

연구보고서

# 크롬 및 그 화합물의 노출기준 개정방향

김승원·피영규·백용준·정태진

산업재해예방  
안전보건공단  
산업안전보건연구원





# 제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “크롬 및 그 화합물의 노출기준 개정방향”의 최종 보고서로 제출합니다.

2022년 10월

## 연구진

연구기관 : 계명대학교 산학협력단

연구책임자 : 김승원 (교수, 계명대학교)

연구원 : 피영규 (교수, 대구한의대학교)

연구원 : 백용준 (대표이사, 사랑작업환경연구소)

연구원 : 정태진 (대표이사, EHS프렌즈)



# 요약문

- 연구기간 2022년 04월 ~ 2022년 10월
- 핵심단어 총크롬, 6가 크롬, 3가 크롬, 비수용성, 수용성, 무기화합물
- 연구과제명 크롬 및 그 화합물의 노출기준 개정방향

## 1. 연구배경

크롬 및 그 무기화합물은 5개(크롬(금속), 크롬(2가)화합물, 크롬(3가)화합물, 크롬(6가)화합물(수용성), 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물))의 노출기준으로 구분되어 있고, 그 외에 개별물질 7종(크로밀 클로라이드, 크롬광 가공(크롬산), 크롬산 연, 삼차부틸크롬산, 크롬산 아연, 스트론튬크로메이트, 갈슘크로메이트)의 노출기준이 따로 설정되어 있다.

우리나라의 크롬 및 그 화합물에 대한 12개의 노출기준은 ACGIH TLV를 준용하여 설정된 것이나, 2018년 기존의 TLV가 통합 및 철회된 이후의 TLV와는 상당 부분이 달라 개정에 대한 검토가 필요하다.

## 2. 주요 연구내용

### 1) 국내외 크롬 및 그 화합물 노출기준 현황

우리나라의 크롬 화합물에 대한 노출기준은 2002년 처음 제정된 이후 2007년 크롬(6가)화합물(불용성) 노출기준을  $0.05 \text{ mg/m}^3$ 에서  $0.01 \text{ mg/m}^3$ 으로 낮추었다. 2008년 스트론튬 크로메이트에 대한 노출기준을  $0.0005 \text{ mg/m}^3$

로 신설하고 2018년 칼슘 크로메이트에 대한 노출기준을 0.001 mg/m<sup>3</sup>로 신설하였다.

미국의 노출기준은 OSHA, NIOSH, ACGIH의 노출기준이 서로 크게 상이하다. 우리나라와 달리 크롬(6가)화합물을 수용성과 불용성으로 구분하지 않으며, NIOSH와 ACGIH는 크롬광 가공(크롬산) 및 크롬산 아연 등의 크롬산 화합물을 크롬(6가)화합물로 취급한다. 크롬(6가)화합물에 대해서는 낮은 노출기준(OSHA는 0.005 mg/m<sup>3</sup>, NIOSH와 ACGIH는 0.0002 mg/m<sup>3</sup>)을 적용하지만 크롬(2가) 및 크롬(3가) 화합물에 대해서는 국내와 동일한 0.5 mg/m<sup>3</sup>의 노출기준을 적용한다. ACGIH는 STEL 농도를 제시하고 있다.

영국, 일본, 프랑스 등도 크롬(6가)화합물을 수용성과 불용성으로 구분하지 않지만 상황에 따라 차등적용하는 2중 노출기준을 가지고 있다. 노출기준의 수준은 우리나라와 유사하다. 독일의 경우 크롬(2가)화합물을 제외한 나머지 물질들에 대해 노출기준을 설정하지 않고 사용자제 권고하고 있다.

## 2) 크롬 및 그 화합물의 독성 및 노출기준 설정근거

### 크롬 3가

- 동물실험: 0.5 mg/m<sup>3</sup> 미만의 단기 노출 수준에서 병태생리학적 중요성의 변화 없음. 염기성 황산크롬(III)은 가장 낮은 노출 수준인 3.0 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>에서 염증성 폐 변화
- Huvinen et al.(1993, 1996, 2002a) 모든 Cr(III) 화합물에 대해 흡입성 입자상 물질로서 0.003 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>의 TLV-TWA 지정
- 폐암 및 피부 자극 자료 충분히 없음

### 크롬광 가공

- 크롬철광 광석(FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)을 페로크롬 합금(ferrochromium alloys) 또

는 크롬산염으로 가공하는 동안 크롬 금속, 크롬산염 및 크롬산염 화합물에 노출될 수 있으므로 가장 독성이 강한 크롬 6가와 노출기준 동일

### 크롬 6가

- ARA(2009): 쥐의 LOAEL을 사용하여 종별 선량계측 모델링(MPPD v2.1)을 사용하여 동일한 일일 예치량에 대한 인간 등가 농도(HEC)를 도출; 인간에 상응하는 LOAEL은 0.0022 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>으로 도출
- Gibb et al.(2000b): CrO<sub>3</sub> 노출 시 비강 및 귀에 대한 영향은 보통 0.010~0.015 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>의 중앙값 노출에 대한 노출이 시작된 후 1개월 이내에 발생
- Lucas and Kramkowski(1975): 0.002~0.020 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> TWA 도금공(chrome platers)에서 코 자극, 점막 위축 및 귀양, 폐기능 감소; 0.002 mg/m<sup>3</sup> 미만 작업자의 4/19(21%)에서 비강 자극 및 점막 위축 징후
- Park et al.(2004), Gibb et al. (2000a): 폐암 사망의 초과 위험은 0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>에 노출된 작업자 1000명당 1명으로 추산; Luippold et al.(2003)의 데이터 Crump et al.(2003) 분석하여 동일한 결과 얻음
- Lindberg & Hedenstierna(1983): "피크" 노출을 조사했을 때 다양한 비강 증상 및 징후에 대한 NOAEL이 0.0002~0.0012 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> 범위에서 관찰
- Huvinen et al.(1993, 2002a, b): 0.0003~0.0005 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> 범위에서 Cr(VI)에 노출된 작업자에 대한 8시간 TWA NOAEL을 제안

### 3) 국내 크롬 제조·취급 사업장 대상 노출 실태조사

용접 사업장 2개소, 도금 사업장 4개소, 스프레이 도장 2개소에서 총크롬과 6가 크롬을 각각 6개 시료를 측정하여 비교하였다. 총크롬 분석법인 ICP로 측정한 결과와 6가 크롬 분석법인 IC로 분석한 결과의 평균을 비교하면 사업장 4만 동일하고 모두 총크롬이 더 많이 평가되었으며, 총크롬은

0.0004~0.0027 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었고, 6가 크롬은 불검출~0.0014 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었다.

#### 4) 크롬 및 그 화합물의 노출기준 개정안

개정안 ①: 6가 크롬의 노출기준을 수용성, 불용성, 크롬광 가공, 그 외 6가 크롬 화합물로 구분하지 않고 통합하여 크롬(6가)화합물(불용성) 수준인 0.01 mg/m<sup>3</sup>으로 노출기준 통합하며, 크롬(금속) 및 크롬(3가)화합물에 대한 노출기준은 크롬(3가)화합물로 통합하고 노출수준은 유지

개정안 ②: 개정안 ①처럼 노출기준을 통합하되 그 수준을 OSHA의 노출기준인 0.005 mg/m<sup>3</sup>으로 낮춘 후 4년의 적용유예기간을 가짐

개정안 ③: 개정안 ①처럼 노출기준을 통합하되 그 수준을 ACGIH의 노출기준인 0.0002 mg/m<sup>3</sup>으로 낮춘 후 5년의 적용유예기간을 가짐

설정 근거: 6가 크롬 화합물의 종류에 상관없이 독성이 동일한 것으로 보고 되고 있음. 건강영향이 없는 수준은 ACGIH TLV 수준인 0.0002 mg/m<sup>3</sup>으로 여러 문헌에서 보고하고 있음. 항공기 부품 페인트 작업처럼 국소배기장치 등의 설치 및 운용이 쉽지 않은 경우에 기술적으로 성취하기 어려울 수 있음. OSHA도 노출기준 개정 후 4년간의 적용유예기간을 가졌으므로 일정기간의 적용유예기간이 권장됨

#### 5) 노출기준 개정안 사회경제성 평가

개정안 ①: 노출기준의 변화가 미미하여 소요되는 비용이 적어지고 편익/비용비가 1보다 커서 개정안 적용에 문제가 없음

개정안 ②: 크롬6가(불용성)를 제외한 모든 시나리오에서 편익/비용비가 1보다 커서 개정안 적용에 큰 문제가 없을 것으로 생각됨

개정안 ③: 모든 시나리오에서 편익/비용비가 1보다 작아서 개정안 적용시 얻을 수 있는 사회적 총편익이 크기 않을 것으로 생각됨

### 3. 연구 활용방안

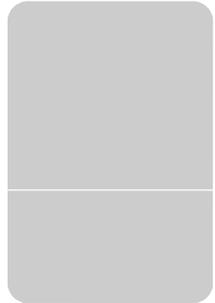
정책적 기대효과: 국내외 노출기준 및 실태조사사업을 통해 수집한 정보를 바탕으로 크롬 및 그 화합물의 노출기준을 개정하여 크롬 노출을 효율적으로 관리하는데 이바지할 수 있다.

기술적 기대효과: 크롬 및 그 화합물에 대한 국내외 노출기준 및 그 설정근거에 대해 정리된 자료를 활용할 수 있고, 실태조사사업을 통해 다양한 업종에 대해 수집된 최신 노출자료를 활용할 수 있다.

### 4. 연락처

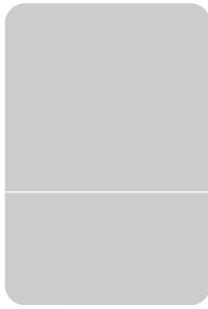
- 연구책임자 : 계명대학교 교수 김승원
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 차장 한정희
  - ☎ 042) 869. 0354
  - E-mail hanjh@kosha.or.kr

크롬 및 그 화합물의 노출기준 개정방향



# 목 차

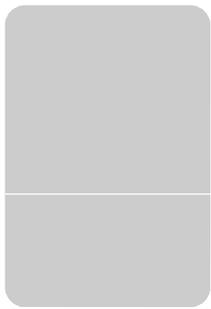
|  |           |
|--|-----------|
| <b>I. 서론</b> .....                           | <b>1</b>  |
| 1. 연구 배경 .....                               | 3         |
| 1) 연구 필요성 .....                              | 3         |
| 2. 연구 목적 .....                               | 4         |
| 3. 관련 선행 연구에 대한 내용 분석 .....                  | 5         |
| 1) 크롬 화합물의 노출기준 .....                        | 5         |
| 2) 국내 크롬 화합물의 노출수준 .....                     | 9         |
| <b>II. 연구방법</b> .....                        | <b>19</b> |
| 1. 연구내용 및 범위 .....                           | 21        |
| 2. 내용별 연구방법 .....                            | 22        |
| 1) 국내외 관련 노출기준 및 독성 등에 대한 문헌조사 및 분석<br>..... | 22        |
| 2) 국내 크롬 제조·취급 사업장 대상 작업자 노출 실태조사 .....      | 22        |
| 3) 크롬 및 그 화합물 노출기준 개정을 위한 사회성·경제성 평가         |           |



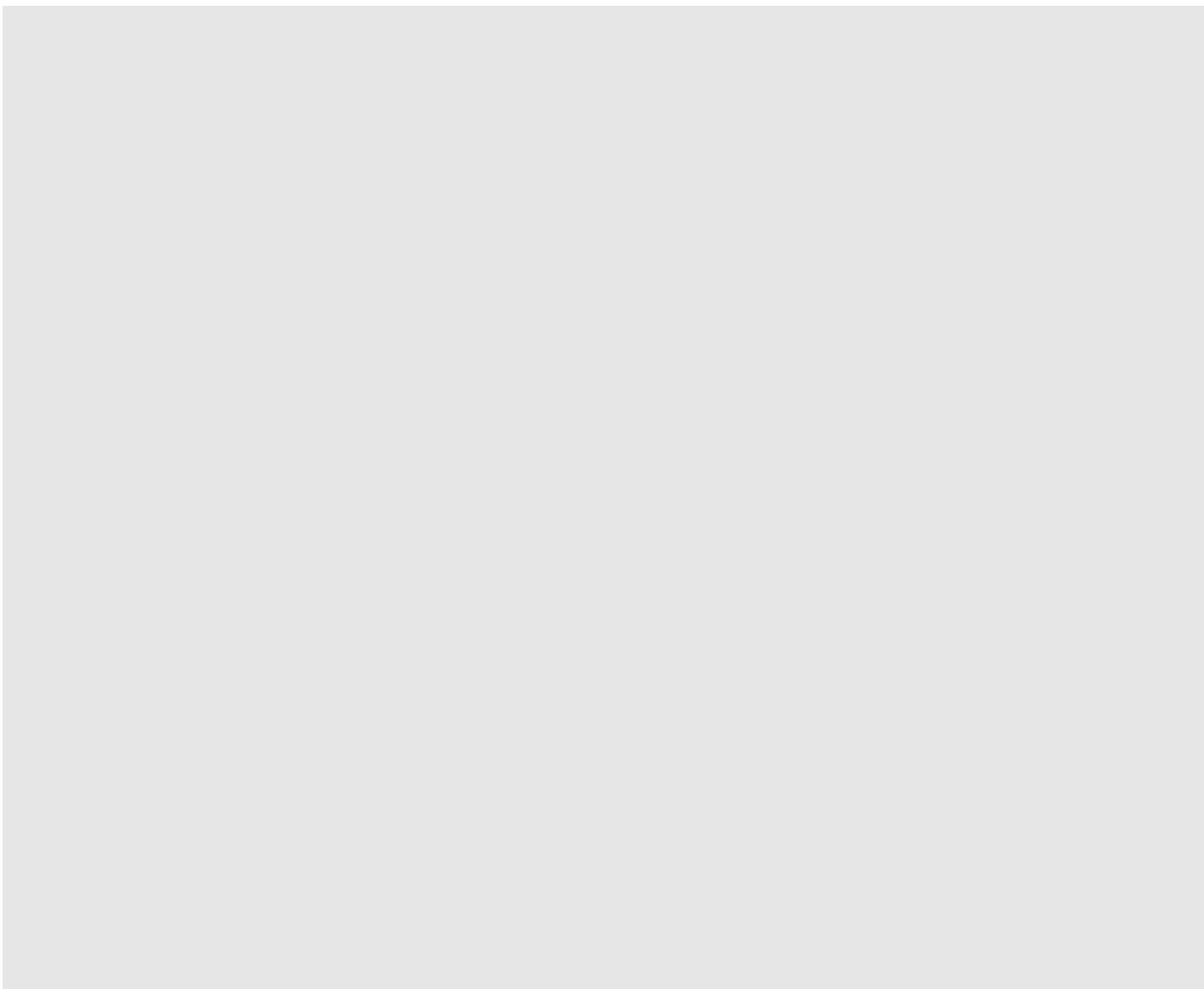
# 목 차

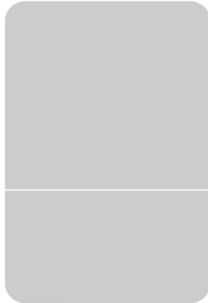
|   |           |
|---|-----------|
| .....   | 34        |
| <b>Ⅲ. 연구 결과 .....</b>                         | <b>37</b> |
| 1. 국내외 노출기준 및 설정근거 .....                      | 39        |
| 1) 주요 국가의 크롬 및 그 화합물 관련 노출기준 .....            | 39        |
| 2) 국내외 크롬 및 그 화합물의 화학물질별 노출기준 .....           | 60        |
| 3) 크롬 및 그 화합물에 대한 독성학적 고찰 .....               | 79        |
| 4) 크롬 및 무기화합물에 대한 Documentation of TLVs ..... | 103       |
| 5) 6가 크롬에 대한 OSHA PEL 설정 근거 .....             | 139       |
| 6) 소결 .....                                   | 184       |
| 2. 국내 크롬 및 그 화합물 측정자료 분석 .....                | 185       |
| 1) 안전보건공단 측정자료 분석 .....                       | 185       |
| 2) 문헌에 나타난 노출수준 검토 .....                      | 193       |
| 3. 국내 크롬 및 그 화합물 노출실태조사 .....                 | 200       |
| 1) 6가 크롬의 ICP분석결과와 IC분석결과의 비교 .....           | 200       |
| 2) 실태조사 결과 .....                              | 205       |
| 4. 국내 크롬 및 그 화합물 노출기준 개정안 .....               | 207       |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 1) 노출기준 개정안 .....          | 207        |
| 2) 노출기준 설정 근거 및 고려사항 ..... | 209        |
| 6. 사회경제성 평가 .....          | 212        |
| 1) 규제영향 분석 절차 및 내용 .....   | 212        |
| 2) 규제영향 평가 결과 .....        | 212        |
| <b>참고문헌 .....</b>          | <b>249</b> |
| <b>Abstract .....</b>      | <b>253</b> |
| <b>부록 .....</b>            | <b>257</b> |



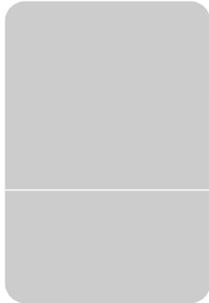
# 목 차





# 표 목차

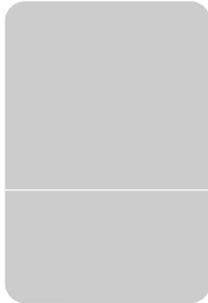
|  |    |
|--|----|
| 〈표 I-1〉 개정된 ACGIH 크롬 노출기준(2018) .....                | 3  |
| 〈표 II-1〉 연구내용 및 범위 .....                             | 21 |
| 〈표 II-2〉 실태조사 연구계획 .....                             | 23 |
| 〈표 II-3〉 크롬 및 그 화합물의 시료채취매체 및 분석법 .....              | 24 |
| 〈표 II-4〉 이온크로마토그래피-전도도검출기 분석조건 .....                 | 30 |
| 〈표 II-5〉 이온크로마토그래피-분광검출기 분석조건 .....                  | 30 |
| 〈표 II-6〉 고성능액체크로마토그래피-분광검출기 분석조건 .....               | 31 |
| 〈표 III-1〉 우리나라 크롬 및 그 화합물의 노출기준(2002) .....          | 39 |
| 〈표 III-2〉 우리나라 크롬 및 그 화합물의 노출기준(2007) .....          | 41 |
| 〈표 III-3〉 우리나라 크롬 및 그 화합물의 노출기준(2008) .....          | 42 |
| 〈표 III-4〉 현행 우리나라 크롬 및 그 화합물의 노출기준 .....             | 45 |
| 〈표 III-5〉 크롬 및 그 화합물의 OSHA PELs .....                | 48 |
| 〈표 III-6〉 크롬 및 그 화합물의 NIOSH RELs .....               | 49 |
| 〈표 III-7〉 크롬 및 그 화합물의 ACGIH TLVs .....               | 51 |
| 〈표 III-8〉 크롬 및 그 화합물 관련 ACGIH TLVs에서 철회된 물질<br>..... | 52 |
| 〈표 III-9〉 크롬 및 그 화합물의 영국 WELs .....                  | 54 |
| 〈표 III-10〉 크롬 및 그 화합물에 대한 일본의 관리농도 .....             | 55 |
| 〈표 III-11〉 크롬 및 그 화합물의 일본 ROELs .....                | 56 |
| 〈표 III-12〉 크롬 및 그 화합물의 독일 MAKs .....                 | 57 |
| 〈표 III-13〉 크롬 및 그 화합물의 프랑스 VLEPs .....               | 59 |



## 표 목차

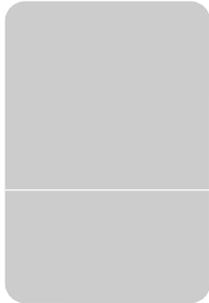
|  |    |
|--|----|
| 〈표 III-14〉 크롬 및 그 화합물의 노출기준 정보 .....   | 60 |
| 〈표 III-15〉 크롬(금속) / Chromite ore processing(Chromate) .....                                      | 62 |
| 〈표 III-16〉 크롬(금속) / Chromium, metal[7440-47-3] .....   | 63 |
| 〈표 III-17〉 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물) / Chromium(VI) compounds,<br>insoluble [7429-90-5] .....          | 64 |
| 〈표 III-18〉 크롬(6가)화합물(수용성) / Chromium(VI) compounds,<br>water-soluble compounds [7440-47-3] ..... | 65 |
| 〈표 III-19〉 크롬산 연 / Lead chromate(as Cr) [7758-97-6] .....  | 66 |
| 〈표 III-20〉 크롬산 연 / Lead chromate(as Pb) [7784-40-9] .....  | 67 |
| 〈표 III-21〉 크롬산 아연 / Zinc chromates(as Cr) [13530-65-9]<br>.....                                  | 68 |
| 〈표 III-22〉 크롬(2가)화합물 / Chromium(II) compounds (as Cr)[22541-79-3]<br>.....                       | 70 |
| 〈표 III-23〉 크롬(2가)화합물 / Chromium(II) compounds (as Cr)[7440-47-3]<br>.....                        | 70 |
| 〈표 III-24〉 크롬(3가)화합물 / Chromium(III)compounds, as Cr [16065-83-1]<br>.....                       | 73 |
| 〈표 III-25〉 삼차부틸크롬산 / (tert-Butyl chromate, as CrO <sub>3</sub> ) [1189-85-1]<br>.....            | 74 |
| 〈표 III-26〉 스트로튬티움크로메이트 / Strontium chromate(as Cr) [7789-06-2]<br>.....                          | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| 〈표 Ⅲ-27〉 칼슘크로메이트 / Calcium chromate [13765-19-10]  | 77  |
| 〈표 Ⅲ-28〉 작업환경측정 결과(2019-2021년)의 분포                 | 185 |
| 〈표 Ⅲ-29〉 용접공정(‘용접’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수      | 186 |
| 〈표 Ⅲ-30〉 용접공정(‘사상’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수      | 186 |
| 〈표 Ⅲ-31〉 용접공정(‘배관’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수      | 186 |
| 〈표 Ⅲ-32〉 도금공정(‘도금’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수      | 187 |
| 〈표 Ⅲ-33〉 도장공정(‘도장’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수      | 187 |
| 〈표 Ⅲ-34〉 미분류 공정(용접, 도금, 도장 공정이 아닌 분류)에서 유해물질별 측정건수 | 188 |
| 〈표 Ⅲ-35〉 유해물질 분류코드별 측정건수                           | 188 |
| 〈표 Ⅲ-36〉 실태조사 사업장 현황                               | 200 |
| 〈표 Ⅲ-37〉 용접사업장 실태조사 결과                             | 201 |
| 〈표 Ⅲ-38〉 도금사업장 실태조사 결과                             | 203 |
| 〈표 Ⅲ-39〉 페인트도장사업장 실태조사 결과                          | 204 |
| 〈표 Ⅲ-40〉 사업장별 크롬 평균 농도                             | 205 |



## 표 목차

|  |     |
|--|-----|
| 〈표 III-41〉 크롬 및 그 화합물 노출기준 개정안 .....   | 207 |
| 〈표 III-42〉 6가 크롬 노출기준 개정안 실태조사 적용 시 노출기준 초과비율<br>.....                               | 211 |
| 〈표 III-43〉 개정안에 따른 규제영향평가 필요여부 .....   | 213 |
| 〈표 III-44〉 비용항목과 관련된 산업안전보건법 조항 .....  | 214 |
| 〈표 III-45〉 노출기준 강화로 인한 초과 사업장수(추정) .....   | 216 |
| 〈표 III-46〉 사업장당 비용 환산(분석기간 30년) .....  | 217 |
| 〈표 III-47〉 크롬 및 그 화합물 형태별 노출 인구수 .....   | 219 |
| 〈표 III-48〉 VSL의 미래시점 환산 .....  | 220 |
| 〈표 III-49〉 WTP의 미래시점 환산 .....  | 221 |
| 〈표 III-50〉 시나리오별 사회적 총비용(분석기간 30년) .....   | 223 |
| 〈표 III-51〉 Expected Excess Lung Cancer Deaths per 1,000<br>Workers(OSHA, 2006) ..... | 228 |
| 〈표 III-52〉 분석기간 30년에 해당하는 초과발암위해도 예측 .....   | 229 |
| 〈표 III-53〉 현재 및 개정안에 따른 초과발암위해도 예측 .....   | 230 |
| 〈표 III-54〉 VSL로 추정한 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 5.5%) ..                                   | 233 |
| 〈표 III-55〉 VSL로 추정한 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 3%) .....                                  | 235 |
| 〈표 III-56〉 WTP로 추정한 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 5.5%) ·                                    | 238 |
| 〈표 III-57〉 WTP로 추정한 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 3%) .....                                  | 241 |
| 〈표 III-58〉 사회적 비용-편익 비교(분석기간 30년) .....  | 246 |



## 그림목차

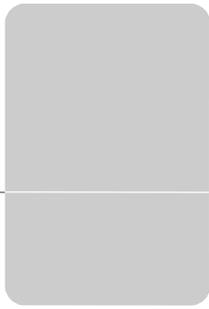
|  |     |
|--|-----|
| [그림 Ⅰ-1] 우리나라와 ACGIH의 크롬 화합물 노출기준 비교 .....             | 5   |
| [그림 Ⅰ-2] 크롬 화합물별 측정횟수 및 비율 .....                       | 10  |
| [그림 Ⅰ-3] 크롬 화합물별 측정횟수 변화 비교 .....                      | 11  |
| [그림 Ⅰ-4] 크롬 화합물별 측정농도 수준 비교 .....                      | 13  |
| [그림 Ⅰ-5] 6가 크롬 화합물(불용성 무기화합물) 노출수준 분포의 연도별 변화 추이 ..... | 14  |
| [그림 Ⅰ-6] 6가 크롬 화합물(수용성 무기화합물) 노출수준 분포의 연도별 변화 추이 ..... | 15  |
| [그림 Ⅰ-7] 크롬 3가 화합물 노출수준 분포의 연도별 변화 추이 .....            | 16  |
| [그림 Ⅰ-8] 크롬 취급 공정별 노출수준 비교 .....                       | 17  |
| [그림 Ⅱ-1] 사회·경제성 평가 절차 .....                            | 35  |
| [그림 Ⅲ-1] 투입 에너지 수준별 총크롬 중 6가 크롬 함량 변화 .....            | 194 |
| [그림 Ⅲ-2] 크롬 화합물의 노출기준 선정 계통도 .....                     | 196 |
| [그림 Ⅲ-3] 크롬 및 그 화합물의 용해도 특성 .....                      | 197 |
| [그림 Ⅲ-4] 전체, 금속, 크롬 유소건자 트렌드 .....                     | 199 |
| [그림 Ⅲ-5] 농도수준별 초과발암위해도 다항방정식 .....                     | 231 |



# I. 서론







# I. 서론

## 1. 연구 배경

### 1) 연구 필요성

○ 크롬 및 그 무기화합물은 5개의 노출기준(크롬(금속), 크롬(2가)화합물, 크롬(3가)화합물, 크롬(6가)화합물(수용성), 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물))으로 구분되어 있고, 그 외에 개별물질 7종(크로밀 클로라이드, 크롬광 가공(크롬산), 크롬산 연, 삼차부틸크롬산, 크롬산 아연, 스트론튬 크로메이트, 칼슘 크로메이트)의 노출기준이 따로 설정되어 있다.

○ 우리나라의 유해인자 노출기준은 ACGIH TLV를 준용하여 제·개정되어 왔으나, 현재 일부 물질에 대한 노출기준에 차이가 있다. 크롬 및 그 화합물에 대한 12개의 노출기준은 ACGIH TLV를 준용하여 설정된 것이나, 2018년 기존의 TLV가 통합 및 철회된 이후의 TLV\*와는 상당 부분이 달라 개정에 대한 검토가 필요하다.

〈표 1-1〉 개정된 ACGIH 크롬 노출기준(2018)

| 물질명                                      | TWA<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL<br>(mg/m <sup>3</sup> ) |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| Metallic chromium, as Cr(0)              | 0.5 (I)                     | -                            |
| Chromium(II) compounds                   | 삭제                          |                              |
| Trivalent chromium compounds, as Cr(III) | 0.003 (I)                   | -                            |
| Water-soluble chromium(VI) compounds     | 0.0002 (I)                  | 0.0005 (I)                   |
| Insoluble chromium(VI) compounds         |                             |                              |

|   |  |                 |
|---|--|-----------------|
| Chromyl chloride, as Cr(VI)                   | 0.0002<br>(IFV)                                | 0.0005<br>(IFV) |
| Chromite ore processing                       | hexavalent and trivalent chromium compounds 참고 |                 |
| Lead chromate, as Cr(VI)<br>* as Pb의 노출기준은 삭제 | 0.0002   | 0.0005          |
| Zinc chromate                                 | 삭제   |                 |
| Strontium chromate                            | 삭제   |                 |
| Calcium chromate                              | 삭제   |                 |

(I) inhalable particulate matter, (IFV) inhalable fraction and vapor

우리나라에서 2013-2019년에 크로밀 클로라이드, 갈슘 크로메이트, 삼차부틸 크롬산은 한번도 측정되지 않고 있다.

## 2. 연구 목적

- 1) 크롬 및 그 화합물에 대한 국내외 노출기준 설정현황을 비교한다.
- 2) 국내 크롬 및 그 화합물 노출현황 및 실태를 파악한다.
- 3) 국내 크롬 및 그 화합물의 사회경제적 영향 분석을 통한 개정(안)을 제시한다

### 3. 관련 선행 연구에 대한 내용 분석

#### 1) 크롬 화합물의 노출기준

##### (1) 국내 현황

박정임 등(2020)이 보고한 크롬 및 그 화합물 노출기준 관련 국내외 현황은 다음과 같다.

| 우리나라         |  |                              | ACGIH  |   |  |
|--------------|--|------------------------------|--|---|--|
| 노출기준<br>일련번호 | 구분   | 노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | TLV 구분/<br>적용범위                                    | TLV<br>(mg/m <sup>3</sup> )   | note   |
| 538          | 크롬(금속)/Chromium<br>(Metal)   | 0.5                          | Metallic<br>Chromium,<br>Cr(0)                     | 0.5(inhala-<br>ble)   |  |
| 539          | 크롬(6가)화합물<br>(불용성 무기화합물)<br>Chromium(VI)compound<br>s (Water insoluble<br>inorganic compounds) | 0.01                         | Hexavalent<br>Chromium<br>compounds,<br>Cr(VI)     | 0.0002(TW<br>A,<br>inhalable)   | RSEN,<br>DSEN,<br>Skin(wat-<br>er<br>soluble<br>only)<br>A1                |
| 540          | 크롬(6가)화합물(수용성)<br>Chromium(VI)compounds<br>(Water soluble)                                     | 0.05                         |  | 0.0005<br>(STEL,<br>inhalable)  |  |
| 545          | 크롬(3가)화합물/<br>Chromium(Ⅲ)compounds   | 0.5                          | Trivalent<br>Chromium<br>compounds,<br>Cr(Ⅲ)       | 0.003(inhal-<br>able)   | RSEN(wa-<br>ter<br>soluble<br>only)<br>DSEN(wa-<br>ter<br>soluble<br>only) |
| 535          | 크로밀 클로라이드/<br>Chromyl chloride   | 0.025<br>ppm                 | Chromyl<br>Chloride <sup>25)</sup><br>[14977-61-8] | 0.0002<br>(TWA,<br>inhalable,<br>as Cr(VI))<br><br>0.0005(ST<br>EL,<br>inhalable,<br>as Cr(VI)) | RSEN,<br>DSEN,<br>Skin,<br>A1  |

| 우리나라         |   |                              | ACGIH   |   |   |
|--------------|---|------------------------------|---|---|---|
| 노출기준<br>일련번호 | 구분  | 노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | TLV 구분/<br>적용범위   | TLV<br>(mg/m <sup>3</sup> )   | note  |
| 537          | 크롬광가공(크롬산)/<br>Chromite ore<br>processing(Chromate) | 0.05                         | Chromite<br>Ore<br>Processing   | See hexav<br>alent and<br>trivalent<br>chromium<br>compounds                                    |   |
| 541          | 크롬산 연/Lead<br>chromate                              | 0.012                        | Lead<br>chromate<br>[7758-97-6]<br>as Cr(VI),<br>2017<br><br>Cr(VI)<br>compounds<br>목록에<br>포함됨(TLV<br>Documentati<br>on, Table 1) | 0.0002<br>(TWA,<br>inhalable,<br>as Cr(VI))<br><br>0.0005<br>(STEL,<br>inhalable,<br>as Cr(VI)) | RSEN,<br>DSEN,<br>A1;<br>BEI<br><br>별도의<br>TLV<br>documen<br>tation |
| 543          | 크롬산 아연/Zinc<br>chromates                            | 0.012                        | Cr(VI)<br>compounds<br>목록에<br>포함됨(TLV<br>Documentati<br>on, Table 1)  | 0.0002<br>(TWA,<br>inhalable)   | RSEN,<br>DSEN,<br>A1  |
| 327          | 스트론튬 크로메이트/<br>Strontium chromate                   | 0.0005                       |   |   |   |
| 523          | 칼슘 크로메이트/<br>Calcium chromate                       | 0.001                        |   |   |   |
| 289          | 삼차부틸크롬산/tert-Butyl<br>chromate                      | 0.1(C)                       | tert-Butyl<br>chromate,<br>as CrO3<br>[1189-85-1],<br>1960  | 0.1(C)  |   |
| 544          | 크롬(2가)화합물/<br>Chromium( II )compounds               | 0.5                          | None  |   |   |

[그림 1-1] 우리나라와 ACGIH의 크롬 화합물 노출기준 비교

## (2) TLV 설정 근거

금속 크롬과 크롬 화합물의 범위는 매우 다양하다. 원자가(0, +3, +6)에 따라 그 독성과 발암성에 차이가 크기 때문에 그 내용을 원자가 별로 섹션을 나누어 서류화하였다. 크롬산 연(lead chromate)은 6가 크롬으로 분류되지만 별도의 documentation을 두었다. 크롬의 원자가는 학문적으로는 -4, -2부터 +6까지 다양하게 존재할 수 있다. 그러나 일반적으로 금속 크롬[free metal Cr(0)], 크롬 3가인 크롬염(chromic salts), 6가 크롬인 크롬산(chromates)과 디크롬산(dichromates)이 산업적인 용도로 쓰이기 때문에 전술한 3가지 원자가에 대한 화합물만 포함한다.

## 가) Metallic Chromium, Cr(0)

- TLV basis: Respiratory tract irritation
- 금속크롬, 크롬-철화합물 및 크롬을 함유한 합금을 생산하거나 사용하는 과정에서 노출될 수 있다.
- 크롬 3가 또는 6가 크롬이 동시에 존재하는 경우에는 크롬 3가 또는 6가 크롬 기준을 적용하여야 한다.
- 상기도 및 하기도에 자극을 줄 수 있으나, 발암성의 증거는 없다.
- 1931년 이후 지금까지 0.5 mg/m<sup>3</sup> 기준을 적용하고 있다. 다만 inhalable particulate matter 표시만 추가되었다.

## 나) Trivalent Chromium Compounds, 크롬 3가

- TLV basis: Respiratory tract irritation, Asthma
- 크롬 3가 화합물은 수동화산 또는 phagocytosis에 의해 세포벽을 통과하여, 세포 안으로 천천히 소량 들어간다. 그러나, 일단 세포 안으로 들어가면

밖으로 나오는 것도 매우 천천히 일어나기 때문에, 결국 세포 안에 축적되어 독성을 유발할 수 있다(크롬 3가의 세포 내 주요 노출원은 6가 크롬이 환원되는 것이다).

#### 다) Trivalent Chromium Compounds, 크롬 3가

· TLV basis: Respiratory tract irritation, Asthma, Lung cancer, Sinonasal cancer

· Chromium trioxide, chromic acid, chromates, dichromates, polychromates 등이 포함된다.

· Water-soluble 6가 크롬은 피부와 점막에 매우 자극성이 있다(highly irritating). 따라서 피부와 기도 sensitization을 유발할 수 있다. 6가 크롬의 심각한 부식성 때문에 피부궤양(chrome holes), 구강궤양, 비염, 비중격 천공 등이 생길 수 있다.

· 6가 크롬의 발암성은 여러 연구(동물실험 및 역학연구)에서 확인되었다.

· 6가 크롬은 피부나 점막을 통과하여 크롬 3가로 쉽게 환원되는데, Cr(III)-protein 반응으로 면역반응을 유발한다. 천식, 알러지 피부염을 일으킬 수 있다. 이 때문에 DSEN, RSEN 표기를 부여하였다.

· 수용성인 6가 크롬 화합물의 경우 피부 투과성이 더 좋고, 전신독성을 유발할 수 있으므로, 수용성 6가 크롬 화합물에 대해서는 Skin notation을 표기하였다. 수용성 6가 크롬 화합물에 노출된 경우 소변 중 6가 크롬 농도가 증가하므로 BEI를 확인한다.

#### 라) Chromyl Chloride

· 6가 크롬 화합물이지만, 다른 화합물과 달리 상온에서 액체로 존재한다.

· 강력한 산화제로 물과 반응하여 불용성의 6가 크롬 oxide를 발생시킨다.

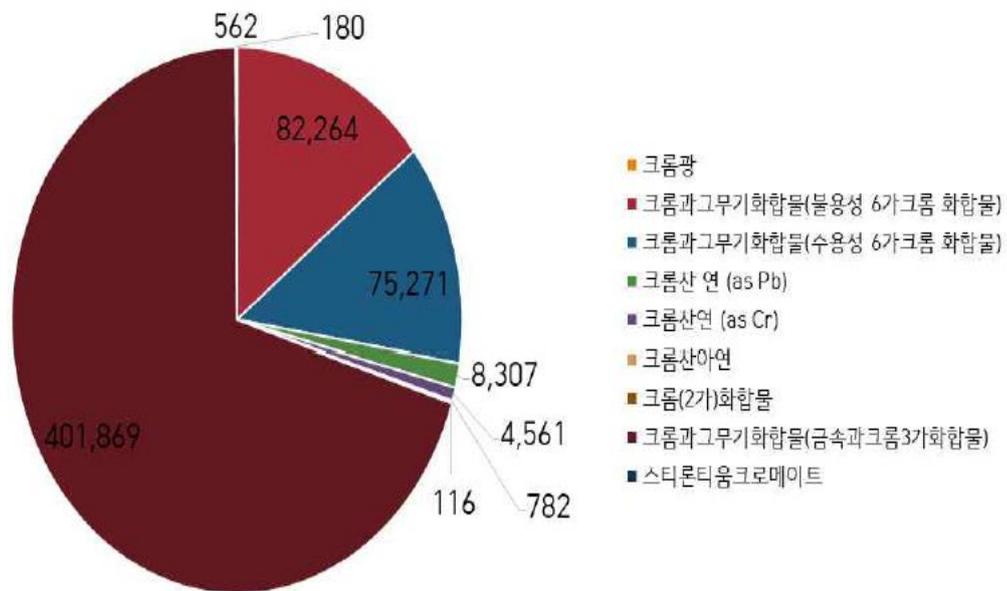
- 호흡뿐 아니라 액체 및 기체상일 때 피부접촉을 통한 노출도 주요한 경로이다.

마) Chromite Ore Processing

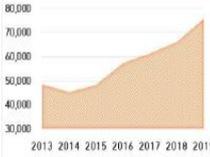
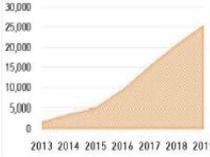
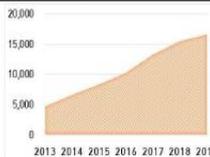
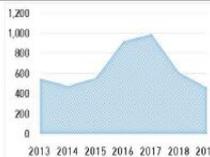
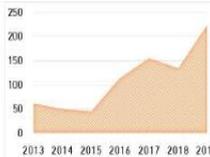
- 금속크롬, 크롬 3가, 6가 크롬에 모두 노출될 가능성이 있다.
- 따라서 6가 크롬 화합물에 의한 건강영향이 가장 주요하게 평가되어야 한다. 6가 크롬 화합물이 존재하지 않는 경우(no detectable exposure to Cr(VI))에만 크롬 3가 노출기준을 적용할 수 있다.

## 2) 국내 크롬 화합물의 노출수준

박정임 등(2020)이 보고한 크롬 및 그 화합물 노출기준 관련 국내 측정횟수(2013~2019년)는 다음과 같다. 크롬 및 그 무기화합물의 노출기준 분류는 총 12가지로, 용해도, 산화수(oxidation number) 등에 따라 다양하다. 하지만, 크롬의 측정횟수는 크롬 3가와 6가 크롬(수용성 및 불용성)가 대부분이었다(85.6%). 크롬 3가, 6가 크롬(수용성 & 불용성), 크롬산 연(as Cr)의 연도별 추세는 증가하고 있다. 크롬산 연(as Cr)은 2013년부터 2017년까지 증가하다가 2018년부터 다시 감소하는 경향을 보인다. 크로밀 클로라이드, 칼슘 크로메이트 삼차부틸크롬산은 7년간 한번도 측정되지 않았다.



[그림 1-2] 크롬 화합물별 측정횟수 및 비율(박정임 등, 2020)

| 번호    | 물질명                      | 측정빈도<br>총합(%) | 연도별 측정빈도 |        |        |        |        |        |        | Yearly trend  |
|-------|--------------------------|---------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
|       |                          |               | 2013     | 2014   | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | 2019   |   |
| 1     | 크롬(3가)화합물                | 401,869(71.1) | 48,377   | 45,111 | 48,207 | 57,316 | 61,162 | 65,951 | 75,745 |    |
| 2     | 크롬(6가)화합물<br>(불용성 무기화합물) | 82,264(14.5)  | 1,882    | 3,778  | 5,104  | 9,518  | 15,541 | 20,794 | 25,647 |    |
| 3     | 크롬(6가)화합물<br>(수용성)       | 75,271(13.3)  | 4,718    | 6,573  | 8,313  | 10,235 | 13,303 | 15,529 | 16,600 |   |
| 4     | 크롬산 연(as Cr)             | 4,561(0.81)   | 550      | 475    | 555    | 922    | 991    | 611    | 457    |  |
| 5     | 크롬산 아연                   | 782(0.14)     | 61       | 50     | 45     | 114    | 155    | 134    | 223    |  |
| 6     | 스티론티움크로메이트               | 562(0.10)     | 135      | 40     | 41     | 65     | 126    | 79     | 76     | Trend 없음  |
| 7     | 크롬광가공(크롬산)               | 180(0.03)     | 15       | 14     | 6      | 33     | 33     | 44     | 35     | Trend 없음  |
| 8     | 크롬(2가)화합물                | 116(0.02)     | 14       | 13     | 11     | 12     | 42     | 14     | 10     | Trend 없음  |
| Total |                          | 573,912(100)  |          |        |        |        |        |        |        |   |

[그림 1-3] 크롬화합물별 측정횟수 변화 비교(박정임 등, 2020)

크롬의 노출수준은 다음과 같다. 측정된 크롬 화합물 중 노출기준을 초과한 물질은 3가, 6가 불용성, 6가 수용성, 크롬산 연(as Cr)이었으며, 초과된 횟수는 각각 28건(28/401,869건), 9건(9/82,264건), 5건(5/75,271건), 4건(4/4,561건)이었다. 크롬 3가 화합물 중 38.6%(155,154건)가 불검출이었으며, 61%(246,687건)가 검출한계 이상~노출기준미만으로 측정되었다. 크롬 3가 화합물의 노출 수준은 검출한계 이상~ 노출기준의 1/100 수준이 217,182건(54%)으로 가장 많았으며, 노출기준의 1/100~ 노출기준의 1/10 등 순이었다. 6가 크롬 화합물은 용해도와 상관없이 비슷한 빈도로 측정되었으며, 불검출된 건수도 각각 75%, 63%로 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 검출한계 이상의 노출 수준의 분포를 보았을 때, 용해도에 따라 농도 수준에 차이가 있음을 알 수 있었다. 불검출을 제외하고, 불용성과 수용성화합물에서 가장 낮은 빈도로 측정된 농도 수준은 각각 노출기준의 1/100~노출기준의 1/10 수준(13,845건), 검출한계 이상~ 노출기준의 1/100 수준(14,996건)이었다. 같은 6가 화합물임에도 불용성이 수용성보다 더 높은 농도 분포임을 알 수 있었다. 대부분의 금속화합물 노출 수준은 불검출이 가장 많으며, 농도 수준이 높아질수록 빈도는 줄어드는 경향이 있었다. 크롬의 경우 이러한 경향과 다르게, 노출기준의 1/100~노출기준의 1/10 수준이 가장 많은 빈도를 나타낸 물질이 많았다. 6가 크롬 불용성화합물, 크롬산 연(as Cr), 크롬산 아연, 크롬광가공(크롬산)이 그 예이다.

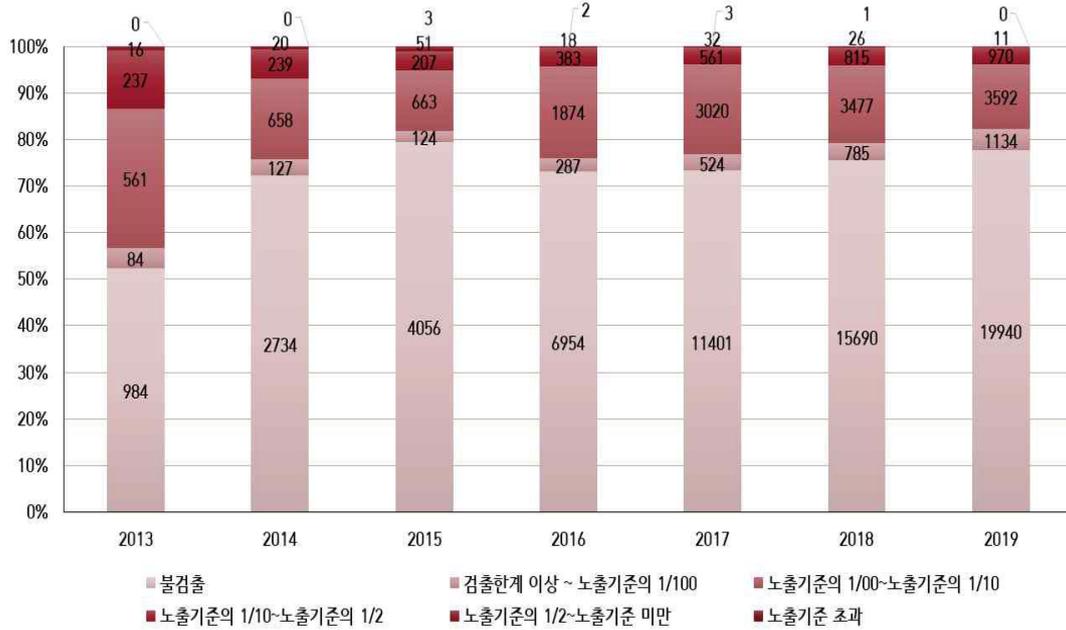
| 구분                       | 측정횟수(n) | 측정농도(TWA) 분포(n) |                         |                            |                          |                    |            |            |
|--------------------------|---------|-----------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|------------|
|                          |         | 불검출             | 검출한계 이상~<br>노출기준의 1/100 | 노출기준의 1/100~<br>노출기준의 1/10 | 노출기준의 1/10~<br>노출기준의 1/2 | 노출기준의 1/2<br>~노출기준 | 노출기준<br>미만 | 노출기준<br>초과 |
| 크롬(3가)화합물                | 401,869 | 155,154         | 217,182                 | 27,701                     | 1,714                    | 90                 | 401,841    | 28         |
| 크롬(6가)화합물(불<br>용성 무기화합물) | 82,264  | 61,759          | 3,065                   | 13,845                     | 3,412                    | 174                | 82,255     | 9          |
| 크롬(6가)화합물<br>(수용성)       | 75,271  | 47,677          | 14,996                  | 10,894                     | 1,625                    | 74                 | 75,266     | 5          |
| 크롬산 연(as Cr)             | 4,561   | 1,911           | 332                     | 1,505                      | 722                      | 87                 | 4,557      | 4          |
| 크롬산 아연                   | 782     | 445             | 17                      | 192                        | 111                      | 7                  | 0          | 0          |

| 구분             | 측정횟수(n) | 측정농도(TWA) 분포(n) |                         |                            |                          |                    |            |            |
|----------------|---------|-----------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|------------|
|                |         | 불검출             | 검출한계 이상~<br>노출기준의 1/100 | 노출기준의 1/100~<br>노출기준의 1/10 | 노출기준의 1/10~<br>노출기준의 1/2 | 노출기준의 1/2<br>~노출기준 | 노출기준<br>미만 | 노출기준<br>초과 |
| 스티론티움<br>크로메이트 | 562     | 352             | 0                       | 76                         | 134                      | 0                  | 562        | 0          |
| 크롬광가공(크롬산)     | 180     | 30              | 26                      | 92                         | 32                       | 0                  | 180        | 0          |
| 크롬(2가)화합물      | 116     | 45              | 68                      | 3                          | 0                        | 0                  | 116        | 0          |

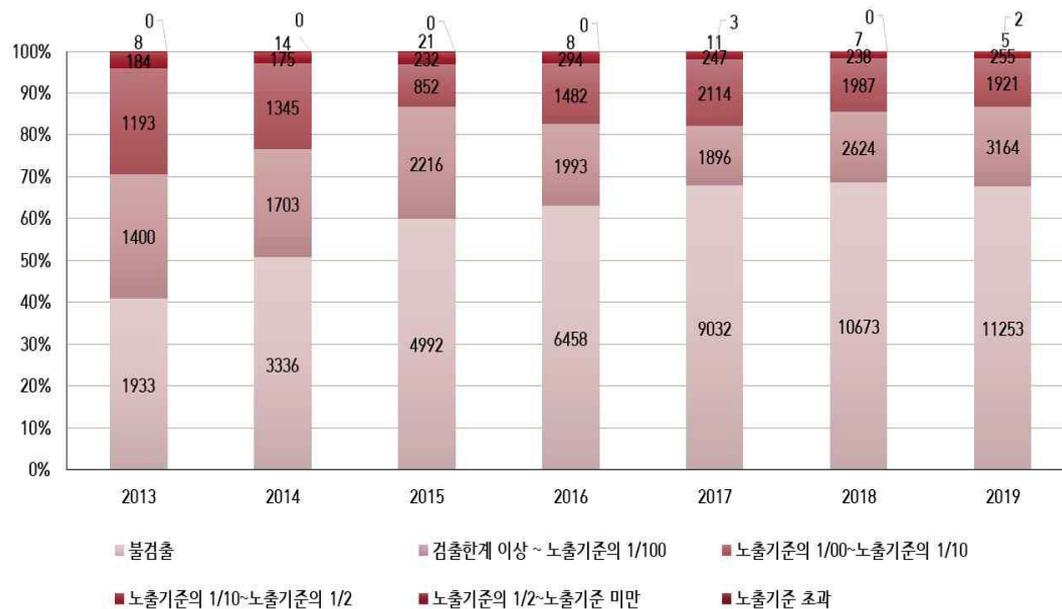
[그림 1-4] 크롬 화합물별 측정농도 수준 비교(박정임 등, 2020)

6가 크롬 화합물(불용성 무기화합물)은 2013년에 불검출된 경우가 약 50% 이었으며, 2014년 이후로 대폭 증가하여, 70% 이상을 유지하였다.



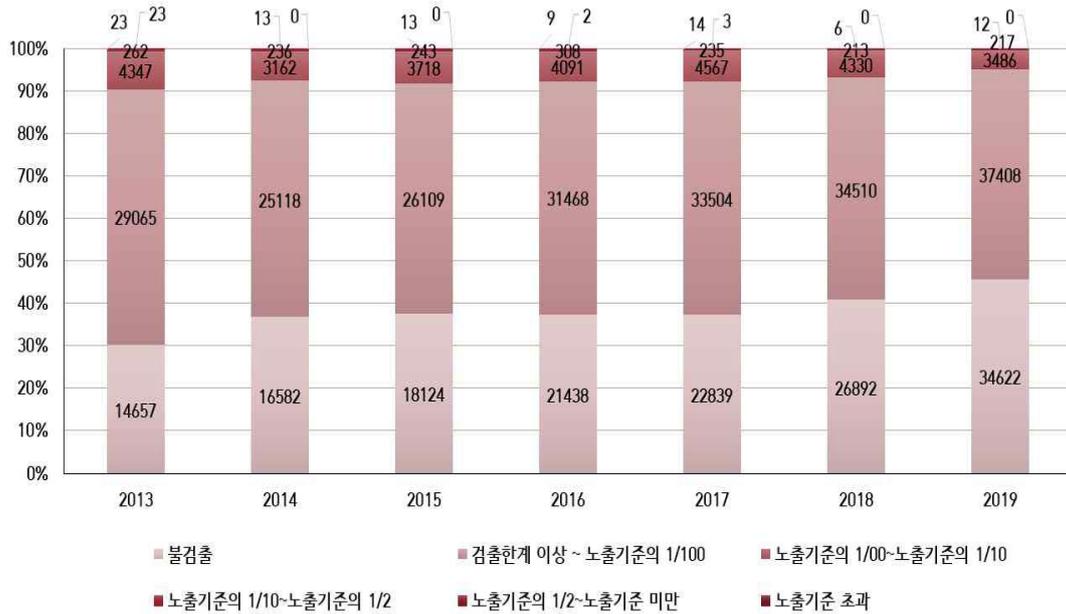
[그림 1-5] 6가 크롬 화합물(불용성 무기화합물) 노출수준 분포의 연도별 변화 추이(박정임 등, 2020)

6가 크롬 화합물(수용성)은 매년 불검출되는 경우가 늘어났다. 검출한계 이상~노출기준의 1/100 수준은 더 매년 감소하는 경향을 보였다.



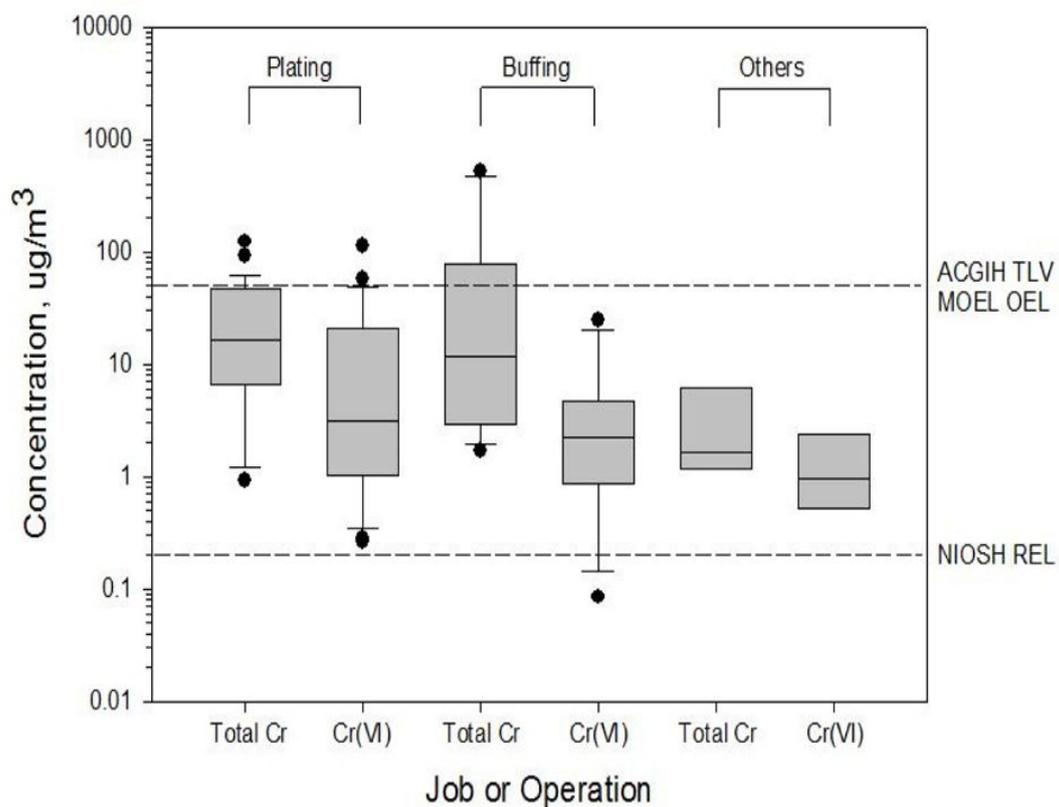
[그림 1-6] 6가 크롬 화합물(수용성 무기화합물) 노출수준 분포의 연도별 변화 추이(박정임 등, 2020)

크롬 3가 화합물은 연도별로 불검출된 값이 증가하고 있었으며, 검출한계 이상~노출기준의 1/100 수준은 감소하는 경향이 있었다.



[그림 1-7] 크롬 3가 화합물 노출수준 분포의 연도별 변화 추이(박정임 등, 2020)

이광용 등(2015)은 크롬 도금 사업장에서 근로자의 업무 및 사업장별 공기 중크롬 노출 농도 특성을 보고하였다. 공기 중 총크롬 농도는 연마작업( $GM=21.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 도금작업( $GM=13.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 및 기타 작업( $GM=2.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높게 나타났다. Cr(VI) 농도는 도금작업( $GM=4.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 가장 높았고 다음으로 연마작업( $GM = 1.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 기타 작업( $GM=1.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순이었다. 총크롬 및 6가 크롬 농도는 업무 간 유의한 차이가 있었다( $p<0.05$ ). 이와 같이 도금작업자는 6가 크롬 노출농도가 높은 반면, 연마 작업자는 총크롬 농도가 더욱 높은 것으로 나타났다.



[그림 1-8] 크롬 취급 공정별 노출수준 비교(이광용 등, 2015)



## II. 연구방법





## II. 연구방법

### 1. 연구내용 및 범위

연구내용, 세부목표 및 범위는 아래처럼 요약될 수 있다.

〈표 II-1〉 연구내용 및 범위

| 연구내용   | 세부 목표   | 범위 및 세부 내용  |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내외 크롬의 노출기준 개정 현황 조사</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 크롬 노출기준의 설정 현황 조사</li> <li>• 해외 크롬 노출기준 설정 현황 조사</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 크롬 노출기준의 설정 배경 및 변천사 조사</li> <li>• ACGIH, 유럽연합 등의 크롬에 대한 노출기준 설정 현황 조사</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 크롬 제조·취급 사업장 대상 작업자 노출 실태조사</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 노출기준 설정 대상(금속분진, 피로파우더, 흙, 가용성 염, 알킬)별 노출 평가</li> <li>• 기존 측정자료의 분석</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 크롬 노출 인구(업종, 규모, 농도 등)를 분석하여 대표성 있는 평가대상 선정 후 노출 평가</li> <li>• 관련 연구결과 및 안전보건공단이 보유한 작업환경측정결과 및 작업환경실태조사 등을 분석</li> </ul>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 크롬 노출기준 개정을 위한 사회성·경제성 평가 실시</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 노출수준 및 건강영향 등을 고려하여 비용편익분석</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 크롬의 유해성 평가(국내외 문헌검토, 최신 유해성 정보 확인)</li> <li>• 크롬의 위험성 평가(국내 취급 및 노출실태 조사)</li> <li>• 크롬의 국내법상 규제 수준을 검토하고 그에 따른 사회경제성 평가 실시</li> <li>• 크롬의 산업안전보건법상 적절한 규제 방안을 제시(노출기준 목록, 작업환경측정, 특수건강진단, 특별관리물질 대상 여부 등 검토)</li> </ul> |

## 2. 내용별 연구방법

### 1) 국내외 관련 노출기준 및 독성 등에 대한 문헌조사 및 분석

○ 크롬 및 그 화합물 노출기준 관련 국내외 현황 파악 : 국내외 개발 현황을 파악하기 위해 크롬 노출기준 관련 내용이 보고된 국내·외 논문 및 보고서 검토

○ 국내논문은 KISS(한국학술정보), 과학기술학회마을, DBPIA에서 '크롬', '크롬 및 그 화합물노출기준', '크롬 금속', '6가 크롬', '2가 크롬', '3가 크롬', '크로밀 클로라이드', '크롬광 가공', '그롬산 연', '삼차부틸크롬산', '칼슘크로메이트' 등의 중심어를 입력하여 검색

○ 국외논문은 국외논문은 Science Direct, EBSCO Host, PubMed, Google 학술검색 서비스를 이용하여 키워드로 'chromium occupational exposure limit', 'chromium compounds', 'Chromite ore processing', 'lead chromate', 'zinc chromate' 등을 입력하여 검색

○ 검토한 문헌을 정리하여 ACGIH TLV Documentation과 유사한 노출기준 설정 근거 자료를 작성

### 2) 국내 크롬 제조·취급 사업장 대상 작업자 노출 실태조사

#### (1) 크롬 측정자료 분석

최근 5년간 크롬 및 그 화합물에 대한 우리나라 작업환경측정 실시현황을 파악하기 위해 한국산업안전보건공단에서 보유하고 있는 우리나라 작업환경측정 DB를 요구할 것이다. DB에서 다음을 변수로 하여 자료를 추출하고 이에 대하여 노출기준 대비 10%, 50%, 100% 초과여부를 분석할 예정이다.

● 크롬 형태[크롬(금속), 크롬(2가)화합물, 크롬(3가)화합물, 크롬(6가)화합물(수용성), 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)]

- 측정업체 수
- 측정시료 수
- 노출 수준

## (2) 크롬 측정자료 분석

다양한 형태의 크롬 화합물[크롬(금속), 크롬(2가)화합물, 크롬(3가)화합물, 크롬(6가)화합물(수용성), 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)]을 사용하는 10~15개 사업장을 대상으로 100개 전후의 시료채취를 진행하고 있다. 이때 각각의 크롬 화합물이 포함되도록 구성할 것이며, 가용성 염 및 알킬 화합물을 제외한 금속분진, 피로 파우더, 용접흄, 산화 크롬에 대해서는 총분진과 호흡성분진을 동시에 측정하여 노출기준 개정의 검토과정에서 활용할 것이다.

〈표 II-2〉 실태조사 연구계획

| 물질명                                      | 사업장수 | 비고          |
|--|------|-------------|
| Metallic chromium, as Cr(0)              | 5    |             |
| Chromium(II) compounds                   | -    | 독성학적 평가만 수행 |
| Trivalent chromium compounds, as Cr(III) | 5    |             |
| Water-soluble chromium(VI) compounds     | 5    |             |
| Insoluble chromium(VI) compounds         | 5    |             |
| Chromyl chloride, as Cr(VI)              | -    | 국내 사용 확인 필요 |
| Chromite ore processing                  | -    | 국내 크롬 광산 없음 |
| Lead chromate, as Cr(VI)                 | -    | 독성학적 평가만 수행 |
| Zinc chromate                            | -    | 독성학적 평가만 수행 |
| Strontium chromate                       | -    | 독성학적 평가만 수행 |
| Calcium chromate                         | -    | 국내 사용 확인 필요 |

|    |    |              |
|----|----|--------------|
| 합계 | 20 | 각 사업장당 5개 시료 |
|----|----|--------------|

### (3) 크롬 및 그 화합물의 분석

크롬 및 그 화합물은 아래와 같이 크게 2가지로 나누어 번호 1~3의 금속크롬 및 크롬(II, III)을 ICP로 분석하고, 번호 4~6의 6가 크롬 화합물들은 IC 및 HPLC을 이용하여 분석하였다.

〈표 II-3〉 크롬 및 그 화합물의 시료채취매체 및 분석법

| 번호 | 물질명                                      | 시료채취매체                                    | 분석법              | 비고 |
|----|--|---|------------------|----|
| 1  | Metallic chromium, as Cr(0)              | 막여과지(mixed cellulose ester (MCE) filters) | ICP법(NIOSH 7300) |    |
| 2  | Chromium(II) compounds                   |   |                  |    |
| 3  | Trivalent chromium compounds, as Cr(III) |   |                  |    |

|    |                                      |  |                            |   |   |
|----|--------------------------------------|--|----------------------------|---|---|
| 4  | Water-soluble chromium(VI) compounds | hexavalent chromium compounds, as Cr(VI)로 통합 | PVC여과지 37 mm, 공극 5 $\mu$ m | IC법 및 HPLC법 (안전보건공단 6가 크롬 매뉴얼 및 NIOSH 7605) | 수용해도: 반응<br>수용성과 불용성 혼합<br>불용성<br>불용성<br>불용성<br>불용성 |
| 5  | Insoluble chromium(VI) compounds     |  |                            |   |   |
| 6  | Chromyl chloride, as Cr(VI)          |  |                            |   |   |
| 7  | Chromite ore processing              |  |                            |   |   |
| 8  | Lead chromate, as Cr(VI)             |  |                            |   |   |
| 9  | Zinc chromate                        |  |                            |   |   |
| 10 | Strontium chromate                   |  |                            |   |   |
| 11 | Calcium chromate                     |  |                            |   |   |

가) 금속크롬 및 크롬(II, III)의 측정 및 분석

• 금속크롬 및 크롬(II, III)에 대한 분석방법은 NIOSH 7300 ELEMENTS by ICP(Nitric/Perchloric Acid Ashing)을 참고하여 진행한다.

- 시료채취
  - 시료채취매체 : 막여과지(mixed cellulose ester(MCE) filters)
  - 유량: 1 ~ 4 L/min
  - 공기량: 최대 1000 L, 최소 10 L
  - 운반: 여과지의 시료포집 부분이 위를 향하도록 하고 마개를 닫아 밀폐된 상태에서 운반

- 시료의 안정성: 안정함

- 공시료: 시료 세트 당 2~10개의 현장 공시료

• 분석기기 및 조건

- 분석기술: 유도결합 플라즈마 방출 분광기(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer; ICP-AES)

- 분석대상물질: chromium

- 전처리: 진한 질산(HNO<sub>3</sub>) / 진한 과산화수소(HClO<sub>4</sub>) (4:1) 5 mL

- 최종용액: 4% HNO<sub>3</sub>, 1% HClO<sub>4</sub> 25 mL

- 검량선: 크롬 표준용액 elements in 4% HNO<sub>3</sub>, 1% HClO<sub>4</sub>

- 범위: 5~1000 µg/sample

- 검출한계: 0.020 µg/filter

- 정밀도: 5.31

• 시료 전처리

(a) 카세트필터 홀더를 열고 시료와 공시료를 깨끗한 비이커로 옮긴 후 전처리액 5 mL를 넣고 시계접시를 덮은 후, 120°C 가열판에서 가열한다.

(b) 산 용액이 약간 노란색으로 변하며, 용액이 투명해질 때까지 산 용액 2 mL씩 첨가하여 유기 금속을 완전히 파괴시킨다.

(c) 시료 용액이 투명해지면, 시계접시와 비이커를 증류수로 헹군 후 다시 비이커를 가열판에 놓고, 용액이 약 0.5 mL 정도가 남을 때까지 150°C에서 가열한다.

(d) 비이커를 2~3 mL 5% 전처리액으로 헹군 후 25 mL 용량 플라스크에

옮겨 담고 5% 전처리액으로 플라스크 표면을 맞춘다.

- 검량선 작성 및 회수율

(a) 크롬 0~10  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 가 되도록 100 mL 용량 플라스크에 5% 전처리액을 사용하여 최소 5개의 표준용액을 제조한다.

(b) 표준용액을 공시료 및 시료와 함께 분석한다.

(c) 표준용액 농도( $\mu\text{g}/\text{mL}$ )에 따른 흡광도 결과를 바탕으로 검량선 그래프를 작성한다.

(d) 작성한 검량선에 따라 보통 10개의 시료를 분석한 후, 표준용액을 이용하여 분석기기 반응에 대한 재현성을 점검한다. 재현성이 나쁘면 검량선을 다시 작성하고 시료를 분석한다.

(e) 막여과지에 알고 있는 양의 분석대상물질을 첨가한 시료(spike 시료)로 아래와 같이 회수율(recovery) 시험을 실시하여 현장 시료 분석값을 보정한다.

- 회수율 시험 및 보정

(a) 예상 시료량이 포함되도록 3가지 이상의 수준 및 각 수준별로 3개 이상의 시료를 만든다.

(b) 하룻밤 방치한 후 '시료전처리' 과정과 동일하게 전처리하고 현장 시료와 동일하게 분석한 후 회수율을 다음과 같이 구한다.

$$\text{회수율} = \text{분석값} / \text{첨가량}$$

(c) (b)에서 구한 회수율로 시료의 분석값을 다음과 같이 보정한다. 수준별로 회수율의 차이가 뚜렷하면 수준별로 보정한다.

$$\text{보정 분석값} = \text{현장시료 분석값} / \text{회수율}$$

• 분석과정

(a) 유도결합플라즈마분광광도계(ICP)의 기기를 작동시켜 최적화시킨 후 267.716 nm에서 크롬의 흡광도를 측정한다. 만일 방해물질이 존재할 경우 다른 파장을 선택하여 분석한다.

(b) 표준용액, 공시료, 현장시료, 그리고 회수율 검증시료를 흡입시켜 크롬의 흡광도를 측정하고 기록을 저장한다.

(c) 적당한 비율로 표준용액을 희석하여 크롬 금속의 검출한계를 구한다. 이 분석방법의 검출한계는 0.02  $\mu\text{g}/\text{filter}$  수준으로 알려져 있다.

• 계산

(a) 측정된 흡광도를 이용하여 그에 상응하는 시료의 금속 농도( $C_s$ )와 공시료의 평균값( $C_b$ )을 계산한다.

(b) 시료의 용액 부피( $V_s$ )와 공시료 부피( $V_b$ )를 이용하여 채취된 공기중( $V$ ) 채취물질의 농도( $C$ )를 계산한다.

(c) 다음 식에 의하여 해당물질의 농도를 구한다.

$$C(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{(C_s V_s - C_b V_b)}{V \times RE}$$

$C_s$  : 시료에서 크롬 농도,  $\mu\text{g}/\text{ml}$

$V_s$  : 시료의 최종용량,  $\text{ml}$

$C_b$  : 공시료에서 크롬 농도,  $\mu\text{g}/\text{ml}$

$V_b$  : 공시료의 최종용량,  $\text{ml}$

$V$  : 시료공기 채취 총량,  $\text{L}$

$RE$  : 평균 회수율

## 나) 6가 크롬 화합물의 측정 및 분석

• 크롬(VI)에 대한 분석방법은 6가 크롬 (Chromium, Hexavalent)과 NIOSH CHROMIUM, HEXAVALENT 7605 by Ion Chromatography을 참고하여 IC 및 HPLC로 진행한다.

## • 시료채취

- 시료채취매체 : PVC여과지 37 mm, 공극 5  $\mu$ m

- 유량: 1~4 L/min

- 공기량: 최대 1000L, 최소 100 L

- 운반: 시료채취기의 마개를 완전히 밀봉하여 운반하고 도금공정에서 채취된 시료는 시료채취 후 즉시 여과지를 꺼내 바이알에 넣고 추출용액(2% 수산화나트륨/3% 탄산나트륨) 5 mL를 첨가하여 여과지를 완전히 적신 후 마개로 밀봉하고 냉장보관하여 운반

※ 수용성 6가 크롬화합물만 존재 한다면 추출용액 대신 증류수를 사용할 수 있다.

- 시료의 안정성: 냉장보관하고 2주 이내 분석, 스테인리스강 용접공정의 시료는 채취 후 8일 이내 분석

- 공시료: 시료 세트 당 2~10개 또는 시료수의 10% 이상

## • 분석기기에 따른 조건

(a) 이온크로마토그래피 - 전도도검출기 사용

〈표 II-4〉 이온크로마토그래피-전도도검출기 분석조건

|        |   |
|--------|---|
| 컬럼     | Dionex HPIC-AG5 guard, HPIC-AS5 separator, anion suppressor                           |
| 시료주입량  | 50 $\mu$ L  |
| 전도도 설정 | 1 us full scale   |
| 추출용액   | 7.0 mM Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / 0.5 mM NaOH, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> |
| 유량     | 2 mL/분  |
| 검출한계   | 검출한계: 3.5 $\mu$ g/sample  |

(b) 이온크로마토그래피 - 분광검출기 사용

〈표 II-5〉 이온크로마토그래피-분광검출기 분석조건

|         |  |
|---------|--|
| 컬럼      | IonPac NG1 guard, IonPac AS7 separator, anion suppressor                           |
| 시료주입량   | 50~100 $\mu$ L   |
| 유량      | 1.5 mL/분   |
| 추출용액    | 250 mM (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + 100 mM NH <sub>4</sub> OH |
| 발생용액    | 2 mM 1,5-diphenylcarbazide/10% MeOH/1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>             |
| 발생용액 유량 | 유량 0.5 mL/분  |
| 파장      | 540nm  |
| 검출한계    | 검출한계: 3.5 $\mu$ g/sample   |

(c) 고성능액체크로마토그래피 - 분광검출기(HPLC-UVD) 사용

〈표 II-6〉 고성능액체크로마토그래피-분광검출기 분석조건

|        |  |
|--------|--|
| 컬럼     | Shim-pack IC-SA2(250mmL×4.0mm I.D.)  |
| 시료주입량  | 10 $\mu$ L   |
| 전도도 설정 | 1 us full scale  |
| 추출용액   | 10 mM Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / 0.5 mM NaOH, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> |
| 유량     | 1.2 mL/분   |
| 검출한계   | 0.0130 $\mu$ g/sample  |

- 시료 전처리

(a) 시료채취기로 부터 여과지를 핀셋을 이용해 꺼낸 후 50 mL 비커에 넣고, 추출용액을 5 mL를 첨가한다. 바이알에 추출용액에 담구어 운반한다. 보관한 시료는 여과지와 용액을 50 mL를 비커에 넣은 후 추출용액으로 바이알을 2~3번 헹구어 비커에 담는다.

(b) 비커에 유리덮개를 덮고 약 100~135 $^{\circ}$ C 정도의 가열판 위에서 45분 정도 가끔 흔들어 주면서 가열시킨다. 이때 용액에 끓어오르지 않도록 주의한다.

(c) 용액을 식힌 후 10~25 mL의 용량플라스크에 옮긴다. 이때 비커를 증류수로 2~3번 헹구어 시료손실이 없도록 한다.

- 검량선 작성 및 회수율

(a) 시료농도 범위가 포함될 수 있도록 최소 5개 이상의 농도수준을 표준용액으로 하여 검량선을 작성한다. 이때 표준용액의 농도 범위는 현장시료 농도 범위를 포함하는 것이어야 한다.

(b) 표준용액의 조제는 25 mL 용량플라스크에 추출용액 5 mL를 넣고 일정

량의 6가 크롬 표준용액을 첨가한 후 증류수로 최종부피가 25 mL가 되게 하는 방식으로 조제토록 한다.

(c) 작업장에서 채취된 현장시료, 회수율 시험시료, 현장 공시료 및 공시료를 분석한다.

(d) 분석된 회수율 검증시료를 통해 아래와 같이 회수율을 구한다.

$$\text{회수율} = \text{분석값} / \text{첨가량}$$

• 분석과정

(a) 기기를 작동시키고 위 '분석기기에 따른 조건'에 맞추어 설정한다.

(b) 표준용액 및 시료를 정량적으로 정확히 주입한다. 시료 주입법은 자동주입기를 이용하는 방법이 있다.

• 계산

(a) 측정된 흡광도를 이용하여 그에 상응하는 시료의 금속 농도( $C_s$ )와 공시료의 평균값( $C_b$ )을 계산한다.

(b) 시료의 용액 부피( $V_s$ )와 공시료 부피( $V_b$ )를 이용하여 채취된 공기중( $V$ ) 채취물질의 농도( $C$ )를 계산한다.

(c) 다음 식에 의하여 해당물질의 농도를 구한다.

$$C(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{(C_s V_s - C_b V_b)}{V \times RE}$$

·  $C_s$  : 시료에서 크롬 농도,  $\mu\text{g}/\text{ml}$

·  $V_s$  : 시료의 최종용량, ml

·  $C_b$  : 공시료에서 크롬 농도,  $\mu\text{g}/\text{ml}$

- $V_b$  : 공시료의 최종용량, ml
- $V$  : 시료공기 채취 총량, L
- RE : 평균 회수율

### 3) 크롬 및 그 화합물 노출기준 개정을 위한 사회적·경제성 평가

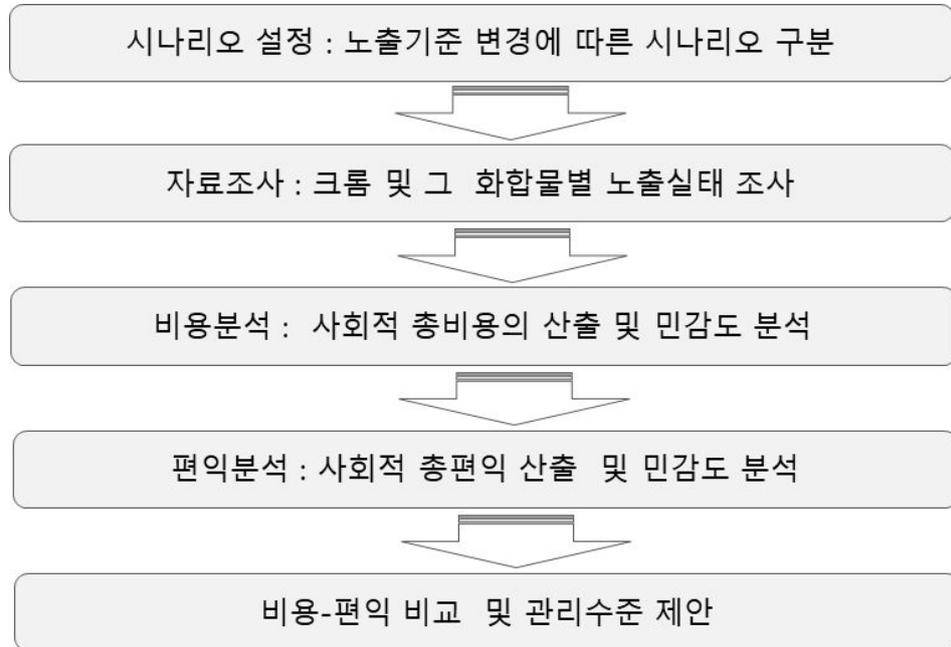
크롬 및 그 화합물의 유해성·위험성 평가후 규제에 따른 사회적·경제적 비용과 편익 분석시 다음 사항들을 고려하였다.

- 국내 산업계의 취급/노출 현황
- 국내·외 직업병 발병 사례
- 대체물질 존재 여부 및 기술적·경제적 적용 가능성
- 작업장에서의 적절한 관리 방안 및 소요 비용
- 직업병 감소에 따른 사회적·경제적 편익
- 비용과 편익의 비교를 통한 규제의 타당성·적합성

크롬 및 그 화합물의 산업안전보건법 규제로 인해 야기되는 사회·경제적 비용, 편익, B/C ratio를 통한 정량적 평가를 진행하였다.

- 비용(C) : 국소배기장치 설치 등 공학적 대책 비용, 관리적 대책 비용 등을 통해 비용 산출
- 편익(B) : 크롬 및 그 화합물 노출기준을 변경함으로써 기대되는 조기사망 감소편익과 화학물질로 인한 건강장해를 회피하기 위한 지불의사금액을 통해 편익을 산출
- B/C ratio : 정량적 사회·경제성 평가 보고서는 시나리오별, 할인율별로 B/C ratio를 산출( $B/C \text{ ratio} = \text{편익(B)} / \text{비용(C)}$ )

본 연구의 사회적·경제성 평가는 [그림 II-1]와 같은 절차로 수행하였다.



[그림 II-1] 사회·경제성 평가 절차



### Ⅲ. 연구 결과

.....



### Ⅲ. 연구결과

#### 1. 국내외 노출기준 및 설정근거

##### 1) 주요 국가의 크롬 및 그 화합물 관련 노출기준

###### (1) 우리나라의 노출기준

###### 가) 2002년 노출기준

우리나라 노출기준은 1986년 노동부고시 제86-45호로 제정되었다. 제정된 이후 여러번 개정되었는데 크롬 및 그 화합물의 노출기준은 2002년(노동부고시 제2002-2호)에 대상물질이 대폭 확대되면서 개정되었다. 지금의 크롬 및 그 화합물의 노출기준과 비교해보면 당시 크롬(6가)화합물(불용성)의 노출기준은 0.05 mg/m<sup>3</sup>으로 현재보다 완화되어 있었으며 CAS No.도 크롬(금속)과 동일하게 사용하고 있었다. 발암성의 경우 당시에는 ACGIH의 발암성 구분을 사용하여 인체에 암이 확인된 물질인 A1으로 표기하였다. 또한 크롬산염(Lead chromate, as Pb), 스트론튬 크로메이트(Strontium chromate), 칼슘 크로메이트(Calcium chromate)의 노출기준은 설정되어 있지 않았다.

〈표 Ⅲ-1〉 우리나라 크롬 및 그 화학물의 노출기준(2002)

| 일련<br>번호 | 유해물질의 명칭 |      | 화학식 | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |      | 비고<br>(CAS번호 등) |
|----------|----------|------|-----|--------------------------|------|-----------------|
|          | 국문표기     | 영문표기 |     | TWA                      | STEL |                 |

| 일련<br>번호 | 유해물질의 명칭               |  | 화학식   | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |       | 비고<br>(CAS번<br>호 등)     |
|----------|------------------------|--|---|--------------------------|-------|-------------------------|
|          | 국문표기                   | 영문표기   |   | TWA                      | STEL  |                         |
| 500      | 크롬광<br>가공(크롬산)         | Chromite ore<br>processing(C<br>hromate), as<br>Cr | Cr  | 0.05                     |       | [7440-<br>47-3]<br>A1   |
| 501      | 크롬(금속)                 | Chromium(M<br>etal)                                | Cr  | 0.5                      |       | [7440-<br>47-3]         |
| 502      | 크롬(6가)화합<br>물<br>(불용성) | Chromium(VI)<br>compounds(<br>Water<br>insoluble)  | Cr  | 0.05                     |       | [7440-<br>47-3]<br>A1   |
| 503      | 크롬(6가)화합<br>물<br>(수용성) | Chromium(VI)<br>compounds<br>(Water<br>soluble)    | Cr  | 0.05                     |       | [7440-<br>47-3]         |
| 504      | 크롬산 연                  | Lead<br>chromate, as<br>Cr                         | PbCrO <sub>4</sub>  | 0.05                     |       | [7758-<br>97-6]<br>A2   |
| 505      | 크롬산 아연                 | Zinc<br>chromates, as<br>Cr                        | ZnCrO <sub>4</sub><br>/ZnCr <sub>2</sub><br>O <sub>4</sub> /ZnCr<br>r <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 0.01                     |       | [13530<br>-65-9]<br>A1  |
| 506      | 크롬(2가)화합<br>물          | Chromium(II)<br>compounds,<br>as Cr                | Cr  | 0.5                      |       | [7440-<br>47-3]         |
| 507      | 크롬(3가)화합<br>물          | Chromium(III)<br>compounds,<br>as Cr               | Cr  | 0.5                      |       | [7440-<br>47-3]         |
| 268      | 삼부틸크롬산                 | tert-Butyl<br>chromate, as<br>CrO <sub>3</sub>     | [(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> C<br>O] <sub>2</sub> CrO <sub>2</sub>                            |                          | C 0.1 | [1189-<br>85-1]<br>Skin |

나) 2007년 노출기준

2002년 크롬 및 그 화합물의 노출기준이 제정된 이후 2007년(노동부고시 제2007-25호)에 크롬(6가)화합물(불용성)을 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)로 용어를 변경하면서 그 기준을 0.05 mg/m<sup>3</sup>에서 0.01 mg/m<sup>3</sup>로 강화하였다.

〈표 III-2〉 우리나라 크롬 및 그 화합물의 노출기준(2007)

| 일련<br>번호 | 유해물질의 명칭                        |  | 화학식  | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |      | 비고<br>(CAS번<br>호 등)    |
|----------|---------------------------------|--|--|--------------------------|------|------------------------|
|          | 국문표기                            | 영문표기   |  | TWA                      | STEL |                        |
| 500      | 크롬광<br>가공(크롬산)                  | Chromite ore<br>processing(C<br>hromate), as<br>Cr | Cr   | 0.05                     |      | [7440-<br>47-3]<br>A1  |
| 501      | 크롬(금속)                          | Chromium(M<br>etal)                                | Cr   | 0.5                      |      | [7440-<br>47-3]        |
| 502      | 크롬(6가)화합<br>물<br>(불용성무기화<br>합물) | Chromium(VI)<br>compounds(<br>Water<br>insoluble)  | Cr   | 0.01                     |      | [7440-<br>47-3]<br>A1  |
| 503      | 크롬(6가)화합<br>물<br>(수용성)          | Chromium(VI)<br>compounds<br>(Water<br>soluble)    | Cr   | 0.05                     |      | [7440-<br>47-3]        |
| 504      | 크롬산 연                           | Lead<br>chromate, as<br>Cr                         | PbCrO <sub>4</sub>   | 0.05                     |      | [7758-<br>97-6]<br>A2  |
| 505      | 크롬산 아연                          | Zinc<br>chromates, as<br>Cr                        | ZnCrO <sub>4</sub><br>/ZnCr <sub>2</sub><br>O <sub>4</sub> /ZnCr<br>r.O <sub>7</sub> | 0.01                     |      | [13530<br>-65-9]<br>A1 |

| 일련<br>번호 | 유해물질의 명칭      |  | 화학식  | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |       | 비고<br>(CAS번<br>호 등)     |
|----------|---------------|--|--|--------------------------|-------|-------------------------|
|          | 국문표기          | 영문표기   |  | TWA                      | STEL  |                         |
| 506      | 크롬(2가)화합<br>물 | Chromium(II)<br>compounds,<br>as Cr            | Cr   | 0.5                      |       | [7440-<br>47-3]         |
| 507      | 크롬(3가)화합<br>물 | Chromium(III)<br>compounds,<br>as Cr           | Cr   | 0.5                      |       | [7440-<br>47-3]         |
| 268      | 삼부틸크롬산        | tert-Butyl<br>chromate, as<br>CrO <sub>3</sub> | [(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> C<br>O] <sub>2</sub> CrO <sub>2</sub> |                          | C 0.1 | [1189-<br>85-1]<br>Skin |

#### 다) 2008년 노출기준

크롬 및 그 화합물과 관련하여 2008년(노동부 고시 제2008-26호)의 주요 개정 내용으로는 그 동안 사용하고 있던 크롬산 연(Lead chromate, as Cr)의 노출기준을 0.05 mg/m<sup>3</sup>에서 0.012 mg/m<sup>3</sup>로 강화하고 Lead chromate, as Pb를 신설하면서 그 기준을 0.05 mg/m<sup>3</sup>로 규정하였다. 또한 스트론튬 크로메이트(Strontium chromate)에 대한 노출기준을 0.0005 mg/m<sup>3</sup>로 신설하였다.

〈표 III-3〉 우리나라 크롬 및 그 화학물의 노출기준(2008)

| 일련<br>번호 | 유해물질의 명칭       |  | 화학식 | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |      | 비고<br>(CAS번<br>호 등)          |
|----------|----------------|--|-----|--------------------------|------|------------------------------|
|          | 국문표기           | 영문표기   |     | TWA                      | STEL |                              |
| 500      | 크롬광<br>가공(크롬산) | Chromite ore<br>processing(C<br>hromate), as<br>Cr | Cr  | 0.05                     |      | [7440-<br>47-3]<br>발암성<br>1A |

| 일련<br>번호  | 유해물질의 명칭                |   | 화학식                | 노출기준(mg/m³) |      | 비고<br>(CAS번<br>호 등)               |
|-----------|-------------------------|---|--------------------|-------------|------|-----------------------------------|
|           | 국문표기                    | 영문표기  |                    | TWA         | STEL |                                   |
| 501       | 크롬(금속)                  | Chromium(Metal)   | Cr                 | 0.5         |      | [7440-47-3]                       |
| 502       | 크롬(6가)화합물<br>(불용성무기화합물) | Chromium(VI) compounds(Water insoluble inorganic compounds) | Cr                 | 0.01        |      | [18540-29-9]<br>발암성 1A            |
| 503       | 크롬(6가)화합물<br>(수용성)      | Chromium(VI) compounds (Water soluble)                      | Cr                 | 0.05        |      | [18540-29-9]<br>발암성 1A            |
| 504       | 크롬산 연                   | Lead chromate, as Cr  | PbCrO <sub>4</sub> | 0.012       |      | [7758-97-6]<br>발암성 1A,<br>생식독성 1A |
| 504<br>의2 | 크롬산 연                   | Lead chromate, as Pb  | PbCrO <sub>4</sub> | 0.05        |      | [7758-97-6]<br>발암성 1A,<br>생식독성 1A |

| 일련<br>번호  | 유해물질의 명칭  |  | 화학식  | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |       | 비고<br>(CAS번<br>호 등)                            |
|-----------|-----------|--|--|--------------------------|-------|--|
|           | 국문표기      | 영문표기                                     |  | TWA                      | STEL  |  |
| 505       | 크롬산 아연    | Zinc chromates, as Cr                    | ZnCrO <sub>4</sub> / ZnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> / ZnCr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 0.01                     |       | [13530-65-9][11103-86-9][37300-23-5]<br>발암성 1A |
| 506       | 크롬(2가)화합물 | Chromium(II) compounds, as Cr            | Cr   | 0.5                      |       | [7440-47-3]                                    |
| 507       | 크롬(3가)화합물 | Chromium(III) compounds, as Cr           | Cr   | 0.5                      |       | [7440-47-3]                                    |
| 268       | 삼차부틸크롬산   | tert-Butyl chromate, as CrO <sub>3</sub> | [(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> CO] <sub>2</sub> CrO <sub>2</sub>                       |                          | C 0.1 | [1189-85-1]<br>발암성 1A,<br>Skin                 |
| 308<br>의2 | 스트론튬크로메이트 | Strontium chromate                       | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Sr  | 0.0005                   |       | [7789-06-2]<br>발암성 1A                          |

라) 2020년 노출기준

칼슘 크로메이트의 노출기준은 2018년 3월 0.001 mg/m<sup>3</sup>로 신설되었다. 현재 활용되고 있는 2020년 크롬 및 그 화합물의 노출기준(고용노동부고시 제2020-48호)은 과거와 달리 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)과 크롬(6가)화합물(수용성)의 CAS No.와 발암성 표기가 변경되었다.

〈표 III-4〉 현행 우리나라 크롬 및 그 화학물의 노출기준

| 일련<br>번호 | 유해물질의 명칭                        |   | 화학식                | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |      | 비고<br>(CAS번<br>호 등)                         |
|----------|---------------------------------|---|--------------------|--------------------------|------|---|
|          | 국문표기                            | 영문표기  |                    | TWA                      | STEL |   |
| 537      | 크롬광<br>가공(크롬산)                  | Chromite ore<br>processing(C<br>hromate), as<br>Cr                          | Cr                 | 0.05                     |      | [7440-<br>47-3]<br>발암성<br>1A                |
| 538      | 크롬(금속)                          | Chromium(M<br>etal)   | Cr                 | 0.5                      |      | [7440-<br>47-3]                             |
| 539      | 크롬(6가)화합<br>물<br>(불용성무기화<br>합물) | Chromium(VI)<br>compounds(<br>Water<br>insoluble<br>inorganic<br>compounds) | Cr                 | 0.01                     |      | [18540<br>-29-9]<br>발암성<br>1A               |
| 540      | 크롬(6가)화합<br>물<br>(수용성)          | Chromium(VI)<br>compounds<br>(Water<br>soluble)                             | Cr                 | 0.05                     |      | [18540<br>-29-9]<br>발암성<br>1A               |
| 541      | 크롬산 연                           | Lead<br>chromate, as<br>Cr  | PbCrO <sub>4</sub> | 0.012                    |      | [7758-<br>97-6]<br>발암성<br>1A,<br>생식독성<br>1A |
| 542      | 크롬산 연                           | Lead<br>chromate, as<br>Pb  | PbCrO <sub>4</sub> | 0.05                     |      | [7758-<br>97-6]<br>발암성<br>1A,<br>생식독성<br>1A |

| 일련<br>번호 | 유해물질의 명칭    |  | 화학식  | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |       | 비고<br>(CAS번<br>호 등)                               |
|----------|-------------|--|--|--------------------------|-------|---|
|          | 국문표기        | 영문표기   |  | TWA                      | STEL  |   |
| 543      | 크롬산 아연      | Zinc<br>chromates, as<br>Cr                    | ZnCrO <sub>4</sub><br>/ZnCr <sub>2</sub><br>O <sub>4</sub> /ZnCr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 0.01                     |       | [13530-65-9][11103-86-9][37300-23-5]<br>발암성<br>1A |
| 544      | 크롬(2가)화합물   | Chromium(II)<br>compounds,<br>as Cr            | Cr   | 0.5                      |       | [7440-47-3]                                       |
| 545      | 크롬(3가)화합물   | Chromium(III)<br>compounds,<br>as Cr           | Cr   | 0.5                      |       | [7440-47-3]                                       |
| 289      | 삼차부틸크롬산     | tert-Butyl<br>chromate, as<br>CrO <sub>3</sub> | [(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub><br>CO] <sub>2</sub> Cr<br>O <sub>2</sub>                    |                          | C 0.1 | [1189-85-1]<br>발암성<br>1A,<br>Skin                 |
| 327      | 스트론튬크로메이트   | Strontium<br>chromate                          | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ·<br>Sr   | 0.0005                   |       | [7789-06-2]<br>발암성<br>1A                          |
| 523      | 칼슘<br>크로메이트 | Calcium<br>chromate                            | CaCrO <sub>4</sub>   | 0.001                    | -     | [13765-19-0]                                      |

## (2) 미국의 노출기준

미국의 직업적 노출기준(Occupational Exposure Limits)은 크게 3가지로 구분된다.

### 가) OSHA PELs

미국 직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)의 허용노출기준(Permissible Exposure Limits, PELs)에서 크롬 및 그 화합물은 2가 크롬, 3가 크롬 및 6가 크롬으로 구분하고 있으며 2가 및 3가 크롬의 경우 PELs은  $0.5 \text{ mg/m}^3$ 이며, 6가 크롬의 경우 어깨글<sup>1)</sup>로 §1910.1026의 노출기준이 유지되거나 유효하지 않은 모든 작업 또는 부문에 대한 노출기준은 Table Z-2를 참조하라고 설명되어 있으며, Table Z-2에서는 Chromium(VI) 표준, §1910.1026의 노출기준이 유지되거나 유효하지 않은 모든 작업 또는 부문에 적용된다고 설명<sup>2)</sup>하고 있다. 결국 OSHA의 PEL은 8시간 시간 가중 평균(TWA)으로 계산된 공기 입방 미터당 5마이크로그램( $5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ )을 초과하는 공기 중 크롬(VI) 농도에 노출되지 않도록 해야 하고<sup>3)</sup>, Action Level은 그 절반 수준인  $2.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 으로 확인<sup>4)</sup>되었다.

1) 5 See Table Z-2 for the exposure limit for any operations or sectors where the exposure limit in §1910.1026 is stayed or is otherwise not in effect.

2) This standard applies to any operations or sectors for which the exposure limit in the Chromium (VI) standard, §1910.1026, is stayed or is otherwise not in effect.

3) 1910.1026(c)

Permissible exposure limit (PEL). The employer shall ensure that no employee is exposed to an airborne concentration of chromium (VI) in excess of 5 micrograms per cubic meter of air ( $5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ), calculated as an 8-hour time-weighted average (TWA).

4) Action level means a concentration of airborne chromium (VI) of 2.5 micrograms per cubic meter of air ( $2.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) calculated as an 8-hour time-weighted average (TWA).

한편 우리나라에서 제정된 크롬산 아연과 크롬산 연과 스트론티움크로메이트 및 칼슘 크로메이트는 물질로서 동일한 기준은 찾아볼 수 없었고, 크롬산과 크롬산염(Chromic acid and chromates)에 포함되어 있을 것으로 추정된다. 또한 삼차부틸크롬산은 우리나라 노출기준과 동일하게 설정 및 표기되어 있었다.

〈표 III-5〉 크롬 및 그 화합물의 OSHA PELs

| Substances  | CAS No.   | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> )        |                       |
|---|-----------|---------------------------------|-----------------------|
|   |           | TWA                             | STEL                  |
| Chromium (II) compounds.(as Cr)                                 | 7440-47-3 | 0.5                             |                       |
| Chromium (III) compounds.(as Cr)                                | 7440-47-3 | 0.5                             |                       |
| Chromium (VI) compounds; See 1910.10265                         |           | 0.005<br>(5 µg/m <sup>3</sup> ) |                       |
| Chromium metal and insol. salts (as Cr)                         | 7440-47-3 | 1                               |                       |
| tert-Butyl chromate (as CrO <sub>3</sub> ); see 1910.10266      | 1189-85-1 |                                 | C 0.1<br>X            |
| Chromic acid and chromates (Z37.7-1971) (as CrO <sub>3</sub> )c |           |                                 | 1 mg/10m <sup>3</sup> |

#### 나) NIOSH RELS

미국 직업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 권장노출기준(Recommended Exposure Limits,

RELs)에서 크롬 및 그 화합물 중 크롬금속, 2가크롬 및 3가 크롬의 RELs은 모두 PELs과 동일하게 0.5 mg/m<sup>3</sup>로 설정되어 있었다. 6가 크롬의 경우 OSHA PELs보다 강한 0.2 µg/m<sup>3</sup>으로 규정하고 있었다.

다만 우리나라에서 제정된 크롬산염, 스트론티움크로메이트 및 칼슘 크로메이트는 물질에 대해 동일한 기준은 찾아볼 수 없었으며, 크롬산과 크롬산염(Chromic acid and chromates)의 경우 동의어 및 상품명으로 크롬산(CrO<sub>3</sub>), 크롬산 무수물, 크롬 산화물, 크롬(VI) 산화물(1:3), 크롬 삼산화물, 아연 크롬산 아연으로 명기<sup>5)</sup>하고 있었다.

에 포함되어 있을 것으로 추정된다. 삼차부틸크롬산은 우리나라 노출기준과 동일하였지만 피부흡수(Skin designation)는 표기되어 있지 않았다.

〈표 III-6〉 크롬 및 그 화합물의 NIOSH RELs

| Substances                       | CAS No.   | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |      | Remarks |
|----------------------------------|-----------|--------------------------|------|---------|
|                                  |           | TWA                      | STEL |         |
| Chromium metal                   | 7440-47-3 | 0.5                      |      |         |
| Chromium (II) compounds.(as Cr)  | 7440-47-3 | 0.5                      |      |         |
| Chromium (III) compounds.(as Cr) | 7440-47-3 | 0.5                      |      |         |
| Chromium (VI) oxide              |           | 0.0002                   |      | Ca      |

5) Chromic acid and chromates(Synonyms & Trade Names) : Chromic acid (CrO<sub>3</sub>), Chromic anhydride, Chromic oxide, Chromium(VI) oxide (1:3), Chromium trioxide, Zinc chromate

| Substances                 | CAS No.                       | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> )       |      | Remarks |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------|---------|
|                            |                               | TWA                            | STEL |         |
| Chromic acid and chromates | 1333-82-0 (CrO <sub>3</sub> ) | 0.0002                         |      | Ca      |
| tert-butyl chromate        | 1189-85-1                     | 0.0001                         |      | Ca      |
| Zinc chromate              | 1333-82-0 (CrO <sub>3</sub> ) | 0.0002                         |      | Ca      |
| Chromyl chloride           | 14977-61-8                    | 0.001 mg Cr(VI)/m <sup>3</sup> |      | Ca      |

\* The NIOSH REL (8-hour TWA) is 0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> for all hexavalent chromium [Cr(VI)] compounds.

#### 다) ACGIH TLVs

미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) 서한도(Threshold Limit Values, TLVs)에서 크롬 및 그 화합물은 크롬과 무기화합물(Chromium, [7440-47-3] and inorganic compounds)로 명기하고 있으며 크롬 금속(Metallic chromium, as Cr)은 0.5 mg/m<sup>3</sup>(흡입성)으로 우리나라 등과 유사하였다. 다만 3가 크롬화합물(수용성)은 TWA 0.003 mg/m<sup>3</sup>(흡입성)으로 설정되어 있었고 피부흡수(수용성)와 피부 및 호흡기 감각(DSEN, RSEN)을 표시하고 있었다. 6가 크롬(수용성)의 경우 더욱 엄격하게 TWA 0.0002 mg/m<sup>3</sup>(흡입성), STEL 0.0005 mg/m<sup>3</sup>(흡입성)로 설정하였고 발암성은 A1(인체 발암 확인)과 더불어 피부흡수(수용성)와 피부 및 호흡기 감각(DSEN, RSEN)을 표시하고 있었다, 또한 크로밀클로라이드(Chromyl chloride)도 TWA 0.0001 mg/m<sup>3</sup>(흡

입성, 증기), STEL 0.00025 mg/m<sup>3</sup>(흡입성, 증기)로 설정하였고 발암성은 A1 (인체 발암 확인)과 더불어 피부흡수(수용성)와 피부 및 호흡기 감각 (DSEN,RSEN)을 표시되어 있다.

〈표 III-7〉 크롬 및 그 화합물의 ACGIH TLVs

| Substances[CAS No.](Documentation data)                           | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |               |                              | MW     | TLV Basis                                       |
|---|--------------------------|---------------|------------------------------|--------|---|
|   | TWA                      | STEL          | Notations                    |        |   |
| Chromium,[7440-47-3] and inorganic compounds(2017)                |                          |               |                              |        | Pneumococcosis,                                 |
| Metallic chromium, as Cr(0)                                       | 0.5(I)                   | -             | -                            | Varies | Resp tract irr                                  |
| Trivalent chromium compounds, as Cr (III) Water-soluble compounds | 0.003(I)                 | -             | A4<br>DSEN,R<br>SEN          | Varies | Resp tract irr, asthma                          |
| Hexavalent chromium compounds, as Cr (VI) Water-soluble compounds | 0.0002(I)                | 0.0005 (I)    | A1<br>Skin;DS<br>EN;RSE<br>N | Varies | Lung & sinonasal cancer, Resp tract irr, asthma |
| Chromyl chloride[14977-61-8], as Cr(VI)                           | 0.0001 (IFV)             | 0.0002 5(IFV) | Skin;DS<br>EN;RSE<br>N; A1   | Varies | Lung & sinonasal cancer, Resp tract irr, asthma |
| Chromite ore processing   | 0.0002(I)                | 0.0005 (I)    | A1<br>Skin;DS<br>EN;RSE<br>N |        |   |

| Substances[CAS No.](Documentation data)                    | 노출기준(mg/m³) |            |                    | MW     | TLV Basis                                       |
|--|-------------|------------|--------------------|--------|---|
|  | TWA         | STEL       | Notations          |        |   |
| tert-Butyl chromate, as CrO <sub>3</sub> [1189-85-1](1960) |             | C 0.1      | Skin               | 230.17 | LRT & skin irr                                  |
| Lead chromate [7758-97-6], as Cr (VI)(2017)                | 0.0002(I)   | 0.0005 (I) | DSEN;R SEN; A1;BEI | 323.22 | Lung & sinonasal cancer; resp tract irr; asthma |

I : Inhalable fraction matter

IFV : Inhalable fraction and vapor

한편, 부록 G에 채택된 문서 및 TLVs가 자료 부족, 물질군 재편성 등 다양한 이유로 철회된 물질에 아래와 같은 물질이 기록되어 있었다.

**〈표 III-8〉 크롬 및 그 화합물 관련 ACGIH TLVs에서 철회된 물질**

| Substances(CRN)                          | Year Withdrawn | Reason                               |
|--|----------------|--------------------------------------|
| Calcium chromate [13765-19-0], as Cr     | 2018           | See Chromium and inorganic compounds |
| Chromite ore processing(Chromate), as Cr | 2018           | See Chromium and inorganic compounds |
| Chromyl chloride (Chromate), as Cr       | 2018           | See Chromium and inorganic compounds |

| Substances(CRN)   | Year Withdrawn | Reason                               |
|---|----------------|--------------------------------------|
| Strontium chromate [7789-06-2], as Cr                   | 2018           | See Chromium and inorganic compounds |
| Zinc chromate[11103-86-9; 13530-65-9'37300-23-5], as Cr | 2018           | See Chromium and inorganic compounds |

### (3) 영국의 노출기준(WELs)

영국 보건안전청(Health & Safety Executive, HSE)의 작업장 노출기준 (Workplace Exposure Limit, WELs)은 The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002와 연계되어 있다. 크롬 및 그 화합물 중 Chromium (VI) compounds은 그 기준이 개정되어 2020년 1월부터 시행 중이며, 이 물질에 대해서는 기존 WELs에 대하여 감소를 요구하고 있다.

크롬(Chromium), 2가 크롬(Chromium (II) compounds), 3가 크롬(Chromium (III) compounds)은 모두 TWA 0.5 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있으며, 6가 크롬(Chromium (VI) compounds)은 0.01 mg/m<sup>3</sup> 및 0.025 mg/m<sup>3</sup> (process generated)로 구분되어 있다. 또한 발암성, 감작표기가 있으며, Biological monitoring guidance values(BMGVs)를 설정하고 있다.

특이한 점으로 모든 Chromate 물질에 대한 기준이 전형 설정되어 있지 않았다.

〈표 III-9〉 크롬 및 그 화합물의 영국 WELs

| Substances                       | CAS No.  | Workplace exposure limit(mg/m <sup>3</sup> )         |  | Comments        |
|----------------------------------|----------|--|--|-----------------|
|                                  |          | Long-term exposure limit (8-hr TWA reference period) | Short-term exposure limit (15 minute reference period) |                 |
| Chromium                         | 440-47-3 | 0.5  | -  |                 |
| Chromium (II) compounds (as Cr)  |          | 0.5  | -  |                 |
| Chromium (III) compounds (as Cr) |          | 0.5  | -  |                 |
| Chromium (VI) compounds (as Cr)  |          | 0.01<br>0.025<br>(process generated) <sup>1</sup>    |  | Carc, sen, BMGV |

#### (4) 일본의 노출기준(OELs)

일본의 경우 직업적 노출기준은 2개로 구분되어 있다. 일본직업보건학회 (Japan Society for Occupational Health, JSOH)의 직업적 권장노출기준 (Recommendation of occupational exposure limits, ROELs)과 후생노동성의 작업환경측정법에 따른 작업환경평가기준에 관리농도가 제시되어 있다.

##### 가) 관리농도

노동안전보건법(1971년 법률 제57호) 제65조의 2제2항의 규정에 근거하여 작업환경 평가기준을 다음과 같이 정하고 있다. 제2조(측정 결과 평가)는 노동안전위생법 제65조의 2 제1항의 작업 환경 측정 결과의 평가는, 단위 작업 장소(작업 환경 측정 기준(소화 51년 노동성 고시 제40) 6호) 제2조 제1항 제1호에 규정하는 단위 작업 장소를 말한다. 이하 동일) 마다, 다음의 각 호에 해당하는 경우에 따라, 각각 해당 각 호의 표의 아래 칸에 제시된 바에 따라 제1관리 구분으로부터 제3관리 구분까지 구분하여 실시한다고 명시하고 있다. 별표 2는 제2조와 관련하여 크롬 및 그 화합물에 대한 관리농도가 제시되어 있으며, 크롬산과 그 염은 크롬으로서 0.05 mg/m<sup>3</sup>, 중크롬산과 그 염도 역시 0.05 mg/m<sup>3</sup>로 설정되어 있다. 다만 모든 크로메이트류는 물질별로 설정하고 있지 않다.

〈표 III-10〉 크롬 및 그 화합물에 대한 일본의 관리농도

| 물질의 종류        | 관리농도                         |
|---------------|------------------------------|
| 11 크롬산과 그 염   | 크롬으로서 0.05 mg/m <sup>3</sup> |
| 19 중크롬산 및 그 염 | 크롬으로서 0.05 mg/m <sup>3</sup> |

나) 권고노출기준(ROELs)

일본직업보건학회(Japan Society for Occupational Health, JSOH)의 직업적 권장노출기준(Recommendation of occupational exposure limits, ROELs)에서 제시하고 있는 크롬 및 그 화합물에 대한 기준은 1989년에 제안된 것으로 확인되었다. 우선 크롬 및 화합물은 기도감작 2군, 피부감작 1군으로 분류하고 있었고 생식독성은 3군으로 구분하고 있었다. 크롬 금속과 3가 크롬 화합물은 다른 국가와 유사한 규제수준인 0.5로 설정하고 있었고, 6가 크롬화합물의 경우 0.05이었고, 특정 6가 크롬화합물은 0.01로

제시되어 있었다.

한편, tert-Butyl chromate을 포함한 모든 크로메이트 화합물과 의 경우 노출기준이 설정되어 있지 않았다.

〈표 III-11〉 크롬 및 그 화합물의 일본 ROELs

| Substance<br>[CAS No.]                              | OEL<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | Skin | Carc | Sen        |      | Re<br>pro | Year<br>of<br>Prop<br>osal |
|---|-----------------------------|------|------|------------|------|-----------|----------------------------|
|   |                             |      |      | Air<br>way | Skin |           |                            |
| Chromium and<br>compounds (as<br>Cr)<br>[7440-47-3] |                             |      |      | 2          | 1    | 3         | '89                        |
| Chromium metal                                      | 0.5                         |      |      |            |      |           |                            |
| Chromium (III)<br>compounds                         | 0.5                         |      |      |            |      |           |                            |
| Chromium (VI)<br>compounds                          | 0.05                        |      |      |            |      |           |                            |
| Certain<br>chromium (VI)<br>compounds               | 0.01                        |      | 1    |            |      |           |                            |

## (5) 독일의 노출기준(MAKs)

Deutsche Forschungsgemeinschaft의 경우 크롬 및 그 화합물에 대하여 가장 강력한 규제를 하고 있는 것으로 판단된다. Chrome yellow, C.I. Pigment Red 104, C.I. Pigment Yellow 34는 모두 크롬산 연(Lead chromate)으로 간주하고 있었다. 또한 크롬산 연, 크롬산 아연 및 스트론튬염크로메이트는 모두 6가 크롬 화합물로 간주하고 있었고, 더욱이 3가 크롬 화합물과 6가 크롬 화합물은 최대허용농도(Maximum Concentrations, MAKs) 자체를 삭제하고 있었다. 한편, 6가 크롬 화합물은 발암성 등급1, Germ cell matation 등급 2, 생식독성은 H로 구분하고 있었다.

〈표 III-12〉 크롬 및 그 화합물의 독일 MAKs

| Substances<br>[CAS numner] | Formula             | MAK(mg/m <sup>3</sup> )       | H:S | Carc | Germ<br>cell<br>matatio<br>n |
|----------------------------|---------------------|-------------------------------|-----|------|------------------------------|
| Alkali<br>chromates        |                     | Chromium(<br>VI)<br>compounds |     |      |                              |
| Calcium<br>chromate        |                     | Chromium(<br>VI)<br>compounds |     |      |                              |
| Chrome yellow              |                     | Lead<br>chromate              |     |      |                              |
| C.I. Pigment<br>Red 104    |                     | Lead<br>chromate              |     |      |                              |
| C.I. Pigment<br>Yellow 34  |                     | Lead<br>chromate              |     |      |                              |
| Chromium                   | Cr(CO) <sub>6</sub> | -                             | -   | -    | -                            |

| Substances<br>[CAS nummer]                           | Formula                    | MAK(mg/m <sup>3</sup> )       | H:S         | Carc | Germ<br>cell<br>matatio<br>n |
|--|----------------------------|-------------------------------|-------------|------|------------------------------|
| carbonyl<br>[13007-92-6]                             |                            |                               |             |      |                              |
| Chromium(III)<br>compounds                           | see Section<br>IIb and XII | -                             | Sh43        |      |                              |
| Chromium(VI)<br>compounds<br>(inhalable<br>fraction) | see Section<br>XII         | -                             | H44<br>Sh45 | 1    | 2<br>Preg<br>abs H           |
| Lead chromate  |                            | Chromium(<br>VI)<br>compounds |             |      |                              |
| Strontium<br>chromate                                |                            | Chromium(<br>VI)<br>compounds |             |      |                              |
| Zinc chromate  |                            | Chromium(<br>VI)<br>compounds |             |      |                              |

43 does not apply for chromium(III) oxide and similar poorly soluble chromium (III) compounds

44 the chromates of barium, lead, strontium and zinc are not designated with "H"

45 barium chromate and lead chromate are not designated with "Sh"

#### (6) 프랑스의 노출기준(VLEs)

프랑스 INRS(National Research and Safety Institute for the Prevention of Work Accidents and Occupational Disease)에서는 크롬 및 그 화합물에 비규제 한계치(Les valeurs limites d'exposition

professionnelle, VLEP)를 살펴보면 8시간 기준 0.001 mg/m<sup>3</sup>이었고, VLEP CT(VLEP CT s'endendent pour des concentrations mesurées sur une durée de 5 min)는 5분 동안 측정 시 농도는 0.005 mg/m<sup>3</sup>로 규정하고 있다.

한편 크롬(금속), 무기 크롬 화합물(II) 및 무기(불용성) 크롬 화합물(III)은 8시간 VLEP는 2 mg/m<sup>3</sup>로 설정되어 있다.

〈표 III-13〉 크롬 및 그 화합물의 프랑스 VLEPs

| Désignation  | N° CAS    | VLEP8h<br>(mg.m <sup>-3</sup> ) | VLEP<br>CT<br>(mg.m <sup>-3</sup> ) | Année |
|--|-----------|---------------------------------|-------------------------------------|-------|
| Chrome hexavalent et ses composés  | -         | 0.001                           | 0.005                               | 2012  |
| Chrome (métal), composés de chrome inorganiques (II) et composés de chrome inorganiques (insolubles) (III) | 7440-47-3 | 2                               |                                     | 2007  |

## 2) 국내외 크롬 및 그 화합물의 화학물질별 노출기준

IFA(Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung)의 GESTIS-Stoffdatenbank에서 전 세계의 직업적 노출기준(International Limit Values)에 대한 정보가 제시되어 있다. 크롬 및 그 화합물의 노출기준 분류는 총 30가지로 확인되었다. 그러나 우리나라의 직업적 노출기준에 설정된 크롬 및 그 화합물을 중심으로 국내외 노출기준과 비교하였다.

크롬 화합물의 노출기준 구분은 수용성/불용성, 무기/유기, 산화수(oxidation number) 등에 따라 분류하고 있으며, 총 40여 종으로 매우 다양하다. 우리나라는 6가 크롬 화합물에 대해서만 수용성과 불용성을 구분하고 있는데, 다른 국가에서는 2가, 크롬 3가 화합물을 용해도와 무기/유기를 추가하여 구분하기도 했다. 용해도와 무기/유기를 구분하지 않고 화합물로서의 분류도 존재했다. 이러한 요인이 크롬의 노출기준을 더욱 세분화시키고 혼란을 줄 수 있다. ACGIH의 크롬 화합물 TLV는 2018년을 기준으로 개정되었다. 크롬 3가 화합물은 0.5 mg/m<sup>3</sup>에서 0.003 mg/m<sup>3</sup>로 6가 불용성화합물과 수용성화합물은 각각 0.01 mg/m<sup>3</sup>, 0.05 mg/m<sup>3</sup>에서 6가 화합물로 통합되면서 0.0002 mg/m<sup>3</sup>로 개정되었다. 비교적 최근에 ACGIH TLV가 개정되었기 때문에 국가에 따라 큰 차이를 보이는 경우가 있다(박정임 등, 2020).

〈표 III-14〉 크롬 및 그 화합물의 노출기준 정보

| Substance                          | Remark                           | CAS No.   |
|------------------------------------|----------------------------------|-----------|
| Chromic acid and chromates         | as Cr, except SrCrO <sub>4</sub> | 7738-94-5 |
| Chromite ore processing (Chromate) | as Cr                            | 7440-47-3 |
| Chromium, metal                    |                                  |           |

| Substance  | Remark          | CAS No.    |
|--|-----------------|------------|
| Chromium metal and insoluble salts               |                 | 7440-47-3  |
| Chromium metal and its inorganic compounds       |                 |            |
| Chromium(II) compounds                           | as Cr           | 22541-79-3 |
| Chromium(II) compounds, inorganic                |                 |            |
| Chromium and Cr(II); Cr(III) compounds           | insoluble as Cr | 7440-47-3  |
| Chromium(III) chromate                           |                 | 24613-89-6 |
| Chromium(III) compounds, inorganic, insoluble    |                 |            |
| Chromium(III) compounds                          | as Cr           | 16065-83-1 |
| Chromium(III) compounds, soluble                 |                 |            |
| Chromium(III) sulphate, basic                    | as Cr           | 39380-78-4 |
| Chromium(VI) compounds                           | as Cr           | 18540-29-9 |
| Chromium(VI) compounds, insoluble                | as Cr           |            |
| Chromium(VI) compounds, water-soluble compounds  |                 | 7440-47-3  |
| Chromates (VI), dichromates (VI)                 | as Cr (VI)      |            |
| Chromium(VI) oxide                               |                 | 1333-82-0  |
| Chromium dihydrogen phosphate                    | as Cr           | 27096-04-4 |
| Chromium hydroxide sulphate                      | as Cr           | 12336-95-7 |
| Chromium(III) compounds, water-soluble compounds | 7440-47-3       |            |
| Chromyl chloride                                 |                 | 14977-61-8 |
| Chromyl chloride                                 | as Cr           | 14977-61-8 |

| Substance           | Remark              | CAS No.    |
|---------------------|---------------------|------------|
| tert-Butyl chromate | as CrO <sub>3</sub> | 1189-85-1  |
| tert-Butyl chromate | as Cr               | 1189-85-1  |
| Calcium chromate    | as Cr               | 13765-19-0 |
| Lead chromate       | as Pb               | 7758-97-6  |
| Lead chromate       |                     | 7758-97-6  |
| Zinc chromates      | as Cr               | 13530-65-9 |
| Strontium chromate  |                     | 7789-06-2  |

(1) 크롬광가공(크롬산)

고용노동부의 크롬광가공(크롬산)에 대한 노출기준은 as Cr, 0.05 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 벨기에, 캐나다-퀘벡, 뉴질랜드 모두 0.05 mg/m<sup>3</sup>로 채택하고 있다.

〈표 III-15〉 크롬(금속) / Chromite ore processing(Chromate)

| 국가            | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation |
|---------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Belgium       | 0,05                    |                          |          |
| Canada-Québec | 0,05                    |                          |          |
| New Zealand   | 0,05                    |                          |          |
| South Korea   | 0,05                    |                          |          |

(2) 크롬(금속)

고용노동부의 크롬(금속)에 대한 노출기준은 0.5 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 대부분의 국가인 벨기에, 캐나다, 핀란드, 이태리 등에서 우리나라와 동일한 수준을 채택하고 있었다. 다만 호주(2 mg/m<sup>3</sup>), 유럽연합(2 mg/m<sup>3</sup>), 남아공화국(1 mg/m<sup>3</sup>)은 우리나라에 비해 낮은 수준으로 설정하고 있다.

〈표 III-16〉 크롬(금속) / Chromium, metal[7440-47-3]

| 국가                  | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation               |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| Austria             | 2                       |                          |                        |
| Belgium             | 0,5                     |                          |                        |
| Canada-Québec       | 0,5                     | 2                        |                        |
| European Union      | 2                       |                          |                        |
| Finland             | 0,5                     |                          |                        |
| Italy               | 0,5                     |                          |                        |
| Japan(JSOH)         | 0,5                     |                          |                        |
| Norway              | 0,5                     |                          |                        |
| South Africa        | 1 (1)                   |                          | (1) Inhalable fraction |
| South Africa Mining | 0,5                     |                          |                        |
| Switzerland         | 0,5 (1)                 |                          | (1) Inhalable fraction |
| The Netherlands     | 0,5                     |                          |                        |
| USA-NIOSH           | 0,5                     |                          |                        |

### (3) 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)

고용노동부의 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)에 대한 노출기준은 0.01 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 캐나다, 아일랜드, 이스라엘이 우리나라와 동일한 수준으로 규제하고 있었다. 한편, ACGIH TLV(0.0002 mg/m<sup>3</sup>)보다 더 강력한 규제기준은 뉴질랜드로 0.00002 mg/m<sup>3</sup>를 채택하고 있으며 15분간 기준은 0.0005 mg/m<sup>3</sup>로 설정되었다.

〈표 III-17〉 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물) / Chromium(VI) compounds, insoluble [7429-90-5]

| 국가             | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation                     |
|----------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Australia      | 0,05                    |                          |                              |
| Canada-Ontario | 0,01                    |                          |                              |
| Canada-Québec  | 0,01                    |                          |                              |
| Ireland        | 0,01                    |                          |                              |
| Israel         | 0,01                    |                          |                              |
| New Zealand    | 0,00002                 | 0,0005 (1)               | (1) 15 minutes average value |
| South Korea    | 0,01                    |                          |                              |

### (4) 크롬(6가)화합물(수용성)

크롬(6가)화합물(수용성)에 대한 고용노동부의 노출기준은 0.05 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 캐나다-퀘벡, 이스라엘 및 남아공화국-광산이 우리나라와 동일하게 0.05 mg/m<sup>3</sup>로 설정되어 있다. 남아공화국의 경우 가장 낮은 수준인 0.0004 mg/m<sup>3</sup>(단시간 노출기준 0.001 mg/m<sup>3</sup>)을 채택하고 있다.

〈표 III-18〉 크롬(6가)화합물(수용성) / Chromium(VI) compounds,  
water-soluble compounds [7440-47-3]

| 국가                  | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation   |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Canada-Québec       | 0,05                    |                          |  |
| Israel              | 0,05                    |                          |  |
| South Africa        | 0,0004 (1)(2)           | 0,001 (1)(2)(3)          | (1) Inhalable fraction<br>(2) Skin<br>(3) 15 minutes average value |
| South Africa Mining | 0,05                    |                          |  |

#### (5) 크롬산 연(Lead chromate)

크롬산 연은 크게 as Cr과 as Pb로 구분되면, 이를 별도로 살펴보면 아래와 같다.

##### 가) 크롬산 연(Lead chromate, as Cr)

우리나라 크롬산 연(Lead chromate, as Cr)에 대한 노출기준은 0.012 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 우리나라와 동일한 수준으로 노출기준을 설정한 국가는 캐나다, 아일랜드, 이스라엘, 싱가포르, 스페인으로 확인되었다. 더 완화된 0.05 mg/m<sup>3</sup>를 채택하고 있는 국가는 오스트레일리아, 호주가 있었고, 단시간 노출기준을 설정하고 있는 국가는 호주(0.2 mg/m<sup>3</sup>), 스웨덴(0.015 mg/m<sup>3</sup>) 및 네덜란드(0.025 mg/m<sup>3</sup>)가 있었다.

〈표 III-19〉 크롬산 연 / Lead chromate(as Cr) [7758-97-6]

| 국가             | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation   |
|----------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Australia      | 0,05                    |                          |  |
| Austria        | 0,05 inhalable aerosol  | 0,2 inhalable aerosol    |  |
| Belgium        | 0,01 (1)                |                          | (1) Additional indication "C" means that the agent falls within the scope of Title 2 concerning carcinogenic, mutagenic and reprotoxic agents of Book VI of the Codex on well-being at work. |
| Canada-Ontario | 0,012                   |                          |  |
| Canada-Québec  | 0,012                   |                          |  |
| Ireland        | 0,012 (1)               |                          | (1) as Cr (2) as Pb  |
|                | 0,1 (2)                 |                          |  |
| Israel         | 0,012                   |                          |  |
| Norway         | 0,005 (1)               |                          | (1) as Cr(VI)  |
| Singapore      | 0,012                   |                          |  |
| South Korea    | 0,012                   |                          |  |
| Spain          | 0,012 (as Cr)           |                          |  |
|                | 0,05 (as Pb)            |                          |  |

|                 |           |              |  |
|-----------------|-----------|--------------|--|
| Sweden          | 0,005 (1) | 0,015 (1)(2) | (1)<br>Inhalable fraction<br>(2) 15 minutes<br>average value |
| The Netherlands |           | 0,025 (1)    | (1) 15 minutes<br>average value                              |

#### 나) 크롬산 연(Lead chromate, as Pb)

크롬산 연(Lead chromate, as Pb)에 대한 우리나라 노출기준은 0.05 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 우리나라와 동일한 수준으로 노출기준을 설정한 국가는 캐나다(온타리오), 스페인이 있었으며, 아일랜드는 가장 낮은 수준인 0.012 mg/m<sup>3</sup>를 채택하고 있었다. 한편 단기노출기준은 확인되지 않았다.

〈표 III-20〉 크롬산 연 / Lead chromate(as Pb) [7784-40-9]

| 국가             | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation |
|----------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Canada-Ontario | 0,05                    |                          |          |
| Canada-Québec  | 0,15                    |                          |          |
| Ireland        | 0,012                   |                          |          |
| Singapore      | 0,15                    |                          |          |
| South Korea    | 0,05                    |                          |          |
| Spain          | 0,05                    |                          |          |

#### (6) 크롬산 아연(Zinc chromates, as Cr)

우리나라 크롬산 아연(Zinc chromates, as Cr)에 대한 노출기준은 0.01 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 우리나라와 동일한 노출기준을 설정한 국가는 오스트레일리아, 벨기에, 캐나다(온타리오), 이스라엘, 루마니아, 싱가포르, 스페

인, 스위스가 있었다. 우리나라보다 크롬산 아연에 대한 노출기준이 강력한 국가는 캐나다(퀘벡, 0.001 mg/m<sup>3</sup>), 핀란드 및 스웨덴(0.005 mg/m<sup>3</sup>), 미국 NIOSH의 노출기준은 우리나라 기준보다 1/10 수준인 0.001 mg/m<sup>3</sup>로 설정되어 있다. 한편, 스페인은 크롬산 아연을 감작물질로 지정하고 있었고, 단기간 노출기준을 설정하고 있는 국가는 호주, 헝가리, 스웨덴 및 노르웨이가 있었다.

〈표 III-21〉 크롬산 아연 / Zinc chromates(as Cr) [13530-65-9]

| 국가             | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation   |
|----------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Australia      | 0,01                    |                          | (1) Inhalable fraction (2) 15 minutes average  |
| Austria        | 0,05 (1)                | 0,2 (1)(2)               |  |
| Belgium        | 0,01 (1)                |                          | (1) Additional indication "C" means that the agent falls within the scope of Title 2 concerning carcinogenic, mutagenic and reprotoxic agents of Book VI of the Codex on well-being at work. |
| Canada-Ontario | 0,01                    |                          |  |
| Canada-Québec  | 0,001                   |                          |  |

| 국가              | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation  |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|---|
| Finland         | 0,005 (1)               |                          | (1) including zinc potassium chromate               |
| Hungary         |                         | 0,01                     |   |
| Israel          | 0,01                    |                          |   |
| Romania         | 0,01 (1)                |                          | (1) as ZnCrO <sub>4</sub>                           |
| Singapore       | 0,01                    |                          |   |
| South Korea     | 0,01                    |                          |   |
| Spain           | 0,01 (as Cr)            |                          | sen   |
| Sweden          | 0,005 (1)               | 0,015 (1)(2)             | (1) Inhalable fraction (2) 15 minutes average value |
| Switzerland     | 0,01 inhalable aerosol  |                          |   |
| The Netherlands |                         | 0,01 (1)                 | (1) 15 minutes average value                        |
| USA-NIOSH       | 0,001                   |                          |   |
| United Kingdom  | 0,05                    |                          |   |

(7) 크롬(2가)화합물(Chromium(II)compounds, as Cr)

크롬(2가)화합물(Chromium(II)compounds, as Cr, CAS No. 22541-79-3)의 노출기준이 설정되어 있는 국가는 우리나라를 포함하여 6개국으로 다른 물질에 비해 채택하고 있는 국가가 많이 존재하지는 않았다. 우리나라는 크롬(2가)화합물의 노출기준을 0.5 mg/m<sup>3</sup>로 설정하고 있으며 뉴질랜드(0.05 mg/m<sup>3</sup>) 이외에는 모두 우리나라 노출수준과 동일하게 설정되어 있다.

〈표 III-22〉 크롬(2가)화합물 / Chromium(II) compounds(as Cr)[22541-79-3]

| 국가          | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation |
|-------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Australia   | 0,5                     |                          |          |
| Finland     | 0,5                     |                          |          |
| New Zealand | 0,05                    |                          |          |
| Norway      | 0,5                     |                          |          |
| South Korea | 0,5                     |                          |          |
| USA-NIOSH   | 0,5                     |                          |          |

한편, 크롬(2가)화합물을 현재 우리나라 노출기준 CAS No.와 동일한 Chromium and Cr(II); Cr(III) compounds insoluble as Cr[7440-47-3]의 경우 대부분의 국가에서 노출기준 0.5~2 mg/m<sup>3</sup>을 채택하고 있다.

〈표 III-23〉 크롬(2가)화합물 / Chromium(II) compounds(as Cr)[7440-47-3]

| 국가        | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation |
|-----------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Australia | 0,5                     |                          |          |
| Belgium   | 0,5                     |                          |          |

|                |          |             |  |
|----------------|----------|-------------|--|
| Canada-Québec  | 0,5      |             |  |
| Denmark        | 0,5      | 1,0         |  |
| European Union | 2        |             | Bold-type:<br>Indicative<br>Occupational<br>Exposure Limit<br>Value (IOELV) ~<br>(for references<br>see bibliography)                              |
| Finland        | 0,5      |             |  |
| France         | 2        |             | Italic type:<br>Indicative<br>statutory limit<br>values  |
| Germany(AGS)   | 2 (1)(2) | 2 (1)(2)(3) | (1) Except<br>chromium(III)<br>sulphate, basic<br>(CAS:<br>12336-95-7,<br>39380-78-4) (2)<br>Inhalable fraction<br>(3) 15 minutes<br>average value |
| Hungary        | 0,5      | 2 (1)       | (1) 15 minutes<br>average value  |
| Ireland        | 2        |             |  |
| Israel         | 0,5      |             |  |
| Italy          | 0,5      |             |  |
| LatVla         | 2 (1)    |             | (1) Insoluble Cr(II)<br>and Cr(III) salts  |
| New Zealand    | 0,5      |             |  |

|                            |                       |  |  |
|----------------------------|-----------------------|--|--|
| Norway                     | 0,5                   |  |  |
| People's Republic of China | 0,05                  |  |  |
| Poland                     | 0,5                   |  |  |
| South Africa Mining        | 0,5                   |  |  |
| South Korea                | 0,5                   |  |  |
| Spain                      | 2                     |  |  |
| Sweden                     | 0,5                   |  |  |
| Switzerland                | 0,5 inhalable aerosol |  |  |
| Turkey                     | 2                     |  |  |
| USA-OSHA                   | 0,5                   |  |  |
| United Kingdom             | 0,5                   |  |  |

(8) 크롬(3가)화합물(Chromium(III)compounds, as Cr)

우리나라 크롬(3가)화합물(Chromium(III)compounds, as Cr)에 대한 노출기준은 0.5 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다. 대부분의 국가에서 우리나라와 동일한 노출수준으로 설정한 국가가 대부분이었으며 헝가리만 유일하게 2 mg/m<sup>3</sup>로 완화된 노출기준을 보이고 있었다.

〈표 III-24〉 크롬(3가)화합물 / Chromium(III)compounds, as Cr [16065-83-1]

| 국가             | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation |
|----------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Australia      | 0,5                     |                          |          |
| Canada-Ontario | 0,5                     |                          |          |

|             |     |  |  |
|-------------|-----|--|--|
| Finland     | 0,5 |  |  |
| Hungary     | 2   |  |  |
| Japan(JSOH) | 0,5 |  |  |
| New Zealand | 0,5 |  |  |
| Norway      | 0,5 |  |  |
| Poland      | 0,5 |  |  |
| South Korea | 0,5 |  |  |
| USA-NIOSH   | 0,5 |  |  |

#### (9) 삼차부틸크롬산(tert-Butyl chromate, as CrO<sub>3</sub>)

우리나라 삼차부틸크롬산(tert-Butyl chromate)의 노출기준은 C 0.1 mg/m<sup>3</sup>로 설정되어 있다. 다른 국가에서도 대부분 노출기준의 수준을 천정치(Ceiling) 또는 15분간 노출기준으로서 0.1 mg/m<sup>3</sup>을 채택하고 있었다. 다만 미국 NIOSH RELs의 경우 0.001 mg/m<sup>3</sup>, 벨기에는 0.019 mg/m<sup>3</sup>로 강화된 수준으로 설정되어 있었다. 한편 우리나라와 같이 피부 흡수를 표기하고 있는 국가는 캐나다(퀘벡), 노르웨이, 스페인, 네덜란드 등이 있었다.

〈표 III-25〉 삼차부틸크롬산 / (tert-Butyl chromate, as CrO<sub>3</sub>) [1189-85-1]

| 국가              | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation                              |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Australia       |                         | 0,1 (1)                  | (1) Ceiling limit value               |
| Belgium         | 0,019 (1)(2)(3)         |                          |                                       |
| Canada-Ontario  |                         | 0,1 (1)                  | (1) Ceiling limit value               |
| Canada-Québec   |                         | 0,1 (1)(2)               | (1) Ceiling limit value (2) Skin      |
| France          |                         | 0,1                      |                                       |
| Ireland         |                         | 0,1 (1)                  | (1) 15 minutes average value          |
| Norway          |                         | 0,1 (1)(2)               | (1) Skin (2) Ceiling limit value      |
| Singapore       |                         | 0,1                      |                                       |
| South Korea     |                         | 0,1 (1)(2)               | (1) Ceiling limit value (2) Skin      |
| Spain           |                         | 0,1 (1)(2)               | (1) Skin (2) 15 minutes average value |
| The Netherlands |                         | 0,1 (1)(2)               | (1) Skin (2) Ceiling limit value      |
| USA-NIOSH       | 0,001                   |                          |                                       |
| USA-OSHA        |                         | 0,1 (1)                  | (1) Ceiling limit value               |

(1) Additional indication "C" means that the agent falls within the scope of Title 2 concerning carcinogenic, mutagenic and reprotoxic agents of Book VI of the Codex on well-being at work.  
 (2) Additional indication "D" means that the absorption of the

agent through the skin, mucous membranes or eyes is an important part of the total exposure. It can be the result of both direct contact and its presence in the air. (3) Additional indication "M" means that irritation occurs when the exposure exceeds the limit value or there is a risk of acute poisoning. The work process must be designed in such a way that the exposure never exceeds the limit value. For evaluation, the sampled period should be as short as possible. However, the sampled period shall be long enough to perform a reliable measurement. The measured result shall be related to the considered period.

(10) 스트로튬티움크로메이트(Strontium chromate, as Cr)

우리나라 스트로튬티움크로메이트(Strontium chromate, as Cr)의 노출기준은 시간가중평균 0.0005 mg/m<sup>3</sup>로 설정되어 있으며, 벨기에, 캐나다, 스페인 등 다른 국가에서도 우리나라와 동일한 수준으로 설정하고 있었다. 다만 호주(0.05 mg/m<sup>3</sup>), 핀란드(0.005 mg/m<sup>3</sup>), 및 스웨덴(0.005mg/m<sup>3</sup>)은 우리나라 노출기준 수준보다 완화된 기준을 채택하고 있었다.

〈표 III-26〉 스트로튬티움크로메이트 / Strontium chromate(as Cr) [7789-06-2]

| 국가      | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation                                      |
|---------|-------------------------|--------------------------|---|
| Austria | 0,05 (1)                | 0,2 (1)(2)               | (1) Inhalable fraction (2) 15 minutes average |

| 국가              | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation   |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|--|
| Belgium         | 0,0005 (1)              |                          | (1) Additional indication "C" means that the agent falls within the scope of Title 2 concerning carcinogenic, mutagenic and reprotoxic agents of Book VI of the Codex on well-being at work. |
| Canada-Ontario  | 0,0005                  |                          |  |
| Canada-Québec   | 0,0005                  |                          |  |
| Denmark         | 0,0005                  | 0,001                    |  |
| Finland         | 0,005                   |                          |  |
| Hungary         | 0,005                   |                          |  |
| Israel          | 0,0005                  |                          |  |
| Singapore       | 0,0005                  |                          |  |
| South Korea     | 0,0005                  |                          |  |
| Spain           | 0,0005                  |                          |  |
| Sweden          | 0,005 (1)               | 0,015 (1)(2)             | (1) Inhalable fraction (2) 15 minutes average value  |
| The Netherlands | 5                       | 0,01 (1)                 | (1) 15 minutes average value   |

(11) 칼슘크로메이트(Calcium chromate)

칼슘크로메이트(Calcium chromate)의 노출기준이 설정되어 있는 국가는 우리나라를 포함하여 11개 국으로 확인되었다. 우리나라 노출기준은 0.001 mg/m<sup>3</sup>으로 벨기에, 캐나다, 아일랜드, 이스라엘 등이 동일한 수준이었으며 더 강화된 기준을 채택하고 있는 국가는 없었다. 다만 as Cr으로 관리하는 국가는 벨기에, 핀란드, 이스라엘, 싱가포르 및 네덜란드가 있었고, 단시간노출기준을 설정하고 있는 국가는 호주(0.08 mg/m<sup>3</sup>), 헝가리(0.05 mg/m<sup>3</sup>) 및 네덜란드(0.01 mg/m<sup>3</sup>)가 있었다.

〈표 III-27〉 칼슘크로메이트 / Calcium chromate [13765-19-0]

| 국가      | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation   |
|---------|-------------------------|--------------------------|--|
| Austria | 0,02 (1)(2)(3)          | 0,08 (1)(2)(3)(4)        | (1) as Cr(VI) (2) Inhalable fraction (3) Valid until 17.01.2025 (4) 15 minutes average value   |
|         | 0,01 (1)(2)             | 0,04 (1)(2)(4)           |  |
| Belgium | 0,001 (1)(2)            |                          | (1) as Cr (2) Additional indication "C" means that the agent falls within the scope of Title 2 concerning carcinogenic, mutagenic and reprotoxic agents of Book VI of the Codex on |

| 국가              | TWA(mg/m <sup>3</sup> ) | STEL(mg/m <sup>3</sup> ) | Notation                               |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|--|
|                 |                         |                          | well-being at work.                    |
| Canada-Ontario  | 0,001                   |                          |  |
| Canada-Québec   | 0,001                   |                          |  |
| Finland         | 0,005 (1)               |                          | (1) calculated as Cr                   |
| Hungary         |                         | 0,05                     |  |
| Ireland         | 0,001 (1)               |                          | (1) as Cr                              |
| Israel          | 0,001                   |                          |  |
| Singapore       | 0,001 (1)               |                          | (1) as Cr                              |
| South Korea     | 0,001                   |                          |  |
| Spain           | 0,001 (as Cr)           |                          |  |
| The Netherlands |                         | 0,01 (1)(2)              | (1) as Cr (2) 15 minutes average value |

### 3) 크롬 및 그 화합물에 대한 독성학적 고찰

국제노동기구(International Labour Organization) 및 세계보건기구(World Health Organization)에서는 United Nations Environment Programme으로 International Programme on Chemical Safety를 발간하고 있다. Environmental Health Criteria 61은 크롬에 대한 내용으로 물리화학적 성상, 직업적 노출과 독성에 대한 부분만 발췌하여 수록하였다.

#### (1) 물리화학적 성상(Physical and Chemical Properties)

크롬(원자번호 24, 상대 원자량 51.996)은 -2가에서부터 +6가 산화상태로 존재할 수 있지만 0, +2, +3 그리고, +6가 상태가 흔하다. 2가 크롬은 대부분의 화합물에서 불안정하여 공기 중에서 3가로 쉽게 산화된다. 3가와 6가 크롬이 공중보건학적으로 중요하다. 그리고 이러한 두 산화상태가 인간을 포함한 살아있는 생물에 미치는 영향과 특성은 상당히 다르다. 따라서 이들은 항시분리해서 조사되어야 한다. 즉, 한 성분으로서 크롬의 생물학적 영향을 일반화하는 것은 타당하지 않다.

3가 크롬과 6가 크롬사이의 관계는 다음과 같이 기술될 수 있다.



이러한 관계는 6가 크롬화합물의 강한 산화력과 3가 크롬이 6가 크롬으로 산화하기 위해서는 상당한 에너지가 필요함을 보여 주고 있다. 실질적으로 이러한 산화는 생태계에서 결코 일어날 수 없다. 6가 크롬은 유기체내에서 동시에 환원이 일어난다. 6가 크롬이 3가 크롬으로 점차적인 환원을 실험실에서 크롬세척용액의 색깔변화로 알 수 있는 데, 유기물의 존재하에서 광채나는 오

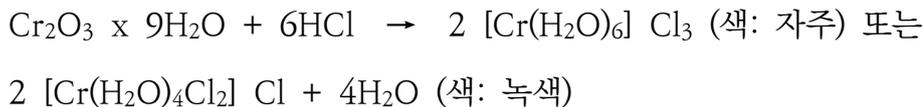
렌지색이 녹색으로 변한다. 혈액 내에서 크롬산염은 일단 적혈구 세포막을 통과하면 3가 상태로 환원된다. 그리고 헤모글로빈과 세포나 다른 구성성분과 결합하여 다시 세포 밖으로 빠져 나오지 못한다.

Feldman(1968)은 chromium-51 labelled chromate를 쥐에 주입하여 빠른 환원을 증명해 보였다.  $\text{CrF}_6$  화합물이 잘 알려져 있기는 하지만, 6가 크롬의 안정된 형태는 거의 항상 산소와 결합한 상태이다. 3가 크롬은 화합물의 형태를 취하고 결코 이온 상태로 존재하지는 않는다. 일반적으로 결합수는 6이고, 복합체는 대개 8면체이다. 많은 복합체와 크롬의 킬레이트가 조사되었는데, 단순히 hexa- 또는 tetra-aquo 복합체에서 유기산, 비타민, 아미노산 그리고 기타화합물이 있다. 크롬화합물의 리간드 교환 속도는 코발트 복합체를 제외하면 다른 전이 요소에 비해 낮다. 대부분의 3가 복합체는 용액 내에서 역동학적으로 안정돼 있다. 이러한 성질이 3가 크롬 화합물의 전기화학적 안정성과 상대적인 불활성을 가져온다. 그러나 동물 유기체 환경인, 거의 중성 또는 알칼리 pH에서는 단순 크롬화합물은 빠르게 불용성이 된다. 따라서 3가 크롬이 생물학적 리간드에 결합하는 것이 생리적인 pH에서 용해성, 생물학적 기능, 그리고 장 흡수 이용률에 반드시 필요하다. Cotton & Wilkinson(1966)과 Mertz(1969)은 각각 배위화학 그리고 특이적인 생화학적 반응을 검토하였다.

#### 일반적인 크롬 화합물

금속 크롬(산화상태=0)의 비용해성 "sandwich 복합체"가 알려져 있는데 (예,  $\text{Cr}(\text{C}_6\text{H}_6)_2$ ), 이들의 실질적인 적용은 거의 없다. 염화크롬(chromium (II) Chloride,  $\text{CrCl}_2$ )과 같은 2가 크롬은 실험실에서 강한 환원제로 사용될 수 있으나 산업장에서는 거의 사용되지 않는다. 알려진 수백 가지의 3가 크롬 화합물 중에서, 산화크롬(chromic oxide,  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ )이 페인트에서 색소로, 소화기 연구에서 대변 표지자로 사용된다. 산에서 용해되고 다음과 같

이 hexa-aquo 또는 tetra-aquo 복합체를 형성한다.



염화크롬( $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_3$  또는  $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_4\text{Cl}_2]\text{Cl}$ )은 가죽 무두질을 위해 기본 용액에 사용된다. 플루오르화물은 인쇄, 염색 산업에서 사용되고, 황산크롬, 질산크롬은 안료와 인쇄 염료로 사용된다. 수많은 크롬 유기복합체중의 하나인 dinicotinatogluthionato-chromium 복합체를 이스트(yeast)에서 분리할 수 있는데, 이복합체는 동물유기물에서 생리화학적 활성화 상태로 가정되며, 정확한 구조는 알려져 있지 않다(Toepfer et al., 1977).

지구상에 가장 중요한 크롬 침전물은 원소상태(elemental)나 3가 크롬 산화상태이다. 지구상에 6가 크롬 화합물은 주로 인간에 의해 만들어 졌고, 이에 대한 경험이 매우 짧다. 크롬산염과 중크롬산염은 소다회(灰) 존재하에 크롬광석을 배소(焙燒)하여 만들어 진다. 이로부터 황산을 첨가하게 되면 산화크롬(6가)(chromium (VI) oxide,  $\text{CrO}_3$ )가 침전된다. 중크롬산나트륨과 중크롬산칼륨이 다른 크롬 화합물, 특히 산화크롬(6가) 출처로서 산업장에서 널리 사용되고 있고, 이러한 과정이 6가 크롬 오염의 주 근원이다.

## (2) 크롬의 자연발생원

크롬은 자연계 도처에 있어, 공기 중에  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하에서부터, 토양에서 4 g/kg 농도까지 검출될 수 있다. 자연계에 발생하는 크롬은 거의 항상 3가 상태에 있으며, 6가 크롬은 거의 모두 인간의 활동으로부터 기인한다. Merian(1984) 은 자연환경에 크롬의 전체적인 근원을 다음과 같이 정리하였다: 화산방출(1%이내), 생물학적 순환(15%), 인간에 의한 방출(70%). 인간에

의한 방출 중에서 3%는 광석과 금속 생산으로부터, 60%는 금속사용으로부터, 7%는 석탄 연소와 다른 연소과정에서 발생된다.

#### 가) 공기(Air)

산업화 되지 않은 지역에서 공기 중 크롬농도는  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만이다. 공기 중 크롬의 자연적 발생은 산림화재 그리고 화산폭발에 의한다. 인간에 의해서 모든 형태의 연소와 크롬 산업에서 배출로부터 크롬이 발생된다. 공기 중 크롬의 화학적 형태는 잘 알려져 있지 않다. 그러나 공기 중 크롬의 일부는 6가 상태이고, 고열의 연소에서 유래되었을 것으로 추정하고 있다. 삼산화 크롬(Chromium trioxide,  $\text{CrO}_3$ ) 이 공기 중에 가장 중요한 화합물이다 (Sullivan, 1969).

### (3) 크롬의 직업적 노출

#### 가) 흡입 노출(Inhalation exposure)

크롬 광석 광산에서 공기 중 분진의 농도는 사업장에 따라 다르지만,  $1.3\sim 16.9 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이다. 분쇄 그리고 분류공장에서는  $6.1\sim 148 \text{ mg}/\text{m}^3$  범위이다. 침착된 분진에서 크롬함량( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )은  $3.6\sim 48\%$ 로 다양하다. 1953~63년 동안 대기 중 분진의 농도는  $14\sim 38 \text{ mg}/\text{m}^3$  이었는데, 합금철 공장 내에 분진 내 크롬은 작업장에 따라 차이가 있었는데,  $16\sim 42\%$  이었다 (Pokrovskaja & Shabynina, 1974). 과거 정제된 철크롬 합금의 생산은 작업장 내 분진의 농도를 높였다( $10\sim 30 \text{ mg}/\text{m}^3$ ) (Velichkovsky & Pokrovskaja, 1973). 위생시설과 환경측정의 도입 후 6가 크롬의 농도는  $0.03\sim 0.06 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이었다 (Velichkovsky & Pokrovskaja, 1973).

크롬산염 제조시, 산화상태, 용해성 및 공기매개 조성이 공장 내 지역마다 다르다. 광석 분쇄지역에서는 3가, 비용해성 미립자에 노출되고, 침출지역 (leaching area)에서는 3가 및 6가 크롬, 용해성비용해성 미립자 및 비말에 노출되고, 크롬산염 제조과정 건식 말미에는 용해성이 높은 미립자형태의 6

가 크롬산염과 침출 후 비용해성 잔재에 노출된다(Velichkovsky & Pokrovskaja, 1973). 로스팅(roasting)과정에서 재순환시 잔재로 크롬산 칼슘을 포함하는데, 현재까지는 동물실험을 기초로 크롬산 칼슘이 발암성이 있는 것으로 보고 있다. 금속 표면에 크롬 도금시 작업장내에서 공기 중으로 6가 크롬을 내는데 그 농도는  $0.04\sim 0.4 \text{ mg/m}^3$ (Yunisova & Pavlovskaja, 1975) 범위였다. 한 전기도금 공장에서 공기 중 크롬산 증기의 농도는  $0.1\sim 1.4 \text{ mg/m}^3$ 이었다(Gomes, 1972). 스웨덴 크롬 도금 공장에서 3개의 다른 용해조 인접지역에서 크롬 농도는  $20\sim 46 \text{ } \mu\text{g chromium (VI)/m}^3$ 이었고, 다른 공장에서는 모든 용해조 인접지역에서 노출농도가  $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  미만이었다(Lindberg et al., 1985).

여러 연구자들이 용접 중 크롬에 의한 직업적 노출을 분석하고 그 결과를 출판하였다(Stern, 1981). 크롬과 니켈 전극을 사용하여 금속을 용접하는데 있어 높은 열이 필요하다. 이 열은 전기전극과 용접할 금속을 녹이고 가스, 산화물 및 기타 화합물을 생성한다. 이러한 화학작용은 각각의 경우에 사용된 기술, 물질 및 용접 매개변수에 영향을 받는다(Lautner et al., 1978). 6가 크롬 화합물이 용접자 호기 지역 내에서  $3.8\sim 6.6 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  의 농도로 검출된다(Migai, 1975). 전체적으로 용접산업에서 용접으로 인해 발생하는 평균 노출은 균일하지는 않고, 용접과정의 유형과 상태에 따라 다르다(Stern, 1982). 시멘트 제조 공장에서 작업장 대기 중 6가 크롬의 농도는  $0.0047\sim 0.008 \text{ mg/m}^3$ 이다. 크롬의 존재는 가마가 크롬화합물을 17~28% 함유한 크롬-마그네슘 벽돌로 구성되었다는 사실로 설명된다. 미국 시멘트 42개 유형이 총 크롬 함량, 특히 6가 크롬에 대해 분석이 되었는데, 6가 크롬이 42개 표본 중 18에서 존재하였고, 그 농도는  $0.1\sim 5.4 \text{ g/kg cement}$ 이었다. 총 크롬의 함량은  $35\sim 173 \text{ g/kg}$ 이었다(Perone et al., 1974). 유럽 9개 지역으로부터 포트랜드 시멘트 59개 표본을 분석한 결과는 황산나트륨(sodium sulfate)으로 추출된 6가 크롬의 함량은  $1\sim 83 \text{ g/kg of cement}$ 이었고, 총 크롬 함량은  $35\sim 173 \text{ g/kg}$  이었다(Fregert & Gruvberger, 1972).

#### 나) 피부 노출(Dermal exposure)

직업적 피부노출은 Aitio et al.(1984)이 황산크롬(3가)의 경피흡수에 대해 의문점을 제기하기는 하지만 경피 흡수와 피부에 악영향을 줄 수 있다. 크롬 특히 크롬산염은 가장 흔한 접촉 알레르겐이고, 직업성 접촉성 피부염에 있어 중요성이 크다(Thormann et al., 1979). 크롬 습진은 주로 건설노동자들에게서 가장 흔하게 발생한다. 그 외에도 페인트공, 아연도금공, 기계 드릴공, 금속공, 그래픽 예술가 및 목재, 화학, 가죽, 섬유 산업 노동자에서도 흔하게 발생한다(Polak et al., 1973). 이는 많은 일상생활품으로부터 크롬에 흔하게 노출되고 있음을 반영한다. 시멘트의 피부 노출이 대부분의 위험집단 중에서 건설노동자들에서 특히 중요하다.

#### (4) 크롬의 독성연구(Toxicity Studies)

크롬 화합물들의 독성학은 US National Academy of Science(US NAS, 1974a), Langard과 Norseth(1979), the International Agency for Research on Cancer(IARC, 1980), Langard(1980a, 1982) 및 Burrows (1983)에 의해 검토되었다. 독성학적 문제점들을 논의하는 데 있어 크롬과 그 화합물의 여러 산화상태를 구별하는 것이 중요하다. 3가 크롬은 음식과 식수로 동물에 투여되었을 때, 높은 용량에서도 조사 해로운 영향을 주는 것 같지 않다(US NAS, 1974a). 크롬의 급성 및 만성 독성은 주로 6가 크롬 화합물에 원인이 된다. 시약 등급의 3가 크롬 화합물뿐 만 아니라 산업장 3가 크롬화합물 모두 6가 크롬에 의해 오염될 수 있다는 것이 밝혀졌기 때문에 실험 연구의 평가는 어렵다(Petrilli & DeFlora, 1978a; LeVIs & Majone, 1979). 특히, 화학물의 순수성이 알려져 있지 않을 때는 더욱 그렇다. 6가 크롬과 3가 크롬의 생물학적 효과의 감별이 어렵다. 왜냐하면 6가 크롬이 조직 내 세포막을 통과한 후 3가 크롬으로 즉시 환원되기 때문에(Gray & Sterling, 1950; US NAS, 1974a), 관찰된 현상이 이러한 환원에 의한 영향인지, 세포에서 흡

수된 후 리간드에 의한 3가 크롬의 트래핑(trapping)에 의한 것이니 분명하지 않기 때문이다.

자료를 평가하는데 있어 또 다른 문제점은 투여 경로에 관한 것이다. 경구로 투여된 6가 크롬은 부분적으로 위산에 의해 3가 크롬으로 환원된다(Donaldson & Barreras, 1966; DeFlora & Boido, 1980). 그래서 효과의 유무는 주로 투여한 6가 크롬이 아니라 주로 3가 크롬에 의해 영향을 받을 것이다.

#### (5) 크롬의 독성영향

##### 가) 급성 독성 영향(Acute Toxic Effects)

성인에서 용해성 크롬산염의 경구 치사량은 50 mg/kg(RTECS, 1978)과 70 mg/kg(Deichmann & Gerarde, 1969) 사이라고 생각된다. 독성의 임상적인 특징은 구토, 설사, 출혈성 체질 그리고 심혈과 쇼크를 일으키는 소화기관으로 출혈 등이다. 환자가 대략 8일 생존한다면, 현저한 특징은 간괴사(Brieger, 1920), 신장 세뇨관 괴사, 및 혈액생성기관의 중독(Langard, 1980) 등이다. 1.5 g의 중크롬산칼륨을 섭취한 14세 소년이 8일 후 사망하였다. Kaufmann et al.(1970)은 또한 소견의 뇌에서 비대와 부종을 보고하였다.

##### 나) 만성 독성 영향(Chronic Toxic Effects)

3가 크롬과 6가 크롬의 만성적인 영향을 Langard & Norseth(1979)이 검토한 연구에서 가장 중요한 특징은 피부와 점막의 변화, 알레르성 피부 및 폐기관지 영향들이었다. 중요한 전신 영향은 신장, 간, 소화기관 및 순환기계에서 일어난다.

Mancuso (1951)은 직업적으로 크롬산염에 노출된 사람들에서 여러 생물

학적 변수들을 연구하여, 임상적인 증후 및 증상과 관련을 시켰다. 그는 백혈구 증가증, 백혈구 감소증, 단구 증가증(monocytosis), 호산구 증다증(eosinophilia), 혈색소 감소와 출혈시간 지연을 관찰하였다. 그러나 이들 중 어느 것도 믿을 만한 검사로서 도움이 될 만큼 충분히 일치되지 않았다.

크롬 화합물에 노출된 94명의 대상자에서 경도의 정색소성 빈혈이 Myslyaeva(1965)에 의해 보고되었는데, 이들 중 68명이 만성중독의 증후를 나타냈다. Baetjer et al.(1959b)의 보고가 단지 3 증례에 기초하였다고 할지라도 크롬산염이 적혈구에 우선적으로 달라붙는다는 것을 가리킨다. Koutras et al.(1964)는 적혈구 효소 glutathione reductase가 5 - 25 mg/kg body weight의 크롬 농도에 의해 억제됨을 보고하였다. 그러나 가장 낮은 유효농도는 과노출된 사람에서조차 상당히 과다한 수준이다. 그래서 모든 시도들이 만성 크롬독성을 평가하기 위한 특이적이고 민감한 생화학적 검사를 찾는데 실패하였다.

중크롬산염을 생산하는 공장에서 일하는 그리고 근접한 곳에서 사는 임신 여성에 대해 장기간 감시체계를 대조군에 비해 혈중 및 요중 크롬 농도가 상승되었다는 것이 밝혀졌다(Shmitova, 1980). 임신 32주에 혈중 크롬 농도는 여성노동자들에서 2.5 mg/L, 공장근처에 사는 여성에서 1.2 mg/L, 대조군에서는 0.19 mg/L이었다. 소변내 농도는 각각 1, 0.47, and 0.045 mg/L였다. 제대정맥은 각각 1.8, 0.66, and 0.37 mg chromium/L의 크롬농도를 보였다. 조사된 여성에서 태반의 크롬농도는 각각 162, 179, and 40  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 였다. 모유에서의 농도는 119, 20, and 31  $\mu\text{g}/\text{L}$ 이었고, 이는 크롬이 태반에서 모유 그리고 태아와 유아로 갈수 있다는 것을 의미한다. 중크롬산염 공장에서 일하는 여성은 산과적 병리와 geotoses의 높은 발생률을 나타냈다. 중크롬산 공장의 여성노동자들과 크롬에 노출되지 않은 여성노동자들로부터 임신 12주에 태아와 태반조직에서 크롬수준이 추정되었다. 시험군에서 크롬은 태아조직에서 1140  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 이었고, 태반에서 135  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 였다. 반면 대조군에서는 각각 928 and 30  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 였다. 어떠한 기형발생에 대한 영향을 관찰되지

않았다(Shmitova, 1980).

#### 다) 폐에 미치는 영향(Effects on the lung)

공기매개 3산화크롬은 급속히 기관지-폐 계통에 흡수되어 침식작용을 일으킨다(Borghetti et al., 1977). 크롬 증기의 흡수는 폐포 탐식세포의 활성화도 및 림프관 배수뿐만 아니라 미립자의 물리적, 화학적 성상에 따라 좌지우지된다(Sanders et al. 1971).

Jindrichova(1978)과 Keskinen et al.(1980)는 크롬함유 전기전극을 사용하는 용접공이 기관지염을 앓는다고 보고하였다. Zober(1982)는 수년간 크롬과 니켈이 함유된 금속여과기를 사용하고 있는 아크 용접공들을 연구하였다. 용접공들이 대조군과 비교하여, 이전에 호흡기계 질환을 더 많이 보고하였고, 주로 급성 기관지염의 형태였다. 용접공의 X-선에서 철 분진의 양성 침착을 가리키는 등그런 음영이 더 많이 관찰되었다. 의미 있는 소견이 담배를 피우는 용접공에서 훨씬 분명하고 더 발생하였다 (아마 흡연과 용접 흡의 결합 효과). Reggiani et al.(1973)는 폐활량계를 이용하여 101명의 전기 도금공을 연구하였는데, 이들의 13%에서 폐쇄성 질환 형태를 관찰하였다. 아세틸콜린 흡입 후, 폐경련성 반응이 노동자의 23%에서 발생하였다. 44명의 크롬 전기도금공에 대한 다른 폐활량계 연구에서(Bovet et al., 1977), 폐쇄성 호흡기 증후군이 높은 소변내 크롬량을 갖는 노동자들 가운데 관찰되었다. 저자들은 폐활량계 검사에 대한 흡연의 영향은 크롬의 영향보다는 훨씬 적었다고 결론을 내렸다.

Langard(1980b)은 크롬철과 실리콘철을 생산하는 공장의 전기용광로 노동자들에서 폐기능을 연구하고, 폐쇄성 폐질환을 일반화해서, 감소된 FVC와 증가된 폐쇄성 폐질환 유병율을 관찰하였다. 크롬의 존재와 증가된 폐질환간의 관계를 기록할 수는 없지만 저자들은 효과가 충분진 특히 무결정의 실리콘 분진의 높은 농도 때문이라고 제시하고 있다.

Lindberg & Hedenstierna(1983)은 대조군으로서 119명의 자동차 정비공(자동차 페인트이나 용접공은 아니다)과 크롬 도금에 노출된 100명이상 대상자에서 폐기능을 연구하였다. 노출대상자에서 FVC와 FEV1) 모두 0.2 리터(L) 감소하였다. forced mid-expiratory flow는 0.4 L/second로 감소하였다. 저자들은  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상 평균 8시간노출은 폐기능의 일시적인 감소를 일으킨다고 결론을 내렸다.

진폐증이 독일에서 진단되었고(Letterer et al., 1944), 남아프리카의 아크롬산 광산에서 다시 진단되었다(Sluis-Cremer & du Toit, 1968). 그러나 미국의학사무국(American Medical Officers)은 미국 내 크롬산염을 생산하는 공장의 897명의 노동자를 조사하였을 때, 이러한 특징을 검증하지 못했다(US PHS, 1953). 크롬분진은 실험동물연구에서 섬유성장 잠재력이 낮다는 점을 주지해야 된다. Davies(1974)은 크롬철 제조공장 노동자들을 X-선을 찍고, 미립형 폐결핵과 비슷한 소견을 관찰하였다. 노동자들은 용광로 근접 지역에 있었고, 분진 미립자에 노출되었다(이들 중 90%가 직경  $2 \mu\text{m}$ 이하였다). 거더(girders)에 침착된 분진은 95%  $\text{SiO}_2$ 과 2.4%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 로 구성된다. 저자는 결핵의 어떠한 증상이나 증후를 발견하지 못했다. 그러나 크롬철 공장에서 흡기 위험을 가리키기에 충분한 증거가 있다. 그래서 Princi et al.(1962)의 초기 관찰을 뒷받침한다.

#### 라) 신장에 미치는 영향(Effects on the kidney)

20세기 초, 크롬산염과 크롬산은 경우에 따라 일부 피부병변의 치료물질로 사용되었다. 치명적인 급성 신장염 환자가 발생하여 소변내에서 알부민, hyaline 및 granular casts, 적혈구가 나타나고, 무뇨가 동반되었다. 부검은 사구체 손상없이 세뇨관 괴사를 보였다(Kaufman et al., 1970). 1.5~10 g의 중크롬산칼륨을 마신 자살 사례에서 수 시간 후에 급성독성 위장염이 발생하였고, 이후 동맥 저 긴장(arterial hypotonia)이 발생하였다. 2-4일내 모

든 환자가 oliguria, anuria, 및 hyperhydration 과 같은 급성신부전의 증후와 급성 독성 간염의 증거를 나타냈다(Luzhnikov et al., 1976). 다량의 크롬산염에 사고로 인해 피부노출의 결과로서 특히 광범위한 피부 손상과 연관되어 신장 손상이 산업장에서 또한 일어났다(Luzhnikov et al., 1976). 크롬산업장 노동자가운데 신장질환의 사망률은 증가하는 것 같지 않다. 한 연구에서, 신장염과 요독증으로 인한 어떠한 사망도 4개 크롬산염 생산 공장에서 관찰되지 않았다. 단지 1공장에서 대조군에 비해 사망률이 높았다(Machle & Gregorius, 1948). Hayes et al.(1979)은 1945년과 1977년 사이에 대조집단의 4.95 사망수와 비교하여, 크롬산염을 생산하는 공장 노동자들에서 신장염과 신장증으로 인한 4명의 사망이 발생하였다고 보고하였다. Satoh et al.(1981)은 기대수치2.1과 비교하여 크롬산염 노동자집단에서 신장염과 신장증 1예를 발견하였다. 일부 저자들(Franchini et al., 1975; Borghetti et al., 1977; Gylseth et al., 1977; Tola et al., 1977)은 확산성 크롬의 소변배출과 신장 청소율을 공기매개 크롬의 노출 정도와 신체 축적량을 평가하는 생물학적 지표로서 사용될 수 있다고 결론을 내렸다. 그러나 용량 효과 관련이 노출기관과 크롬배출 수준 간에 (Tandon et al., 1977) 또는 초기 신장 독성지표간의 정립이 되지 않았다(Mutti et al., 1979). 신장에 대한 6가 크롬효과의 용량반응 관련성을 Mutti et al.(1979)이 기술하였는데, 소변 내에서 beta-glucuronidase, protein, 및 lysozyme을 측정하였다. 노출 4.5 ± 3.2년 동안 39명의 스테인레스 강철 용접공들에서 비정상적인 양상이 관찰되었다. 1 ± 0.4년 동안 특별한 전기전극을 가지고 강철로 용접에 종사한 노동자들 집단에서 22%에서 소변 내 beta-glucuronidase이 증가하였고, 10%에서 단백질이 증가하였다. 8.9±7.3년 동안 노출된 크롬 도금 사업장 24명 노동자들에 대한 한 연구에서 저자들은 노동자 37%에서 소변 내 beta-glucuronidase의 증가를, 17%에서 단백질증가를 4%에서 lysozyme의 증가를 관찰하였다. Lindberg & Vesterberg(1983b)이 크롬 도금 공장에서(4개 다른 공장에서 일하는 평균 36세 의 24명의 남자노동자) 요중

beta2-microglobulin을 연구하였다. 노출은 개인공기시료채취기(personal air samplers)를 사용하여 측량하였다. 8시간 평균값은 6가 크롬 2~20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위였고, 평균 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 대부분의 노동자들은 기도자극의 증상을 보였다. 이들 중 2명은 비중격 궤양을 가졌고, 다른 2명은 완전 천공소견이 있었다. 비슷한 연령대의 대조 노동자들에 비하여(평균나이, 38 세 평균 소변 내 beta2-microglobulin level, 0.15 mg/L; 범위, 0.06~0.19 mg/L; SD, 0.08). 이들 노동자집단에서 매우 높은 소변 내 beta2-microglobulin 수준이 관찰되었다(0.23 mg/L; 범위, 0.04~1.24 mg/L; SD, 0.27). 노출과 소변 내 beta2-microglobulin 유병률 (0.3 mg/L을 초과하는 수준)간의 관련성이 관찰되었다. 비중격천공을 가지고 있는 2명은 매우 높은 노출집단의 노동자들이다. 오래된 크롬 도금 공장에서 초창기 수년간 근무해온 노동자 집단(mean, 0.25 mg/L)과 비슷한 연령대의 노동자집단(mean, 0.29 mg/L)에 요증 beta2-microglobulin의 차이는 관찰되지 않았다. 그러나 이들 집단의 평균 연령이 52세를 초과한다는 점을 주지해야 된다.

#### 마) 간에 미치는 영향(Effects on the liver)

간질환 만 분리된 통계는 거의 출판되지 않았고, 이들은 대개 소화기계 질환으로 포함되었다. 크롬 사업장에 이들 질환에 대한 통계는 다른 사업장과 비슷하다고 보고되고 있다(US PHS, 1953). 미국 연방 안전국(Federal Security Agency)은 조사된 14명 크롬산염 노동자들이 간비대소견이 있다고 보고하였으나 이들이 사업장에서 근무한 시간과 관련은 없었다. 황달과 함께 급성 간염이 크롬 도금 공장에 근무하는 한 노동자에서 기술되었다. 역학연구에서, Satoh et al.(1981)는 크롬 노동자에서 간경화률이 낮고, 간기능검사 결과가 대조집단과 의미 있는 차이는 없다고 보고하였다. 그러나 다량의 중크롬산염의 섭취후 간의 형태가 소실된 간괴사(Brieger, 1920)와 율혈성 간(Kaufman et al., 1970)이 기술되었다. 전기도금공(Pascale et al., 1952)과 크롬산염 화학물 공장 노동자들(Etmanova, 1965)에서 간기능과 병리에

관한 사례연구들이 있었으나 그 결과는 해석하기가 어렵다.

#### 바) 위장관에 미치는 영향(Effects on the gastrointestinal tract)

다음의 증상과 증후들은 크롬산염 생산에 종사하는 노동자들에서 보고되었다(Sterekhova et al., 1978): 위산과다, pepsin과 pepsinogen 상승, 부종, 충혈 및 점막 침식, 다발성 용종, dyskinesia(운동이상증), 위염이다. 그러나 Satoh et al.(1981)은 크롬산염 노동자에서 소화성 궤양의 발생이 기대수준보다 낮다고 보고하였다. 다른 연구에서는 소화기계 질환의 사망률이 크롬산염 노동자들에서 대조군에 비해 더 낮다고 보고하였다(Hayes et al., 1979). 위산은 6가 크롬을 3가 크롬으로 환원시킴으로써 섭취한 6가 크롬의 해독에 중요한 역할을 하는 것으로 보고 있다. 3가 크롬은 흡수율이 낮고 대변으로 제거된다(Donaldson & Barreras, 1966; DeFlora & Boido, 1980).

#### 사) 순환기계에 미치는 영향(Effects on the circulatory system)

중크롬산염 칼륨 공장에서 크롬중독에 기인한 폐 또는 위장질환을 앓고 있는 200명 이상의 노동자들을 대상으로 심근 기능에 대한 임상연구가 Kleiner et al.(1970)에 의해 수행되었다. 70명의 건강한 대조군이 선정되었다. 심전도와 다른 심장기능 검사의 병리적 변화들은 우측심장기능의 이상을 가리키고 이는 폐병변의 2차적인 영향으로 보고 있다. 논문이 충분히 이용되지 않아 자료를 자세히 평가할 수는 없었다. 역학연구에서 심혈관 사망률의 기대치 못한 소견이 언급되지는 않았다.

#### 아) 최기형성(Teratoogenicity)

Morton & Elwood(1974)는 남 웨일즈에서 모은 물표본의 크롬량과 중추신경계 기형 빈도간의 어떠한 상관관계도 발견하지 못했다. 더욱이 Suzuki et al.(1979)는 태아 조직의 크롬 축적을 가리킬 만한 어떠한 소견도 관찰하

지 못했다.

자) 변이원성과 기타 단기 시험(Mutagenicity and other short term tests)

인간을 대상으로 크롬에 의한 돌연변이 유발성을 다룬 보고는 드물고, 단지 6가 크롬이 어떠한 영향을 일으킨다. Bigaliev et al.(1978)은 크롬 화합물을 다루는 노동자들에서 말초혈액내 백혈구의 염색체 변이가 비노출 군에서 2%에 비교하여 3-8% 증가됨을 관찰하였다.

Papanicolaou system에 따라 분류하였을 때, 크롬산염 생산 사업장의 116명의 노동자들의 객담 세포검사결과는 어떤 단계의 종양발생도 보여주지 못했다(Maltoni, 1976). 그러나 30명의 노동자들에서 발견된 중간단계의 병변은 비정형 선종모양의 증식, 상피세포 및 기저세포 이형성(dysplasia)으로 기술되었다. 직업적으로 CrO<sub>3</sub>에 노출된 노동자들로부터 얻어진 배양 임파구 세포를 연구한 Sarto et al.(1982)는 대조군과 비교하여 요증 크롬 수준과 상관성이 있고, 흡연습관에 의해 촉진되는 자매염색분체 교환의 빈도가 증가됨을 관찰하였다.

차) 발암성(Carcinogenicity)

폐암(Lung cancer)\_크롬산염 생산 공장 역학 연구

호흡기관의 암이 크롬노출과 관련이 있다는 첫 인식은 1932년 오래된 독일 크롬산염 화학 공장에서 발생한 2명의 기관지원성 암환자 보고에서 기인한다(Lehmann, 1932). Gross & Kölsch(1943)은 크롬산납과 아연을 생산하는 작은 공장에서 폐암에 의한 10명의 사망을 보고하였다. 1947년 52명의 환자가 이러한 산업에서 보고되었고, 독일 연방공화국에서도 크롬색소공장에서 10명의 환자가 보고되었다 (Baetjer, 1950a).

첫 역학연구는 1948년 미국에서 보고되었다. 사망 자료는 미국 내 6개 크롬산염 생산 공장에서 집단생명보험증권(life insurance policies) 기록에 기초하였고, 생명보험회사 또는 비크롬 사업장으로부터의 비슷한 자료를 비교하였다. 연구는 1938년과 1947년 사이 모든 사망의 21.8%가 호흡기암에 때문이었다. 대조군은 1.4%였다. 기관지와 폐암의 조사망률은 대조군에 비해 28배 높았다(Machle & Gregorius, 1948). 이러한 공장들중 하나에서 (Mancuso & Hueper, 1951), 암사망률이 그 공장이 위치한 지역의 일반 인구에 비해 15배 높았다. US PHS(1953)는 이들 6개 공장에서 호흡기암 위험도를 연구하여, 비교군으로 1940년과 1948년 사이의 미국남성의 평균사망률을 이용하여 28.9 상대위험도를 추정하였다.

사망원인이 보험 또는 사망증명서 기록에서 얻어진 이런 연구뿐만 아니라 부검 또는 생검으로 진단된 예를 이용하여 환자 대조군 연구가 Baetjer(1950b)에 의해 수행되었다. 미국에서 가장 큰 크롬산염 공장 근처의 두개 병원에 1924-46년에 폐기관기암으로 진단받고, 조직병리학적으로 확진된 모든 환자의 병력을 제공해줄 것을 요청하였다. 나이, 성과 입원일에 따라 개인별로 비암 환자로 짝을 이룬 집단을 대조군으로 선정하였다. 290 명의 확진된 암환자 중 3.26%가 크롬산 공장에서 근무를 하였고, 900명의 대조군 중 크롬에 노출된 적은 없었다. 폐암들 중에서 크롬산염 노동자 퍼센트는 도시의 남자노동자 인구집단 중크롬산염 노동자 퍼센트의 28.6배였다. 이연구와 관련된 공장은 1950년에 재건축되어 암문제가 폭로되었다. Hayes et al.(1979)은 암에 대한 위험이 제거될 수 있는 지를 결정하기 위해 이 공장에 대해 새로운 연구가 수행하였다. 조사는 1945년과 1974년 사이에 90일 이상 근무하였고, 1945년과 1977년 사이에 죽은 2101명 남자 중 438명의 사망을 찾아냈다. 기관, 기관지 그리고 폐의 악성 신생물에 대한 SMR은 202였다. 공장이 위치해 있는 도시의 암 사망이 기대수를 계산하기 위해 사용되었다. 단지 새로운 공장에서 근무한 노동자중 1960년과 1977년 사이에 공장에서 어떠한 호흡기 암환자도 발생하지 않았다. 긴 잠복기 때문에 추적이 더 필

요하다.

미국에서 크롬산염 노동자중 증가된 폐암 발생을 Taylor(1966), Enterline(1974), Mancuso(1975)에 의해 검증되었다. 이들은 1950년 이전 코호트 연구 초기동안에 특히 위험도가 높았음을 관찰하였다. 다른 나라에서 수행된 연구에서도 비슷한 결과를 보였다. 영국에 크롬 생산 공장의 노동자들에 대한 1956년 연구에서, 폐암사망률이 영국, 웨일즈에 비해 3.6배 높았다 (Bidstrup & Case, 1956). 1948년에서 1977까지 영국 3개 크롬산염 생산 공장에서 일하는 2715명의 남자를 노동자에 대한 추적 연구에서, Alderson et al.(1981)은 116명의 폐암 사망을 확인하였다 (기대사망수 48). 현재까지 운영 중인 한 공장의 개선으로 인해, 폐암의 상대위험도는 3이상에서 대략 1.8로 감소하였다.

2개의 역학연구가 일본 크롬산염 사업장에서 수행되었다. 한 공장에서, 9년 이상 노출된 136명의 노동자에서 1960년과 1973년 사이에 5명의 폐암 사망이 발생하였다. 표준사망비(SMR)은 1510였다(Watanabe & Fukuchi, 1975). 다른 공장에서는 1918년과 1975년 사이에 공장에서 근무를 하고 1978년까지 추적이 되었던 896명에 대해 호흡기암의 사망이 조사되었다. 표준사망비(SMR)은 920였다 (기대 사망은 1975년 일본인 남자에 대한 연령원인 특수사망률에 기초하였다)(Sato et al., 1981).

독일 연방공화국에서 한 연구가 2개 크롬산염 생산 공장에서 수행되었다 (Korallus et al., 1982). 이들 두 집단에 대한 1948-79년 동안 폐암의 표준사망비를 비교하면, 현저히 감소하는 경향이 관찰된다. 1948-52년 동안 첫 번째 공장에서 표준사망비(SMR)은 512이고, 1978-79년은 98이었다. 다른 공장에서는 표준사망비가 각각 1905, 150이었다.

가장 최신의 자료를 비노출군의 빈도에 근접할 만큼 위험도가 낮아지고 있다(Korallus & Loenhoff, 1981). 이는 직업적 위생적 그리고 기술적 수단의 결과이다. 특히 크롬 광석 온라인(online) 제조과정의 변화로 발암성이 있는

6가 크롬 화합물의 량을 최소화한 결과이다.

Bittersohl(1972)는 독일 민주공화국에서 1921-71년 기간 동안 하나의 큰 화학단위의 30만 명의 노동자들에 대한 연구결과를 기술하였다. 특히 남자에서 588건 신생물과 여자에서 170건 신생물이 1957-70년 기간 동안 평가되었다. 1971년 남자에서 108건의 새로운 신생물, 여자에서는 29건의 새로운 신생물이 출현하였다. 한 크롬산염 공장에서 모든 암의 발생률은 평균을 훨씬 웃돈다.

그 공장은 질산, 산화철(III), 크롬산 반응을 통해 촉매제를 제조하였다. 공기매개 크롬농도는 자세히 보고되지 않았지만  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 단기노출이 있었다. 크롬산염 공장에서 노동자들 중 악성 신생물의 발생률은 1만 노동자당 852였다. 비노출 노동자들에서 악성 신생물의 발생률은 1만 노동자당 84였다. 악성 신생물을 갖는 사람들의 대략 86%가 흡연자였고, 악성 신생물을 갖지 않는 사람들의 78%가 또는 흡연자였다. 이는 흡연이 혼란요란이 될 가능성이 없다는 것을 가리킨다.

소련에서 폐암의 높은 발생률이 크롬산염 생산에 종사하는 남자들에게 보고되었다. 대조집단에 비해 공장에서 폐암의 비는 50-59세에서 6.4(관찰치 748, 기대치 116)이고, 60-69세에서 15.7 관찰치 2657, 기대치 170)이었다 (Tyushnyakova et al., 1974).

1982년 중국에서 크롬산염 생산 노동자들 중 폐암의 문제를 조사하기 위한 연구가 수행되었다. 이는 7개 도시와 사업장에서 최소 1년 동안 근무한 2184명 남자와 798명 여자를 포함한다. 예비보고에서는 남자노동자들 중 101사망건수 중 11건이 폐암 때문이었고, 여자노동자들 중 13 사망건수 중 폐암에 의한 사망은 없었다.

#### 폐암(Lung cancer)\_크롬 색소 산업 역학 연구

1973년에 시행된 첫 역학 연구는 미국에서 3개의 작은 크롬 색소제조 공

장을 포함하고 있다. 폐암 사망의 퍼센트는 비노출 노동자들에 비해 대략 3배가 된다고 임시적으로 보고하였다(Equitable Environmental Health Inc., 1976). 폐암의 사망률이 1930년대 또는 1940년대부터 1981년까지 영국에서 3개 크롬 색소 공장에서 일하는 1152 남자노동자들에서 연구되었다. 크롬산아연과 크롬산납을 생산하는 A 공장 노동자들 가운데, 높은 그리고 중등도 노출된 1932-45년 사이의 공장 입사자는 폐암의 위험도가 아주 높았다(SMR = 223). 비슷한 위험도가 1946-54년 입사자에서도 관찰되었다. 그러나 위험도는 아주 짧게 떨어졌다. 또한 크롬산아연과 크롬산납을 생산하는 B 공장의 고도 또는 중등도 노출된 1947-64년 입사자 가운데 폐암의 위험도가 높게 관찰되었다. 위험도는 10년 이상 근무한 노동자들에서 더욱 심각했다. 크롬산납만을 생산하는 C 공장에서는 폐암의 높은 위험도는 관찰되지 않았다. 그러나 노동자수와 연구의 power가 낮았다.

1948년과 1972년 사이에 3년 이상 한 작은 노르웨이 회사에 근무하였던 24명의 남자 노동자들을 Langard & Norseth(1975)가 확인하고, 추적하였다. 왜냐하면 이들의 주 노출은 크롬산 아연분진이었다 (경우에 따라서는 0.5 mg hexavalent chromium/m<sup>3</sup>까지도 측정되었다). 1980년 12월까지 6명의 폐암환자가 진단되어, 그 지역의 일반 인구에 비해 44배의 상대위험도를 보였다. 6명의 환자 중 5명이 흡연자였고, 단지 1명이 크롬산 아연이외에 크롬산염에 노출되었다고 저자들은 기술하였다(Langard & Vlgander, 1983).

Sheffet et al.(1982)는 크롬산납과 크롬산아연이 사용되는 Newark의 색소공장 노동자들을 대상으로 세밀한 사망연구를 수행하였다. 1940년과 1969년 사이에 고용된 1296명 백인과 650명 비백인 남자들 중 각각의 원인에 따른 사망을 관찰하여, 미국의 원인별, 연령별, 시간별 특수 표준사망률을 가지고 기대사망을 계산하여 비교하였다. 10년 이상 근무한 백인 남자 가운데 폐암의 상대위험도는 1.6으로 통계적으로 유의했다. 크롬산염에 최소 중등도로 노출되고, 최소 2년 근무한 사람에서는 1.9의 상대위험도를 나타냈다.

유럽의 여러 센터를 포함한 역학연구가 Frenzel-Beyme(1983)에 의해 수

행되었다. 이런 연구는 크롬산염 색소를 생산하는 유럽 공장들의 노동자들 가운데 암과 다른 질환으로 인한 사망을 정량화하기 위해 디자인 되었다 (3명의 독일인, 2명의 네덜란드인). 공장에서 관찰 사망수와 공장이 위치해 있는 지역의 사망특징을 기초로 하여 계산된 기대사망수를 비교하였다. 전체적인 사망은 기대치에서 벗어나지 않았다. 폐암의 발생률은 기대치보다 항상 높았으나 단지 하나의 코호트에서만 통계적으로 유의하게 높았다. 노출기간의 양상은 폐암 위험도가 고용기간과 명확히 상관관계를 보이지 않음을 지적한다. 미국의 2개 정비 기지로부터 크롬 색소 스프레이 페인트공에서 폐암의 위험도가 약간 높았다고 Dalager et al.(1980)이 보고하였다. 확인된 202 사망건수 중 21건이 폐암 때문이었다(11.4 기대사망수 비교집단: 미국 남성 비례사망율). 22명의 암환자를 포함하여 226 사망건수가 비교집단으로 공장이 위치해 있는 지역의 비례사망을 사용하여 분석되었는데, 자동차 페인트공 집단에서 폐암의 의미 있는 증가는 관찰되지 않았다(Chiazze et al., 1980).

#### 폐암(Lung cancer)\_크롬철 산업 역학 연구

Langard et al.(1980)은 1960년 1월1일 이전에 작업을 시작한 976명의 노동자들 가운데서 7명의 기관지원성 암환자가 발생하였다고 보고하였다. 비교를 위한 참고치로서 국가적인 비율을 사용하였을 때 기대수는 3.1이고, 국소적 비율을 사용하였을 때는 1.8이고, 국제적 비율을 사용하였을 때는 1미만이었다. 국가적, 국소적 비율을 사용하였을 때는 의미 있는 차이가 없었지만, 국제적 비율을 참고치로 사용하였을 때는 의미 있는 차이가 있었다. 스웨덴의 한 연구에서는 크롬철 노동자들에서 호흡기암이 의미있게 높다는 것을 보여주지 못했다(Axelsson et al., 1980). 1930년과 1975년 사이에 최소 1년 동안 근무한 1932명의 노동자 중 폐암 발생률이 공장이 위치해 있는 지역의 국가암등록자료에 기초한 기대수치와 비교를 하였다. 5명의 호흡기암이 관찰되었고, 기대치는 7.2였다.

폐암의 높은 발생률이 러시아 크롬철 공장에서 보고되었다(Pokrovskaya & Shabynina, 1973). 1955년과 1969년 사이의 암사망수는 공장이 위치해 있는 지역보다 높았다. 저자들은 6가와 3가 크롬 노출이 이러한 위험도를 높인 이유라고 보고 있고, 단지 3가 크롬만이 존재하는 크롬광석 분쇄공장 주변에서 비슷한 위험도를 나타냈다. 이 연구에서 환자수와 비율은 제시되지 않았다. 몇몇 용접 유형에서 6가 크롬이 만들어 진다. 용접 흠 미립자는 mammalian spot test에서 양성이고, 이는 돌연변이성과 발암성의 잠재력이 있다는 것을 의미한다.

Sjgren(1980)은 1950년과 1965년 사이의 5년 이상 스테인레스 강철을 용접한 234명의 용접공 코호트에서 1977년까지 추적을 하여 폐암의 발생률을 구하였다. 일반 인구에서 0.68 기대수에 비하여 3명의 용접공이 폐암으로 사망하였다 ( $p = 0.03$ ). Axelson & Rylander(1980)은 철 합금 산업을 가지고 있는 2개의 교구에서 폐암 사망률을 동일 지역으로부터 그런 산업이 없는 비슷한 크기의 다른 교구에서의 사망률과 비교를 하였는데, 폐암으로 인한 사망의 증가는 관찰할 수 없었다. 대부분의 오염지역의 대기공기 중 크롬농도는 0.1에서 0.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 이주, 직업적 노출 및 흡연습관과 같은 몇 가지 가능한 혼란 요인들이 통제되지 않았다는 점을 주지해야한다.

#### 폐암(Lung cancer)\_크롬 도금 노동자 역학 연구

크롬 도금과 관련 산업의 노동자들에 대한 역학연구들이 Hayes(1982)에 의해 검토되었다. 이들 연구의 관련 자료들이 표 4-8에 정리되었다. Hayes에 따르면, 크롬산에 산업장 노출과 관련하여 암의 위험도를 결정할 만한 충분한 역학적 증거는 없다. 위험도가 증가하더라도 크롬 화학제 생산 산업에서 전형적으로 기술되었던 것보다는 아마 낮다.

보다 더 최근의 논문에서, Franchini et al. (1983)가 1951년 1월에서 1981년 12월까지 기간 동안 최소 1년을 근무한 노동자의 사망을 조사하기

위하여 9개 크롬 도금 공장에 대해 후향적 코호트 연구를 수행하였다. 연구 집단은 총 178명이었다. 생체 상태 확인 97%가 완전하였다. 총 사망수는 기대수에 근접하였다 (관찰수 15, 기대수 15.2). 반면 폐암 사망은 기대수를 초과하였다 (관찰수 3, 기대수 0.7  $p=0.03$ ). 크롬 도금공중에 폐암 사망률 증가는 노출 강도와 관련이 있는 것 같다.

#### 폐 이외의 기관에서 암(Cancer in organs other than lung)

상부 호흡기관과 구강부위에 몇몇 암이 높은 비율은 아니지만 크롬산염 생산 산업장에서 보고되었다. 암은 구강, 인후와 식도에도 가능하다. 비중격의 암에 대해서는 이탈리아의 1예를 제외하면 기록된 바 없다(Vigliani & Zurlo, 1955). 1977년 시작된 덴마크-핀란드-스웨덴 합동 사례 보고 조사에서, 비강암, 부비강암과 여러 직업적 노출과의 관계가 연구되었다. 모든 새로운 비강과 부비강암 환자는 국가 암등록처에서 모아지거나(핀란드와 스웨덴) 또는 병원(덴마크)으로부터 모아진다. 결과는 비강암, 부비강암과 크롬, 용접, 화염절단 그리고 납땀, 중목재 또는 혼합목재 분진, 그리고 경목재 분진 간의 관련성을 보여주었다(Hernberg et al., 1983).

매우 높은 노출이 있었던 초창기동안 미국 내 5개 공장에서, 소화기관암의 발생률은 0~3.04/1000로 다양하였고, 대조군에서는 0.59/1000이었다 (Machle & Gregorius, 1948). 위암의 사망률은 일본, 미국 크롬 생산 공장에서 보고되었는데, 각각 표준사망비가 90 (Sato et al., 1981), 40 (Hayes et al., 1979)이었다. 한 러시아 공장 내 위암 발생(Pokrovskaya & Shabynina, 1973) 과 주변지역의 발생간의 의미 있는 차이는 보고되지 않았다.

Sheffet et al. (1982)은 크롬산납과 아연을 사용한 색소 공장 내 암사망률이 조사하였는데, 전체 코호트(1946명 노동자) 가운데 위암 (SMR = 170)과 췌장암의 위험도가 증가하였지만 통계적인 차이는 없었다.

#### 차) 직업적 노출(Occupational exposure)

피부 및 상부 호흡기의 자극성 병변, 알레르기 반응 및 호흡기계 암을 포함하여 공기 중 크롬에 직업적으로 노출되면 여러 가지 영향이 발생할 수 있다. 다만 위장, 심혈관 및 비노생식기 계통과 같은 기타 영향에 대한 자료는 평가하기에 충분하지 않다.

역학 연구에 따르면 크롬산염 및 크롬산염 안료 생산에 종사하는 노동자는 기관지암 발병 위험이 증가한다. 역학 연구에서 용량-반응 관계에 대한 자세한 자료는 없다. 크롬 도금 작업자의 폐암 위험 증가에 대한 의심이 제기되었지만 크롬에 노출이 발생하는 다른 산업 공정에 대한 자료와 마찬가지로 사용 가능한 자료는 결정적이지 못하다. 폐 이외의 모든 기관에서 암의 원인으로서는 크롬의 역할에 대한 증거는 충분하지 않다. 실험 동물에 대한 연구의 증거는 6가 크롬 화합물, 특히 용해도가 낮은 화합물이 폐암을 유발할 수 있음을 보여준다.

크롬도금공장 노동자의 림프구에서 자매염색분체 교환의 빈도는 대조군보다 노출군에서 더 높았다.

돌연변이 유발성 및 관련 연구에 따르면 6가 크롬이 유전적으로 활성인 것으로 설득력이 있다. 6가 크롬은 세포막을 통과한 다음 3가 크롬으로 환원되어 DNA 교차 연결을 유발하고 DNA 함축의 불임을 증가시킬 수 있다. 3가 크롬 화합물은 DNA와 직접 상호작용할 수 있는 시스템을 제외하고 대부분의 시험 시스템에서 유전적으로 비활성인 것으로 나타났다.

#### 암 이외의 영향(Effects other than cancer)

##### 호흡기(Respiratory tract)

상기도에서 급성 자극성 영향의 역치는 가장 민감한 개인의 경우  $25 \mu\text{g}/\text{mg}/\text{m}^3$ 인 것으로 보고되었다.  $1 \mu\text{g}$  크롬산/ $\text{m}^3$  이상의 용량에 장기간 노출되면 비강 자극, 비점막 위축, 비강 중격 천공의 궤양을 유발할 수 있다.

기관지 천식은 이전에 크롬 화합물에 대한 노출에 기인했지만 결론을 내리기에는 과학적 자료가 너무 부족하다.

#### 피부(Skin)

피부 발진, 궤양, 궤양, 습진이 직업적으로 노출된 노동자들 사이에서 보고되었다. 3가 및 6가 크롬 화합물은 특히 알칼리성 노출 조건으로 인해 크롬 유발 피부 병변의 발생률이 높은 시멘트 산업과 같은 특정 환경 조건에서 피부를 민감하게 만들 수 있다.

처음에 광범위 홍반형으로 나타나는 습진성 피부염은 심한 경우 삼출성 단계로 진행되며 피부 패치 시험에서 밝혀진 바와 같이 크롬에 민감한 환자의 8-15%가 관련이 있다. 감작을 유발하는 크롬의 산화 상태에 대해서는 의견이 분분하지만, 6가 크롬이 합텐(hapten)으로 피부에 침투하여 3가 상태로 환원되고 단백질과 결합하여 감작 반응을 개시하는 전체 항원으로 변형된다는 증거가 있으며, 아마 세포 매개 면역 반응만을 포함한다.

크롬 유발 피부 알레르기로 고통받는 환자는 코발트와 니켈에 과민해지는 경향이 있다는 점에 유의해야 한다. 또한 크롬에 의해 유발된 피부 알레르기 사례의 48%는 임상적으로 관찰된 광 민감도가 있거나 없는 경우에 4/5의 최소 홍반 조사량에 노출되었을 때 표준화된 포토패치 시험 절차에 의해 훨씬 더 강렬한 반응을 보였다.

#### 신장(Kidney)

크롬의 고용량, 단기 경구 섭취 후 급성 신염 및 세뇨관 괴사가 관찰되었다. 크롬 도금 산업 종사자에 대한 몇 가지 역학 연구에는 신장 질환에 대한 자료가 포함되어 있으며 대부분은 정확한 노출 수준을 제공하지 않는다. 최근 연구에서는 증가된 요중 베타2 마이크로글로불린 수치와 2~20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  사이의 노출 범위와 관련이 있다. 이 연구에서 관찰된 용량-반응 관계는 더 많은 수의 노출 작업자에 대한 확인이 필요하다.

#### 기타 장기 및 시스템(Other organs and systems)

크롬 화합물이 간이나 위장 및 순환계에 미치는 영향을 평가하는 결정적인 자료는 없다.

#### 최기형성(Teratogenicity)

두 가지 산화 상태 모두 동물에 비경구적으로 고농도로 주입하면 기형을 유발하며 6가 형태는 3가보다 훨씬 높은 농도로 배아에 축적된다. 작업 그룹은 인간 집단에서 최기형성을 나타내는 보고서를 확인하지 못했다.

#### 4) 크롬 및 무기화합물에 대한 Documentation of TLVs

METALLIC CHROMIUM, Cr(0)

CAS number: 7440-47-3

Chemical structure: Cr

TLV-TWA, 0.5 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(0), Inhalable particulate matter

TRIVALENT CHROMIUM COMPOUNDS, Cr(III)

CAS number: Various (see Table 1)

Chemical structures: Various (see Table 1)

TLV-TWA, 0.003 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(III), Inhalable particulate matter

Respiratory Sensitization (RSEN) (water-soluble compounds only)  
and

Dermal Sensitization (DSEN) (water-soluble compounds only)

A4 — Not Classifiable as a Human Carcinogen

HEXAVALENT CHROMIUM COMPOUNDS, Cr(VI)

CAS number: Various (see Table 1)

Chemical structures: Various (see Table 1)

TLV-TWA, 0.0002 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(VI), Inhalable particulate matter

TLV-STEL, 0.0005 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(VI), Inhalable particulate matter

Respiratory Sensitization (RSEN) and Dermal Sensitization (DSEN)

Skin (water-soluble compounds only)

A1 — Confirmed Human Carcinogen

CHROMYL CHLORIDE

CAS number: 14977-61-8

Chemical structure:

2 - Chromium and inorganic compounds ACGIH® © 2018

TLV-TWA, 0.0001 ppm (0.0002 mg/m<sup>3</sup>), as Cr(VI), Inhalable fraction and vapor

TLV-STEL, 0.00025 ppm (0.0005 mg/m<sup>3</sup>), as Cr(VI), Inhalable fraction and vapor

Respiratory Sensitization (RSEN) and Dermal Sensitization (DSEN)  
Skin

A1 — Confirmed Human Carcinogen

크롬광 가공(CHROMITE ORE PROCESSING (see Hexavalent and Trivalent Chromium Compounds)

## TLV 권고

작업장에서 광범위한 금속 크롬 및 무기 크롬 화합물을 접할 수 있으며 가장 일반적으로 원자가 상태가 0, +3 또는 +6(예: 표 1 및 2 참조)으로 독성 및 발암 영향이 매우 다양하다. 따라서 크롬 및 무기 화합물에 대한 이 문서는 크롬 원자가 상태와 현재의 독성 및 역학적 증거를 기반으로 여러 섹션으로 구분된다. 납 크롬산염에 대해서도 별도의 TLV® 문서가 제공된다.

### 크롬 금속 Metallic Chromium, Cr(0)

크롬 금속, Cr(0)에 대한 노출은 금속 크롬, 페로크롬(ferrochromium) 또는 기타 크롬 함유 합금의 생산 및 사용에서 발생할 수 있다. Cr(0)에 대한

TLV-TWA는 이러한 경우에 적용된다. 그러나 Cr(III) 또는 Cr(VI) 중 (species)도 존재하는 경우 해당 화합물에 대한 TLV를 사용해야 한다.

금속 크롬은 불용성이지만 흡입하면 상기도 및 하기도 자극을 유발할 수 있다. 0.5 mg/m<sup>3</sup>의 TLV-TWA는 크롬 금속에 대해 1931년에 채택되었다. 그 이후로 토끼를 대상으로 한 단일 흡입 연구에서 0, 0.6 또는 3.1 mg/m<sup>3</sup>의 크롬 금속 에어로졸(입자의 60-80%가 7 μm 이하 직경)은 폐에 크롬 관련 영향이 없었다. 체외 폐포 대식세포의 구조와 기능은 영향을 받지 않았으며 크롬 입자는 체내 폐포 대식세포에 의해 쉽게 식균된다(Johansson et al., 1980). 0.5 mg Cr(0)/m<sup>3</sup>의 이전 TLV-TWA 값은 흡입성 입자상 물질의 새로운 입자 크기 지정과 함께 유지되었다.

작업자 노출과 관련이 없는 주입 또는 기타 경로를 통해 금속 크롬을 투여 받은 동물에서 여러 종양이 보고되었다. Cr(0)의 발암성과 관련하여 동물이나 사람에게 대한 흡입 자료는 없지만 이 노출 경로에 의해 암을 유발할 가능성은 없는 것으로 간주된다(U.S. ATSDR, 2012).

TLV STEL을 지정하거나 RSEN, DSEN, 피부 또는 발암성 표기를 권장하는 데 사용할 수 있는 자료는 충분하지 않다.

### 3가 크롬 화합물(Trivalent Chromium Compounds, Cr(III))

이 물질군(group of agents)은 산화크롬(III)(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 황산크롬(III)(Cr<sub>2</sub>[SO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>), 염화크롬(III)(CrCl<sub>3</sub>) 및 기타 다양한 화합물이 포함된다. Cr(III) 화합물 및 그 성상 목록. Cr(III)에 대한 노출은 이러한 다양한 화합물의 생산 및 사용에서 발생된다.

크롬(III) 화합물은 수동 확산 또는 식세포 작용(phagocytosis)에 의해 세포막을 가로질러 세포에 천천히 소량으로 통과된다. 그러나 일단 세포 내부로 들어가면 역확산도 매우 느려서 Cr(III)이 시간이 지남에 따라 세포 내로 축적

되어 결국 독성 효과를 유발할 수 있다.[참고: 세포 내 Cr(III)의 주요 공급원은 Cr(VI) 화합물이 세포로 흡수된 후 발생하며, 이는 음이온 수송체 메커니즘과 Cr(VI)에서 Cr(III)으로의 후속 환원을 통해 빠르게 발생한다.

쥐와 토끼에서 Cr(III) 염은 0.5 mg/m<sup>3</sup> 미만의 단기 노출 수준에서 병태생리학적 중요성의 변화를 일으키지 않았다(Henderson et al., 1979; IPCS, 2009; Johansson et al., 1980, 1986a, b, 1987). Langard, 1990). Derelanko et al.(1999)은 0, 3, 10, 30 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>에 노출된 CDF 쥐를 대상으로 13주 동안 코로만 흡입(nose-only inhalation)하는 단기 연구를 수행했다. 크롬(III) 황산염. 두 물질, 특히 염기성 황산크롬(III)은 가장 낮은 노출 수준인 3.0 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>에서 염증성 폐 변화를 보였다.

Huvinen et al.(1993, 1996, 2002a)은 핀란드 크롬 작업자의 Cr(III) 및 Cr(VI) 노출을 연구했다. Cr(III) 화합물에만 노출된 사람들은 작업 관련 기침, 3개월 이상 가래, 작업 관련 호흡 곤란 및 운동 시 숨가쁨의 증상에 대해 대상 그룹에 비해 유의하게 증가된 비율(P<0.05)을 보였고, 자신의 건강이 "나쁨"이라고 생각하는 비율도 더 높았다(13.2% 대 4.2%, P = 0.03)(표 3 참조). 추적 조사에서 Cr(III)에 대한 개인 노출은 중앙값 0.03 mg/m<sup>3</sup>에서 0.004 mg/m<sup>3</sup>로 감소했다. 그러나 추적 조사에서 Cr(III)에 노출된 노동자는 3개월 이상 가래(OR = 3.01, P = 0.02) 및 천명을 동반한 호흡 곤란(OR = 4.89, P = 0.02)이 참조 그룹(표 4), 비록 평균 폐 기능(예측된 값의 백분율)은 크게 변하지 않았고 흉부 X선도 변하지 않았다. 흡연자와 비흡연자의 노출 관련 영향은 0.03 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>의 중앙값 수준에서 나타났지만 나중에 0.004 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>의 노출 중앙값이 무영향 관찰수준(NOAEL)인지는 분명하지 않았다. 결과적으로 모든 Cr(III) 화합물에 대해 흡입성 입자상 물질로서 0.003 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>의 TLV-TWA가 지정된다.

Gibb et al.(2000a)은 Cr(III) 및 Cr(VI)에 노출된 2357명의 작업자 중 폐암 사망을 조사했다. Cr(III) 및 Cr(VI) 노출이 상관관계가 있고 둘 중 하나의 누적 노출이 폐암과 관련되어 있지만 저자는 전체 폐암 사망률에 대한 각각의

기여도를 분리하려했다. Cr(III) 및 Cr(VI) 노출에 대한 변수를 포함하는 비례 유해 모델(proportional hazard models)에서 Cr(VI) 노출은 과도한 폐암 위험과 유의하게 연관되었고 Cr(III) 수준은 그렇지 않았다. 실험 동물 연구에서 흡입에 의한 Cr(III) 화합물에 대한 노출과 암 사이의 연관성은 관찰되지 않았다(U.S. ATSDR, 2012; Langard, 1989; Norseth, 1986).

크롬(III) 피콜리네이트(picolinate) 섭취에 대한 2년 연구(U.S. NTP, 2010)는 수컷 랫드에서 포피샘 샘종의 발병률이 증가한 것으로 나타났지만 암컷 랫트 또는 수컷 및 암컷 마우스에서는 과도한 종양이 없었다. 돌연변이 유발성에 대한 시험은 암컷 마우스에서 가장 높은 농도를 제외하고는 음성이었다.

이 미국 국립 독성 프로그램(U.S. National Toxicology Program) 연구는 "수컷 쥐의 발암성과 암컷 쥐의 유전독성에 대한 불분명한 증거(equivocal evidence)가 있다"고 결론지었다. 따라서 현재까지의 자료는 Cr(III) 화합물이 사람에게 발암성이 아닐 가능성이 있지만 동물에서는 모호한 결과가 있음을 나타낸다. 보다 확실한 자료가 제공될 때까지 A4(인체 발암성 물질로 분류되지 않음)로 발암성을 표기한다.

Cr(III) 화합물에 대한 감작성은 피하 내 주사를 통해 동물에서 입증되었다(IPCS, 2009; Gross et al., 1968; Polak et al., 1973), 그러나 Cr(III)에 대한 노출은 Cr(VI)보다 면역 감작성을 유발할 가능성이 훨씬 적다(U.S. ATSDR, 2012; IPCS, 2009). 그러나 Cr(VI) 화합물에 대한 감작은 개인이 Cr(III), 특히 수용성인 Cr(III) 화합물에 대한 노출로 인한 후속 알레르기 반응의 위험이 있다는 것이 분명하다(U.S. ATSDR, 2012; IPCS, 2013, Park et al., 1994)(수용성 Cr(III) 화합물 목록은 표 2 참조). Cr(III) 및 Cr(VI)에 대한 동시 노출은 일반적으로 특정 작업(예: 스테인리스강 제조 및 용접, 가죽 무두질, 크롬 도금)에서 발생되고 이러한 과정에서 Cr(III) 및 Cr(VI) 화합물에 대한 과민 반응이 발생할 가능성이 있다. 제한된 동물 자료와 불분명한 인체 연구 결과에서 Cr(VI) 노출과 무관하게 수용성 Cr(III) 화합물에 의한 과민 반

응의 유도를 배제할 수 없다. 수용성 Cr(III) 화합물에 대한 일부 크롬에 민감한 개인의 감각반응을 기반으로 RSEN 및 DSEN를 표기한다. 피부를 통한 Cr(III) 화합물의 흡수가 부족하여 전신으로 분포되는 경우 낮고 요배설량도 적다. 이에 대한 주된 이유는 많은 Cr(III) 화합물의 낮은 수용성인 반면, 수용성 화합물은 피부 각질층의 단백질과 밀접하게 가교결합하여 아주 작은 부분만 피부에 침투할 수 있기 때문이다. 따라서 Cr(III) 화합물에는 피부 표기를 하지 않는다. TLV STEL을 추천하기에는 자료가 충분하지 않다.

### 크롬(6가)화합물(Hexavalent Chromium Compounds, Cr(VI))

이 화합물 그룹에는 삼산화크롬( $\text{CrO}_3$ ), 크롬산( $\text{H}_2\text{CrO}_4$ ), 다양한 크롬산염(예:  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ), 중크롬산염(예:  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) 및 다크롬산염이 포함된다.

수용성 Cr(VI) 화합물은 진피와 점막에 매우 자극적이며 피부와 호흡기에 감각을 유발할 수 있다. Cr(VI) 화합물의 심각한 부식 영향은 피부(크롬 구멍)와 입의 궤양, 비염, 비중격 천공을 유발할 수 있다(DaCosta et al., 1916; Bloomfield and Blum, 1928; Lieberman, 1941; Hanslian et al., 1967, IPCS, 2013에서 인용).

Cr(VI)에 대한 장기간 흡입 노출에 대한 동물 자료는 드물지만 가장 명확한 정보는 쥐의 중크롬산나트륨(sodium dichromate) 에어로졸에 대한 30일 및 90일 노출에서 발생되었다(Glaser et al., 1985, 1990). 이는 폐의 지속적인 염증 변화에 대하여 최소유해작용량(LOAEL, lowest observable adverse effect level)을  $0.096 \text{ mg Cr(VI)}/\text{m}^3$ (주 5일 동안 8시간/일로 변환)으로 확인하였다. 쥐의 LOAEL을 사용하여 종별 선량계측 모델링(MPPD v2.1, ARA 2009)을 사용하여 동일한 일일 예치량에 대한 인간 등가 농도(HEC)를 도출했다. 호흡 기관의 모든 영역에서 침착이 발생하고 가벼운 육체 노동 조건에서 작업장 노출이 발생하며 크롬산나트륨( $2.52 \text{ g}/\text{cm}^3$ )에 대한 물질별 밀도 값이 적절하다고 가정했다. 인간에 상응하는 LOAEL은  $0.0022 \text{ mg}$

Cr(VI)/m<sup>3</sup>으로 도출되었으며, 이를 추가로 조정하여 0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>의 NOAEL을 확보하였다. 대규모 후향적 코호트 연구에서 Gibb et al.(2000b)는 CrO<sub>3</sub> 노출로 인한 중격 궤양, 피부 궤양, 비중격 천공 및 고막 천공의 위험을 추정했다. 고용 중 일반적으로 종종 코 자극의 증상(68.1%) 또는 궤양성 비강 격막의 징후(62.9%)가 발생되었다. 비강 및 귀에 대한 영향은 보통 0.010~0.015 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>의 중앙값 노출에 대한 노출이 시작된 후 1개월 이내에 발생했다. NOAEL은 정의되지 않았다.

미국 국립직업안전보건연구원(NIOSH)의 미국 전기도금 시설의 건강 위험 평가(Lucas and Kramkowski, 1975)에서 7/11 작업자가 피부 궤양의 병력을 보고했으며 9/11이 치유된 크롬 궤양의 특징적인 흉터를 가지고 있었다. ; 비출혈, 비염 및 비강 궤양도 보고되었으며, 4/11에서 비중격 천공이 나타났다. 이 노동자들은 평균 7.5년 동안 고용되었으며 평균 농도 0.004 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>에 노출되었다. Lindberg와 Hedenstierna(1983)는 평균 8시간 0.002~0.020 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> TWA 수준에 주로 노출된 크롬 도금공(chrome platers)에서 코 자극, 점막 위축 및 궤양, 폐기능 감소(FEV1, FVC, MMEF)에 대한 상당한 초과 비율(P<0.05)을 확인하였다. 0.002 mg/m<sup>3</sup> 미만의 평균 8시간 TWA 수준에 노출된 작업자의 4/19(21%)에서 비강 자극 및 점막 위축 징후가 나타났다(표 5 참조). 피크 노출을 조사했을 때 NOAEL은 0.0002-0.0012 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> 범위에서 관찰되었다(표 5 참조). 전반적으로, 이러한 자료는 0.0005 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>(즉, 0.5 μg/m<sup>3</sup>)의 TLV-STEL이 Cr(VI) 화합물에 대한 일시적인 피크 노출(transient peak exposures)을 보호하고 TLV TWA가 0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>(즉, 0.2 μg/m<sup>3</sup>)는 상부 및 하기도의 심한 자극과 폐기능 감소로부터 거의 모든 작업자를 보호할 수 있다. Cr(VI) 화합물의 유해한 건강 영향은 상부 및 하부 호흡기 전체에서 발생하기 때문에 적절한 시료 크기는 흡입성 입자상 물질이다.

광범위한 연구에서 Cr(VI) 화합물이 폐암 및 기타 비강암을 유발하는 발암 물질로 확인되었다(U.S. ATSDR, 1989, 2012; UK HSE, 1989; IARC,

1990; IPCS, 1988, 2013; U.S. NIOSH, 2013). Park et al.(2004), Gibb et al. (2000a)는 이 코호트의 노출 반응 관계가 누적 흡연, 인종, 인종 크롬 상호작용 항 및 누적 크롬 노출에 대한 용어를 사용하는 선형 상대 비율 모델에 의해 가장 잘 설명된다는 것을 발견했다. 폐암 사망의 초과 위험은 0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>에 노출된 작업자 1000명당 1명으로 추산되었다. 다른 미국 코호트(Luippold et al., 2003)의 데이터는 Crump et al.(2003)에 의해 분석되었으며, 이는 작업 생애 기간 동안 0.001 mg/m<sup>3</sup>에 노출된 노동자 1000명당 2명의 폐암 사망 초과 위험을 발견했는데, 이는 Park et al.이 계산한 초과 위험과 유사하다(Park et al. 2004; Park and Stayner, 2006).

볼티모어 코호트에 대한 후속 조사(Gibb et al., 2015)는 폐암과 다양한 비강 자극 증상 사이에 상당한 연관성을 보여 Cr(VI)의 자극 영향을 줄이면 Cr(VI)으로 인한 폐암 위험이 감소할 가능성이 있다. 인간과 동물에 대한 강력한 증거를 바탕으로 모든 Cr(VI) 화합물에는 A1(인간 발암성 확인)으로 지정한다. 크롬(VI) 화합물은 수용성에 따라 Cr(III) 화합물보다 피부와 점막에 훨씬 더 많이 침투하며, 이는 피부 발육 및 호흡기 감작에 중요하다. 크롬(VI) 화합물은 세포 내에서 Cr(III)으로 전환되며, 면역 반응은 합텐(haptens)으로 작용하는 Cr(III)-단백질 복합체에 대한 것이다(U.S. ATSDR, 2012).

Cr(VI) 화합물에 대한 감작은 일반적이며, 일단 감작되면 개인은 Cr(III) 또는 Cr(VI) 화합물에 노출될 때 알레르기성 피부염 또는 천식을 경험할 가능성이 있다. 이미 감작된 사람에게는 안전한 노출 수준이 없을 수 있다. 수용성 및 난용성 Cr(VI) 화합물 모두 피부 또는 호흡기 감작을 유발할 수 있으며 이러한 이유로 Cr(VI) 화합물은 그룹으로 DSEN 및 RSEN 표기로 지정되었다.

Cr(VI) 화합물에 대한 0.0002 mg/m<sup>3</sup>의 TLV-TWA 및 0.0005 mg/m<sup>3</sup>의 TLV-STEL은 호흡기 감작을 최소화하고 이미 감작된 개인에서 천식 반응의 가능성을 줄여야 하지만 심각한 반응이 여전히 발생시킬 수 있다. 이러한 낮은 공기 중 노출 수준에서도 피부 접촉과 그로 인한 감작 위험을 방지하기 위해 적절한 관리가 필수적이다.

피부 표시는 수용성 Cr(VI) 화합물에 대한 피부 노출 후 크롬의 전신 흡수를 기반으로 하는 Cr(VI) 화합물에 해당되며, 이는 소변에서 크롬 배설 증가로 찾아낼 수 있다. 산업위생전문가는 수용성 Cr(VI) 노출 및 허용 가능한 수준의 크롬이 있는 경우의 소변 모니터링에 대한 정보를 위해 TLVs® 및 BEIs® 문서에서 소변 중 크롬(VI)에 대한 현재 BEI® 값을 참조하면 된다.

### 크롬광 가공(Chromite Ore Processing)

크롬철광 광석( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ )을 페로크롬 합금(ferrochromium alloys) 또는 크롬산염으로 가공하는 동안 크롬 금속, 크롬산염 및 크롬산염 화합물에 노출될 수 있다. 혼합 노출이 있는 경우 Cr(VI)은 Cr(0) 또는 Cr(III)보다 훨씬 낮은 TLV로도 주요 건강 문제가 있을 것으로 예상된다. 이러한 이유로 크롬철광 광석 처리의 노출기준으로 TLV-TWA(Cr(VI))  $0.0002 \text{ mg/m}^3$  및 TLV-STEL  $0.0005 \text{ mg/m}^3$ (Cr(VI))이 권장된다. 확인된 인체 발암 물질인 Cr(VI)의 존재에 따라 발암 물질 표기(A1)와 RSEN, DSEN 및 피부 표기가 지정된다. 노출 측정 결과 Cr(VI)에 대한 노출이 검출되지 않는 경우 Cr(III)에 대한 TLV를 사용하는 것이 권장된다.

#### 1) TLV® 근거

Cr(0): 호흡기계 자극. Cr(III): 호흡기계 자극; 천식. Cr(VI): 폐암; 비위암; 호흡기 자극; 천식.

#### 2) 물리화학적 성상

작업장에서 가장 자주 사용되는 크롬 화합물의 화학적, 물리적 특성과 일반적인 동의어는 이 문서의 끝 부분에 있는 표 1과 2에 나와 있다. 크롬은 원자

가 -4 및 -2 ~ +6에서 발생한다(U.S. NIOSH, 2013). 그러나 자유 금속 [Cr(0)], 크롬 염[Cr(III)], 크롬산염 및 중크롬산염[Cr(VI)]만이 일반적인 산업 용도로 사용된다.

미국 직업안전보건청(U.S. OSHA, 2006)은 크롬 화합물과 혼합물을 다음 세 가지 범주의 용해도로 분류했다. : 불용성(용해도<0.01g/L), 난수용성(0.01-500g/L), 고수용성(500g/L). 크롬 화합물의 수용성은 원자가 상태에 크게 의존된다. 3가 크롬 화합물 - 크롬(III) 아세테이트, 크롬(III) 염화물 육수화물 및 크롬(III) 질산염을 제외하고는 물에 불용성이거나 잘 녹지 않지만 반면 대부분 Cr(VI) 화합물은 수용성이 높다(표 2 참조). 크롬(VI) 화합물은 자연적으로 거의 발생하지 않으며 대부분은 산업 공정의 산물 또는 부산물로 발생된다.

### 3) 주 사용과 생산(Production and Major Uses)

크롬은 지각에서 21번째로 흔한 원소이다(Krebs, 2006). 크로마이트 광석은 자연적으로 발생하는 형태의 크롬이다. 여기에는 철, 알루미늄 및 마그네슘과 함께 여러 Cr(III) 화합물이 포함된다. 크롬 금속은 1798년에 크롬 철광석에서 처음으로 분리되었다. 크롬 철광석의 채광은 주로 남아프리카, 카자흐스탄, 인도 및 터키에서 발생하며 함께 세계 크롬 자원의 95%를 차지한다. 중국은 주요 크롬 소비 및 강크롬 생산 국가이자 최고의 스테인리스강 생산국이다. 매년 미국은 전 세계 크롬철광 광석 생산량의 약 5%를 소비한다. 2014년 세계 크롬철광 광석 생산량은 2,900만 톤이었다(USGS, 2015).

크롬과 그 화합물의 생산, 특성, 용도, 노출 및 독성은 국제 화학 안전 프로그램(IPCS, 1988, 2009, 2013), 영국 Health and Safety Executive(UK)(HSE, 1989), 국제 암 연구 기구(IARC, 2012), 미국 독성물질 및 질병등록기관(U.S. ATSDR, 2012), 미국 국립 직업안전보건연구원(U.S. NIOSH, 2013)를 비롯한 다양한 국제 기구에서 광범위하게 검토되었

다. 국제 크롬 개발 협회(International Chrome Development Association, ICDA, 2011)는 페로크롬(ferrochromium, FeCr)의 생산을 다음과 같이 설명하고 있다.

“다양한 크기의 크롬 광석은 일반적으로 잠긴 AC 전기로에 장입되고 환원제(코크스, 석탄 및 규암, quartzite)가 추가된다. 제련 공정은 에너지 집약적이며 재료 중량 톤당 최대 4,000kWh가 필요하다. 슬래그는 액체 페로크롬에서 분리되어 추가 처리를 위해 퍼담은 후 두드린다. 그런 다음 액체 페로크롬을 금형에 붓고 냉각 후 고객이 요구하는 크기로 분쇄한다. 분쇄된 페로크롬은 최종 고객이나 선적을 위해 항구로 운반된다(ICDA, 2011).

Lees(1991)는 크로메이트 생산 산업의 핵심 공정을 아래와 같이 요약했다.

기본 생산 공정에는 3가 크롬철광 광석을 밀링 및 석회 및 소다회와 혼합하는 것이 포함된다(일부 시설은 무석회 공정을 사용). 그 후 이 혼합물을 고온으로 가열하여 3가 크롬의 대부분을 6가 크롬 종(chrome species)으로 산화시킨다. 그런 다음 가용성 6가 종을 물로 추출한(침출). 공정의 이 부분을 드라이 엔드(dry end)라고 한다. 추가 생산 활동은 생성된 크롬산 나트륨 침출수의 반응을 기반으로 한다. 일반적으로 최종 결정화 및 포장 단계에 이르기까지 이러한 모든 공정은 액체 형태로 발생된다. 따라서 이것은 웨트 엔드(wet end)로 알려져 있다. Wet-end 생산 단계는 원하는 최종 제품에 따라 다르다. 일반적으로 침출수의 상당 부분은 황산 또는 중황산나트륨(sodium bisulfate) 부산물과의 반응을 통해 중크롬산나트륨으로 전환된다. 중크롬산나트륨은 일반적으로 중크롬산칼륨, 크롬산 및 가죽 무두질제(leather tanning agents)와 같은 다양한 크롬산염 화학물질의 생산에서 중간체로 판매되거나 사용된다(Lees, 1991). 대부분의 Cr(III) 및 Cr(VI) 화합물은 크롬산나트륨 또는 중크롬산나트륨에서 생산됩니다. 예를 들어, 무두질에 일반적으로 사용되는 Cr(III) 화합물인 염기성 크롬 황산염 $[(OH)Cr(SO_4)]$ 은 황산이 있

는 상태에서 중크롬산나트륨을 유기 화합물(예: 당밀)로 환원시켜 상업적으로 생산된다. 일반적으로 안료로 사용되는 Cr(VI) 화합물인 크롬산 납은 크롬산 나트륨과 질산 납의 반응 또는 일산화납과 크롬산 용액의 반응에 의해 생성된다(U.S. ATSDR, 2012). 크롬(VI) 화합물은 특히 다음 응용 분야에서 널리 사용된다(U.S. ATSDR, 2012; IARC, 2012; U.S. NTP, 2016; U.S. OSHA, 2006): 섬유 염료(중크롬산암모늄, 크롬산칼륨, 크롬산나트륨) 및 페인트, 잉크 및 플라스틱(크롬산납, 크롬산아연, 크롬산바륨, 크롬산칼슘, 중크롬산칼륨, 크롬산나트륨)의 안료로서; 부식 억제제(삼산화크롬, 크롬산아연, 크롬산바륨, 크롬산칼슘, 크롬산나트륨, 크롬산스트론튬); 목재 방부제(삼산화크롬); 금속 마감 및 크롬 도금(삼산화크롬, 크롬산스트론튬); 가죽 태닝(중크롬산암모늄). 크롬(VI)은 포틀랜드 시멘트에도 불순물로 존재하며, 크롬이 원래 6가 상태로 존재하지 않았더라도 스테인리스강과 관련된 주조, 용접 및 절단 작업 중에 생성 및 방출될 수 있다(U.S. ATSDR, 2012).

#### 4) 노출(Exposure)

역사적으로 Cr(VI)에 대한 노출은 많은 미국 산업에서 높게 나타났다. 1970년대와 1980년대에 작업장에서 공기 중 Cr(VI) 수준의 일반적인 범위는 다음과 같다. 크롬산염 생산, 0.10-0.50 mg/m<sup>3</sup>; 스테인레스 스틸 용접, 0.05-0.40 mg/m<sup>3</sup>; 크롬 도금, 0.005-0.025 mg/m<sup>3</sup>; 페로크롬 합금, 0.01-0.14 mg/m<sup>3</sup>; 및 크롬 안료 생산, 0.06-0.60 mg/m<sup>3</sup>(Stern, 1982). 1980년대에 독일의 스테인리스강 용접공의 작업 환경에서 삼산화크롬(CrO<sub>3</sub>) 수준은 0.08 mg/m<sup>3</sup>(0.04 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>)만큼 높았으며 중앙값은 0.004-0.01 mg/m<sup>3</sup>(0.002 -0.005 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>)이었다(Angerer et al., 1987). 최근에는 산업화된 국가에서 노출 수준이 더 낮아졌다. 유럽에서 Cr(VI)에 대한 기하 평균 노출은 일반적으로 대부분의 크롬 산업에서 0.02 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> 미만이다(EU, 2005).

1999-2001년에 NIOSH는 다양한 산업에서 Cr(VI) 노출에 대해 21건의 현장 조사를 수행하고 작업자의 호흡 영역에서 8시간 TWA 노출을 측정했다 (Blade et al., 2007). 크롬산염 함유 안료의 스프레이 페인팅 및 샌딩에서 가장 높은 Cr(VI) 노출이 나타났다(범위: <math>0.02-5 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>). 경도가 높고 밝은 전기도금(<math>0.22-16 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>); 원자화된 크롬 합금 스프레이 페인팅(최대 <math>1900 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>); 선박 해체 시 금속 절단(<math>0.07-27 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>); 합금강 용접 및 절단(<math>0.37-22 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>). 이러한 현장 조사는 일련의 사례 연구이며 반드시 미국 전역의 Cr(VI)에 대한 산업적 노출을 대표하는 것은 아니다. 대만의 전기도금 작업에서 Cr(VI)에 대한 노동자의 노출은 전기도금 근처에서 <math>0.5-6.0 \text{ g Cr(VI)}/\text{m}^3</math>, 탱크 및 제조 지역의 <math>0.3 \text{ g Cr(VI)}/\text{m}^3</math>으로 나타났다(Kuo et al., 1997). 핀란드의 현대적인 강크롬 및 스테인리스 스틸 공장에서 1987년 Cr(VI)의 중앙값 농도는 <math>0.5 \text{ g Cr(VI)}</math>인 곳을 제외한 모든 생산 지역에서 <math>0.1 \text{ mg Cr(VI)}/\text{m}^3</math> 이하였다.; 기록된 가장 높은 개인 노출은 <math>6.6 \text{ g Cr(VI)}/\text{m}^3</math>이었다(Huvinen et al., 1993). 1999년에 동일한 시설에서 중간 및 최대 호흡 구역 수준은 각각 <math>0.3</math> 및 <math>0.7 \text{ g Cr(VI)}/\text{m}^3</math>이었다(Huvinen et al., 2002b). 미국 직업상 Cr(VI) 노출 데이터베이스는 OSHA(2006)에서 제공된다. 500,000명 이상의 미국 노동자가 직업상 Cr(VI) 화합물에 노출된 것으로 추정된다(U.S. NIOSH, 2013). 크롬 및 무기 화합물에 대한 입자 크기 선택적 측정에 대한 자료는 매우 제한적이며 "흡입성 입자" 및 "전체" 에어로졸 시료를 동시에 나란히 측정하여 그 결과를 비교한 자료는 부족하다. 이러한 이유로 문서에서 TLV 값은 많은 크롬 화합물이 상부 및 하부 기도 자극을 유발하기 때문에 "흡입성 입자상 물질"로 표현한다. 총 에어로졸의 이전 측정값을 흡입성 입자상 물질로 변환하기에 충분한 자료가 없는 경우 비율을 1.0으로 가정했다. 이는 흡 및 기타 미세 에어로졸에 적합하지만 입자 크기가 <math>10 \mu\text{m}</math>보다 큰 환경에서는 지나치게 보전적일 수 있다.

#### 4) 인체연구(Human Studies)

크롬(Ⅲ)은 인슐린의 작용을 강화함으로써 포도당, 지방 및 단백질 대사에 역할을 할 수 있는 필수 영양소로 간주된다. Institute of Medicine은 Cr(Ⅲ)의 일일 섭취량을 25-45  $\mu\text{g}/\text{day}$ 로 권장했다(IOM-FNB, 2001). Chromium(Ⅲ) picolinate는 건강 보조 식품으로 사용되었다. 신진대사를 촉진하고 항당뇨병 효과가 있다고 주장한다(Broadhurst et al., 1997). 그러나 당뇨병 치료에 Cr(Ⅲ) 화합물을 사용하는 것은 논란의 여지가 있고 다소 입증되지 않은면이 있다(Althuis et al., 2002).

- (1) 호흡기, 부식영향, 자극 및 감작(Respiratory Tract: Corrosive Effects, Irritation, Sensitization)

##### 크롬 금속(METALLIC CHROMIUM, CR(0))

Cr(0)에 대한 정보는 합금강 공장(Triebig et al., 1987)과 보일러 제조업체(Verschoor et al., 1988)에서 노동자의 신장 영향 가능성을 조사한 연구가 있다.  $0.61 \text{ mg Cr(0)}/\text{m}^3$ 의 금속 크롬 및 기타 금속에 평균 7년 노출된 합금 철강 공장에 고용된 작업자는 총 단백질 및 2-microglobulin, alanine-aminopeptidase 효소 활성, N-acety-Dglucosaminidase, gamma-glutamyl-transpeptidase 및 -galactosidase에서 정상적인 소변 수준을 보였다(Triebig et al., 1987). Cr(0)에 노출된 보일러 제조업체에서는 요중 크롬 농도가 증가하지 않았으며 레티놀 결합 단백질, 2-microglobulin 또는 기타 신장 독성 지표의 농도 차이가 발견되지 않았다(Verschoor et al., 1988).

##### 크롬(3가)화합물(TRIVALENT CHROMIUM COMPOUNDS, CR(Ⅲ))

초기 조사에서는 Cr(III) 화합물이 낮은 수준의 독성을 갖는다고 제안했다 (Akatsuka & Fairhall, 1934). 동물과 인간에 대한 후속 연구에서는 Cr(III) 화합물이 흡수될 때 건강에 미치는 악영향이 비교적 적다는 것을 확인하였다 (U.S. ATSDR, 2012). 이것은 잘 알려진 Cr(III)의 특성이 세포막을 통해 잘 흡수되지 않기 때문이다. 그러나 일단 세포 내부에 들어가면 Cr(III)은 단백질과 결합하고 DNA와 가교를 형성하는 경향이 있다. 세포내 Cr(III)의 주요 공급원은 Cr(VI)의 흡수와 가장 안정적인 상태인 Cr(V), Cr(IV) 및 Cr(III)을 포함하는 더 독성이 있는 형태로의 세포내 환원에서 유래한다. Cr(III) 노출과 관련된 주요 건강 영향은 호흡기 자극, 알레르기성 피부염 및 천식이다. 호흡기 자극이 가장 민감한 증점으로 보인다(U.S. ATSDR, 2012). Princi et al.(1962)는 0.27 mg 총 Cr/m<sup>3</sup>의 공기 중 수준에서 페로크롬 합금의 Cr(III)에 노출된 작업자에게서 폐질환을 발견했지만 Cr(III)과 Cr(VI) 모두에 노출되었을 가능성이 있었고 이 질환에 기여했을 수도 있는 기타 분진과 흡이 이 사업장에 존재했다. Huvinen et al.(1993, 1996, 2002a, b)은 핀란드 크롬 노동자: 크롬광 가공(N = 36, Cr (III) 및 기타 노출); 소결 및 분쇄(N = 76, Cr(III) 노출); 제련 및 크롬철 생산(N = 109, Cr(VI) 노출); 및 냉간 압연기(N = 95, 비노출 기준 그룹)dp 대하여 호흡기 건강과 노출에 대한 단면과 추적 연구를 실시하였다. 최초 건강 기반 조사(Huvinen et al., 1996)에서 Cr(III) 화합물에 노출된 노동자는 작업 관련 기침 증상에 대해 기준 집단(referent group)에 비해 (calculated odds ratio, OR = 8.37), 가래 > 3개월(OR = 4.39) 유의하게 증가됨을 확인하였다(P<0.05), 업무 관련 호흡곤란(OR = 2.19), 운동 시 숨가쁨(OR = 2.62)(표 3 참조), 기준 집단과 비교하여 Cr(III)에 노출된 노동자의 더 많은 부분이 건강이 "나쁨(13.2% 대 4.2%; OR = 3.67, P = 0.03)"으로 확인되었다. 연령, 크롬 노출 기간 및 초기 폐질환을 포함하는 로지스틱 회귀 분석은 유의미한 크롬 관련 효과를 나타내지는 않았다(Huvinen et al., 1996). 크롬 노출은 범주형 변수로 분석되었지만 연속 변수로는 분석되지 않았다. 이후 후속 조사(Huvinen et al., 2002a)가 진행

되었으며 크롬 노출 Cr(VI)(N = 104), Cr(III)(대부분 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N = 68), 크로마이트 처리(크롬(III) 입자, 크리스탈일 석면 및 모암(host rock)의 공기 중 입자에 대한 혼합 노출, N = 31), 그리고 각각의 경우에 연구된 74명의 기준 집단에 대한 작업자의 정보를 제공하였다. 비흡연자와 흡연자에 대한 자료는 Cr(III)에 노출된 노동자가 대상 그룹보다 유의하게 더 높은 증상 비율을 가지고 있음을 확인했지만(Huvinen et al., 2002a), 이러한 증상에 대한 교차비는 이전 단면 연구에 비해 감소했다. Cr(III)에 대한 특정 노출 수준은 보고되지 않았지만 총 크롬 및 6가 크롬 수준은 확인되었다. non-Cr(VI) 크롬, Cr(III)의 개인 노출 수준 중앙값은 11년에 걸쳐 0.030 mg/m<sup>3</sup>에서 0.004 mg/m<sup>3</sup>로 감소되었다(Huvinen et al., 2002a). 이러한 결과로 0.03mg Cr(III)/m<sup>3</sup>의 호흡기 증상에 대한 LOAEL을 제안했으며 0.004 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>에서 대부분의 증상이 상당히 감소했다. 나중에 노출 수준에서 증상이 지속되는 것이 Cr(III)에 대한 이전 노출과 관련된 지속적인 영향을 반영하는지, 아니면 훨씬 더 낮고 나중에 노출 수준에 기인하는 영향을 반영하는지는 명확하지 않다. Huvinen et al.(1996, 2002a)는 5년 동안 진행되는 것처럼 보이는 크롬광 광부의 방사선 상 소음영에 주목했지만, 이는 크롬 화합물이 아니라 광산 환경의 공기 중 섬유유로 인한 것으로 추측했다. 크롬광 광부의 방사선학적 변화에 대한 다른 보고는 혼합 노출에서 발생했을 수 있으며 방사선학적 변화가 Cr(III) 화합물로 인한 것인지 여부는 불분명했다(U.S. ATSDR, 2012; U.S. NIOSH, 2013). Cr(VI)(N = 29), Cr(III)(N = 14) 또는 크로마이트(III) 광석(N = 5)에 최소 14년 동안 노출된 스테인리스강 작업자(모든 비흡연자)에 대한 추가 연구에서 크롬에 노출되지 않은 작업자 39명의 기준 집단과 비교하여 크롬에 노출된 작업자의 코 질환이나 코 증상의 발생률은 증가하지 않았다(Huvinen et al., 2002b). 비강 자극의 임상 징후의 노출 관련 증가는 관찰되지 않았지만, 전방 비경검사(anterior rhinoscopy)에서 Cr(VI)(risk ratio = 2.4) 또는 Cr(III)(risk ratio = 2.3)에 노출된 작업자가 노출되지 않은 준거군에 비해 비점막의 염증성 변화 발생률이 증가하는 것으로 나타났다. Cr(VI)

그룹의 평균 노출 수준은  $0.0005 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ 이었고 Cr(III) 그룹의 경우  $0.248 \text{ mg Cr/m}^3$ (총 크롬은 Cr(III) 노출을 반영한 것으로 추정됨)(Huvinen et al. al., 2002b), 크로마이트 광석(chromite ore) 그룹의 경우  $0.022 \text{ mg Cr(III)/m}^3$ 이었다. 이러한 결과는 상기도 자극에 대하여 가능한 LOAEL을  $0.25 \text{ mg Cr(III)/m}^3$ 의 평균 노출로 제안되었다.

피부 또는 기도 감작은 수용성 Cr(VI) 화합물에 대한 노출에서 가장 일반적으로 나타난다(U.S. ATSDR, 2012; IPCS, 2009; U.S. NIOSH, 2013). 수용성 Cr(III) 화합물은 수용성 Cr(VI) 화합물과 마찬가지로 피부에 침투하지 않기 때문에 이러한 Cr(III) 화합물과의 접촉으로 인한 초기 감작은 Cr(VI) 화합물과의 접촉보다 가능성이 적다. 수용성 Cr(VI) 화합물은 진피까지 침투하여 Cr(III)으로 전환된다. 크롬 감작을 유발하는 것으로 여겨지는 합텐(haptens)의 형성을 초래할 가능성이 있는 것은 Cr(III)의 공급원이다. 피부 또는 호흡기 감작에 대한 도발 시험은 크롬에 감작된 대부분의 개인이 Cr(III) 및 Cr(VI) 화합물 모두에 반응하는 것으로 나타났다(U.S. ATSDR, 2012; IPCS, 2009; Leroyer et al., 1998). 따라서 크롬에 감작되고 이후 Cr(VI) 또는 Cr(III) 제제에 노출된 개인은 결과적으로 감작 반응을 경험할 수 있다. 그러나 피부 및 호흡기 감작이 항상 같은 개인에게 나타나는 것은 아니며 피부 감작이 더 일반적인 임상 반응이다(Leroyer et al., 1998).

#### 크롬(6가)화합물HEXAVALENT CHROMIUM COMPOUNDS, CR(VI)

Cr(VI) 화합물의 첫 번째 보고된 호흡기 영향은 중크롬산칼륨에 노출된 작업자의 비중격 천공이었다(Mackenzie, 1884). Bloomfield & Blum(1928)은 Cr(VI) 화합물의 산성 미스트에 노출된 20/23(87%)의 전기도금공(electroplaters)가 비강 격막과 피부 궤양(크롬 구멍)에 천공되거나 궤양이 생겼다고 발표했다. 영국 공장의 의사 감독관(1930)에 따르면 크롬 도금에 종사하는 223명의 작업자 중 42.6%가 피부염이나 피부 궤양을 앓고 있으며

52%는 비중격 천공 또는 궤양이 있다고 보고했다. 후속 산업 보건 문헌에는 Cr(VI) 화합물이 자극성 및 알레르기성 하기도 질환과 비염에서 비중격 천공에 이르는 비강 자극을 유발한다는 것이 잘 문서화되어 있다. 시멘트에 용해된 크롬산염은 피부염과 호흡기 질환을 유발했다(Engebrigtsen, 1952). 비강 자극은 용해성 크롬산염 및 중크롬산염 염 및 크롬산 안개의 흡입과 관련이 있다(Engebrigtsen, 1952; Machle & Gregorius, 1948). 공기 중 6가 크롬 수준과 코 점막의 자극을 연관시키려는 연구가 있었다. Bloomfield & Blum(1928)은 증상이 있는 전기도금공에게서 Cr(VI) 공기 중 노출을 0.06~2.8 mg/m<sup>3</sup>로 추정했다. 미국 연방 보안국(U.S. Federal Security Agency, 1953)의 연구에 따르면 비강 자극이 발생한 전기도금 공장에서 Cr(VI)의 평균 농도는 0.07 mg/m<sup>3</sup>이었다. 크롬에 대한 접촉 피부염의 병력이 있는 5명의 개인이 중크롬산칼륨(potassium dichromate)으로서 0.035 mg Cr(VI)/ml를 함유하는 에어로졸에 분무기를 통해 노출되었다(Olaguibel & Basomba, 1989). 강제 호기량(forced expiratory volume)의 20% 감소가 관찰되었으며 얼굴 홍반, 비인두 가려움증, 코 막힘, 기침 및 천명이 동반되었다. 54개 공장에서 997명의 크롬 도금공과 1117명의 대조군에 대하여 설문 조사를 실시했으며(Royle, 1975) Cr(VI)에 노출된 노동자의 만성 비염, 기관지염이 동반된 비염, 비궤양 및 천공의 비율이 대조군에 비해 통계적으로 유의하게 증가하는 것으로 나타났다. 작업자는 흡입 및 침전된 분진과의 접촉을 통해 Cr(VI) 화합물에 노출되었다. 공기 수준은 일반적으로 0.03 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> 미만이고 침전된 분진의 Cr(VI) 수준은 0.3-97 mg/g이었다. 이러한 증상에 대한 임계 노출 수준은 결정할 수 없다. 전기도금 시설에 대한 미국 NIOSH 건강 위험 평가에서는 평균 7.5년 동안 0.004 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>의 평균 농도에 노출된 작업자 4/11의 비중격 천공이 보고되었다. 이 노동자들 중 다수는 비출혈, 비염, 비강 궤양, 피부 궤양을 앓고 있었다(Lucas and Kramkowski, 1975).

Lindberg & Hedenstierna(1983)는 크롬산에 노출된 85명의 남성과 19

명의 여성 크롬 도금 작업자를 연구했다. 그들은 코, 인후 및 흉부 증상을 평가하고 비강의 변화를 검사하고 폐기능 검사를 시행하였다. 크롬 도금자들의 결과는 크롬에 노출되지 않은 119명의 자동차 정비공으로 구성된 대조군의 결과와 비교하였다. 크롬산에 노출된 기간은 0.1년에서 36년 사이였다. 크롬 노출은 개인용 공기 시료채취기와 크롬산을 포함하는 욕조 가까이에 위치시켜 고정 장비를 사용하여 측정을 수행하였다. 다른 산 및 금속염에 노출과 함께 노출은 "높음(일 평균값 > 0.002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>), "낮음(< 0.002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>) 및 "혼합"(< 0.002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>)으로 분류하였다.

직업적으로 2.5년의 중앙 노출 기간 동안 0.002-0.020 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>에 노출된 노동자에게 비염(P<0.05), 점막 위축(P<0.05), 비강 궤양(P<0.01)의 유병률이 유의하게 증가했으며 폐기능 감소(FEV1, FVC, MMEF)가 발생되었다. 노출 대상자의 약 60%가 흡연자였지만 Cr(VI) 노출과 담배 흡연 사이의 일관된 연관성은 관찰되지 않았다. 그러나 주관적인 코 자극과 점막 위축의 징후가 0.002 mg/m<sup>3</sup> 미만의 평균 8시간 TWA 수준에 노출된 4/19(노동자의 21%)에서도 나타났으므로 명확한 NOAEL을 정의하지 않았다. 비중격 손상은 평균 8시간 TWA 농도보다 크롬산(chromic acid)에 대한 단기 피크 노출과 더 좋은 상관관계가 있었다. "피크" 노출을 조사했을 때 다양한 비강 증상 및 징후에 대한 NOAEL이 0.0002-0.0012 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> 범위에서 관찰되었다.

종합적으로 이러한 자료는 Cr(VI) 화합물에 대한 8시간 TWA가 0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>(0.2 μg/m<sup>3</sup>)이고 STEL이 0.0005 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>(1.0 μg/m<sup>3</sup>)임을 의미한다. 이러한 기준은 거의 모든 작업자를 상부 및 하부 호흡기의 심한 자극과 폐기능의 감소로부터 보호할 수 있다.

Huvinen et al.(1993)은 핀란드 스테인리스 스틸 생산 노동자의 호흡기 증상, 폐기능 결손 또는 X-선 상 진폐증(방사선 상 소음영)의 증가는 없다고 보고했다. 그들의 연구 집단은 같은 부서에서 8년 이상 근무한 노동자 221명과 냉간 압연 공장 및 기타 크롬 또는 분진 노출이 최소이거나 전혀 존재하지

않는 지역의 노동자 95명으로 구성된 대조군으로 구성하였다. 크롬에 노출된 작업자는 3 집단으로 구분하였다.: Cr(VI) 노출(크롬 제련 및 철크롬 생산, N = 109), Cr(III) 노출(크롬 광석 소결 및 분쇄, N = 76), 크로마이트 분진(크로마이트 광석 채광, N = 36). 건강 증상에 관한 설문지는 37명의 전직 노동자가 작성했으며, 질병 때문에 퇴사한다고 보고한 사람은 아무도 없었다. Cr(VI)에 노출된 대조군과 노동자는 평균 고용 기간(16.0년 대 14.4년), 흡연 습관 및 기타 특성이 유사하였다. 혼란 요인의 영향에 대해 조정된 로지스틱 회귀 분석 결과 보고된 증상 비율, 폐기능 장애의 유병률 및 방사선 상 소음영에서 Cr(VI)에 노출된 작업자와 대조군 사이에 유의미한 차이가 없었다 ( $P < 0.05$ ). 1987년 철강 제련소에서 측정된 개인 Cr(VI) 농도의 중앙값은  $0.0005 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ 이었다. 5년 후 동일한 코호트에 대한 추적 관찰 조사에서도 유사한 결과가 나타났다(Huvinen et al., 2002a). 철강 제련소에서 측정된 Cr(VI) 개인 농도 중앙값은 1999년에  $0.0003 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ (최대,  $0.0007 \text{ mg/m}^3$ )로 감소했으며, 저자는 이를 생산 공정의 개선을 주 원인으로 판단하였다. Cr(VI)에 노출된 노동자(N = 104, 평균 고용 기간 21.0년) 및 대조군(N = 81, 평균 고용 기간 19.4년)은 폐기능 검사에서 유의한 차이가 없었다. Cr(VI)에 노출된 1명을 포함하여 3명의 작업자(ILO 범주 1/0)에서 소음영이 많이 발생되었다. 두 연구의 결과를 바탕으로 저자는 측정된 농도의 크롬 화합물에 노출되어도 폐 섬유증이 발생하지 않는다고 결론지었다. 철강 제련소에서 Cr(VI)에 노출된 29명의 작업자에 대한 임상 검사에서는 비강 종양, 만성 궤양 또는 비중격 천공이 발견되지 않았다(평균 고용 기간: 21.4년)(Huvinen et al., 2002a). Huvinen et al.(2002b)의 추가 연구에서 Cr(VI)에 노출된 작업자 48명을 대상으로 비강 세포의 소핵 변화(micronuclei changes)를 평가했다. 29명은 스테인리스강 생산 작업에 종사했으며 1993년과 1999년에 이 노동자들은 각각  $0.0005$  및  $0.0003 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ 의 중간 수준에 노출되었다. 14개는 페로크롬(ferrochromium) 공장의 소결 및 파쇄 부서에 있었고 Cr(III)에 대한 노출은  $0.24\text{--}0.48 \text{ mg Cr(III)/m}^3$ 였다. 그리고 5

명은 0.022 mg Cr(III)/m<sup>3</sup>의 중앙 농도에서 크롬철광 광석에 노출된 크롬철광 광부였다. 대조군은 냉간 압연 공장의 또 다른 39명의 작업자를 선정하였다. 각 그룹은 연령과 고용 기간이 유사했다. 자궁경부 브러시를 사용하여 각 피험자의 중간 비도에서 세포학적 시료를 수집했다. 시료를 원심분리하고 세포 유형 및 소핵에 대해 현미경으로 검사했다. 소핵의 수 또는 유형, 세포 유형의 비율 또는 비정형 세포의 존재에서 그룹 간에 차이가 발견되지 않았다. 노출된 각 그룹은 노출되지 않은 비교 작업자에서 발견된 패턴과 유사했다.

종합하면 Huvinen et al.(1993, 2002a, b)는 0.0003-0.0005 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup> 범위에서 Cr(VI)에 노출된 작업자에 대한 8시간 TWA NOAEL을 제안하며, 이는 Lindberg & Hedenstierna(1983)의 결과로부터 유도된 0.0002 mg/m<sup>3</sup> 값과 유사하다. 훨씬 더 큰 분석에서 Gibb et al.(2000b)는 시간 경과에 따른 CrO<sub>3</sub> 노출로 인한 궤양성 비중격, 피부 궤양, 비중격 천공 및 고막 천공의 위험을 추정하기 위해 충분한 건강 및 노출 자료를 사용하여 역학 연구를 수행하였다. 이 후향적 연구는 2,357명의 남성 노동자의 의무 기록을 검토하고 1950년 1985년 기간 동안 수집된 공기 시료에서 수천 개의 측정치를 분석했다. 이들 노동자의 상당수는 근무 중 어느 정도 시간이 지나면 비중격 염증(68.1%) 또는 비중격 궤양(62.9%)을 경험하였다. 이러한 소견(즉, 비중격 천공, 비중격 출혈, 피부 자극, 피부 궤양, 피부염, 화상, 결막염, 고막 천공)의 최초 진단 당시 Cr(VI) 노출 수준의 중앙값은 0.010-0.015 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>(10-15 g/m<sup>3</sup>)이었다. 특히 우려되는 것은 노출 시작 후 1개월 이내에 발생하는 비강 및 귀 영향에 대한 발견이었다. 비중격(22일), 고막 천공(10일). 비례 유해 모델(proportional hazards model)은 주변 Cr(VI) 수준이 0.05 mg/m<sup>3</sup> 증가할 때마다 궤양성 비강 증격의 경우 1.20, 궤양성 피부의 경우 1.11, 고막 천공의 경우 1.35의 상대 위험으로 예측되었다.

NOAEL은 이 자료에서 분명하지 않다. 인체 노출에 대한 증거 자료에 따르면 Cr(VI) 노출을 8시간 TWA 0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>로 제한하고 일시적인 피크 노출을 0.001mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>로 제한하며, 이는 거의 모든 노동자를 상부 및

하부 호흡기 자극에서 보호되어야 할 필요가 있다.

호흡기 감각에 대한 가능성이 있는 LOAEL 또는 NOAEL에 대한 자료가 부족하다. 그러나 0.0002 mg/m<sup>3</sup>의 TWA와 0.0005 mg/m<sup>3</sup>의 STEL은 Cr(VI) 화합물에 대한 호흡기 감각의 가능성을 상당히 줄여야 하지만 이미 민감한 개인이 이러한 수준에 노출되어도 반응할 수 있다.

## 5) 발암성 및 유전독성(Carcinogenicity and Genotoxicity)

### 금속 크롬, Cr(0)

Cr(0)의 발암성 또는 유전독성에 대한 인체 연구는 확인되지 않았다.

### 3가 크롬 화합물, Cr(III)

식이 연구에서 크롬(III) 피콜리네이트(picolinate dihydrate) 이수화물을 만성적으로 섭취하면 수컷 랫드에서 포피샘의 신생물 발생률이 증가했다. 그러나 암컷 쥐나 수컷 또는 암컷 마우스에서는 증가된 신생물이 관찰되지 않았다(U.S. NTP, 2010). 수컷 50마리와 암컷 F344/N 쥐 50마리로 구성된 그룹에 2년 동안 0, 2000, 10,000 또는 50,000 ppm 크롬 피콜리네이트 이수화물(chromium picolinate monohydrate)을 함유한 식이를 섭취하게 하였다. 크롬 피콜리네이트 이수화물의 2년 평균 일일 용량은 수컷 쥐에서 0, 90, 460 및 2400 mg/kg/day(Cr으로 0, 11, 55 또는 286 mg/kg/day에 해당)로 계산되었다.; 암컷 쥐의 경우 0, 100, 510, 2630 mg/kg/day(0, 12, 61 또는 313 mg/kg/day, Cr에 해당). 수컷 쥐의 포피샘(preputial gland) 선종의 발병률은 Cr(대조군에서 14.9 대 2.2%, P=0.031)과 같이 55 mg/kg/day 투여 군에서 유의하게 증가했지만 더 낮거나 더 높은 투여량에 노출된 군에서는 그렇지 않았다. 그리고 용량 증가에 따른 신생물 발생률에는 유의한 경향이 없었다. 암컷 쥐는 음핵의 신생물을 포함하여 종양 발생률이

증가하지 않았다. 50마리의 수컷과 50마리의 암컷 F6C3F1 마우스 그룹에 2년 동안 0, 2000, 10,000 또는 50,000 ppm 크롬 피콜리네이트 일수화물을 함유한 식이를 섭취시켰다. 크롬 피콜리네이트 일수화물의 2년 평균 일일 용량은 수컷 마우스에서 0, 250, 1200 및 6565 mg/kg/day(0, 30, 143 또는 781 mg/kg/day, Cr에 해당)로 계산되었다. 암컷 마우스의 경우 100, 510 및 2630 mg/kg/day(Cr로 0, 29, 143 또는 726 mg/kg/day에 해당). 수컷 또는 암컷 마우스에서 크롬 피콜리네이트 일수화물 노출로 인한 신생물이나 병변은 없었다. 연구자는 수컷 쥐에서 크롬 피콜리네이트의 발암성에 대한 증거가 모호하며 연구에서 쥐에서 발암성에 대한 증거를 제공하지 않았다고 결론내렸다(U.S. NTP, 2010).

Gibb와 동료들(2000a)은 Cr(III) 및 Cr(VI)에 노출된 2357명의 작업자 중 폐암 사망을 조사했다. Cr(III) 및 Cr(VI)에 대한 노출은 상관관계가 있었고 둘 중 하나의 누적 노출은 폐암과 관련이 있었다. 연구자들은 전체 폐암 사망률에 대한 각각의 기여도를 분리하였다. 누적 Cr(III) 및 Cr(VI) 노출에 대한 변수를 포함하는 Cox 비례 유해 모델에서 Cr(VI) 노출은 과도한 폐암 위험과 유의하게 연관되었고 Cr(III) 수준은 그렇지 않았다. Cr(III) 화합물은 아마 이 집단에서 과도한 폐암 사망에 기여하지 않았을 것이라고 결론지었다(Gibb et al., 2000a).

#### 6가 크롬 화합물, Cr(VI)

미국 ATSDR(1989, 2012), 영국 HSE(1989), IARC(1990), IPCS(1988, 2013) 및 미국 NIOSH(2013)는 모두 Cr(VI) 화합물이 인체 발암 물질임을 분명히 보여주는 대규모 연구를 인용한다. Nickens와 동료들의 리뷰(2010)는 Cr(VI) 발암과 관련이 있는 것으로 간주되는 몇 가지 유전적 및 후성적 메커니즘을 요약했다.

크롬(VI) 발암성은 Cr(VI)의 세포내 대사 감소, 유전독성 및 돌연변이 유발

효과를 생성하기 위해 DNA와 상호작용할 수 있는 크롬 종(chromium species) 생성; Cr(VI) 유발 염증/면역 반응; 및 생존 신호 경로의 변경. 크롬(VI)은 비특이적 음이온 채널을 통해 세포로 들어가며 아스코르브산염, 글루타티온 및 시스테인을 포함한 물질에 의해 대사적으로 Cr(V), Cr(IV) 및 Cr(III)로 환원된다. 크롬(III)은 막 투과성이 약하고 세포막을 통과할 수 없으므로 DNA에 결합하여 유전적 손상을 일으켜 게놈 불안정을 일으킬 수 있는 세포 내에 가두게 된다. Cr(VI)의 세포내 환원에 의해 생성된 구조적 유전 병변에는 DNA 부가물, DNA-가닥 절단, DNA-단백질 가교, 산화된 염기, 염기성 부위 및 DNA 가닥간 및 가닥내 가교가 포함된다. Cr(VI)에 의해 유발된 손상은 DNA 복제 및 전사 기능 장애, 비정상적인 세포 주기 체크포인트, 조절되지 않은 DNA 복구 메커니즘, 미세 위성 불안정성, 염증 반응 및 세포 생존과 세포의 균형을 담당하는 주요 조절 유전자 네트워크의 붕괴로 이어질 수 있다. 모두 Cr(VI) 발암에 중요한 역할을 할 수 있다. 여러 증거에 따르면 신생물 진행은 세포 생존 이점을 제공하고 궁극적으로 정상 인간 세포를 악성 암세포로 전환시키는 연속적인 유전적/후성적 변화의 결과이다.

독일(Gross and Kosch, 1943), 미국(Machle and Gregorius, 1948), 노르웨이(Langard and Norseth, 1975) 및 영국(Royle, 1975)에서 크롬 안료 제조에 종사하는 근로자들 사이에서 폐암 발병률이 증가했음을 보여주는 초기 역학 연구가 보고되었다. Baetjer(1950)는 환자대조군 연구를 수행하여 미국 크롬산염(chromate) 작업자 사이에서 폐암 위험 증가를 확인했다.

Mancuso & Hueper(1951)는 폐암에 걸린 근로자의 공기 중 크롬 노출을 추정하고 0.01~0.15 mg/m<sup>3</sup>의 수용성 크롬과 0.10~0.58 mg/m<sup>3</sup>의 불용성 크롬에 노출되었음을 발견했다. 작업장 에어로졸에서 크롬의 산화 상태는 직접적으로 결정되지 않았다. 대신, 불용성 분율은 Cr(III)으로 가정하고 가용성 분율은 Cr(VI)로 가정했다. 그러나 직접적인 측정 없이는 이 과제의 근거가 부족하고 분석에 심각한 결함이 있었다.

이전 연구에서 크롬산염 작업자는 Cr(III) 및 Cr(VI) 화합물과 기타 잠재적

인 발암 물질(예: 니켈 또는 코발트 화합물, 다방향족 탄화수소)에 노출되었다. 일반적으로 그 증거는 수불용성(water-insoluble) Cr(III) 물질인 크롬광 광석이 발암 물질임을 제안하지는 않았다. 초기 특정 Cr(VI) 화합물, 주로 불용성이거나 물에 잘 녹지 않는 화합물이 폐암 위험 증가의 원인이 되는 것으로 나타났다. 동물 실험 자료는 난용성(poorly soluble) Cr(VI) 화합물(예: 크롬산 아연)이 발암성인 반면 가용성 Cr(VI) 형태는 암을 유발하지 않는 것으로 나타났다(Laskin et al., 1969). 그러나 U.S. ATSDR(2012), IARC(2012) 및 U.S. NIOSH(2005, 2013)에 의해 요약된 많은 양의 후속 증거는 모든 Cr(VI) 화합물이 수성 매질에서의 용해도에 관계없이 발암 가능성이 있다고 밝혔다. 미국 NIOSH(2013)는 Cr(VI) 화합물에 대한 최근 기준과 관련된 기록에서 2개의 미국 코호트(Gibb et al., 2000a; Luippold et al., 2003)에 대해 수행된 연구를 위험 평가를 위해 사용하기 가장 적합한 것으로 강조했다. 이 연구는 개별 작업자, 잘 정의된 코호트, 장기간의 추적 관찰, 상당한 수의 사망에 대한 좋은 노출 추정치를 가지고 있다. Gibb et al. (2000a)이 연구한 볼티모어 코호트의 연구대상자 수가 더 많았고(N = 2357) 사망(N = 122), 코호트의 80% 이상에 대한 흡연 자료가 있었고 코호트의 87%에 대한 인종과 관련된 정보가 있었는데 이는 위험성 평가를 위해 선호하는 데이터 세트로 구성되어 있었다.

볼티모어 자료를 사용하여 단일 단계 및 다단계 모델을 탐색한 후 Park와 동료(2004)는 노출-반응 관계가 누적 흡연(선형 스플라인), 인종, 인종-크롬 상호작용 기간, 누적 크롬 노출(5년 지연)에 대한 항을 사용하는 선형 상대 비율 모델에 의해 가장 잘 설명된다는 것을 발견했다. 이 NIOSH 위험성 평가는 작업 수명 동안 0.001 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>에 노출된 근로자 1000명당 6명의 초과 폐암 사망; 0.0005 mg/m<sup>3</sup>에서 작업자 1000명당 3명; 및 0.0002 mg/m<sup>3</sup>에서 근로자 1000명당 약 1명과 같이 폐암 사망에 대한 평생 초과할 위험성을 나타냈다(Park et al., 2004). 이러한 위험성 추정치는 사용된 데이터 세트, 가정 및 검정된 모델에 따라 다를 수 있다.

Painesville 코호트(Luippold et al., 2003)에는 493명의 근로자가 포함되어 있으며 51명의 폐암으로 사망했다. Crump와 동료들(2003)은 근무 기간 동안 0.001mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>에 노출된 근로자에서 1000명당 2명의 폐암 사망에 대한 초과 위험이 발견되었으며 이는 볼티모어 코호트에 대해 계산된 초과 위험과 유사한 수준으로 확인하였다(Park et al., 2004). Park and Stayner(2006)는 Cr(VI)과 폐암 사이의 관계에서 역치 또는 기타 비선형성을 정의하기 위해 볼티모어 코호트의 자료를 추가로 조사했다. 분석의 한계 때문에 역치를 배제할 수는 없었지만 연구자들은 Cr(VI) 폐암 영향에 역치가 존재하지 않을 가능성이 있으며 존재한다면 0.001 mg/m<sup>3</sup> 미만일 것이라고 결론을 내렸다. 임계값을 표시한다고 주장하는 여러 연구(Luippold et al., 2003; Birk et al., 2006)에는 낮은 Cr(VI) 노출 수준에서 그러한 임계값이 무엇인지 자신 있게 예측할 수 있는 충분한 폐암 사망에 대한 자료가 부족했다. 이 연구는 또한 노출 범주 전반에 걸쳐 매우 유의미한 선형성 경향을 보였으며, 그 결과는 Park & Stayner(2006)와 유사하였다.

NIOSH 조사자(Park et al., 2004; Park & Stayner, 2006)는 가장 포괄적인 분석을 수행하여 Cr(VI)과 폐암의 관계에 대한 값을 0.0002 mg/m<sup>3</sup>으로 제시하였고, 이러한 의미는 작업 수명 동안 1000명당 약 1명의 위험이 NIOSH의 Cr(VI) 화합물에 대한 권장 노출 기준(Recommended Exposure Limit)의 근간을 마련하였다(U.S. NIOSH, 2013).

Gibb와 동료들(2015)은 2011년까지 볼티모어 코호트의 업데이트한 내용을 제공했다. 당시 총 사망자 수는 1613명(총 코호트 2354명의 69%)으로 증가했으며 217명의 폐암 사망자(코호트의 9.2%)가 있었다. 흡연자로 제한된 분석에서 폐암 사망에 대한 관찰/예상 비율(O/E)은 노출 사분위수에 따라 단 순하게 증가했다.

Q1 O/E = 1.18 (95% CI = 0.84 1.60)

Q2 O/E = 1.81 (95% CI = 1.34 2.39)

Q3 O/E = 1.95 (95% CI = 1.44 2.58)

Q4 O/E = 2.54 (95% CI = 1.96 3.24)

또한 누적 Cr(VI) 노출은 흡연 및 근무 연수에 대한 변수를 포함하는 회귀 모델에서 폐암의 유의한 예측인자로 확인되었다( $P < 0.05$ ). 로그 누적 Cr(VI) 노출은 이 코호트에서 로그 누적 Cr(III) 노출( $r = 0.98$ ,  $P < 0.001$ )과 높은 상관 관계가 있어 폐암에 대한 Cr(III)의 기여도를 결정할 수 없었다[모델 누적 Cr(VI) 및 Cr(III) 노출을 포함하여 Cr(III)에 대해 음의 계수를 보였다].

비강 자극의 다양한 증상과 폐암의 유의한( $P < 0.05$ ) 연관성이 관찰되었다. 폐암의 위험은 개인마다 코 자극의 빈도에 따라 증가하고 코 자극의 유형에 따라 다르다(Gibb et al., 2015). 이 관찰은 단순히 비강 자극을 폐암을 유발하기에 충분한 Cr(VI) 노출의 표지자로 반영하거나 자극이 Cr(VI) 유발 폐암의 기전임을 시사할 수 있다. 두 경우 모두 비강 자극을 유발하는 Cr(VI)에 대한 노출을 최소화하는 것과 관련이 있으며 염증 감소에 기반한 TLV가 폐암 감소에 대한 우려도 해결할 수 있음을 의미한다.

Gibb와 동료(2015)는 또한 폐암 예방에 현재 OSHA PEL( $5 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$ ) 및 NIOSH REL( $0.2 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$ )의 적절성을 언급했다. 45년의 작업 수명을 가정할 때 OSHA PEL은 작업자를  $225 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$  연간 누적 노출에 노출시키는 수준이고(노출의 최고 사분위수에 배치), NIOSH REL은 작업자를  $9 \mu\text{g}$ 에 노출시키는 수준이다( $\text{Cr(VI)}/\text{m}^3$ (흡연자의 폐암에 대한 Cr(VI)의 O/E 위험이 1.95인 노출의 두 번째로 높은 사분위수에 배치).

2011년까지의 Painsville 코호트 업데이트도 보고되었다(Proctor et al., 2016). 원래 코호트에 198명의 단기 근로자(1년 미만)가 추가되어 노출 스펙트럼의 최하단에 기여하여 714명의 근로자의 새로운 코호트를 생성했다. 모든 암으로 인한 사망은 총 167명(코호트의 25%)이었고 그 중 77명이 폐암이었다. 폐암 발병률(SMR 186; 95% CI=145228)은 이전에 관찰된 것(SMR 241, 95% CI=180317)보다 낮았으며, 이는 Cr(VI)에 대한 노출수준이 낮고

폐암 위험이 낮은 대상을 추가한 것과 일치한다. 업데이트된 코호트의 결과에 따르면 45년 동안 OSHA PEL( $5 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$ )에 지속적으로 노출되면 폐암 위험이 1000명당 8.3명으로 추산되었다. 45년 동안 NIOSH REL( $0.2 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$ )에 지속적으로 노출된 경우 위험은 작업자 1000명당 0.3명으로 추정되었다.

## 6) 유전독성(Carcinogenicity and Genotoxicity)

크롬(VI)과 Cr(III)은 인간 세포주에서 유전독성이 있는 것으로 나타났다. S 상 의존성 DNA 이중 가닥 파손은 크롬산나트륨에 노출된 배양된 인간 진피 섬유아세포에서 관찰되었다(Ha et al., 2003, 2004). 크롬산나트륨(Sodium chromate)은 또한 배양된 인간 기관지 섬유아세포 및 기관지 상피 세포에서 농도 의존적 염색체 손상이 유도되었다(Holmes et al., 2006; Wise et al., 2006).

Cr(III)에 대해 약한 양성 반응이 관찰되었다(Nakamuro et al., 1978; Stella et al., 1982). 그러나 Cr(III) 화합물의 유전독성 효능은 동일한 시스템에서 테스트한 Cr(VI) 화합물보다 몇 차수 낮았다. 증가된 소핵과 DNA 손상에 대한 긍정적인 결과는 염화크롬(III)에 노출된 림프구에서도 관찰되었다(Blasiak and Kowalik, 2000). 손상되지 않은 세포에서 Cr(III)에 대한 양성 결과는 시험 화합물의 Cr(VI) 오염, 매우 높은 용량에서의 비특이적 영향, 세포 내로 Cr(III)의 침투 또는 기술적 인공물 등에 대한 결과에 의문이 제기되었다(De Flora et al., 1990). Cr(III) 화합물은 상대적으로 세포막을 통과할 수 없기 때문에 Cr(VI) 화합물보다 독성이 적지만 Cr(III)이 Cr(VI)에서 세포 내 환원에 의해 형성되거나 세포 내 시스템에서 DNA와 반응한다(Bridgewater et al., 1994a, b, 1998; Fornace et al., 1981; Snow, 1991; Snow and Xu, 1989).

직업적 노출 연구는 크롬 화합물의 유전독성 가능성에 대해 복합적인 결과

를 보였다. 스테인리스강 용접 및 전기도금에서 Cr(VI)에 노출된 작업자에 관한 연구(Halasova et al., 2008; Husgafvel-Pursiainen et al., 1982; Littorin et al., 1983; Nagaya, 1986; Nagaya et al., 1991) 및 제혁소의 Cr(III)(Hamamy et al., 1987)은 말초 림프구에서 염색체 이상 또는 자매 염색분체 교환의 증가된 수가 보고되지 않았다. 중크롬산염 생산에 관여하는 Cr(VI)에 노출된 작업자의 림프구에서는 DNA 가닥 절단 또는 데옥시구아노신의 하이드록실화(hydroxylation of deoxyguanosine)가 증가하지 않았지만(Gao et al., 1994), 19명의 크롬 도금업자의 말초 림프구에서는 DNA 가닥 절단이 보고되었다(Gambelunghe et al., 2003).

불가리아의 크롬 전기도금 작업자에 대한 연구에서 말초 림프구와 협측 점막 세포에서 소핵의 빈도 증가가 보고되었다(Benova et al., 2002). 크롬 전기도금에 종사하는 15명의 작업자의 경우 매우 낮은 노출 영역( $0.0004 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ ,  $N = 15$ )의 작업자와 비교하면 낮은(평균 노출,  $0.0075 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ ) 및 높은( $0.0249 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ ) 노출 영역에서 말초 림프구 및 협측 점막 세포의 소핵의 상당한 증가가 관찰되었다(Benova et al., 2002).

Cr(VI)이 유전독성이라는 보고 외에도, 설치류를 대상으로 한 경구 섭취 연구 및 위장 세포를 포함한 시험관 내 연구에서 발암성과 관련된 비유전독성 효과가 보고되었다(De Flora et al., 2016; Kirman et al., 2012, 2016). ; Thompson et al., 2012a, b, 2013). 이 결과는 Cr(VI) 섭취 후 쥐와 생쥐의 GI 암과 관련이 있었다. 장의 관강 내 환경이 폐와 다르다는 것은 분명하지만 Cr(VI) 섭취로 인한 이러한 결과가 작업자의 Cr(VI) 흡입과 어떻게 관련되는지는 분명하지 않았다. Cr(VI)에 노출된 작업자의 여러 대규모 사망률 집단에서 위장관 암의 증가가 관찰되지 않았다(Cole and Rodu, 2005; Crump et al., 2003; Gatto et al., 2010). Gibb et al., 2000a, 2015; Proctor et al., 2016).

## 7) 기타 영향(Other Effects)

0.0002 mg Cr(VI)/m<sup>3</sup>의 흡입 노출에서 이러한 영향이 발생하지 않는다.

### 피부 영향(DERMAL EFFECTS)

개인이 민감해지는 유도 단계 이후에 피부에 노출되면 알레르기 반응이 나타난다. 급성 반응 단계는 며칠에서 몇 주 동안 지속되며 홍반, 부종, 크고 작은 수포가 특징이다. 반복 노출 후 만성 단계는 유사한 임상 특징을 나타내지만 피부가 두꺼워지고, 벗겨지며, 갈라진 피부가 나타날 수도 있다(Winder and Carmody, 2002). 크롬 감수성을 진단하기 위한 기술로 피부 패치 테스트를 사용한 연구에 따르면 소량의 Cr(III) 또는 Cr(VI)에 대한 도전이 감작된 개인에서 반응이 유도될 수 있다(Hansen et al., 2003, 2006a, b). 유사한 결과에 따르면 크롬(III) 화합물을 사용한 크롬(VI) 민감 환자의 패치 테스트는 알레르기 반응을 유발할 수 있다(Fregert and Rorsman, 1964, 1966; Mali et al., 1966). 따라서 Cr(III) 및 Cr(VI)에 대한 교차 반응성(cross-reactivity)은 일반적으로 발견되는 것으로 보인다.

### 신장 영향(RENAL EFFECTS)

알부민뇨와 핍뇨, 다뇨, 질소 정체를 동반한 급성 신염은 크롬산칼륨이 함유된 피부 연고를 사용한 후 개인에서 발생되었다. 사망한 사람들의 부검에서 충혈과 세뇨관 괴사가 밝혀졌다(Brieger, 1920). 다뇨증과 단백뇨를 동반한 급성 신염은 평면 인쇄 공장에서 몇 달 동안 일한 후 중크롬산 암모늄에 대한 피부 접촉으로 인해 양손에 피부 궤양을 겪은 한 남성이 기술되었다(Smith, 1931). 얼굴에 수술이 불가능한 암이 있는 49세 남자가 크롬산 결정으로 치료를 받았다. 심한 단백뇨와 함께 심각한 신염이 발생했다. 신장에 대한 부검에서 세뇨관 상피의 광범위한 파괴가 확인되었다(Major, 1922). 다리에서 약

10분 동안 크롬산에 피부를 노출시킨 전기도금 작업자는 24시간 이내에 꺾노가 발생했으며 혈청 크레아티닌 수치가 증가하면 급성 신부전으로 진행되었다(Lin et al., 2009). Hunter와 Roberts(1933)는 중크롬산칼륨(potassium dichromate)에 노출된 원숭이의 신장 영향을 기록하였다. 크롬 관련 신장 영향에 대한 이러한 보고 중 어느 것도 정량적 노출 정보가 제공되지 않았다.

#### 안 영향(OCULAR EFFECTS)

Gibb와 동료들(2000b)이 연구한 볼티모어 크롬 작업자 코호트의 20%에서 결막염이 보고되었다. 평균 노출 수준은  $0.025 \text{ mg Cr(VI)}/\text{m}^3$ 이고 평균 증상 발병 시간은 604일이었다. 7개의 미국 크로메이트 생산 공장에서 일하는 크로메이트 작업자에 대한 광범위한 연구(USPHS, 1953)에서 크롬 화합물이 눈에 자주 튀는 것이 관찰되었다. 안과 검사에서 비-크로메이트 작업자 45/155명(29.0%)에 비해 크로메이트 작업자 430/897(40.8%)에서 결막의 이상소견이 유의하게 증가하였고( $P=0.003$ ), 결막충혈도 크롬산염 작업자(38.7% 대 25.8%,  $P = 0.001$ )가 더 흔하게 발견되었다. ; 눈 분비물(3.2% 대 1.3%), 각막 홍터(2.3% 대 2.6%) 또는 결막 작열감(17.0% 대 22.6%)에서 크롬산염 작업자 중 유의미한 증가는 발견되지 않았다. 중크롬산나트륨과 크롬산나트륨(pH 7.4)의  $1000 \text{ mg Cr(VI)}/\text{L}$  용액 0.1 ml를 주입하면 토끼의 눈에 자극적이거나 부식성은 없었다(Fujii et al., 1976). 공기 중 이산화 크롬(chromium dioxide)( $15.5 \text{ mg Cr(VI)}/\text{m}^3$ )에 노출된 쥐의 눈에 대한 조직학적 검사에서는 병변이 나타나지 않았다(Lee et al., 1989). 또 다른 눈 자극 검사에서 수컷과 암컷 뉴질랜드 흰둥이 토끼에게 물에 크로뮴 니코티네이트(chromium nicotinate)로  $5.2 \text{ mg Cr(III)}$ 을 직접 점적하면 각막 혼탁이나 홍채염이 관찰되지 않았지만 적용 1시간 이내에 결막염이 발생되었다(Shara et al., 2005).

### 위장관 영향(GASTROINTESTINAL EFFECTS)

옴 치료를 위해 개인의 피부에 크롬산칼륨이 함유된 연고를 바르자마자 구토가 발생되었다. 이들 중 일부는 노출된 부위의 감염으로 사망했으며 부검 결과 위점막의 충혈이 밝혀졌다(Brieger, 1920). 약 10분 동안 크롬산에 피부를 노출시킨 전기도금 작업자는 메스꺼움, 구토 및 복통을 보고했다(Lin et al., 2009). 치사 농도의 Cr(VI) 화합물에 노출된 뉴질랜드 토끼에서 설사가 보고되었다(Gad et al., 1986). Cr(VI) 화합물의 섭취는 쥐에서 위 병변을 유발했다(Samitz, 1970). 13.5~50 mg/kg 크롬산칼륨(3.6~12.9 mg Cr(VI)/kg)을 위관 영양법으로 투여한 쥐에서 간 및 신장 독성과 혈액학적 변화가 관찰되었다(Kumar et al., 1985; Kumar and Barthwal, 1991; 미국 ATSDR, 2000).

9주 동안 사료로 중크롬산칼륨(수컷의 경우 1.1~32 mg/kg/day, 암컷의 경우 1.8~48 mg/kg/day)을 투여한 수컷 및 암컷 마우스에서 간세포 세포질 공포화가 보고되었다(U.S. NTP, 1996). 비슷한 용량의 다양한 Cr(VI) 화합물을 사용한 추가 연구에서는 간독성 효과를 입증하지 못했다(U.S. ATSDR, 2000).

### 혈액학적 영향(HEMATOLOGICAL EFFECTS)

심각한 백혈구 증가증(미성숙 다형핵 세포, 골수 세포 및 골수모세포의 현저한 증가와 함께), 유헤 적혈구 및 Howell-Jolly 소체(용혈성 빈혈을 나타냄)가 옴을 치료하기 위해 크롬산칼륨을 함유한 피부 연고를 적용한 후 개인에서 관찰되었다(Brieger, 1920). 백혈구 증가증은 평면 인쇄 공장에서 중크롬산 암모늄에 피부에 노출된 후 양손에 피부 궤양이 있는 남성의 사례 보고서에서도 설명되었다(Smith, 1931). 빈혈과 혈소판 감소증은 전기도금 작업자가 다리를 크롬산에 약 10분 동안 노출시킨 후 5일 후에 발생했다(Lin et al., 2009). 크롬 화합물에 피부 노출 후 동물에서 혈액학적 영향에 대한 연

구는 발견되지 않았다.

#### 생식 영향(REPRODUCTIVE EFFECTS)

수용성 Cr(VI) 화합물이 임신과 결과에 미치는 영향에 대한 동물 연구는 다양한 결과가 나타났다(IPCS, 2013). 임신부와 남성 스테인리스강 용접공의 배우자에 대한 Cr(VI) 노출의 영향에 대한 연구는 결정적이지 않았다(IPCS, 2013). Cr(VI) 화합물에 노출된 21명의 중국인 전기도금 작업자에서 정자 수, 정자 운동성, LDH 및 LDH C4 동종효소는 대조군과 비교하여 유의하게 감소했으며( $P < 0.05$ ), FSH 수준은 유의하게 증가했다( $P < 0.05$ )(Li et al., 2001). 생식 및 발달 독성에 대한 동물 연구를 요약했다(IPCS, 2013). 수용성 형태의 Cr(VI)에 대한 섭식 연구는 일반적으로 10 mg Cr(VI)/kg 이상의 용량에서 쥐의 수컷 고환에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### TLV® 개정 연혁

##### 크로밀 클로라이드(Chromyl chloride)

1980: 제안: TLV TWA, 0.025 ppm

1982 2018: TLV TWA, 0.025 ppm

2017: 제안: 철회, 크롬과 무기화합물 참조

2018: 철회, 크롬과 무기화합물 참조

##### 크롬 및 무기화합물(Chromium and inorganic compounds)

1946-1947: MAC TWA, 0.1 mg/m<sup>3</sup> 크롬산과 크로메이트(as Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

1948-1949: TLV TWA, 0.1 mg/m<sup>3</sup> 크롬산과 크로메이트(as Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

1950-1975: TLV TWA, 0.1 mg/m<sup>3</sup> 크롬산과 크로메이트(as CrO<sub>3</sub>)

- 1968-1981: TLV TWA, 0.5 mg/m<sup>3</sup>, as Cr 가용성 크롬, 크롬염  
(Soluble chromic, chromous salts)
- 1974-1976: TLV TWA, 0.1 mg/m<sup>3</sup>; A1a 특정 불용성 크로메이트  
(Certain insoluble chromates)
- 1976-1980: TLV TWA, 0.05 mg/m<sup>3</sup>, as Cr 크롬산 및 크로메이트  
(Chromic acid and chromates)
- 1976: TLV TWA, 1 mg/m<sup>3</sup> 크롬 금속(Chromium metal)
- 1977-1980: TLV TWA, 0.05 mg/m<sup>3</sup>, as Cr; A1a 특정 불용성 크로메  
이트(Certain insoluble chromates)
- 1978-1986: TLV TWA, 0.05 mg/m<sup>3</sup>, as Cr; A1a 크롬광 가공  
(Chromite ore processing)
- 1981-1993: TLV TWA, 0.5 mg/m<sup>3</sup> 크롬 금속; TLV TWA, 0.5 mg/  
m<sup>3</sup>, as Cr 크롬(II)과 크롬(III) 화합물 TLV TWA, 0.05  
mg/m<sup>3</sup>, as Cr 크롬(VI) 수용성 화합물(water-soluble  
compounds)
- 1981-1986: TLV TWA, 0.05 mg/m<sup>3</sup>, as Cr; A1a 특정 수용성 크롬  
(VI) 화합물(Certain water-insoluble chromium(VI)  
compounds)
- 1987-1993: TLV TWA, 0.05 mg/m<sup>3</sup>, as Cr; A1, 인체 발암 확인 물질  
(Confirmed Human Carcinogen) 특정 수용성 크롬  
(VI) 화합물과 크롬광가공(Certain water-insoluble  
chromium(VI) compounds and chromite ore  
processing)
- 1994 2018: TLV TWA, 0.5 mg/m<sup>3</sup>, as Cr; A4, 인체 발암 물질로 분류  
불가(Not Classifiable as a Human Carcinogen) 크롬

금속 및 Cr(III) 화합물(Chromium metal and Cr(III) compounds);

TLV TWA, 0.05 mg/m<sup>3</sup>, as Cr; A1, 인체 발암 확인 물질(Confirmed Human Carcinogen) 수용성 크롬(VI) 화합물(Water-soluble chromium(VI) compounds); TLV TWA, 0.01 mg/m<sup>3</sup>, as Cr; A1, 인체 발암 확인 물질(Confirmed Human Carcinogen) 불용성 크롬(VI) 화합물(Insoluble chromium(VI) compounds)

2017: 제안: TLV TWA, 0.5 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(0), 흡입성 입자상 물질 금속 크롬(Inhalable particulate matter Metallic Chromium); TLV TWA, 0.003 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(III), 흡입성 입자상 물질(Inhalable particulate matter); RSEN; DSEN; A4, 인체 발암 물질로 분류 불가(Not Classifiable as a Human Carcinogen) 크롬(III) 화합물(Chromium(III) compounds); TLV TWA, 0.0002 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(VI), 흡입성 입자상 물질; TLV STEL, 0.0005 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(VI), 흡입성 입자상 물질; RSEN, DSEN; Skin; A1, 인체 발암 확인 물질(Confirmed Human Carcinogen) 크롬(VI) 화합물(Chromium(VI) compounds); TLV TWA, 0.0001 ppm, as Cr(VI), 흡입성 분울 및 증기(Inhalable fraction and vapor); TLV STEL, 0.00025 ppm, as Cr(VI), 흡입성 분울 및 증기(Inhalable fraction and vapor); RSEN; DSEN; Skin; A1, 인체 발암 확인 물질(Confirmed Human Carcinogen)-크로밀 클로라이드(Chromyl chloride)

2018: 적용: TLV TWA, 0.5 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(0), 흡입성 입자상 물질 금속 크롬(Inhalable particulate matter Metallic Chromium); TLV TWA, 0.003 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(III), 흡입성 입자상 물질(Inhalable particulate matter); RSEN; DSEN; A4, 인체 발암

물질로 분류 불가(Not Classifiable as a Human Carcinogen)  
크롬(III) 화합물 Chromium(III) compounds; TLV TWA, 0.0002 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(VI), 흡입성 입자상 물질; TLV STEL, 0.0005 mg/m<sup>3</sup>, as Cr(VI), 흡입성 입자상 물질; RSEN, DSEN; Skin; A1, 인체 발암 확인 물질(Confirmed Human Carcinogen) 크롬(VI) 화합물(Chromium(VI) compounds); TLV TWA, 0.0001 ppm, as Cr(VI), 흡입성 분울 및 증기 (Inhalable fraction and vapor); TLV STEL, 0.00025 ppm, as Cr(VI), 흡입성 분울 및 증기(Inhalable fraction and vapor); RSEN; DSEN; 피부 흡수(Skin); 인체 발암 확인 물질 (Confirmed Human Carcinogen)-크로밀 클로라이드(Chromyl chloride)

### 5) 6가 크롬에 대한 OSHA PEL 설정 근거(29 CFR Parts 1910, 1915, et al.)

2006년 2월 28일 미국 OSHA에서 발간된 6가 크롬에 대한 직업적 노출; 최종 규칙(29 CFR Parts 1910, 1915, et al.)은 총 267페이지로 상당히 방대하다. 이번 연구보고서에는 미국의 PEL이 어떤 과정을 거쳐 개정되었는지, 노사 등 관계자들의 논란은 없었는지가 중요하여 15장 기준 요약 및 설명(Summary and Explanation of the Standards)의 (a) 범위와 (c) 허용노출기준(Permissible Exposure Limit, PEL)을 발췌하여 번역하였고, 포괄적으로 설명이 가능한 규정인 18장 최종 기준(Final Standards)은 전문을 번역하여 수록하였다.

#### (1) 개요

미국 노동부(DEPARTMENT OF LABOR)

미국 직업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration)

29 CFR Parts 1910, 1915, 1917, 1918, and 1926

[Docket No. H054A]

RIN 1218-AB45

6가 크롬에 대한 직업적 노출(Occupational Exposure to Hexavalent Chromium)

기관(AGENCY): 직업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA), 노동부(Department of Labor).

조치(ACTION): 최종 규칙

#### SUMMARY:

미국 직업안전보건청(OSHA)은 6가 크롬(Cr(VI))에 대한 직업적 노출을 제한하는 기존 기준을 개정하였다. OSHA는 현재 이용 가능한 최상의 증거에 기반하여 Cr(VI)에 대한 현재 허용노출기준(PEL)이 근로자가 건강 손상을 입힐 상당한 위험에 직면해 있다고 결정했다.

최종 규칙은 공기 입방 미터( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )당 Cr(VI)  $5 \mu\text{g}$ 의 8시간 시간 가중 평균(TWA) 노출 기준으로 설정하였다. 이는  $\text{CrO}_3$ 로 보고된 공기 10입방미터당  $1 \text{ mg}$ ( $1 \text{ mg}/10\text{m}^3$ , 또는  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 기존 PEL에 비해 상당히 감소한 것으로, Cr(VI)로서  $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준치에 해당한다.

이 규칙 제정에 대한 기록의 증거는 Cr(VI)에 노출된 근로자가 폐암 발병 위험이 높다는 것을 의미한다. 또한 이 기록에는 직업상 Cr(VI)에 노출되면 천식, 비강 상피 및 피부 손상을 유발할 수 있다는 것도 포함되어 있다.

최종 규칙에는 노출 결정에 대한 요구사항, 새로운 PEL이 실행 불가능한 소규모 부문에 대한 준수 대안, 호흡기 보호, 보호복 및 보호 장비, 위생 지역 및 실행, 의료 감시, 기록 보관 및 PEL을 충족하기 위해 공학적 관리 실행을 위해 발표일 이후 4년을 포함하는 기간 등 선호하는 노출 관리 방법 등과 같이 작업자 보호에 대한 보조 조항도 포함되어 있다.

최종 기준은 일반 산업, 건설 및 조선소를 개별적으로 규제하여 이러한 각 부문의 고유한 상황에 맞게 요구 사항을 조정한다.

이 규칙에 의해 설정된 PEL은 기술적으로나 경제적으로 가능한 최대 범위까지 Cr(VI)에 대한 직업적 노출로 인해 근로자에게 발생하는 심각한 위험을 감소시킬 수 있는 기준이다.

#### DATES:

이 최종 규칙은 2006년 5월 30일에 발효된다. 특정 조항에 대한 시작 날짜는 일반 산업의 경우 § 1910.1026(n), 조선업의 경우 § 1915.1026(l); 및 건설업 § 1926.1126(l)에 설정되어 있다. 그러나 영향을 받는 당사자는 노동부가 연방 관보에 OMB(예산 관리국)에서 할당한 관리 번호를 게시할 때까지

최종 규칙의 정보 수집 요구 사항을 준수할 필요가 없다. 관리 번호의 공개는 OMB가 1995년 문서 축소법에 따라 이러한 정보 수집 요구 사항을 승인했음을 대중에게 알린다.

#### SUPPLEMENTARY INFORMATION:

다음 목차는 최종 기준에 대한 전문의 구조를 나타냈다. 이 전문에는 OSHA의 법적 의무에 대한 자세한 설명, 규칙 제정 중에 제출된 의견 및 자료의 요약 및 응답을 포함하여 FDA의 결정을 뒷받침하는 분석 및 근거가 포함되어 있다.

##### I. 일반 사항(General)

이 최종 규칙은 모든 Cr(VI) 화합물에 대한 8시간 시간 가중 평균으로 공기 입방 미터당 Cr(VI) 5마이크로그램( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 허용 노출 한계(PEL)를 설정한다. 이 규칙 제정 중에 제출된 모든 의견과 증거를 고려한 후 OSHA는 Cr(VI)에 대한 직업적 노출로 인한 심각한 건강 위험을 줄이기 위해  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 필요하다는 최종 결정을 내렸다. 이 규칙의 영향을 받는 산업에 대해 기술적으로나 경제적으로 실현 가능한 가장 낮은 수준이다. 이 PEL을 설정하기 위한 OSHA의 근거에 대한 전체 설명은 V(건강 영향), VI(정량적 위험 평가), VII(위험의 중요성), VIII(최종 경제 분석 및 규제 유연성 분석 요약) 및 XV(기준 요약 및 설명, 단락 (c), 허용 노출 기준)에 제시되어 있다.

OSHA는 다음을 위해 Cr(VI)에 대한 직업적 노출을 다루는 세 가지 별도의 기준을 설정하고 있다; 일반 산업(29 CFR 1910.1026); 조선업(29 CFR 1915.1026) 및 건설업(29 CFR 1926.1126). PEL 외에도 이러한 세 가지 기준에는 노출 결정, 준수 방법, 호흡기 보호, 작업복 및 장비, 위생 구역 및 관행, 의료 감시, 종사자에 대한 Cr(VI) 위험 정보 전달, 기록 보관 및 준수 날짜(compliance dates) 등이 포함되어 있다. 일반 산업 표준에는 규제 구역

및 정리정돈에 대한 추가 조항이 있다. 이 전문의 요약 및 설명 섹션(섹션 XV, 단락 (d)에서 (n)까지)에는 이러한 조항을 최종 기준에 포함하기 위한 근거에 대한 전체 논의가 포함되어 있다. 2004년 10월 4일 제안된 규칙에 대한 몇 가지 주요 변경 사항은 OSHA가 의견 기간 및 공청회 동안 받은 의견 및 자료를 분석한 결과이다. 주요 변경 사항은 아래에 요약되어 있으며 이 서문(섹션 XV)의 요약 및 설명 섹션에 자세히 설명되어 있다.

이후 목차는 아래와 같이 구성되어 있다.

## II. 관련 법적 권한(Pertinent Legal Authority)

## III. 최종 기준 연계 이벤트(Events Leading to the Final Standard)

## IV. 화학적 성상과 산업적 사용(Cheical Properties and Industrial Uses)

## V. 건강 영향(Health Effects)

### A. 흡수, 분포, 대사 감소 및 제거(Absorption, Distribution, Metabolic Reduction and Elimination)

1. 호흡기에 흡입된 Cr(VI)의 침착 및 제거(Deposition and Clearance of Inhaled Cr(VI) From the Respiratory Tract)
2. 흡입된 Cr(VI)의 혈류 흡수(Absorption of Inhaled Cr(VI) Into the Bloodstream)
3. Cr(VI)의 피부 흡수(Dermal Absorption of Cr(VI))
4. 경구를 통한 Cr(VI)의 흡수(Absorption of Cr(VI) by the Oral Route)
5. 체내 Cr(VI)의 분포(Distribution of Cr(VI) in the Body)
6. Cr(VI)의 대사 감소(Metabolic Reduction of Cr(VI))
7. 인체 Cr(VI) 제거(Elimination of Cr(VI) From the Body)

8. 생리학적 기반 약동학 모델링(Physiologically-Based Pharmacokinetic Modeling)
9. 요약(Summary)
- B. 발암 영향(Carcinogenic Effects)
  1. 크로메이트 생산 종사자에 대한 증거(Evidence From Chromate Production Workers)
  2. 크로메이트 안료 생산 종사자에 대한 증거(Evidence From Chromate Pigment Production Workers)
  3. 크롬 도금 작업자에 대한 증거(Evidence From Workers in Chromium Plating)
  4. 스테인레스 스틸 용접자에 대한 증거(Evidence From Stainless Steel Welders)
  5. 페로크롬 작업자에 대한 증거(Evidence From Ferrochromium Workers)
  6. 다른 산업 부문 종사자의 증거(Evidence From Workers in Other Industry Sectors)
  7. 실험동물 연구의 증거(Evidence From Experimental Animal Studies)
  8. 기계적 고려 사항(Mechanistic Considerations)
- C. 비발암성 호흡기 영향(Non-Cancer Respiratory Effects)
  1. 비강 자극, 비강 조직 궤양 및 비강 중격 천공(Nasal Irritation, Nasal Tissue Ulcerations and Nasal Septum Perforations)
  2. 직업성 천식(Occupational Asthma)
  3. 기관지염(Bronchitis)

4. 요약(Summary)

D. 피부 영향(Dermal Effects)

E. 기타 건강영향(Other Health Effects)

VI. Quantitative Risk Assessment(정량적 위험성평가)

A. 개요(Introduction)

B. 연구 선택(Study Selection)

1. Gibb 코호트(Gibb Cohort)

2. Luippold 코호트(Luippold Cohort)

3. Mancuso 코호트(Mancuso Cohort)

4. Hayes 코호트(Hayes Cohort)

5. Gerin 코호트(Gerin Cohort)

6. Alexander 코호트(Alexander Cohort)

7. 정량적 위험 평가를 위해 선택된 연구(Studies Selected for the Quantitative Risk Assessment)

C. Gibb 코호트 기반 정량적 위험 평가(Quantitative Risk Assessments Based on the Gibb Cohort)

1. 환경위험성평가(Environ Risk Assessments)

2. 미국 국립직업안전보건연구원(NIOSH) 위험성 평가(National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Risk Assessment)

3. 지수 위험성 평가(Exponent Risk Assessment)

4. Gibb 집단 기반 위험성 평가 요약(Summary of Risk Assessments Based on the Gibb Cohort)

D. Luippold 코호트 기반 정량적 위험성 평가(Quantitative Risk

## Assessments Based on the Luippold Cohort)

## E. Mancuso, Hayes, Gerin 및 Alexander 코호트 기반 정량적 위험성 평가(Quantitative Risk Assessments Based on the Mancuso, Hayes, Gerin, and Alexander Cohorts)

1. Mancuso 코호트(Mancuso Cohort)
2. Hayes 코호트(Hayes Cohort)
3. Gerin 코호트(Gerin Cohort)
4. Alexander 코호트(Alexander Cohort)

## F. Gibb, Luippold 및 추가 코호트 기반 위험성 추정치 요약(Summary of Risk Estimates Based on Gibb, Luippold, and Additional Cohorts)

## G. 이슈 및 불확실성(Issues and Uncertainties)

1. 작업자의 Cr(VI) 노출에 대한 불확실성(Uncertainty With Regard to Worker Exposure to Cr(VI))
2. 모델 불확실성, 노출 한계 및 용량 영향(Model Uncertainty, Exposure Threshold, and Dose Rate Effects)
3. 흡연, 인종 및 건강 근로자 생존 효과의 영향(Influence of Smoking, Race, and the Healthy Worker Survivor Effect)
4. 다른 산업에서 Cr(VI) 노출에 대한 위험 추정치의 적합성(Suitability of Risk Estimates for Cr(VI) Exposures in Other Industries)

## H. 결론(Conclusions)

## VII. 위험의 중요성(Significance of Risk)

## A. 건강에 대한 물질적 손상(Material Impairment of Health)

1. 폐암(Lung Cancer)

- 2. 비-발암성 장애(Non-Cancer Impairments)
  - B. 위험성 평가(Risk Assessment)
    - 1. Gibb 코호트를 기반으로 한 폐암 위험(Lung Cancer Risk Based on the Gibb Cohort)
    - 2. Luippold 코호트를 기반으로 한 폐암 위험(Lung Cancer Risk Based on the Luippold Cohort)
    - 3. 비-발암성 장애의 위험Risk of Non-Cancer Impairments
  - C. 위험성 및 위험성 감소의 중요성(Significance of Risk and Risk Reduction)
- VIII. Summary of the Final Economic Analysis and Regulatory Flexibility Analysis(최종 경제분석 및 규제 유연성 분석 요약)
- IX. OMB Review Under the Paperwork Reduction Act of 1995(1995년 서류 축소법에 따른 OMB 검토)
- X. Federalism(연방주의)
- XI. State Plans(주 계획)
- XII. Unfunded Mandates(무자금 위임장)
- XIII. Protecting Children from Environmental Health and Safety Risks (환경 보건 및 안전 위험으로부터 어린이 보호)
- XIV. Environmental Impacts(환경 영향)
- XV. Summary and Explanation of the Standards(기준 요약 및 설명)
  - (a) 범위(Scope)
  - (b) 정의(Definitions)
  - (c) 허용노출기준(Permissible Exposure Limit, PEL)

- (d) 노출 결정(Exposure Determination)
- (e) 규제지역(Regulated Areas)
- (f) 준수방법(Methods of Compliance)
- (g) 호흡기보호(Respiratory Protection)
- (h) 작업보호의 및 장비(Protective Work Clothing and Equipment)
- (i) 위생지역 및 실무(Hygiene Areas and Practices)
- (j) 정리정돈(Housekeeping)
- (k) 의료감시(Medical Surveillance)
- (l) 종사자에 대한 크롬(VI) 유해성 정보 전달(Communication of Chromium (VI) Hazards to Employees)
- (m) 기록보관(Recordkeeping)
- (n) 시행일(Dates)

XVI. Authority and Signature

XVII. Final Standards

XVI. 권한 및 서명(Authority and Signature)

XVII. 최종 기준(Final Standards)

## (2) 미국 6가 크롬 기준과 관련된 범위 및 PEL

미국의 PEL이 어떤 과정을 거쳐 개정되었는지, 노사 등 관계자들의 논란은 없었는지 확인을 위하여 15장 기준 요약 및 설명(Summary and Explanation of the Standards)의 (a) 범위와 (c) 허용노출기준(Permissible Exposure Limit, PEL)을 번역하였다. 가급적 원문의 목차를 그대로 유지시켰다.

### XV. Summary and Explanation of the Standards(기준 요약 및 설명)

#### (a) 범위(Scope)

OSHA는 일반 산업, 건설업 및 조선업에서 6가 크롬(크롬(VI) 또는 Cr(VI)이라고도 함) 노출을 다루는 별도의 기준(standards)을 발행하고 있다. 조선업에 대한 기준은 해양 터미널 및 롱쇼링 산업에도 적용된다. 건설 및 조선업 기준은 서로 매우 유사하지만 일반 산업의 기준과 몇 가지 면에서 차이가 있다. OSHA는 이 두 부문의 특정 조건이 일반 산업에 적용되는 것과 다소 다른 요구 사항을 보증한다. 이 요약 및 설명은 일반 산업에 대한 최종 규칙을 설명하고 이 규칙과 건설업 및 조선업 기준 간의 차이점에 대해 설명한다.

논평자들은 일반적으로 일반 산업, 건설업 및 조선업에 대한 별도의 기준을 제안하기로 한 OSHA의 결정을 지지했다(예: Exs. 38-199-1; 38-212; 38-214; 38-220-1; 38-236; 38-244; 39-19), 다만 한 명의 제안자는 단일 기준이 모든 부문에 적용되어야 한다고 주장했다(Ex. 39-51). 별도의 기준 제정에 대한 우려를 표명한 경우, 별도의 기준을 마련한다는 개념보다는 기준의 규정 및 적용에 중점을 두었다. 일부 의견제시자들은 특정 활동이나 산업이 일반 산업의 기준보다 건설업 기준에 의해 다루어져야 한다고 주장했다(예: Exs. 38-203; 38-228-1, p. 18; 39-52-2; 39-56). ; 다른 사람들은 제안된 건설업 및 조선업 기준이 제안된 일반 산업 기준보다 덜 보호적인 것으로 간주했다(Exs. 38-222; 39-71; 47-23, pp. 16-17; 47-28).

## (c) Permissible Exposure Limit (PEL)

## 개요(Introduction)

최종 규칙의 (c)항은 공기 입방 미터( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )당 Cr(VI) 5 마이크로그램의 8시간 시간 가중 평균(TWA) 노출 기준으로 설정한다. 이 기준은 8시간 근무 교대 중 Cr(VI)에 대한 평균 노출이  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 수 없음을 의미한다. 새로운 기준은 CrO<sub>3</sub>로 측정된 이전 PEL과 달리 Cr(VI)에 적용된다. CrO<sub>3</sub>로 보고된 공기 10입방미터당 1밀리그램의 이전 PEL( $1 \text{ mg}/10\text{m}^3$  또는  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )은 Cr(VI)의 한계인  $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 해당한다. OSHA는 Cr(VI)에 대해  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 제안했다. 이 PEL은 이 기관이 이전 PEL에서 Cr(VI)에 대해 직업적으로 노출된 근로자 사이에서 상당한 폐암 위험을 초래하고, 제안된 PEL을 준수하면 그 위험을 상당히 감소시킬 것으로 예상된다는 예비 결정을 내렸기 때문에 제안되었다. 당시 OSHA에서 입수할 수 있었던 정보에 따르면  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 영향을 받는 산업에 경제적, 기술적으로 실현 가능한 것으로 판단되었기 때문이었다. PEL은  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL에 대한 정당성에 대해 극명하게 분열된 의견을 드러내는 규칙 제정 과정에서 논쟁의 초점이었다. 제안된 PEL에 대해 일부 지지가 있었다(Exs. 38-199-1, p. 42; 38-219-1, p. 2; 39-73-1). 그러나 대다수의 논쟁자들은 제안된 PEL이 적절하다고 생각하지 않았다. 일부는 제안된 기준이 실행 불가능하거나 건강 및 위험 증거에 의해 정당화되지 않는다고 주장하면서 더 높은 PEL을 설정하는 것이 정당하다고 주장했다(예: Exs. 38-205; 38-215; 38-231; 38-228; 38-233). 몇몇 의견 제시자들은  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Exs. 38-134; 38-135; 38-195; 38-203; 38-212; 38-250; 38-254)가 적절;  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ex. 38-204)이 적절;  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (예: Ex. 38-7, 43-22, 43-23, 43-25, 43-39)가 적절 또는  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ex. 38-263)가 적절하다는 대체 PEL을 제안했다. 다른 사람들은 제안된 PEL의 위험이 과도하다고 주장했으며 OSHA는  $0.2$  또는  $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 제안하는 더 낮은 PEL을 채택해야 한다고 주장했다(Exs. 39-71; 40-10-2; 47-23; 47-28). 규칙 제정 기록의 증거를 신중하게 고려한 후 OSHA는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최종 PEL

을 설정했다. 이 전문의 섹션 V에서 논의된 건강 영향 증거에 대한 OSHA의 조사는 Cr(VI)에 대한 노출이 다른 심각한 건강 영향뿐만 아니라 폐암을 유발한다는 이 기관의 예비 결론을 재확인했다. 섹션 VI에 제시된 OSHA의 정량적 위험 평가는 이전 PEL에서 Cr(VI) 노출로 인한 위험의 가장 신뢰할 수 있는 평생 추정치가 근로자 1000명당 폐암 사망자가 101~351명을 초과하여 나타난다고 확인하였다. 섹션 VII에서 논의된 바와 같이, 이는 건강에 대한 손상의 상당한 위험을 분명히 있다는 것을 의미한다. OSHA는 PEL을  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮추면 이러한 위험이 크게 줄어들 것이라고 확신했다. OSHA는 새로운 PEL에서 평생 폐암으로 인한 사망 위험이 1000명당 10명에서 45명 사이인 것으로 추정하였다. 이 기관은 새로운 PEL에 남아 있는 위험 수준이 상당하다는 것을 고려하였다. 그러나 규칙 제정 과정에서 평가된 증거를 기반으로 OSHA는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 적절하다고 결론을 내렸다.

새로운 PEL은 모든 산업 분야에서 기술적으로나 경제적으로 실현이 가능하다. 항공우주 산업의 항공기 및 대형 항공기 부품의 도색은 해당 부문 중 한 분야 내에서 2개 작업에서만  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 실현가능하였다. 직업안전보건법(OSH Act)의 섹션 6(b)(5)에 따라 OSHA는 새로운 PEL이 타당성 제약에 따라 사업주가 일반적으로 준수할 수 있는 최저 기준이라고 결정했다. 남아 있는 위험을 더욱 줄이기 위해 최종 규칙에 추가 요구 사항이 포함되었다. OSHA는 이러한 보조 조항이 새로운 PEL 단독으로 준수할 감소 이상의 위험을 감소시킬 것으로 예상하였다.  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 동일한 PEL을 채택하는 OSHA의 근거는 아래에 자세히 설명되었다. 토론은 논평자에게 가장 중요한 문제를 중심으로 구성된다. (a) 일정한 PEL이 모든 크롬 화합물에 적합한지, (b) 다양한 PEL에 대한 기술 및 경제적 타당성, (c) 섹션 6(b)의 요건 (5) 실현 가능성과 일치하는 가장 보호적인 기준을 공포하고, (d) 단기간 노출 기준이 필요한지 여부.

**동일한 PEL은 모든 크롬 화합물에 적합**

OSHA는 모든 Cr(VI) 화합물에 적용되는 단일 PEL을 설정하는 것이 적절

하다고 판단했다. OSHA가 선호하는 위험 추정치는 크롬산 나트륨(sodium chromate)과 중크롬산 나트륨(sodium dichromate)에 주로 노출된 크롬산 생산 작업자의 두 코호트에서 유추된다. 많은 의견 제시자들은 이러한 코호트의 위험 추정치가 특정 다른 Cr(VI) 화합물에 적용할 수 없다고 주장했다(Exs. 38-106; 38-201-1; 38-205; 38-215-2). 규칙 제정 기록에서 역학, 동물 및 역학 증거를 심도있게 평가한 후 OSHA는 모든 Cr(VI) 화합물을 발암성으로 간주한다(추가 논의는 이 전문의 섹션 V를 참조). OSHA는 크롬산 염(chromate) 생산 코호트에서 개발된 위험 추정치가 다른 산업에서 다른 Cr(VI) 화합물에 대한 동등한 노출에서 예상되는 위험을 합리적으로 대표한다고 결정했다. OSHA는 크롬 생산 종사자의 Gibb 및 Luippold 코호트에서 추정된 위험이 동등한 수준의 Cr(VI) 화합물에 노출되는 다른 산업의 근로자에 대한 위험을 적절하게 나타내는 것으로 확인했다(이러한 결론을 뒷받침하는 근거는 이 서문의 섹션 V 및 VI에서 자세히 논의), (특히, 정량적 위험 평가의 섹션 VI(H) 참조). OSHA의 위험 추정치는 모든 직업적 Cr(VI) 노출을 합리적으로 대표하기 때문에 이 기관은 모든 Cr(VI) 화합물에 적용할 수 있는 단일 PEL을 설정하는 것이 적절하다고 판단했다. 많은 규칙 제정 참가자들이 이 접근 방식을 지지했다(Exs. 38-214; 38-220; 39-20; 39-60; 40-10; 40-19).

5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최종 PEL은 영향을 받는 모든 산업에 대해 기술적으로나 경제적으로 실현 가능하다; 제안된 PEL이 아니다.

OSHA는 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 영향을 받는 모든 산업에서 경제적으로나 기술적으로 실현 가능하다고 결론지었다. 또한 OSHA는 기록에 제출된 의견과 증거를 기반으로 제안된 PEL 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 모든 산업에서 실현 가능하지 않다고 결론을 내렸다. OSHA의 타당성 결정은 아래에 설명되어 있다.

최종 PEL의 기술적 타당성. 기술적 타당성을 결정할 때 OSHA는 이전 기준을 검토한 법원에서 제공한 지침을 준수했다. 특히, OSHA의 납 기준(United Steelworkers of America v. Marshall, 647 F.2d 1189 (D.C.

Cir.1981))에 대한 컬럼비아 특별구의 미국 항소 법원의 결정은 이 기관이 기술적 타당성을 평가하기 위해 벤치마크로 설정했다. 법원은 OSHA가 '선택한 PEL의 실행 가능성을 결정하는 데 있어 큰 재량을 가지고 있다.'라고 설명했다. 647 F.2d at 1309. 기술적 및 경제적 실행 가능성은 모두 "산업별로 검증되어야 한다." 647 F.2d at 1301. 기준이 기술적으로 실현 가능하다는 것을 확정하기 위해 "OSHA는 일반적인 기업이 대부분의 운영과정에서 PEL을 충족할 수 있는 공학적 관리 및 작업관행 관리(work practice controls)를 개발 및 설치할 수 있다는 합리적인 가능성을 입증해야 한다." 647 F.2d at 1272. 법원은 "산업 내 일부 격리된 공정에 대한 기술적 타당성에 대한 불충분한 증거 또는 그러한 일부 공정에 호흡보호구가 필요하다는 OSHA의 양보조차도 "OSHA의 기술적 타당성 발견을 훼손하지 않을 것이라고 허용했다.

이 타당성 정의를 적용하여 OSHA는 영향을 받는 각 산업을 평가했으며 모든 산업에서 제한된 호흡 보호구 사용으로 공학적 관리 및 작업관행 관리를 통해  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 준수할 수 있다고 결론지었다. 이 결론에 대한 주요 증거 지원은 최종 경제 및 규제 유연성 분석(FEA)에서 심층적으로 논의된 Shaw Environmental, Inc.의 보고서이다. Shaw가 수집한 자료를 기반으로 OSHA는 국소배기환기(LEV), 공정관리, 공정 변경 또는 대체와 같은 공학적 관리를 사용하여 대부분의 작업에서 노출을 관리할 수 있다고 결론을 내렸다.

OSHA는 공학적 및 작업 실무 관리가 항상 PEL 미만의 공기 중 노출을 PEL 이하로 감소시키는데 충분하지 않기 때문에 추가로 호흡보호구 사용이 필요한 특정 사례가 있다는 것을 확인했다. 다양한 잠재적 PEL에서 예상되는 호흡보호구 사용 범위에 대한 요약 정보는 표 VIII-3에 나와 있다(섹션 VIII, FEA 요약 참조). FEA에 제시된 다른 자료 및 분석과 함께 이 정보를 고려하여, OSHA는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 영향을 받는 모든 산업 부문과 거의 모든 공정에서 기술적으로 실현 가능하다고 결론지었다. 단, 아래에서 더 자세히 설명하는 일부 항공우주 도장 작업은 예외로 한다. 3개 부문에서만 노출된 종사자의 5% 이상이 호흡보호구를 사용해야 한다. 크롬산염 안료 생산자와 크롬

염료 생산자 중 2개 부문에서 간헐적으로 호흡보호구를 사용해야 한다. 세 번째 부문인 스테인리스강 용접은 특정 작업에서 기술적 과제가 제시된다. 그러나 새로운 PEL은 공학적 관리 및 작업관행 관리를 통해 대부분의 작업에서 명확하게 준수할 수 있다.

OSHA는 항공우주 산업 내에서 두 가지 개별 작업인 항공기 도장 및 대형 항공기 부품 도장의 경우 공학적 관리 및 작업관행 관리가  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만의 노출로 관리될 수 없으며 이러한 작업을 수행하는 대부분의 종사자에게 호흡보호구가 필요하다는 것을 인식하고 있었다(아래의 항공 우주 페인팅에 대한 추가 논의를 참조). 이러한 이유로 OSHA는 사업주가 종사자 노출을  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제한하기 위해 공학적 관리 및 작업관행 관리를 사용하도록 요구하는 특정 작업에 대한 조항을 채택하고 있다. 그 다음 PEL을 준수하기 위해 호흡기 보호를 수행해야 한다. OSHA는 PEL을  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 설정하지 않았으며, 이는 공학적 관리 및 작업관행 관리만으로 모든 산업의 모든 작업에서 준수할 수 있는 수준이다. 이러한 접근 방식은 영향을 받는 대다수의 종사자가 대부분의 산업 및 작업에서 실현 가능한 수준보다 높은 Cr(VI) 수준에 노출되기 때문에 부적절하다. 위에서 논의한 바와 같이  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 낮은 PEL은 판례법의 의미 내에서는 실현 가능하지만, 일부 산업에서는 제한적으로 호흡보호구를 사용하여야 하고 항공우주 산업의 두 가지 도장 작업에서 중요한 호흡보호구를 사용해야 한다. 호흡보호구를 많이 사용하는 두 가지 항공 우주 도장 작업은 위에서 논의한 조항에 포함된다. 이러한 작업에 대해 OSHA는 호흡기 보호 요구 사항의 부정적인 측면에 대해 호흡보호구에 의해 제공되는 추가 보호를 비교하여 추가적으로 호흡보호구 사용을 수용한다고 하였다.

제안된 PEL의 기술적 타당성. OSHA는 제안된  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 D.C. Circuit's Lead 결정의 기준에 따라 모든 산업에서 기술적으로 실현 가능하지 않다고 결론내렸다. 법원의 기술적 타당성 정의는 관리 계층에 기반한 기준의 경우 특정 PEL이 단순히 호흡보호구의 광범위한 사용을 통해 준수될 수 있기 때문에 기술적으로 실현 가능하지 않다는 점을 인정한다. 647 F.2d at

1272. 이는 광범위하게 호흡보호구 사용을 해야 하는 요구 사항을 피하는 것이 현명하다는 OSHA의 오랜 견해와 일치한다. 공청회 브리핑에서 공중 시민(Public Citizen)은 홀로 산업 내 상당수의 공정에서 규정 준수를 위해 호흡보호구 사용이 필요한 경우 또는 PEL이 호흡보호구 사용을 통해서만 준수할 수 있는 경우에도 PEL이 기술적으로 실현 가능한 것으로 간주되어야 한다고 주장했다(Ex. 47-23, pp. 12-15). 그 입장은 관리 계층에 근거한 기준의 타당성에 대해 확립된 검증과 일치하지 않는다. 더욱이, 준수 방법에 대한 단락(f)의 전문 설명에서 논의된 바와 같이 작업장에서 호흡보호구를 사용하는 것은 많은 개별적인 안전 및 보건 문제가 유발될 수 있다. 호흡보호구를 착용한 작업자의 시력이 저하될 수 있으며 호흡보호구를 착용하면 종사자가 서로 의사소통하는 능력이 저하될 수 있다. 호흡보호구는 호흡보호구의 무게와 작업 중 경험하는 호흡 저항 증가로 인해 종사자에게 생리적 부담을 줄 수도 있다. 요구되는 육체 노동의 수준, 보호구의 사용, 극한의 온도 및 높은 습도와 같은 환경적 요인은 호흡 보호구 사용과 상호 작용하여 종사자의 생리적 부담을 증가시킬 수 있다. 심혈관 및 호흡기 질환, 폐 기능 저하, 신경계 또는 근골격계 장애, 감각 기능 장애 또는 심리적 상태와 같은 의학적 상태로 인해 이러한 긴장에 대처할 수 없는 경우 종사자들은 질병, 부상 및 사망 위험이 증가할 수 있다. 장기간 호흡보호구를 일상적으로 사용하는 것이 단기간에 간헐적으로 사용하는 것보다 더 중요하다.

또한 OSHA는 호흡보호구가 공학적 관리 및 작업관행 관리보다 본질적으로 신뢰성이 떨어진다고 판단한다. 지속적으로 적절한 보호를 제공하려면 호흡보호구의 적절한 선택과 착용 및 적당하게 사용되고 유지되어야 한다. 이러한 조건은 준수하기 어려울 수 있고 인적 오류가 발생할 수 있기 때문에 OSHA는 호흡보호구 공학적 관리 및 작업관행 관리와 동일한 보호 수준이라고 생각하지 않는다. 제출된 증거 및 의견을 바탕으로 OSHA는  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL의 기준이 적용되는 다수의 종사자를 고용하는 상당수의 산업 및 공정에 기술적으로 실현 가능하지 않다는 것을 확인했다. 기록에 따르면 공학적 관리 및 작업

관행 관리는 많은 공정에서 노출을  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만으로 줄일 수 없기 때문에  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 용접 및 항공 우주 페인팅에 기술적으로 실행이 불가능하다. OSHA는 또한 기록에 크롬산염 안료 생산업체, 크롬 촉매 생산업체, 크롬 염료 생산업체 및 일부 경질 크롬 전기도금기 등 4개 다른 산업에 대해 제안된 PEL의 기술적 타당성을 입증하기에 불충분한 증거가 포함되어 있다고 확인했다. 제안된 PEL의 기술적 타당성에 대한 OSHA의 결과는 아래에 요약되어 있으며 FEA의 III장에서 더 광범위하게 논의된다(특히 "제안된  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  8시간 TWA PEL의 기술적 타당성' 섹션 참조').

**용접.** OSHA는 공공학적 관리 및 작업관행 관리가 일반적으로 종사자 노출을  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만으로 줄일 수 없기 때문에  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 스테인리스강의 차폐 금속 아크 용접(SMAW)에 기술적으로 실현 가능하지 않다고 결론내렸다. 모든 스테인리스강 SMAW 작업의 거의 1/3(29%)은  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL에서 호흡보호구를 사용해야 한다. 일반 산업에서만 스테인리스강 SMAW 공정의 절반 이상(52%)이 공학적 관리 및 작업관행 관리를 사용하여 Cr(VI) 노출을  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만으로 줄일 수 없다. 특히 스테인리스 스틸 용접은 경제 전반에 걸쳐 널리 퍼져 있다. 65개 이상의 3자리 NAICS 코드로 약 127,000명의 근로자를 고용하는 20,000개 이상의 시설에서 발생된다. SMAW는 스테인리스강 용접의 가장 일반적인 유형이며 67,000명 이상의 종사자가 수행한다. 이는 전체 스테인리스강 용접공 수의 절반 이상이고 기준이 적용되는 모든 용접공의 1/4에 해당된다. OSHA는 처음 SMAW 대신 가스 금속 아크 용접(gas metal arc welding, GMAW)을 Cr(VI) 노출을 줄이는 가장 저렴하고 효과적인 방법으로 권장했다. SMAW와 마찬가지로 GMAW는 일반적인 용접 유형이지만 GMAW는 SMAW보다 노출이 경향이 낮은 수준이다. 그러나 청문회 증언과 기록에 제출된 증거를 바탕으로 OSHA는 현재 SMAW 작업의 60%만이 GMAW로 전환할 수 있다고 믿고 있다(Exs. 38-220-1, p. 8; 39-60, p. 3; 39-70, 2페이지, 35-410, 4페이지). 또한 GMAW로 전환할 수 있는 전류 노출이  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상인 SMAW 작업에서도 일부(일반 산업의 경우

40%, 건설 및 해양의 경우 59%)만 호흡보호구 없이  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 준수할 수 있다. 또한 OSHA는  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 환기 가용성의 제한으로 인해 제한적이거나 밀폐된 공간에서 수행되는 스테인리스강 용접에 기술적으로 불가능하다고 결정했다. 공학적 관리 및 작업관행 관리는 노출을  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만으로 일관되게 줄일 수 없기 때문에 제한되거나 밀폐된 공간에서 스테인리스강 용접 작업의 대부분은  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL에서 호흡보호구가 필요하다. 예를 들어 일반 산업에서 스테인리스강 용접 작업의 60%는 제한된 공간에서 공학적 관리 및 작업관행 관리를 사용하여 제안된 PEL을 준수할 수 없다.

요약하면, OSHA는 가장 일반적인 용접 작업 중 일부가  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 준수하는 것이 불가능하다고 결론을 내렸다. OSHA의 용접 작업에 대한 기술적 타당성 분석에 대한 자세한 설명은 FEA의 III장을 참조하면 된다. 또한 OSHA는 덜 일반적인 유형의 용접 작업이 공학적 관리 및 작업관행 관리로  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 준수하는 것이 가능할 수 있지만 용접의 도처에 있는 특성으로 인해  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 일반적으로 모든 용접 작업에 실행이 불가능하다고 결정했다. 특히, OSHA는 제안된 PEL이 일반적으로 용접이 고노출 작업과 저노출 작업으로 쉽게 구분되지 않기 때문에 용접 작업에 실행 불가능하다고 생각했다. 용접공은 동일한 날 다른 유형의 용접을 수행할 수 있으므로 사업주가 작업별로 작업을 모니터링하기 어렵거나 불가능하다(Ex. 39-22). 또한 서로 다른 유형의 용접을 수행하는 작업자가 서로 함께 작업하는 경우가 많기 때문에 격리된 용접 작업에 대해 기술적으로 실현 가능한 것이 스테인리스강에서 SMAW 옆에 수행되거나  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 기술적으로 불가능하다.

용접은 65개의 서로 다른 3자리 NAICS 코드에 걸쳐 40,000개 이상의 시설에서 발생된다. 용접은 다양한 작업장(Ex. 38-8, p. 5)에 걸쳐 다양한 현장에서 이루어진다. 스테인리스강 SMAW는 일반적으로 다른 용접 또는 절단 작업과 가까운 곳에서 수행되며, 이는 SMAW 용접공이 생성하는 더 높은 노출에 인근 작업자를 노출시킬 수 있다(Ex. 38-214, p. 7). 북미의 특수 철강 산업은 "OSHA에서 평가하는 것과 다른 직업 범주의 근로자는 잠재적 노출

영역에서 상당한 시간을 보낼 수 있다"고 논평했다(Ex. 38-233, p. 10). 통합 폐기물 서비스 협회(Integrated Waste Services Association)는 유사하게 검사자, 비계 작업자, 작업자, 파이프 수리공 및 내화 작업자가 니켈 크롬 합금을 입히는 동안 Cr(VI) 노출 가능성이 있는 영역을 지나갈 수 있다고 밝혔다(Ex. 38-258, p. 2). AFL-CIO의 건축 및 건설 무역 부서는 또한 '노동자가 근접 노출을 통해 Cr VI 노출과 관련된 작업을 직접 수행하지 않더라도 위험에 노출될 수 있다'라고 명시했다(예: 31-6-1). 또한 OSHA는 용접공이 프로젝트 과정에서 또는 단일 작업 교대 중에도 서로 다른 용접 방법을 사용하여 다양한 유형의 모재에 다양한 환경에서 용접하는 경우가 있다는 것을 파악하고 있다(Exs. 34-10, 38-235). 이러한 상황에서 종사자의 전체 노출 수준은 필연적으로 자신이 수행하는 다양한 용접 작업 중에 존재하는 다양한 노출에 영향을 받는다. 따라서 PEL이  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 용접 작업을 수행하는 데 얼마나 많은 시간을 소비하는지에 따라 다른 작업에서는 PEL  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 준수하기 위해 공학적 관리 및 작업관행 관리를 사용한다. 용접 작업이 반드시 해당 기준 아래로 종사자의 전체 노출 수준을 낮추는 것은 아니다. 이러한 요인으로 인해 실제 작업 현장에서 용접은 고노출 작업과 저노출 작업으로 쉽게 구분되지 않는다. 이러한 이유로 OSHA는 제안된  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 일반적으로 용접 작업에 실행 불가능하다는 기록이 입증되었다고 판단했다. 새 기준의 적용을 받는 노동자 중 거의 270,000명이 이러한 용접 작업에 종사하고 있다(표 VIII-2).

항공 우주 도장. 항공 우주 페인팅 분야에는 약 8300명의 노출된 노동자가 있다(표 VIII-2).  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 모든 항공우주 도장 작업의 약 2/3에 적합하지 않다.  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL에서 항공우주 도장 작업의 1/3만 상당한 호흡 보호구 사용이 필요하다. 항공 우주 페인팅의 노출은 국소배기환기(LEV)가 있는 페인팅 부스 또는 전용 공간의 작업을 둘러싸서 관리된다. 이것은 작은 부품에 대해 가능하지만 부품의 크기가 커질수록 노출을 관리하기가 더 어려워진다. 예를 들어, 대부분의 작은 부품을 도장할 때  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만의 노출이

가능하지만 더 큰 부품의 경우 공학적 관리 및 작업관행 관리를 사용하여 노출을  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  사이로만 감소시킬 수 있다.  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (전체 항공우주 도장 작업의 약 1/3) 수준을 준수할 수 있는 이 집단은 LEV를 사용할 수 있지만 큰 수평 구조와 같은 전체 부품, 부품의 크기가 커질수록 주변에 좋은 기류를 제공하기가 점점 더 어려워진다. 더욱이, 부품의 크기가 증가함에 따라 도장작업자는 부품의 기하학적 구조로 인해 페인트 과다 스프레이의 다운스트림이 되는 것을 피하기 위해 스스로를 배치하는 것이 점점 더 어려워진다. 동체, 날개 또는 전체 항공기와 같은 더 큰 부품을 도장할 때 추가 호흡보호구 없이 더 이상  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만의 노출로 줄일 수 없다. 이러한 큰 부품은 둘러싼 부분이나 도장작업실에 맞지 않기 때문에 일반적으로 축구장 크기에 달하는 길이와 같은 대형 작업 공간에서 도장작업을 수행해야 한다 (Ex. 38-106-2, p. 2). 대형 작업 공간에서는 환기 시스템의 효율성이 떨어지며 일반적으로 공간이 클수록 환기하기가 더 어렵다. 더욱이 이러한 구역에 환기장치를 설치하면 오염된 공기를 희석하거나 확산시키는 데 필요한 공기의 양이 페인트나 페인트가 묻을 정도로 작업 품질에 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 공기 흐름을 증가시키는 단순한 해결책이 불가능하다. 코팅은 부품이나 평면을 보호하기 위한 목적으로 허용되지 않는다(Ex. 38-106, p. 38). 따라서 이러한 장소와 상황에서 단순히 기류를 증가시키는 것은 실행 가능한 대안은 아니다. 위에서 논의한 바와 같이 OSHA는 엔지니어링 및 작업관행 관리만으로 노출을  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 낮출 수 없는 상황을 해결하기 위한 규정을 마련했다. 그러나 이러한 작업에 호흡보호구를 사용하면 PEL이  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달될 수 있다. 요컨대, OSHA는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 항공우주 도장 작업에 적합하다고 판단된다. 이러한 작업의 3분의 1은 PEL을 준수하기 위해 호흡기 보호를 사용해야 하지만 나머지는 공학적 관리 및 작업관행 관리만으로 준수할 수 있다. 나머지 집단의 절반은  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 달성할 수 없는 데 그 이유로 국소배기환기(LEV)가 있는 도장실과 같은 인클로저를 활용할 수 있지만 부품이 커질수록 LEV의 효율성이 떨어지기 때문이다. 이러한 이유

로 PEL을  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮추면 위에서 설명한 호흡 보호구를 착용해야 하는 종사자의 수가 크게 증가한다. 따라서 OSHA는 PEL이 1인 것은 일반적으로 항공 우주 페인팅에 적합하지 않다고 결론을 내렸다. 항공 우주 페인팅 작업에 대한 OSHA의 기술적 타당성 분석에 대한 자세한 설명은 FEA의 III장을 참조하면 된다.

기타 산업. OSHA가  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 공학적 관리 및 작업관행 관리로 충족할 수 있다고 확신하는 다른 주요 산업 또는 응용 프로그램이 있지만 기록에 따르면  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 기술적으로 실현 가능하다는 것을 입증하지 못했다. 특히, 크롬산염 안료 생산업체, 크롬 촉매 생산업체 및 크롬 염료 생산업체는 제안된 PEL을 충족하는 데 어려움이 있다고 판단했다. 이러한 산업의 운영과정에서 상당 부분은 매우 분진가 많고 노출을 통제하기 어려운 개방적이고 일부는 넓은 지역에서 작업이 수행된다. 위의 항공 우주 페인팅과 마찬가지로 기본적인 관리는 작업을 둘러싸고 환기하는 것이다. 그러나 일부 공정은 플랜트, 특히 오래된 시설의 물리적 구성으로 인해 포위시킬 수 없다(Ex. 47-3, p. 55). 더욱이 Cr(VI)을 포함하는 매체는 미세한 분말이기 때문에 모든 작업장에서 추가 LEV는 잠재적으로 심각하고 견딜 수 없는 제품 손실을 초래할 수 있다. 따라서 포위식으로 수용할 수 있는 시설의 수에 따라 대부분 이러한 작업은  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL을 충족하기 위해 광범위한 호흡보호구 사용을 잠재적으로 요구될 수 있다. OSHA는 이 3가지 산업의 종사자 중 44%가 최소한 간헐적으로 호흡보호구를 착용해야 할 것으로 예측했다. 번거로운 공정을 포함할 수 없는 시설이 많은 경우 이 숫자는 훨씬 더 증가할 수 있다. 제안된 PEL이 산업에 기술적으로 실현 가능하다는 것을 찾으려면 OSHA는 일반 기업이 대부분의 공정에서 공학적 관리 및 작업관행 관리를 통해 이를 충족할 수 있는 "합리적인 가능성을 증명"해야 한다.

연합 철강노동자, 647 F.2d at 1272. 표 VIII-3은 크롬산염 안료 생산자, 크롬 촉매 생산자 및 크롬 염료 생산자에 대해 제안된 PEL  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달하기 위해 간헐적인 호흡보호구 사용이 필요함을 나타낸다. 제안된 PEL을 충

축하기 위해 요구되는 일일 호흡 보호구 사용의 범위는 권장되는 포위식 관리 및 주요 작업의 자동화가 기존 시설에서 실현 가능하지 않은 경우 명확하지 않지만 위에서 논의한 변수에 따라 상당할 수 있다. 결론적으로 OSHA는 기록이 이러한 산업의 일반적인 기업이 공학적 관리 및 작업관행 관리를 통해 제안된 PEL을 충족할 가능성을 입증한다고 판단했다. 이 3종류 산업에 노출된 종사자는 총 약 469명이다(표 VIII-2). 크롬산염 안료 생산자, 크롬 촉매 생산자 및 크롬 염료 생산자에 대한 OSHA의 기술적 타당성 분석에 대한 자세한 설명은 FEA의 III장을 참조하면 된다.

기술적 타당성은 또한 제품 사양을 방해하여 생성된 제품을 사용할 수 없게 만들기 때문에 흡 억제제(fume suppressants)를 사용하여 Cr(VI) 노출을 관리할 수 없는 경질 크롬 전기도금 작업의 문제이다. 결론적으로 OSHA는 영향을 받는 모든 산업에서  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 기술적으로 실현 가능하지만 이 기록은 용접 작업, 항공 우주 페인팅, 크롬산염 안료 생산업체, 크롬 촉매 생산업체, 크롬 염료 생산업체 및 일부 경질 크롬 전기도금 작업에 대해 제안된 PEL  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 실행 가능성을 뒷받침하지는 못한다.

최종 및 제안된 PEL의 경제적 타당성. OSHA는 제안된 PEL과 최종 PEL의 경제성도 평가했다. 경제적 타당성과 관련하여 OSHA는 "기준 비용의 가능한 범위와 해당 비용이 업계에 미치는 영향에 대한 합리적인 평가"를 제공하여 "이 비용이 일부 한계 기업에 재앙을 초래할지라도 산업의 존재 또는 경쟁 구조를 위협하지 않는다." AFL-CIO v. OSHA, 965 F.2d 982(11th Cir. 1992). OSHA는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최종 PEL이 영향을 받는 모든 산업에서 실현 가능하다고 확신했다(OSHA의 경제적 타당성 분석에 대한 더 자세한 논의는 VIII장, 최종 경제 분석 및 규제 유연성 분석 요약, 섹션 D 및 E를 참조). 대부분의 산업에서 비용은 수익의 1% 미만이다. 약 250개의 NAICS(North American Industry Classification System) 범주 중 이 규칙의 영향을 받는 범주가 10개 미만인 경우 비용이 수익의 1%를 초과하는 것으로 추정된다. OSHA는 영향을 받는 모든 산업이 존재 또는 경쟁 구조를 위협하지 않고 이

러한 비용을 수용 가능할 수 있다고 판단하였다. 따라서 OSHA는 새로운 기준이 모든 산업 분야에서 경제적으로 실현 가능하다고 결론을 내렸다.

대조적으로, 제안된  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 주요 산업 전기도금 작업장(NAICS 332813; 전기도금, 도금, 폴리싱 아노다이징 및 착색 서비스)에서 경제적으로 실현 가능하지 않다. 전기도금 시설은 크게 두 가지 범주로 분류될 수 있다. (1) 작업장과 (2) 종속 작업장으로 대략 절반의 시설이 각 범주에 속한다. 작업장은 다른 사람들을 위해 전기도금 서비스를 수행하는 반면, 종속 작업장은 그들이 속한 시설에 도금 서비스를 제공한다. 작업장은 다른 사람들을 위해 전기도금 서비스를 수행하는 반면, 종속 작업장은 그들이 속한 시설에 도금 서비스를 제공한다.  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 전기도금 작업장에서 매출의 2.7%와 이익의 65%를 초과하는 비용을 초래한다. 이 전문의 섹션 VIII 및 FEA에서 추가로 설명된 바와 같이, OSHA는 영향을 줄이기 위한 옵션(예: 단계적 호흡보호구 사용 또는 사용 허용)이 제안된 PEL의 부담을 크게 완화할 것이라고 생각하지 않는다. OSHA는 이러한 비용이 업계의 경쟁 구조를 바꿀 수 있다고 우려하고 있다. 약 33,400명의 노동자가 전기도금 작업장에 고용되어 있다.

최종 및 제안된 PEL의 기술 및 경제적 타당성에 대한 요약. 요약하면, OSHA는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최종 PEL이 영향을 받는 산업에 기술적으로나 경제적으로 실현 가능하다고 결론 내렸다. 반면 제안된  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL은 기술적으로 또는 경제적으로 실행 불가능하거나 용접, 항공 우주 페인팅, 크롬산염 안료 생산, 크롬 촉매 생산, 크롬 염료 생산, 일부 경질 크롬 전기도금 작업 및 전기도금 작업장을 포함하여 기준이 적용되는 많은 산업 및 작업에서 입증되지 못했다. 이러한 작업은 약 312,170명의 노출된 종사자 또는 Cr(VI)에 직업적으로 노출된 전체 종사자 수의 거의 56%에 영향을 미친다(표 VIII-2). 이 수치에는 용접공 270,000명, 항공우주 도장 작업 종사자 8,300명, 전기도금 작업장 종사자 33,400명, 기타 3개 산업 분야의 종사자 469명이 포함된다. (이 수치에는 전기도금 작업장 범주에 고용된 종사자가 해당 작업을 수행하는 이중 계산

을 피하기 위해 경질 크롬 전기도금을 수행하는 종사자에 대한 별도의 수는 포함되지 않았다.) OSHA는 PEL을 1~5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준으로 설정하는 것과 관련된 자료나 권장 사항을 받지 못했다.

5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 동일한 PEL은 OSHA Act 섹션 6(b)(5)의 실행 가능성 제약과 일치한다. 어떤 종사자도 건강에 물질적 손상을 입어서는 안된다." 이 조항은 기관이 가능한 범위까지 상당한 위험을 제거하거나 줄일 것을 요구한다. American Textile Mfr. 참조 Inst., Inc. 대 Donovan, 452 U.S. 490, 506-22(1981). OSHA는 PEL을 산업 및 공정 전반에 걸쳐 실현 가능한 최저 수준으로 설정할 수 있는 실질적인 재량권을 기관에 부여하기 위해 항상 섹션 6(b)(5)를 해석해 왔다. OSHA는 특정 산업 또는 공정이 달성할 수 있는 가장 낮은 수준을 기반으로 여러 PEL을 설정해야 한다는 조항을 해석하지 않았다. 의회가 법령의 정확한 문제에 대해 말하지 않았기 때문에 OSHA는 자신이 판단하는 것이 이 법의 목적을 가장 잘 수행할 것이라는 합리적인 해석을 채택할 권한이 있다. Chevron U.S.A. v. 천연 자원 방어 위원회, 467 U.S. 837(1984).

새로운 Cr(VI) 기준은 섹션 6(b)(5)의 요건을 충족한다. 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL이 실제로 적용 대상 종사자(사실 영향을 받는 종사자)를 많이 고용하는 많은 작업 및 공정에서 실현 가능한 최저 기준이기 때문이다. OSHA는 이 전문의 섹션 VII에서 내린 결정에 따라 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PEL에서 상당한 위험이 남아 있음을 인식하고 있다. 위험의 중요성 섹션의 표 VII-3에 나와 있는 것처럼, 45년 근무 기간 동안 PEL에 노출된 작업자의 남은 위험은 정량적 평가가 다음과 같은 이전 OSHA 건강 기준의 나머지 위험과 비슷하거나 더 크다. OSHA는 기준의 보조 조항이 이러한 잔류 위험을 감소시킬 것으로 예상하지만, 일부 산업 및 공정에서 더 낮은 PEL을 달성할 수 있으며, 이는 이러한 위험을 더욱 감소시킬 수 있다는 것을 알고 있다. 그러나 아래에 설명된 바와 같이 OSHA는 이러한 이점이 기준이 적용되는 다양한 산업 및 공정 그룹에 대해 여러 PEL을 설정하고 적용하려는 시도의 중대한 단점으로 상쇄될 것이라고

결론지었다. Building & Constr. 참조. Trades Dep't v. U.S. Dep't of Labor, 838 F.2d 1258, 1273(D.C. Cir. 1988) (행정상의 어려움이 적절하게 설명된다면 동일한 PEL을 선택하기로 한 결정을 정당화할 수 있음).

여러 PEL을 설정하기 위한 OSHA 요구. -각 산업 또는 공정 또는 그 집단에 고유한 타당성을 고려- 더 낮은 PEL에 도달할 수 있는 특정 상황이 있는 경우 이를 확인하고 설정하기 위해 OSHA에 막대한 증거 부담을 부과할 것이다. 그러한 부담스러운 의무는 중요한 건강 기준의 채택을 배제하지는 않더라도 불가피하게 지연시킬 것이다. 또한, 분류가 법적 의무를 결정하는 영향을 받는 산업과 공정을 정확하게 정의하고 명확하게 구별하는데 내재된 어려움으로 인해 여러 PEL을 설정해야 하는 부담이 복잡해진다. OSHA가 규정 준수 목적이 아닌 분석을 위해 산업 단위 및 운영 단위를 사용하는 경우와 종합적으로 PEL을 설정하는 경우, 즉 분석이 특정 여부를 결정하는 것으로 제한되는 경우가 훨씬 덜 중요하다. PEL은 영향을 받는 산업 전체에 대해 실현 가능한 가장 낮은 수준이다. OSHA가 여러 PEL을 설정하고 해당 PEL에 산업 또는 공정을 할당해야 한다면 부정확한 분류의 결과가 훨씬 더 중요해지기 때문에 문제가 훨씬 더 분명해진다. 연방 통계 기관이 사업체를 분류할 때 사용하는 표준으로 SIC(Standard Industrial Classification) 시스템을 대체한 북미 산업 분류 시스템(NAICS)은 여러 PEL을 설정하기 위한 적절한 기반이 아니다. NAICS 분류는 일반적으로 정의된 정의를 기반으로 하며 특정 시설에 가장 적합한 정의가 항상 명확한 것은 아니다. 또한 시설의 NAICS 분류는 기본 활동을 기반으로 한다. 그러나 시설에는 다른 많은 활동이 포함될 수 있으며 한 활동에서 운영 가능한 가장 낮은 수준이 다른 활동에서는 그렇지 않을 수 있다. 또한 시설의 주요 활동은 시간이 지남에 따라 변경될 수 있으며 NAICS 시스템 자체는 5년마다 개정된다. 정의의 불확실성, 다양하고 변화하는 사업 활동의 존재, 개별 코드의 주기적 개정은 시간이 지남에 따라 기준을 시행하는 데 중요한 결과를 초래할 수 있다. 이러한 이유로 OSHA는 역사적으로 표준 범위를 SIC 분류로 분류하는 것을 꺼려했다. 58 FR 166620-

16621(1993년 3월 30일) 참조(잠금/태그아웃 표준 적용 범위의 세분화 논의). 유사하게, 작업에 의한 세분화는 주요 실제적인 단점이 있다. 정의의 복잡성 외에도 PEL을 세분화하기 위한 작업 사용의 중요한 문제는 많은 기업이 두 개 이상의 다른 범주에 노출되어 있다는 것이다. 예를 들어 용접은 일반 산업, 해양 및 건설의 제조 작업에 널리 사용된다. 따라서 예를 들어 용접 응용 분야의 경우 PEL을 5로 설정하고 다른 응용 분야의 경우 1로 설정하는 것은 일부 회사가 동일한 작업장 내에서, 그리고 동일한 종사자에 대해서도 Cr(VI) 노출에 대해 두 가지 다른 PEL을 준수해야 한다는 것을 의미한다. 또 다른 예로서, 크롬 변환은 처리된 금속 표면이 크롬 화합물의 복잡한 혼합물을 포함하는 층으로 변환되는 과정이다. 전기도금과 달리 크롬 변환은 완전히 화학적 공정이며 일반적으로 크롬 전기도금과 관련된 것보다 Cr(VI) 노출이 더 적다. 단일 시설에서 크롬 전기도금과 함께 크롬 변환이 수행되는 경우 한 발생원과 다른 발생원의 노출을 구별하는 것이 사실상 불가능할 수 있다. 동일한 작업자가 두 작업을 모두 수행할 수도 있다. 경질 크롬 도금은 장식 도금 및 크롬 전환과 같은 낮은 Cr(VI) 노출을 포함하는 다른 작업과 동시에 동일한 작업장 또는 영역에서 가끔 수행되기 때문에 경질 크롬 전기도금으로 인한 노출은 필연적으로 근처의 다른 작업자에게 영향을 미친다. 사실, 많은 상황에서 특정 종사자의 노출 수준에 기여하는 다양한 발생원을 구별하는 것이 사실상 불가능할 수 있다. 이것은 개별 사업주가 둘 이상의 다른 작업에서 발생하는 Cr(VI) 노출을 갖게 될 기록에 반영된 많은 사례의 몇 가지 사례이다 (Exs. 38-233, pp. 9-10; 39-52, p. 4, 47~24, 2, 39~20, 5). 여러 공정에 대해 여러 PEL이 설정된 경우 사업주는 동일한 작업장 내에서 둘 이상의 PEL 준수 여부를 모니터링해야 한다. -종사자의 노출이 단일 작업에만 국한되지 않을 수 있다는 사실로 인해 작업이 더욱 어려워지고, 서로 다른 공정이 서로 근접하여 수행될 수 있으며 각각의 개인의 노출에 기여될 수 있다.

OSHA는 또한 통일된 PEL이 영향을 받는 사업주가 기준의 요구 사항을 더 쉽게 이해하고 준수할 수 있도록 함으로써 궁극적으로 기준을 더 효과적으로

만들 것이라고 판단했다. 동일한 PEL은 또한 OSHA가 규제 대상 커뮤니티에 명확한 지침을 제공하고 비준수 조건을 식별하는 것이 더 용이하다.

마지막으로 OSHA는 여러 PELs를 채택하면 시행 목적을 위해 추적해야 하는 많은 하위 범주가 생길 수 있다는 점을 우려하였다. 특히 심각한 분해 문제를 나타내는 용접 및 전기도금 외에도 Cr(VI)에 노출되는 30개 이상의 다른 산업 분야가 있다. 이러한 부문 중 어느 것도 개별적으로 노출된 전체 종사자의 6% 이상을 차지하지 않는다; 실제로 이러한 집단 중 일부는 100명 미만의 종사자를 고용하고 있다.

이러한 이유로 OSHA는 역사적으로 6(b)(5)항을 해석하여 PEL을 전체 산업 또는 운영에 실현 가능한 최저 수준으로 설정할 수 있는 기관의 실질적인 재량을 부여했다. 예를 들어, 비소 기준을 채택할 때 OSHA는 "이러한 접근 방식은 구현하기가 극히 어려울 것"이라는 이유로 다른 PELs 설정을 명시적으로 거부했다. 43 FR 19584, 19601(1978년 5월 5일). 그 경우 OSHA는 다음과 같이 설명했다.

OSHA가 적절하다고 생각하고 이 기준 및 기타 기준에 대해 선택한 접근 방식은 대부분의 위치에서 공학적 관리 및 작업관행 관리를 통해 달성할 수 있는 가장 낮은 수준이다. 이 접근 방식은 과도한 호흡 보호구 사용 없이 최대의 보호를 제공하기 위한 것이다.

유사하게, OSHA는 처음에 벤젠에 대한 PEL을 10 ppm에서 1 ppm으로 낮췄을 때 추가적으로 낮은 수준의 PEL을 설정하는 생각을 고려했지만 거부했으며 '다른 산업에 대한 다른 수준은 심각한 행정상의 어려움을 초래할 것'이라고 결론지었다. FR 5918, 5947(1978년 2월 10일). 그리고 OSHA가 중대한 위험에 대한 보다 특별한 결과를 위해 벤젠 기준을 환송한 후 후속적으로 재고했을 때 OSHA는 0.5 ppm의 PEL을 고려했지만 거부했다. 노동 조합은 관리가 1ppm 보다 다소 더 나은 일부 상황을 지적했지만 OSHA는 높은 수준의 신뢰를 가질 수 있는 수준이 일반적으로 달성 가능하기 때문에 1

ppm이 올바르게 균형적임을 선택했다고 판단했다. 52 FR 34460, 34519(1987년 9월 11일). OSHA가 특정 집단에 대해 서로 다른 PEL을 설정한 먼분진의 경우, 집단은 서로 다른 종류의 먼분진과 다양한 위험 수준에 대한 노출을 포함했다. 그럼에도 불구하고 OSHA는 영향을 받는 모든 부문에 대해 고유한 PEL을 채택하는 것을 거부했다. 43 FR 27350, 37360-61(1978년 6월 23일) 참조(OSHA는 섬유 산업에 대해 하나의 PEL을 설정하고 비섬유 산업에 대해 별도의 PEL을 설정했지만 각 비섬유 산업에 대해 다른 노출기준을 채택하는 옵션을 명시적으로 거부했다).

결론적으로, 새로운 PEL은 많은 수의 노동자, 실제로 6가 크롬에 노출된 대부분의 노동자를 고용하는 많은 산업 및 작업에서 실현 가능하게 달성할 수 있는 가장 낮은 수준이다. 위에 요약된 모든 요소를 고려하여 OSHA는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 동일한 PEL이 섹션 6(b)(5)와 일치하며 더 이상의 분류가 보증되지 않는다는 것을 확인했다.

단기간 노출기준 불필요. 다양한 의견 제시자들은 OSHA가 Cr(VI)에 대한 단기간 노출기준(STEL)을 설정할 것을 권장했다(Exs. 38-219; 38-222; 39-38; 39-50; 40-19). STEL은 단기간의 잠재적인 대규모 노출을 제한함으로써 상대적으로 높은 노출과 관련된 건강 영향으로부터 보호하고 누적 노출을 줄이기 위한 것이다. UAW는 암의 높은 잔류 위험이 STEL을 정당화한다고 지적한 반면(예: 40-19), NIOSH는 높은 수준의 Cr(VI)에 단기간 노출되면 심각한 호흡기 영향을 유발할 수 있다고 밝혔다(40-10-2, p 17). 다른 의견 제시자들은 STEL이 정당하다고 믿지 않았으며, 어떤 경우에는 NIOSH나 ACGIH가 Cr(VI)에 대해 STEL을 권장하지 않는다고 언급했다(Exs. 38-214; 38-220; 39-19; 39-20; 39-40; 39-41, 39-47, 39-51, 39-52, 39-60, 43-26).

OSHA는 세 가지 이유로 최종 Cr(VI) 기준에 STEL을 포함하지 않기로 결정했다. 첫째, 사업주는 이미 새로운 PEL 이하의 수준으로 노출을 줄여야 하며, 이는 고노출 범위로 발생하는 것을 제한할 것으로 예측했다. 최고 노출로

인한 모든 위험을 제거할 수는 없지만, OSHA는 새로운 PEL을 준수하면 고노출되는 일탈의 빈도와 규모를 크게 줄여 최고 노출로 인한 건강에 악영향을 미칠 가능성을 최소화할 것으로 판단했다. 둘째, 이론적으로 STEL을 부과하면 Cr(VI)에 대한 누적 노출이 더 낮아질 수 있지만 이 가정을 뒷받침하는 기록에 대한 증거는 거의 존재하지 않는다. 셋째, 플라스틱 착색제 생산자와 같은 일부 적용 집단에서 종사자는 일반적으로 짧은 기간 동안 뿐만 아니라 간헐적으로 Cr(VI)에 노출된다. 업계에서는 사용된 안료의 5%만이 Cr(VI)을 함유하고 있다고 추정하였다(Ex. 47-24-1). 이러한 사업주의 경우 STEL을 준수하기 위해 작업자를 추가로 보호하지 않으면서 상당한 자원을 소비해야 할 수 있다. 이러한 자원은 다른 형태의 노동자 보호에 보다 효과적으로 할당될 수 있다.

더 나은 정당화 없이 OSHA는 STEL의 설정이 합리적으로 필요하거나 적절하다고 간주하지 않았다. OSHA는 STEL이 기껏해야 최소한의 건강 효과(health benefit)를 제공할 것이라고 결론을 내렸다.

### (3) 미국의 6가 크롬 최종 기준

2006년 2월 28일 미국 OSHA에서 발간된 6가 크롬에 대한 직업적 노출; 최종 규칙(29 CFR Parts 1910, 1915, et al.) 중 포괄적으로 설명이 가능한 규정인 18장 최종 기준(Final Standards)은 전문을 번역하여 수록하였다.

#### XVII. Final Standards

연방규정집 Title 29의 XVII장은 다음과 같이 수정된다.

PART 1910—[AMENDED]

## Subpart Z—[Amended]

1. Part 1910의 Subpart Z에 대한 전거 인용은 다음과 같이 수정된다.

권한: 1970년 직업안전보건법 섹션 4, 6, 8(29 U.S.C. 653, 655, 657: 노동부 장관 명령 번호 12-71(36 FR 8754), 8-76(41 FR 25059), 9-83(48 FR 35736), 1-90(55 FR 9033), 6-96(62 FR 111), 3-2000(65 FR 50017) 또는 5-2002(67 FR 65008)(해당되는 경우) 29 CFR 파트 1911.

29 CFR 1910.1000의 표 Z-1, Z-2 및 Z-3에 나열된 노출기준이 있는 물질을 제외하고 직업안전보건법의 섹션 6(b)에 따라 발행된 모든 하위 파트 Z. 후자는 섹션 6(a)(29 U.S.C. 655(a))에 따라 발행되었다.

섹션 1910.1000, 표 Z-1, Z-2 및 Z-3도 5 U.S.C. 553, 섹션 1910.1000 표 Z-1, Z-2 및 Z-3을 참조하지만 비소(유기 화합물), 벤젠, 목분진 및 크롬(VI) 목록을 제외하고 29 CFR part 1911에는 해당되지 않는다.

1910.1001항은 또한 계약 근로 시간 및 안전 표준법(40 U.S.C. 3704)의 107항 및 5 U.S.C. 553.

섹션 1910.1002도 5 U.S.C. 553이지만 29 U.S.C. 655 또는 29 CFR 파트 1911.

섹션 1910.1018, 1910.1029 및 1910.1200도 29 U.S.C. 653.

섹션 1910.1030도 Pub. L. 106-430, 114 Stat. 1901.

### § 1910.1026 Chromium (VI).

#### (a) 범위.

(1) 이 기준은 다음을 제외하고 일반 산업에서 모든 형태 및 화합물의 크롬(VI)에 대한 직업적 노출에 적용된다.

(2) 환경 보호국 또는 다른 연방 정부 기관에서 규제하는 살충제 사용 시

발생하는 노출(예: 목재를 방부제로 처리)

- (3) 포틀랜드 시멘트에 대한 노출; 또는
  - (4) 사업주가 크롬을 포함하는 물질 또는 크롬과 관련된 특정 공정, 작업 또는 활동이  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 농도로 크롬(VI)의 분진, 흠 또는 미스트를 방출할 수 없다는 객관적인 자료를 가지고 있는 경우 예상되는 사용 조건에서 8시간 가중 평균(TWA).
- (b) 정의. 이 섹션의 목적을 위해 다음 정의가 적용된다.

조치 수준(Action level)은 8시간 시간 가중 평균(TWA)으로 계산된 공기 입방 미터당 2.5마이크로그램( $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 공기 중 크롬(VI) 농도를 의미한다.

차관보는 노동부 산업안전보건 차관보, 미국 노동부 또는 피지명인을 의미한다.

크롬(VI)[6가 크롬 또는 Cr(VI)]은 원자가가 양수 6인 크롬을 의미하며, 모든 형태와 화합물이다.

국장은 미국 국립직업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health), 미국 보건복지부(Department of Health and Human Services)의 국장 또는 피지명인을 의미한다.

비상이란 통제되지 않은 크롬(VI) 방출을 초래하거나 초래할 가능성이 있는 모든 사건을 의미한다. 크롬(VI)의 우발적인 방출인 경우 즉시 방출 구역의 종사자나 유지 보수 담당자에 의해 통제될 수 있다면 비상 상황이 아니다.

노동자 노출은 노동자가 호흡보호구를 사용하지 않을 경우 발생할 수 있는 공기 중 크롬(VI)에 대한 노출을 의미한다.

고효율 미립자 공기[HEPA] 필터는 직경이 0.3마이크로미터 이상인 단일 분산 입자를 제거하는 데 최소 99.97% 효율을 보이는 필터를 의미한다.

이력 모니터링 자료는 2006년 5월 30일 이전에 수행된 크롬(VI) 모니터링 자료를 의미하며, 사업주의 현재 작업에서 공정, 재료 유형, 관리 방법, 작업

실무 및 환경 조건과 매우 유사한 작업장 조건에서 수행되는 작업 중에 획득한 것이다.

객관적인 자료는 특정 제품 또는 재료 또는 특정 공정, 작업과 관련된 종사자의 크롬(VI) 노출을 보여주는 물질의 구성 또는 화학적 및 물리적 특성을 기반으로 한 산업 전반의 조사 또는 계산에서 얻은 대기 모니터링 자료와 같은 정보를 의미한다. 자료는 사업주의 현재 작업에서 프로세스, 재료 유형, 관리 방법, 작업관행 및 환경 조건과 매우 유사한 작업장 조건을 반영해야 한다.

의사 또는 기타 면허를 소지한 의료 전문가[PLHCP]는 법적으로 허용된 진료 범위(예: 면허, 등록 또는 인증)를 통해 이 섹션의 단락 (k)에서 요구하는 케어 서비스로 건강의 일부 또는 전체를 제공할 책임을 독립적으로 제공하거나 위임받은 개인이다.

규제 지역이란 사업주가 공기 중 크롬(VI) 농도에 노출되는 것이 PEL을 초과하거나 초과할 것으로 합리적으로 예상될 수 있는 사업주에 의해 구분된 지역을 말한다.

이 섹션은 이 § 1910.1026 크롬(VI) 기준을 말한다.

(c) 허용노출기준(Permissible exposure limit, PEL)

사업주는 종사자가 8시간 TWA(시간 가중 평균)로 계산된 공기 1 입방 미터당 5 마이크로그램( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과하는 공기 중 크롬(VI) 농도에 노출되지 않도록 하여야 한다.

(d) 노출 결정(Exposure determination)

(1) 일반. 이 섹션의 적용을 받는 작업장 또는 작업 공정이 있는 각 사업주는 크롬(VI)에 노출된 각 종사자에 대한 8시간 TWA 노출을 결정해야 한다. 이 결정은 이 섹션의 단락 (d)(2) 또는 단락 (d)(3)에 따라 결정된다.

- (2) 예약 모니터링 옵션. (i) 사업주는 각 작업 분류에 대해 작업 공간의 각 교대조의 전체 교대 노출을 정확하게 특성화하기 위해 충분한 수의 개인 호흡기 영역의 공기 시료를 기반으로 각 종사자의 8시간 TWA 노출을 결정하기 위한 초기 모니터링을 수행하여야 한다. 사업주가 이 요건을 충족하기 위해 모든 종사자에 대해 시료 채취를 하는 대신 대표 시료 채취를 수행하는 경우 사업주는 가장 높은 크롬(VI) 노출이 예상되는 종사자에 대해 시료채취를 실시해야 한다.
- ii) 초기 모니터링에서 종사자의 노출이 조치 수준(action level) 미만임을 나타내는 경우 사업주는 그러한 모니터링으로 대표되는 종사자에 대한 모니터링을 중단할 수 있다.
- (iii) 모니터링 결과 종사자의 노출이 조치 수준 이상인 것으로 밝혀지면 사업주는 최소 6개월마다 정기적인 모니터링을 수행해야 한다.
- (iv) 모니터링 결과 종사자의 노출이 PEL을 초과하는 것으로 밝혀지면 사업주는 최소 3개월마다 정기적인 모니터링을 수행해야 한다.
- (v) 정기적인 모니터링에서 종사자 노출이 조치 수준 미만으로 나타나고 그 결과가 최소 7일 후에 수행된 다른 모니터링의 결과로 확인되는 경우, 사업주는 그러한 모니터링으로 대표되는 노출이 있는 종사자에 대한 모니터링을 중단할 수 있다.
- (vi) 사업주는 크롬(VI)에 대한 새로운 또는 추가 노출을 초래할 수 있는 생산 공정, 원자재, 장비, 인력, 작업 실무 또는 통제 방법에 변경이 있는 경우 추가 모니터링을 수행해야 한다.
- (3) 성능 지향 옵션(Performance-oriented option). 사업주는 종사자의 크롬(VI) 노출을 정확하게 특성화하기에 충분한 공기 모니터링 자료, 과거 모니터링 자료 또는 객관적인 자료의 조합을 기반으로 각 종사자의 8시간 TWA 노출을 결정해야 한다.
- (4) 결정 결과의 종사자 통지.

(i) 노출 결정이 종사자 노출이 PEL을 초과함을 나타내는 경우, 사업주는 15 근무일 이내에 영향을 받는 모든 종사자가 접근할 수 있는 적절한 위치에 결과를 게시하거나 영향을 받는 각 종사자에게 결과를 서면으로 개별적으로 통지해야 한다.

(ii) 노출 결정이 종사자 노출이 PEL 이상임을 나타낼 때마다 사업주는 종사자 노출을 PEL 이하로 줄이기 위해 취하는 시정 조치를 서면 통지에 설명해야 한다.

(5) 측정의 정확도. 이 섹션의 요구 사항을 준수하기 위해 공기 중 모니터링을 수행하는 경우 사업주는  $\pm 25\%$ 의 정확도 내에서 크롬(VI)을 측정할 수 있고 조치 수준 이상의 공기 중 농도에 대한 신뢰 수준 95%의 모니터링 및 분석 방법을 사용해야 한다.

(6) 모니터링 관찰(Observation of monitoring).

(i) 이 섹션의 요구 사항을 준수하기 위해 공기 모니터링이 수행되는 경우, 사업주는 영향을 받는 종사자 또는 지정된 대리인에게 노동자의 크롬(VI) 노출 모니터링을 관찰할 기회를 제공해야 한다.

(ii) 모니터링 관찰이 보호복 또는 장비의 사용이 요구되는 지역에 진입해야 하는 경우, 사업주는 관찰자에게 의복 및 장비를 제공하고 관찰자가 그러한 의복 및 장비를 사용하고 다른 모든 적용 가능한 규정을 준수하는지 확인해야 한다.

(e) 규제 지역(Regulated areas).

(1) 설정(Establishment). 사업주는 종사자의 공기 중 크롬(VI) 농도 노출이 PEL을 초과하거나 초과할 것으로 합리적으로 예상되는 경우 규제 구역을 설정해야 한다.

(2) 경계(Demarcation). 사업주는 규제 영역의 경계를 적절하게 설정하고 종사자에게 경고하는 방식으로 규제 영역이 작업장의 나머지 부분과

구분되도록 해야 한다.

(3) 접근(Access). 사업주는 규제 구역에 대한 접근을 다음으로 제한해야 한다.

(i) 사업주가 승인하고 업무상 규제 구역에 있어야 하는 자;

(ii) 이 섹션의 단락 (d)에 따라 모니터링 절차를 관찰할 권리를 행사할 목적으로 지정된 종사자 대표로 해당 영역에 들어가는 자 또는;

(iii) 직업안전보건법 또는 이에 따라 발행된 규정에 의해 규제 구역에 있도록 승인된 자

(f) 준수 방법(Methods of compliance).

(1) 공학적 관리 및 작업관행 관리

(i) 이 절의 단락 (f)(1)(ii) 및 단락 (f)(1)(iii)에서 허용된 경우를 제외하고 사업주가 그러한 관리가 가능하지 않다는 것을 입증할 수 없는 한, 사업주는 종사자의 크롬(VI) 노출을 PEL 이하로 줄이고 유지하기 위해 공학적 관리 및 작업관행 관리를 사용해야 한다. 가능한 공학적 대책 및 작업관행 관리가 종사자의 PEL 노출 또는 그 미만을 줄이기에 충분하지 않은 경우, 사업주는 이를 사용하여 종사자의 노출을 달성 가능한 가장 낮은 수준으로 줄이고, 이 섹션 (g)항의 요구 사항을 준수하는 호흡기 보호 장치를 사용하여 이를 보완해야 한다.

(ii) 항공기 또는 대형 항공기 부품의 도색이 항공우주 산업에서 수행되는 경우 사업주는 그러한 관리가 가능하지 않다는 것을 입증할 수 없는 경우 공학적 관리 및 작업관행 관리를 사용하여 종사자의 크롬(VI) 노출을  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 줄이고 유지해야 한다. 사업주는 PEL을 달성하기 위해 이 섹션의 단락 (g) 요구 사항을 준수하는 호흡기 보호 장치를 사용하여 이러한 공학적 관리 및 작업관행 관리를 보완해야 한다.

(iii) 사업주가 공정 또는 작업으로 인해 종사자가 연간 30일 이상(연속 12

개월) 동안 PEL 이상의 크롬(VI)에 노출되지 않음을 입증할 수 있는 경우, PEL을 달성하기 위해 공학적 관리 및 작업관행 관리를 구현해야 하는 요구 사항은 해당 공정 또는 작업에 적용되지 않는다.

(2) 순환 금지(Prohibition of rotation).

사업주는 PEL 준수를 위해 종사자를 다른 직무로 순환시켜서는 안 된다.

(g) 호흡기 보호(Respiratory protection).

(1) 일반.

사업주는 다음 기간 동안 종사자에게 호흡기 보호를 제공해야 한다.

(i) 실행 가능한 엔지니어링 및 작업관행 관리를 설치하거나 구현하는 데 필요한 기간

(ii) 엔지니어링 및 작업관행 관리가 가능하지 않은 유지 보수 및 수리 활동과 같은 작업 공정;

(iii) 사업주가 실행 가능한 모든 엔지니어링 및 작업관행 관리를 구현한 작업 운영 및 그러한 통제는 PEL에 대한 노출 또는 그 미만의 노출을 줄이는 데 충분하지 않다.

(iv) 종사자가 연간 30일 미만 동안 PEL 이상에 노출되고 사업주가 PEL을 달성하기 위해 엔지니어링 및 작업관행 관리를 구현하지 않기로 선택한 작업 공정; 또는

(v) 응급 상황.

(2) 호흡기 보호 프로그램(Respiratory protection program).

이 섹션에서 호흡기 사용이 요구되는 경우 사업주는 29 CFR 1910.134에 따라 호흡기 보호 프로그램을 시행해야 한다.

(h) 작업 보호의 및 장비(Protective work clothing and equipment).

(1) 제공 및 사용(Provision and use).

크롬(VI)과 피부 또는 눈 접촉으로 인해 위험이 존재하거나 존재할 가능성이 있는 경우 사업주는 적절한 개인 보호복과 장비를 종사자에게 무료로 제공해야 하며 종사자가 이러한 의복과 장비를 사용하도록 해야 한다.

(2) 제거 및 보관.

(i) 사업주는 근무 교대 종료 시 또는 크롬(VI) 노출과 관련된 작업 완료 시 중 먼저 도래하는 시점에 종사자가 크롬(VI)으로 오염된 모든 보호복과 장비를 제거하도록 해야 한다.

(ii) 사업주는 종사자가 작업장에서 크롬(VI)으로 오염된 보호의나 장비를 제거하지 않도록 해야 한다. 단, 이러한 의복이나 장비를 세탁, 청소, 유지 관리 또는 처리하는 종사자는 예외로 한다.

(iii) 오염된 보호의 또는 장비를 세탁, 청소, 유지보수 또는 폐기를 위해 제거할 때 사업주는 밀봉된 불침투성 백 또는 기타 밀폐된 불침투성 용기에 보관 및 운송되도록 해야 한다.

(iv) 세탁, 청소, 유지보수 또는 폐기를 위해 탈의실에서 제거된 오염된 보호복 또는 장비의 가방 또는 용기는 유해성 정보 전달 기준(Hazard Communication Standard), 29 CFR 1910.1200의 요구 사항에 따라 라벨을 부착해야 한다.

(3) 청소 및 교체.

(i) 사업주는 효율성을 유지하기 위해 필요에 따라 이 섹션에서 요구하는 모든 보호복과 장비를 청소, 세탁, 수리 및 교체해야 한다.

(ii) 사업주는 바람을 불거나 흔들어서 크롬(VI)을 공기 중이나 종사자의 몸에 분산시키는 방법으로 보호복 및 장비에서 크롬(VI)을 제거하는 것을 금지해야 한다.

(iii) 사업주는 크롬(VI)으로 오염된 보호복 또는 장비를 세탁하거나 청소하는 사람에게 크롬(VI) 노출의 잠재적인 유해 영향을 알리고 의복과 장

비는 크롬(VI)과의 피부 또는 눈 접촉을 최소화하고 PEL을 초과하는 공기 중 크롬(VI)의 방출을 효과적으로 방지하는 방식으로 세탁하거나 청소해야 한다.

(i) 위생 영역 및 실무.

(1) 일반.

보호의와 장비가 필요한 경우 사업주는 29 CFR 1910.141에 따라 탈의실을 제공해야 한다. 크롬(VI)과 피부 접촉이 발생하는 경우 사업주는 29 CFR 1910.141에 따라 세척 시설을 제공해야 한다. 사업주가 제공하는 식사 및 음료 공간도 § 1910.141을 준수해야 한다.

(2) 교환 시설(Change rooms)

사업주는 탈의실에 보호복과 장비, 평상복을 보관하는 별도의 보관 시설을 갖추고 이러한 시설이 교차 오염을 방지하도록 해야 한다.

(3) 세척 시설.

(i) 사업주는 피부에서 크롬(VI)을 제거할 수 있는 쉽게 접근 가능한 세척 시설을 제공하고 영향을 받는 종사자가 필요할 때 이러한 시설을 사용하도록 해야 한다.

(ii) 사업주는 종사자가 크롬(VI)과 피부 접촉을 하는 경우 근무 교대 종료 후 식사, 음주, 흡연, 담배 또는 껌 씹기, 화장품 바르기 또는 사용 전에 손과 얼굴을 화장실을 사용하여 씻도록 해야 한다.

(4) 음용 지역(Eating and drinking areas)

(i) 사업주는 종사자에게 크롬(VI)이 존재하는 작업장에서 음식이나 음료를 소비하도록 허용할 때마다 식사 및 음료 공간과 표면에 크롬(VI)이 없는 상태로 유지되도록 해야 한다.

(ii) 사업주는 표면 크롬(VI)이 공기 중으로 분산되지 않는 방법으로 종사자의 몸에 의복 및 장비에서 제거되지 않는 한 근로자가 보호 작업복 또는 장비

를 착용하고 식당에 들어가지 않도록 해야 한다.

#### 5) 금지 활동(Prohibited activities).

사업주는 근로자가 규제 구역 또는 크롬(VI)과 피부 또는 눈 접촉이 발생하는 구역에서 종사자가 먹거나, 마시거나, 흡연하거나, 담배 또는 껌을 씹거나, 화장품을 바르지 않도록 해야 한다.

#### (j) 정리정돈(Housekeeping).

(1) 일반. 사업주는 다음을 보장해야 한다. (i) 모든 표면에 크롬(VI)이 가능한 한 축적되지 않도록 유지해야 한다.

(ii) 모든 유출 또는 방출된 크롬(VI) 함유 물질은 즉시 청소한다.

#### (2) 청소 방법(Cleaning methods).

(i) 사업주는 크롬(VI)으로 오염된 표면이 HEPA 필터 진공 청소 또는 크롬(VI)에 대한 노출 가능성을 최소화하는 기타 방법으로 청소해야 한다.

(ii) 건식 삽질(Dry shoveling), 건식 쓸기 및 건식 브러싱은 HEPA 필터 진공 청소기 또는 크롬(VI)에 대한 노출 가능성을 최소화하는 기타 방법을 시도했지만 효과가 없는 것으로 판명된 경우에만 사용할 수 있다.

(iii) 사업주는 다음 경우를 제외하고 압축 공기를 사용하여 표면에서 크롬(VI)을 제거하는 것을 허용해서는 안 된다; (A) 압축 공기는 압축 공기에 의해 생성된 분진 구름을 포착하도록 설계된 환기 시스템과 함께 사용 또는 (B) 대체 방법이 실행 가능하지 않은 경우

(iv) 사업주는 작업장으로 크롬(VI)의 재유입을 최소화하는 방식으로 청소 장비를 취급해야 한다.

#### (3) 폐기(Disposal). 사업주는 다음을 보장해야 한다.

(i) 폐기물, 스크랩, 잔해 및 크롬(VI)으로 오염된 기타 모든 물질은 처리를 위해 위탁되어 밀봉된 불침투성 백 또는 기타 폐쇄된 불침투성 용기에

수집 및 처리하여야 한다.

(ii) 폐기를 위해 위탁되는 폐기물, 스크랩, 잔해 및 기타 크롬(VI)으로 오염된 재료의 가방 또는 용기는 유해성 정보전달 기준(Hazard Communication Standard), 29 CFR 1910.1200의 요구 사항에 따라 표시해야 한다.

(k) 의료 감시(Medical surveillance).

(1) 일반.

(i) 사업주는 종사자에게 무료로, 합리적인 시간과 장소에서 모든 종사자를 위해 의료 감시를 제공해야 한다.

(A) 1년에 30일 이상 작업 수준 이상의 크롬(VI)에 직업적으로 노출되거나 노출될 수 있는 사람

(B) 크롬(VI) 노출과 관련된 유해한 건강 영향의 징후 또는 증상을 경험하는 경우; 또는 (C) 비상시 노출.

ii) 사업주는 이 섹션에서 요구하는 모든 건강 검진 및 절차가 PLHCP에 의해 또는 PLHCP의 감독 하에 수행되도록 해야 한다.

(2) 주기(Frequency). 사업주는 건강 검진을 제공해야 한다.

(i) 종사자가 지난 12개월 이내에 이 단락의 요구 사항을 충족하는 크롬(VI) 관련 건강 검진을 받은 경우를 제외하고 최초 할당 후 30일 이내

(ii) 매년;

(iii) PLHCP의 서면 의학적 소견이 추가 검사를 권고한 후 30일 이내;

(iv) 종사자가 크롬(VI) 노출과 관련된 유해한 건강 영향의 징후 또는 증상을 보일 때마다;

(v) 관리되지 않은 크롬(VI) 방출을 초래하는 비상 사태 중 노출 후 30일 이내 또는;

- (vi) 고용 종료 시, 이 섹션의 단락 (k)의 요구 사항을 충족한 마지막 시험이 종료 날짜 이전 6개월 미만인 경우
- (3) 검사내용(Contents of examination). 건강 검진은 다음으로 구성된다.
  - (i) 다음을 강조하는 의료 및 작업 이력: 과거, 현재 및 예상되는 미래의 크롬 노출(VI); 호흡기 기능 장애의 병력; 천식, 피부염, 피부 궤양 또는 비중격 천공의 병력; 및 흡연 상태 및 이력;
  - (ii) 피부 및 호흡기의 신체 검사; 그리고
  - (iii) 검사 PLHCP가 적절하다고 판단한 추가 검사
- (4) PLHCP에 제공된 정보(Information provided to the PLHCP). 사업주는 검사하는 PLHCP에 이 기준의 사본이 있는지 확인하고 다음 정보를 제공해야 한다.
  - (i) 크롬(VI)에 대한 종사자의 직업적 노출과 관련하여 영향을 받는 종사자의 이전, 현재 및 예상되는 직무에 대한 설명
  - (ii) 종사자의 크롬(VI)에 대한 직업적 노출의 이전, 현재 및 예상 수준;
  - (iii) 종사자가 해당 장비를 사용한 시기와 기간을 포함하여 종사자가 사용했거나 사용할 개인 보호구에 대한 설명 그리고
  - (iv) 현재 사업주가 관리하는 해당 종사자에게 이전에 제공된 고용 관련 건강 검진 기록의 정보.
- (5) PLHCP의 서면 의학적 의견(PLHCP's written medical opinion)
  - (i) 사업주는 각 종사자에 대해 수행된 각 건강 검진에 대해 30일 이내에 PLHCP로부터 다음을 포함하는 서면 의학적 의견을 받아야 한다.
  - (A) 종사자가 크롬(VI)에 대한 추가 노출로 인해 건강에 중대한 손상을 줄 위험이 증가하는 의학적 상태를 종사자가 발견했는지 여부에 대한 PLHCP의 의견

- (B) 종사자가 크롬(VI)에 노출되거나 호흡보호구와 같은 개인 보호구를 사용할 때 권장되는 제한 사항
- (C) PLHCP가 종사자에게 추가 평가 또는 치료가 필요한 크롬(VI) 노출과 관련된 의학적 상태, 보호의 또는 장비 사용에 대한 특별 조항을 포함하여 건강 검진 결과를 설명했다는 진술.
  - (ii) PLHCP는 크롬(VI)에 대한 직업적 노출과 관련이 없는 특별한 결과 또는 진단과 관련된 내용을 사업주에게 공개하지 않는다.
  - (iii) 사업주는 PLHCP의 서면 의료 소견서 사본을 받은 후 2주 이내에 검사 종사자에게 제공해야 한다.
- (l) 종사자에 대한 크롬(VI) 유해성 정보전달(Communication of chromium (VI) hazards to employees)

(1) 일반.

유해성 정보전달 기준(Hazard Communication Standard), 29 CFR 1910.1200의 요구 사항 외에도 사업주는 다음 요구 사항을 준수해야 한다.

(2) 종사자 정보 및 교육. (i) 사업주는 각 종사자가 최소한 다음 사항에 대한 지식을 입증할 수 있도록 해야 한다.

(A) 이 섹션의 내용 그리고

(B) 이 섹션의 단락 (k)에서 요구하는 의료 감시 프로그램의 목적 및 설명.

(ii) 사업주는 영향을 받는 모든 종사자가 비용 없이 이 섹션의 사본을 쉽게 사용할 수 있도록 해야 한다.

(m) 기록 보관(Recordkeeping)

(1) 공기 모니터링 자료. (i) 사업주는 이 섹션의 요구 사항을 준수하기 위해 수행된 모든 대기 모니터링에 대한 정확한 기록을 유지해야 한다.

(ii) 이 기록에는 최소한 다음 정보가 포함되어야 한다.

- (A) 채취한 각 시료의 측정 날짜
  - (B) 모니터링되고 있는 크롬(VI) 노출과 관련된 작업;
  - (C) 사용된 시료채취 및 분석 방법과 정확성의 증거
  - (D) 채취한 시료의 수, 기간 및 결과;
  - (E) 착용하는 호흡보호구와 같은 개인 보호구의 유형; 그리고
  - (F) 모니터링에 의해 대표되는 모든 종사자의 이름, 사회 보장 번호 및 직업 분류는 실제로 모니터링된 종사자를 나타낸다.
- (iii) 사업주는 29 CFR 1910.1020에 따라 노출 기록이 유지되고 이용 가능하도록 해야 한다.
- (2) 이력 모니터링 자료(Historical monitoring data)
- (i) 사업주가 크롬(VI)에 대한 노출을 결정하기 위해 과거 모니터링 자료에 의존한 경우, 사업주는 의존하는 이력 모니터링 자료의 정확한 기록을 수립하고 유지해야 한다.
  - (ii) 기록에는 다음 조건을 반영하는 정보가 포함되어야 한다.
    - (A) 이 섹션의 단락 (d)(5)의 정확성 요구 사항을 충족하는 방법을 사용하여 자료 수집
    - (B) 과거 모니터링 자료를 얻을 때 사용되었던 과정 및 작업 실무는 노출이 결정되는 작업 동안 사용된 것과 본질적으로 동일하다.
    - (C) 이력 모니터링 자료를 얻을 때 취급되는 크롬(VI) 함유 물질의 특성은 노출이 결정되는 작업의 특성과 동일하다.
    - (D) 과거 모니터링 자료를 얻었을 때 우세한 환경 조건은 노출이 결정되는 작업의 환경 조건과 동일하다. 그리고
    - (E) 예외가 적용되는 운영, 재료, 처리 또는 종사자 노출과 관련된 기타 자료

(iii) 사업주는 29 CFR 1910.1020에 따라 과거 노출 기록이 유지되고 이용 가능하도록 해야 한다.

### (3) 객관적 자료(Objective data)

(i) 사업주는 이 섹션의 요구 사항을 준수하기 위해 의존하는 모든 객관적인 자료의 정확한 기록을 유지해야 한다.

(ii) 이 기록에는 최소한 다음 정보가 포함되어야 한다.

(A) 문제의 크롬 함유 물질;

(B) 객관적인 자료의 출처;

(C) 크롬(VI) 방출 물질의 시험 프로토콜 및 시험 결과 또는 분석 결과;

(D) 공정, 작업 또는 활동에 대한 설명과 자료가 결정을 뒷받침하는 방법 그리고

(E) 공정, 운영, 활동, 재료 또는 종사자 노출과 관련된 기타 자료

(iii) 사업주는 객관적인 자료가 29 CFR 1910.1020에 따라 유지되고 이용 가능하도록 해야 한다.

### (4) 의료 감시

(i) 사업주는 이 섹션의 단락 (k)에 따라 의료 감시 대상이 되는 각 종사자에 대한 정확한 기록을 수립하고 유지해야 한다.

(ii) 기록에는 종사자에 대한 다음 정보가 포함되어야 한다.

(A) 이름 및 사회 보장 번호

(B) PLHCP의 서면 의견 사본

(C) 이 섹션의 단락 (k)(4)에서 요구하는 대로 PLHCP에 제공된 정보의 사본

(iii) 사업주는 29 CFR 1910.1020에 따라 의료 기록이 유지되고 이용 가

능하도록 해야 한다.

(n) 시행일(date).

- (1) 종사자가 20명 이상인 사업주의 경우, 이 섹션의 단락 (f)에서 요구하는 공학적 관리를 제외하고 이 섹션의 모든 의무는 2006년 11월 27일부터 시작된다.
- (2) 종사자가 19명 이하인 사업주의 경우, 이 섹션의 단락 (f)에서 요구하는 공학적 관리를 제외하고 이 섹션의 모든 의무는 2007년 5월 30일부터 시작된다.
- (3) 모든 사업주에 대해 이 섹션의 단락 (f)에서 요구하는 공학적 관리는 늦어도 2010년 5월 31일까지 시행되어야 한다.

## 6) 소결

크롬 3가에 대한 독성은 동물실험에서  $0.5 \text{ mg/m}^3$  미만의 단기 노출 수준에서 병태생리학적 중요성의 변화가 없었고 폐암 및 피부 자극 자료는 충분히 보고되지 않았다. 크롬 6가에 대한 최신 연구들에서는 공통적으로 NOAEL이  $0.0002 \sim 0.0012 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$  범위에서 관찰되었다. ACGIH는 2018년 독성학적인 자료에 기반해서  $0.0002 \text{ mg/m}^3$ 을 TWA-TLV로 제안하였다. 이에 반해 그보다 앞서 2006년 노출기준을 개정한 OSHA는 실현가능성까지 고려하였다.

OSHA는 최초로 PEL을  $0.001 \text{ mg/m}^3$ ( $1 \mu\text{g/m}^3$ )로 제안하면서 일부 공정에 대해서는 가장 일반적인 용접 작업 중 일부가  $1 \mu\text{g/m}^3$ 의 PEL을 준수하는 것이 불가능하다고 결론을 내렸다. 용접의 도처에 있는 특성으로 인해  $1 \mu\text{g/m}^3$ 의 PEL은 일반적으로 모든 용접 작업에 실행이 불가능하다고 판단했다. 특히, OSHA는 제안된 PEL이 일반적으로 용접이 고노출 작업과 저노출 작업으로 쉽게 구분되지 않기 때문에 용접 작업에 실행 불가능하다고 판단했다.

그렇기 때문에, 최종적으로  $0.005 \text{ mg/m}^3$ 을 PEL로 제안하게 된다. 이 수준에서도 항공기나 조선업에서 가공되는 일부 대형 부품을 도장하는 공정에서는 국소배기 등의 공학적 관리방법을 효율적으로 적용하기 어렵기 때문에 이 공정들은 PEL의 적용 대상에서 제외하였다.

## 2. 국내 크롬 및 그 화합물 측정자료 분석

### 1) 안전보건공단 측정자료 분석

#### (1) 최근 노출수준

안전보건공단 2019-2021년 작업환경측정 결과를 요약하면 노출기준 대비 4가지 수준로 나누어 보면 아래 표와 같다. 대부분이 노출기준의 10% 이하 수준에서 노출되고 있고 노출기준을 초과하는 경우는 크롬 3가 및 6가, 크롬 산 연에서만 보고되었다.

〈표 Ⅲ-28〉 작업환경측정 결과(2019-2021년)의 분포

| 구분             | 노출기준의<br>10% 이하 | 10% 초과,<br>50% 이하 | 50% 초과,<br>100% 이하 | 노출기준<br>초과 | 총합계     |
|----------------|-----------------|-------------------|--------------------|------------|---------|
| 크롬(3가)         | 214,360         | 578               | 20                 | 1          | 214,959 |
| 크롬(6가,<br>불용성) | 77,308          | 2,933             | 65                 | 7          | 80,313  |
| 크롬(6가,<br>수용성) | 45,002          | 722               | 16                 | 2          | 45,742  |
| 크롬산 연          | 1,128           | 175               | 7                  | 2          | 1,312   |
| 크롬산 아연         | 385             | 77                | -                  | -          | 462     |
| 스티론티움<br>크로메이트 | 144             | 84                | -                  | -          | 228     |
| 크롬광가공<br>(크롬산) | 87              | 8                 | -                  | -          | 95      |
| 크롬(2가)         | 19              | -                 | -                  | -          | 19      |
| 총합계            | 338,433         | 4,577             | 108                | 12         | 343,130 |

(2) 공정에 따른 분류

제공받은 공단자료에서 ‘부서명’, ‘공정명’, ‘단위작업장소’에서 일부 공정에 대한 키워드를 포함하는 경우를 추출하여 분석하였다.

용접 공정

‘용접’ 키워드를 포함하는 경우 크롬 3가와 6가(불용성)으로 측정되는 경우가 많았고 6가(수용성)도 10% 정도 차지했다. 용접에 대해서 공통적으로 정해진 측정방법이 없다고 할 수 있다.

〈표 III-29〉 용접공정(‘용접’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수

| 연도   | 크롬(3가) | 크롬(6가, 수용성) | 크롬(6가, 불용성) |
|------|--------|-------------|-------------|
| 2019 | 27,710 | 5,726       | 12,956      |
| 2020 | 28,142 | 6,029       | 15,380      |
| 2021 | 27,618 | 4,771       | 17,545      |
| 총합계  | 83,470 | 16,526      | 45,881      |

용접 이외에도 ‘사상’ 공정과 ‘배관’ 공정의 경우도 일부 작업에 용접이 포함될 확률이 크므로 용접으로 분류한다면 아래 내용도 용접 공정으로 분류될 수 있다.

〈표 III-30〉 용접공정(‘사상’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수

| 연도   | 크롬(3가) | 크롬(6가, 수용성) | 크롬(6가, 불용성) |
|------|--------|-------------|-------------|
| 2019 | 8,740  | 1,682       | 3,395       |
| 2020 | 9,175  | 1,941       | 3,891       |
| 2021 | 9,428  | 1,466       | 4,632       |
| 총합계  | 27,343 | 5,089       | 11,918      |

〈표 III-31〉 용접공정(‘배관’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수

| 연도 | 크롬(3가) | 크롬(6가, 수용성) | 크롬(6가, 불용성) |
|----|--------|-------------|-------------|
|----|--------|-------------|-------------|

|      |       |     |       |
|------|-------|-----|-------|
| 2019 | 1,278 | 127 | 623   |
| 2020 | 1,507 | 195 | 773   |
| 2021 | 1,305 | 154 | 908   |
| 총합계  | 4,090 | 476 | 2,304 |

도금 공정

‘도금’ 키워드를 포함하는 경우 크롬(6가, 수용성)으로 측정하는 경우가 가장 많았으며 크롬(3가)로 측정하는 경우도 30% 이상으로 상당 부분을 차지했다.

〈표 III-32〉 도금공정(‘도금’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수

| 연도   | 크롬(3가) | 크롬(6가, 수용성) | 크롬(6가, 불용성) |
|------|--------|-------------|-------------|
| 2019 | 1,945  | 3,337       | 190         |
| 2020 | 2,003  | 3,486       | 136         |
| 2021 | 1,989  | 3,479       | 132         |
| 총합계  | 5,937  | 10,302      | 458         |

도장 공정

‘도장’ 키워드를 포함하는 경우 측정은 아래와 같이 이루어졌다. ‘인쇄’ 키워드를 포함하는 경우도 크롬이 포함된 색소가 포함되어 있다고 볼 수 있다.

〈표 III-33〉 도장공정(‘도장’ 키워드를 포함하는 분류)에서 유해물질별 측정건수

| 연도   | 크롬(3가) | 크롬(6가, 수용성) | 크롬(6가, 불용성) |
|------|--------|-------------|-------------|
| 2019 | 2,243  | 565         | 1,948       |
| 2020 | 2,601  | 541         | 1,658       |
| 2021 | 3,233  | 502         | 1,438       |
| 총합계  | 8,077  | 1,608       | 5,044       |

### 공정 미분류

‘판금’ 키워드도 용접으로 분류하여 용접/도금/도장에 해당되지 않는 공정을 분석하면 아래 표와 같다. 약 44%의 공정의 경우는 미분류에 해당된다고 볼 수 있다. 공단DB의 경우 ‘부서명’, ‘공정명’, ‘단위작업장소’가 제대로 입력되지 않는 경우가 많다고 볼 수 있다.

〈표 III-34〉

미분류 공정(용접, 도금, 도장 공정이 아닌 분류)에서 유해물질별 측정건수

| 연도   | 크롬(3가) | 크롬(6가, 수용성) | 크롬(6가, 불용성) |
|------|--------|-------------|-------------|
| 2019 | 30,182 | 4,916       | 7,410       |
| 2020 | 31,073 | 5,737       | 7,970       |
| 2021 | 30,354 | 5,533       | 9,208       |
| 총합계  | 91,609 | 16,186      | 24,588      |

### (3) 분류 오류

안전보건공단의 자료에서 유해물질 분류코드와 매칭된 유해물질 이름을 분석하면 아래 표와 같다. 오분류 된 경우는 분류코드별로 1% 미만이라고 할 수 있지만 최근에도 여전히 존재함을 알 수 있다.

〈표 III-35〉 유해물질 분류코드별 측정건수

| 유해물질 분류코드       | 측정건수       |
|-----------------|------------|
| <b>12005</b>    | <b>462</b> |
| 크롬산 아연          | 402        |
| 크롬산 아연 및 함유제제   | 52         |
| 크롬산아연           | 8          |
| <b>12015</b>    | <b>95</b>  |
| 크롬광가공(열소성처리경우만) | 9          |

|  |               |
|--|---------------|
| 크롬광가공품(크롬산)                            | 7             |
| 크롬광및 함유제제(열소성처리경우만)                    | 65            |
| 크롬광및함유제제(열소성처리경우만)                     | 14            |
| <b>22071</b>                           | <b>206578</b> |
| 3가 크롬                                  | 41            |
| 니켈(금속)                                 | 2             |
| 니켈(불용성무기화합물)                           | 2             |
| 망간및그무기화합물                              | 3             |
| 산화철분진과흙                                | 3             |
| 산화크롬                                   | 2             |
| 이산화티타늄                                 | 4             |
| 크롬                                     | 5864          |
| 크롬 3가화합물                               | 1605          |
| 크롬 및 그 무기화합물                           | 4             |
| 크롬(3가)                                 | 19            |
| 크롬(3가) 및 그 무기화합물                       | 1041          |
| 크롬(3가)화합물                              | 863           |
| 크롬(Cr)                                 | 762           |
| 크롬(금속)                                 | 3000          |
| 크롬(금속과 3가화합물)                          | 1111          |
| 크롬(금속과 크롬 3가 화합물)                      | 304           |
| 크롬(금속과 크롬 3가화합물)                       | 89092         |
| 크롬(금속과 크롬 3가화합물)(Cr)                   | 4             |
| 크롬(금속과 크롬 <sup>3</sup> 가 화합물)          | 15            |
| 크롬(금속과크롬 <sup>3</sup> 가화합물)            | 666           |
| 크롬 <sup>3</sup> 가                      | 1             |
| 크롬과 그 무기화합물(금속과 크롬 3가화합물)              | 1139          |
| 크롬과 그 무기화합물(금속과 크롬 <sup>3</sup> 가 화합물) | 1577          |
| 크롬과 그 무기화합물(금속과 크롬 <sup>3</sup> 가화합물)  | 891           |
| 크롬과 그무기화합물(금속과크롬 <sup>3</sup> 가화합물)    | 530           |
| 크롬과그무기화합물                              | 11            |
| 크롬과그무기화합물(금속과크롬 3가화합물)                 | 1577          |
| 크롬과그무기화합물(금속과크롬 <sup>3</sup> 가화합물)     | 96443         |

|   |              |
|---|--------------|
| 크롬과그무기화합물(수용성 6가 크롬 화합물)                      | 2            |
| <b>22072</b>                                  | <b>8381</b>  |
| 3가 크롬   | 2            |
| 산화알루미늄  | 6            |
| 크롬  | 4            |
| 크롬(Cr)  | 282          |
| 크롬(금속)  | 293          |
| 크롬과그무기화합물(금속과크롬3가화합물)                         | 49           |
| 크롬과그무기화합물(금속과크롬3가화합물)물질의 중량비율 1% 이상 함유한 제재    | 7745         |
| <b>22073</b>                                  | <b>45133</b> |
| 6가 크롬(수용성)                                    | 47           |
| 6가 크롬화합물(수용성)                                 | 910          |
| 수용성 6가 크롬 화합물                                 | 11           |
| 크롬(6가)화합물(수용성)                                | 19153        |
| 크롬(수용성 6가 크롬 화합물)                             | 36           |
| 크롬(수용성 6가 크롬화합물)                              | 3856         |
| 크롬(수용성6가 크롬)                                  | 142          |
| 크롬과 그 무기화합물(수용성 6가 크롬 화합물)                    | 1597         |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가 크롬 화합물)                      | 4            |
| 크롬과그무기화합물(수용성 6가 크롬 화합물)                      | 12978        |
| 크롬과그무기화합물(수용성 6가 크롬화합물)                       | 310          |
| 크롬과그무기화합물(수용성6가 크롬화합물)                        | 6087         |
| 크롬산 칼륨  | 2            |
| <b>22074</b>                                  | <b>609</b>   |
| 6가 크롬(수용성)                                    | 63           |
| 크롬(6가)화합물(수용성)                                | 16           |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가 크롬 화합물)물질의 중량비율 1% 이상 함유한 제재 | 1            |
| 크롬과그무기화합물(수용성 6가 크롬 화합물)                      | 1            |
| 크롬과그무기화합물(수용성 6가 크롬 화합물)물질의 중량비율1%이           | 28           |
| 크롬과그무기화합물(수용성 6가 크롬 화합물)물질의 중량비율1%이상함유한제재     | 500          |
| <b>22075</b>                                  | <b>78119</b> |
| <b>6가 크롬(불용성 )</b>                            | <b>27</b>    |
| 6가 크롬(불용성)                                    | 601          |

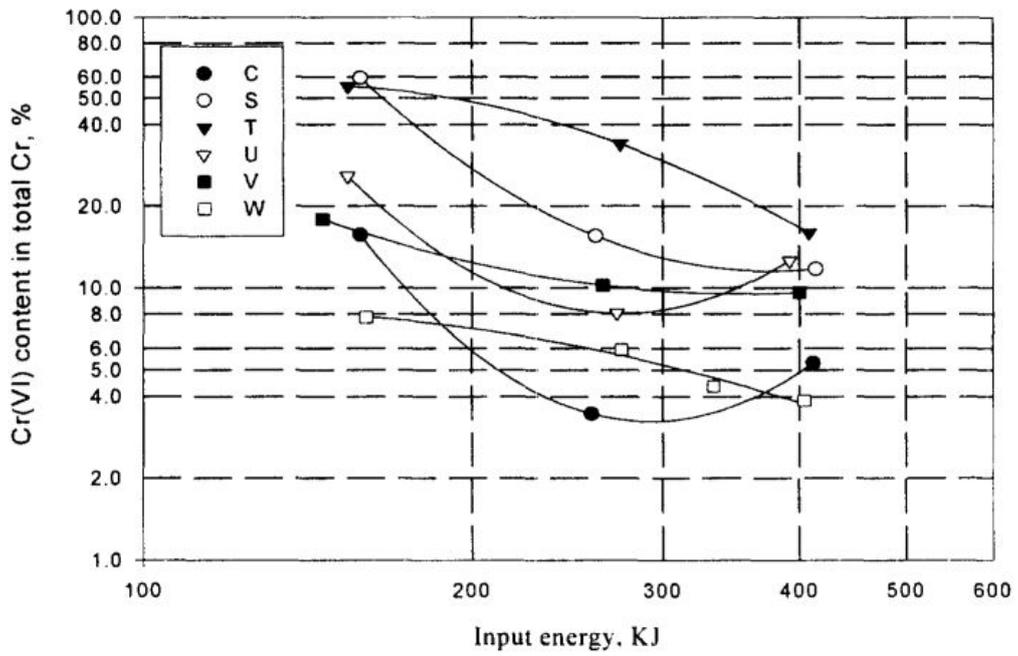
|   |             |
|---|-------------|
| 6가 크롬화합물(불용성)                                 | 327         |
| 니켈(불용성무기화합물)                                  | 2           |
| 망간및그무기화합물                                     | 2           |
| 불용성 6가 크롬 화합물                                 | 1347        |
| 크롬(6가)화합물(불용성)                                | 20841       |
| 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)                           | 1464        |
| 크롬(불용성 6가 크롬 화합물)                             | 338         |
| 크롬(불용성 6가 크롬화합물)                              | 12832       |
| 크롬(불용성6가 크롬화합물)                               | 4           |
| 크롬과 그 무기화합물(불용성 6가 크롬 화합물)                    | 2356        |
| 크롬과그무기화합물(금속과크롬3가화합물)                         | 4           |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가크 화합물)                        | 1           |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가 크롬 화합물)                      | 16518       |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가 크롬화합물)                       | 1050        |
| 크롬과그무기화합물(불용성6가 크롬화합물)                        | 20397       |
| 크롬과그무기화합물(수용성 6가 크롬 화합물)                      | 8           |
| <b>22076</b>                                  | <b>2194</b> |
| 6가 크롬   | 1           |
| 6가 크롬(불용성)                                    | 159         |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가 크롬 하한목)목직의 중량비율 1% 이상 함유한 제재 | 1976        |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가 크롬)                          | 38          |
| 크롬과그무기화합물(불용성 6가 크롬)함유제재                      | 20          |
| <b>51326</b>                                  | <b>1312</b> |
| 크롬산 연   | 9           |
| 크롬산 연(as Cr)                                  | 1           |
| 크롬산 연(Cr)                                     | 74          |
| 크롬산 연(크롬)                                     | 95          |
| 크롬산연  | 602         |
| 크롬산연(6가 Cr)                                   | 1           |
| 크롬산연(6가 크롬)                                   | 5           |
| 크롬산연(as Cr)                                   | 187         |
| 크롬산연(as Cr)(Cr)                               | 38          |
| 크롬산연(as Pb)                                   | 22          |

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| 크롬산염(as Pb)(Pb) | 38            |
| 크롬산염(AsCr)      | 5             |
| 크롬산염(Cr)        | 142           |
| 크롬산염(크롬)        | 6             |
| 크롬산염as Cr       | 87            |
| <b>51327</b>    | <b>19</b>     |
| 크롬(2가)화합물       | 19            |
| <b>52037</b>    | <b>228</b>    |
| 스티론티움크로메이트      | 228           |
| <b>총합계</b>      | <b>343130</b> |

## 2) 문헌에 나타난 노출수준 검토

### (1) 플렉스 코어드 아크 용접 중 발생하는 총 크롬 및 6가 크롬의 함량 변화 (윤충식 등, 2000)

6가 크롬 중 수용성 6가 크롬은 약 80~90%에 해당하며 용접 와이어별로 큰 차이는 없었지만 투입되는 에너지 수준이 증가할수록 6가 크롬의 함량은 감소하는 경향을 보였다([그림 III-1]). 따라서 FCAW 흡 중 대부분의 6가 크롬은 수용성 형태로 존재함을 알 수 있다. SMAW 흡에 존재하는 6가 크롬도 대부분 수용성인데, 이들이 수용성인 이유는 발생하는 크롬이 피복제에 존재하는 칼륨이나 나트륨과 반응하여 산화물을 형성하기 때문이다. 칼륨은 SMAW의 피복제나 FCAW의 플렉스에 아크 안정제나 교착제로, 나트륨은 아크 안정제로 함유된다. 흡 중 이 두 성분을 합하면 와이어간의 차이는 있으나 평균 16.7%였다. 이들 성분은 플렉스 코어드 와이어에서 아크 안정제로서 일정한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이들 성분 자체는 용접작업에서 보건학적으로 큰 문제를 야기하지 않으나 전술한 것처럼 크롬을 수용성의 6가 형태로 존재하게 하는 원인 물질로 작용할 수 있다.



[그림 Ⅲ-1] 투입 에너지 수준별 총크롬 중 6가 크롬 함량 변화

## (2) 금속화합물 노출기준 개정 방향 연구(박정임 등, 2020)

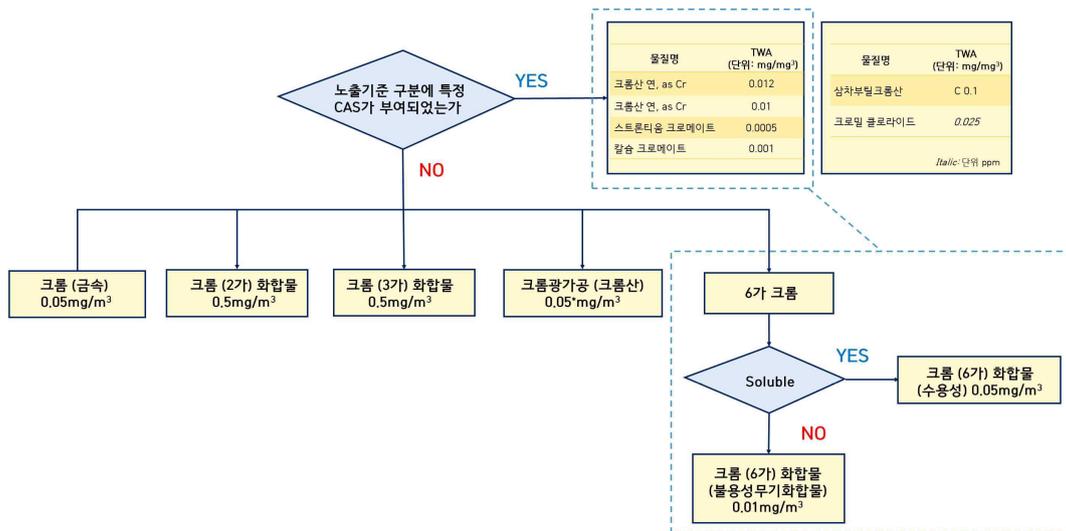
크롬에 해당하는 금속 및 금속화합물의 ACGIH TLV documentation을 검토하여 각각의 노출기준 설정 배경과 개정 이력을 고찰하였다. 안전보건공단 2018-2020 작업환경측정 결과를 요약하여 제시하였다.

측정된 크롬 화합물 중 노출기준을 초과한 물질은 3가, 6가 불용성, 6가 수용성, 크롬산 연(as Cr)이었으며, 초과된 횟수는 각각 28건(28/401,869건), 9건(9/82,264건), 5건(5/75,271건), 4건(4/4,561건)이었다. 크롬 3가 화합물 중 38.6%(155,154건)가 불검출이었으며, 61%(246,687건)가 검출한계 이상~노출기준 미만으로 측정되었다. 크롬 3가 화합물의 노출 수준은 검출한계 이상~노출기준의 1/100 수준이 217,182건(54%)으로 가장 많았으며, 노출기준의 1/100~노출기준의 1/10 등 순이었다. 6가 크롬 화합물은 용해도와 상관없이 비슷한 빈도로 측정되었으며, 불검출된 건수도 각각 75%, 63%로 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 검출한계 이상의 노출 수준의 분포를 보았을 때, 용해도에 따라 농도 수준에 차이가 있음을 알 수 있었다. 불검출을 제외하고, 불용성과 수용성화합물에서 가장 잦은 빈도로 측정된 농도 수준은 각각 노출기준의 1/100~노출기준의 1/10 수준(13,845건), 검출한계 이상~노출기준의 1/100 수준(14,996건)이었다. 같은 6가 화합물임에도 불용성이 수용성보다 더 높은 농도 분포임을 알 수 있었다. 대부분의 금속화합물 노출 수준은 불검출이 가장 많으며, 농도 수준이 높아질수록 빈도는 줄어드는 경향이 있었다. 크롬의 경우 이러한 경향과 다르게, 노출기준의 1/100~노출기준의 1/10 수준이 가장 많은 빈도를 나타낸 물질이 많았다. 6가 크롬 불용성화합물, 크롬산 연(as Cr), 크롬산 아연, 크롬광가공(크롬산)이 그 예이다.

크롬 화합물의 분류기준의 경우 아래 그림과 같이 선정절차를 제시하였다. 수용성에 대한 기준은 구체적으로 제시하지 않았고 수용성에 대한 구분 없이 통합하는 것을 제안하였다.

크롬은 현행 노출기준이 12종으로 매우 세분화되어 있다. 크롬(금속)의 경

우 크롬 화합물과 달리 발암성, 피부 감작성 등의 독성에 대한 근거가 없으므로 별도로 구분한다. 화합물의 경우 크롬 2가(거의 존재하지 않음) 및 3가 화합물은 분석법과 노출기준이 같으므로 통합할 수 있을 것이다. 각종 크로메이트( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) 구조의 크롬 화합물과 크로밀 클로라이드는 6가 크롬 무기화합물에 통합하여 기준을 적용할 수 있을 것이다. 수용성과 불용성을 현재 구분하고는 있으나, 두 구분 모두 발암성 구분이 1A이고 ACGIH TLVs 등 다수의 기관에서도 구분 없이 적용하므로 우리나라도 6가 크롬 화합물로 통합하는 것이 바람직할 것이다.



[그림 III-2] 크롬 화합물의 노출기준 선정 계통도(박정임 등, 2020)

(3) 금속화합물 노출기준 개정 방향 연구(박승현 등, 2013)

NIOSH의 가용성 물질의 측정분석을 위한 지침(NIOSH, 2003)에서 제시하고 있는 크롬 및 그 화합물의 용해도 평가 자료는 표 3-29와 같다. 표에서 보면 크롬 금속의 경우는 불용성 물질이고, 6가 크롬 화합물에서는 크롬산과 크롬산 무수물 그리고 나트륨, 칼륨 등의 모노크로메이트 및 디크로메이트 화합물이 수용성이고 크롬산아연, 크롬산연, 크롬산바륨 등은 불용성 물질이다.

〈표 3-29〉 크롬 및 그 화합물의 용해도 특성(NIOSH 자료)

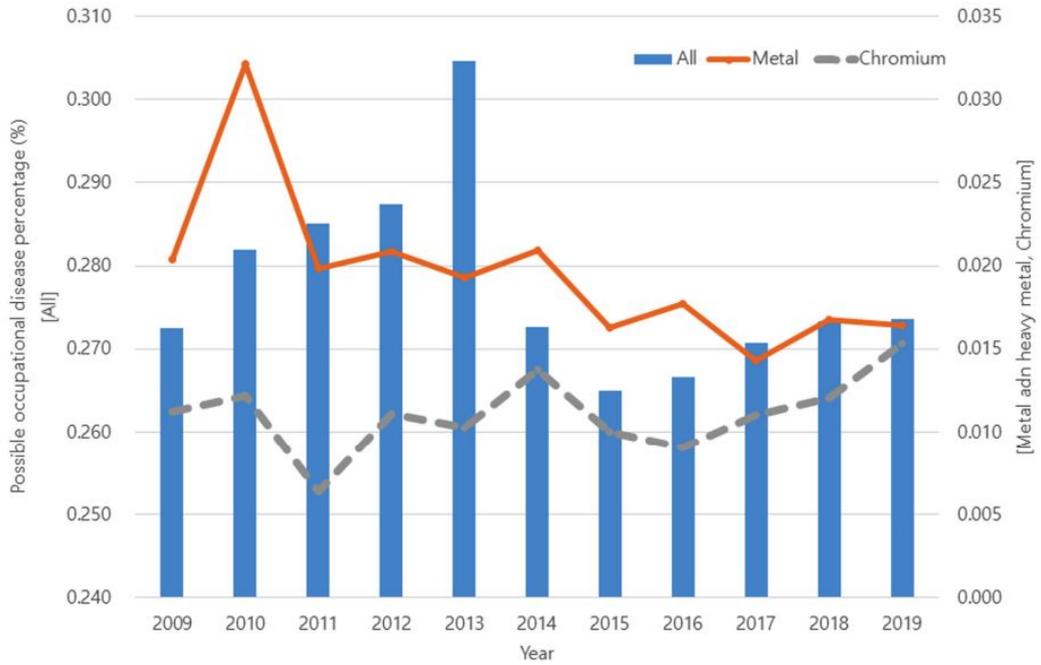
| 크롬 및 그 화합물                       | 수용성 | 불용성 | 비 고   |
|----------------------------------|-----|-----|---|
| Chromium metal                   |     | ○   | Insoluble in hot and cold water   |
| Water soluble Cr(VI) compounds   | ○   |     | Chromic acid, its anhydride, and the monochromates and dichromates of sodium, potassium, ammonium, lithium, cesium, and rubidium. |
| Water insoluble Cr(VI) compounds |     | ○   | Zinc chromate, lead chromate, barium chromate, and sintered chromium trioxide.  |

[그림 III-3] 크롬 및 그 화합물의 용해도 특성(박승현 등, 2013)

#### (4) 크롬 직업병 유소견자와 요관찰자 추이 및 취급 근로자의 생물학적 노출 수준 고찰(박상일 등, 2021)

최근 11년간 국내 크롬 취급근로자의 직업병 유소견자 및 요관찰자 추이를 분석하였으며, 국내외 크롬 취급근로자에 대한 문헌을 검토하여 관련업종 및 근로자, 최근 생물학적 노출수준에 대한 동향, 건강영향에 대한 주요 결과를 확인하였다. 크롬 취급근로자의 직업병 유소견자 및 요관찰자의 연도별 비율은 최근 증가하는 경향을 보였다. 직업병 유소견자 및 요관찰자 연평균 비율은 남녀 모두 연령별로 60대 이상, 작업 기간은 10~14년에서 높게 나타났으며, 사업장 규모는 직업병 유소견자의 경우 5인 미만, 직업병 요관찰자의 경우 5~49명인 경우에 높게 나타났다. 산업별로는 직업병 유소견자 경우 제조업, 직업병 요관찰자의 경우 운수업에서 높게 나타났다.

최근 11년간 특수건강진단을 실시한 연 근로자수 대비 직업병 유소견자 및 요관찰자(연 근로자수)의 연도별 비율을 산정하여 전체 근로자, 금속물질 취급 근로자, 크롬 취급근로자로 구분하여 아래 그림에 나타내었다. 크롬 직업병 유소견자의 연도별 비율은 최근 증가하는 경향을 보였으며, 금속물질 취급 근로자는 대체로 감소하는 경향을 보였다. 크롬 직업병 요관찰자의 연도별 비율은 최근 증가하는 경향을 보였으며, 금속물질 취급근로자의 연도별 비율도 최근 증가하는 경향을 보였다. 다만 전체 근로자의 직업병 요관찰자의 연도별 비율은 매년 감소하는 경향을 보였다. 한편 크롬 취급근로자에 대한 문헌검토 결과에서는 전기도금, 크롬생산, 무두질 공장에서의 크롬에 대한 직업적 노출 보고가 많았다. 또한 혈중 및 요중 크롬 모두 대조군보다 조사군이 높게 보고되었으며, 혈중 크롬은 치과 기술자와 무두질 작업자에서 높게 나타났고, 요중 크롬은 타일공장이나 유리 세공소작업자, 시멘트 작업자, 중크롬산나트륨에 노출된 작업자에서 높게 보고되었다.



[그림 III-4] 전체, 금속, 크롬 유소건자 트렌드

### 3. 국내 크롬 및 그 화합물 노출실태조사

#### 1) 6가 크롬의 ICP분석결과와 IC분석결과의 비교

##### (1) 개요

6가 크롬 발생 공정에서 크롬이 모두 6가 형태로 발생한다면 ICP를 이용한 총크롬 분석결과와 IC로 분석하는 6가 크롬의 분석결과가 동일한 수준으로 평가될 것이다. 이러한 전제를 기준으로 6가 크롬이 주로 발생하는 공정 중 스테인레스 용접 공정과 크롬도금 공정을 선정하여 실태조사를 진행하였다.

〈표 III-36〉 실태조사 사업장 현황

| 구분   | 공정       | 작업내용   |
|------|----------|--|
| 사업장1 | 스테인레스 용접 | 크롬이 23~27% 함유된 Fe-Cr용접봉과 크롬이 18~20% 함유된 Sus Cut Wire용접봉을 사용하여 수작업으로 용접 |
| 사업장2 | 용접       | CSF-308와 309, TGC-308과 309(크롬함유 약 20%이상 함유) 용접봉을 사용하여 수작업으로 용접         |
| 사업장3 | 크롬도금     | 무수크롬산을 사용하여 크롬도금 작업  |
| 사업장4 | 경질크롬도금   | 99.7% 크롬산을 사용하여 경질크롬도금 작업  |
| 사업장5 | 크롬도금     | 무수크롬산을 사용하여 크롬도금 작업  |
| 사업장6 | 도금       | 무수크롬산을 사용하여 크롬도금 작업  |
| 사업장7 | 스프레이도장   | pigment yellow34(크롬산납)가 0~1%포함된 페인트로 도장                                |
| 사업장8 | 스프레이도장   | pigment yellow34(크롬산납)가 0~1%포함된 페인트로 도장                                |

(2) 분석결과

가) 용접공정

사업장1은 크롬이 23~27% 함유된 Fe-Cr용접봉과 크롬이 18~20% 함유된 Sus Cut Wire용접봉을 사용하여 용접을 하는 곳이다. 용접이 이루어지는 작업위치에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 7개를 측정하였다. 그 결과 <금속과 크롬3가>는 ICP(유도결합플라즈마)로 분석하여 평균 0.0023 mg/m<sup>3</sup>으로 평가되었고 <크롬(6가)화합물(불용성)>은 IC-UVD(이온크로마토그래피 분광검출기)로 분석하여 평균 0.0005 mg/m<sup>3</sup>으로 평가되었다.

사업장2는 주철 및 스테인레스 용접을 필요에 따라 진행하는 곳으로 크롬이 20%이상 함유된 용접봉 CSF-308와 309, TGC-308과 309들을 사용하여 스테인레스용접을 할 때 시료채취카트 2개를 용접대 주변에 설치하여 측정을 실시하였다. 그 결과 ICP법의 평균은 0.0004 mg/m<sup>3</sup>으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 분석되었다.

〈표 III-37〉 용접사업장 실태조사 결과

| 구분   | 분석방법    | 분석결과(단위 : mg/m <sup>3</sup> ) |        |        |        |        |        |        |
|------|---------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      |         | 시료1                           | 시료2    | 시료3    | 시료4    | 시료5    | 시료6    | 평균     |
| 사업장1 | ICP법    | 0.0001                        | 0.0049 | 0.0039 | 0.0060 | 0.0003 | 0.0008 | 0.0023 |
|      | IC-UVD법 | 0.0009                        | 0.0010 | 0.0001 | 0.0015 | 불검출    | 불검출    | 0.0005 |
| 사업장2 | ICP법    | 0.0006                        | 0.0001 | 0.0005 | 0.0003 | 0.0008 | 0.0003 | 0.0004 |
|      | IC-UVD법 | 불검출                           | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    |

## 나) 도금공정

사업장3는 크롬산을 사용하여 도금의 마지막 과정으로 광택을 입히는 작업이다. 도금조와 작업공간이 협소하여 불가피하게 시료채취카트 대신 시료채취기구를 가방에 넣어 2세트로 준비하고 도금조 주변에 매달아 측정하였다. 그 결과 ICP법의 평균은  $0.0012 \text{ mg/m}^3$ 으로 평가되었고 IC-UVD법의 평균은  $0.0002 \text{ mg/m}^3$ 으로 평가되었다.

사업장4은 크롬산을 사용하여 경질크롬도금을 하는 곳으로 크롬도금조 주변에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 평균은  $0.0014 \text{ mg/m}^3$ 으로 평가되었고 IC-UVD법의 평균도  $0.0014 \text{ mg/m}^3$ 으로 평가되었다.

사업장5는 무수크롬산을 사용하여 도금과정 중 최종 크롬도금을 진행하는 곳으로 크롬도금조 옆에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 평균은  $0.0004 \text{ mg/m}^3$ 으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 분석되었다.

〈표 III-38〉 도금사업장 실태조사 결과

| 구분   | 분석방법    | 분석결과(단위 : mg/m <sup>3</sup> ) |        |        |        |        |        |        |
|------|---------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      |         | 시료1                           | 시료2    | 시료3    | 시료4    | 시료5    | 시료6    | 평균     |
| 사업장3 | ICP법    | 0.0013                        | 0.0015 | 0.0015 | 0.0009 | 0.0010 | 0.0010 | 0.0012 |
|      | IC-UVD법 | 0.0001                        | 0.0003 | 0.0004 | 불검출    | 0.0001 | 0.0002 | 0.0002 |
| 사업장4 | ICP법    | 0.0009                        | 0.0011 | 0.0014 | 0.0017 | 0.0015 | 0.0020 | 0.0014 |
|      | IC-UVD법 | 0.0014                        | 0.0017 | 0.0015 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0016 | 0.0014 |
| 사업장5 | ICP법    | 0.0004                        | 0.0005 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0004 | 0.0004 |
|      | IC-UVD법 | 불검출                           | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    |
| 사업장6 | ICP법    | 0.0001                        | 0.0001 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 | 0.0002 |
|      | IC-UVD법 | 불검출                           | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    | 불검출    |

## 나) 도장 공정

사업장7의 스프레이도장 공정은 pigment yellow34(크롬산납)가 0~1%포함된 UT6581-A-N7.0 등의 페인트로 스프레이도장을 하는 곳으로, 도장주변에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 크롬산연(as Cr)이 분석 평균이 0.00009 mg/m<sup>3</sup>으로, 크롬산연(as Pb)은 0.00009 mg/m<sup>3</sup>으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 평가되었다.

사업장8의 스프레이도장 공정은 pigment yellow34(크롬산납)가 17~27% 함유된 소부에나멜(상도) DNM-103(황색) 등을 사용하여 제품에 도장을 하는 곳으로, 공정 주변에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 크롬산연(as Cr) 평균이 0.00025 mg/m<sup>3</sup>으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 평가되었다.

〈표 III-39〉 페인트도장사업장 실태조사 결과

| 구분   | 분석방법            | 분석결과(단위 : mg/m <sup>3</sup> ) |         |         |         |         |         | 평균      |
|------|-----------------|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|      |                 | 시료1                           | 시료2     | 시료3     | 시료4     | 시료5     | 시료6     |         |
| 사업장7 | ICP법<br>(as Cr) | 0.00010                       | 0.00009 | 0.00009 | 0.00008 | 0.00013 | 0.00006 | 0.00009 |
|      | IC-UVD법         | 불검출                           | 불검출     | 불검출     | 불검출     | 불검출     | 불검출     | 불검출     |
| 사업장8 | ICP법<br>(as Cr) | 0.00022                       | 0.00018 | 0.00029 | 0.00024 | 0.00032 | 0.00024 | 0.00025 |
|      | IC-UVD법         | 불검출                           | 불검출     | 불검출     | 불검출     | 불검출     | 불검출     | 불검출     |

## 2) 실태조사 결과

6가 크롬 취급 공정에서 크롬이 모두 6가 형태로 발생한다면 ICP를 이용한 총크롬 분석결과와 IC로 분석하는 6가 크롬의 분석결과가 동일한 수준인가를 파악하기 위한 이번 실태조사 결과는 아래와 같다.

〈표 III-40〉 사업장별 크롬 평균 농도 (단위: mg/m<sup>3</sup>)

| 구분   | 용접     |        | 도금     |        |        |        | 스프레이도장  |         |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|      | 사업장1   | 사업장2   | 사업장3   | 사업장4   | 사업장5   | 사업장6   | 사업장7    | 사업장8    |
| ICP법 | 0.0027 | 0.0004 | 0.0012 | 0.0014 | 0.0004 | 0.0002 | 0.00009 | 0.00025 |
| IC법  | 0.0006 | 불검출    | 0.0002 | 0.0014 | 불검출    | 불검출    | 불검출     | 불검출     |

총크롬 분석법인 ICP로 측정한 결과와 6가 크롬 분석법인 IC로 분석한 결과의 평균을 비교하면 사업장4만 동일하고 모두 총크롬이 더 많이 평가되었다. 총크롬은 0.0004~0.0027 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었고, 6가크롬은 불검출~0.0014 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었다.

철강용접자의 크롬 및 망간 노출평가와 산업위생관리 대책에 관한 연구(이영세, 1999)에서 용접흡 중의 총 크롬 대비 6가 크롬의 농도비 CO<sub>2</sub> 아크용접에서는 스테인레스강을 SUS309 용접봉으로 용접할 때 총 크롬이 7.294 mg/m<sup>3</sup>으로 가장 많이 발생하였으나 총 크롬 대비 6가 크롬 비는 오히려 연강 용접시의 발생비 93.9~96.8% 보다 훨씬 적은 수준으로 19.2%가 발생하였으며 통계적 검정결과 유의한 차이가 있다고 밝힌 것처럼 다양한 용접방법과 작업상황에 따라 총크롬 대비 6가 크롬의 비는 달라져 총크롬과 차이가 있는 것으로 보인다.

유해화학물질 취급 사업장 작업환경개선 연구 유해화학물질 취급 사업장 작업환경개선 연구- 도금공정에서 발생된 공기중 크롬의 산화환원 특성에 관

한 연구(안전보건공단, 2000)에서 도금 업체에서 사용되고 있는 크롬 화합물은  $\text{CrO}_3$ 로서 6가 크롬이지만 공기중에는 다른 산화상태의 크롬이 존재하는 것으로 나타났다. 총크롬에 대한 6가 크롬 농도 비는 0.41로 공기 중 존재하는 전체 크롬 중에서 약 40%만이 6가 크롬이었다라고 밝혔다.

이번 실태조사에서 도금공정 사업장3~5의 결과가 어떤 경향을 띠지는 못하지만 공정의 환경에 따라 산화환원의 특성이 다양하게 이루어져 6가 크롬이 발생한 후 3가로 환원되는 등의 변화가 유기적으로 일어나 총크롬과 6가 크롬양의 차이가 발생한 것으로 파악된다.

스프레이도장공정은 크롬산납이 함유한 페인트를 사용하고 있었으며 페인트내 안료상태로 크롬이 비교적 안정한 조건에서 산화환원의 과정을 거치지 않을 것으로 예상하였지만 그 결과는 굉장히 낮은 농도이지만 총크롬은  $0.00009\sim 0.00025 \text{ mg/m}^3$ 이었고 6가 크롬은 불검출이었다.

대기 중에서 6가 크롬은 vanadium( $\text{V}^{2+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{VO}_2^+$ ),  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{HSO}_3^-$  및  $\text{AS}^{3+}$  등의 환원 물질에 의해 유의한 속도로 환원될 수 있다. 공기 중에서 6가 크롬은 3가보다 불안정하여 무기 또는 유기 환원성 물질 또는 산성조건에서 환원되며 대기환경과 유사한 조건의 실험환경에서 6가 크롬의 반감기는 13시간으로 보고된 바 있다.(유해화학물질 취급 사업장 작업환경개선 연구 유해화학물질 취급 사업장 작업환경개선 연구- 도금공정에서 발생된 공기중 크롬의 산화환원 특성에 관한 연구(안전보건공단, 2000)) 6가 크롬의 이러한 불안정한 성질은 스프레이로 공기 중 분무됨으로써 공정의 환경조성에 따라 산화환원되어 농도가 낮아지는 것으로 추측된다.

## 4. 국내 크롬 및 그 화합물 노출기준 개정안

### 1) 노출기준 개정안

본 연구진이 제안하는 개정안 3가지는 아래와 같이 요약될 수 있다. 6가 크롬 화합물의 종류에 상관없이 독성이 동일한 것으로 보고되고 있으며, 건강 영향이 없는 수준은 ACGIH TLV 수준인 0.0002 mg/m<sup>3</sup>으로 여러 문헌에 보고되고 있다.

〈표 Ⅲ-41〉 크롬 및 그 화합물 노출기준 개정안

| 크롬 및 그 화합물      | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |        |       |       |        | 참고사항                         |        |        |
|-----------------|--------------------------|--------|-------|-------|--------|------------------------------|--------|--------|
|                 | 고용노동부                    | ACGIH  | 개정안 ① | 개정안 ② | 개정안 ③  |                              |        |        |
| 크롬광 가공 (크롬산)    | 0.05                     | 0.0002 | 0.01  | 0.005 | 0.0002 | 6가 크롬으로 통합<br><br>6가 크롬으로 분석 |        |        |
| 크롬(6가)화합물 (불용성) | 0.01                     |        |       |       |        |                              |        |        |
| 크롬(6가)화합물 (수용성) | 0.05                     |        |       |       |        |                              |        |        |
| 크롬산 연           | 0.012                    |        |       |       |        |                              |        |        |
| 크롬산 아연          | 0.01                     |        |       |       |        |                              |        |        |
| 스트론튬 크로메이트      | 0.0005                   |        |       |       |        |                              | 0.0005 | 0.0005 |
| 칼슘 크로메이트        | 0.001                    |        |       |       |        |                              | 0.001  | 0.001  |

| 크롬 및 그 화합물 | 노출기준(mg/m <sup>3</sup> ) |       |       |       |       | 참고사항                      |
|------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|
|            | 고용노동부                    | ACGIH | 개정안 ① | 개정안 ② | 개정안 ③ |                           |
| 크롬 (금속)    | 0.5                      | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 3가 크롬으로 통합<br><br>크롬으로 분석 |
| 크롬(2가)화합물  | 0.5                      | -     |       |       |       |                           |
| 크롬(3가)화합물  | 0.5                      | 0.003 |       |       |       |                           |
| 삼부틸크롬산     | C 0.1                    | C 0.1 | C 0.1 | C 0.1 | C 0.1 | 노출기준 유지                   |

#### (1) 개정안 ①

6가 크롬의 노출기준을 수용성, 불용성, 크롬광 가공, 그 외 6가 크롬 화합물로 구분하지 않고 통합하여 크롬(6가)화합물(불용성) 수준인 0.01 mg/m<sup>3</sup>으로 노출기준 통합하고 그 외 크롬(금속) 및 크롬(3가)화합물 등은 유지하는 안이다. 이 수준보다 낮은 노출기준을 가진 6가 크롬인 스트론티움 크로메이트와 칼슘 크로메이트는 현재 수준을 유지한다. 이 두 물질에 대한 노출기준은 각각 2008년 및 2018년에 추가되어 최신 독성자료들이 반영되어 있다고 볼 수 있다.

#### (2) 개정안 ②

개정안 ①처럼 노출기준을 통합하되 그 수준을 OSHA의 노출기준인 0.005 mg/m<sup>3</sup>으로 낮춘 후 4년의 적용유예기간을 가진다. 이 수준보다 낮은 노출기준을 가진 6가 크롬인 스트론티움 크로메이트와 칼슘 크로메이트는 현재 수

준을 유지한다. 이 두 물질에 대한 노출기준은 각각 2008년 및 2018년에 추가되어 최신 독성자료들이 반영되어 있다고 볼 수 있다.

### (3) 개정안 ③

개정안 ①처럼 노출기준을 통합하되 그 수준을 ACGIH의 노출기준인 0.0002 mg/m<sup>3</sup>으로 낮춘 후 5년의 적용유예기간을 가진다. 이렇게 되는 경우 크롬(3가)화합물을 제외한 모든 노출기준이 ACGIH TLV와 동일하게 된다.

## 2) 노출기준 설정 근거 및 고려사항

### (1) 독성학적 설정 근거

6가 크롬 화합물의 종류에 상관없이 독성이 동일한 것으로 보고되고 있으며, 건강영향이 없는 수준은 ACGIH TLV 수준인 0.0002 mg/m<sup>3</sup>으로 여러 문헌에 보고되고 있으나, 기술적으로 성취하기 어려울 수 있으며, OSHA도 노출기준 개정 후 4년간의 적용유예기간을 가졌다.

### (2) 기타 고려사항

노출기준이 낮아지면서 시료 분석방법의 민감도에 대한 고려가 필요하다. 3가 크롬의 경우 기존 노출기준을 유지하기 때문에 문제가 되지 않는다. 원자흡광광도계법을 사용하는 크롬 분석방법의 검출한계는 0.06 µg/sample이다. 최소 6시간 동안 2.0 lpm으로 시료를 채취하는 경우 흡인되는 공기의 양은 720 리터이며, 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 10배로 계산할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 0.0008 mg/m<sup>3</sup>으로 기본 장비를 그대로 사용하는 것

에 문제 없다.

6가 크롬의 경우 모두 6가 크롬으로 가정하고 총크롬으로 분석하는 방법과 6가 크롬 이온을 분석하는 두 가지 측정방법이 있다. 6가 크롬 노출기준이  $0.005 \text{ mg/m}^3$  또는  $0.0002 \text{ mg/m}^3$ 로 기존의 1/2(개정안 ②) 또는 1/50(개정안 ③)로 낮아지는 경우 분석이 어려워질 수 있다.

본 연구에서 사용한 두 분석방법의 검출한계는 ICP가  $0.4 \mu\text{g/sample}$ 이고 IC가  $0.02 \mu\text{g/sample}$ 이다. 최소 6시간 동안  $2.0 \text{ lpm}$ 으로 시료를 채취하는 경우 흡인되는 공기의 양은 720 리터이며, 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 10배로 계산할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 각각  $0.0056 \text{ mg/m}^3$  및  $0.00028 \text{ mg/m}^3$ 이 되어 IC를 사용하는 경우 개정안 ②의 적용은 문제 없지만 개정안 ③의 적용은 현실적으로 제한될 수 있다. ICP를 사용하는 경우 개정안 ②와 ③ 모두에서 문제가 생길 수 있다. 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 3배로 계산할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 낮아진다. 위험성평가 제도에서 노출수준을 구분하는 기준 중 하나가 노출기준의 10%인 것을 감안하면 새로운 노출기준이 적용되는 경우 검출한계 이하 농도에서는 위험성평가 제도의 시행에 문제가 생길 수 있다.

### (3) 개정안의 실태조사 적용

제안된 개정안을 실태조사된 자료에 적용했을 때 노출기준 초과비율을 계산하면 개정안 ③의 경우 전체적으로 51.0%의 초과비율이 발생한다. 개정안 ②의 경우 초과하는 시료가 사업장1에서 1개이지만, 노출기준의 절반을 초과하는 시료는 사업장1에서 3개이고 다른 사업장에서는 없었다.

〈표 Ⅲ-42〉 6가 크롬 노출기준 개정안 실태조사 적용 시 노출기준 초과비율

| 사업장<br>번호 | 공정<br>구분 | 노출기준 초과비율(%) |       |       | 참고사항  |
|-----------|----------|--------------|-------|-------|---|
|           |          | 개정안 ①        | 개정안 ② | 개정안 ③ |   |
| 1         | 용접       | 0.0          | 8.3   | 66.7  | ICP법 및<br>IC-UVD<br>법 분석<br>시료<br>통합하여<br>사업장당<br>12개의<br>시료 채취 |
| 2         |          | 0.0          | 0.0   | 50.0  |   |
| 3         | 도금       | 0.0          | 0.0   | 75.0  |   |
| 4         |          | 0.0          | 0.0   | 100.0 |   |
| 5         |          | 0.0          | 0.0   | 50.0  |   |
| 6         |          | 0.0          | 0.0   | 25.0  |   |
| 7         | 도장       | 0.0          | 0.0   | 0.0   |   |
| 8         |          | 0.0          | 0.0   | 41.7  |   |
| 전체        |          | 0.0          | 1.0   | 51.0  |   |

## 5. 사회경제성 평가

### 1) 규제영향 분석 절차 및 내용

새로운 규제를 신설하거나 강화하는 경우 중앙행정기관의 장은 행정규제기본법 제7조에 따라 규제영향분석서를 작성하여야 하며, 규제의 신설 또는 강화의 필요성, 규제 목적의 실현 가능성, 피규제 집단과 국민이 부담하는 비용과 편익 분석 등을 작성토록 하고 있다. 또한 고용노동부에서는 화학물질의 유해성·위험성 평가에 관한 규정 제17조(사회성·경제성 평가 대상)를 통해서 화학물질의 유해성 및 노출에 따른 위험성이 상당하여 적절한 관리가 필요한 화학물질에 대하여 사회성·경제성을 평가하도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 크롬 및 그 화합물의 노출기준 개정을 제안하였다. 개정 방안 실행으로 야기되는 규제영향은 앞선 연구방법론에서 언급된 바와 같이 ‘시나리오 설정 → 자료조사 → 비용분석 → 편익분석 → 비용·편익 비교 및 관리수준 제안’ 순으로 진행하였다.

### 2) 규제영향 평가 결과

#### (1) 시나리오 설정

크롬 및 그 화합물에 대한 규제수준 변경에 따라서, 비용 부담자들이 준수해야 할 관리 및 조치수준이 달라지기 때문에 예상되는 규제 시나리오를 설정할 필요가 있다. 연구결과에서 언급된 규제수준은 <표 III-41>와 같이 개정안 1, 2, 3으로 구분된다. 각 개정안에서 물질별로 규제의 신설 또는 강화에 따른 규제영향평가가 필요하며, 변경이 없는 경우 평가가 필요하지 않다. 물질별 개정안 1, 2, 3에 따른 구체적인 규제 신설 또는 강화의 내용은 <표 III-43>과 같으며, 1안 2건, 2안 5건, 3안 7건이 노출기준 강화에 따른 규제영

향평가가 필요하다. 산업안전보건법 시행규칙 [별표 21, 22]에 따르면 ‘크롬 및 그 화합물’을 작업환경측정대상 유해인자, 특수건강진단 대상 유해인자로 규정하고 있고, 안전보건기준에 관한 규칙 [별표 12]에 관리대상 유해물질로 규정하고 있다. 이중 크롬 6가의 경우는 별도로 특별관리물질로 지정하고 있다. 다만, <표 III-43>의 7개 물질은 기존 규제대상 물질에 해당되므로 개정안에 따른 규제 신설은 발생하지 않는다.

<표 III-43> 개정안에 따른 규제영향평가 필요여부

| 물질명           | 현재<br>노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 규제<br>신설 | 규제<br>강화 | 규제영향평<br>가필요 | 시나리<br>오 |
|---------------|------------------------------------|-----------------------------|----------|----------|--------------|----------|
| 크롬 및<br>크롬3가  | 0.5                                | 1안 : 0.5                    | X        | X        | X            |          |
|               | 0.5                                | 2안 : 0.5                    | X        | X        | X            |          |
|               | 0.5                                | 3안 : 0.05                   | X        | O        | O            | #1       |
| 크롬광           | 0.05                               | 1안 : 0.05                   | X        | X        | X            |          |
|               | 0.05                               | 2안 : 0.005                  | X        | O        | O            | #2       |
|               | 0.05                               | 3안 : 0.0002                 | X        | O        | O            | #3       |
| 크롬6가<br>(수용성) | 0.05                               | 1안 : 0.01                   | X        | O        | O            | #4       |
|               | 0.05                               | 2안 : 0.005                  | X        | O        | O            | #5       |
|               | 0.05                               | 3안 : 0.0002                 | X        | O        | O            | #6       |
| 크롬6가<br>(불용성) | 0.01                               | 1안 : 0.01                   | X        | X        | X            |          |
|               | 0.01                               | 2안 : 0.005                  | X        | O        | O            | #7       |
|               | 0.01                               | 3안 : 0.0002                 | X        | O        | O            | #8       |
| 크롬산 아연        | 0.01                               | 1안 : 0.01                   | X        | X        | X            |          |
|               | 0.01                               | 2안 : 0.005                  | X        | O        | O            | #9       |
|               | 0.01                               | 3안 : 0.0002                 | X        | O        | O            | #10      |
| 스트론튬<br>크로메이트 | 0.0005                             | 1안 : 0.0005                 | X        | X        | X            |          |
|               | 0.0005                             | 2안 : 0.0005                 | X        | X        | X            |          |
|               | 0.0005                             | 3안 : 0.0002                 | X        | O        | O            | #11      |

| 물질명   | 현재<br>노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 규제<br>신설 | 규제<br>강화 | 규제영향평<br>가필요 | 시나리<br>오 |
|-------|------------------------------------|-----------------------------|----------|----------|--------------|----------|
| 크롬산 연 | 0.012                              | 1안 : 0.01                   | X        | ○        | ○            | #12      |
|       | 0.012                              | 2안 : 0.005                  | X        | ○        | ○            | #13      |
|       | 0.012                              | 3안 : 0.0002                 | X        | ○        | ○            | #14      |

## (2) 자료조사

### 가) 크롬 및 그 화합물 관련 국내법 검토

크롬 및 그 화합물과 관련된 국내법 조항을 살펴본 결과, 산업안전보건법외에 환경보건법, 어린이제품법, 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률 등에 규제내용이 담겨있다. 다만 환경보건법, 어린이제품법, 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률은 크로뮴(+6) 화합물에 대한 사용 제한의 내용을 규정하고 있으며, 페인트 관련 산업에서 이미 사용 저감이 이루어지고 있어 대체물질·기술 적용 등에 따른 사회경제적 비용보다 흡입·경피노출 및 수계·토양 환경 노출로 인한 인체건강과 환경비용 절감편익이 높다고 분석된 바 있다(환경부, 2021). 따라서 이번 연구에서는 노출기준 개정으로 발생할 수 있는 산업안전보건법상 피규제자의 부담항목에 대하여 파악하였고, 그 결과는 <표 III-44>과 같다.

**<표 III-44> 비용항목과 관련된 산업안전보건법 조항**

| 비용항목               | 법조항             | 내용  |
|--------------------|-----------------|---|
| 국소배기장치 설치 및 유지관리비용 | 산업안전보건기준에 관한 규칙 | 제422조(관리대상 유해물질과 관계되는 설비) 사업주는 근로자가 실내작업장에서 관리대상 유해물질을 취급하는 업무에 종사하는 경우에 그 작업장에 관리대상 유해물질의 가스·증기 또는 분진의 발산원을 밀폐하는 설비 또는 국소배기장치를 설치하여야 한다. |

| 비용항목                  | 법조항             | 내용   |
|-----------------------|-----------------|--|
| 보호구 및 보호복 지급 및 유지관리비용 | 산업안전보건기준에 관한 규칙 | 제450조(호흡용 보호구의 지급 등)<br>- 생략 -   |
| 유해위험방지계획서 작성비용        | 산업안전보건법         | 제42조(유해위험방지계획서의 작성·제출 등) ① 사업주는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 이 법 또는 이 법에 따른 명령에서 정하는 유해·위험 방지에 관한 사항을 적은 계획서(이하 “유해위험방지계획서”라 한다)를 작성하여 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 고용노동부장관에게 제출하고 심사를 받아야 한다. - 중략 -<br>2. 유해하거나 위험한 작업 또는 장소에서 사용하거나 건강장해를 방지하기 위하여 사용하는 기계·기구 및 설비로서 대통령령으로 정하는 기계·기구 및 설비를 설치·이전하거나 그 주요 구조부분을 변경하려는 경우. - 이하 생략 - |
| 특별안전·보건교육 비용          | 산업안전보건법         | 제29조(근로자에 대한 안전보건교육) - 중략 -<br>③ 사업주는 근로자를 유해하거나 위험한 작업에 채용하거나 그 작업으로 작업내용을 변경할 때에는 제2항에 따른 안전보건교육 외에 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 유해하거나 위험한 작업에 필요한 안전보건교육을 추가로 하여야 한다. - 이하 생략 -   |
| 작업환경측정비용              | 산업안전보건법         | 제125조(작업환경측정) ① 사업주는 유해인자로부터 근로자의 건강을 보호하고 쾌적한 작업환경을 조성하기 위하여 인체에 해로운 작업을 하는 작업장으로서 고용노동부령으로 정하는 작업장에 대하여 고용노동부령으로 정하는 자격을 가진 자로 하여금 작업환경측정을 하도록 하여야 한다. - 이하 생략 -   |

| 비용항목     | 법조항     | 내용  |
|----------|---------|---|
| 특수건강진단비용 | 산업안전보건법 | 제130조(특수 건강진단 등) ① 사업주는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 근로자의 건강관리를 위하여 건강진단(이하 “특수건강진단”이라 한다)을 실시하여야 한다. 다만, 사업주가 고용노동부령으로 정하는 건강진단을 실시한 경우에는 그 건강진단을 받은 근로자에 대하여 해당 유해인자에 대한 특수건강진단을 실시한 것으로 본다. - 이하 생략 - |

#### 나) 노출기준 초과사업장 추정

개정안 1, 2, 3에서 노출기준이 강화된 경우 작업환경측정시 노출기준 초과에 따른 규제 비용이 발생할 수 있다. 최근 작업환경측정결과를 토대로 추정한 노출기준 초과 사업장수는 <표 III-45>과 같다.

**<표 III-45> 노출기준 강화로 인한 초과 사업장수(추정)**

| 물질명           | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 노출기준 초과<br>추정 사업장수 | 시나리오 |
|---------------|-----------------------------|--------------------|------|
| 크롬 및 크롬3가     | 1안 : 0.5                    | -                  |      |
|               | 2안 : 0.5                    | -                  |      |
|               | 3안 : 0.05                   | 1,655              | #1   |
| 크롬광           | 1안 : 0.05                   | -                  |      |
|               | 2안 : 0.005                  | -                  | #2   |
|               | 3안 : 0.0002                 | 2                  | #3   |
| 크롬6가<br>(수용성) | 1안 : 0.01                   | 54                 | #4   |
|               | 2안 : 0.005                  | 121                | #5   |
|               | 3안 : 0.0002                 | 1,089              | #6   |
| 크롬6가<br>(불용성) | 1안 : 0.01                   | -                  |      |
|               | 2안 : 0.005                  | 25                 | #7   |
|               | 3안 : 0.0002                 | 1,397              | #8   |

| 물질명           | 개정안<br>(mg/m³) | 노출기준 초과<br>추정 사업장수 | 시나리오 |
|---------------|----------------|--------------------|------|
| 크롬산 아연        | 1안 : 0.01      | -                  |      |
|               | 2안 : 0.005     | -                  | #9   |
|               | 3안 : 0.0002    | 14                 | #10  |
| 스트론튬<br>크로메이트 | 1안 : 0.0005    | -                  |      |
|               | 2안 : 0.0005    | -                  |      |
|               | 3안 : 0.0002    | 1                  | #11  |
| 크롬산 연         | 1안 : 0.01      | 3                  | #12  |
|               | 2안 : 0.005     | 5                  | #13  |
|               | 3안 : 0.0002    | 63                 | #14  |

다) 사업장당 비용항목

최상준 등(2019)의 연구에서는 김태운 등(2014)의 사업장당 2014년 시점 비용을 법적용 예상 시점으로 할인율을 적용하여 환산한 바 있다. 마찬가지로 본 연구에서는 연구년도로 부터 2년 후인 2024년 시점으로 비용을 환산하였고 결과는 <표 III-46>과 같다. 미래시점의 화폐가치를 현재 시점으로 환산하기 위한 할인율은 기존의 연구에서 활용한 5.5%, 3%를 활용하였고, 분석기간은 만성적 건강영향을 고려하여 30년으로 설정하였다. 비용 항목중에서 노출 기준을 초과하는 사업장의 경우는 국소배기장치 설치 및 유지관리비용과 유해위험방지계획서 작성비용이 추가로 발생할 수 있다.

<표 III-46> 사업장당 비용 환산(분석기간 30년)

| 비용 항목                | 2014년 시점 사업장당<br>총비용(단위:원) |             | 2024년 시점 사업장당<br>총비용(단위:원) |             |
|----------------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|                      | 할인율 5.5%                   | 할인율 3%      | 할인율 5.5%                   | 할인율 3%      |
| 국소배기장치 설치<br>및 유지관리비 | 325,634,856                | 365,741,898 | 556,231,375                | 491,526,527 |
| 밀폐설비 설치 및            | 253,577,982                | 296,245,852 | 433,147,825                | 398,129,653 |

| 비용 항목                                       | 2014년 시점 사업장당<br>총비용(단위:원) |             | 2024년 시점 사업장당<br>총비용(단위:원) |             |
|---|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|
|   | 할인율 5.5%                   | 할인율 3%      | 할인율 5.5%                   | 할인율 3%      |
| 유지관리비                                       |                            |             |                            |             |
| 보호복 및 보호구<br>지급비용                           | 93,812,162                 | 122,348,948 | 160,244,725                | 164,426,755 |
| 세척시설 및 용기<br>등 관리비용                         | 206,254,314                | 271,566,450 | 352,312,163                | 364,962,600 |
| 유해위험방지계획<br>서 작성비용                          | 16,491,546                 | 16,491,546  | 28,169,943                 | 22,163,259  |
| 특별안전보건교육<br>비용                              | 323,685,553                | 426,183,263 | 552,901,684                | 572,754,668 |
| 작업환경측정 평균<br>비용(면제 또는<br>횡수조정 대상이<br>아닌 경우) | 84,594,024                 | 111,152,564 | 144,498,813                | 149,379,751 |
| 작업환경측정 평균<br>비용(면제 또는<br>횡수조정 대상인<br>경우)    | 29,142,641                 | 38,292,058  | 49,779,841                 | 51,461,324  |
| 특수건강진단 비용                                   | 85,771,208                 | 112,676,605 | 146,509,614                | 151,427,935 |
| 특별관리물질<br>취급일지 작성비                          | 2,995,829                  | 3,702,671   | 5,117,309                  | 4,976,080   |
| 특별관리물질<br>고지비용                              | 2,995,829                  | 3,702,671   | 5,117,309                  | 4,976,080   |

마) 노출인구수

크롬 및 그 화합물 각각의 물질들에 대해서 이미 작업환경측정제도가 시행되고 있었으므로, 과거 작업환경측정 자료를 통해 노출되는 인구수를 확인하였다<표 III-47>.

<표 III-47> 크롬 및 그 화합물 형태별 노출 인구수

| 물질명           | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 노출 인구수 | 시나리오 |
|---------------|-----------------------------|--------|------|
| 크롬 및 크롬3가     | 1안 : 0.5                    | -      |      |
|               | 2안 : 0.5                    | -      |      |
|               | 3안 : 0.05                   | 80,635 | #1   |
| 크롬광           | 1안 : 0.05                   | -      |      |
|               | 2안 : 0.005                  | -      | #2   |
|               | 3안 : 0.0002                 | 56     | #3   |
| 크롬6가<br>(수용성) | 1안 : 0.01                   | 1,673  | #4   |
|               | 2안 : 0.005                  | 3,691  | #5   |
|               | 3안 : 0.0002                 | 43,423 | #6   |
| 크롬6가<br>(불용성) | 1안 : 0.01                   | -      |      |
|               | 2안 : 0.005                  | 152    | #7   |
|               | 3안 : 0.0002                 | 25,013 | #8   |
| 크롬산 아연        | 1안 : 0.01                   | -      |      |
|               | 2안 : 0.005                  | -      | #9   |
|               | 3안 : 0.0002                 | 338    | #10  |
| 스트론튬<br>크로메이트 | 1안 : 0.0005                 | -      |      |
|               | 2안 : 0.0005                 | -      |      |
|               | 3안 : 0.0002                 | 74     | #11  |
| 크롬산 연         | 1안 : 0.01                   | 79     | #12  |
|               | 2안 : 0.005                  | 99     | #13  |
|               | 3안 : 0.0002                 | 414    | #14  |

바) 통계적 인간생명가치(VSL) 및 건강장해 회피 지불의사금액(WTP)

신영철 등(2019)은 화학물질 관리를 위한 사회경제성 분석 기반 구축(III) 연구에서 화학물질 규제를 통해 얻는 편익으로서 조기사망감소 편익을 산출하기 위한 통계적 인간생명가치(VSL) 및 화학물질로 인한 건강장해를 회피하기 위한 지불의사금액(WTP, Willingness To Pay) 등의 자료를 제안한 바 있다. 2019년 시점 자료를 법 적용 예상 시점인 2024년 시점으로 편익을 환산할 필요가 있고, 결과는 <표 III-48, 49>와 같다. 기존의 연구에서 할인율을 5.5%, 3%로 활용하였으므로, 물가상승률 5.5%, 3%를 활용하여 2019년으로부터 5년 후의 화폐가치를 환산하였다.

<표 III-48> VSL의 미래시점 환산

| 구분          | 2019년 시점<br>VSL<br>(단위:백만원) | 2024년 시점<br>VSL(단위:백만원) |             | 비고                            |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------------|
|             |                             | 물가상승률<br>5.5%           | 물가상승률<br>3% |                               |
| 하한값         | 1,333                       | 1,742                   | 1,545       | 국내 기존 VSL의<br>메타회귀분석 대푯값      |
| 화학물질-<br>만성 | 2,533                       | 3,311                   | 2,936       | 화학물질-만성위험                     |
| 화학물질-<br>급성 | 3,740                       | 4,888                   | 4,336       | 화학물질-급성위험                     |
| 상한값         | 5,145                       | 6,724                   | 5,964       | 미국 EPA 및 ECHA<br>사용값 편익이전 평균값 |

〈표 III-49〉 WTP의 미래시점 환산

| 구분       |           | 2019년 시점<br>WTP(단위:<br>원/년) | 2024년 시점<br>WTP(단위:원/년) |             |
|----------|-----------|-----------------------------|-------------------------|-------------|
|          |           |                             | 물가상승률<br>5.5%           | 물가상승률<br>3% |
| 인간<br>건강 | 발암성       | 37,004                      | 48,363                  | 42,898      |
|          | 잠재건강      | 30,986                      | 40,497                  | 35,921      |
|          | 생식영향      | 10,438                      | 13,642                  | 12,101      |
|          | 발달영향      | 9,195                       | 12,017                  | 10,660      |
|          | 호흡기/심혈관   | 11,353                      | 14,838                  | 13,161      |
| 환경<br>생태 | 잔류성       | 23,990                      | 31,354                  | 27,811      |
|          | 생물농축성     | 20,372                      | 26,625                  | 23,617      |
|          | 환경영향      | 21,488                      | 28,084                  | 24,910      |
|          | 수계영향      | 7,841                       | 10,248                  | 9,090       |
|          | 대기영향      | 7,070                       | 9,240                   | 8,196       |
|          | 토양영향      | 6,577                       | 8,596                   | 7,625       |
|          | 인간외의 생물영향 | 17,517                      | 22,894                  | 20,307      |

(3) 비용분석

노출기준 개정안에 따라 초과하는 사업장의 경우 〈표 III-46〉에 따른 국소 배기장치 설치 및 유지관리비, 유해위험방지계획서 작성비용이 추가된다. 따라서 각 시나리오에 따라 추가되는 사회적 총비용은 아래 식에 의해 추산되었다.

- 시나리오에 따라 추가되는 사회적 총 비용 = (국소배기장치 설치 및 유지관리비 + 유해위험방지계획서 작성비용) × 초과 사업장수

개정안에 따라 규제영향 분석이 필요한 시나리오는 총 14개로서 시나리오 별 사회적 총비용은 <표 Ⅲ-50>과 같이 산출될 수 있다.

〈표 III -50〉 시나리오별 사회적 총비용(분석기간 30년)

| 시나리오 | 물질명       | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 사업장당 추가비용 (원)                                  | 초과 사업장수 | 사회적 총비용 (원)  |
|------|-----------|------------------------------|--------------------------|--|---------|--|
| #1   | 크롬 및 크롬3가 | 0.5                          | 3안 : 0.05                | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 1,655   | 할인율(5.5%): 967,184,180,682<br>할인율(3%): 850,156,596,036 |
| #2   | 크롬광       | 0.05                         | 2안 : 0.005               | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | -       | 할인율(5.5%): 0<br>할인율(3%): 0                             |
| #3   | 크롬광       | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 2       | 할인율(5.5%): 1,168,802,635<br>할인율(3%): 1,027,379,572     |

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 사업장당 추가비용 (원)                                  | 초과 사업장수 | 사회적 총비용 (원)  |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|--|---------|--|
| #4   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 1안 : 0.01                | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 54      | 할인율(5.5%): 31,557,671,152<br>할인율(3%): 27,739,248,451   |
| #5   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 2안 : 0.005               | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 121     | 할인율(5.5%): 70,712,559,434<br>할인율(3%): 62,156,464,121   |
| #6   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 1,089   | 할인율(5.5%): 636,413,034,902<br>할인율(3%): 559,408,177,090 |

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 사업장당 추가비용 (원)                                  | 초과 사업장수 | 사회적 총비용 (원)  |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|--|---------|--|
| #7   | 크롬6가 (불용성) | 0.01                         | 2안 : 0.005               | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 25      | 할인율(5.5%): 14,610,032,941<br>할인율(3%): 12,842,244,653   |
| #8   | 크롬6가 (불용성) | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 1,397   | 할인율(5.5%): 816,408,640,733<br>할인율(3%): 717,624,631,216 |
| #9   | 크롬산 아연     | 0.01                         | 2안 : 0.005               | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | -       | 할인율(5.5%): 0<br>할인율(3%): 0                             |

| 시나리오 | 물질명                    | 현재<br>노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 사업장당 추가비용<br>(원)                                  | 초과<br>사업장수 | 사회적 총비용<br>(원)   |
|------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---|------------|--|
| #10  | 크롬산<br>아연              | 0.01                               | 3안 : 0.0002                 | 할인율(5.5%):<br>584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 14         | 할인율(5.5%):<br>8,181,618,447<br>할인율(3%):<br>7,191,657,006 |
| #11  | 스트론티<br>움<br>크로메이<br>트 | 0.0005                             | 3안 : 0.0002                 | 할인율(5.5%):<br>584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 1          | 할인율(5.5%): 584,401,318<br>할인율(3%):<br>513,689,786        |
| #12  | 크롬산 연                  | 0.012                              | 1안 : 0.01                   | 할인율(5.5%):<br>584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 3          | 할인율(5.5%):<br>1,753,203,953<br>할인율(3%):<br>1,541,069,358 |

| 시나리오 | 물질명   | 현재<br>노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 사업장당 추가비용<br>(원)                                  | 초과<br>사업장수 | 사회적 총비용<br>(원)   |
|------|-------|------------------------------------|-----------------------------|---|------------|--|
| #13  | 크롬산 연 | 0.012                              | 2안 : 0.005                  | 할인율(5.5%):<br>584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 5          | 할인율(5.5%):<br>2,922,006,588<br>할인율(3%):<br>2,568,448,931   |
| #14  | 크롬산 연 | 0.012                              | 3안 : 0.0002                 | 할인율(5.5%):<br>584,401,318<br>할인율(3%): 513,689,786 | 63         | 할인율(5.5%):<br>36,817,283,011<br>할인율(3%):<br>32,362,456,526 |

#### (4) 편익분석

시나리오 #1~#14에서 노출기준 개정을 통해 얻을 수 있는 건강 편익은 <표 III-48>의 통계적인간생명가치(VSL, Value of Statistical Life)와 <표 III-49>의 화학물질의 건강장해를 회피하기 위한 지불의사금액(WTP, Willingness To Pay)을 이용하였고, 편익의 수혜자 수는 최근 작업환경측정자료를 통해 파악하였다.

##### 가) VSL을 활용한 편익 분석

1인당 VSL은 <표 III-48>와 같이 신영철 등(2019)이 제시한 값을 법적용 예상시점인 2024년 기준으로 환산하였다. 만성적인 건강장해를 감안하여 분석기간을 30년으로 설정하였고, 할인율은 5.5%와 3%를 적용하였다. 한편 신영철 등(2019)에 의하면 화학물질별 초과발암위해도를 근거로 연간 위해저감 인구수를 구하고, 이 인구수에 VSL값을 곱하여 편익을 산정하는 방안을 제시하고 있다. 다만, 이 자료에는 크롬의 직업적 노출에 의한 초과발암위해도가 제시되고 있지 않아서, 2006년 OSHA가 Federal Register에서 크롬6가에 대한 노출기준을 개정하면서 밝힌 1,000명당 초과폐암사망자수 예측값 자료를 활용하였다<표 III-51>.

**<표 III-51> Expected Excess Lung Cancer Deaths per 1,000 Workers(OSHA, 2006)**

| Cr(VI)Concentration, ug/m3 |    | 20-year Exposure | 45-year Exposure |
|----------------------------|----|------------------|------------------|
| Previous PEL               | 52 | 43-198           | 101-351          |
|                            | 20 | 17-83            | 41-164           |
|                            | 10 | 9-43             | 21-86            |

| Cr(VI)Concentration, ug/m3 |      | 20-year Exposure | 45-year Exposure |
|----------------------------|------|------------------|------------------|
| New PEL                    | 5.0  | 4.3-22           | 10-45            |
|                            | 1.0  | 0.85-4.4         | 2.1-9.1          |
|                            | 0.5  | 0.43-2.2         | 1.1-4.6          |
|                            | 0.25 | 0.21-1.1         | 0.53-2.3         |

이 자료에서는 주어진 농도에서 노출되는 기간이 절반으로 줄어들게 되면 초과위험이 약 절반으로 줄어드는 비례의 관계가 있음을 밝히고 있다. 따라서 이번 연구의 분석기간인 30년에 해당하는 초과발암위해도를 비례의 관계를 통해 예측하였고, 이를 통해 초과 발암위해도를 예측하였다<표 III-52>.

〈표 III-52〉 분석기간 30년에 해당하는 초과발암위해도 예측

| Cr(VI)농도 (mg/m³) |         | 30년 노출     | 30년 평균 | 30년 초과 발암위해도 |
|------------------|---------|------------|--------|--------------|
| Previous PEL     | 0.052   | 68.8-264.0 | 166.4  | 0.16639670   |
|                  | 0.020   | 27.2-110.7 | 68.9   | 0.06893195   |
|                  | 0.010   | 14.4-57.3  | 35.9   | 0.03586595   |
| New PEL          | 0.005   | 6.88-29.3  | 18.1   | 0.01810630   |
|                  | 0.001   | 1.36-5.9   | 3.6    | 0.00361326   |
|                  | 0.0005  | 0.69-2.9   | 1.8    | 0.00181063   |
|                  | 0.00025 | 0.34-1.5   | 0.9    | 0.00090132   |

이를 통해, 현재의 초과발암위해도와 개정안에 따른 초과발암위해도를 계산하고, 그 차이를 통해 편익을 계산하였다. 다음의 <표 III-53>는 각 시나리

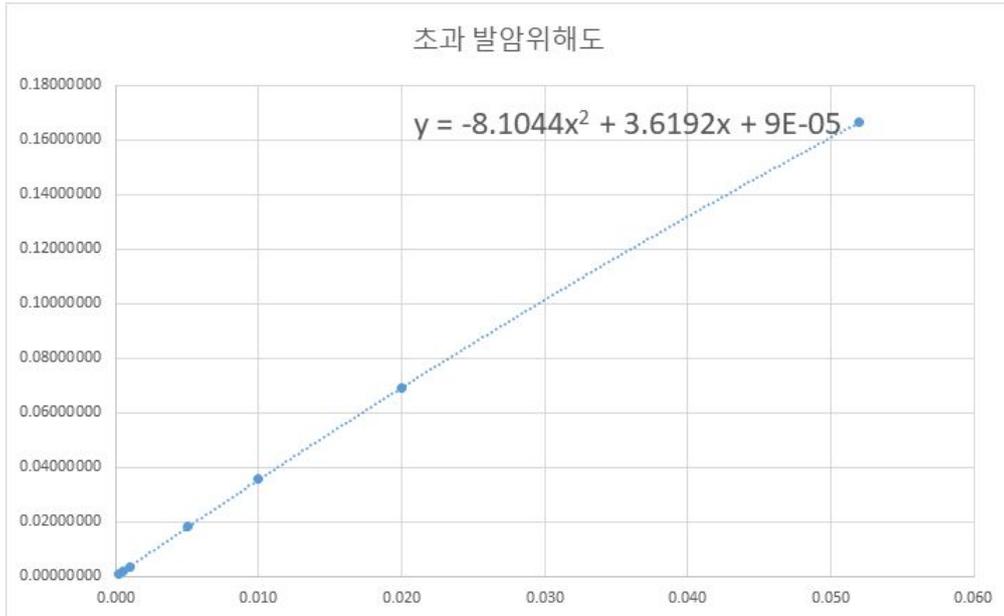
오별로 작업환경측정결과의 농도수준을 통해 파악한 현재의 초과발암위해도와, 개정안을 통해 달성하고자 하는 초과발암위해도를 나타낸다.

〈표 III-53〉 현재 및 개정안에 따른 초과발암위해도 예측

| 시나리오 | 물질명        | 현재                                |             | 개정안                       |             |
|------|------------|-----------------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
|      |            | 최근 작업환경 측정평균 (mg/m <sup>3</sup> ) | 초과발암위해도     | 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 초과발암위해도     |
| #1   | 크롬 및 크롬3가  | -                                 | 비발암성 물질     | 0.05                      | -           |
| #2   | 크롬광        | 초과 없음                             | -           | 0.005                     | -           |
| #3   | 크롬광        | 0.00066                           | 0.002475142 | 0.0002                    | 0.000813516 |
| #4   | 크롬6가 (수용성) | 0.01529                           | 0.053532888 | 0.01                      | 0.03547156  |
| #5   | 크롬6가 (수용성) | 0.01053                           | 0.037301553 | 0.005                     | 0.01798339  |
| #6   | 크롬6가 (수용성) | 0.00162                           | 0.005931835 | 0.0002                    | 0.000813516 |
| #7   | 크롬6가 (불용성) | 0.00876                           | 0.03117228  | 0.005                     | 0.01798339  |
| #8   | 크롬6가 (불용성) | 0.00100                           | 0.003701096 | 0.0002                    | 0.000813516 |
| #9   | 크롬산 아연     | 초과 없음                             | -           | 0.005                     | -           |
| #10  | 크롬산 아연     | 0.00151                           | 0.005536513 | 0.0002                    | 0.000813516 |
| #11  | 스트론튬 크로메이트 | 0.00028                           | 0.001102741 | 0.0002                    | 0.000813516 |
| #12  | 크롬산 연      | 0.01439                           | 0.050492093 | 0.01                      | 0.03547156  |
| #13  | 크롬산 연      | 0.01182                           | 0.041736659 | 0.005                     | 0.01798339  |
| #14  | 크롬산 연      | 0.00193                           | 0.007044868 | 0.0002                    | 0.000813516 |

이때 〈표 III-52〉의 데이터를 이용하여 다항방정식을 작성하였고[그림 III

-5], 이를 통해 <표 III-53>의 다양한 농도수준별 초과발암위해도를 계산하였다.



[그림 III-5] 농도수준별 초과발암위해도 다항방정식

다음의 <표 III-54, 55>는 분석기간 30년(할인율 5.5%, 3.3%)일때의 사회적 총편익을 VSL로 추정된 자료이다. 시나리오 #1, #2, #9는 비발암성물질이거나, 초과사업장이 없고 노출기준 강화로 인한 건강편익만 존재하여 사회적 총편익을 계산하지 않았다. VSL로 추정된 사회적 총편익은 다음의 식들을 통해 계산하였다.

- VSL로 추정된 사회적 총편익(분석기간 30년) = 1인당 VSL × 연간 위해저감인구수 × 할인율 계수
- 연간 위해저감인구수 = 연간 위험작업자 × 위해 저감율(%)
- 연간 위험작업자 = 노출인구수 × (현재 초과 발암위해도/30년)

- 위해 저감율(%) = (현재 초과 발암위해도-개정안 초과 발암위해도) ÷ 현재 초과 발암위해도

분석기간이 30년이므로 미래시점의 화폐가치를 현재화하기 위한 할인율 계수는 김승원 등(2021)이 제시한 할인율 5.5%일 때 15.3, 3%일 때 20.2를 사용하였다.

〈표 III-54〉 VSL로 추정된 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 5.5%)

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (ng/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (ng/m <sup>3</sup> ) | 1인당 VSL       | 노출 인구수 | 현재 초과 발암위해도 (30년) | 연간 위험 직업자 (명) | 개정안 초과 발암위해도 (30년) | 위해 저감율 (%) | 연간 위해저감인구수 (명) | (계수)30년분석 5.5% 할인율 | 사회적 총편익 (VSL)                    |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------------------|------------|----------------|--------------------|----------------------------------|
| #1   | 크롬 및 크롬3가  | 0.5                          | 3안 : 0.05                | -             | -      | -                 | -             | -                  | -          | -              | -                  | 비발암성물질로 VSL 계산하지 않음              |
| #2   | 크롬6가       | 0.05                         | 2안 : 0.005               | -             | -      | -                 | -             | -                  | -          | -              | -                  | 초과사망정이 없고, 노출기준 강화로 인한 건강 편익만 존재 |
| #3   | 크롬광        | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 3,311,000,000 | 56     | 0.002475          | 0.0046        | 0.000814           | 67.1%      | 0.0031         | 15.3               | 157,126,934                      |
| #4   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 1안 : 0.01                | 3,311,000,000 | 1,673  | 0.053533          | 2.9854        | 0.035472           | 33.7%      | 1.0072         | 15.3               | 51,024,056,266                   |
| #5   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 2안 : 0.005               | 3,311,000,000 | 3,691  | 0.037302          | 4.5893        | 0.017983           | 51.8%      | 2.3768         | 15.3               | 120,403,531,303                  |
| #6   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 3,311,000,000 | 43,423 | 0.005932          | 8.5859        | 0.000814           | 86.3%      | 7.4084         | 15.3               | 375,298,242,256                  |
| #7   | 크롬6가 (불용성) | 0.01                         | 2안 : 0.005               | 3,311,000,000 | 152    | 0.031172          | 0.1579        | 0.017983           | 42.3%      | 0.0668         | 15.3               | 3,385,175,462                    |
| #8   | 크롬6가 (불용성) | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 3,311,000,000 | 25,013 | 0.003701          | 3.0859        | 0.000814           | 78.0%      | 2.4076         | 15.3               | 121,963,290,088                  |

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개장안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당 VSL       | 노출 인구수 | 현재 초과 발암위해도 (30년) | 연간 위험 작업자 (명) | 개장안 초과 발암위해도 (30년) | 위해 저감률 (%) | 연간 위해저감인구수 (명) | (계수)30년분식 5.5% 할인율 | 사회적 총편익 (VSL)                    |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------------------|------------|----------------|--------------------|----------------------------------|
| #9   | 크롬산 아연     | 0.01                         | 2안 : 0.005               | -             | -      | -                 | -             | -                  | -          | -              | -                  | 초과사망장이 없고, 노출기준 강화로 인한 건강 편익만 존재 |
| #10  | 크롬산 아연     | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 3,311,000,000 | 338    | 0.005537          | 0.0624        | 0.000814           | 85.3%      | 0.0532         | 15.3               | 2,695,651,578                    |
| #11  | 스트론튬 크로메이트 | 0.0005                       | 3안 : 0.0002              | 3,311,000,000 | 74     | 0.001103          | 0.0027        | 0.000814           | 26.2%      | 0.0007         | 15.3               | 36,140,703                       |
| #12  | 크롬산 연      | 0.012                        | 1안 : 0.01                | 3,311,000,000 | 79     | 0.050492          | 0.1330        | 0.035472           | 29.7%      | 0.0396         | 15.3               | 2,003,741,939                    |
| #13  | 크롬산 연      | 0.012                        | 2안 : 0.005               | 3,311,000,000 | 99     | 0.041737          | 0.1377        | 0.017983           | 56.9%      | 0.0784         | 15.3               | 3,970,890,720                    |
| #14  | 크롬산 연      | 0.012                        | 3안 : 0.0002              | 3,311,000,000 | 414    | 0.007045          | 0.0972        | 0.000814           | 88.5%      | 0.0860         | 15.3               | 4,356,241,914                    |

〈표 III -55〉 VSL로 추정된 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 3%)

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개장안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당 VSL       | 노출 인구수 | 현재 초과 발암위험도 (30년) | 연간 위험 작업자 (명) | 개장안 초과 발암위험도 (30년) | 위해 저감율 (%) | 연간 위해저감인구수 (명) | (계수)30년분석 3%할인율 | 사회적 총편익 (VSL)                    |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------------------|------------|----------------|-----------------|----------------------------------|
| #1   | 크롬 및 크롬3가  | 0.5                          | 3안 : 0.05                | -             | -      | -                 | -             | -                  | -          | -              | -               | 비발암성물질로 VSL 계산하지 않음              |
| #2   | 크롬6가       | 0.05                         | 2안 : 0.005               | -             | -      | -                 | -             | -                  | -          | -              | -               | 초과사업장이 없고, 노출기준 강화로 인한 건강 편익만 존재 |
| #3   | 크롬광        | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 2,936,000,000 | 56     | 0.002475          | 0.0046        | 0.000814           | 67.1%      | 0.0031         | 20.2            | 183,953,242                      |
| #4   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 1안 : 0.01                | 2,936,000,000 | 1,673  | 0.053533          | 2.9854        | 0.035472           | 33.7%      | 1.0072         | 20.2            | 59,735,401,895                   |
| #5   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 2안 : 0.005               | 2,936,000,000 | 3,691  | 0.037302          | 4.5893        | 0.017983           | 51.8%      | 2.3768         | 20.2            | 140,960,046,265                  |
| #6   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 2,936,000,000 | 43,423 | 0.005932          | 8.5859        | 0.000814           | 86.3%      | 7.4084         | 20.2            | 439,372,973,691                  |
| #7   | 크롬6가 (불용성) | 0.01                         | 2안 : 0.005               | 2,936,000,000 | 152    | 0.031172          | 0.1579        | 0.017983           | 42.3%      | 0.0668         | 20.2            | 3,963,127,032                    |
| #8   | 크롬6가 (불용성) | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 2,936,000,000 | 25,013 | 0.003701          | 3.0859        | 0.000814           | 78.0%      | 2.4076         | 20.2            | 142,786,102,927                  |

| 시나리오 | 물질명         | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당 VSL       | 노출 인구수 | 현재 초과 발암위험도 (30년) | 연간 위험 작업자 (명) | 개정안 초과 발암위험도 (30년) | 위해 저감율 (%) | 연간 위해자감인 구수 (명) | (개수)3 0년분석 3% 할인율 | 사회적 총편익 (VSL)                    |
|------|-------------|------------------------------|--------------------------|---------------|--------|-------------------|---------------|--------------------|------------|-----------------|-------------------|----------------------------------|
| #9   | 크롬산 아연      | 0.01                         | 2안 : 0.005               | -             | -      | -                 | -             | -                  | -          | -               | 20.2              | 초과사업장이 없고, 노출기준 강화로 인한 건강 편익만 존재 |
| #10  | 크롬산 아연      | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 2,936,000,000 | 338    | 0.005537          | 0.0624        | 0.000814           | 85.3%      | 0.0532          | 20.2              | 3,155,880,621                    |
| #11  | 스티론티움 크로메이트 | 0.0005                       | 3안 : 0.0002              | 2,936,000,000 | 74     | 0.001103          | 0.0027        | 0.000814           | 26.2%      | 0.0007          | 20.2              | 42,311,011                       |
| #12  | 크롬산 연       | 0.012                        | 1안 : 0.01                | 2,936,000,000 | 79     | 0.050492          | 0.1330        | 0.035472           | 29.7%      | 0.0396          | 20.2              | 2,345,841,134                    |
| #13  | 크롬산 연       | 0.012                        | 2안 : 0.005               | 2,936,000,000 | 99     | 0.041737          | 0.1377        | 0.017983           | 56.9%      | 0.0784          | 20.2              | 4,648,841,554                    |
| #14  | 크롬산 연       | 0.012                        | 3안 : 0.0002              | 2,936,000,000 | 414    | 0.007045          | 0.0972        | 0.000814           | 88.5%      | 0.0860          | 20.2              | 5,099,983,822                    |

## 나) WTP를 활용한 편익 분석

1인당 WTP는 <표 III-49>와 같이 신영철 등(2019)이 제시한 값을 법적용 예상시점인 2024년 기준으로 환산하였다. 만성적인 건강장해를 감안하여 분석기간을 30년으로 설정하였고, 미래시점의 화폐가치를 현재 화하기 위한 할인율 계수는 할인율 5.5%일 때 15.3, 3%일 때 20.2를 사용하였다. 크롬 및 그 화합물의 물질별 유해성 특성을 감안하여 인간건강 영향중 잠재건강, 호흡기/심혈관 질환을 회피하기 위한 WTP를 사용하였고, 발암성이 있는 물질의 경우 발암성을 추가하였다.

- WTP를 통한 사회적 총편익 = 1인당 WTP × 노출 추정 근로자수 × 할인율 계수
- 1인당 WTP = 잠재건강 WTP + 호흡기/심혈관 질환 회피 WTP

〈표 III-56〉 WTP로 추정된 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 5.5%)

| 시나리오 | 물질명           | 현재<br>노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당<br>WTP(원) | 노출<br>인구수 | 5.5%<br>할인율<br>(계수) | 사회적 총편익(원)<br>(WTP)                    |
|------|---------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------|---------------------|--|
| #1   | 크롬 및<br>크롬3가  | 0.5                                | 3안 : 0.05                   | 55,335        | 80,635    | 15.3                | 68,268,115,648                         |
| #2   | 크롬광           | 0.05                               | 2안 : 0.005                  | -             | -         | -                   | 초과사업장이 없고, 노출기준<br>강화로 인한<br>건강 편익만 존재 |
| #3   | 크롬광           | 0.05                               | 3안 : 0.0002                 | 103,698       | 56        | 15.3                | 88,848,556                             |
| #4   | 크롬6가<br>(수용성) | 0.05                               | 1안 : 0.01                   | 103,698       | 1,673     | 15.3                | 2,654,350,607                          |
| #5   | 크롬6가<br>(수용성) | 0.05                               | 2안 : 0.005                  | 103,698       | 3,691     | 15.3                | 5,856,071,782                          |
| #6   | 크롬6가<br>(수용성) | 0.05                               | 3안 : 0.0002                 | 103,698       | 43,423    | 15.3                | 68,894,122,185                         |

| 시나리오 | 물질명                    | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당 WTP(원) | 노출 인구수 | 5.5% 할인율 (계수) | 사회적 총편익(원) (WTP)                 |
|------|------------------------|------------------------------|--------------------------|------------|--------|---------------|----------------------------------|
| #7   | 크롬6가 (불용성)             | 0.01                         | 2안 : 0.005               | 103,698    | 152    | 15.3          | 241,160,366                      |
| #8   | 크롬6가 (불용성)             | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 103,698    | 25,013 | 15.3          | 39,685,159,437                   |
| #9   | 크롬산 아연                 | 0.01                         | 2안 : 0.005               | -          | -      | -             | 초과사업장이 없고, 노출기준 강화로 인한 건강 편익만 존재 |
| #10  | 크롬산 아연                 | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 103,698    | 338    | 15.3          | 536,264,498                      |
| #11  | 스트론튬<br>올<br>크로메이<br>트 | 0.0005                       | 3안 : 0.0002              | 103,698    | 74     | 15.3          | 117,407,020                      |

| 시나리오 | 물질명   | 현재<br>노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당<br>WTP(원) | 노출<br>인구수 | 5.5%<br>할인율<br>(계수) | 사회적 총편익(원)<br>(WTP) |
|------|-------|------------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------|---------------------|---------------------|
| #12  | 크롬산 연 | 0.012                              | 1안 : 0.01                   | 103,698       | 79        | 15.3                | 125,339,927         |
| #13  | 크롬산 연 | 0.012                              | 2안 : 0.005                  | 103,698       | 99        | 15.3                | 157,071,554         |
| #14  | 크롬산 연 | 0.012                              | 3안 : 0.0002                 | 103,698       | 414       | 15.3                | 656,844,681         |

〈표 III -57〉 WTP로 추정된 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 3%)

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당 WTP(원) | 노출 인구수 | 3% 할인율 (계수) | 사회적 총편익(원) (WTP)                 |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|------------|--------|-------------|----------------------------------|
| #1   | 크롬 및 크롬3가  | 0.5                          | 3안 : 0.05                | 49,083     | 80,635 | 20.2        | 79,946,909,423                   |
| #2   | 크롬광        | 0.05                         | 2안 : 0.005               | -          | -      | -           | 초과사업장이 없고, 노출기준 강화로 인한 건강 편익만 존재 |
| #3   | 크롬광        | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 91,980     | 56     | 20.2        | 104,048,096                      |
| #4   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 1안 : 0.01                | 91,980     | 1,673  | 20.2        | 3,108,436,868                    |
| #5   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 2안 : 0.005               | 91,980     | 3,691  | 20.2        | 6,857,884,327                    |
| #6   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 3안 : 0.0002              | 91,980     | 43,423 | 20.2        | 80,680,008,432                   |

| 시나리오 | 물질명                    | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당 WTP(원) | 노출 인구수 | 3% 할인율 (계수) | 사회적 총편익(원) (WTP)                 |
|------|------------------------|------------------------------|--------------------------|------------|--------|-------------|----------------------------------|
| #7   | 크롬6가 (불용성)             | 0.01                         | 2안 : 0.005               | 91,980     | 152    | 20.2        | 282,416,261                      |
| #8   | 크롬6가 (불용성)             | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 91,980     | 25,013 | 20.2        | 46,474,196,875                   |
| #9   | 크롬산 아연                 | 0.01                         | 2안 : 0.005               | -          | -      | -           | 초과사업장이 없고, 노출기준 강화로 인한 건강 편익만 존재 |
| #10  | 크롬산 아연                 | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 91,980     | 338    | 20.2        | 628,004,579                      |
| #11  | 스트론튬<br>올<br>크로메이<br>트 | 0.0005                       | 3안 : 0.0002              | 91,980     | 74     | 20.2        | 137,492,127                      |

| 시나리오 | 물질명   | 현재<br>노출기준<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 1인당<br>WTP(원) | 노출<br>인구수 | 3%<br>할인율<br>(계수) | 사회적 총편익(원)<br>(WTP) |
|------|-------|------------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------|-------------------|---------------------|
| #12  | 크롬산 연 | 0.012                              | 1안 : 0.01                   | 91,980        | 79        | 20.2              | 146,782,135         |
| #13  | 크롬산 연 | 0.012                              | 2안 : 0.005                  | 91,980        | 99        | 20.2              | 183,942,170         |
| #14  | 크롬산 연 | 0.012                              | 3안 : 0.0002                 | 91,980        | 414       | 20.2              | 769,212,710         |

## (5) 비용-편익 비교

〈표 III-54, 55, 56, 57〉를 이용해 사회적 비용과 편익을 재정리하였고, 할인율별, 시나리오별 B/C Ratio를 구하였다(표 III-58).

- $B/C \text{ Ratio} = \text{사회적 총편익}(B) \div \text{사회적 총비용}(C)$
- $\text{사회적 총편익}(B) = \text{WTP에 의한 사회적 총편익} + \text{VSL에 의한 사회적 총편익}$

〈표 III-58〉에서 시나리오 #2, 4, 5, 9, 12, 13은 B/C Ratio가 1보다 크거나 건강 편익만 존재하여 사회경제성 평가결과 타당한 것으로 평가되었고, 시나리오 #1, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14는 편익보다 사회적 비용이 큰 것으로 평가되었다.

## (6) 관리수준의 제안

### 가) B/C Ratio가 1보다 큰 경우

노출기준을 변경하는 시나리오 중 B/C Ratio가 1보다 큰 경우는 사회적으로 얻을 수 있는 편익이 사회적 총비용보다 크므로, 본 연구에서 제안하는 개정안에 따른 변경이 필요하다. 특히 시나리오 #4, 5와 12, 13은 더 낮은 노출기준을 적용함에도 B/C Ratio가 더욱 커지므로 강화된 노출기준을 적용할 필요가 있다.

### 가) B/C Ratio가 1보다 작은 경우

노출기준을 변경하는 시나리오 중 B/C Ratio가 1보다 작은 경우는 사회적으로 지불해야 하는 총비용이 사회적 총편익보다 크므로, 현재의 노출기준을 유지하는 것이 합리적이다. 다만, 본 연구에서는 편익의 산출시 보수적인 판단을 위해 정량적 평가만을 사용하고 정성적인 편익을 고려치 않아 과소평가

의 가능성이 남아 있다. 노출기준 개정시 사회경제성평가 결과와 함께 최신의 국제적 노출기준과의 조화를 함께 검토할 필요가 있다.

〈표 III -58〉 사회적 비용-편익 비교(분석기간 30년)

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 사회적 총비용(C)                    | 편익(B) (WTP)                  | 편익(B) (VSL)                  | 사회적 총편익 (WTP+VSL)            | B/C Ratio               |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| #1   | 크롬 및 크롬3가  | 0.5                          | 3안 : 0.05                | 할인율(5.5%):<br>967,184,180,682 | 할인율(5.5%):<br>68,268,115,648 | 할인율(5.5%):<br>0              | 할인율(5.5%):<br>68,268,115,648 | 할인율(5.5%):<br>0.07      |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>850,156,596,036   | 할인율(3%):<br>79,946,909,423   | 할인율(3%):<br>0                | 할인율(3%):<br>79,946,909,423   | 할인율(3%):<br>0.09        |
| #2   | 크롬광        | 0.05                         | 2안 : 0.005               | 할인율(5.5%):<br>0               | 할인율(5.5%):<br>건강 편익만 존재      | 할인율(5.5%):<br>건강 편익만 존재      | 할인율(5.5%):<br>건강 편익만 존재      | 할인율(5.5%):<br>건강 편익만 존재 |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>0                 | 할인율(3%):<br>건강 편익만 존재        | 할인율(3%):<br>건강 편익만 존재        | 할인율(3%):<br>건강 편익만 존재        | 할인율(3%):<br>건강 편익만 존재   |
| #3   | 크롬광        | 0.05                         | 3안 :<br>0.0002           | 할인율(5.5%):<br>1,168,802,635   | 할인율(5.5%):<br>88,848,556     | 할인율(5.5%):<br>157,126,934    | 할인율(5.5%):<br>245,975,490    | 할인율(5.5%):<br>0.2105    |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>1,027,379,572     | 할인율(3%):<br>104,048,096      | 할인율(3%):<br>183,953,242      | 할인율(3%):<br>288,001,338      | 할인율(3%):<br>0.2803      |
| #4   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 1안 : 0.01                | 할인율(5.5%):<br>31,557,671,152  | 할인율(5.5%):<br>2,654,350,607  | 할인율(5.5%):<br>51,024,056,266 | 할인율(5.5%):<br>53,678,406,874 | 할인율(5.5%):<br>1.7010    |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>27,739,248,451    | 할인율(3%):<br>3,108,436,868    | 할인율(3%):<br>59,735,401,895   | 할인율(3%):<br>62,843,838,762   | 할인율(3%):<br>2.2655      |

| 시나리오 | 물질명        | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 사회적 총비용(C)                    | 편익(B) (WTP)                  | 편익(B) (VSL)                   | 사회적 총편익 (WTP+VSL)             | B/C Ratio               |
|------|------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| #5   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 2단 : 0.005               | 할인율(5.5%):<br>70,712,559,434  | 할인율(5.5%):<br>5,856,071,782  | 할인율(5.5%):<br>120,403,531,303 | 할인율(5.5%):<br>126,259,603,085 | 할인율(5.5%):<br>1.7855    |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>62,156,464,121    | 할인율(3%):<br>6,857,884,327    | 할인율(3%):<br>140,960,046,265   | 할인율(3%):<br>147,817,930,592   | 할인율(3%):<br>1.7855      |
|      |            |                              |                          | 할인율(5.5%):<br>636,413,034,902 | 할인율(5.5%):<br>68,894,122,185 | 할인율(5.5%):<br>375,298,242,256 | 할인율(5.5%):<br>444,192,364,441 | 할인율(5.5%):<br>0.6980    |
| #6   | 크롬6가 (수용성) | 0.05                         | 3단 :<br>0.0002           | 할인율(3%):<br>559,408,177,090   | 할인율(3%):<br>80,680,008,432   | 할인율(3%):<br>439,372,973,691   | 할인율(3%):<br>520,052,982,123   | 할인율(3%):<br>0.9296      |
|      |            |                              |                          | 할인율(5.5%):<br>14,610,032,941  | 할인율(5.5%):<br>241,160,366    | 할인율(5.5%):<br>3,385,175,462   | 할인율(5.5%):<br>3,626,335,828   | 할인율(5.5%):<br>0.2482    |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>12,842,244,653    | 할인율(3%):<br>82,416,261       | 할인율(3%):<br>3,963,127,032     | 할인율(3%):<br>4,245,543,293     | 할인율(3%):<br>0.3306      |
| #8   | 크롬6가 (불용성) | 0.01                         | 3단 :<br>0.0002           | 할인율(5.5%):<br>816,408,640,733 | 할인율(5.5%):<br>39,685,159,437 | 할인율(5.5%):<br>121,963,290,088 | 할인율(5.5%):<br>161,648,449,525 | 할인율(5.5%):<br>0.1980    |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>717,624,631,216   | 할인율(3%):<br>6,474,196,875    | 할인율(3%):<br>142,786,102,927   | 할인율(3%):<br>189,260,299,802   | 할인율(3%):<br>0.2637      |
|      |            |                              |                          | 할인율(5.5%):<br>0               | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재      | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재       | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재       | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재 |
| #9   | 크롬산 이연     | 0.01                         | 2단 : 0.005               | 할인율(3%):<br>0                 | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재        | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재         | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재         | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재   |
|      |            |                              |                          | 할인율(3%):<br>0                 | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재        | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재         | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재         | 할인율(3%):<br>간강 편익만 존재   |
|      |            |                              |                          | 할인율(5.5%):<br>0               | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재      | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재       | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재       | 할인율(5.5%):<br>간강 편익만 존재 |

| 시나리오 | 물질명         | 현재 노출기준 (mg/m <sup>3</sup> ) | 개정안 (mg/m <sup>3</sup> ) | 사회적 총비용(C)   | 편익(B) (WTP)  | 편익(B) (VSL)  | 사회적 총편익 (WTP+VSL)  | B/C Ratio                                  |
|------|-------------|------------------------------|--------------------------|--|--|--|--|--|
| #10  | 크롬산 아연      | 0.01                         | 3안 : 0.0002              | 할인율(5.5%):<br>,181,618,447<br>할인율(3%):<br>7,191,657,006    | 할인율(5.5%):<br>536,264,498<br>할인율(3%):<br>628,004,579 | 할인율(5.5%):<br>2,695,651,578<br>할인율(3%):<br>3,155,880,621 | 할인율(5.5%):<br>3,231,916,076<br>할인율(3%):<br>3,783,885,201 | 할인율(5.5%):<br>0.3950<br>할인율(3%):<br>0.5261 |
| #11  | 스트론티움 크로메이트 | 0.0005                       | 3안 : 0.0002              | 할인율(5.5%):<br>584,401,318<br>할인율(3%):<br>513,689,786       | 할인율(5.5%):<br>117,407,020<br>할인율(3%):<br>137,492,127 | 할인율(5.5%):<br>36,140,703<br>할인율(3%):<br>42,311,011       | 할인율(5.5%):<br>153,547,723<br>할인율(3%):<br>179,803,138     | 할인율(5.5%):<br>0.2627<br>할인율(3%):<br>0.3500 |
| #12  | 크롬산 연       | 0.012                        | 1안 : 0.01                | 할인율(5.5%):<br>1,753,203,953<br>할인율(3%):<br>1,541,069,358   | 할인율(5.5%):<br>125,339,927<br>할인율(3%):<br>46,782,135  | 할인율(5.5%):<br>2,003,741,939<br>할인율(3%):<br>2,345,841,134 | 할인율(5.5%):<br>2,129,081,866<br>할인율(3%):<br>2,492,623,270 | 할인율(5.5%):<br>1.2144<br>할인율(3%):<br>1.6175 |
| #13  | 크롬산 연       | 0.012                        | 2안 : 0.005               | 할인율(5.5%):2,922,006,588<br>할인율(3%):<br>2,568,448,931       | 할인율(5.5%):<br>157,071,554<br>할인율(3%):<br>83,942,170  | 할인율(5.5%):<br>3,970,890,720<br>할인율(3%):<br>4,648,841,554 | 할인율(5.5%):<br>4,127,962,274<br>할인율(3%):<br>4,832,783,724 | 할인율(5.5%):<br>1.4127<br>할인율(3%):<br>1.8816 |
| #14  | 크롬산 연       | 0.012                        | 3안 : 0.0002              | 할인율(5.5%):<br>36,817,283,011<br>할인율(3%):<br>32,362,456,526 | 할인율(5.5%):<br>656,844,681<br>할인율(3%):<br>69,212,710  | 할인율(5.5%):<br>4,356,241,914<br>할인율(3%):<br>5,099,983,822 | 할인율(5.5%):<br>5,013,086,595<br>할인율(3%):<br>5,869,196,531 | 할인율(5.5%):<br>0.1362<br>할인율(3%):<br>0.1814 |

## 참고문헌

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Aluminum metal and insoluble compounds. Documentations of the threshold limit values and biological exposure indices, 7th Ed. ACGIH, Cincinnati(OH); 2015

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Aluminum metal and insoluble compounds. Documentations of the threshold limit values and biological exposure indices, 7th Ed. ACGIH, Cincinnati(OH); 2019a

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Guide to occupational exposure values. ACGIH, Cincinnati(OH); 2004. p. 5-6

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Guide to occupational exposure values. ACGIH, Cincinnati(OH); 2011. p. 5-6

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values(TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure indices(BEIs). ACGIH, Cincinnati(OH); 2002. p. 13

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values(TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure

indices(BEIs). ACGIH, Cincinnati(OH); 2019b. p. 12

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values(TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure indices(BEIs). ACGIH, Cincinnati(OH); 2020.

Chung EK. A review on chemical occupational exposure limits in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2007;17(2):K1-K6

Health and Safety Executive(HSE). EH40/2005 Workplace exposure limits.

Health and Safety Executive(HSE). EH40/2005 Workplace exposure limits. p. 9 [Accessed 6 August 2020] Available from: <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf>

Jeong JY, Choi SJ, Kho YL, Kim PG. Extensive changes to occupational exposure limits in Korea. Regul Toxicol Pharmacol 2010;58:345-348. DOI:10.1016/j.yrtph.2010.08.006

Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational exposure limits of chemical substances and physical agents. MoEL Notice of Korea 2020-48, 2020

National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Manual of Analytical Methods(NMAM), ALUMINUM and compounds, as Al, Fourth Edition, 8/15/94

National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH pocket guide to chemical hazards.

- National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH pocket guide to chemical hazards. [Accessed 6 August 2020] Available from <https://www.cdc.gov/niosh>
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Federal Register/Vol. 71. No. 39, 2006.
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Permissible Exposure Limits/OSHA Annotated Table Z-1.
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Permissible Exposure Limits/OSHA Annotated Table Z-1. [Accessed 6 August 2020] Available from <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-1.html>
- Recommendation of occupational exposure limits(2020-2021). The Japan Society for Occupational Health. EnViron Occup Health Practice 2020; 2
- 고용노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준. 2020 고용노동부고시 제 2002-8
- 김승원, 피영규, 백용준, 정태진. 알루미늄 노출기준 개정을 위한 국내 실태조사 및 사회경제적 영향 분석 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서, 2021.
- 김태윤, 이은정, 김주찬. 특별관리물질 및 관리대상 유해물질 선정을 위한 사회경제성 평가 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서, 2014.
- 노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준. 2002 노동부고시 제 2002-8
- 신영철, 김정수, 고도현, 권선희, 이규명, 김선형, 이상직, 박시용. 화학물질

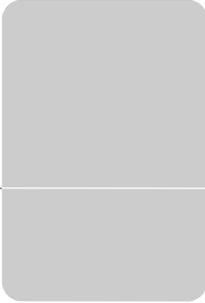
관리를 위한 사회경제성 분석 기반 구축(III). 국립환경과학원 연구보고서, 2019.

윤충식. 새 국제표준규격에 의한 수용성 유해금속의 평가. 한국산업보건학회지 2003: 13(3): 1-10

정규철. 산업중독편람. 신광출판사

최상준 등. 생식독성물질의 산업안전보건법 등 관리수준 검토를 위한 유해성 위험성 평가. 산업안전보건연구원 연구보고서, 2019.

환경부. 제한물질·금지물질의 지정. 규제영향분석서, 2021.



## Abstract

# Revision of occupational exposure limits for chromium and its compounds

**Objectives** : The 12 occupational exposure limits (OELs) for chromium and its compounds in Korea were set by applying the ACGIH TLV, but it is significantly different from the TLV after the existing TLV was integrated and withdrawn in 2018, so it is necessary to review the revision.

**Method** : Various documents related to chromium OELs were reviewed, including the ACGIH TLV Documentations for chromium and its compounds. A field survey was conducted targeting workplaces handling chromium and its compounds. Based on this, a revised OELs were proposed and a socio-economic evaluation was conducted.

**Results** : The OELs for chromium compounds in Korea was first enacted in 2002, and in 2007, the OELs for chromium (hexavalent) compounds (insoluble) was lowered from 0.05 mg/m<sup>3</sup> to 0.01 mg/m<sup>3</sup>. In 2008, the OELs for strontium chromate was newly established as 0.0005 mg/m<sup>3</sup>, and in 2018, the OELs for calcium chromate was newly established as 0.001 mg/m<sup>3</sup>.

OELs in the United States differ greatly from those of OSHA, NIOSH, and ACGIH. Unlike Korea, chromium (hexavalent) compounds are not

classified as soluble and insoluble, and NIOSH and ACGIH treat chromic acid compounds such as chromium ore processing (chromic acid) and zinc chromate as chromium (hexavalent) compounds. For chromium (hexavalent) compounds, a low OEL ( $0.005 \text{ mg/m}^3$  for OSHA,  $0.0002 \text{ mg/m}^3$  for NIOSH and ACGIH) is applied, but for chromium (divalent) and chromium (trivalent) compounds, the same  $0.5 \text{ mg/m}^3$  as in Korea is applied. ACGIH presents STEL concentrations. The UK, Japan, and France also do not classify chromium (hexavalent) compounds into soluble and insoluble, but have a dual OELs that applies differently depending on the situation. The level of OELs is similar to that of Korea. In the case of Germany, OELs for substances other than chromium (divalent) compounds are not set and refrain from using is recommended.

Total chromium and hexavalent chromium were measured for each of 6 samples at 2 welding sites, 4 plating sites, and 2 spray coating sites and compared. Comparing the average of the results measured by ICP, a total chromium analysis method, and the analysis results by IC, a hexavalent chromium analysis method, only workplace 4 was the same, and total chromium was evaluated more, and total chromium was evaluated at  $0.0004$  to  $0.0027 \text{ mg/m}^3$ . And hexavalent chromium was evaluated as non-detection  $\sim 0.0014 \text{ mg/m}^3$ .

Amendment ①: The exposure standard for hexavalent chromium is not divided into water soluble, insoluble, chromium ore processing, and other hexavalent chromium compounds, and is integrated into  $0.01 \text{ mg/m}^3$ , which is the level of chromium (hexavalent) compound (insoluble). , OELs for chromium (metal) and chromium (trivalent) compounds are

integrated into chromium (trivalent) compounds, and the exposure level is maintained.

Amendment ②: As in the amendment ①, the OELs are integrated, but the level is lowered to 0.005 mg/m<sup>3</sup>, which is the OELs of OSHA, and there is a grace period of 4 years.

Amendment ③: As in the amendment ①, the OELs are integrated, but the level is lowered to 0.0002 mg/m<sup>3</sup>, which is the exposure standard of ACGIH, and there is a grace period of 5 years.

**Conclusion** : Amendment ①: The change in the OELs is insignificant, so the cost required is small, and the benefit/cost ratio is greater than 1, so there is no problem in applying the amendment.

Amendment ②: In all scenarios except chromium 6 (insoluble), the benefit/cost ratio is greater than 1, so it is thought that there will be no major problem in applying the amendment.

Amendment ③: Since the benefit/cost ratio is less than 1 in all scenarios, it is thought that the total social benefit that can be obtained when applying the amendment is not large.

**Key words** : total chromium, chromium hexavalent, chromium trivalent, insoluble, soluble, inorganic compounds





# 부록

실태조사 사업장별 개요 - 사업장 1

|      |  |  |              |
|------|--|--|--------------|
| 사업장명 | 사업장1   | 대상공정   | 스테인리스 용접     |
| 소재지  | 인천시 미추홀구   | 조사일자   | 2022년 6월 23일 |
| 대상물질 | 용접흄의 6가 크롬산  |  |              |
| 작업내용 | 크롬이 23~27% 함유된 Fe-Cr용접봉과 크롬이 18~20% 함유된 Sus Cut Wire용접봉을 사용하여 수작업으로 용접 |  |              |
| 측정결과 | ICP법   | 0.0001~0.0060mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0027mg/m <sup>3</sup> ) |              |
|      | IC-UVD법  | 불검출~0.0015mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0006mg/m <sup>3</sup> )    |              |

공정흐름도



측정사진



## 실태조사 사업장별 개요 - 사업장 2

|      |   |  |              |
|------|---|--|--------------|
| 사업장명 | 사업장2  | 대상공정   | 용접           |
| 소재지  | 인천시 미추홀구  | 조사일자   | 2022년 7월 29일 |
| 대상물질 | 용접흄의 6가 크롬산   |  |              |
| 작업내용 | CSF-308와 309, TGC-308과 309(크롬함유 약 20%이상 함유)<br>용접봉을 사용하여 수작업으로 용접 |  |              |
| 측정결과 | ICP법  | 0.0001~0.0008mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0004mg/m <sup>3</sup> ) |              |
|      | IC-UVD법   | 불검출  |              |

## 공정흐름도

원자재



용접



기계가공



출하

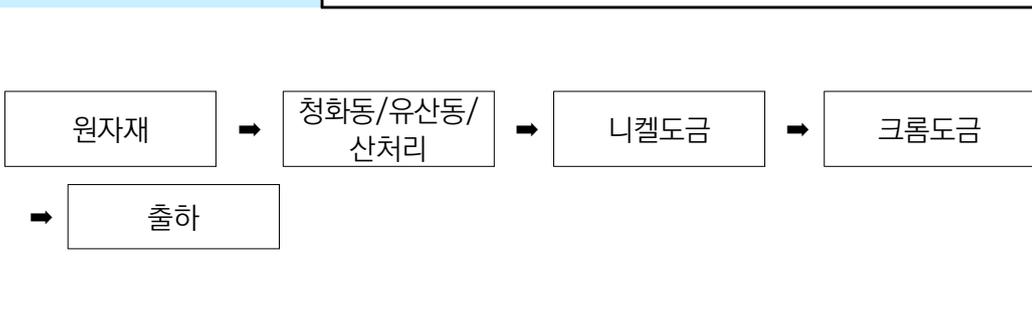
## 측정사진



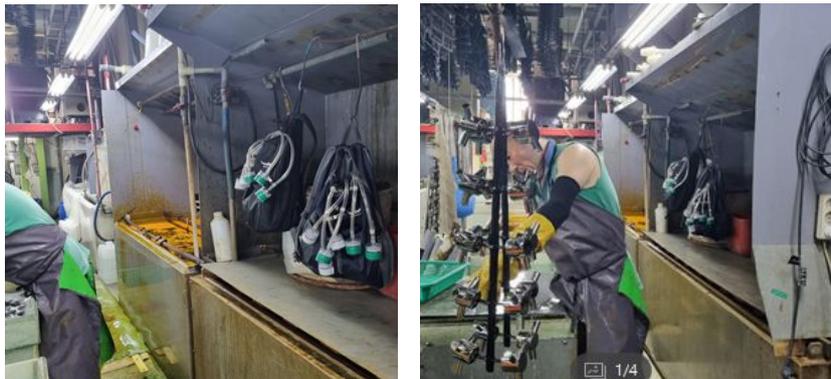
실태조사 사업장별 개요 - 사업장 3

|      |                     |  |             |
|------|---------------------|--|-------------|
| 사업장명 | 사업장3                | 대상공정   | 크롬도금        |
| 소재지  | 인천시 서구              | 조사일자   | 2022년 8월 1일 |
| 대상물질 | 크롬도금의 6가 크롬산        |  |             |
| 작업내용 | 무수크롬산을 사용하여 크롬도금 작업 |  |             |
| 측정결과 | ICP법                | 0.0009~0.0015mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0012mg/m <sup>3</sup> ) |             |
|      | IC-UVD법             | 불검출~0.0003mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0002mg/m <sup>3</sup> )    |             |

공정흐름도



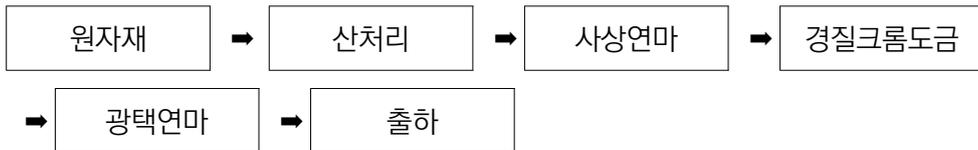
측정사진



## 실태조사 사업장별 개요 - 사업장 4

|      |                           |  |             |
|------|---------------------------|--|-------------|
| 사업장명 | 사업장4                      | 대상공정   | 경질크롬도금      |
| 소재지  | 경기도 부천시                   | 조사일자   | 2022년 8월 2일 |
| 대상물질 | 크롬도금의 6가 크롬산              |  |             |
| 작업내용 | 99.7% 크롬산을 사용하여 경질크롬도금 작업 |  |             |
| 측정결과 | ICP법                      | 0.0009~0.0020mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0014mg/m <sup>3</sup> ) |             |
|      | IC-UVD법                   | 0.0012~0.0017mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0014mg/m <sup>3</sup> ) |             |

## 공정흐름도



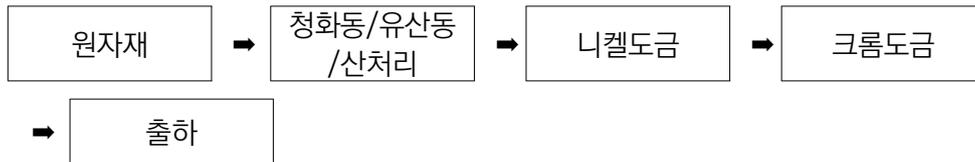
## 측정사진



실태조사 사업장별 개요 - 사업장 5

|      |                     |  |             |
|------|---------------------|--|-------------|
| 사업장명 | 사업장5                | 대상공정   | 크롬도금        |
| 소재지  | 경기도 부천시             | 조사일자   | 2022년 8월 3일 |
| 대상물질 | 크롬도금의 6가 크롬산        |  |             |
| 작업내용 | 무수크롬산을 사용하여 크롬도금 작업 |  |             |
| 측정결과 | ICP법                | 0.0004~0.0005mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0004mg/m <sup>3</sup> ) |             |
|      | IC-UVD법             | 불검출  |             |

공정흐름도



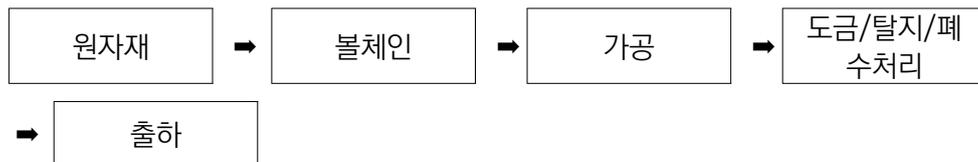
측정사진



## 실태조사 사업장별 개요 - 사업장 6

|      |                     |  |              |
|------|---------------------|--|--------------|
| 사업장명 | 사업장6                | 대상공정   | 도금           |
| 소재지  | 인천시 남동구             | 조사일자   | 2022년 8월 11일 |
| 대상물질 | 크롬도금의 6가 크롬산        |  |              |
| 작업내용 | 무수크롬산을 사용하여 크롬도금 작업 |  |              |
| 측정결과 | ICP법                | 0.0001~0.0002mg/m <sup>3</sup> (평균 0.0002mg/m <sup>3</sup> ) |              |
|      | IC-UVD법             | 불검출  |              |

## 공정흐름도



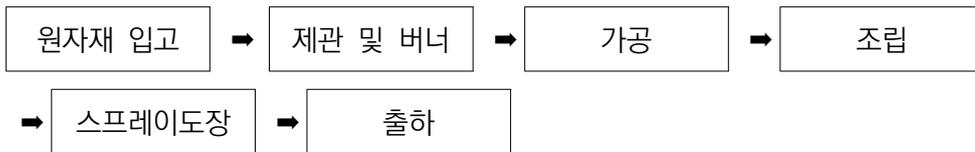
## 측정사진



실태조사 사업장별 개요 - 사업장 7

|      |   |   |              |
|------|---|---|--------------|
| 사업장명 | 사업장7                                    | 대상공정  | 스프레이도장       |
| 소재지  | 인천시 서구                                  | 조사일자  | 2022년 9월 16일 |
| 대상물질 | 스프레이도장의 크롬산납                            |   |              |
| 작업내용 | pigment yellow34(크롬산납)가 0~1%포함된 페인트로 도장 |   |              |
| 측정결과 | ICP법                                    | 0.00006~0.00013mg/m <sup>3</sup> (평균 0.00009mg/m <sup>3</sup> ) |              |
|      | IC-UVD법                                 | 불검출   |              |

공정흐름도



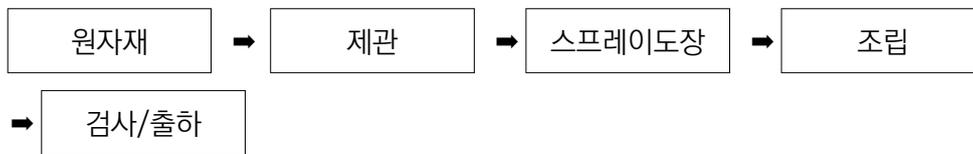
배치도



## 실태조사 사업장별 개요 - 사업장 8

|      |   |   |              |
|------|---|---|--------------|
| 사업장명 | 사업장8                                    | 대상공정  | 스프레이도장       |
| 소재지  | 인천시 남동구                                 | 조사일자  | 2022년 9월 22일 |
| 대상물질 | 스프레이도장의 크롬산납                            |   |              |
| 작업내용 | pigment yellow34(크롬산납)가 0~1%포함된 페인트로 도장 |   |              |
| 측정결과 | ICP법                                    | 0.00018~0.00032mg/m <sup>3</sup> (평균 0.00025mg/m <sup>3</sup> ) |              |
|      | IC-UVD법                                 | 불검출   |              |

## 공정흐름도



## 측정사진





**연구진**

연구기관 : 계명대학교 산학협력단

연구책임자 : 김승원 (교수, 계명대학교)

연구원 : 피영규 (교수, 대구한의대학교)

연구원 : 백용준 (대표이사, 사랑작업환경연구소)

연구원 : 정태진 (대표이사, EHS프렌즈)

연구보조원 : 유주연 (기술위원, 사랑작업환경연구소)

연구보조원 : 정정임 (실장, 사랑작업환경연구소)

연구보조원 : 남식찬 (실장, 사랑작업환경연구소)

연구보조원 : 김성민 (이사, EHS프렌즈)

연구상대역 : 한정희 (차장, 산업안전보건연구원)

**연구기간**

2022. 04. 11. ~ 2022. 10. 31.

본 연구는 산업안전보건연구원의 2022년도 위탁연구 용역사업에 의한 것임

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,  
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

## 연구제목

(2022-산업안전보건연구원-691)

발행일 : 2022년 10월 31일

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 계명대학교 부교수 김승원

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전화 : 042-869-0354

팩스 : 042-863-9001

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 979-11-92782-17-1

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체