

연구보고서

라돈 노출 근로자 건강장해 예방을 위한 정책 연구

서성철·최은희·김기연·임대성·조용민
·이철민·이동현·권철웅·남궁선주·진영화

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “라돈 노출 근로자 건강장해 예방을 위한
정책 연구”의 최종 연구결과 보고서로 제출합니다.

2019년 10월

연구기관 : 을지대학교 산학협력단

연구기간 : 2019.04.12 ~ 2019.10.31

연구책임자 : 서성철 (을지대학교 보건환경안전학과 교수)

공동연구원 : 조용민 ((주)스마티브 생명환경연구소 연구소장)

공동연구원 : 최은희 (을지대학교 간호학과 교수)

공동연구원 : 임대성 ((주)한성보건안전기술원 대표)

공동연구원 : 김기연 (서울과학기술대학교 안전공학과 교수)

공동연구원 : 이철민 (서경대학교 화학생명공학과 교수)

공동연구원 : 이동현 ((주)EHS기술연구소 대표)

연구보조원 : 권철웅 (을지대학교 산학협력단 연구지원센터 연구원)

연구보조원 : 남궁선주 (서경대학교 화학생명공학과 연구교수)

연구보조원 : 진영화 (한국라돈협회 팀장)

요 약 문

연구기간

2019년 4월 ~ 2019년 10월

핵심 단어

라돈, 폐암, 자연방사성물질, 비용편익 분석

연구과제명

라돈 노출 근로자 건강장해 예방을 위한 정책 연구

1. 연구배경

- 라돈으로 인한 건강영향에 대한 사회적 우려 확산과 함께, 소비자 뿐 아니라 작업자에 대한 건강문제 제기. 이에 따라 원료 취급 작업장 전수조사가 이루어졌으며, 사업장의 라돈 노출기준이 600 Bq/m^3 으로 신설됨. 라돈 노출기준을 초과하는 사업장과 위험요인에 노출된 근로자 파악과 함께 저감 대책 마련이 필요함.

2. 주요 연구내용

- 연 구 결 과

- 본 연구에서는 라돈 노출 사업장을 구분함에 있어 라돈 방출 원료 등을 취급하는 의도적 노출 사업장과 원료 등을 취급하지는 않지만 자연 발생 라돈에 의하여 영향을 받을 수 있는 비의도적 노출 사업장으로 구분하였음.
- 모나자이트를 제외한 원료물질 및 공정부산물 사업장 66개소를 선정. 이 중 10개 사업장(의도적 노출 사업장)을 방문하여 측정 수행. 이팜과 알파 트랙을 이용하여 총 151개 측정점에서 수행한 측정결과의 산술평균은 122.0 Bq/m^3 , 기하평균은 82.2 Bq/m^3 으로 산출됨.
- 자연방사성물질의 노출이 우려되는 비의도적 노출 사업장 11개소를 선정하여 의도적 노출 사업장과 동일한 방법으로 측정을 수행함. 총 114개 시료

의 산술평균은 179.7 Bq/m³, 기하평균은 140.1 Bq/m³으로 산출됨.

- 생활주변방사선 안전관리법(이하 생방법)에서는 주로 원재료를 사용하거나 취급하는 사업장에 대해 관리하고 있으나, 자연적으로 노출되는 근로자를 보호하기 위한 관점의 규정은 두고 있지 않음.
- 산업안전보건법(이하 산안법)에서는 방사선과 분리한 라돈 자체의 규정이 필요할 것으로 판단됨. 자연적으로 발생하는 라돈에 노출되는 근로자에 대해서 생방법과 산안법 모두 구체적인 안전관리 방안이 마련되어 있지 않아, 산안법 상의 관리규정이 필요.
- 고용노동부에서 제시한 작업장 라돈관리에서 100 Bq/m³ 초과는 관심, 300 Bq/m³ 초과는 주의, 600 Bq/m³ 초과는 위험 단계로 구분하여 저감대책에 대한 10년 간 비용편익분석을 실시.
- 순편익은 기하평균시 3,165,582,722원, 산술평균시 11,025,537,132원, 최대치에서 3,068,809,345원이었음. 편익-비용비는 최소 1.12에서 최대 2.02로 모두 편익이 높게 나타남.

- 시 사 점

- 본 연구는 작업장 라돈관리 방안에 대하여 ‘의도적 노출 사업장’ 과 ‘비의도적 노출 사업장’ 을 구분하여 제시.
- 의도적 노출 사업장의 경우, 생방법에서 정하고 있는 바에 따라 측정 및 평가, 종합계획서 작성을 이미 이루어지도록 하고 있음. 그러나 측정방법, 건강검진 등에 대한 규정은 산안법을 통한 보완이 필요할 것으로 여겨짐.
- 비의도적 노출 사업장의 경우에도 관리는 필요하며 이러한 관리로 인하여 예상되는 편익 효과도 긍정적인 것으로 파악됨.
- 향후 연구에서는 정기적 모니터링 방법과 주체, 주기 등에 대한 논의가 필요.

3. 연구 활용방안

- 제 언

- 라돈을 직접 취급하진 않지만, 라돈에 노출 가능성이 있는 비의도적 라돈 노출작업장의 경우 정기적인 라돈 농도의 측정을 통한 작업장 관리는 필요하며, 이는 산업안전보건법 제42조의 작업환경측정 제도가 아닌 산업안전보건기준에 관한 규칙의 방사선으로 인한 건강장해 예방 내의 규정으로서 사업주가 라돈 노출 작업장의 라돈 농도 수준을 파악하고 라돈 농도에 따른 정기적인 측정을 실시하며 이를 통하여 근로자의 라돈 노출을 최소화 할 수 있도록 관련 규정을 개정하는 것으로 제안.

- 활 용

- 산안법상 라돈 관리 규정 수립의 근거
- 산업보건학회 학술대회 발표 및 국내외 산업보건관련 학회지 논문 발표

4. 연락처

- 연구책임자 : 을지대학교 보건환경안전학과 교수 서성철
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 직업환경연구실 정은교 선임연구위원
 - Tel: 052. 7030. 881
 - E mail: jungек60@kosha.or.kr

차 례

I. 서 론 1

- 1. 연구배경1
- 2. 연구동향2
- 3. 연구목적4

II. 연구방법 5

- 1. 문헌조사5
- 2. 라돈 노출 사업장 현황 파악6
- 3. 관련 국내 법령과의 비교 및 법령 개정안 제안13
- 4. 비용편익 분석14

III. 연구결과 17

- 1. 라돈의 직업적 유해위험성 정보17
- 2. 원료물질 및 공정부산물의 종류와 방사성 물질 함유 가능성21
- 3. 국내 라돈 노출 사업장 측정 결과28
- 4. 국외 제도 현황67

5. 라돈 관련 국내 법규 검토	90
6. 비용편익 분석 및 규제영향분석	108
7. 작업장 라돈 가이드 검토	122

IV. 결론 124

1. 요약	124
2. 제언	126

V. 참고문헌 128

VI. 부록 133

표 차 례

〈표 I-1〉 흡연상태 및 평균 라돈농도별 폐암 상대위험도	2
〈표 II-1〉 원료물질 및 공정부산물 사업장 분류	7
〈표 II-2〉 34개 원료물질 및 공정부산물 사업장 대상의 원료 및 공정부 산물 종류, 업체수 현황	7
〈표 II-3〉 라돈 측정대상 의도적 노출 사업장	9
〈표 II-4〉 라돈 노출평가를 실시한 비의도적 노출 사업장	10
〈표 II-5〉 측정에 사용된 라돈 측정 장비 목록	11
〈표 II-6〉 작업장 라돈 측정 장비관련 문헌조사	12
〈표 III-1〉 라돈과 관련한 업무상질병 판정 현황	20
〈표 III-2〉 의도적 및 비의도적 노출 사업장의 단기 및 장기 라돈측정기 측정기간과 의도적 사업장의 관련 작업 종사자 수	28
〈표 III-3〉 의도적 노출 사업장 A-1의 라돈 측정농도 결과	31
〈표 III-4〉 의도적 노출 사업장 A-2의 라돈 측정농도 결과	32
〈표 III-5〉 의도적 노출 사업장 A-3의 라돈 측정농도 결과	33
〈표 III-6〉 의도적 노출 사업장 A-4의 라돈 측정농도 결과	34
〈표 III-7〉 의도적 노출 사업장 A-5의 라돈 측정농도 결과	35
〈표 III-8〉 의도적 노출 사업장 A-6의 라돈 측정농도 결과	37
〈표 III-9〉 의도적 노출 사업장 A-7의 라돈 측정농도 결과	38
〈표 III-10〉 의도적 노출 사업장 A-8의 라돈 측정농도 결과	39
〈표 III-11〉 의도적 노출 사업장 A-9의 라돈 측정농도 결과	40
〈표 III-12〉 의도적 노출 사업장 A-10의 라돈 측정농도 결과	41

<표 III-13> 비의도적 노출 사업장 B-1의 라돈 측정농도 결과	44
<표 III-14> 비의도적 노출 사업장 B-2의 라돈 측정농도 결과	45
<표 III-15> 비의도적 노출 사업장 B-3의 라돈 측정농도 결과	47
<표 III-16> 비의도적 노출 사업장 B-4의 라돈 측정농도 결과	48
<표 III-17> 비의도적 노출 사업장 B-5의 라돈 측정농도 결과	49
<표 III-18> 비의도적 노출 사업장 B-6의 라돈 측정농도 결과	50
<표 III-19> 비의도적 노출 사업장 B-7의 라돈 측정농도 결과	51
<표 III-20> 비의도적 노출 사업장 B-8의 라돈 측정농도 결과	52
<표 III-21> 비의도적 노출 사업장 B-9의 라돈 측정농도 결과	53
<표 III-22> 비의도적 노출 사업장 B-10의 라돈 측정농도 결과	54
<표 III-23> 비의도적 노출 사업장 B-11의 라돈 측정농도 결과	55
<표 III-24> 의도적 노출 사업장별 라돈 노출 농도 결과	57
<표 III-25> 원료창고와 나머지 공정에 대한 라돈농도의 기술 통계정보 및 t -test 결과	59
<표 III-26> 비의도적 노출 사업장별 라돈 노출 농도 결과	62
<표 III-27> 의도적 노출사업장과 비의도적 노출사업장에 대한 라돈농도 의 기술통계 정보 및 t -test 결과	64
<표 III-28> 연속작업, 간헐작업, 비의도적 노출사업장의 라돈 농도 기술 통계 정보	66
<표 III-29> 주요 유럽 국가들의 라돈 관리에 대한 특징적인 사항	67
<표 III-30> 유럽 연합 국가들의 작업장 유형별 라돈 관리기준	69
<표 III-31> EU 국가별 작업장 내 라돈 기준 유무 요약	69
<표 III-32> 라돈 노출 정도에 따른 NORM 프로그램 분류	82
<표 III-33> 라돈에 노출되는 추정 근로자 수	108
<표 III-34> 라돈관리 단계별 비율	110

<표 III-35> 라돈농도에 따른 폐암으로 인한 사망의 누적위험도	111
<표 III-36> 라돈농도에 따른 폐암 사망자 수	112
<표 III-37> 라돈 농도수준별 조치사항에 따른 비용	113
<표 III-38> 라돈 농도수준별 조치사항에 따른 비용 산출	116
<표 III-39> 폐암 사망으로 인한 1인당 발생 비용	119
<표 III-40> 라돈 농도에 따른 폐암으로 인한 편익	120
<표 III-41> 라돈 측정변화에 따른 비용-편익 분석	121
<표 III-42> 기 배포된 작업장 라돈 가이드라인	122

그림 차례

[그림 II-1] 라돈 유해성에 대한 체계적 문헌검토 전략	6
[그림 III-1] 공정 부산물 종합안전관리 시스템	22
[그림 III-2] 원료보관창고 측정	29
[그림 III-3] 유약 및 시유 공정	30
[그림 III-4] 의도적 노출 사업장 A-1의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	31
[그림 III-5] 의도적 노출 사업장 A-2의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	32
[그림 III-6] 의도적 노출 사업장 A-3의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	33
[그림 III-7] 의도적 노출 사업장 A-4의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	34
[그림 III-8] 의도적 노출 사업장 A-5의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	35
[그림 III-9] 의도적 노출 사업장 A-6의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	37
[그림 III-10] 의도적 노출 사업장 A-7의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	38
[그림 III-11] 의도적 노출 사업장 A-8의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	39
[그림 III-12] 의도적 노출 사업장 A-9의 단기 및 장기측정에 의한 라돈	

측정농도 결과	40
[그림 III-13] 의도적 노출 사업장 A-10의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	41
[그림 III-14] 지하 공동구 측정 현황	43
[그림 III-15] 터널 내 측정 현황	43
[그림 III-16] 비의도적 노출 사업장 B-1의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	44
[그림 III-17] 비의도적 노출 사업장 B-2의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	45
[그림 III-18] 비의도적 노출 사업장 B-3의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	47
[그림 III-19] 비의도적 노출 사업장 B-4의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	48
[그림 III-20] 비의도적 노출 사업장 B-5의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	49
[그림 III-21] 비의도적 노출 사업장 B-6의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	50
[그림 III-22] 비의도적 노출 사업장 B-7의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	51
[그림 III-23] 비의도적 노출 사업장 B-8의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	52
[그림 III-24] 비의도적 노출 사업장 B-9의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	53
[그림 III-25] 비의도적 노출 사업장 B-10의 단기 및 장기측정에 의한 라돈 측정농도 결과	54

[그림 III-26] 비의도적 노출 사업장 B-11의 단기측정에 의한 라돈 측정 농도 결과	55
[그림 III-27] 의도적 노출 사업장에서 단기측정 및 장기측정에 의한 원 료보관창고와 나머지 모든 공정에서의 라돈농도 분포도	58
[그림 III-28] 의도적 노출 사업장과 비의도적 노출 사업장의 측정 기기 별 라돈농도 분포도	63
[그림 III-29] 의도적 노출 사업장과 비의도적 노출 사업장의 단기 및 장 기 측정에 의한 라돈농도 분포도	63
[그림 III-30] 연속작업, 간헐작업, 비의도적 노출 사업장의 라돈 농도 분 포도	65
[그림 III-31] 작업장 라돈 노출 위험도평가를 위한 영국의 구획 지역	77
[그림 III-32] 라돈 노출에 대한 법규 보호 체계	102
[그림 III-33] 이동형 국소배기장치	113
[그림 IV-1] 라돈 관리방안 제안	127

I. 서론

1. 연구배경

라돈은 무색의 비활성 기체이자 방사성 원소로서 암을 유발할 수 있는 알파선을 방출하며, 기체 형태로 존재하는 특성으로 인하여 호흡기를 통한 노출 위험을 가진다.

2018년, 라돈을 방출하는 침대 제품 리콜 사태는 라돈에 대한 사회적 우려를 높이게 되었다. 소비자들은 제품을 통해 라돈에 노출되지만 노동자들은 원료를 통해 라돈에 노출될 수 있다. 제품의 원료인 모나자이트(Monazite)에는 우라늄과 토륨 등의 방사능 물질이 함유되어 있으며 폐로 흡입되어 작업자들로 하여금 폐암의 원인이 될 수 있다.

언론 보도 등을 통한 사회적 우려 확산과 함께, 원료 취급 작업장에 대한 전수조사가 이루어진 바 있으며, 작업장 라돈 가이드 개발 등의 활동이 이루어졌다. 또한 고용노동부는 2018년 3월, 사업장의 라돈 노출기준을 600 Bq/m^3 으로 신설하였다. 그러나 작업자들의 라돈 노출을 평가하고 그에 근거하여 건강장해 예방 대책을 수립할 수 있는 기반 조사연구는 여전히 미흡한 실정이다.

따라서 노출기준 신설에 따라 라돈 노출기준을 초과하는 전국 사업장과 위험요인에 노출된 근로자를 파악하는 것이 필요하며, 노출된 근로자에게 적용될 수 있는 저감 대책 마련이 필요하다. 특히 작업자들의 라돈 노출을 평가하고 그에 근거하여 건강장해 예방 대책을 수립할 수 있는 기반 조사연구가 필요하다. 아울러, 생활주변방사선안전관리법과 산업안전보건법, 라돈가이드 등의 비교분석을 통해 라돈 노출 근로자 건강장해 예방을 위한 산업안전보건법 상 보호규정 도입 및 구체적인 가이드를 마련할 필요가 있다.

2. 연구동향

작업자를 대상으로 하는 라돈 노출 평가 연구는 시멘트 제조업체, 지하철 작업자 등을 대상으로 일부 수행된 바 있다. 시멘트 제조업체 7개소를 대상으로 한 라돈 측정 결과, 최소 1.0에서 최대 144.3 Bq/m³에 이르는 라돈 농도가 검출된 것으로 보고되었다(정은교 등, 2015). 한편 지하철 터널 내부와 배수펌프장에서 측정을 실시한 연구 결과에서, 터널 내부는 58.9±50.9 Bq/m³, 배수장은 140.4±66.6 Bq/m³으로 조사되었다(김기연 등, 2015). 또한 사업장 건축물 특성에 따른 라돈 농도 비교 결과, 벽의 재질이 석고보드인 경우 기하평균이 18.1 Bq/m³이었으며 콘크리트의 경우 14.9 Bq/m³였다(정은교, 2014).

라돈의 건강유해성에 대한 연구는 폐암을 중심으로 보고되고 있으며, 지하광부에 대한 코호트 연구와 주택 라돈 피폭에 대한 환자-대조군 연구로부터 라돈 및 자손이 폐암을 초래할 수 있는 증가가 확실하다는 결론에 도달하였다. 일생 흡연자에게서 라돈 노출에 따른 폐암 발생 상대위험도(relative risk)는 비흡연자에 비하여 약 26배 증가하는 것으로 전해진다(Darby et al., 2006).

<표 1-1> 흡연상태 및 평균 라돈농도별 폐암 상대위험도

흡연여부	평균 라돈 농도 (Bq/m ³)		
	<25	100	400
비흡연	1.0	1.2	1.6
흡연 (15-24개비/일)	25.8	29.9	42.3

셀 안의 숫자는 상대위험도(RR, relative risk)를 의미

이와 같이, 라돈에 대한 직업적 노출과 건강영향에 대한 연구는 일부 작업장에서의 노출평가 연구 및 라돈 노출에 따른 폐암 발생의 위험성 산정 연구 형태가 주로 전해지며, 국내에서의 작업장 라돈 노출평가 연구는 2010년대 이후 일부 진행되어 결과가 보고되고 있다.

국외에서도 역시 라돈 노출평가 및 건강영향에 대한 연구가 진행된 바 있다. 지하에서 근무하는 광부들에게 라돈 노출이 발생하고 그로 인한 폐암 위험성이 증가하는 것은 이미 많은 역학적 증거들을 가지고 있다. 최근에는 광산이 아닌 공간에서의 라돈 노출평가 연구가 진행되고 있으며 원료물질이 사용되지 않는 사무공간 등에서의 보고도 전해지고 있다. 이러한 연구결과들에 근거하여 일부 국가들에서 작업자에 대한 라돈 관리 정책이 이루어지고 있다. 미국 OSHA는 작업장에 대한 라돈의 허용기준으로 미국원자력위원회에서 권고하는 기준을 준수하며 최대값으로 100 pCi/L를 설정하였다. 캐나다와 유럽연합, 호주, 이스라엘 등은 400 Bq/m³를 정해놓고 있으며, 라돈에 대한 노출 한도기준으로 연평균 800 Bq/m³, 작업장 관리를 위한 참고기준 400 Bq/m³ 도입이 제안되었다(최은희 등, 2017).

한편, 국내에서 라돈-222 또는 그 붕괴물질(지하 등 환기가 잘 되지 않는 장소에서 노출된 경우)에 노출되어 발생한 폐암이 2013년 업무상질병 인정기준에 새롭게 채택된 바 있다. 이후 사회적 확산 우려와 함께, 우리나라 고용노동부는 2018년 고시 제2018-24호(2018. 3. 20) “화학물질 및 물리적인자의 노출기준”을 통하여 작업장 라돈 노출기준으로 600 Bq/m³을 제정, 고시하였다.

3. 연구목적

본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 라돈의 직업적 노출 특성과 위험요인 목록화
- 작업장 내 라돈 노출 실측 및 평가
- 라돈 노출로 인한 업무상질병 사례 분석
- 국외 관련 제도 및 운영실태 분석
- 생활주변방사선안전관리법과 산안법 간 비교 및 연계성 검토
- 작업장 라돈 가이드 해설서 검토
- 산안법상 라돈 관리 보호규정 제안 및 비용편익, 규제영향분석

II. 연구방법

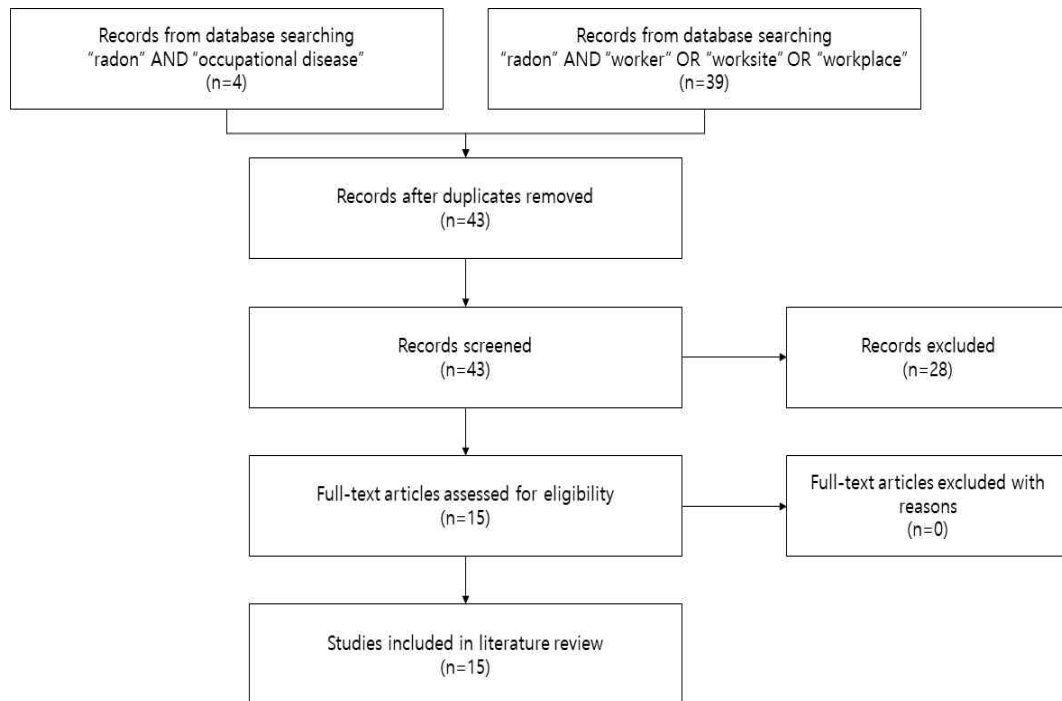
1. 문헌조사

본 연구에서 문헌조사는 라돈에 대한 일반적인 정보와 유해성, 작업장에서의 건강장해 및 산재 사례 조사, 국외 제도 현황 파악 등을 위하여 수행하였다.

작업장 건강장해 현황 파악을 위한 문헌고찰은 체계적 문헌검토 방법을 적용하였다. 검색원은 Pubmed과 Web of Science를 이용하였으며, 검색 조건은 “radon” AND “occupational disease” / “radon” AND “worker” / “radon” AND “worksite” OR “workarea” 등으로 하였다. 검색된 문헌 중 중복을 제외하였다. 동일한 문헌은 아니지만 내용상 중복이 있는 경우, 예를 들어 200x년 라돈으로 인한 함 발생률 추정 수치가 n이었고, 동일한 연구자 집단에 의하여 동일집단 대상으로 201x년의 업데이트 결과를 제시하였다면 최신의 결과만을 반영하였다. 그 밖에 문헌제외 기준은 직업적 노출연구가 아닌 경우(환경 노출 등), 라돈에 대한 수치화된 위험성 또는 노출근거가 없는 경우, 유해위험성 연구가 아닌 평가 방법론에 관한 연구 등은 고찰에서 제외하였다. 또한 원문을 제공받을 수 없는 경우 역시 검토에서 제외하였다. 문헌의 검토는 일차적으로 초록 리뷰 이후 최종 선정된 문헌의 원문 검토로 진행하였다.

아울러, 근로복지공단의 산재 통계를 통하여 국내 라돈으로 인한 직업병 사례를 조사하였다.

그 밖에, 국외 제도 정보 등은 각 정부기관에서 공개하는 웹사이트 및 국내외 공식적으로 발간된 보고서 등을 이용하였으며 가능한 최신의 정보를 검토하였다.



[그림 II-1] 라돈 유해성에 대한 체계적 문헌검토 전략 (PRISMA diagram)

2. 라돈 노출 사업장 현황 파악

1) 의도적 노출 사업장

고용노동부는 라돈 침대 문제에 관한 원자력안전위원회(이하 “원안위”라 함) 발표 후, 노동자 건강보호를 위해 관련 침대 매트리스 제조업체의 모나자이트 사용현황 및 현장 작업자의 건강이상 유무를 확인(2018년 5월)한 바 있다. 또한 모나자이트를 직접 취급하는 사업장에 대한 작업환경 실태조사를 수

행하였다(고용노동부 보도자료 2018. 5. 25). 모나자이트를 사용하는 작업장은 전국에 66개소인 것으로 알려졌다.

본 연구에서는 원안위의 협조를 통하여 모나자이트 사용하는 사업장을 제외한 원료물질 및 공정부산물 취급자로 등록된 66개 사업장에 대한 목록을 확보하였다. 전자메일과 문서를 통하여 현황 파악 협조를 요청하였고 일부 사업장에서 보내온 조사표 및 전화와 전자메일을 통하여 추가조사를 실시하였다.

먼저 66개 사업장을 원안위에서 주어진 자료를 바탕으로 단순 유통업체(32개 사업장)와 원료물질 및 공정부산물을 직접 다루는 제조업체(34개 사업장)로 분류하였다 표 II-1. 이 중 단순 유통업체의 경우 해당물질을 직접 취급하지 않으므로 원료물질 및 공정부산물 제조사업장만을 다루기로 하였다.

<표 II-1> 원료물질 및 공정부산물 사업장 분류

분류	원료물질 및 공정부산물 제조사업장	단순유통업체	합계
업체수	34	32	66

**<표 II-2> 34개 원료물질 및 공정부산물 사업장 대상의 원료 및
공정부산물 종류, 업체 수 현황**

원료물질 및 공정부산물	염화칼륨 및 칼륨 화합물	저어콘 및 저어콘 샌드	인광석	인산 스케일	티탄 철석	배관내부 침적 스케일	실리카 폼	합계
업체수	13(2)	16	1	1	1	1	1	34

* 한 사업체에서 염화칼륨과 인광석을, 다른 사업체에서 염화칼륨과 인산스케일을 함께 다룸. 사업체 수 중복을 피하도록 괄호로 표시함.

단순 유통업체를 제외한 원료물질 및 공정부산물 제조사업장 중 물질유형으로 분류하였다(표 II-2). 염화칼륨 및 칼륨화합물의 경우 라돈의 함량이 매우 적으므로 측정대상 사업장에서 제외하였다. 단, 이 중 한 사업체에서는 염화칼륨과 함께 인산스케일 공정부산물을, 다른 사업체는 염화칼륨과 함께 인광석 원료물질을 다루어 측정대상 사업장에 포함하였다(괄호로 표시). 해당 21개 업체 중 기존의 다른 연구에서 이미 다루어졌던 사업체, 공정부산물을 처분완료하고 등록자 폐지 절차를 밟고 있는 업체(배관내부 침적스케일), 연간 취급량이 소량인 업체(연간 1톤) 등을 제외하였다. 추가 조사로 단순유통과 제조를 병행하는 곳으로 파악되는 대상 업체는 포함시켰으나, 제조업체로 분류되었던 사업장 두 곳은 원료물질 구매 후 바로 직수출 하는 곳과 단순 판매하는 하는 곳으로 밝혀져 제외하였다. 측정 요청을 거절할 경우를 대비하여 연간 취급량이 소량(100톤 미만)인 예비 3곳을 추가하였다.

최종적으로 선정된 15개 후보 사업장 및 예비 3곳의 사업장에 라돈 측정을 위한 협조를 요청하였고, 여러 사정으로 측정을 거절하는 업체들로 인하여 최종적으로 10개의 사업장을 방문하여 라돈을 측정할 수 있었다(표 II-3). 지역적으로 경기지역 3곳, 충청지역 2곳, 전라지역 1곳, 경상지역 4곳을 방문하였다.

2) 비의도적 노출 사업장

인체는 언제나 자연적인 방사선에 노출되어 있으며 이러한 노출은 어느 정도 피할 수 없다. 이러한 자연 속에 존재하는 방사성 물질을 천연방사성물질 또는 자연방사성물질을 'NORM'(Naturally occurring radioactive material)이라고 통칭한다.

<표 II-3> 라돈 측정대상 의도적 노출 사업장

사업장 번호	지역	원료물질	공정부산물	연간취급량(ton)	
				원료물질	공정부산물
A-1	경기	저어콘	-	984	
A-2	경기	실리카폼	-	50	
A-3	경기	저어콘	-	160	
A-4	충청	저어콘	-	220	
A-5	충청	저어콘	-	120	
A-6	경상	저어콘	-	102	
A-7	경상	저어콘	-	600	
A-8	경상	저어콘샌드	저어콘샌드	14	2
A-9	경상	저어콘	-	260	
A-10	전라	저어콘	-	34	

자연 속에 존재하는 암석과 토양 속의 방사성핵종의 농도는 일반적으로 낮다. 하지만, 지각으로부터 광물들이 추출되면서 그들의 물리적, 화학적인 과정을 통해 방사성핵종은 다양한 광물 속에서 그 분포가 불균일해질 수 있으며, 인간의 다양한 활동들이 이러한 NORM 방사성핵종의 농도를 심각하게 증가시킬 수 있다.

본 연구에서는 라돈을 발생시키는 것으로 알려진 원료물질이나 그 공정부산물을 다루는 ‘의도적 노출 사업장’에 대한 연구와 함께 자연적으로 발생하는 ‘비의도적 노출 사업장’에 대한 라돈의 노출평가를 실시하였다. 지하철 공간에 대한 라돈 연구는 이미 다른 연구자들에 의해 많은 부분이 진행되어 왔기에 이를 제외하고 지하 공동구, 터널, 건물의 지하 공간 등을 소재한 우리 일상생활에서도 흔히 볼 수 있는 사업장들을 선정하였다. 의도적인 사업장들에 대한 노출 평가와 비교할 수 있도록 그 측정 사업체 수를 비슷하게 하였다. 표 II-4는

본 연구에서 라돈 측정을 진행한 11개 비의도적 노출 사업장에 대한 정보를 나타냈다.

<표 II-4> 라돈 노출평가를 실시한 비의도적 노출 사업장

사업장 번호	지역	사업장과 공간용도
B-1	경기	지하 공동구1
B-2	충청	대규모사업장1 내 지하 가스공급시설
B-3	경기	터널1
B-4	경기	터널2
B-5	서울	건물1 1층 사무실
B-6	서울	건물2 지하 5층 창고
B-7	경기	연구교육시설1 지하 1층 창고
B-8	경기	대규모사업장2 지하 4층 주차장
B-9	서울	연구교육시설2 지하 2층 기계실
B-10	충청	건물3 지하 공간
B-11	경기	대규모사업장3 지하2층 화학물질 저장소

3) 라돈 측정방법

대상 사업장에 대한 라돈 측정은 ‘실내공기질 공정시험법’의 라돈농도 측정 주 시험법인 알파비적 검출기인 라듀엣(Raduet, Model RSV-8)과 알파트랙(Alpha Track Detector)을 이용하여 측정하였다. 라듀엣에 의한 측정방법은 장기측정방법(수동형)으로 알파선 이외에 베타나 감마선의 영향을 받지 않고 라돈(Radon)과 토론(Thoron)을 동시에 측정할 수 있어 라돈 농도 이외 토론의 농도에 대한 기초적 자료도 확보 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 라돈농도 측

정은 개인노출 측정 장비로 개발된 것이 없어 지역노출 측정이 불가피하다. 다만, 호흡기를 통한 라돈의 노출 특성을 고려하여, 측정기를 근로자의 주 작업 위치 내 호흡기 위치에 가급적 가깝게 설치하고자 한다. 라돈 발생 공정 당 2 지점 이상 측정을 실시한다. 측정기는 주 작업공간 당 총 3개 지점에 설치하고, 측정기의 위치는 벽이나 천장으로부터 30cm 이상, 바닥으로부터 50cm 이상 이격하고 전자파가 발생할 수 있는 전자장비 장비 주변은 피하면서 창문이나 환풍기 등 기류의 이동통로를 피하여 기류에 영향이 없도록 하여야 한다. 본 연구에서 각 사업장과 작업장의 환경에 가급적 맞추어 적용하였다.

측정방법은 장·단기 측정을 병행하였으며, 장기측정(2개월 이상)은 라듀엣과 알파트랙을, 단기측정(일주일)은 이퍼름(E-Perm)을 사용하였다. 통상 5곳에 설치를 하였으나 사업장 규모에 따라 측정 개수를 달리 산정하기도 하였다. 연속 모니터링 측정(1시간)을 위하여 RAD7 및 FRD400을 이용하였다. 라돈 검출기 설치 방법은 수평 장착과 수직 장착으로 나뉜다. 기본 방침은 수평 장착방법으로 설치하되 현장 상황을 고려하여 설치할 공간이 없을 경우 수직형 방법도 병행하여 설치하였다. 표 II-5는 본 연구에 사용된 라돈 측정 장비들이고, 표 II-6은 문헌에 나타난 작업장 라돈 측정 장비와 측정기간에 관한 정리를 한 것이다.

<표 II-5> 측정에 사용된 라돈 측정 장비 목록

모델명	FRD400	RAD7	E-Perm	알파트랙	라듀엣
장비					
측정 방법	연속측정	연속측정	단기측정	장기측정	장기측정

<표 II-6> 작업장 라돈 측정 장비관련 문헌조사

국가	측정 장비	측정 기간	문헌
일본	수동형 라돈/토론 식별모니터	1년	Oikawa et al., 2006
일본	수동형 라돈 검출기	1년	Iyogi et al., 2003
영국	트랙에치(Track-etch)검출기(CR39)	1년	Gilmore et al., 2002
영국	트랙에치(Track-etch)검출기(CR39)	3개월	Denman et al., 2002
영국	수동식 트랙에치(Track-etch) 검출기	3개월	Wiegand et al., 1996
독일	- 스크린 분산 배터리 - 저기압 케이스케이드 충격기 - 옹축 핵 카운터 - PAEC 라돈 모니터	2~3시간	Reichelt et al., 2000
이탈리아	수동형 핵트랙 검출기(CR39)	6개월	Bucci et al., 2011
스페인	- 활성화된 차콜캐니스터 - CR39 핵트랙 검출기	3개월	Sánchez et al., 2012
아일랜드	수동식 알파트랙-에치 검출기(CR39)	9개월	Synnott et al., 2004
그리스	수동식 라돈 검출기(Electrets)	1년	Clouvas et al., 2011
슬로베니아	Karlsruhe 트랙에치 검출기	2개월	Vaupotič et al., 2010
호주	고형상태 알파 검출기(RAD7)	7일	Alharbi et al., 2015
멕시코	수동식 밀폐형 컵 장치(PADC)(CR39)	1년	Espinosa et al., 2009
파키스탄	NRPB 검출기(CR39)	6개월	Rahman et al., 2010
나이지리아	Corentium 모니터	7일	Adegun et al., 2019

3. 관련 국내 법령과의 비교 및 법령 개정안 제안

현재 우리나라의 라돈 노출관리 중 실내 노출관리는 다중이용시설(실내공기질관리법) 및 학교(학교보건법)에 대해서는 라돈 관리 기준이 정립되어 있고, 라돈이 발생하는 사업장 내의 근로자를 위한 법규에 대해서는 원자력위원회와 고용노동부에서 관리기준을 마련하기 위한 노력이 진행 중이다.

최근 원자력안전위원회에서는 생활주변방사선 안전관리법을 개정(개정 : 2019.01.15, 시행 : 2019.07.16)하였고, 이에 따른 생활주변방사선 안전관리법 시행령(개정 : 2019.07.09, 시행 : 2019.07.16)과 시행규칙(개정 : 2019.07.16, 시행 : 2019. 07.16)을 개정하여 시행 중이다. 생활주변방사선 안전관리법에는 생활주변방사선(지각방사선 포함) 뿐 아니라 원료물질로 사용되는 방사선을 취급하는 취급자에 대한 안전조치 사항이 포함되어 있으며, 라돈이 원재료에 포함되어 있고, 이를 취급하는 자들에 대한 안전조치 내용이 생활주변방사선 안전관리법에 포함되어 있다.

반면, 전부 개정된 산업안전보건법은 2020년 1월 16일 시행을 앞두고 있으나, 시행령과 시행규칙이 아직 확정되지 않은 상황이다(2019.09.20. 기준). 이에 본 연구에서는 생활주변방사선 안전관리법과 산업안전보건법을 비교 분석함으로써 근로자들의 라돈노출에 대한 건강보호를 위해 산업안전보건법 시행령 및 시행규칙에 포함되어야 할 내용을 제안하였다.

4. 비용편익 분석

1) 추정 근로자

2019년 2월 고용노동부에서 제시한 작업장 라돈관리 가이드에서는 ① 지하 작업공간(지하철 터널, 지하 공동구, 광산, 터널 굴착장소 등) ② 라돈 발생 원료물질의 취급, 가공 사업장 ③ 우라늄 공장(관련 폐기물 취급 작업 포함), 인산염 비료시설이나 인산염 광물 취급 공장 ④ 인산석고를 포함한 건축자재 제조공장 ⑤ 정유공장 ⑥ 그 밖에 라돈 노출 가능성이 높은 장소를 라돈 노출 우려 작업장으로 제시하였고, 이에 근거하여 해당 작업장의 업종과 근로자수를 추정하였다.

또한, 본 연구에서 라돈 노출 고위험 사업장에 대해 직접 라돈 농도를 측정한 결과를 활용하여 추정에 적용하였다.

2) 분석방법

비용편익 분석은 국가자원의 비용과 국민경제 측면에서의 편익을 파악하여 의사결정에 도움을 주기위한 방법으로 이 때 모든 가치들은 화폐가치로 환산된다. 본 연구에서 비용편익 분석으로는 노출기준 100 Bq/m³에 따른 저감 대책에 소요되는 비용과 저감 대책으로 인한 건강 영향을 편익으로 파악하였다.

(1) 비용분석

비용에 대해서는 직접비용과 간접비용으로 구분하였다. 직접비용은 저감 대책으로 KOSHA(2015)에서 제시된 라돈 농도 측정, 환기, 유입원 차단, 보호구 착용 4가지에 대하여 참조수준별 저감에 필요한 구입비용을 적용하였고, 간접

비용은 환기시설 운영에 들어가는 전기세, 교육으로 소요되는 시간으로 인한 생산성 감소 등의 간접비용으로 구분하였다.

라돈으로 인한 위험도 추정은 WHO에서 흡연과 비흡연자로 구분하여 라돈 수준별로 추정된 폐암 사망 위험도에 의하여 폐암 사망 인원수를 구하였다. 이를 위하여 다음 세 가지를 가정하였다. 첫째, 측정위치별로 전국 지하철 근로자가 동일한 수로 근무한다. 둘째, 지하철 근로자 흡연율은 질병관리본부(Korea Centers for Disease Control and Prevention, KCDC)에서 2017년 만 19세-44세 현재 남성 흡연율 38.1%와 동일하다. 관련 업종에서의 근로자의 성별의 비율이 제시된 통계는 없으나, Kim(2007)의 연구에서 지하철 근로자 대상 석면노출관련 설문조사 시 남성이 97.5%이어서 남성 흡연율 기준으로 하였다.

(2) 편익분석

편익은 직접편익과 간접편익으로 구분하였다. 저감 대책으로 인한 라돈의 건강영향을 고려하였다. 지하 광부의 역학연구결과 라돈 노출수준에 따라 폐암으로 인한 사망자수에 유의한 영향을 미치기 때문에 저감 대책 수준에 대한 폐암으로 인한 사망자수의 감소를 편익으로 하였다.

흡연으로 인한 경우는 생활습관으로 인한 폐암발생의 확률이 있어 입원과 외래 진료비를 적용하였으며, 흡연이 아닌 경우 업무상 질병으로 인정될 수 있는 가능성이 높아 산재진료비, 간병급여, 장의비, 유족보상급여 감소를 직접편익으로 하였으며, 간접편익으로는 치료를 받기 위한 생산성 하락, 외래 이용 시 보호자 시간비용을 적용하였다.

본 연구에서는 폐암 진단 시 기본 5년은 생존한다는 가정으로 폐암 사망자수 감소에 대한 편익을 구하였다.

(3) 비용편익분석과 민감도분석

비용과 편익의 기준선 설정이 필요한데 기준선은 비용과 편익의 추정 대상

이 되는 업종과 직종에 근무하는 근무자의 수는 2017년 이후 일정하고, 측정 지점의 라돈 수준은 연간 변화가 없다고 가정하였다. 비용 후 건강에 대한 편익은 지연효과가 있고, 질병 발생의 시기 지점을 알 수 없기에 분석기간은 10년으로 설정하였다.

본 연구에서는 10개 의도적 라돈 노출 사업장에 대해 3가지 방법으로 라돈 수준을 측정하였다. 기하평균, 산술평균, 최대치의 3가지 방법에 대하여 비용과 편익을 적용하여 각각 비용편익 분석한 것을 민감도 분석으로 하였다.

III. 연구결과

1. 라돈의 직업적 유해위험성 정보

1) 일반적 특성

라돈(Radon, 원소기호 222, Rn)은 주기율표상 86번 원소로 우라늄(Uranium)과 토륨(Thorium)의 방사선 붕괴를 통하여 자연적으로 형성되는 가스 형태의 방사선 동위원소이다. 라돈은 공기, 바위, 물, 토양에 존재하는 천연 방사성 화학 물질로, 다른 물질과 화학적으로 반응하지 않는 불활성이며, 무색·무취의 방사선을 방출한다. 라돈-222는 사람의 일상생활 환경 어느 곳이나 존재하고, 분진에 붙어 공기 중으로 이동할 수 있다. 특히, 토양 내 라돈-222는 일반적인 확산을 통해 불과 몇 미터 거리의 경우 이동할 수 있으며, 균열, 틈 혹은 지하 구멍과 건물 배기구를 통해 수직 대류 이동을 할 수 있다.

라돈은 공기보다 9배 정도 무거워 지표에 가깝게 존재하여 주로 건물 바닥이나 지하실 벽의 균열된 틈을 타고 유입된다. 일반적으로 건물의 높은 층보다 낮은 층에서 높은 농도를 나타낸다. 최근 높은 층에서도 라돈 농도가 높게 관측되고 있는데, 이것은 라돈이 함유된 건축자재를 사용하기 때문이다.

라돈은 환기만 충분히 해도 공기 중 농도를 저감시킬 수 있는데 이는 라돈이 밀폐된 실내공간에서 쉽게 쌓이는 특성이 있기 때문이다. 라돈은 자연적으로 발생하는 방사성 가스로서 땅 밖으로 스며 나와 집과 실내 작업장에 쌓일 수 있으므로 환기가 잘 이루어지지 않는 터널, 갱내, 지하실 등 지하공간에서 더 큰 문제가 될 수 있다.

일반적으로 숨을 쉴 때 흡입되는 라돈 가스는 즉시 방출되고 방사능 위험이

거의 없다. 반면, 라돈의 붕괴 생성물은 기체보다 더 견고한 물질처럼 행동하는 방사성 물질로 대기의 먼지와 물방울에 부착되어 호흡으로 흡입되면 폐 및 기도에 박혀 있게 되며, 위험한 방사선을 방출하여 폐의 민감한 세포에 심각한 손상을 일으킨다.

라돈은 사람이 받는 방사선 선량의 가장 큰 부분을 차지하며, 긴 시간 머무르는 작업장에서 상당한 노출이 가능하다. 국제암연구소(IARC, 1988)는 라돈을 폐암 발암물질로 인정하였다. 8번의 붕괴를 거치면서 알파, 베타, 감마선을 방출하는데, 이러한 붕괴 산물들은 먼지 등에 잘 흡착되어 호흡을 통해 인체에 흡입된 라돈은 붕괴를 일으키면서 알파(α)선을 방출하고 방출된 알파(α)선은 폐 세포와 조직을 파괴한다. WHO의 2009년 보고서에 따르면 폐암 발병원인으로 흡연 다음으로 라돈이 높으며, 전체 폐암의 3~14% 정도를 차지한다.

이러한 라돈의 노출을 최소화하기 위해서 무엇보다 라돈이 어떻게 실내로 유입되는지, 사람에게 노출되는지에 대한 유입 경로를 인지하여 라돈에 노출되는 것을 최소화 할 필요가 있다.

라돈은 아래의 3가지 유입 경로를 통해 실내 또는 사람에게 노출된다.

① 토양으로부터의 유입

실내 라돈의 85~97%는 토양으로부터 건물 바닥이나 벽의 갈라진 틈을 통해 들어온다. 그밖에 건축자재에 들어 있는 라듐 등으로부터 발생(2~5%)하거나, 지하수에 녹아 있던 라돈이 실내로 유입(1%)되기도 한다.

② 건물의 갈라진 틈

라돈은 실내 등 밀폐된 공간에 고농도로 축적될 수 있다. 토양층을 통과해 올라온 라돈이 실외보다 압력이 낮은 건물 내부로 유입되어 쌓이게 된다.

③ 실내공기 호흡 시 노출

라돈에 노출되는 경로의 약 95%는 실내공기를 호흡할 때이다. 이밖에 샤워를 할 때, 물을 마실 때도 지하수에 녹아있는 라돈에 노출될 수 있다. 식품 섭취에 의한 유입 가능성도 있으나, 그 확률은 매우 낮은 것으로 알려져 있다.

2) 작업장에서의 건강장해 예방 사례

라돈에 의한 직업적 노출 및 건강영향 사례를 파악하기 위하여 체계적 문헌 검토를 실시한 결과, 15편의 학술논문이 리뷰에 활용되었다. 라돈의 직업적 노출에 있어 가장 흔하게 보고되는 사례는 광산 작업이었다. 한 연구에서 비철광산 작업자들의 연간 유효선량은 2.1 ± 1.9 mSv/yr로 산출되었다(Olszewski et al., 2010). 또한 일반적으로 직업에 종사하는 기간이 긴 탄광 근로자들에게서 오랜 기간 라돈의 노출이 일어난다는 보고가 전해진다(Veiga et al., 2007). 한 연구에서는 지하 광부보다 동굴 관광 가이드가 더 높은 수준에 노출되는 것으로 평가되기도 하였다(Colgan et al., 2008). 광산이나 지하 작업장 외에 제조 사업장에서도 라돈 농도가 실측되었는데, 인산염(phosphate) 생산 작업장에서 공정에 따라 라돈 노출 수준이 차이를 보였으며(Mulas et al., 2016), 토탄 발전 시설(peat-fired power station)에서도 라돈 노출이 가능하였다(Organo et al., 2005). 또한 은행에서도 라돈이 검출되었는데 특히 밀폐 내벽으로 지어진 금고가 원인이 되었고(Urso et al., 2008), 내화 산업의 광물 원재료 취급 작업자에게도 라돈이 노출될 수 있었다(Righi et al., 2009). 한 연구에서는 가정에 비하여 사무실 근로자에게서 8배 높은 수준의 라돈이 검출된 바 있으며(Whicker and McNaughton, 2009), 최근의 연구에서는 다양한 작업장 총 248개 지점에서 측정을 실시한 결과 전체 중 27.4%에서 300 Bq/m³을 초과하였고 그 중 의료 관련 사업장이 가장 높은 농도 평균 및 초과율을 보였다(Ruano-Ravina et al., 2018).

라돈 노출로 인한 직업적 건강영향은 현재까지 폐암에 한정하고 있으며 우라늄 광산 작업자들의 암 위험성과 사망률이 산출되었다(Park et al., 2002; Tirmarche et al., 2004). 4,124명의 우라늄 광산 근로자들 중, 617명의 라돈 관련 폐암 사망과 6,071인-년(person-years of life) 손실이 추정된 바 있다(Keil

AP et al., 2015). 우리나라 광산 근로자들은 또한 백혈병, 림프종, 다발성골수증 등으로 인한 사망 위험이 제기될 수 있다(Zablotska et al., 2014).

직업성 역학 근거 등을 취합하여 분석하였을 때, 라돈은 전체 직업성 암 부담의 약 1.5%를 차지하며(Hutchings et al., 2012), CAREX를 통한 EU 근로자들의 발암물질 노출 산정 결과 라돈 노출 근로자는 2,700,000명으로 추정되었다(실리카 3,200,000명, 벤젠 1,400,000명, 디젤연소물 3,000,000명)(Kauppinen et al., 2000).

2000년부터 2018년까지 발간된 직업병진단사례집을 검토한 결과 2005, 2006, 2008, 2011년에 폐암 발병에 대한 업무상질병 사례가 보고되었으며 2010년에 두경부암에 대한 사례가 진해지고 있었다. 각 사례에서 다양한 유해인자가 존재하고 있었으며 그 중 철도운행 작업자에 대한 폐암 사례가 라돈 노출의 업무관련성이 높은 것으로 전해진다.

<표 III-1> 라돈과 관련한 업무상질병 판정현황

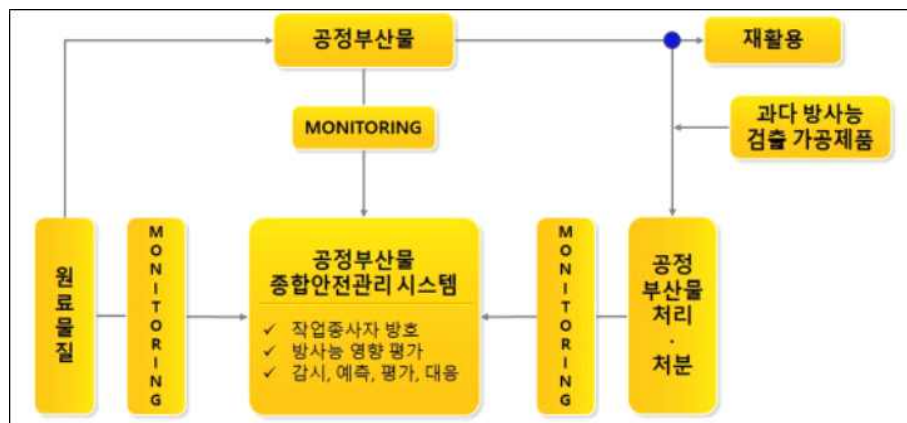
연도	작업종류	질병종류	관련요인	판정
2011	건설 기술	폐암	라돈, 호흡성분진, 디젤연소 가스, PVC, 석면	업무관련성 높음
2010	모터카 운전	두경부암	라돈, 석면, PAH	쟁점
2008	철도 운행	폐암	라돈	업무관련성 낮음
2006	철광 채광부	폐암	라돈, 결정형유리규산, 크롬	업무관련성 높음
2005	지하철 유지보수	폐암	라돈, 석면, 디젤엔진연소물질, PAH	업무관련성 높음

* 출처: 직업병 진단사례집 (2000-2018)

2. 원료물질 및 공정부산물의 종류와 방사성 물질 함유 가능성

생활주변방사선 종합 안전관리를 위하여 원자력위원회에서는 ① 원료물질, 공정부산물 취급자 등록 등 관련 인허가 및 국내 유통현황정보 관리, ② 결합/부적합 가공제품에 대한 조치, ③ 방사선감시기 설치 및 운영, ④ 생활주변방사선 안전관리 실태조사 및 분석, ⑤ 생활주변방사선 정보의 관리를 하고 있으며 해양수산부 및 관세청에서는 방사성오염물질의 국내 유입 감시를 위하여 ① 무역항 방사선감시기 위탁운영 지원, ② 방사성오염 재활용고철 국내 유입 차단, ③ 수입 공산품에 대한 세관 방사선 감시를 하고 있다.

산업원료광물은 국내 산업에서 주도적으로 사용되어 유통되는 원료광물을 의미하며 이를 일차적으로 변화 및 가공처리한 반제품이나 부산물 및 폐기물 등은 산업원료물질로 분류된다. 원료물질, 공정부산물 및 가공제품에 대한 안전 관리와 작업자, 사용자 안전 확보를 위하여 원료물질/공정부산물 취급사업장의 작업자 안전 확보, 자연방사성물질(NORM) 함유 가공제품의 사용자 안전 확보, 자연방사성물질(NORM) 폐기물과 사용부적합 가공제품에 대한 안전한 처리/처분을 하고 있다(그림 III-1).



[그림 III-1] 공정부산물 종합안전관리 시스템

1) 원료물질의 방사성물질 함유 가능성

① 염화칼륨, 칼륨화합물

- 취급물질의 특성

염화 칼륨(KCl) 화합물은 칼륨과 염소로 이루어진 금속 할로겐 화합물인 염이다. 순수한 상태에서 냄새를 느낄 수 없으며 하양거나 무색의 입방체 결정 구조를 볼 수 있다. 쓰고 짠맛이 난다. 탄산 칼륨, 염소산 칼륨, 질산 칼륨 등의 칼륨염의 제조 원료이기도 하며 비료로 쓰이기도 한다.

- 방사성물질 함유 가능성

관리대상 주요핵종(U, Th, Rn, K) 중에서 40K를 포함하고 우라늄/토륨/라돈/토론과 같은 방사성물질 포함 가능성은 아주 낮다.

포타슘 화합물을 취급하는 종사자에 대한 내부피폭방사선량평가 결과 10-6~10-10 mSv/y 정도로 아주 낮은 결과를 보였으며 외부피폭방사선량도 모두 1 mSv/y 미만으로 평가되어 종사자에 대한 안전조치는 불필요한 것으로 판단된다(구본철 외, 2017).

- 참고문헌

https://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_chloride

구본철 외, 2017. 2016년도 생활주변방사선 안전관리 실태 조사 및 분석.

② 인광석

- 취급물질의 특성

인광석(Phosphate rock)은 인회석(Apatite)을 함유하는 암석으로 생화학 기원의 퇴적암으로 또는 화성암 기원으로 맥상으로 나타난다. 인회석과 인광석은 인의 함량에 따라 광물 가치가 결정되며 주로 비료원료로 많이 사용된다. 이 밖에 인회석은 인산제조, 의약품, 반도체, 세라믹, 실크, 섬유, 방충제, 설탕 정련, 폭약 등에도 사용되고 있다. 인의 순도가 낮은 경우에는 품위를 높여주는

선광 작업을 거쳐 사용한다. 인산이나 비료용으로 사용하는 인회석(인광석 포함)은 인이 30% 이상 함유되어야 한다.

- 방사성물질 함유 가능성

인광석은 약 30개 나라에서 내수 및 해외 수출용으로 생산되고 있으며 거의 대부분의 인광석은 노천에서 채굴된다. 국내 인광석 취급 산업체의 경우에는 중국, 모로코 등에서 인광석을 수입하여 인산비료를 생산하고 있다. 일반적으로 원광 처리과정에서는 원료에 존재하는 226-Ra의 80%, 232-Th의 30%, 238-U의 14%가 인산석고에 남아 있다. 우라늄과 토륨은 원래 값(총 우라늄과 토륨의 70%)의 약 150% 까지 농축된다(IAEA, 2003).

- 참고문헌

IAEA, 2003. Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation, IAEA Technical Report Series No. 419. IAEA.

③ 저어콘, 저어콘 샌드

- 취급물질의 특성

보통 저어콘이 가장 흔하게 발견되는 암석은 화강암 계열의 암석이다. 편광 현미경을 이용하면 흑운모나 백운모 혹은 결정 경계면에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 저어콘은 무척 풍화에 강해서 어지간한 환경에서는 손상되지 않는다는 점이고, 또 하나는 이 광물에서 Zr은 4가 양이온이며 이 자리를 우라늄과 토륨, 하프늄이 쉽게 치환할 수 있다. 보통 Zr, Hf, Th, U은 고준위원소(High Field Strength Elements, HFSEs)라고 부르는 집단에 속한다. 이들은 마그마가 결정을 만들 때 대부분 참여하지 않는다. 액체와 너무 친하기 때문인데, 바로 이 지르콘은 그런 고준위원소를 잘 받아들이는 마그마 속 몇 안되는 광물이다. 그래서 지르콘 내에는 다른 광물과는 비교를 거부할 정도로 고준위원소 농도가 높다(Bergamini, M. et al. 1985).

- 방사성물질 함유 가능성

저어콘과 저어콘 샌드는 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 등을 포함하고 있는 것으로 알려져 있다(Bergamini, M. et al, 1985).

- 참고문헌

Bergamini, M. et al. Radiation protection aspects of the use of zircon sand. Sci. Total Environ., 45 (1985) 135.

④ 보오크사이트

- 취급물질의 특성

알루미늄과 수산화알루미늄을 제조하는 (주)KC에서 사용하는 보오크사이트는 “자연기원방사성 물질(NORM)”에, 가공 중 발생하는 폐기물 또는 부산물인 red mud는 “인위적으로 농축된 자연기원방사성물질(TENORM)”에 해당된다. 이 연구는 NORM의 대량사용시설인 (주)KC 공장 내부 및 주변 지역의 지질 특성, 토양에 대한 광물학적 및 지화학적 분석을 수행하여 향후 작업장과 그 주변 지역의 방사능 피복량을 측정하고 방호하기 위한 과학적인 기초자료를 제공하고자 한다. (주)KC 공장 내부 및 인근지역 토양의 광물조성은 석영, 장석, 운모, 고령토, 깃사이트, 세피올라이트 등 모암으로부터 유래된 광물조성과 적철석, 보에마이트, 방해석 등 원광석인 보오크사이트로부터 유래된 광물조성으로 혼화되어 있다(문동혁 외, 2010).

- 방사성물질 함유 가능성

(주)KC 공장 인근지역토양의 평균 U 함량은 4.7 ppm, Th 함량은 23.6 ppm으로서 Th 함량이 다소 높게 나타난다. 토양의 ^{40}K 의 농도는 100~1,433 Bq/kg, ^{226}Ra 의 농도는 8.4~179 Bq/kg이고 ^{232}Th 의 농도는 13.5~300 Bq/kg으로서 높은 농도는 보이지 않으나 상대적으로 높은 ^{226}Ra 농도는 red mud 적재장 주변에서 확인된다. 토양시료의 외부 위해지수 범위는 0.10~1.66이며 평균 0.63으로서 전체적으로는 위해 기준치로 제시되는 1.0 이하이지만 41개 지

점 중 4개 지점이 1.0 이상을 나타난다(문동혁 외, 2010).

- 참고문헌

Bergamini, M. et al. Radiation protection aspects of the use of zircon sand. Sci. Total Environ., 45 (1985) 135.

⑤ 실리카폼

- 취급물질의 특성

실리카 폼은 실리콘(Si), 페로실리콘(FeSi), 실리콘 합금 등을 제조할 때에 발생하는 폐가스 중에 포함되어 있는 SiO₂를 집진기로 수집 여과하여 얻어지는 마이크로 실리카 입자로서 고강도 시멘트 및 콘크리트 제품, 내화물, 그리고 기타 석면 등의 대체 등 다양한 분야에 응용하는 제품이다.

실리카 폼은 SiO₂를 96.0%이상 포함하고 있다.

- 방사성물질 함유 가능성

관리대상 주요핵종(U, Th, Rn, K)을 포함하지 않음.

우라늄/토륨/라돈/토론과 같은 방사성물질 포함 가능성은 아주 낮음.

- 참고문헌

https://en.wikipedia.org/wiki/Silica_fume

2) 공정부산물의 방사성물질 함유 가능성

① 티탄철석 공정부산물

- 취급물질의 특성

화학조성식 FeTiO_3 이며 일메나이트(ilmenite)라고도 한다. 부성분으로 Mg, Mn, Fe를 함유한다. 굳기 5~6, 비중 4.79이며 쪼개짐이 없고 철흑색(鐵黑色)의 불투명한 금속광택이 있으며 조흔색은 흑갈색이다.

- 방사성물질 함유 가능성

티탄철석 취급 사업장은 대부분의 공정이 closed system으로 이루어져 있고 취급 하는 원료물질인 티탄철석과 생산제품인 이산화티타늄의 방사능농도가 낮아 해당 사업장 종사자의 피폭방사선량은 최대 0.13 mSv/y로 평가되었다. 다만, 일부 공정에 서라뚝의 농도가 높은 스케일이 발생하는 것으로 알려져 있으므로 해당 시설의 교 체 또는 해체 작업 중에는 방사선 안전관리 측면에서 주의가 필요하다(고상모 외, 2008).

- 참고문헌

고상모, 유장한, 류충렬, 김대형, 김지환, 이홍진. 2008. 천연방사성 산업물질 실태조사. KINS/HR-858. 한국원자력안전기술원. 253pp.

② 인산스케일

- 취급물질의 특성

인광석은 주로 인산질 비료생산의 원료로 주로 비료공장에서 사용된다. 인광석은 성분에 따라 수산화인회석, 염화인회석으로 구분된다.

화학식은 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$ 으로 피상의 인회석을 포스포라이트(Phosphorite)라고 일반적으로 부른다. 인광석 가공공정 내 슬러지, 원석먼지, 파이프 스케일이 평균보다 높은 수준의 방사성 물질을 포함할 수 있다(IAEA, 2003). 공정부산물들은 다양한 산업 현장에서 발생될 수 있는데, 농도가 낮더라

도 발생량이 매우 많아서 주변 환경이나 일반 대중에 미치는 영향이 크거나, 비록 발생량이 적다하더라도 포함된 천연방사성물질의 농도가 매우 높아서 일반 대중이나 산업계 종사자에게 방사선에 의한 피폭을 증가시킬 소지가 있는 경우에 따로 분류하여 관리를 해야 할 필요성이 발생하게 된다.

- 방사성물질 함유 가능성

인산 공정에서 추가적인 폐기물은 공정 파이프, 여과탱크 등에서 발생하는 소량의 스케일이며, 파이프를 마모시키기 때문에 주기적으로 제거되어야 한다. 비록 이러한 폐기물 이 생산된 인산석고의 부피와 비교해서 그리 많은 부하가 되는 것은 아니지만, 이들은 일부 핵종의 경우에는 인산석고 보다 1,000배 이상 까지 높은 방사능 농도를 보인다(IAEA, 2003).

- 참고문헌

IAEA, 2003. Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation, IAEA Technical Report Series No. 419. IAEA.

③ 배관 내부 침적 스케일 등

- 취급물질의 특성

어떤 물질을 위하여 사용하는 배관이나에 따라 방사성물질의 포함여부가 결정됨.

- 방사성물질 함유 가능성

유류와 가스에 사용된 배관의 내부 침적 스케일에는 방사성물질이 포함될 가능성이 높음(Health Canada, 2011).

- 참고문헌

Health Canada, 2011. Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring

Radioactive Materials (NORM). ISBN: 978-1-100-23019-1

3. 국내 라돈 노출 사업장 측정 결과

의도적인 노출사업장 10곳과 비의도적인 노출사업장 11곳을 2019년 6월 27일부터 2019년 10월 8일까지 약 100 일 정도에 걸쳐 측정을 실시하였다. 각각의 라돈 측정기에 대한 측정기간을 각 사업장 별로 표 III-2에 표시하였다. E-Perm에 의한 단기측정은 대부분 7~8일 정도 측정을 하였고, Alpha Track과 Raduet에 의한 장기측정의 경우 대부분 20일~80일 정도 측정을 하였다. 비의도적 노출사업장 B-11에서는 단기측정만 실시하였다. 또한 의도적 노출 사업장에서의 원료물질 및 공정부산물 관련된 작업종사자들의 인원을 사업장 별로 파악하여 나타내었다.

**<표 III-2> 의도적 및 비의도적 노출 사업장의 단기 및 장기
라돈측정기 측정기간과 의도적 사업장의 관련 작업 종사자 수**

의도적 노출 사업장	E-Perm (일)	Alpha Track & Raduet (일)	관련 작업 종사자 수 (명)	비의도적 노출 사업장	E-Perm (일)	Alpha Track & Raduet (일)
A-1	7	75	22	B-1	7	73
A-2	7	69	4	B-2	9	48
A-3	7	61	10	B-3	7	41
A-4	7	63	50	B-4	7	42
A-5	12	55	36	B-5	7	15
A-6	7	77	17	B-6	8	19
A-7	7	63	30	B-7	7	15
A-8	7	29	9	B-8	7	14
A-9	22	56	58	B-9	7	7
A-10	11	67	10	B-10	8	8
				B-11	7	-

1) 의도적 노출 사업장에서의 라돈 측정농도 결과

10개의 의도적 노출 사업장(A-1~A-10)을 방문하여 라돈 측정을 하였다. 단기측정, 장기측정, 연속 모니터링 측정(RAD7, FRD400)을 하였다. 각 사업체의 공정 및 측정위치별 라돈 측정값과 시료수, 산술평균(AM: Arithmetic Mean), 표준편차(SD: Standard Deviation), 기하평균(GM: Geometric Mean)과 기하표준편차(GSD: Geometric Standard Deviation), 범위(Range: 최소값~최대값)를 표시하였다. 단, 연속측정의 경우 사업장 당 측정 수(1~3곳)가 적어 기하평균과 기하표준편차 값을 계산할 수 없는 경우도 있었다.

의도적 노출 사업장의 공정을 원료물질에 초점을 맞추어 간략히 나누어 보면, 원료물질 보관창고, 원료물질 혼합 공정(혼합, 믹싱, 유약 등), 혼합된 원료물질을 투입하는 공정(시유, 스프레이, 코팅 등), 그 이후 사업체에 따라 성형, 소성, 가공, 선별(검사) 등을 거친다.



[그림 III-2] 원료보관창고 측정



[그림 III-3] 유약(좌) 및 시유(우) 공정

참고) 유약: 원료물질 혼합 공정 | 시유: 원료물질 투입 공정

사업장 A-1에서 라돈농도가 기하평균으로 41.3 Bq/m^3 (이팜), 50.9 Bq/m^3 (알파트랙1), 90.3 Bq/m^3 (알파트랙2)이 측정되었다. 절단 공정이 있는 위치에서 가장 높은 라돈노출농도 값(215.6 Bq/m^3)이 이팜에 의하여 측정되었고 이는 가장 높은 농도를 보여줄 것으로 여겨졌던 원료보관창고의 농도(이팜 측정값, 45.5 Bq/m^3)보다 대략 5배 정도 높다. 반면 알파트랙에 의한 라돈 농도 측정값은 디확실에서 가장 높은 값(136.8 Bq/m^3)을 나타낸 것을 제외하고 원료보관창고로부터 점차 그 노출농도가 조금씩 낮아지는 경향을 보여주었다.

A-2는 본 의도적 노출 사업장 중 유일하게 다른 원료물질인 실리카폼이 사용되었다. 실리카폼은 다른 원료물질들에 비하여 우라늄/토륨/라돈/토론 등과 같은 방사성 물질의 포함 가능성이 낮은 것으로 알려져 있다. 사업장 A-2의 원료보관창고에서 가장 높은 라돈농도, 209.7 Bq/m^3 값이 이팜에 의하여 측정되었으며 표 III-4에 나타나는 바와 같이 공정이 진행될수록 라돈 농도의 수치가 점차 낮아졌다.

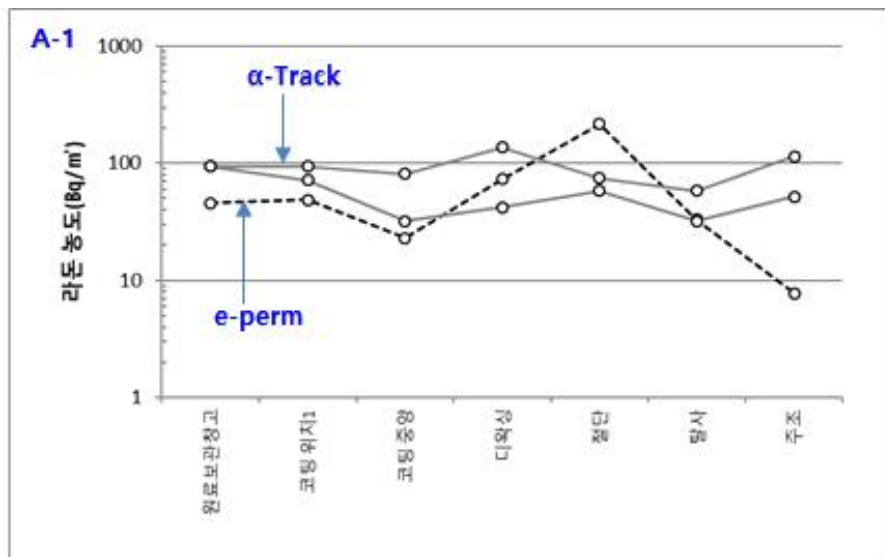
의도적 노출 사업장 A-3에서 이팜 측정값 중, 원료보관창고에서 가장 높은 농도인 78.1 Bq/m^3 값이 나타났다. 사업장 A-3의 경우 해당 사업장의 여러 공정 중 원료물질인 제어콘이 취급되는 공정이 매우 단순하여 혼합공정만을 거쳐 바로 통에 넣어져 밀봉된다. 따라서 이팜에 의해 측정된 라돈 농도(기하평균

19.4 Bq/m³)가 낮게 나타난 것으로 보인다.

<표 III-3> 의도적 노출 사업장 A-1의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

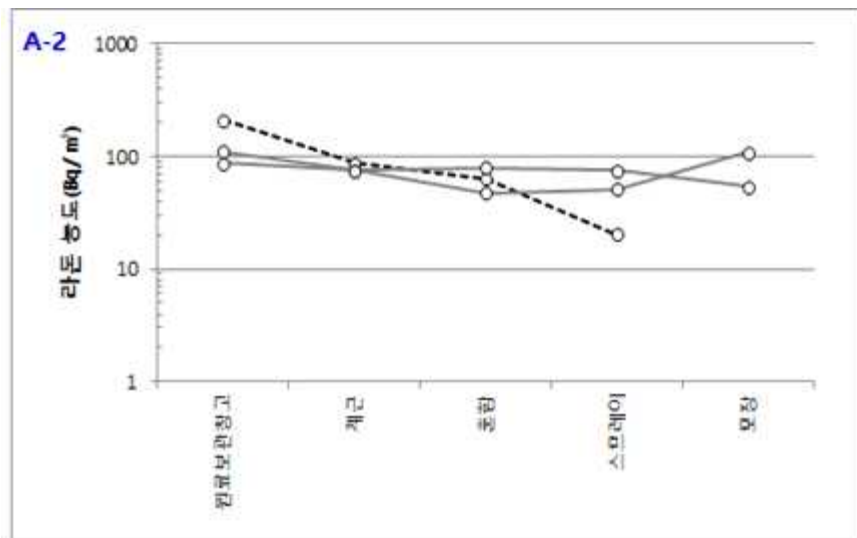
공정 및 측정위치	원료 보관 창고	코팅 위치	코팅 중앙	디확성	절단	탈사	주조	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	45.5	48.4	22.9	73.1	215.6	33.0	7.8	7	63.8±70.1	41.3(2.8)
Alpha Track1	94.3	71.4	32.2	42.0	58.3	32.2	51.8	7	54.6±22.5	50.9(1.5)
Alpha Track2	94.3	94.3	81.2	136.8	74.7	58.3	113.9	7	93.4±25.9	90.3(1.3)
Raduet	20.2	18.7	N.D	N.D	13.8	N.D.	N.D.	7	17.6±3.3	17.3(1.2)
RAD7	16.4	20.6			25.2			3	20.7±4.4	20.4(1.2)
FRD400	16.0	18.0			7.0			3	13.7±5.9	12.6(1.7)



[그림 III-4] 의도적 노출 사업장 A-1의 단기(이perm) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-4> 의도적 노출 사업장 A-2의 라돈 측정농도 결과(단위 Bq/m³)

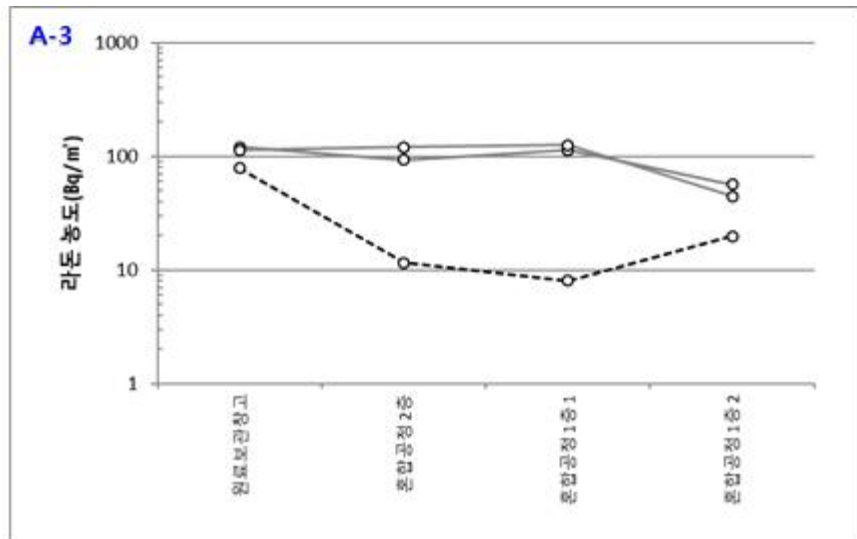
공정 및 측정위치	원료 보관창고	계근	혼합	스프레이	포장	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	209.7	86.0	63.1	20.2	N.D.	5	94.7±81.3	69.3(2.6)
Alpha Track1	110.8	75.3	46.9	50.4	107.3	5	78.1±30.3	73.3(1.5)
Alpha Track2	86.0	75.3	78.8	75.3	54.0	5	73.9±11.9	73.0(1.2)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5		
RAD7	16.4	16.8			24.6	3	19.3±4.6	18.9(1.3)

**[그림 III-5] 의도적 노출 사업장 A-2의 단기(이점) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과**

<표 III-5> 의도적 노출 사업장 A-3의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

공정 및 측정위치	원료보관 창고	혼합 공정 2층	혼합공정 1층1	혼합공정1층 2	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	78.1	11.5	8.0	19.7	4	29.3±32.9	19.4(2.7)
Alpha Track1	120.6	92.5	112.6	56.3	4	95.5±28.7	91.7(1.4)
Alpha Track2	112.6	120.6	124.6	44.2	4	100.5±37.9	93.0(1.6)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	16.8	4	16.8	16.8
RAD7	32.7				1	32.7	32.7
FRD400		4.0			1	4.0	4.0



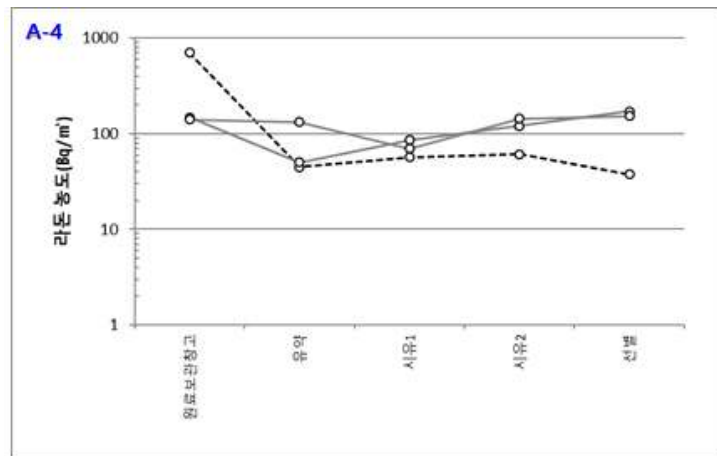
[그림 III-6] 의도적 노출 사업장 A-3의 단기(이점) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

사업장 A-4의 이팜에 의하여 측정된 농도는 703.5 Bq/m^3 로서 고용노동부에
서 고시한 생활주변방사선 안전관리법의 라돈 노출기준 600 Bq/m^3 을 넘는 수
치를 보였다. 대체적으로 이팜에 의한 라돈 측정농도는 원료보관창고에서 높고
공정이 지남에 따라 그 농도가 낮아지는 반면, 알파트랙에 의한 장기측정 농도
는 그 값이 모든 공정에서 유사하게 나타났다.

<표 III-6> 의도적 노출 사업장 A-4의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m^3)

공정 및 측정 위치	원료 보관 창고	유약	시유1	시유2	선별	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	703.5	44.5	56.5	60.9	37.5	5	180.5±292.5	83.4(3.3)
Alpha Track1	148.0	50.0	86.0	121.0	171.0	5	115.2±48.3	105.7(1.6)
Alpha Track2	140.0	132.0	70.0	144.0	152.0	5	127.6±33.0	123.1(1.4)
Raduet	14.9	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5	14.9	14.9
RAD7	16.8	22.9			N.D.	3	19.9±4.3	19.6(1.2)

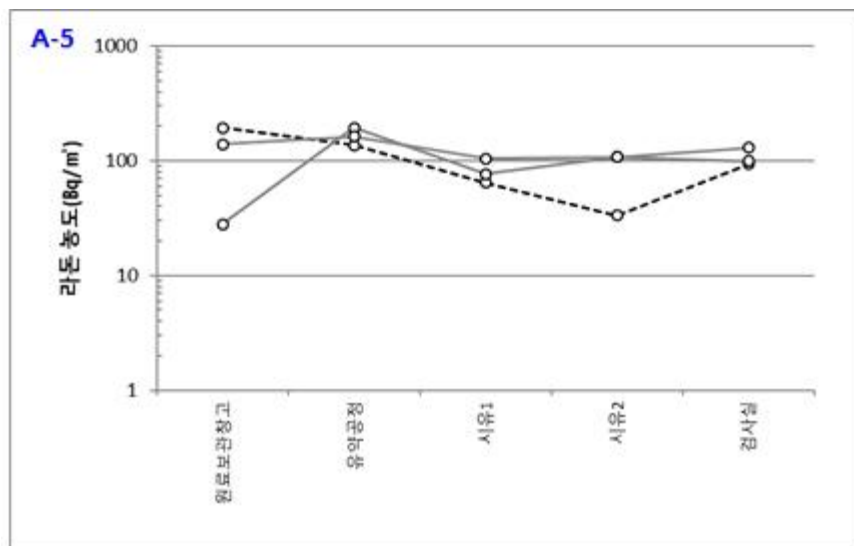


**[그림 III-7] 의도적 노출 사업장 A-4의 단기(이팜) 및
장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과**

<표 III-7> 의도적 노출 사업장 A-5의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

공정 및 측정 위치	원료 보관 창고	유약	시유1	시유2	검사실	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	193.3	136.4	64.2	33.4	93.6	5	104.2±62.7	88.1(2.0)
Alpha Track1	28.0	193.0	77.0	108.0	99.0	5	101.0±60.0	85.0(2.0)
Alpha Track2	139.0	162.0	104.0	108.0	130.0	5	128.6±23.7	126.9(1.2)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5		
RAD7	16.4					1	16.4	16.4



[그림 III-8] 의도적 노출 사업장 A-5의 단기(이펙) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

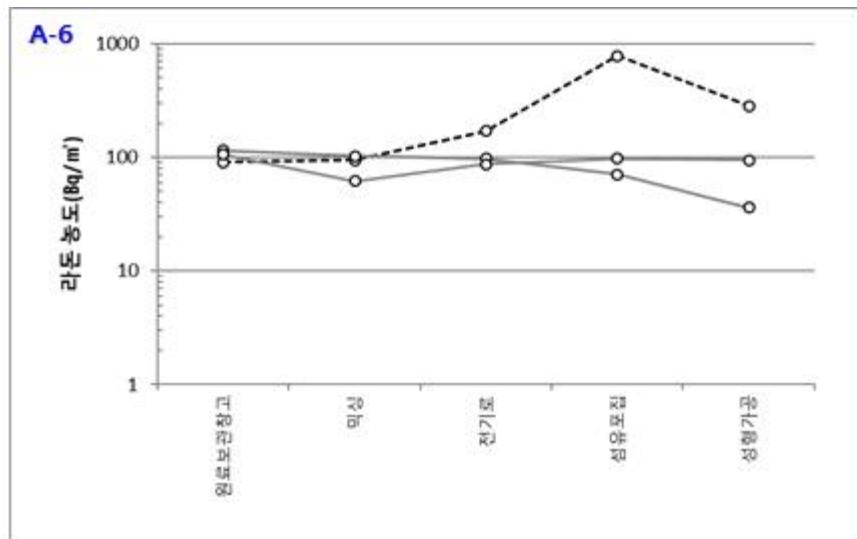
사업장 A-6의 섬유포집 공정 지점에서 이팜에 의한 라돈측정 값이 780.9 Bq/m^3 표 III-8로, 이는 생활주변방사선 안전관리법 라돈기준 600 Bq/m^3 을 초과하는 값이다. 본 연구에서 방문한 모든 사업체 중 이팜에 의한 가장 높은 기하평균값인 200.4 Bq/m^3 을 나타냈다. 사업장 A-7의 이팜에 의한 라돈측정 산술평균값은 방문한 사업체 중 가장 높은 값인 425.4 Bq/m^3 을 보였다. 원료보관창고(874.5 Bq/m^3), 성형1($1,066.3 \text{ Bq/m}^3$), 소성(582.3 Bq/m^3)에서의 높은 라돈 농도를 보인 것과 다르게 나머지 공정에서 급격히 낮은 값을 보였으며, 반면 알파트랙에 의한 장기측정에서는 라돈의 농도변화의 폭이 크지 않았다($75.1 \sim 156.8 \text{ Bq/m}^3$).

사업장 A-8은 저어콘샌드의 원료물질과 공정부산물을 취급하는 곳으로 이팜에 의한 라돈 농도가 낮게 측정되었다(기하평균 32.3 Bq/m^3). 그러나 알파트랙에 의한 라돈농도는 대부분 모든 공정에서 높게 나타났다(표 III-10). 사업장 A-9는 이팜에 의한 라돈 노출농도가 원료보관창고(86.2 Bq/m^3)에서 가장 높게 나타났으며 공정이 진행될수록 점점 줄어드는 경향을 보였으나 알파트랙에 의한 라돈 측정값은 원료보관창고 이후의 공정에서도 라돈 농도가 줄어들지 않았다.

<표 III-8> 의도적 노출 사업장 A-6의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

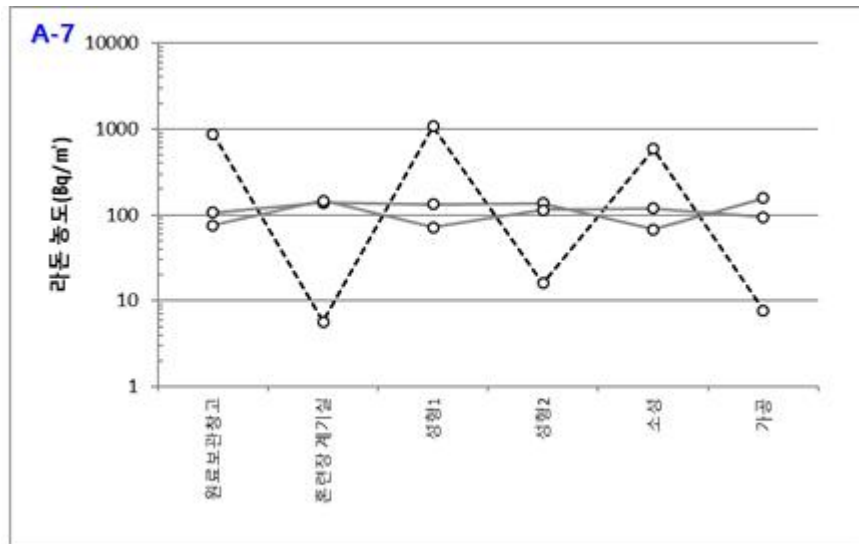
공정 및 측정 위치	원료 보관 창고	믹싱	전기로	섬유 포집	성형 가공	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm (Bq/m ³)	90.6	94.6	170.8	780.9	282.9	5	283.9±288.5	200.4(2.4)
Alpha Track1	115.0	103.0	97.0	71.0	36.0	5	84.4±31.5	78.3(1.6)
Alpha Track2	106.0	62.0	87.0	97.0	94.0	5	89.2±16.7	87.8(1.2)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5		
RAD7 (Bq/m ³)	16.4					1	16.4	16.4



[그림 III-9] 의도적 노출 사업장 A-6의 단기(이펙) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-9> 의도적 노출 사업장 A-7의 라돈 측정농도 결과(단위 Bq/m³)

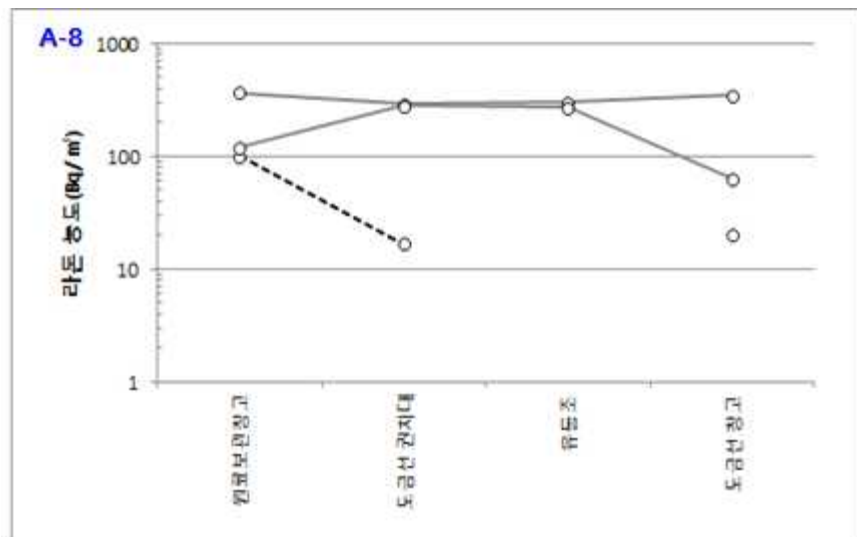
공정 및 측정 위치	원료 보관 창고	혼련장 계기실	성형1	성형2	소성	가공	시 료 수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	874.5	5.7	1,066.3	16.0	582.3	7.8	6	425.4±480.7	85.3(12.2)
Alpha Track1	106.2	137.4	133.5	137.4	67.3	156.8	6	123.1±31.8	118.9(1.4)
Alpha Track2	75.1	145.2	71.2	114.0	118.2	94.5	6	103.0±28.3	99.8(1.3)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	6		
RAD7				16.4			1	16.4	16.4

**[그림 III-10] 의도적 노출 사업장 A-7의 단기(이점) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과**

<표 Ⅲ-10> 의도적 노출 사업장 A-8의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

공정 및 측정 위치	원료 보관 창고	도금선 권치대	유동조	도금선 창고	시 료 수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	99.8	16.7	N.D.	20.2	4	45.6±47.0	32.3(2.7)
Alpha Track1	366.0	290.0	299.0	350.0	4	326.3±37.4	324.6(1.1)
Alpha Track2	121.0	282.0	273.0	63.0	4	184.8±109.7	155.6(2.1)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	4		
RAD7	16.4		24.7	16.8	3	19.3±4.7	18.9(1.3)

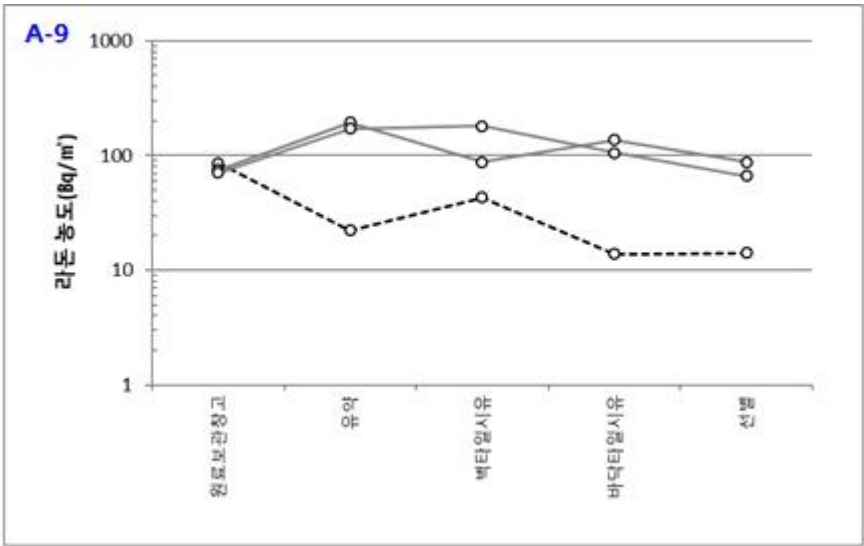


[그림 Ⅲ-11] 의도적 노출 사업장 A-8의 단기(이펙) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-11> 의도적 노출 사업장 A-9의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

공정 및 측정 위치	원료 보관 창고	유약	벽타일 시유	바닥 타일 시유	선별	시료 수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	86.2	22.2	43.0	13.8	14.1	5	35.8±30.6	27.6(2.2)
Alpha Track1	74.9	193.1	88.0	136.2	88.0	5	116.1±49.0	108.8(1.5)
Alpha Track2	70.5	171.2	180.0	105.5	66.1	5	118.7±54.3	108.7(1.6)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5		
RAD7	24.6	16.4			22.4	3	21.1±4.2	20.8(1.2)

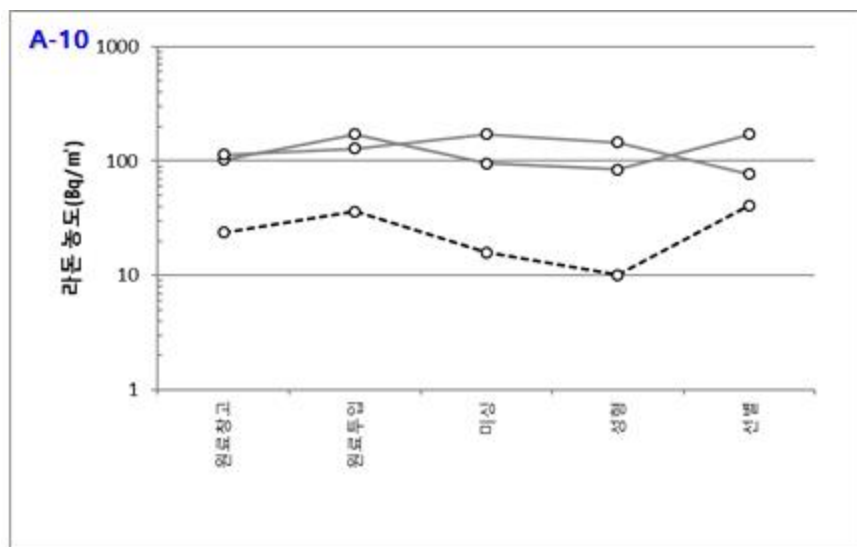


[그림 III-12] 의도적 노출 사업장 A-9의 단기(이팜) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-12> 의도적 노출 사업장 A-10의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

공정 및 측정 위치	원료 보관 창고	원료 투입	믹싱	성형	선별	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	23.8	36.2	15.9	10.1	40.8	5	25.4±13.1	22.4(1.8)
Alpha Track1	103.0	172.0	95.0	84.0	172.0	5	125.2±43.3	119.4(1.4)
Alpha Track2	114.0	128.0	172.0	146.0	77.0	5	127.4±35.5	123.1(1.4)
Raduet	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	5		
RAD7	N.D.				16.8	2	16.8	16.8



[그림 III-13] 의도적 노출 사업장 A-10의 단기(이펙) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

2) 비의도적 노출 사업장에서의 라돈 측정농도 결과

의도적 노출사업장과 다르게 라돈의 원료물질이나 공정부산물을 취급하는 공정이 따로 없는 비의도적 노출사업장은 각 사업체의 측정지점 공간에 따라 5 지점 또는 3지점에서 측정을 실시하였다. 의도적 노출 사업장에서의 라돈 측정과 같이 단기(이팜), 장기(라듀엣, 알파트랙), 연속 모니터링(RAD7) 측정을 실시하였다. 단, 사업장 B-9에서는 단기와 장기 측정만, 사업장 B-11에서는 단기 측정만을 실시하였다. 각 사업체의 측정위치별 라돈 측정값과 시료수, 산술평균(AM), 표준편차(SD), 기하평균(GM), 기하표준편차(GSD), 범위(Range: 최소값~최대값)를 표시하였다.

비의도적 노출 사업장 B-1의 경우 지하공동구로서 측정지점 3곳이 각각 상당한 거리에 있음에도 이팜에 의한 라돈 농도가 균일하게 155~170 Bq/m³ 측정되었으며 기하평균은 161.3 Bq/m³이었다. 또한 장기측정기인 알파트랙 1,2 각각의 기하평균 또한 195.4 Bq/m³, 158.5 Bq/m³, 라듀엣에 의한 기하평균 값이 123.2 Bq/m³로 나타났다. 사업장 B-2의 측정지점은 대규모사업장 지하가스공급 시설이 있는 곳으로 큰 소음이 지속적으로 발생되고 있었다. 이팜의 라돈 농도는 그 변화가 심한 것에 비하여 알파트랙에 의한 라돈의 장기 측정결과는 대체로 각 지점과 상관없이 비슷한 라돈의 농도를 보여주고 있으며 이팜에 의한 기하평균은 83.1 Bq/m³, 알파트랙1과 알파트랙2에 의한 기하평균은 각각 148.1 Bq/m³, 123.1 Bq/m³을 나타냈다.



[그림 III-14] 지하 공동구 측정 현황

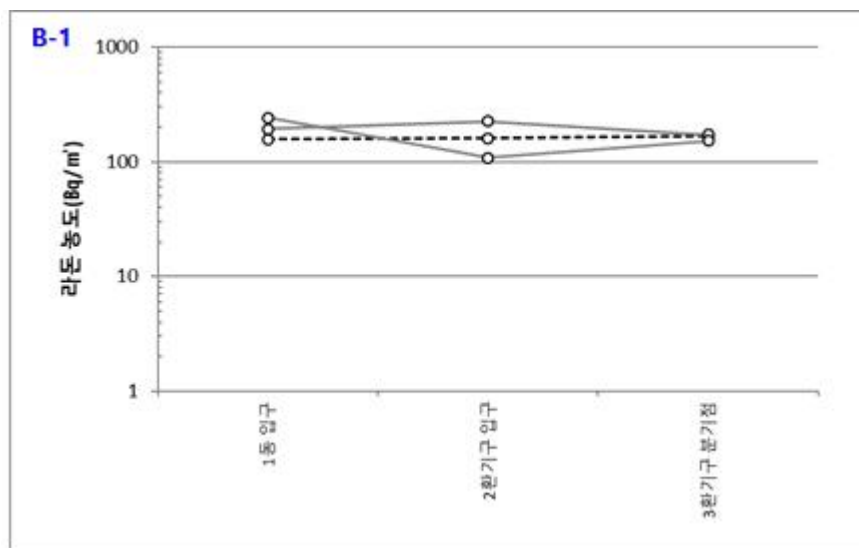


[그림 III-15] 터널 내 측정 현황

<표 III-13> 비의도적 노출 사업장 B-1의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

측정위치	1동 입구	2환기구 부근	3환기구 분기점	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	156.6	160.4	166.9	3	161.3±5.2	161.2(1.0)
Alpha Track1	192.2	225.8	172.0	3	196.7±27.2	195.4(1.1)
Alpha Track2	242.6	108.2	151.9	3	167.5±68.6	158.5(1.5)
Raduet	100.8	156.5	118.4	3	125.2±28.4	123.2(1.2)
RAD7	65.5		71.4	2	68.4±4.2	68.4(1.1)

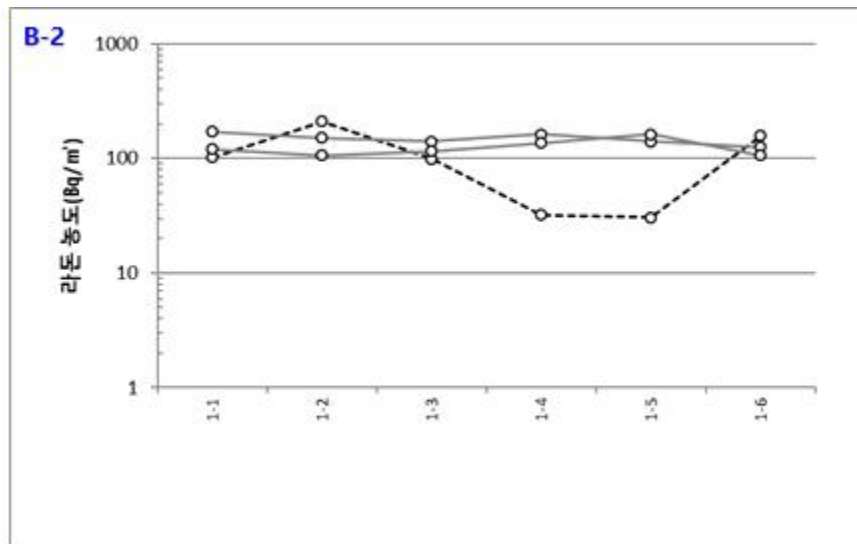


[그림 III-16] 비의도적 노출 사업장 B-1의 단기(이펙) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-14> 비의도적 노출 사업장 B-2의 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

측정 위치	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	101.9	210.2	99.1	32.1	30.5	158.4	6	105.4±70.5	83.1(2.2)
Alpha Track1	172.0	151.0	141.0	162.0	141.0	126.0	6	148.8±16.5	148.1(1.1)
Alpha Track2	121.0	106.0	116.0	136.0	162.0	106.0	6	124.5±21.5	123.1(1.2)
Raduet	18.2	46.9	19.4	N.D.	19.7	18.9	6	24.6±12.4	22.8(1.5)
RAD7		16.4					1	16.4	16.4



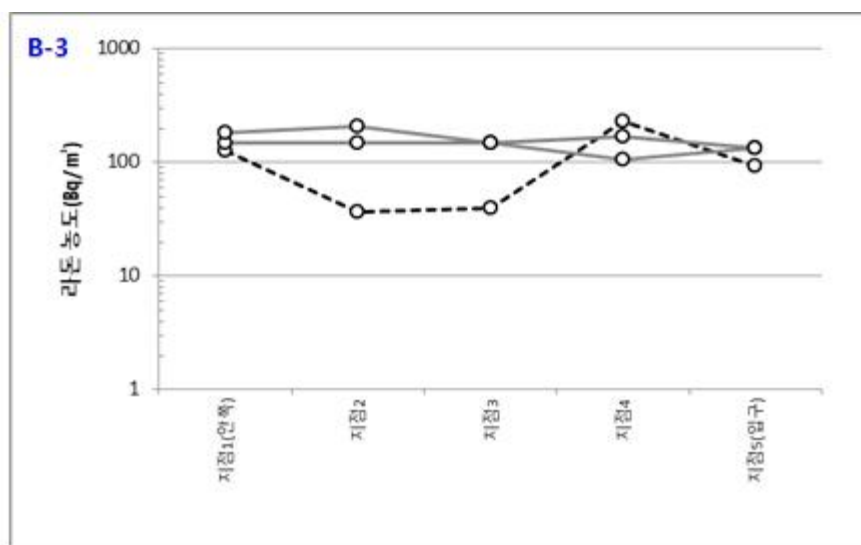
[그림 III-17] 비의도적 노출 사업장 B-2의 단기(이perm) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

비의도적 사업장 B-3과 B-4는 경기도의 공사 중인 터널 현장이다. B-3 사업장의 경우 이팜에 의한 농도를 비교해 볼 때 터널의 깊이와 상관없이 그 농도가 불규칙하게 나타났으며, 기하평균은 82.9 Bq/m^3 이었다. B-4 사업장 터널은 이팜에 의하여 나타난 결과가 터널의 입구에서부터 안으로 들어갈수록 라돈의 농도가 확연히 높게 나타나게 되어, 가장 깊은 1 km 지점에서 308.7 Bq/m^3 의 라돈 농도가 측정되었고 기하평균은 101.1 Bq/m^3 이었다. 반면, 장기측정기인 알파트랙에 의한 결과에서는 터널 깊이와 관계없이 라돈 농도가 $97 \sim 278 \text{ Bq/m}^3$ 의 범위로 나타났다.

비의도적 사업장 B-5~B-10에 대한 정보와 라돈 측정을 실시한 공간에 대한 정보는 표 II-4에 적혀있는 바와 같다. 이팜에 의한 라돈의 단기 측정 농도는 기하평균으로 각각 $76.8, 103.8, 79.4, 49.4, 59.4, 72.1, 32.0 \text{ Bq/m}^3$ 이었다. 이에 비하여 B-5, B-7, B-8, B-9, B-10 사업장 등의 알파트랙에 의한 농도는 B-6의 경우(알파트랙1: 159.3 Bq/m^3 , 알파트랙2: 141.5 Bq/m^3)를 제외하고 이팜에 의한 것보다 그 측정 농도가 대체로 높게 나타났으며 측정값 간 편차도 컸다. 본 연구에서 일반적으로 측정된 다른 장기측정 기간보다 매우 짧은 기간(7일~15일)에 측정되었다.

<표 III-15> 비의도적 노출 사업장 B-3의 라돈 측정농도 결과
(단위 Bq/m³)

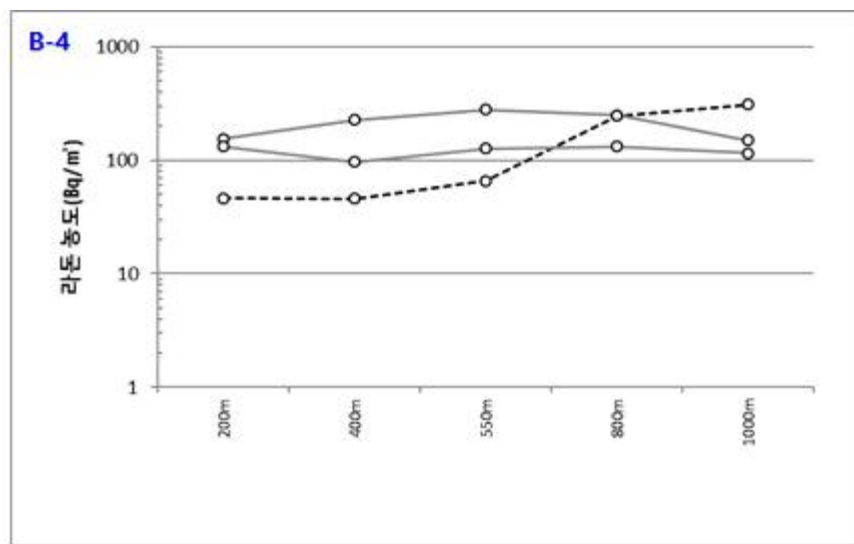
측정 위치	1(터널안쪽)	2	3	4	5(입구쪽)	시 료 수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	126.9	37.1	39.6	228.0	92.3	5	104.8±78.5	82.9(2.2)
Alpha Track1	147.0	147.0	147.0	171.0	135.0	5	149.4±13.1	149.0(1.1)
Alpha Track2	183.0	207.0	147.0	105.0	135.0	5	155.4±40.2	151.2(1.3)
Raduet	N.D.	N.D.	26.1	N.D.	N.D.	5		
RAD7	N.D.				16.4	2	16.4	16.4



[그림 III-18] 비의도적 노출 사업장 B-3의 단기(이perm) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

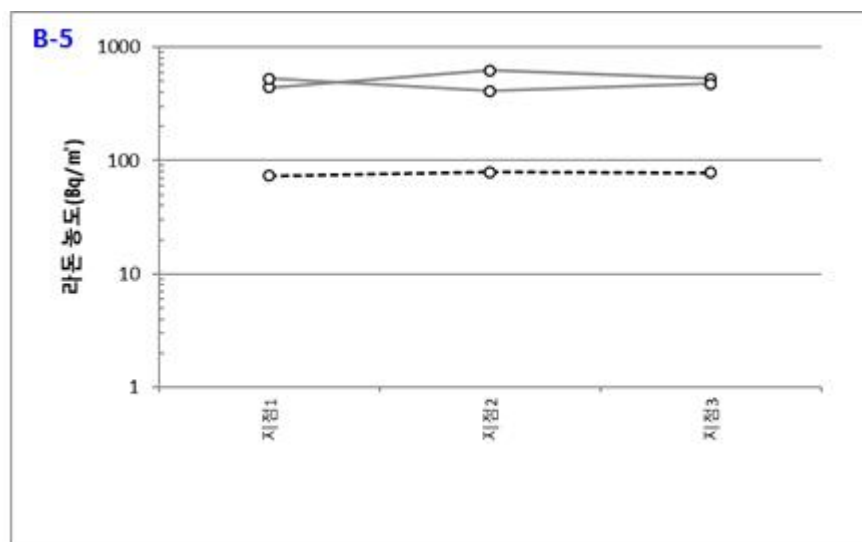
<표 III-16> 비의도적 노출 사업장 B-4의 라돈 측정농도 결과(단위 Bq/m³)

측정 위치	200M	400M	550M	800M	1,000M	시료수	AM±SD	GM (GSD)
E-Perm	46.3	45.9	65.7	245.7	308.7	5	142.4±125.3	101.1(2.5)
Alpha Track1	155.0	226.0	278.0	249.0	150.0	5	211.6±57.0	205.2(1.3)
Alpha Track2	132.0	97.0	126.0	132.0	115.0	5	120.4±14.8	119.6(1.1)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	5		
RAD7	24.6				25.2	2	24.9±0.4	24.9(1.0)

**[그림 III-19] 비의도적 노출 사업장 B-4의 단기(이팜) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과**

<표 III-17> 비의도적 노출 사업장 B-5의 라돈 측정농도 결과
(단위 Bq/m³)

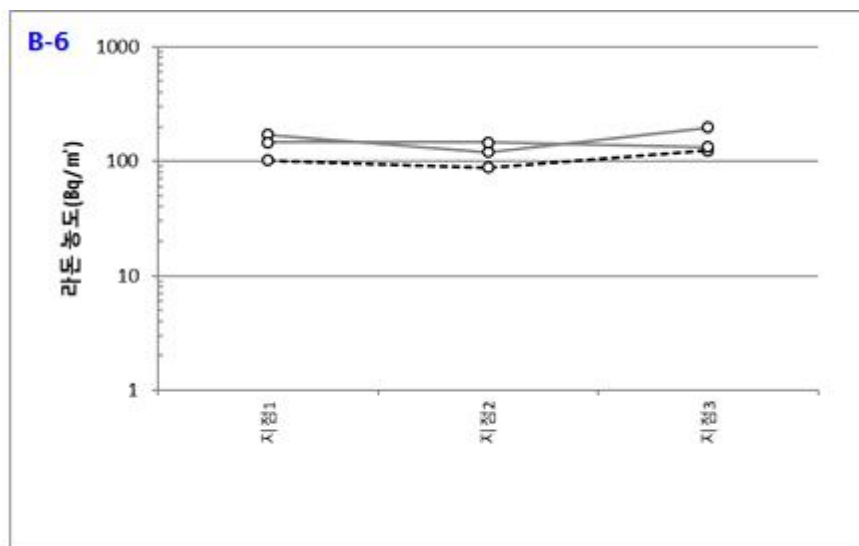
측정 위치	지점1	지점2	지점3	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	73.3	78.8	78.3	3	76.8±3.1	76.8(1.0)
Alpha Track1	443.0	623.0	525.0	3	530.3±90.1	525.2(1.2)
Alpha Track2	525.0	410.0	476.0	3	470.3±57.7	467.9(1.1)
Raduet	N.D.	55.8	224.9	3	140.4±119.6	112.0(2.7)
RAD7	16.8			1	16.8	16.8



[그림 III-20] 비의도적 노출 사업장 B-5의 단기(이점) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-18> 비의도적 노출 사업장 B-6의 라돈 측정농도 결과
(단위 Bq/m³)

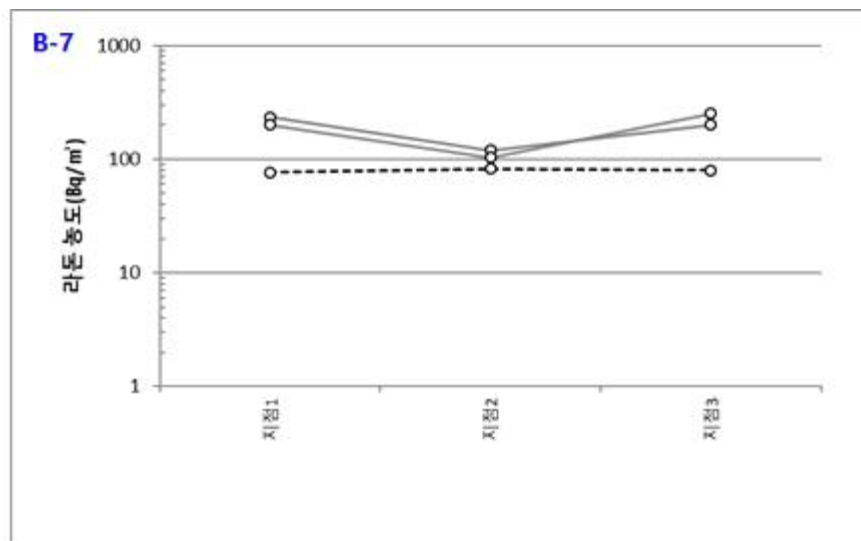
측정 위치	지점1	지점2	지점3	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	102.0	88.2	124.2	3	104.8±18.2	103.8(1.2)
Alpha Track1	171.0	120.0	197.0	3	162.7±39.2	159.3(1.3)
Alpha Track2	146.0	146.0	133.0	3	141.7±7.5	141.5(1.1)
Raduet	68.4	51.3	49.1	3	56.3±10.6	55.7(1.2)
RAD7	37.8			1	37.8	37.8



[그림 III-21] 비의도적 노출 사업장 B-6의 단기(이팜) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-19> 비의도적 노출 사업장 B-7의 라돈 측정농도 결과
(단위 Bq/m³)

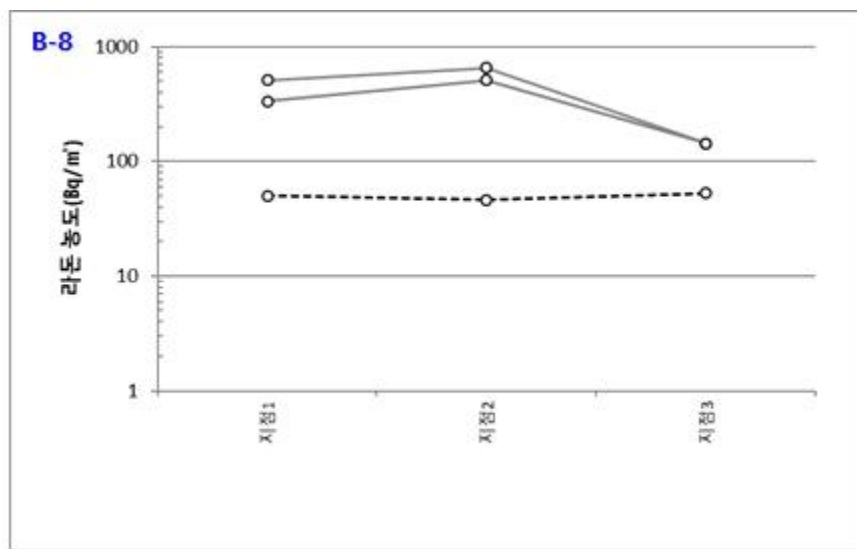
측정위치	지점1	지점2	지점3	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	76.1	82.1	80.0	3	79.4±3.1	79.4(1.0)
Alpha Track1	234.0	119.0	201.0	3	184.7±59.2	177.5(1.4)
Alpha Track2	201.0	103.0	250.0	3	184.7±74.8	173.0(1.6)
Raduet	N.D.	73.7	N.D.	3	73.7	73.7
RAD7	57.9	16.8		2	37.3±29.1	31.2(2.4)



[그림 III-22] 비의도적 노출 사업장 B-7의 단기(이perm) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-20> 비의도적 노출 사업장 B-8의 라돈 측정농도 결과
(단위 Bq/m³)

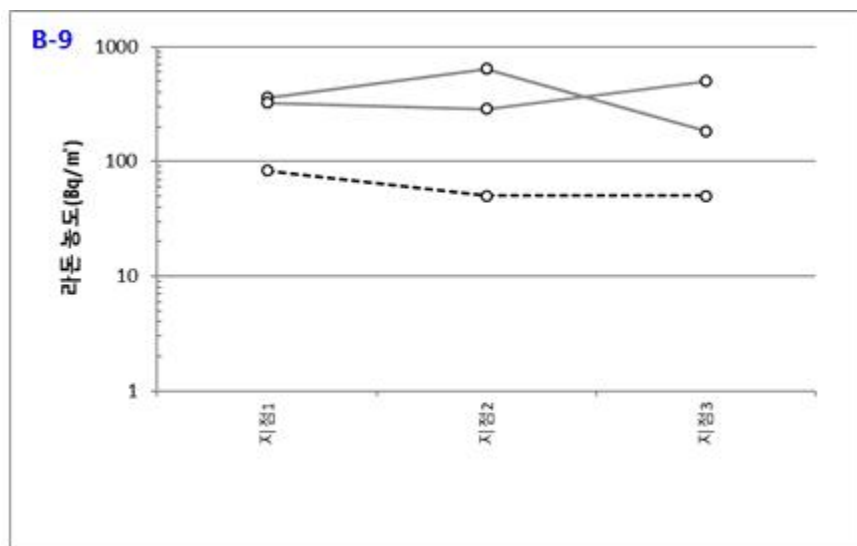
측정위치	지점1	지점2	지점3	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	49.9	45.9	52.5	3	49.4±3.3	49.4(1.1)
Alpha Track1	334.0	509.0	144.0	3	329.0±182.6	290.4(1.9)
Alpha Track2	509.0	650.0	144.0	3	434.3±261.1	362.5(2.2)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	3		
RAD7	25.2			1	25.2	25.2



[그림 III-23] 비의도적 노출 사업장 B-8의 단기(이펙) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-21> 비의도적 노출 사업장 B-9의 라돈 측정농도 결과
(단위 Bq/m³)

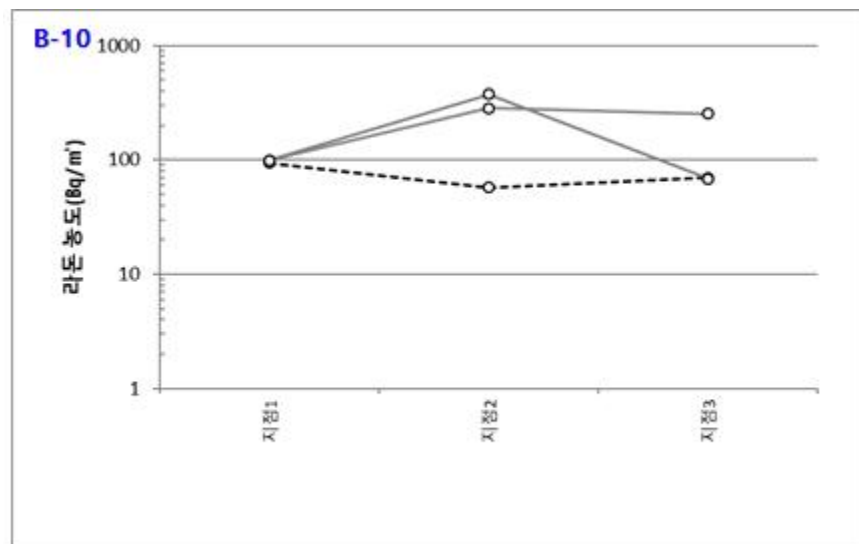
측정위치	지점1	지점2	지점3	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	83.0	50.4	50.2	3	61.2±18.9	59.4(1.3)
Alpha Track1	358.0	638.0	183.0	3	393.0±229.5	347.0(1.9)
Alpha Track2	323.0	288.0	498.0	3	369.7±112.5	359.1(1.3)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	3		



[그림 III-24] 비의도적 노출 사업장 B-9의 단기(이팜) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 III-22> 비의도적 노출 사업장 B-10의 라돈 측정농도 결과
(단위 Bq/m³)

측정위치	지점1	지점2	지점3	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	93.9	57.2	69.7	3	73.6±18.7	72.1(1.3)
Alpha Track1	99.0	375.0	68.0	3	180.7±169.0	136.2(2.5)
Alpha Track2	99.0	283.0	252.0	3	211.3±98.5	191.8(1.8)
Raduet	N.D.	N.D.	N.D.	3		
RAD7	32.8	16.8		2	24.8±11.3	23.5±1.6

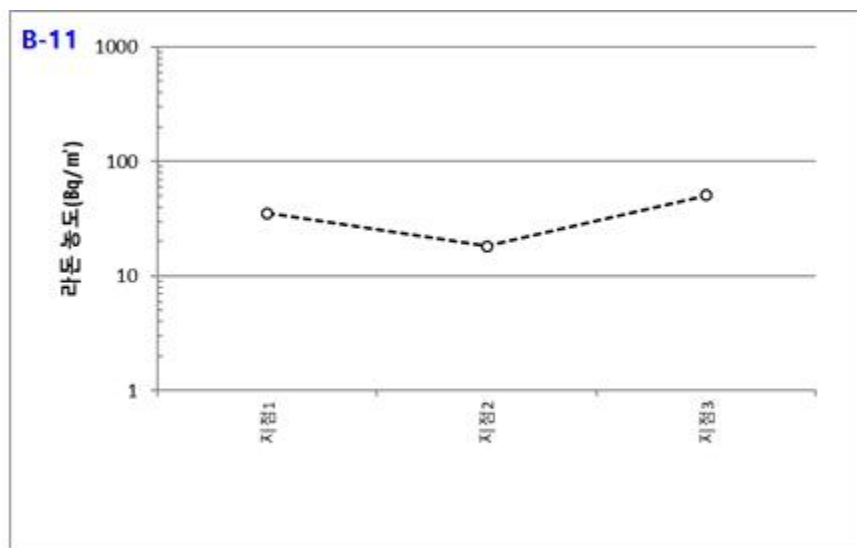


[그림 III-25] 비의도적 노출 사업장 B-10의 단기(이점) 및 장기측정(알파트랙)에 의한 라돈 측정농도 결과

<표 Ⅲ-23> 비의도적 노출 사업장 B-11의 라돈 측정 농도 결과

(단위 Bq/m³)

측정위치	지점1	지점2	지점3	시료수	AM±SD	GM(GSD)
E-Perm	35.4	18.2	50.9	3	34.8±16.3	32.0(1.7)



[그림 Ⅲ-26] 비의도적 노출 사업장 B-11의 단기(이점)측정에 의한
라돈 측정농도 결과

3) 라돈 측정결과에 대한 고찰 및 결론

표 III-24에 의도적 노출 사업장에서의 단기 측정기(이팜)와 장기측정기(알파트랙)에 의하여 측정된 라돈노출 농도의 기하평균, 산술평균, 범위, 시료수를 각 사업장 별로 정리하였다.

각 사업장별로 비교했을 때 의도적 노출사업장 A-6 에서의 라돈 평균농도(기하평균)가 200.4 Bq/m³로 가장 높게 나타났으며 산술평균에 의한 평균농도는 A-7 사업장에서 425.4 Bq/m³ 의 가장 높은 측정값을 보였다. 공정별로는 의도적 노출 사업장 A-7의 성형 공정에서 가장 높은 농도(1,066.3 Bq/m³)를 보여주었다. 의도적 노출사업장 전체적으로 볼 때, 대부분 사업장의 원료물질 보관 창고에서 높은 라돈 노출농도를 보여주었고, 절단, 섬유포집, 성형, 소성 등의 공정에서 높은 노출농도를 보여주었다. 따라서 이들에 대한 보다 철저한 관리가 필요하다고 할 수 있다.

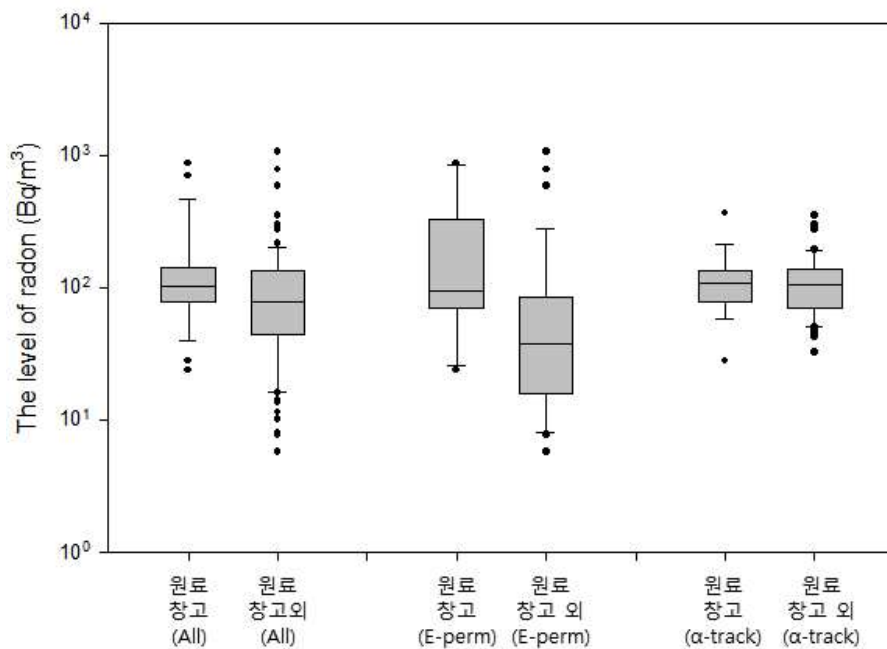
<표 Ⅲ-24> 의도적 노출 사업장별 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

사업장 #	E-Perm				Alpha Track1				Alpha Track2			
	시료 수	GM (GSD)	AM ± SD	Range	시료 수	GM (GSD)	AM ± SD	Range	시료 수	GM (GSD)	AM ± SD	Range
A-1	7	41.3 (2.8)	63.8 ± 70.1	7.8 ~ 215.6	7	50.9 (1.5)	54.6 ± 22.5	32.2 ~ 94.3	7	90.3 (1.3)	93.4 ± 25.9	58.3 ~ 136.8
A-2	5	69.3 (2.6)	94.7 ± 81.3	20.2 ~ 209.7	5	73.3 (1.5)	78.1 ± 30.3	46.9 ~ 110.8	5	73.0 (1.2)	73.9 ± 11.9	54.0 ~ 86.0
A-3	4	19.4 (2.7)	29.3 ± 32.9	8.0 ~ 78.1	4	91.7 (1.4)	95.5 ± 28.7	56.3 ~ 120.6	4	93.0 (1.6)	100.5 ± 37.9	44.2 ~ 124.6
A-4	5	83.4 (3.3)	180.5 ± 292.5	37.5 ~ 703.5	5	105.7 (1.6)	115.2 ± 48.3	50.0 ~ 171.0	5	123.1 (1.4)	127.6 ± 33.0	70.0 ~ 152.0
A-5	5	88.1 (2.0)	104.2 ± 62.7	33.4 ~ 193.3	5	85.0 (2.0)	101.0 ± 60.0	28.0 ~ 193.0	5	126.9 (1.2)	128.6 ± 23.7	104.0 ~ 162.0
A-6	5	200.4 (2.4)	283.9 ± 288.5	90.6 ~ 780.9	5	78.3 (1.6)	84.4 ± 31.5	36.0 ~ 115.0	5	87.8 (1.2)	89.2 ± 16.7	62.0 ~ 106.0
A-7	6	85.3 (12.2)	425.4 ± 480.7	5.7 ~ 1,066.3	6	118.9 (1.4)	123.1 ± 31.8	67.3 ~ 156.8	6	99.8 (1.3)	103.0 ± 28.3	71.2 ~ 145.2
A-8	4	32.3 (2.7)	45.6 ± 47.0	16.7 ~ 99.8	4	324.6 (1.1)	326.3 ± 37.4	290.0 ~ 366.0	4	155.6 (2.1)	184.8 ± 109.7	63.0 ~ 282.0
A-9	5	27.6 (2.2)	35.8 ± 30.6	13.8 ~ 86.2	5	108.8 (1.5)	116.1 ± 49.0	74.9 ~ 193.1	5	108.7 (1.6)	118.7 ± 54.3	66.1 ~ 180.0
A-10	5	22.4 (1.8)	25.4 ± 13.1	10.1 ~ 40.8	5	119.4 (1.4)	125.2 ± 43.3	84.0 ~ 172.0	5	123.1 (1.4)	127.4 ± 35.5	77.0 ~ 172.0

원료보관창고와 나머지 공정과의 비교를 위하여 의도적 노출 사업장에서 단기측정기(이팜)와 장기측정기(알파트랙)에 의하여 측정된 모든 데이터를 Boxplot으로 나타내었다(그림 III-32). 이에 대한 기술통계 정보는 표 III-25에 나타내었다.

원료보관창고와 나머지 공정을 Student *t*-test(unpaired)에 의하여 이팜만의 라돈농도 측정값과 알파트랙만의 측정값과 또 이 두 가지의 측정값을 합하여 통계 분석하였다. 각각의 *P* 값은 0.133, 0.869, 0.134로 모두 유의수준 0.05보다 크므로 원료보관창고와 나머지 공정 간의 라돈 측정농도는 각각의 측정기에 의해서나 두 가지를 모두 합한 방법에서도 통계적으로 차이가 없음을 말해준다.



[그림 III-27] 의도적 노출 사업장에서 단기측정 및 장기측정에 의한 원료보관창고와 나머지 모든 공정에서의 라돈농도 분포도 (Boxplot)

<표 III-25> 원료창고와 나머지 공정에 대한 라돈농도의 기술통계 정보 및 *t*-test 결과

	(단위 Bq/m ³)					
	이편		알파트랙		이편&알파트랙	
	원료창고	나머지 공정	원료창고	나머지 공정	원료창고	나머지 공정
시료수	10	39	20	82	30	121
AM±SD	240.5±297.6	112.2±219.5	116.3±64.9	113.7±62.3	157.7±183.8	113.2±133.7
GM(GSD)	132.3(3.1)	42.5(3.6)	104.6(1.6)	100.0(1.7)	113.2(2.1)	75.9(2.5)
Median	95.2	37.5	108.5	98.0	106.1	86.0
Min	23.8	5.7	28.0	32.2	23.8	5.7
Max	874.5	1,066.3	366.0	350.0	874.5	1,066.3
Student <i>t</i> -test (unpaired)	<i>P</i> = 0.133		<i>P</i> = 0.869		<i>P</i> = 0.134	

표 III-26에 비의도적 노출 사업장에서 단기측정기와 연속측정기로 측정된 라돈노출 농도를 각 사업장 별로 정리하였다. 기하평균과 산술평균 모두 비의도적 노출사업장 B-1(161 Bq/m³)이 가장 높게 나타났으며 측정지점 별로는 비의도적 노출사업장 B-4(터널)의 가장 깊은 지점(1,000M)에서 라돈농도가 가장 높게 나왔다(308.7 Bq/m³). 비의도적 사업장의 측정 지점은 의도적 노출 사업장과 다르게 원료물질이나 공정부산물과 관련된 공정 없이 측정 지점만 나누어져 있기에 표준편차 값에서 보여주듯이 각 사업체의 측정 지점 간 라돈 농도 측정값의 차이가

많지 않았다. 또한 그 농도가 간과할 수 없을 정도의 수준이며 전체적인 평균농도에서는 오히려 의도적인 노출 사업장보다 높게 나타났다.

의도적 노출 사업장과 비의도적 노출사업장에서 단기 및 장기측정기로 측정된 라돈 농도를 비교하기 위해 그림 III-28, 29에 Boxplot으로 나타내었다. 이에 대한 기술통계 정보는 표 III-27에 나타내었다. 이쯤에 의한 라돈 농도에 대하여 Student *t*-test에 의하여 *P* 값이 0.268로, 유의수준 0.05보다 크므로 의도적 노출 사업장과 비의도적 노출사업장 간의 라돈농도 값 간에 차이가 없다는 것을 통계적으로 보여준다. 그러나 알파트랙에 의하여 측정된 라돈 농도에서 *P* 값이 0.001 보다 작고, 이쯤과 알파트랙에 의하여 측정된 모든 값에 대하여 *P* 값이 0.001 로써 유의수준 0.05보다 매우 낮기에, 두 경우 각각 의도적 노출 사업장과 비의도적 노출사업장의 라돈측정 농도가 통계학적으로 차이가 있음을 알 수 있다.

10곳의 의도적 노출사업장 중 연속으로 작업하는 곳은 A-8이 유일했으며 나머지 사업장은 모두 간헐적인 작업을 하는 곳이었다. 단, A-6 사업장의 경우 원료물질에 관련된 연속작업을 한시적으로 진행하는 시점에 단기 측정기인 이쯤을 설치하고 회수를 하였다. 따라서 A-8 사업장에서의 이쯤과 알파트랙에 의한 단기 측정과 장기 측정 결과와 A-6 사업장에서의 이쯤에 의한 단기 측정 결과를 연속 작업으로, 나머지 의도적 노출 사업장의 이쯤과 알파트랙에 의한 측정치를 간헐 작업으로 비교를 하였다. 아울러 비의도적 사업장에서의 이쯤과 알파트랙에 의하여 측정된 값을 함께 평가하였다. 이를 표 III-28와 그림 III-30에 나타내었다. 연속작업과 간헐작업을 비교하였을 때 Student *t*-test에 의한 *P* 값이 0.002로 나타났고, 간헐작업과 비의도적 사업장을 비교하였을 때 *P* 값이 0.001 보다 작으므로 두 경우 모두 유의수준 0.05보다 낮기에 연속작업과 간헐작업 간과, 간헐작업과 비의도적 사업장 간의 통계학적으로 차이가 있음을 볼 수 있다. 반면, 연속작업과 비의도적 사업장을 Student *t*-test로 비교하였을 때, *P* 값이 0.242로 나타나 유의수준 0.05보다 크므로 통계적으로 차이가 없다고

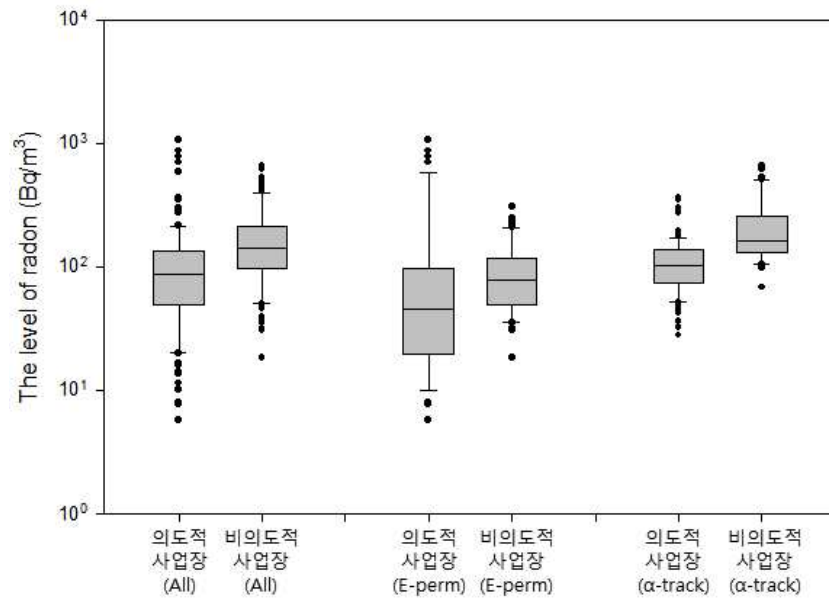
볼 수 있다.

본 연구에서는 당초 가설과 달리 비의도적 노출 사업장에서 보다 높은 결과가 도출되었다. 이는 작업 및 환경조건의 차이 및 다양한 요인들이 함께 작용한 것으로 판단된다. 무엇보다, 의도적인 노출사업장보다 오히려 더 높게 라돈이 측정이 되기도 하는 비의도적인 노출사업장에 대하여 의도적인 노출사업장과 함께 보다 다양한 접근을 통해 라돈 노출에 대한 연구와 대책이 필요함을 보여준다.

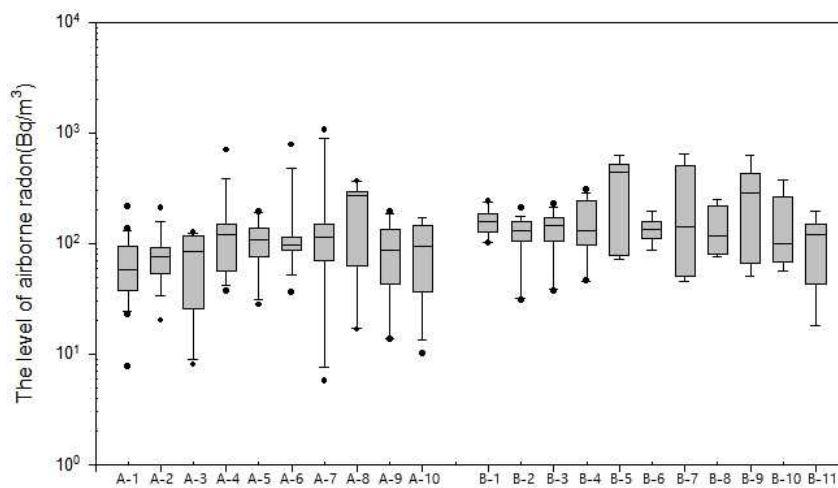
<표 III-26> 비의도적 노출 사업장별 라돈 측정농도 결과

(단위 Bq/m³)

사업장 #	시 료 수	E-Perm			시 료 수	Alpha Track1			시 료 수	Alpha Track2		
		GM (GSD)	AM ± SD	Range		GM (GSD)	AM ± SD	Range		GM (GSD)	AM ± SD	Range
B-1	3	161.2 (1.0)	161.3 ± 5.2	156.6 ~ 166.9	6	195.4 (1.1)	196.7 ± 27.2	172.0 ~ 225.8	6	158.5 (1.5)	167.5 ± 68.6	108.2 ~ 242.6
B-2	6	83.1 (2.2)	105.4± 70.5	30.5 ~ 210.2	5	148.1 (1.1)	148.8 ± 16.5	126.0 ~ 172.0	5	123.1 (1.2)	124.5 ± 21.5	106.0 ~ 162.0
B-3	5	82.9 (2.2)	104.8± 78.5	37.1 ~ 228.0	5	149.0 (1.1)	149.4 ± 13.1	135.0 ~ 171.0	5	151.2 (1.3)	155.4 ± 40.2	105.0 ~ 207.0
B-4	5	101.1 (2.5)	142.4± 125.3	45.9 ~ 308.7	3	205.2 (1.3)	211.6 ± 57.0	150.0 ~ 278.0	3	119.6 (1.1)	120.4 ± 14.8	97.0 ~ 132.0
B-5	3	76.8 (1.0)	76.8± 3.1	73.3 ~ 78.8	3	525.2 (1.2)	530.3 ± 90.1	443.0 ~ 623.0	3	467.9 (1.1)	470.3 ± 57.7	410.0 ~ 525.0
B-6	3	103.8 (1.2)	104.8± 18.2	88.2 ~ 124.2	3	159.3 (1.3)	162.7 ± 39.2	120.0 ~ 197.0	3	141.5 (1.1)	141.7 ± 7.5	133.0 ~ 146.0
B-7	3	79.4 (1.0)	79.4 ± 3.1	76.1 ~ 82.1	3	177.5 (1.4)	184.7 ± 59.2	119.0 ~ 234.0	3	173.0 (1.6)	184.7 ± 74.8	103.0 ~ 250.0
B-8	3	49.4 (1.1)	49.4 ± 3.3	45.9 ~ 52.5	3	290.4 (1.9)	329.0 ± 182.6	144.0 ~ 509.0	3	362.5 (2.2)	434.3 ± 261.1	144.0 ~ 650.0
B-9	3	59.4 (1.3)	61.2 ± 18.9	50.2 ~ 83.0	3	347.0 (1.9)	393.0 ± 229.5	183.0 ~ 638.0	3	359.1 (1.3)	369.7 ± 112.5	288.0 ~ 498.0
B-10	3	72.1 (1.3)	73.6 ± 18.7	57.2 ~ 93.9	3	136.2 (2.5)	180.7 ± 169.0	68.0 ~ 375.0	3	191.8 (1.8)	211.3 ± 98.5	99.0 ~ 283.0
B-11	3	32.0 (1.7)	34.8 ± 16.3	18.2 ~ 50.9								



**[그림 III-28] 의도적 노출 사업장과 비의도적 노출 사업장의 측정
기기 별 라돈농도 분포도**

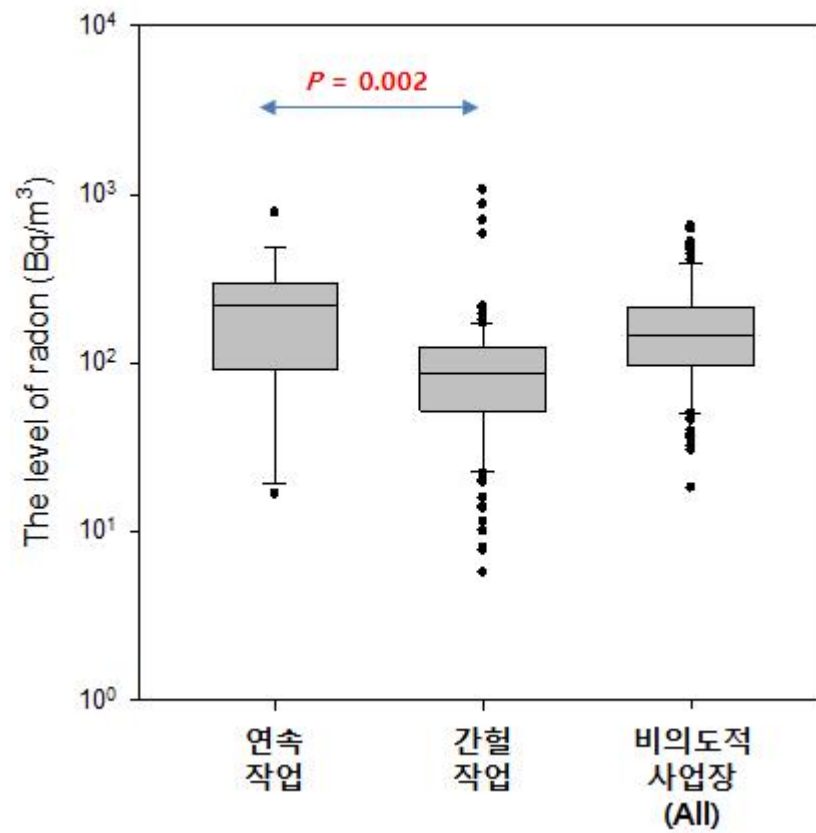


**[그림 III-29] 의도적 노출 사업장과 비의도적 노출 사업장의 단기 및
장기 측정에 의한 라돈농도 분포도**

**<표 III-27> 의도적 노출사업장과 비의도적 노출사업장에 대한
라돈농도의 기술통계 정보 및 *t*-test 결과**

(단위 Bq/m³)

	이뎡		알파트랙		이뎡&알파트랙	
	의도적 사업장	비의도적 사업장	의도적 사업장	비의도적 사업장	의도적 사업장	비의도적 사업장
시료수	49	40	102	74	151	114
AM±SD	138.4±239.7	94.8±64.9	114.2±62.5	225.6±144.6	122.0±146.4	179.7±137.5
GM(GSD)	53.6(3.8)	77.9(1.9)	100.9(1.6)	192.5(1.7)	82.2(2.5)	140.1(2.0)
Median	45.5	78.6	103.5	162.0	93.6	144.0
Min	5.7	18.2	28.0	68.0	5.7	18.2
Max	1,066.3	308.7	366.0	650.0	1,066.3	650.0
Student <i>t</i> -test (unpaired)	<i>P</i> = 0.268		<i>P</i> < 0.001		<i>P</i> = 0.001	



[그림 Ⅲ-30] 연속작업, 간헐작업, 비의도적 노출 사업장의 라돈 농도 분포도

**<표 III-28> 연속작업, 간헐작업, 비의도적 노출 사업장의 라돈 농도
기술통계 정보**

(단위 Bq/m³)

	연속작업	간헐작업	비의도적 사업장
시료수	16	135	114
AM±SD	225.0±189.6	109.8±135.0	179.7±137.5
GM(GSD)	150.7(2.9)	76.5(2.4)	140.1(2.0)
Median	221.9	87.0	144.0
Min	16.7	5.7	18.2
Max	780.9	1,066.3	650.0
Student t-test (unpaired)	연속작업 vs 간헐작업 $P = 0.002$	간헐작업 vs 비의도적 사업장 $P < 0.001$	연속작업 vs 비의도적 사업장 $P = 0.242$

4. 국외 제도 현황

1) 유럽연합

유럽 위원회(European Commission, EC)는 1990년 주택의 라돈에 대한 가이드라인을 발표하였고, 1996년에는 작업장에서의 라돈 노출 기준 및 모니터링에 대한 조치 및 요구사항을 정하였다. 이와 같이 라돈 문제에 대해 대규모 정책수립이 시행되고 라돈에 대한 참조 준위를 법률로 제정하여 라돈 문제에 대한 상당한 노력들이 추진되었다. 유럽연합(EU) 국가 내 대부분의 정부 또는 관련 부처는 주택에서와 마찬가지로 작업장의 라돈에 대한 명령 및 권고사항의 준수를 감독뿐만 아니라 법률 및 권고사항을 이행하고 있었으며, 주요 유럽 국가들의 라돈 관리에 대한 특징적인 사항은 표 III-29와 같다.

<표 III-29> 주요 유럽 국가들의 라돈 관리에 대한 특징적인 사항

국가	내용
덴마크, 핀란드	- 국가 방사선 방호기관이 규제기관으로 이행에 대한 감독 책임 수행
스웨덴	- 산업안전보건에 국가위원회에서 규정을 만들고 지방자치당국이 산업안전보건에 대한 실제적인 감독을 수행
노르웨이	- 천연방사능에 대한 관리를 지방자치단체 또는 지방정부가 라돈 관련 규정을 감독하고 책임을 가지고 관리
스위스	- 국립 상해보험기구 (Suva, Swiss National Accident Insurance Organization)에서 이행 감독
프랑스, 핀란드, 독일, 아일랜드	- 작업장에서 라돈 측정을 위한 프로토콜(Protocols) 제정
벨라루스, 라트비아, 리투아니아, 러시아, 체코, 스위스, 슬로바키아, 슬로베니아	- 방사선 방호 규제기관이 감독 책임 수행

유럽 위원회는 근로자의 건강과 일반인에게 일어날 수 있는 전리 방사선의 위험에 대응하기 위한 안전 가이드라인(라돈에 대한 지침)을 발행하였다. 전반적으로 이들의 권장사항은 ICRP 65(1993) 간행물에서 설정한 지침을 따르고 있다. 유럽 연합은 작업장의 라돈가스농도가 조치 준위(action level)인 500-1,500 Bq/m³의 범위일 것을 권고한다.

반면, 경제적 수준이 낮은 비유럽연합 국가의 경우 유럽연합국가에 비하여 70% 이상이 강제 기준을 적용하고 있다. 그리고 이들 국가들도 유럽연합과 마찬가지로 기존주택 관리기준으로 대부분 400 Bq/m³을 설정하고 있고, 신규주택의 경우 대부분 200 Bq/m³을 설정하고 있다. 비유럽연합 국가는 라돈에 대한 관리 기준이 강제 기준이라는 점에서 유럽연합 국가들과 다르다.

작업장 관리기준은 광산(mines), 지하 작업장(underground workplace), 일반 산업장, 물 취급 작업장(industry workplace, waterworks), 사무실(offices)로 작업장 유형을 4가지로 구분하여 설정하고 있다 표 III-30. 또한 주요 유럽 연합 국가들의 작업장 내 라돈 관리 기준 관련 적용 특성 및 프로토콜 제정 유무는 표 III-31과 같다. 그리고 유럽 연합 국가 중 라돈에 대한 작업장 관리기준을 설정하고 있지 않은 국가는 3국가(네덜란드, 스페인, 포르투갈)이다.

<표 III-30> 유럽 연합 국가들의 작업장 유형별 라돈 관리기준

(단위 Bq/m³)

국가	광산	지하 작업장	일반 산업장/ 물 취급 작업장	사무실	노출평가 방법
벨기에	400	400	400	400	지역시료
불가리아	3,600	3,600	3,600	-	-
체코	1,00	1,000	1,000	400	개인&지역 시료
덴마크	-	400	400	400	지역 시료
에스토니아	-	-	1,000	-	-
핀란드	400	400	400	400	개인&지역 시료
독일	1,000	1,000	1,000	200	개인&지역 시료
그리스	400	400	400	400	개인&지역 시료
헝가리	1,000	1,000	1,000	-	개인&지역 시료
아일랜드	400	400	400	400	개인&지역 시료
이탈리아	500	500	500	500	지역시료
라트비아	-	400	1,000	200	개인시료
리투아니아	1,000	1,000	400	400	-
노르웨이	1,000	100	200	200	지역시료
폴란드	360	360	160	160	개인&지역 시료
세르비아	1,000	1,000	1,000	400	개인&지역 시료
슬로바키아	1,000	1,000	1,000	500	개인&지역 시료
슬로베니아	1,000	1,000	1,000	600	개인&지역 시료
스웨덴	1,250	400	400	400	개인&지역 시료
스위스	3,000	3,000	3,000	1,000	지역시료
우크라이나	750	750	750	200	개인시료

<표 III-31> EU 국가별 작업장 내 라돈 기준 유무 요약

	기준(Bq/m ³)		신축(Bq/m ³)		프로토콜	비고
스웨덴	강제	400	강제	200	△	
	권고	-	권고	-		
덴마크	강제	400	강제	400	○	
	권고	-	권고	-		
핀란드	강제	400	강제	400	○	
	권고	-	권고	-		
영국	강제	400	강제	400	×	http://www.hse.gov.uk/radiation/ionising/radon.htm
	권고	-	권고	-		
체코	강제	1000	강제	200	△	
	권고	200	권고	100		

EU는 라돈의 작업적 노출 관리 규정(COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013)을 제정하여 회원국들이 이를 근거로 관리할 것을 권고하고 있으며, 전반적인 내용은 다음과 같다.

(1) 작업장 내 라돈(Radon in workplace)

① 회원국은 작업장의 실내 라돈 농도에 대한 국가 기준 수준을 설정해야 한다. 공기 중 연간 평균 활동 농도의 기준 수준은 국가적인 현재 상황에서 보장되지 않는 한 300 Bq/m³ 이상이어야 한다.

② 회원국은 다음과 같은 작업장 유형에 대해 라돈 측정을 수행할 것을 요구해야 한다.

- 부속문서 XVIII 제2항에 따른 국가 조치계획에 포함된 매개변수를 고려하여, 제103조 제3항에 따라 식별된 구역 내의 작업장.

- 부속문서 XVIII의 3점을 고려하여 국가 조치계획에서 확인된 특정 유형의 작업장.

③ 라돈 농도(연간 평균치)가 국가 표준 수준을 계속해서 초과하는 작업장 내의 영역에서는 제3장에 명시된 최적화 원칙에 따라 취해진 조치에도 불구하고 회원국은 이 상황이 제 25 조 (2) 항 및 제 35 조 (2) 항에 따라 통보된 사항이 적용된다.

(2) 라돈 관리 방안(Radon action plan)

① 회원국은 제100조 제1항을 적용하여 토사, 건축자재 또는 물 등 모든 라돈 유입원에 대한 주택, 공공 출입이 가능한 건물 및 작업장의 라돈 피폭에 따른 장기적 위험을 다루는 국가 조치계획을 수립해야 한다. 조치계획은 부속문서 XVIII에 명시된 문제를 고려하여 정기적으로 업데이트해야 한다.

② 회원국은 라돈의 새 건물 유입을 방지하기 위한 적절한 조치를 취해야 한다. 이러한 조치들은 국가 건물 법규에 구체적인 요건을 포함할 수 있다.

③ 회원국은 상당한 수의 건물에서 라돈 농도가 관련 국가 기준 수준을 초과할 것으로 예상되는 지역을 파악해야 한다.

사업을 수행하거나 행동을 책임지는 사람은 방사선 방호가 최적화 원칙에 따라 최적화되도록 해야 한다. 이 요구 사항은 라돈에도 적용되어야 하며 광산 및 지하철과 같은 다양한 작업장뿐 아니라 수행되는 작업 및 다른 속성에 대한 조치와 라돈이 있는 다른 부지에서의 조치에도 적용 할 수 있다. 라돈에 대한 재산 소유자의 책임에 관한 방사선 방호 조례가 있어야 한다.

라돈이 실내에서 작업장으로 퍼져 나가는 경우 라돈의 존재가 작업에서의 작업자의 활동과 관련이 없기 때문에 이것은 기존의 노출 상황으로 간주되어야 한다. 일부 지역 또는 특정 유형의 작업장에서의 라돈 노출이 중요 할 수 있으며 국가 기준치를 초과하는 경우 라돈과 노출을 저감하기 위한 적절한 조치가 취해져야 한다. 지속적으로 라돈농도가 국가 표준 수준을 초과하면 작업장을 운영을 해서는 안 된다. 그러나 회원국은 이러한 작업장에 정보가 제공되고 직원의 피폭이 연간 6 mSv의 유효 선량 또는 해당 시간에 통합 된 라돈 노출 값을 초과하는 위험이 있는 경우는 계획된 피폭 상황 및 선량한도가 적용될 뿐만 아니라 실용적인 방사선 보호에 대한 결정 가능한 요구 사항이 적용되어야 한다.

회원국은 노출 작업의 노출 한도가 승인 된 모든 작업에서 일하는 근로자의 연간 총 노출량에 적용되도록 보장해야 한다. 제 54 조 (3) 항에 따라 신고가 필요한 작업장에서의 라돈 노출 및 제 100 조 (3) 항에 따른 기존 피폭 상황으로부터의 기타 작업 피폭, 비상사태에 노출 된 근로자의 경우 제 53 조가 적용 된다.

제 54 조 (3) 항에 언급 된 작업장의 경우 근로자가 6 mSv의 유효 선량 또는 회원국에 의해 수립된 해당 시간 통합 라돈 피폭에 대해 책임이 있는 경우 노출을 다루는 사람들은 이 장의 어느 요건이 적절한 지 결정하기 위해 피폭 상황 및 회원국을 계획해야 한다.

직원에 대한 유효 선량이 연간 6 mSv보다 적거나 같거나 노출 시간이 해당 시간 통합 일보다 짧은 제 54.3 항에 열거 된 작업장의 경우, 권한이 있는 당국은 노출을 모니터링 하도록 요구해야 한다.

※ 부속문서 XVIII

〈제54조, 74조 및 103조에 언급된 라돈 피폭에 따른 장기적 위험을 해결하기 위한 국가 조치계획 작성에 고려해야 할 항목 목록〉

(1) 실내 라돈 농도의 분포 추정, 측정 데이터의 관리 및 기타 관련 매개변수(토양 및 암석 유형, 투과성 및 암석 또는 토양의 라듐-226 함량)의 확립을 위한 실내 라돈 농도 또는 토양 가스 농도의 조사를 실시하는 전략.

(2) 라돈에 대한 노출 가능성이 높은 상황의 특정 지표로 사용할 수 있는 영역 또는 기타 매개변수의 정의에 사용되는 접근법, 데이터 및 기준.

(3) 학교, 지하 작업장과 같이 공공이 접근할 수 있는 작업장과 건물의 유형(예: 점유시간을 고려하여 위험 평가에 근거하여 측정이 필요한 경우)을 식별.

(4) 주거지 및 작업장의 기준치 설정 근거. 해당되는 경우, 기존 및 신규 건물뿐만 아니라 건물(주거, 공공 접근이 가능한 건물, 작업장)의 다양한 사용에 대한 서로 다른 기준 수준을 확립하기 위한 기초.

(5) 책임(정부 및 비정부, 조정 체제 및 조치계획의 이행을 위한 가용 자원의 할당.

(6) 주거지의 라돈 노출을 줄이고, 지점 2에 따라 식별된 상황을 우선적으로 처리하기 위한 전략.

(7) 시공 후 교정조치 촉진 전략.

(8) 상당한 라돈 배출로 건축자재를 식별하는 등 새로운 건물의 라돈 침투 방지를 위한 방법과 도구를 포함한 전략.

- (9) 실행계획 검토 일정.
- (10) 대중의 인식을 높이고, 흡연과 관련하여 라돈의 위험을 지역 의사 결정자, 고용주 및 직원에게 알리기 위한 소통 전략.
- (11) 측정 및 교정 조치를 위한 방법과 도구에 대한 지침. 측정 및 교정 조치 서비스의 인증 기준도 고려.
- (12) 해당되는 경우, 특히 매우 높은 라돈 농도의 민간 주거지에 대해 라돈 조사 및 교정 조치를 위한 재정 지원 제공.
- (13) 라돈 노출에 따른 폐암 위험 감소 측면에서 장기 목표(흡연자 및 비흡연자용).
- (14) 해당되는 경우, 에너지 절약 및 실내 공기 품질에 관한 프로그램과 같은 기타 관련 문제 및 해당 프로그램을 고려.

2) 미국

미국인 근로자들은 1970년에 제정된 직업안전보건법령의 적용 대상이며, OSHA 임무의 한 특징적인 부분은 바로 미국 내 사업장에서의 전리방사선에 대한 불필요한 노출로부터 근로자들을 보호하는 것이다. 그 물질은 방사성 가스인 Radon-222와 관련이 있다. 사실상 OSHA는 1970년대 초기에 설립된 이후로 전리방사선에 대한 규정을 업데이트 해오지는 않고 있다.

OSHA의 29 CFR 1910.1096에는 직업상 피폭, 법령 내 전리방사선, 선량분석 주체 및 방법, 제한구역 및 비제한 구역, 방사선 구역 및 고방사선 구역으로 구분하여 노출 기준을 제시하고 있고, OSHA 규정은 자연 발생적 방사성 물질(NORM)을 포함하기 때문에 대기 중 방사성 구역의 정의는 '공기 중의 자연 발생적 방사성 물질을 포함하는 구역'으로 해석될 수 있으며, Rn-222는 실제로 OSHA 규제 사항에 포함된다.

OSHA는 작업장에 대한 라돈의 허용기준(PEL)으로 미국 원자력위원회에서

권고하는 기준을 준수하여 최대농도(MPC)로 100 pCi/L를 설정하고 있다.

또한, 미국 NRC는 라돈에 대한 유도공기중농도(DAC)로 30 pCi/L를 정하고 미국 ACGIH에서는 4.0 WLM(Working Level Month)을 규정하고 있다.

미국의 라돈 프로그램은 대부분 자발적이지만, 주정부에 따라 다르게 작업장에 대한 기준은 산업안전보건청(OSHA), 광산안전보건청(MSHA) 및 에너지부에서 관리하고, 환경보호국(EPA)은 일반대중에게 라돈에 관한 정보를 알리거나 주택 등의 라돈대책을 촉진하는 라돈 문제에 대한 전반적인 책임을 갖는다.

[※ OSHA 노출 기준]

- ① OSHA의 Rn-222 피폭 제한규정 10 CFR20 제시
- ② 값은 $1\text{E}-7\mu\text{Ci/mL}$ 또는 100 pCi/L으로, 주중 7일 연 속으로 40시간 동안의 작업시간에 해당
- ③ 1968년 연방 방사선위원회 지침과 1968년 Walsh-Healey 공공계약법에 따른 광산 방사선 기준에 지하 우라늄광산에서 라돈에 대한 피폭제한은 개별 광부가 연간 12 WLM 이상의 피폭을 받지 못하도록 하고 가능한 한 이 값보다 훨씬 낮게 유지 권고
- ④ 우라늄 광산산업이 1971년 1월 1일부터 발효될 예정 이었던 4개의 WLM 표준을 충족시키기 위해 노력해야 한다고 언급
- ⑤ OSHA의 최대 허용 농도인 100 pCi/L는 연간 12 WLM의 노출을 초래

3) 영국

영국의 라돈에 대한 조치사항은 안전보건청(HSE)에서 “Radon in the workplace”에서 명시하고 있다. 라돈의 법적 규제는 영국 산업안전 보건법 및 직장 내 건강 및 안전관리 규정(The Health and Safety at Work 1999)에서

건강과 안전 위험에 대한 평가를 요구하고 있다.

직장 내 건강 및 안전관리 규정(HSW 1999) 제3조에 명시된 위험도 평가에 따라 작업장에서는 라돈의 위험도 평가를 실행해야 한다. 3조 1항에서 5명 이상의 직원을 고용한 모든 사업주는 평가에서 중요한 발견이 있거나, 위험에 노출이 예상되는 근로자가 있는 경우 평가를 하도록 명시하고 있다.

또한 3조 5항에서 물리적, 생물학적 및 화학적 물질에 대한 노출의 성질, 기간에 대하여 평가하도록 하고 있어서 영국의 모든 사업주는 작업장에서 잠재적인 라돈의 위험도를 평가해야 한다. 영국의 라돈 지도는 사업주가 작업장 위험을 평가하기 위하여 활용할 수 있다.

1974년도에 제정된 산업안전보건법 (the Health and Safety at Work Act 1974)에 따라 사업주는 합리적으로 실행 가능한 범위 내에서 근로자 및 작업 환경에 접근 할 수 있는 다른 사람들의 건강과 안전을 보장해야 한다. 작업규정에서의 건강과 안전 관리는 건강과 안전 위험에 대한 평가를 요구하며, 다음과 같은 경우 라돈을 포함해야 한다.

[관련규정]

① 노출 기준

3조 1항 b에서 짧은 반감기를 가진 222라돈의 자손 핵종 의 농도 8시간평균 농도가 $6.24 \times 10^7 \text{ J/m}^3$ 를 초과하지 않는 것을 제외하고, 24시간 평균 농도가 400 Bq/m^3 인 장소에서는 어떤 작업이든 수행할 수 없으며, 400 Bq/m^3 이상인 곳에서 효력이 발생하며 사업주는 노출을 제한하기 위한 조치를 취해야 한다.

Ø 핵종: 원자핵을 이루는 양성자 수 Z, 중성자 수 N 및 그 에너지 상태로 구분되는 원자 또는 원자핵의 종류

② 처벌

400 Bq/m^3 이상인 곳에 작업하는 근로자에 대하여 사업주가 적절한 조치를 취하지 않았거나 적절한 조치를 취한 것을 증명할 수 없으면, Health and Safety (Offences) Act 2008에 적용을 받아 penalty를 받게 된다.

영국 산업안전보건법 33조 에서는 위반 행위에 대해 명시하고 있으며, 각 항목에 따라 penalty가 달라진다. 이는 offence중에서 2조를 위반하게 되어 12개월을 초과 하지 않는 징역형 또는 20,000파운드 이하의 벌금에 처해지게 된다.

③ 위험도 평가

5명 이상의 직원을 고용하는 경우, 위험도 평가에서 중요한 발견이 있거나, 특히 위험에 노출될 것으로 예상되는 근로자가 있는 경우 위험성평가를 하도록 명시되었으며, 물리적, 생물학적 및 화학적 물질에 대한 노출의 성질, 기간에 대해 지상 및 지하 작업장으로 평가하고 개선방안을 제시한다.

▶ 지상 작업장

대부분 위험성 평가는 라돈 영향 지역(radon affected area)에 있는 건물의 지상 1층 공간에서 라돈 수치를 포함해야 한다. 고용주는 다음 그림에서 색칠된 부위 1 km 격자 사각형에 있는 모든 건물에서 측정을 수행할 수 있다. (흰색영역에 있는 지상 작업장에서는 측정이 따로 필요하지 않음) 구체적인 정보가 필요할 경우 특정 건물이 radon affected area에 속하는지 여부를 따지기 위해 온라인에서 최종 PHE에 온라인으로 문의할 수 있다.

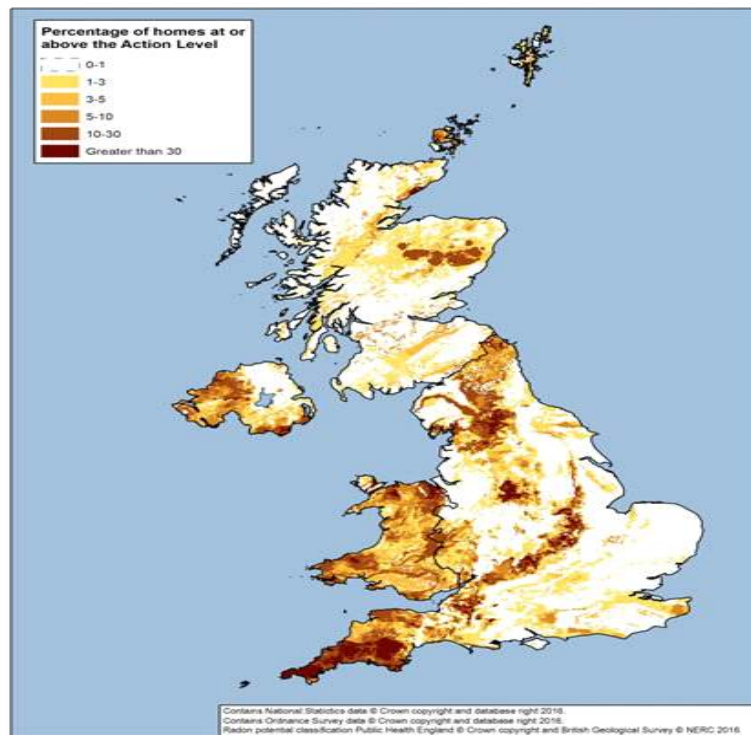
▶ 지하 작업장

주당 평균 시간이 1시간 또는 약 50시간 이상인 곳, 또는 개방수원이 있는 작업장의 경우 위험성평가에 라돈 측정수치가 포함되어야 한다(지도와 상관없이 모든 지하 작업장에 적용된다).

▶ 라돈 위험성 평가 : 안전보건청(HSE) 제안 내용

- 라돈농도가 초기측정 시 300 Bq/m^3 보다 낮은 것으로 밝혀지면 재측정 기간은 10년 마다 한 번 정도 될 수 있다.
- 라돈농도가 초기측정 시 300 Bq/m^3 미만이었던 경우 재측정을 위해 제안된 기간은 10년 미만이다.
- 라돈농도가 초기측정 시 300 Bq/m^3 이상이었고 라돈 노출량을 줄이기 위한 조치가 취해진 경우(예: 공학적 시스템 또는 원인 제한), 지속적

인 효과를 검증하기 위해 재측정이 더 자주 이루어져야 한다.



[그림 III-31] 작업장 라돈 노출 위험도 평가를 위한 영국의 구획 지역

④ 작업장에서의 라돈 측정

작업장에서의 라돈 측정은 위험 평가 프로세스의 일부를 형성하고 라돈 노출이 개선 또는 다른 수단을 통해 통제되어야 하는지 여부에 대한 결정을 알린다. 가정에서 라돈 측정에 사용할 수 있는 서비스는 종종 실내 작업장에 적합하다. 대부분의 직업용 라돈 측정은 3 개월 동안 설치된 수동 모니터로 이루어진다. 그러나 각 건물에 필요한 번호는 내부 영역과 레이아웃에 따라 달라지며, 예를 들어 휴대폰 또는 오픈 플랜 사무실의 경우 측정 밀도가 다를 수 있다. 적절하고 충분한 검사를 위해 적절한 수의 모니터를 결정하는데 있어서 사용자

를 돕기 위한 의정서가 출판되었다. 기준 레벨을 초과 한 경우, 라돈 농도가 가장 높은 방을 결정하고 완화 작업 설계를 지원하고 (3.2.4 절 참조) 규정을 준수하기 위해 초기 테스트 후 작업장에서 추가 측정이 종종 요구된다(3.2.1 절).

광산과 동굴에서 라돈 모니터의 위치는 일반적으로 주 작업 지역과 대중교통 경로 내에 있다. 광업은 일상적인 공기를 위해 활동적인 모니터를 사용하는 문화를 가지고 있다. 13 품질 테스트 및 전자 (능동) 모니터는 수동 측정을 보완하는 데 사용된다. 2018년에는 주거지 및 실내 작업장의 라돈 측정에 적용되는 수정된 검증 계획 (3.1.3 절)이 발표되었다(Daraktchieva et al., 2018). 이 계획은 점유 면적, 건물의 물리적 크기 및 레이아웃의 차이를 고려하고 장기 측정 (3개월)에 적용되며 프로토콜 및 성능 표준을 업데이트하며 계절 보정 요인에 대한 주요 검토를 포함한다. 2019년부터 이 계획 하에 검증된 실험실은 주거, 작업장 또는 두 가지 모두에 대해 라돈 측정 서비스를 제공할지 여부를 선택할 수 있다.

⑤ 작업장에서의 라돈 노출 통제

첫 번째 선택은 라돈의 농도를 낮추는 것이다. 가정에서의 라돈 정화를 위한 동일한 기술은 일반적으로 건물의 크기와 배치, 라돈 수준 및 모든 환기 시스템에 따라 적용되는 작업장 건물에 적용할 수 있다. 구내 계약이 여러 번 연장되거나 사용이 변경된 곳에서는 전문 계약자가 필요할 수도 있다. 사후 완화 라돈 측정은 작업이 성공적인지 여부를 결정하고 그 이후에도 정기적인 유지 보수 점검을 실시하여 효과가 있음을 입증해야 한다.

광산과 동굴에서 라돈 수준은 일반적으로 환기 최적화에 대한 전문가의 조언에 의해 알릴 수 있는 공기 취급 기술로 제어된다.

일부 작업장에서는 라돈 노출량을 접근 기간과 빈도를 높은 라돈 지역으로 제한하는 등 현지 점유를 관리함으로써 통제 할 수 있다.

고농도 라돈이 실제로 감소되기 어려운 소수의 작업장에서는 일부 근로자가 개인 라돈 선량 측정기를 사용하여 개별적으로 평가한 라돈 노출량을 가지고

있다.

라돈 농도를 줄이기 위해 장비를 사용하는 모든 작업장에서 시스템은 제조업체의 지침에 정의된 표준 유지 보수 일정에 포함되어야 한다.

▶ IRR17(Ionizing Radiation Regulations 2017)

본 규정에 의하면 300 Bq/m³ (연간 평균치)보다 높을 경우 고용주는 노출을 제한하기 위한 조치를 취해야 한다고 명시되어 있다. HSE 및 지방 당국은 특정 유형의 작업장에서 규정을 집행할 책임이 있다.

작업장 내부의 농도를 줄이기 위한 보호 조치는 문제의 심각성과 건물 건설 유형에 따라 달라진다. 새로 지은 건물은 바닥 구조 내에 ‘라돈 지붕(Radon proof)’ 장벽, 막을 설치하고 보다 더 진한 농도로 존재할 장소에서는 ‘환기장치가 있는 지하층 보이드(ventilated sub-floor void)’ 또는 ‘라돈 섹프’를 설치하여 건설 중 보호할 수 있다.

기존 건물에서는 라돈 보호 장벽을 제공할 수 없으므로 라돈 수준에 따라 대체 감축 조치가 사용된다. 이러한 조치에는 그 지역의 바닥 및 실내 환기 개선, 지면과 접촉하는 바닥 및 벽의 큰 틈새 밀봉, 지역의 환기 및 라돈 통 및 추출 배관의 설치가 포함된다.

공학적 수단으로 라돈 수준을 낮추는 것이 필요한 경우, 사용자는 설치 후 즉시 해당 지역의 라돈 농도를 재 측정하여 그 유효성을 검증해야한다. 부정기 측정(예: 연간)에 의해 지원되는 공학적 제어의 정기 유지 보수는 시스템이 계속 유효함을 보장한다.

4) 캐나다

라돈에 대한 근로자의 노출은 캐나다 노동법(Canada Labour Code) 및 캐나다 자연발생 방사성물질 관리 지침(Canadian Guidelines for Management of Naturally Occurring Radioactive Materials; NORM)으로 규정되어 있다.

캐나다 노동법에 따르면, 원자력 규제에 정의된 원자력 방사선 작업자 이외의 어떤 근로자도 평균 1년 이상의 라돈 농도에 노출 될 수 없다. 이 규정은 연방 캐나다 노동법의 관할 하에 있는 사업장에 적용된다.

라돈은 자연적으로 발생한 것인지 작업을 통해 발생한 것인지 구별할 수 없으므로, 선량한도는 라돈 노출량의 총량을 기준으로 한다.

관리 지역에서 추정되는 연간 라돈 가스의 평균 농도가 200 Bq/m^3 이상 800 Bq/m^3 미만일 경우 NORM 분류는 NORM Management이다. 노출을 줄이기 위해 공공 및 부수적으로 노출된 근로자 접근 통제, 작업관행의 변경, 라돈 농도 200 Bq/m^3 이하로 감소 등의 조치를 취해야 한다. 작업현장을 정기적으로 검토하여 조건이 변경되지 않았는지 확인해야 한다.

라돈-222 방사선 방호 관리 한계치는 연평균 800 Bq/m^3 이다. 연간 예상되는 라돈가스 평균 농도가 800 Bq/m^3 이상인 경우 NORM 분류는 "방사선 방호 관리"이다. 방사선 방호 관리 프로그램은 선량 모니터링 프로그램을 시작해야 하고, 가능한 프로그램은 라돈 농도를 200 Bq/m^3 이하로 낮추는 단계를 포함해야 한다.

▶ 방사선 방호 프로그램

사업주는 프로젝트의 일환으로 라돈에 대한 노출과 유효선량을 다음 사항의 이행을 통해 가능한 낮게 유지해야 한다(작업 관행에 대한 관리 통제, 직원 자격과 훈련, 직업 및 공공 방사선 노출 제어, 비정상적인 상황에 대한 계획 수립 등).

고용주는 모니터링 결과로 직접 측정하거나 전문가 추정에 의해 라돈에 대한 노출량과 유효선량을 확인해야 한다.

개인적 방사선량 측정 프로그램에서 연간 유효선량이 5 mSv/a 보다 큰 경우 다음과 같은 추가 단계가 포함되어야 한다.

- 공학적 제어장치를 사용하고 필요에 따라 근로자 선량을 줄이도록 설계된 보호 장비를 제공한다.

- 근로자가 5년 평균 작업 선량한도인 20 mSv/y를 초과하지 않도록 한다.
- 조건의 변화를 측정하고 작업자 선량 계산을 용이하게 하여 작업장을 주기적으로 평가한다.

NORM 관리, 선량 관리 또는 방사선 방호 관리 프로그램이 구현될 때마다 정기적인 검토가 필요하다. 검토는 방사선량에 영향을 미칠 수 있는 시스템에 변화가 있었는지 여부를 판단하고, NORM 프로그램의 효과를 모니터링하며, 변경이 필요한지 여부를 판단하기 위한 것이다. 정기 검토의 빈도는 NORM 프로그램의 변경조건에 따라 달라진다.

▶ The Annual Limit on Intake(ALI)는 근로자가 매년 섭취하거나 흡입할 수 있는 방사성 물질의 양으로 연간 20 mSv의 유효량을 제공한다. ALI 값은 ICRP가 개발한 선량계수(DC) 값에서 도출한다. 흡수 매개변수(호흡률, 입자크기 등)는 직업상 또는 공공 노출 기준에 따라 다르기 때문에 직업상(DCw) 또는 공공(DCp) 노출에 대한 DC 값이 다르다.

▶ 직업별 ALI

ALI를 할당하는 데 두 개의 근로자 그룹이 고려되어야 한다.

- 직업상 노출된 근로자는 정규 업무를 통해 NORM 방사선원에 노출된 직원이다. 이들은 직업적 노출 환경에서 일하는 NORM 근로자로 분류되고, 연평균 유효선량은 20 mSv를 초과해서는 안 된다.
- 우발적으로 노출된 근로자는 NORM 방사선원에 대한 노출을 포함하지 않는 직원이다. 이들은 직업상 노출 환경에서 일하는 구성원으로 간주되며, 이러한 근로자의 연간 유효 선량 한계는 1 mSv이다.

다음의 표 III-32는 NORM 방사성 핵종에 대한 NORM 근로자의 DCw 및 ALI 값을 보여준다. DCw 값은 ICRP Publication 68에서 발췌한 것으로 연평균 유효 선량 한도는 20 mSv/y이다. 비의도적으로 노출된 근로자에 대한 ALI 값은 표에 열거된 값의 1/20 이다.

<표 III-32> 라돈 노출 정도에 따른 NORM 프로그램 분류

연간 평균 농도	NORM 프로그램 분류
800 ~ 3,000 Bq/m ³	방사선 방호 관리
200 ~ 800 Bq/m ³	NORM Management
<200 Bq/m ³	제한되지 않음

제시된 값 내에서 라돈-222와 radon progeny의 제어는 라돈-222와 그 progeny가 해당 한계 내에서 동시에 제어된다.

① 3,000 Bq/m³는 직업 선량 한도(5년 평균)를 기준으로 한다. radon-222와 그 progeny에 대한 평형 계수 0.4 및 연간 2,000시간의 직업적 노출 기간을 가정한다.

② 800 Bq/m³는 방사선 방호 관리 DWL에 기초한다. radon-222와 그 progeny에 대한 평형 계수 0.4 및 연간 2,000시간의 직업적 노출 기간을 가정한다.

③ 200 Bq/m³는 Investigation DWL를 기준으로 한다. radon-222와 그 progeny에 대한 평형 계수 0.4 및 연간 2,000시간의 직업적 노출 기간을 가정한다.

▶ 흡입제어조치

흡입은 일부 NORM 작업환경에서 대부분의 선량을 제공한다. 연간 흡입량이 ALI의 1/20을 초과하는 경우, 공기 중 방사성 물질원의 공학적 통제가 선호되는 관리 방법이다. 제어에는 공기가 빠져나가는 것을 방지하기 위한 capture ventilation과 환기율 증가가 포함된다.

공학 제어장치를 적용한 후 흡입량이 ALI의 25%(5 mSv/y와 동일)를 초과하는 경우, 호흡기 보호 프로그램 및 방사선 방호 프로그램의 일부로 근로자 접근을 제한해야 한다. 호흡 보호는 현지 관할 구역에 있는 다른 위험 먼지에 대해 지정된 표준 요구 사항을 따라야 한다.

5) 체코

체코는 현재 신규 빌딩에서 라돈의 노출을 저감시키는 예방 대책(preventive measures)과 기존 건물에서 개선 조치 및 치료 대책(interventions: remedial measures)으로 구분하여 라돈 프로그램을 시행하고 있으며, 라돈의 위험성과 저감조치에 대한 국민들의 인식을 제고하기 위해 다양한 활동들을 하고 있다.

- ① 토양, 건축자재, 물 등 모든 잠재적인 라돈 소스에 대한 규제와 입법 활동
- ② 공기질 컨트롤 시스템: 토양 속 라돈에 대한 세부 위험성 평가는 건축물 승인에 중요한 부분이므로 허가 당국은 승인에 대한 책임을 짐
- ③ 건축물 자재 생산자, 수입업자, 먹는 물 공급자들은 체코의 핵안전부(The State office of Nuclear Safety)의 감독을 받아야 함
- ④ 집안에서의 라돈 발생에 대한 조사
- ⑤ 고농도의 라돈이 검출된 기존 건물에 대한 타깃 조사
- ⑥ 라돈 관리기준 및 예방조치에 대한 정보자료를 모든 정부 부처와 국민들에게 제공하여 라돈에 대한 건강관리의 인식을 제고
- ⑦ 고농도의 실내 라돈 농도를 가진 거주지 소유자에 대한 지원
- ⑧ 라돈에 대한 보호 조치 및 방법 개발 연구

(1) 중재 프로그램

① 라돈농도가 높은 주택을 조사하기 위해 기존 건축물의 실내 라돈 조사과정의 촉진 → ② 라돈 위험도 지도 작성 → ③ 건물 소유주가 교정 조치 수행을 도움(라돈 완화에 대한 보조금 지급) → ④ 경감 효과 시험 실시(장기적인 측정 기준) → ⑤ 일반 대중에의 라돈 문제 인식 제고

(2) 실내 라돈 조사

트랙 탐지기에 의한 국내 최초의 실내 라돈조사는 1992년 3월에 수행되었다. 400 Bq/m³의 중재수준을 초과하는 주택이 2-3% 가량 (50-70,000가구)에 해당하는 것으로 추산된다. 광범위 대상의 실내 라돈조사가 시작되었고, 지금까지 120,000 개가 넘는 가옥 및 유치원에서 측정이 수행되었으며, 그 중 2만 가구 이상이 아직도 중재수준 400 Bq/m³을 초과하는 것으로 발견되었다.

라돈 함량이 증가한 건물에 대한 전국적인 조사는 현재 SURO(National Radiation Protection Institute)의 보장으로 지역 및 지역 당국과의 긴밀한 협력 하에 이루어진 장기적인 프로젝트이다. 추적 검출기는 1년 동안 건물에 배치된 후 평가된다. 특히, 하층부의 토양에서부터 라돈 침투의 위험이 증가할 수 있는 지역 내의 가정, 학교 및 유치 원 시설에 역점을 두고 있다.

프라하의 체코 지질조사(Czech Geological Survey) (CGS)에 의해 1:50,000 배율의 규모로 작성된 국가 영토의 라돈 위험에 대한 지질학적 예후평가에 관한 맵은 고위험 지역에 대한 라돈 조사를 대상으로 사용된다.

SURO는 측정 결과에 대한 자세한 정보를 제공하고 측정 결과를 시민들에게 전달하는 책임을 진다. SURO는 또한 개선조치 이전의 측정값과 확인된 증가 값이 있는 경우 보다 상세한 측정결과와 자료를 제공한다.

체코의 모든 지방자치단체의 실내 라돈 평균값(기하평균)의 지도는 지질도와 쉽게 비교될 수 있다. 지질학적 예측과 실내 라돈자료에 대한 보다 상세한 비교는 현재 개별 가옥의 GIS 좌표와 개별 지질구조의 라돈 관련 위험에 기반을 두고 있다.

(3) 라돈 감축 및 정부 보조금 지원

프로그램이 시작된 이래로 정부의 지원을 받아 수천 개의 체코 가정과 학교에서 라돈 노출방지 및 완화 정책이 수행되었다. 지난 10년 동안 각 가정의 가옥에서 3,500개 이상의 개선조치가 있었고 개입조치 수준인 400 Bq/m³을 초과

하는 300개가 넘는 학교의 건물 소유주들은 500-5,000 Euro/Mitigation에 해당하는 교부금을 신청할 수 있다.

또한, 라돈 발생원을 확인하고 라돈농도저감 프로젝트를 준비하기 위해 의무적으로 시행되어야 할 상세한 라돈진단방법이 제공되었다. 가장 흔한 교정조치의 관련사항은 다음과 같다. 신축건물의 단열, 토양 흡입, 컴퓨터로 제어되는 압력 환기 등 라돈 관련 저감 및 교정조치 이후 시행된 테스트 측정은 매우 중요한 의미를 갖고 있으며 다음의 두 단계를 통해 수행된다.

① 개선의 일환으로 민간 기업의 단기(최소 1 주일) 측정

② 정부(SURO)가 장기간에 걸친 개선조치의 효율성을 연구하기 위해 추적 장치를 사용하여 장기간의(1년) 결과물을 측정한 후 이상이 발견될 경우 현장에서 심층적인 진단 조사 실시

법정으로 임명된 전문가를 포함하는 라돈 관련 전문작업반이 이 목적을 위해 설치되었으며 최고 수준의 라돈 진단장비, 송풍기 기술, 연속 모니터, 극소형 압력차 및 기류 측정용 압력센서 세트 등이 구축되었다.

그러나 이러한 작업들이 아직도 건축 산업에 있어서 상대적으로 새로운 것이라는 사실 때문에 여전히 실패하고 있다. 단기적인 측정은 대부분의 성공적인 완화를 보여 주었지만, 지난 10년 이내에 실현된 약 25%의 개선조치는 실패했음을 보여준다.

평균 유효성은 40%, 최고(sub-soil suction) 90%에 이른다. 새로운 정부의 라돈 완화 보조금 정책은 훨씬 더 제한적이다. 평균 실내 라돈 농도가 1,000 Bq/m³ 이상인 경우에만 제공될 것이며, 또한 보조금은 완화가 실제로 성공적이었다는 승인을 받은 후에야 제공될 것이다.

(4) 예방대책

원자력법령에 의하면 "생수의 건축자재, 제조업자 및 수입업자, 일반 대중을 위한 식수공급 업체의 제조업자 및 수입업자는 자연 방사성 핵종 농도의 체계

적인 측정 및 평가를 위해 시행중인 법적 규제에 명시된 범위 내에서 제공해야 하며, 결과를 기록 및 제출하고 SUJB(방사선 방호 권한)에 보고해야 한다.

자연치유원으로 지정된 물을 제외하고는 건축자재나 생수를 유통시키지 말아야 하며 다음 경우에 식수를 공급해야 한다.

자연 방사성 핵종 농도가 시행중인 법규에 의해 정해진 최대 허용치를 초과하거나, 자연 방사성 핵종 농도가 방사성 핵종 농도 감소를 목표로 하는 교정 조치의 비용이 건강에 해를 끼치는 위험보다 높을 가능성이 있는 경우를 제외하고는 시행중인 법적 규제에서 정한 지침 수준을 유지한다.

모든 측정은 SUJB가 감독하는 승인된 실험실에서만 제공될 수 있으며, 관리자는 무작위 샘플링 및 측정도 수행한다.

① 건축 자재

건축 자재의 천연 방사성 핵종 내용에 대한 규제는 면제수준 및 한계 값을 적용하는 시스템을 기반으로 한다. 활동 지수와 질량 활동에서 정의된 Ra226 및 Th232 (CK, CRa, CTh)는 실내 감마선 선량을 규제할 위한 면제 수준으로 사용된다. 활동 지수에 대해 허용된 면제 수준은 건물의 대량으로 사용되는 자재에 따라 다르다(벽돌과 콘크리트 : $I = 0.5$, 소량으로 사용되는 재료 : $I = 1.0$) 타일 : $I = 2.0$). Ra226 질량활동의 한계 값은 실내 라돈 호기의 한계로 설정되며 건물에 대해서도 이와 유사하다.

② 물

급수와 관련된 자연 방사능의 규제는 유사한 시스템에 기초하며, 가장 중요한 천연 방사성 핵종에 대한 심층 분석이 의무적이며 제한은 효과적인 선량평가에 기초한다.

(5) 정보 및 대중 인식(Information and Public Awareness)

라돈 보고서는 일 년에 두 번 발행되어 전국의 모든 건물사무소(800개의 건물 사무소)와 "라돈 위험도가 높은 지역"의 시장에게 배포된다.

(6) 라돈 관리 관련 추가 연구 수행

단기 및 장기 측정의 변동성 및 라돈 측정의 해석을 객관화하기 위한 교란 인자(기상학 등)의 영향에 대한 조사와 새로운 에너지 절약 주택 건설로 인한 실내 노출의 장기 변화에 대해서 조사를 진행하고 있으며, 조사의 주요 내용은 다음과 같다.

- ① 실내 라돈농도를 구체화하기 위한 새로운 라돈 진단방법 개발, 라돈원 및 라돈 도입 속도를 확인하고 정량화하며, 건물 건축을 통한 라돈 침투 조사, 블로어 도어기술, 라돈 유입속도 지속적인 라돈 모니터에 의한 측정, 단기 및 장기 환기 측정 및 분석 등
- ② 실내 라돈과 토양 가스 라돈과의 관계, 지질학 파라미터 및 건축 기술의 영향, 지질학 예측에 대한 더 나은 이해를 목표로 하는 확률론적 분석에 기초한 실내 암반 라돈 이동 인자
- ③ 라돈 매핑 프로세스의 유효성에 대한 심층 조사
- ④ 새로운 비용-효과적인 구제조치 및 장기적인 완화 대책의 조사
- ⑤ 라돈(Rn) 프로그램 효과에 대한 조사

6) 핀란드

(1) 개요

방사선 법에서 책임 담당자(고용자)는 기존 작업장에서 라돈 농도 측정에 대하여 언급 되었지만 처벌에 대한 규정은 없다.

라돈의 위험을 방지하기 위한 국가 행동 계획 방사선 안전법 제 159 조에 언급된 국가행동 계획에서 집, 다른 생활공간 및 작업장에서 라돈이 노출에 대한 위험성을 다루고 있다. 토양 및 기반암, 건설 제품 및 가정 용수 등에 대해서 부록 6은 실천 계획의 내용을 자세히 기술한다. 실천 계획은 5 년마다 개정된다.

(2) 작업장에서의 라돈

방사선 안전법(Radiation Safety Act)에서는 토양에서 방출되어 실내에 침투하는 실내공기에서의 라돈, 지하 작업장 등의 모든 곳에서 조사가 되도록 의무화하고 있다. 또한, 핀란드에 위치한 작업장의 모든 낮은 층은 의무적으로 라돈 측정을 의무적으로 수행해야하며 첨부된 지도에서는 측정 의무가 있는 우수 지정촌 및 우편번호 등 지역이 있다. 관찰 의무가 있는 영역 보다 정확한 목록은 STUK의 웹페이지에 제공된다.

(3) 작업장에서의 라돈 측정 방법

작업장에서의 라돈 측정은 9 월 중순과 5 월 말에 실시해야 한다. 첫 번째 측정은 최소 2 개월 동안 항상 진행된다. 일반적으로 측정 모드에서 유지되고 측정 시간 후 분석을 위해 서비스 제공자에게 라돈 측정 캔으로 보내진다.

사무실 구내에서 측정은 100 m²당 측정이 수행되어야하고 사무실 면적이 200 m²보다 큰 경우 각 시작 200 m²당 측정이 수행되어야한다. 산업 홀과 같이 연속적인 개방 공간에서는 초기 3,000 m² 당 측정을 한다. 작업장에서의 라돈 측정에 사용되는 장치 및 방법은 STUK의 승인을 받아야한다. STUK의 웹 사이트에서 승인 된 측정 방법 및 측정 서비스를 제공하는 서비스 제공 업체에 대한 정보를 찾을 수 있다. 고용주는 측정 결과를 STUK에 보고해야 한다.

측정 중 참고 값을 초과하지는 않았더라도 작업실에서의 라돈 측정은 10 년 간격으로 반복하는 것이 좋다.

(4) 고농도 노출 라돈의 경우

고용주는 방사선 안전법에 명시된 기준치를 초과하거나 레이더 노출을 제한하는 조치를 시작하면보다 자세한 측정을 해야 한다. 정규 작업을 위한 작업장의 라돈 내용에 대한 기준 값은 300 Bq/m³이다.

라돈 캔을 이용한 측정은 선별 검사이며, 기준치를 초과하면 근로자의 라돈

노출이 작업 하는 동안 높을 농도로 노출될 수 있다는 신호이다. 이 연구는 근무시간 동안 라돈 함유량을 측정하여 명시 할 수 있다. 근무시간 중 라돈 함유량이 기준치보다 높으면 라돈 함유량을 줄이거나 노출 시간을 제한해야 한다. 라돈 함유량을 줄이는 효율적인 방법은 환기 강화, 구조물의 밀폐 및 라돈 흡입 또는 우물 설치이다.

개선 방법은 실내 공기, 건물의 구조, 환기 및 지면의 측정 된 라돈 성분 및 건물 아래의 충진에 영향을 받는다. 라돈 개선은 업계 경험이 있는 수리 회사에서 수행하며, 경우에 따라 직접 오염 제거를 수행 할 수도 있다.

5. 라돈 관련 국내 법규 검토

1) 생활주변방사선 안전 관리법

생활주변방사선 안전 관리법(약칭: 생활방사선법, 2019.07.16. 시행)과 이에 따른 생활주변방사선 안전 관리법 시행령(개정 : 2019.07.09. 시행 : 2019.07.16.)과 시행규칙(개정 : 2019.07.16. 시행 : 2019. 07.16)에서 규정하고 있는 라돈 노출로 인한 근로자 보호 규정은 다음과 같다. 이해를 돕기 위해 작업장 라돈관리와 관련된 부분은 밑줄 및 굵게 표시하였다.

생활주변방사선 안전 관리법

제2조(정의) 이 법에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. "생활주변방사선"이란 다음 각 목의 방사선을 말한다.
 - 다. 지구표면의 암석 또는 토양에서 방출되는 방사선(이하 "지각방사선"이라 한다)
2. "원료물질"이란 우라늄 235, 우라늄 238, 토륨 232와 라돈 220 및 라돈 222 등 각각의 붕괴계열 내의 핵종 또는 포타슘 40 등 천연방사성핵종이 포함된 물질로서 「원자력안전위원회의 설치 및 운영에 관한 법률」 제3조에 따른 원자력안전위원회(이하 "원자력안전위원회"라 한다)가 정하여 고시하는 방사능 농도와 수량을 초과하는 것을 말한다.

제5조(생활주변방사선방호 종합계획의 수립) ① 원자력안전위원회는 생활주변방사선으로부터 국민의 건강과 환경을 보호하기 위하여 관계 중앙행정기관의 장과 협의하여 5년마다 생활주변방사선방호 종합계획(이하 "종합계획"이라 한다)을 수립하여야 한다.

② 종합계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.

1. 생활주변방사선방호 정책의 목표와 기본방향에 관한 사항
2. 생활주변방사선으로부터의 환경 보호에 관한 사항
3. 생활주변방사선의 안전관리에 관한 현황과 전망에 관한 사항

4. 생활주변방사선에 대한 연구개발에 관한 사항
5. 원료물질, 공정부산물 및 가공제품에 대한 조사·분석에 관한 사항
6. 공정부산물의 처리·처분 또는 재활용에 관한 사항
- 6의2. 제15조의 안전기준에 부적합한 가공제품에 대한 조치에 관한 사항
7. 우주방사선, 지각방사선 등의 안전관리 체계 구축을 위하여 필요한 사항
8. 그 밖에 생활주변방사선의 안전관리를 위하여 필요한 사항 중 대통령령으로 정하는 사항

제8조(안전지침의 작성·배포 등) ① 원자력안전위원회는 생활주변방사선의 안전관리를 위하여 필요한 안전지침을 작성하여 제9조의 취급자·등록 제조업자 및 제18조의 항공운송사업자 등에게 배포하여야 한다.

② 제1항의 안전지침에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.

1. 제13조제2항에 따른 공정부산물 처리·처분 또는 재활용의 방법·절차에 관한 사항
2. 제14조에 따른 원료물질 또는 공정부산물의 취급·관리 시 준수사항
3. 제15조에 따른 가공제품의 안전기준에 관한 사항
4. 우주방사선 및 지각방사선에 피폭(被曝)할 우려가 있는 사람의 안전조치에 관한 사항

제12조(기록·보관 및 보고) ① 취급자 및 등록제조업자는 원료물질, 공정부산물 및 가공제품의 취득·발생·보관·판매·처분 현황(이하 "유통현황"이라 한다) 및 제14조제1항 제5호에 따른 건강진단 결과 등을 기록·보관하고 원자력안전위원회에 보고하여야 한다.

제14조(원료물질 또는 공정부산물의 취급·관리 시 준수사항) ① 취급자 및 등록제조업자는 원료물질 또는 공정부산물을 취급·관리할 때에 관련 종사자의 건강 및 환경 보호를 위하여 다음 각 호의 사항을 준수하여야 한다.

1. 화재예방 및 침수 발생을 방지하기 위한 시설을 설치하거나 필요한 조치를 할 것
2. 원료물질 또는 공정부산물이 공기 중에 흩날리는 것을 방지하기 위한 시설을 설치하거나 필요한 조치를 할 것
3. 원료물질 또는 공정부산물을 취급하는 장소의 방사능 농도 또는 방사선량을 측정하고 관리할 것
4. 원료물질 또는 공정부산물을 취급·관리하는 종사자가 연간 생활주변방사선에 피폭되는 양을 조사·분석할 것

5. 원료물질 또는 공정부산물을 취급·관리하는 종사자에 대하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 건강진단을 실시할 것

② 취급자 및 등록제조업자는 제1항 제4호의 조사·분석 결과 및 같은 항 제5호의 건강진단 결과에 따라 종사자의 건강을 보호하고 작업환경을 개선하기 위하여 대통령령으로 정하는 안전조치를 하여야 한다.

제23조(생활주변방사선 안전관리 실태 조사 및 분석) ① 원자력안전위원회는 생활주변방사선의 안전관리 실태를 점검하기 위하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 매년 다음 각 호에 해당하는 사항에 대한 조사계획을 수립·시행하여야 한다.

1. 원료물질과 공정부산물의 유통현황 및 가공제품의 제조 또는 수출입 현황
2. 취급자 또는 제조업자가 운영하는 시설 주변의 방사능 농도 및 환경의 오염 정도
3. 감시기 운영자가 설치·운영하는 감시기의 운영·관리 현황
4. 그 밖에 생활주변방사선 안전관리에 필요한 사항

제24조(보고 및 검사) ② 취급자, 등록 제조업자, 재활용고철취급자는 원료물질, 공정부산물 또는 방사성물질이 포함된 재활용고철의 취급·관리 등에 관하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 정기적으로 원자력안전위원회의 검사를 받아야 한다. 이 경우 검사 대상별 검사 주기는 1년 이상 3년 이하의 범위에서 원료물질 또는 공정부산물의 종류 및 수량, 감시기 운영 대수 등을 고려하여 대통령령으로 정한다.

생활주변방사선 안전 관리법 시행령

제2조(종합계획에 포함될 사항) 「생활주변방사선 안전 관리법」(이하 "법"이라 한다) 제5조제2항 제8호에서 "대통령령으로 정하는 사항"이란 다음 각 호의 사항을 말한다.

2. 법 제27조에 따른 생활주변방사선 전문기관(이하 "전문기관"이라 한다)의 지정·운영에 관한 사항
3. 생활주변방사선이 인체에 미치는 영향에 관한 분석 및 평가에 관한 사항

제5조의2(건강진단) ① 취급자 및 등록제조업자는 법 제14조제1항 제5호에 따라 원료물질 또는 공정부산물을 취급·관리하는 종사자에 대하여 다음 각 호의 시기에 건강진단을 실시하여야 한다.

- ③ 제1항에도 불구하고 해당 종사자가 다음 각 호의 건강진단을 받은 경우에는 제1항에 따른 건강진단을 받은 것으로 본다.

1. 「원자력안전법」 제91조제1항 제2호에 따른 건강진단
 2. 「산업안전보건법」 제43조에 따른 건강진단 중 총리령으로 정하는 건강진단
- 제6조(원료물질 또는 공정부산물 취급·관리 시 안전조치)** 법 제14조제2항에서 "대통령령으로 정하는 안전조치"란 다음 각 호의 사항을 말한다.
1. 법 제14조제1항 제4호의 조사·분석결과 원료물질 또는 공정부산물을 취급·관리하는 종사자의 피폭방사선량이 선량한도를 초과하지 않도록 할 것
 2. 법 제14조제1항 제5호에 따른 건강진단 결과 해당 종사자가 해당 업무를 수행하기에 부적합하다는 의사의 소견이 있는 경우 피폭 우려가 적은 업무로 전환할 것
 4. 해당 종사자의 방사선 피폭 저감(低減)을 위한 장치 또는 기구 활용 등 조치
 5. 해당 종사자에 대한 원료물질 또는 공정부산물의 취급·관리에 따른 피폭방사선량에 관한 정보 제공
- 제14조의2(정기검사 등)** ① 취급자, 법 제9조제1항 제5호에 해당하여 같은 항에 따라 등록을 한 자(이하 "등록제조업자"라 한다), 감시기설치·운영대상 재활용고철취급자는 법 제24조제2항에 따라 사업소별로 원료물질, 공정부산물 또는 방사성물질이 포함된 재활용고철의 취급·관리 등에 관하여 별표 1의 주기에 따라 원자력안전위원회의 정기검사를 받아야 한다.
- ② 제1항에 따른 정기검사의 항목은 다음 각 호와 같다.
1. 취급자 및 등록 제조업자
- 나. 법 제12조에 따른 유통현황 및 건강진단 결과 등의 기록·보관에 관한 사항
- 라. 법 제14조에 따른 원료물질 또는 공정부산물의 취급·관리 시의 준수사항

생활주변방사선 안전 관리법 시행규칙

- 제7조의2(건강진단)** ① 영 제5조의2제3항 제2호에서 "총리령으로 정하는 건강진단"이란 다음 각 호의 건강진단을 말한다.
1. 「산업안전보건법 시행규칙」 제99조제4항 각 호 외의 부분 본문에 따른 방사선 유해인자에 대한 배치전건강진단(영 제5조의2제1항 제1호의 경우에 해당한다)
 2. 「산업안전보건법 시행규칙」 제99조제2항 각 호 외의 부분 본문에 따른 방사선 유해인자에 대한 특수건강진단(영 제5조의2제1항 제2호 및 제3호의 경우에 해당한다)

라돈 노출근로자의 건강보호를 위해서 생활방사선법에서 새로 개정되어 시행되는 내용 중 중요한 변화는 원료물질에 라돈을 포함시켰다는 것이다. 이로써 원료물질을 사용하거나 그로 인한 공정부산물에 노출되는 근로자는 법에서 규정하고 있는 안전조치사항을 따라야 한다. 또한 취급자 및 등록제조업자는 원료물질 또는 공정부산물을 취급·관리하는 장소 및 종사자에 대해서 방사선량을 측정하고 건강진단을 받게 되어 있고, 건강진단 결과는 원자력안전위원회에 보고하게 되어 있다.

또한, 원자력안전위원회는 생활주변방사선(지각방사선 포함) 뿐만 아니라 원료물질, 공정부산물에 대해서도 5년마다 종합계획을 수립해야 하며, 원료물질 또는 공정부산물의 취급·관리 시 준수사항과 지각방사선(라돈 포함)에 피폭할 우려가 있는 사람의 안전조치사항에 대해서 취급자 및 등록 제조업자에게 필요한 안전지침을 배포해야 한다.

라돈을 원료물질로 취급하는 자는 라돈 노출에 대한 안전조치를 취해야 하며, 안전조치는 원료물질이 훔날리는 것을 방지해야 한다. 또한, 피폭되는 양을 조사·분석해야 하며, 건강진단을 받아야 한다. 이러한 안전조치가 잘 지켜지는지 원자력안전위원회는 주기적으로 검사하도록 되어 있다. 건강진단의 경우, 산업안전보건법에 시행하고 있는 배치전건강진단과 특수건강진단을 시행하는 경우 이를 인정해 주고 있다.

언급한 바와 같이, 생활방사선법에서는 주로 원재료를 사용하거나 취급하는 사업장에 대해서는 여러 가지 안전조치사항을 새로 마련하여 관리하고 있으나, 자연적으로 노출되는 근로자를 보호하기 위한 법규의 내용으로는 부족한 점이 많다. 하지만, 라돈을 원재료 및 가공제품으로 하는 근로자들을 위한 법규개정이 되었다는 점에서 고무적이라 할 수 있다.

2) 산업안전보건법

산업안전보건법은 모든 근로자에 대한 안전과 보건 증진을 위한 법으로서 각 사업장에서 필요한 안전보건조치 사항에 대하여 규정하고 있다. 산업안전보건법은 전부 개정되어 2019년 1월15일 공포(시행:2020.01.16) 되었으나, 현재 시행령과 시행규칙, 안전보건 기준에 관한 규칙 등이 개정 중이어서 본 연구에서는 현재 시행중인 법령으로 검토하고자 한다. 산업안전보건법 및 시행규칙 등에서 규정하고 있는 라돈과 관련된 사항은 다음과 같다.

산업안전보건법

제24조(보건조치) ① 사업주는 사업을 할 때 다음 각 호의 건강장해를 예방하기 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.

2. 방사선·유해광선·고온·저온·초음파·소음·진동·이상기압 등에 의한 건강장해

② 제1항에 따라 사업주가 하여야 할 보건상의 조치 사항은 고용노동부령으로 정한다.

제41조의2(위험성평가) ① 사업주는 건설물, 기계·기구, 설비, 원재료, 가스, 증기, 분진 등에 의하거나 작업행동, 그 밖에 업무에 기인하는 유해·위험요인을 찾아내어 위험성을 결정하고, 그 결과에 따라 이 법과 이 법에 따른 명령에 의한 조치를 하여야 하며, 근로자의 위험 또는 건강장해를 방지하기 위하여 필요한 경우에는 추가적인 조치를 하여야 한다.

제43조(건강진단) ① 사업주는 근로자의 건강을 보호·유지하기 위하여 고용노동부장관이 지정하는 기관 또는 「국민건강보험법」에 따른 건강검진을 하는 기관(이하 "건강진단기관"이라 한다)에서 근로자에 대한 건강진단을 하여야 한다.

산업안전보건법 시행령

제32조의8(유해·위험작업에 대한 근로시간 제한 등) ③ 사업주는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 유해·위험작업에서 법 제23조와 제24조에 따른 유해·위험 예방조치 외에 작업과 휴식의 적정한 배분, 그 밖에 근로시간과 관련된 근로조건의

개선을 통하여 근로자의 건강 보호를 위한 조치를 하여야 한다.

4. 라듐방사선이나 엑스선, 그 밖의 유해 방사선을 취급하는 작업

산업안전보건법 시행규칙

제98조(정의) 이 장에서 사용하는 용어의 뜻은 다음 각 호와 같다.

2. "특수건강진단"이란 법 제43조제1항에 따라 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 근로자의 건강관리를 위하여 사업주가 실시하는 건강진단을 말한다.
가. 별표 12의2에서 정한 특수건강진단 대상 유해인자에 노출되는 업무(이하 "특수건강진단대상업무"라 한다)에 종사하는 근로자
3. "배치전건강진단"이란 특수건강진단대상업무에 종사할 근로자에 대하여 배치 예정업무에 대한 적합성 평가를 위하여 사업주가 실시하는 건강진단을 말한다.

■ 산업안전보건법 시행규칙 [별표 12의2]

특수건강진단 대상 유해인자(제98조제2호 관련)

3. 물리적 인자(8종)

- 3) 안전보건규칙 제573조제1호의 방사선

제99조(건강진단의 실시 시기 등) ② 사업주는 특수건강진단대상업무에 종사하는 근로자에 대해서는 별표 12의3에서 특수건강진단 대상 유해인자별로 정한 시기 및 주기에 따라 특수건강진단을 실시하여야 한다.

④ 사업주는 특수건강진단대상업무에 근로자를 배치하려는 경우에는 해당 작업에 배치하기 전에 배치전건강진단을 실시하여야 하고, 특수건강진단기관에 해당 근로자가 담당할 업무나 배치하려는 작업장의 특수건강진단 대상 유해인자 등 관련 정보를 미리 알려주어야 한다.

■ 산업안전보건법 시행규칙 [별표 12의3]

특수건강진단의 시기 및 주기(제99조제2항 관련)

구 분	대 상 유 해 인 자	시 기	주 기
		배치 후 첫 번째 특수 건강 진단	
6	제1호부터 제5호까지의 규정의 대상 유해인자를 제외한 별표 12의2의 모든 대상 유해인자	6개월 이내	12개월

제100조(검사항목 및 실시방법)

④ 특수건강진단·배치전건강진단 및 수시건강진단의 검사항목은 제1차 검사항목과 제2차 검사항목으로 구분하며, 각 세부 검사항목은 별표 13과 같다.

■ 산업안전보건법 시행규칙 [별표 13]

특수건강진단·배치전건강진단·수시건강진단의 검사항목(제100조제4항 관련)

다. 물리적 인자(8종)

번호	유해인자	제1차 검사항목	제2차 검사항목
3	안전보건규칙 제573조제1호에 따른 방사선	(1) 직업력 및 노출력 조사 (2) 주요 표적기관과 관련된 병력조사 (3) 임상검사 및 진찰 ① 조혈기계: 혈액소량, 혈구용적치, 적혈구 수, 백혈구 수, 혈소판 수, 백혈구 백분율 ② 눈, 피부, 신경계, 조혈기계: 관련 증상 문진	임상검사 및 진찰 ① 조혈기계: 혈액도말검사, 망상적혈구 수 ② 눈: 세극등현미경검사

산업안전보건기준에 관한 규칙

제7장 방사선에 의한 건강장해의 예방

제1절 통칙

제573조(정의) 이 장에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. "방사선"이란 전자파나 입자선 중 직접 또는 간접적으로 공기를 전리(電離)하는 능력을 가진 것으로서 알파선, 중양자선, 양자선, 베타선, 그 밖의 중하전입자선, 중성자선, 감마선, 엑스선 및 5만 전자볼트 이상(엑스선 발생장치의 경우에는 5천 전자볼트 이상)의 에너지를 가진 전자선을 말한다.
2. "방사성물질"이란 핵연료물질, 사용 후의 핵연료, 방사성동위원소 및 원자핵분열 생성물을 말한다.
3. "방사선관리구역"이란 방사선에 노출될 우려가 있는 업무를 하는 장소를 말한다.

제2절 방사성물질 관리시설 등

제574조(방사성물질의 밀폐 등) ① 사업주는 근로자가 다음 각 호에 해당하는 방사선 업무를 하는 경우에 방사성물질의 밀폐, 차폐물(遮蔽物)의 설치, 국소배기장치의 설치, 경보시설의 설치 등 근로자의 건강장해를 예방하기 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.

제575조(방사선관리구역의 지정 등) ① 사업주는 근로자가 방사선업무를 하는 경우에 건강장해를 예방하기 위하여 방사선 관리구역을 지정하고 다음 각 호의 사항을 게시하여야 한다.

제576조(방사선 장치실) 사업주는 다음 각 호의 장치나 기기(이하 "방사선장치"라 한다)를 설치하려는 경우에 전용의 작업실(이하 "방사선장치실"이라 한다)에 설치하여야 한다.

제577조(방사성물질 취급 작업실) 사업주는 근로자가 밀봉되어 있지 아니한 방사성 물질을 취급하는 경우에 방사성물질 취급 작업실에서 작업하도록 하여야 한다.

제578조(방사성물질 취급 작업실의 구조) 사업주는 방사성물질 취급 작업실 안의 벽·책상 등 오염 우려가 있는 부분을 다음 각 호의 구조로 하여야 한다.

제3절 시설 및 작업관리

제579조(게시 등) 사업주는 방사선 발생장치나 기기에 대하여 다음 각 호의 구분에

다른 내용을 근로자가 보기 쉬운 장소에 게시하여야 한다.

제580조(차폐물 설치 등) 사업주는 근로자가 방사선장치실, 방사성물질 취급작업실, 방사성물질 저장시설 또는 방사성물질 보관·폐기 시설에 상시 출입하는 경우에 차폐벽(遮蔽壁), 방호물 또는 그 밖의 차폐물을 설치하는 등 필요한 조치를 하여야 한다.

제581조(국소배기장치 등) 사업주는 방사성물질이 가스·증기 또는 분진으로 발생할 우려가 있을 경우에 발산원을 밀폐하거나 국소배기장치 등을 설치하여 가동하여야 한다.

제582조(방지설비) 사업주는 근로자가 신체 또는 의복, 신발, 보호장구 등에 방사성 물질이 부착될 우려가 있는 작업을 하는 경우에 판 또는 막 등의 방지설비를 설치하여야 한다. 다만, 작업의 성질상 방지설비의 설치가 곤란한 경우로서 적절한 보호조치를 한 경우에는 그러하지 아니하다.

제583조(방사성물질 취급용구) ① 사업주는 방사성물질 취급에 사용되는 국자, 집게 등의 용구에는 방사성물질 취급에 사용되는 용구임을 표시하고, 다른 용도로 사용해서는 아니 된다.

② 사업주는 제1항의 용구를 사용한 후에 오염을 제거하고 전용의 용구걸이와 설치대 등을 사용하여 보관하여야 한다.

제584조(용기 등) 사업주는 방사성물질을 보관·저장 또는 운반하는 경우에 녹슬거나 새지 않는 용기를 사용하고, 겉면에는 방사성물질을 넣은 용기임을 표시하여야 한다.

제585조(오염된 장소에서의 조치) 사업주는 분말 또는 액체 상태의 방사성물질에 오염된 장소에 대하여 즉시 그 오염이 퍼지지 않도록 조치한 후 오염된 지역임을 표시하고 그 오염을 제거하여야 한다.

제586조(방사성물질의 폐기물 처리) 사업주는 방사성물질의 폐기물은 방사선이 새지 않는 용기에 넣어 밀봉하고 용기 겉면에 그 사실을 표시한 후 적절하게 처리하여야 한다.

제4절 보호구 등

제587조(보호구의 지급 등) ① 사업주는 근로자가 분말 또는 액체 상태의 방사성물질에 오염된 지역에서 작업을 하는 경우에 개인전용의 적절한 호흡용 보호구를 지

급하고 착용하도록 하여야 한다.

② 사업주는 **방사성물질**을 취급하는 때에 방사성물질이 흩날림으로써 근로자의 신체가 오염될 우려가 있는 경우에 보호복, 보호장갑, 신발덮개, 보호모 등의 보호구를 지급하고 착용하도록 하여야 한다.

③ 근로자는 제1항에 따라 지급된 보호구를 사업주의 지시에 따라 착용하여야 한다.

제588조(오염된 보호구 등의 폐기) 사업주는 방사성물질에 오염된 보호복, 보호장갑, 호흡용 보호구 등을 즉시 적절하게 폐기하여야 한다.

제589조(세척시설 등) 사업주는 근로자가 방사성물질 취급 작업을 하는 경우에 세면·목욕·세탁 및 건조를 위한 시설을 설치하고 필요한 용품과 용구를 갖추어 두어야 한다.

제590조(흡연 등의 금지) ① 사업주는 방사성물질 취급 작업실 또는 그 밖에 방사성물질을 들이마시거나 섭취할 우려가 있는 작업장에 대하여 근로자가 담배를 피우거나 음식을 먹지 않도록 하고 그 내용을 보기 쉬운 장소에 게시하여야 한다.

② 근로자는 제1항에 따라 흡연 또는 음식물 섭취가 금지된 장소에서 흡연 또는 음식물 섭취를 해서는 아니 된다.

제591조(유해성 등의 주지) 사업주는 근로자가 방사선업무를 하는 경우에 방사선이 인체에 미치는 영향, 안전한 작업방법, 건강관리 요령 등에 관한 내용을 근로자에게 알려야 한다.

산업안전보건법에서는 방사선에 의한 건강장해 예방을 위한 조치를 해야 한다고 규정하고 있다. 이에 따른 건강진단(시행규칙) 및 건강장해 예방 조치(안전보건 규칙)를 시행해야 한다. 위험성평가는 사업장 내의 모든 위험요인을 찾아내어 관리를 해야 함으로 방사선이 포함되어 관리되어야 한다.

하지만, 현재 산업안전보건법에서 다루고 있는 방사선이 라돈을 포함하느냐에 대한 논의는 필요하다. 만일 산업안전보건법, 시행규칙, 안전보건규칙에서 규정하고 있는 방사선에 라돈이 포함된다면 위험성평가는 물론이고 건강진단부터 시행되어야 한다. 특수건강진단 대상물질에 방사선이 포함되어 있고, 이는 안전보건규칙 정의에 있는 방사선으로 정의하고 있다. 하지만 방사선에 대한

건강진단 항목을 보면 이는 라돈 노출로 인한 폐질환을 예방하기 위한 검사 항목으로는 적합하지 않다. 결국, 건강진단 항목의 방사선은 라돈을 포함하여 기준을 만든 것은 아니라는 것이다. 따라서 안전보건 규칙 정의에 있는 방사선에 라돈이 포함되느냐에 대한 논의는 필요하다.

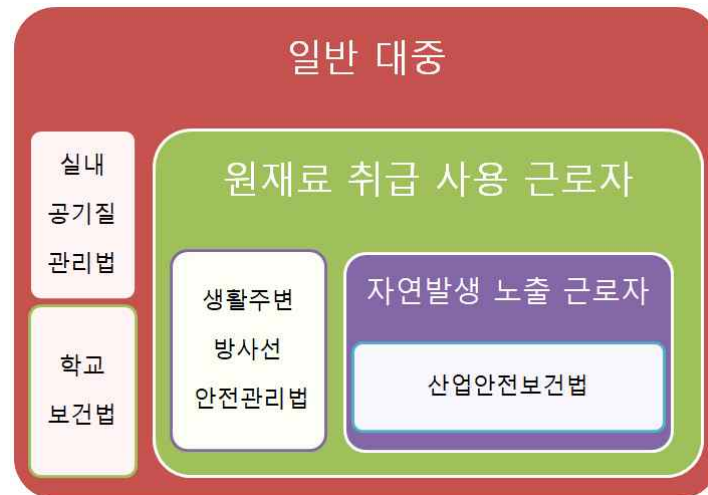
현재 산업안전보건법에서의 방사선은 자연적으로 존재하는 방사선이나 방사성의 가스 상 물질을 관리하기 위한 법률은 아닌 것으로 여겨지는 것이 일반적이다. 특히, 안전보건 규칙에 있는 방사선에 의한 건강장해 예방은 주로 방사선 업무, 방사성 물질 취급 작업, 방사선 발생 장치 등에 대한 것으로 라돈과 같이 자연적으로 존재하는 방사선에 노출될 수 있는 근로자를 보호하는 데 한계가 있다. 물론 라돈을 직접 취급하는 작업에 대해서는 방사성물질 취급 작업으로 안전보건규칙이 해당 될 수 있다.

3) 라돈 관련 법규 검토 결과

라돈과 관련된 생활주변방사선 안전관리법과 산업안전보건법을 비교 검토한 결과, 라돈을 직접 취급하거나 원재료에 포함되어 노출되는 근로자는 원자력안전위원회의 생활주변방사선 안전 관리법으로 보호될 것으로 보인다. 생활주변방사선 안전 관리법에서 라돈을 원재료로 하는 작업장에 대한 안전조치, 측정, 건강진단 등을 시행하게 되어 있고, 이를 원자력안전위원회에서 주기적으로 검사하게 되어 있기 때문이다.

원자력안전위원회에서는 생활주변방사선 안전관리에 대한 종합계획을 수립하게 되어 있고, 지각방사선(라돈포함)도 여기에 포함되어 있어 라돈을 직접 취급하지 않으나 자연적으로 존재하는 라돈에 간접적으로 노출되는 근로자에 대해서도 안전관리계획이 수립되어야 한다. 하지만, 자연적으로 발생하는 라돈에 노출되는 근로자에 대해서는 구체적인 안전관리 방안이 마련되어 있지 않아, 이는 산업안전보건법을 통하여 관리를 하는 것이 필요해 보인다. 대략적인

법규 보호 모식도는 그림 III-32와 같다.



[그림 III-32] 라돈 노출에 대한 법규 체계(안)

4) 산업안전보건법 하위법령 개정안

현재 산업안전보건법은 2019년 1월 15일 전부개정 공포되어 2020년 1월 16일 시행이며, 하위법령(시행령과 시행규칙, 안전보건에 관한 규칙 등)은 2019년 내에 개정될 것으로 보인다. (현재 시행령과 시행규칙, 안전보건에 관한 규칙은 입법예고 중. 4월 22일 부터 10월 9일까지) 현재 산업안전보건법 하위법령 개정안에서는 라돈에 관한 내용이 들어가 있지 않다. 따라서 라돈에 대한 근로자에 건강장해 예방을 위한 규정을 시행규칙 및 안전보건 규칙에 포함시켜 관리할 것을 제안하고자 한다.

주요 개정내용으로는 원료 취급 사업장이 아닌 이유로 생활주변방사선 안전관리법의 범위에서 제외됨에도 라돈에 노출될 우려가 있는 근로자들에 대해 정기적으로 특수건강진단 및 배치 전 건강진단을 받을 수 있도록 하고, 사업주는 정기적인 라돈 농도 측정을 통하여 라돈 노출에 대한 작업장 관리를 강화하고,

라돈 노출 작업장에 경고표지 등을 부착하여 근로자의 알권리를 보장하며, 보호구 착용 및 유해성 주지를 통해 근로자 건강장해를 예방하도록 하는 것이다.

작업환경측정의 경우, 라돈을 직접 취급하는 자는 생활주변방사선 안전 관리법에 의해서 취급자는 피폭량을 측정해야 하고, 이를 원자력안전위원회에서 정기적으로 검사하게 되어 있어, 산업안전보건법 제42조의 작업환경측정 항목으로 포함 시키는 것은 중복규제에 해당할 수 있고, 현재 산업안전보건법 시행규칙 [별표11-5] 작업환경측정 대상 유해인자에는 방사선과 관련된 물리적 인자에 대한 측정대상물질은 없다. 이는 방사선 관련된 유해인자는 원자력안전위원회에서 관리를 일원화하고 있기 때문에 굳이 산업안전보건법에서 별도로 측정대상물질에 포함시킬 필요가 없으며, 현재의 작업환경측정은 6개월의 주기로 정기적인 측정을 하고 있으나 방사선 노출량을 연 2회 측정으로 평가할 수 없기 때문에 라돈을 작업환경측정 대상 유해인자에 포함시키는 것은 배제하였다.

그러나 라돈을 직접 취급하진 않지만, 라돈에 노출 가능성이 있는 비의도적 라돈 노출작업장의 경우 정기적인 라돈 농도의 측정을 통한 작업장 관리는 필요하며, 이는 산업안전보건법 제42조의 작업환경측정 제도가 아닌 산업안전보건기준에 관한 규칙의 방사선으로 인한 건강장해 예방 내의 규정으로서 사업주가 라돈 노출 작업장의 라돈 농도 수준을 파악하고 라돈 농도에 따른 정기적인 측정을 실시하며 이를 통하여 근로자의 라돈 노출을 최소화 할 수 있도록 관련 규정을 개정하는 것으로 제안 하였다.

또한, 라돈 노출 작업장에서 라돈에 노출될 우려가 있는 작업장의 경우, 작업과 휴식의 배분 및 근로조건 개선을 통한 건강보호를 받을 수 있도록 시행령을 개정하는 것으로 제안하고자 한다.

건강진단의 경우, 생활주변방사선 안전 관리법에서 라돈 취급자의 건강진단을 산업안전보건법 상의 배치전건강진단과 특수건강진단을 시행하는 경우 이를 인정 해주고 있어, 이제 맞추어 라돈을 특수건강진단 대상유해인자에 포함시킬 것을 제안하고자 한다.

라돈과 라돈 노출 작업장을 새롭게 정의하여 산업안전보건기준에 관한 규칙의 방사선으로 인한 건강장해 예방 부분을 개정할 것을 제안하고자 한다.

이를 위한 세부 내용은 아래와 같으며, 수정 제안 부분은 밑줄 및 굵게 표시하였다.

산업안전보건법 시행령

제32조의8(유해·위험작업에 대한 근로시간 제한 등) ③ 사업주는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 유해·위험작업에서 법 제23조와 제24조에 따른 유해·위험 예방조치 외에 작업과 휴식의 적정한 배분, 그 밖에 근로시간과 관련된 근로조건의 개선을 통하여 근로자의 건강 보호를 위한 조치를 하여야 한다.

4. 라듐방사선이나 엑스선, 그 밖의 유해 방사선을 취급하는 작업 또는 라돈 노출 작업장에서 라돈에 노출될 우려가 있는 작업 (라돈 노출 작업장이란 고용노동령으로 정하는 작업장으로 한정한다.)

산업안전보건법 시행규칙

제98조(정의) 이 장에서 사용하는 용어의 뜻은 다음 각 호와 같다.

2. "특수건강진단"이란 법 제43조제1항에 따라 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 근로자의 건강관리를 위하여 사업주가 실시하는 건강진단을 말한다.
가. 별표 12의2에서 정한 특수건강진단 대상 유해인자에 노출되는 업무(이하 "특수건강진단대상업무"라 한다)에 종사하는 근로자

■ 산업안전보건법 시행규칙 [별표 12의2]

특수건강진단 대상 유해인자(제98조제2호 관련)

3. 물리적 인자(9종)

3) 안전보건규칙 제573조제1호의 방사선

4) 안전보건규칙 제573조제1호의2의 라돈 (단, 라돈 노출 작업장에 한정한다.)

제100조(검사항목 및 실시방법)

- ④ 특수건강진단·배치전건강진단 및 수시건강진단의 검사항목은 제1차 검사항목

과 제2차 검사항목으로 구분하며, 각 세부 검사항목은 별표 13과 같다.

■ 산업안전보건법 시행규칙 [별표 13]

특수건강진단·배치전건강진단·수시건강진단의 검사항목(제100조제4항 관련)
다. 물리적 인자(8종)

번호	유해인자	제1차 검사항목	제2차 검사항목
4	안전보건규칙 제573조제1호의2의 라돈(단, 라돈 노출 작업장에 한정한다.)	(1) 직업력 및 노출력 조사 (2) 주요 표적기관과 관련된 병력조사 (3) 임상검사 및 진찰 호흡기계: 청진, 흉부방사선(후전면), 폐활량검사	임상검사 및 진찰 호흡기계: 흉부방사선(측면), 흉부 전산화 단층촬영

주) 향후 구체적인 검사항목은 의학적 검토가 필요함.

산업안전보건기준에 관한 규칙

제7장 방사선에 의한 건강장해의 예방

제1절 통칙

제573조(정의) 이 장에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. "방사선"이란 전자파나 입자선 중 직접 또는 간접적으로 공기를 전리(電離)하는 능력을 가진 것으로서 알파선, 중양자선, 양자선, 베타선, 그 밖의 중하전입자선, 중성자선, 감마선, 엑스선 및 5만 전자볼트 이상(엑스선 발생장치의 경우에는 5천 전자볼트 이상)의 에너지를 가진 전자선을 말한다.

1의2. “라돈”이란 토양, 암석 중에 자연적으로 존재하는 우라늄(^{238}U)등이 몇 번의 방사성 붕괴를 거듭하면서 생성된 방사성의 가스상 물질을 말한다.

1의3. “라돈 노출 작업장”이란 지하 작업공간(지하철 터널·지하 공동구·광산·터널 굴착장소 등)에서 근로자가 작업 중 라돈에 직·간접으로 노출될 우려가 있는 작업장으로 다음의 장소는 제외한다.

가. 라돈 농도가 100 Bq/m^3 이하의 작업장

2. "방사성물질"이란 핵연료물질, 사용 후의 핵연료, 방사성동위원소 및 원자핵분열 생성물을 말한다.
3. "방사선관리구역"이란 방사선에 노출될 우려가 있는 업무를 하는 장소를 말한다.

제3절 시설 및 작업관리

제579조(게시 등) 사업주는 방사선 발생장치나 기기 또는 라돈 노출 작업장에 대하여 다음 각 호의 구분에 따른 내용을 근로자가 보기 쉬운 장소에 게시하여야 한다.

1. 입자가속장치
 - 가. 장치의 종류
 - 나. 방사선의 종류와 에너지
2. 방사성물질을 내장하고 있는 기기
 - 가. 기기의 종류
 - 나. 내장하고 있는 방사성물질에 함유된 방사성 동위원소의 종류와 양(단위: 베크렐)
 - 다. 해당 방사성물질을 내장한 연월일
 - 라. 소유자의 성명 또는 명칭
3. 라돈 노출 작업장
 - 가. 라돈 유해성 경고표지
 - 나. 라돈 농도 (단위: 베크렐)

제579조의 2(라돈 노출 작업장의 측정) ① 사업주는 라돈 노출 작업장에서 근로자에게 작업을 하도록 하는 경우 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자로 하여금 해당 라돈 노출 작업장의 라돈 농도를 측정하여 라돈 노출량이 최소화 될 수 있도록 관리해야 한다.

1. 해당 사업장에 소속된 산업위생관리 산업기사 이상의 자격을 보유한 사람
2. 산업안전보건법에 따른 작업환경측정기관
3. 실내공기질관리법에 따른 실내공기질 측정기관
4. 라돈 측정·평가에 관하여 학식과 경험이 풍부한 자로서 관련 분야 석·박사 학위 소지자

② 사업주는 라돈 노출 작업장의 라돈 농도를 측정할 경우 다음 주기에 따라 라돈

농도를 주기적으로 측정하여야 한다. 다만, 라돈농도에 현저한 변화가 있을만한 상황이 발생한 경우에는 1개월 이내에 측정을 실시하여야 한다.

1. 100 Bq/m³ 초과 300 Bq/m³ 이하인 경우 5년 주기
2. 300 Bq/m³ 초과 600 Bq/m³ 이하인 경우 2년 주기
3. 600 Bq/m³ 초과인 경우 2년 주기

③ 사업주는 제1항에 따라 라돈 농도를 측정한 결과 노출기준을 초과한 경우에는 근로시간을 단축하거나, 국소배기장치 등을 이용하여 작업장을 환기시키거나, 근로자에게 특급이상의 방진 마스크를 지급하여 착용하도록 하는 등 근로자의 건강장해 예방을 위하여 필요한 조치를 하여야 한다.

제4절 보호구 등

제587조(보호구의 지급 등) ① 사업주는 근로자가 분말 또는 액체 상태의 방사성물질에 오염된 지역 및 라돈 노출 작업장에서 작업을 하는 경우에 개인전용의 적절한 호흡용 보호구를 지급하고 착용하도록 하여야 한다.

② 사업주는 방사성물질을 취급하는 때에 방사성물질이 흩날림으로써 근로자의 신체에 오염될 우려가 있는 경우에 보호복, 보호장갑, 신발덮개, 보호모 등의 보호구를 지급하고 착용하도록 하여야 한다.

③ 근로자는 제1항에 따라 지급된 보호구를 사업주의 지시에 따라 착용하여야 한다.

제588조(오염된 보호구 등의 폐기) 사업주는 방사성물질 및 라돈에 오염된 보호복, 보호장갑, 호흡용 보호구 등을 즉시 적절하게 폐기하여야 한다.

제590조(흡연 등의 금지) ① 사업주는 방사성물질 취급 작업실 및 라돈 노출 작업장 또는 그 밖에 방사성물질을 들이마시거나 섭취할 우려가 있는 작업장에 대하여 근로자가 담배를 피우거나 음식을 먹지 않도록 하고 그 내용을 보기 쉬운 장소에 게시하여야 한다.

② 근로자는 제1항에 따라 흡연 또는 음식물 섭취가 금지된 장소에서 흡연 또는 음식물 섭취를 해서는 아니 된다.

제591조(유해성 등의 주지) 사업주는 근로자가 라돈 노출 작업장에서 업무를 하거나, 방사선업무를 하는 경우에 라돈 및 방사선이 인체에 미치는 영향, 안전한 작업 방법, 건강관리 요령 등에 관한 내용을 근로자에게 알려야 한다.

6. 비용편익 분석 및 규제영향분석

1) 라돈 사업장 노출 근로자 수

(1) 라돈 고위험 사업장과 근로자

2019년 2월 고용노동부에서 제시한 작업장 라돈관리 가이드에서는 ㉠ 지하 작업공간(지하철 터널, 지하 공동구, 광산, 터널 굴착장소 등) ㉡ 라돈 발생 원료물질의 취급, 가공 사업장 ㉢ 우라늄 공장(관련 폐기물 취급 작업 포함), 인산염 비료시설이나 인산염 광물 취급 공장 ㉣ 인산석고를 포함한 건축자재 제조공장 ㉤ 정유공장 ㉥ 그 밖에 라돈 노출 가능성이 높은 장소를 말한다.

이에 대한 해당 대표적인 업종을 통계청 「시도·산업·종사자규모별 사업체수, 종사자수」에서 제시한 사업체와 근로자 수를 표 III-33에 정리하였다.

<표 III-33> 라돈에 노출되는 추정 근로자 수 (2017년)

업종	사업장수	근로자수
비금속광물광업(연료용 제외)	1,951	12,746
코크스, 연탄 및 석유정제품	327	12,180
질소화합물, 질소, 인산 및 칼리질 화학비료 제조업	47	317
시멘트, 석회, 플라스터 및 그 제품 제조업	2,916	49,241
기타 비금속 광물제품 제조업	3,661	22,542
1차 비철금속 제조업	2,042	37,429
비철금속 주조업	828	7,306
무기 및 총포탄 제조업	133	10,830
반도체 및 디스플레이 제조용 기계제조업	2,727	60,310
방사성 폐기물 수집, 운반 및 처리업	2	-
토양 및 지하수 정화업	33	469
건물 건설업/토목 건설업/전문직별 공사업	138,478	1,438,640
도시철도 운송업	785	16,280
합계	153,930	1,668,290

한국표준산업분류(10차)에 의하면 우라늄을 다루는 사업장은 비철금속 광업인 우라늄 및 토륨 광업, 기타 기초 무기화학 물질 제조업에서 일부 다루고 있다. 인산석고를 다루는 사업장은 정은교 외(2018)의 연구에서 비료제조업, 석고보드제조업, 시멘트제조업이다.

(2) 라돈 고위험 사업장 라돈농도 측정결과에 따른 라돈 노출 고위험 면적과 근로자 수 추정

라돈노출 관리를 위해서는 고위험 라돈 노출사업장의 면적을 추산해야 한다. 통계청에서 제시한 2017년 우리나라 전체 공장용지면적+제조시설+부대시설은 1,239,989,297 m²이었다. 이에 대해 본 연구에서 측정한 고위험 업종 중 라돈 노출 위험 면적과 근로자 수를 구하였다.

본 연구에 따르면 사업장의 모든 면적이 라돈 농도가 높은 것이 아니라 원료를 다루는 지점에서도 일부가 높았다. 전국 라돈 노출 가능성이 있는 모든 사업장에 대해 라돈 위험도를 측정하는 것은 가까운 시일 내에 어려울 것으로 보고 본 연구에서 측정한 사업장 면적 대비 라돈 측정 비율을 전국 사업장에 적용하였다. 또한, 면적대비 근로자는 동일한 수로 근무한다는 가정 하에 라돈 측정 비율을 근로자 수로 적용하였다(표 III-34).

<표 III-34> 라돈관리 단계별 비율

구분	Bq/m'	최소치	기하평균	산술평균	최대치
지점 비율	- 100.0	48(94.1)	36(70.6)	29(56.9)	12(23.5)
	100.1-300.0	3(5.9)	15(29.4)	19(37.3)	33(64.7)
	300.1-600.0	-	-	3(5.9)	3(5.9)
	600 초과	-	-	-	3(5.9)
	합계	51(100.0)	51(100.0)	51(100.0)	51(100.0)
	Bq/m'	최소치	기하평균	산술평균	최대치
전체면 적(544, 104.7m ²) 2) 중 비율	- 100.0	0.88%	0.66%	0.53%	0.22%
	100.1-300.0	0.06%	0.28%	0.35%	0.61%
	300.1-600.0	-	-	0.06%	0.06%
	600 초과	-	-	-	0.06%
	합계	0.94%	0.94%	0.94%	0.94%
	Bq/m'	최소치	기하평균	산술평균	최대치
사업장 면적(m ²)	- 100.0	415,681.1	311,760.8	251,140.7	103,920.3
	100.1- 300.0	25,980.1	129,900.3	164,540.4	285,780.8
	300.1- 600.0	-	-	25,980.1	25,980.1
	600 초과	-	-	-	25,980.1
	합계	441,661.2	441,661.2	441,661.2	441,661.2
	Bq/m'	최소치	기하평균	산술평균	최대치
근로자 수(명)	- 100.0	14,717.4	11,038.0	8,891.7	3,679.3
	100.1- 300.0	919.8	4,599.2	5,825.6	10,118.2
	300.1- 600.0	-	-	919.8	919.8
	600 초과	-	-	0.0	919.8
	합계	15,637.2	15,637.2	15,637.2	15,637.2

(3) 라돈 농도에 따른 폐암 사망자 수

WHO에서 제시한 라돈 농도에 따른 폐암으로 인한 사망 누적위험도는 표 III-35와 같다. 이를 2017년 국민건강영양조사에 따른 남성 흡연율 38.1%를 적용하여 본 연구에 적용하여 폐암사망률을 계산하면 표 III-36과 같다.

표 III-35의 경우 평균 75세까지 생애를 기준으로 하였으므로 라돈 고위험 사업장에서 30년을 근무한다고 가정하면 0.4배로 사망이 감소하므로 폐암 사망자수는 WHO에서 제시한 사망자수에서 $\times 0.4$ 를 하였다. 또한, 한 달 20일을 근무하므로 $\times \frac{2}{3}$ 를 하였다.

100.0-299.9 Bq/m³은 200 Bq/m³의 사망 누적위험도를 적용하였으며, 300.0-599.9 Bq/m³은 400 Bq/m³을, 600 이상은 800 Bq/m³을 적용하였다. 라돈 노출수준을 100 Bq/m³ 이하로 규제하였을 때 최소값으로 산정한 경우 13.1명, 기하평균으로 산정한 경우 65.3명, 산술평균으로 적용한 경우 114.9명, 최대치 적용 시 184.3명으로 라돈으로 인한 실사망자가 감소될 것이라고 예측할 수 있다.

**<표 III-35> 라돈농도에 따른 폐암으로 인한 사망의
누적위험도(Cumulative risk of death from lung cancer)**

Radon concentration (Bq/m ³)	Risk of death per 1000 current smokers of 15 - 24 cigarettes per day	Risk of death per 1,000 lifelong non-smokers
0	101	4.1
100	116	4.7
200	131	5.4
400	160	6.7
800	216	9.3

<표 III-36> 라돈 농도에 따른 폐암 사망자 수

구분	Bq/m ³	흡연유무		폐암사망추정(×0.4×%)		
		유	무	흡연자	비흡연자	전체
최소치	100.1-300.0	350.5	569.4	12.2	0.8	13.1
	300.1-600.0	-	-	-	-	-
	600 초과	-	-	-	-	-
	합계 (100 이하 제외)	1,752.3	2,846.9	12.2	0.8	13.1
기하평균	100.1-300.0	1,752.3	2,846.9	61.2	4.1	65.3
	300.1-600.0	-	-	-	-	-
	600 초과	-	-	-	-	-
	합계 (100 이하 제외)	1,752.3	2,846.9	61.2	4.1	65.3
산술평균	100.1-300.0	2,219.6	3,606.0	77.5	5.2	82.7
	300.1-600.0	350.4	569.4	12.2	19.9	32.1
	600 초과	-	-	-	-	-
	합계 (100 이하 제외)	2,570.0	4,175.4	89.8	25.1	114.9
최대치적용	100.1-300.0	3,855.0	6,263.2	134.7	9.0	143.7
	300.1-600.0	350.4	569.4	15.0	1.0	16.0
	600 초과	350.4	569.4	20.2	1.4	21.6
	합계 (100 이하 제외)	4,555.8	7,402.0	169.8	11.4	181.3

1) 비용 추정

(1) 라돈 농도수준별 조치사항

고용노동부에서 제시한 라돈 농도수준별 조치사항은 100 Bq/m³ 이하로 관리하도록 하며 그 방법으로 발생원 밀폐, 유입원 차단, 환기, 실내 흡연 금지, 안

전보건교육 등을 수행하도록 하였다. 100 Bq/m³ 초과 시 발생원 밀폐, 유입원 차단, 환기, 흡연 금지, 안전보건교육, 300 Bq/m³ 초과 시 방진마스크 지급, 피폭선량 평가, 건강검진 실시, 600 Bq/m³ 초과 시 추가로 작업시간 단축, 작업 기록, 특급이상의 방진마스크를 지급하도록 하였다.

(2) 비용 추정

라돈의 노출기준에 따라 관리에 대한 비용이 소요된다. 비용소요는 직접비용과 간접비용으로 구분하였다.

지하철 라돈 측정에 대한 용역비가 제시되어 있는 경우는 전체 3곳으로 총 용역비 29,215,600원을 측정건수 568건으로 나누어 1건당 51,435원이 계산되었다. 이 비용에는 전체 측정건수의 중복시료 10%와 공시료 5%비용이 포함된 가격이다. 또한, 용역비에는 측정으로 소요되는 인건비가 포함되어 있어 측정비용에는 간접비용을 따로 산출하지 않았다.



[그림 III-33]
이동형 국소배기장치

환기시설은 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 제500조(국소배기장치의 성능 등)에 의하면 가스 상태에서 제어풍속이 0.5미터/초 이상의 성능을 갖추도록 하였다. 현재(2019년 9월, www.naver.com 조회) 시중에서 판매되는 병원, 실험실, 산업현장, 납땀 작업장에서 발생하는 휘발성 유기화합물 및 악취 정화 국소배기장치를 조회하였을 때 풍속 및 풍량 9-12 m/s 인 국소배기장치 가격은 2,430,000원이다. 이동형이라 설치비는 따로 산정하지 않았다. 관련 국소배기장치는 유해가스 제거 능력 시험성적

서가 45% 감소하는 것으로 제시되었다(그림 III-33).

유입원 차단에 대하여 한 지하철 라돈 보고서에서 6개 집수정에 비닐 및 고무덮개를 채시공한 소요 금액이 2,000,000원으로 제시되어 있어 1개 집수정에

유입원 차단 비용은 333,333원으로 계산하였다. 용역비로 소요한 금액으로 인건비가 포함되어 있어 간접비용을 따로 산출하지 않았다. 유입원 방지를 위해서 지하의 경우 고무덮개를 사용하는데, 이에 대한 효과를 측정한 연구는 없다. Jeon et al.(2012)의 연구에서 스크린도어 설치로 라돈이 56%의 감소를 나타낸다고 하여, 고무덮개도 차단 효과도 동일하다고 보아 이를 적용하였다.

보호구 착용에 대한 비용은 지하철 라돈 용역보고서에서 보호구 1급은 1개 2천원, 2급은 1천원, 특급은 4천원으로 1인당 1년 1주일에 1개씩 60개를 지급한 것으로 적용하였다. 근로자에게 방진마스크 착용하는 경우 Kim et al.(2001)의 연구에서 유독가스용 방독마스크를 착용한 경우와 착용하지 않은 경우 근로자의 톨루엔 요 중 마노산 배설이 1.51 g/L에서 0.49 g/L로 감소하여 67.5%의 저감 효과를 보았다는 연구가 있어 이를 적용하였다.

보호구를 착용하는 경우 근로자에 대해 라돈 교육을 동시에 실시하는 것으로 하여 교육 강사 1년에 1시간 교육으로 강사 1인당 100,000원 지급과 간접비용으로 교육에 의한 생산성 감소 비용을 적용하였다. 통계청에서 제시한 우리나라 전체 남자 근로자의 2017년 1달 월 임금총액은 평균 3,981,000원이다. 이를 1달 20일 근무와 1일 8시간으로 계산하여 1시간 급여를 계산하였다. 즉, 1시간 급여는 24,881원이다. 또한, 전문가에게 문의한 결과 개인선량 측정은 연간 8만원/인, 개인피폭관리는 2만원/인, 특수건강진단은 1.5만원/인의 추가 비용이 발생하는 것으로 하였다.

<표 III-37> 라돈 농도수준별 조치사항에 따른 비용

Bq/m ³	100.1-300.0	300.1-600.0	600 초과
라돈측정비용	51,435/건	51,435/건	51,435/건
유입원차단	333,333/건	333,333/건	333,333/건
국소배기장치	2,430,000/개	2,430,000/개	2,430,000/개
교육	24,881/h	24,881/h	24,881/h
방진마스크		2,000/개	2,000/개
피폭선량			80,000/인
건강검진 실시			15,000/인
작업시간단축			24,881/h
개인피폭관리			20,000/인
특급 방진마스크			4,000/개

(3) 라돈노출 규제 시 비용추정

가이드라인에는 작업장소별 2개 이상을 측정하고, 전체 시료수의 10%, 공시료는 전체 시료수의 5%를 측정하라고 되어있다. 본 연구에서는 작업장소의 크기는 100 m²이라고 가정하였다. 이에 대한 비용 산출에 대한 추정 근거는 표 III-38과 같다.

<표 III-38> 라돈 농도수준별 조치사항에 따른 비용 산출

Bq/m'	최소치	기하평균	산술평균 적용 시	
	100.0-299.9	100.0-299.9	100.0-299.9	300.0-599.9
	0.06%	0.28%	0.35%	0.06%
면적	25,980.1	129,900.3	164,540.4	25,980.1
개수(A)	259.8	1,299.0	1,645.4	259.8
라돈측정(B)	5회/10년	2회/10년	2회/10년	5회/10년
근로자수(C)	919.8	4,599.2	5,825.6	919.8
비용(A×B×51,435원(1)+ (1)×0.1+(1)×0.05)	76,836,175	153,672,350	194,651,643	76,836,175
유입원차단 (A×333,333원)	86,599,913	432,999,567	548,466,118	86,599,913
국소배기장치 (A×2개×2,430,000원)	1,262,628,000	6,313,140,000	7,996,644,000	1,262,628,000
교육 (C×B×24,881원)	114,427,719	228,865,390	289,893,507	114,427,719
방진마스크 (C×B×30일×2,000원)				275,940,000
피폭선량 (C×B×80,000)				
건강검진실시 (C×B×15,000)				
작업시간단축 (C×B×7일×1시간×24,881)				
개인피폭관리 (C×B×7일×20,000)				
특급방진마스크 (C×B×30일×4,000원)				
소계	1,540,491,807	7,128,677,307	9,029,655,268	1,816,431,807
합계	1,540,491,807	7,128,677,307	10,846,087,075	

<표 III-38> 라돈 농도수준별 조치사항에 따른 비용 산출(계속)

Bq/m'	최대치 적용 시		
	100.0-299.9	300.0-599.9	600 이상
	0.61%	0.06%	0.06%
면적	285,780.8	25,980.1	25,980.1
개수(A)	2,857.8	259.8	259.8
라돈측정(B)	2회/10년	5회/10년	10회/10년
근로자수(C)	10,118.2	919.8	919.8
비용(A×B×51,435원(1)+ (1)×0.1+(1)×0.05)	338,079,169	76,836,175	153,672,350
유입원차단 (A×333,333원)	952,599,047	86,599,913	86,599,913
국소배기장치 (A×2개×2,430,000원)	13,888,908,000	1,262,628,000	1,262,628,000
교육 (C×B×24,881원)	503,501,868	114,427,719	228,855,438
방진마스크 (C×B×30일×2,000원)		275,940,000	551,880,000
피폭선량 (C×B×80,000)			735,840,000
건강검진실시 (C×B×15,000)			137,970,000
작업시간단축 (C×B×7일×1시간×24,881)			1,601,988,066
개인피폭관리 (C×B×7일×20,000)			1,287,720,000
특급방진마스크 (C×B×30일×4,000원)			1,103,760,000
소계	15,683,088,085	1,816,431,807	7,150,913,767
합계		24,650,433,659	

2) 편익 분석

(1) 라돈관리 가이드에 의한 사업장 규제에 의한 편익 산정

라돈 농도 저감 대책으로 10년간 유지하였을 때 편익이 발생하는 것으로 하여 라돈 노출 기준에 대한 편익을 정리 하였다. 현재 작업장 라돈관리 가이드에 의한 사업장 규제에 의하여 추후 WHO에 의한 폐암사망 추정자수 감소는 사업장 폐암 100 Bq/m³ 미만을 제외하면 4,292.2명이 감소할 것으로 예상된다.

(2) 편익 추정

라돈의 노출기준에 따라 관리되는 편익이 발생한다. 편익은 직접편익과 간접편익으로 구분하였다. 직접편익은 폐암 발생부터 사망까지 이르는 동안의 진료에 소요되는 비용감소를 들 수 있다. 폐암진단으로 인한 진료비용과 사망 시에 산재보험으로 적용받는 장의비, 유족급여를 직접편익으로 하였으며, 간접편익으로는 치료를 받기 위한 생산성 하락, 외래 이용 시 보호자 시간 비용을 적용하였다.

흡연으로 인한 경우는 일반 폐암진단으로 인한 입원비와 외래진료비를 적용하였으며, 비흡연자인 경우 산재사망으로 인한 편익을 추정하였다. 건강보험심사평가원의 2017년 진료비 통계에 따르면, 폐암의 1년 평균 3.5회를 입원하며 1년 입원일수는 32.5일이고, 요양일수는 54.6일였으며, 외래방문은 1년 10.7회에 요양일수는 23.8일이었다. 2017년 1인당 외래진료비용(급여 포함)은 2,199,330원이었고, 입원진료비용 9,639,241원이 소요되었다. 1회 입원비용은 2,548,056원이며, 건당 외래비용은 192,958원이었다. 폐암의 경우 5년 생존율이 2012-2016년 23.7%로 관련 금액이 5년간 지속된다고 보았다(보건복지부, 암등록통계. http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=117&tblId=DT_117N_A00021&conn_path=I3).

고용노동부 「2017년 산재보험 사업연보」에서는 산재보상의 경우 폐암 진

단의 항목으로는 따로 제시되지 않아 폐암으로 인한 보험관련 비용은 위와 동일하다고 가정하였으며, 산재보상으로 인한 요양급여, 휴업급여, 상병보상연금, 간병급여, 장의비, 유족연금을 추가하였다. 2017년 1인 요양급여는 4,317,864원, 1인 간병급여 10,198,265원, 1인 장의비 12,511,615원, 1인 유족보상연금 17,985,783원이 지급되었다.

<표 III-39> 폐암 사망으로 인한 1인당 발생 비용

항목			1인/1인/1년	산정기간	1인당 총 지급액(원)
입원요양일수(A)			54.6일/년		
외래요양일수(B)			23.8일/년		
남성 1일 급여(C)			132,700원/일		
여성 1일 급여(D)			84,800원/일		
국민 보험	직 접 비	입원비용	9,639,241	5년	48,196,205
		외래비용	2,199,330	5년	10,996,650
	간 접 비	생산성 감소 (A+B)×C	10,403,680	5년	52,018,400
		가족생산성 감소 (A+B)×D	6,648,320	5년	33,241,600
	총합계				144,452,855
산재 보험	직 접 비	입원비용	9,639,241	5년	48,196,205
		외래비용	2,199,330	5년	10,996,650
	간 접 비	간병급여	10,198,265	5년	50,991,325
		장의비	12,511,615	1회	12,511,615
	유족급여(연금)		17,985,783	10년, 1인	179,857,830
	간 접 비	생산성 감소 (A+B)×C	10,403,680	5년	52,018,400
	총합계				354,572,025

간접편익은 일을 할 수 있는 근로자의 생산성 손실감소로 폐암을 진단받은 근로자가 입원과 외래 방문으로 인하여 업무를 수행하지 못하는 것이다. 국민 건강보험을 적용받는 경우 입원 시 요양일수 54.6일, 외래 요양일수 23.8일에 대한 근로손실을 보았고, 이 경우 보호자가 동반되기 때문에 보호자의 근로손실도 같이 보았다. 산재보험에서는 요양으로 인하여 업무를 하지 못하는 경우 외래와 입원일수에 대한 근로자 근로손실을 산정하였으며, 보호자 간병의 경우 산재보험에서 간병급여를 제시하기 때문에 이를 산정하지 아니하였다.

관련 업종 대부분 남성이라는 것을 가정할 때, 보호자는 대부분 여성으로 가정할 수 있다. 고용노동부 「고용형태별근로실태조사」에 따른 산업, 성별 임금 및 근로조건에 따르면 2017년 남성의 1달 월 임금총액은 3,981,000원이며, 여성의 1달 월 임금총액은 2,544,000원으로 1달 30일 기준으로 1일 임금은 남성 132,700원, 여성 84,800원으로 계산된다. 이에 따라 폐암발생으로 인한 비용은 표 III-39에 정리하였다.

<표 III-40> 라돈 농도에 따른 폐암으로 인한 편익

구분	최소치 적용		기하평균 적용	
	국민보험	산재보험	국민보험	산재보험
	12.2명 (A)	0.8명 (A)	61.2명 (A)	4.1명 (A)
	144,452,855원 (B)	354,572,025원 (B)	144,452,855원 (B)	354,572,025원 (B)
	A×B	A×B	A×B	A×B
소계	1,762,324,831	283,657,620	8,840,514,726	1,453,745,303
합계	2,045,982,451		10,294,260,029	
구분	산술평균 적용		최대치 적용	
	국민보험	산재보험	국민보험	산재보험
	89.8명 (A)	25.1명 (A)	169.8명 (A)	9.0명 (A)
	144,452,855원 (B)	354,572,025원 (B)	144,452,855원 (B)	354,572,025원 (B)
	A×B	A×B	A×B	A×B
소계	12,971,866,379	8,899,757,828	24,528,094,779	3,191,148,225
합계	21,871,624,207		27,719,243,004	

고위험 라돈 노출 사업장의 라돈 측정 3개 중 최소치를 적용하였을 때 편익은 2,045,982,451원, 기하평균을 적용하였을 때 편익은 10,294,260,029원이었으며, 산술평균을 적용하였을 때 편익은 21,871,624,207원이며, 측정 3개 중 최대치를 적용하였을 경우 편익은 27,719,243,004원이 된다(표 III-40).

4) 비용-편익 분석

본 연구의 비용편익분석을 구하였다. 최소값에서의 총 편익은 505,490,644원이고, 기하평균시에 총 편익은 3,165,582,722원이고, 산술평균시는 11,025,537,132원, 최대치를 적용한 경우 3,068,809,345원이었다. 비용-편익비는 최소치를 적용한 경우 1.33, 기하평균시에 1.44이고, 산술평균시는 2.02 최대치를 적용한 경우 1.12이었다. 즉, 현재 고위험 라돈 노출사업장에서 라돈 규제는 기하평균, 산술평균, 최대치를 적용하더라도 모두 편익이 높았다.

<표 III-41> 라돈 측정변화에 따른 비용-편익 분석

항목	비용	구분	최소편익	기하편익	산술편익	최대편익
			2,045,982,451	10,294,260,029	21,871,624,207	27,719,243,004
최소 비용	1,540,491,807	순이익	505,490,644			
		편익/비용	1.33			
기하 비용	7,128,677,307	순이익		3,165,582,722		
		편익/비용		1.44		
산술 비용	10,846,087,075	순이익			11,025,537,132	
		편익/비용			2.02	
최대 비용	24,650,433,659	순이익				3,068,809,345
		편익/비용				1.12

7. 작업장 라돈 가이드 검토

고용노동부와 안전보건공단은 작업장 라돈관리와 관련한 위해소통을 목적으로 “라돈으로부터 근로자 건강보호를 위한 가이드(2015, 2015-보건-428)”에 이어, 2019년 2월 “작업장 라돈관리 가이드(2019, 2019-사업기획-90)”을 제작, 배포하였다. 이 두 가이드라인의 구성은 다음과 같다.

<표 III-42> 기 배포된 작업장 라돈 가이드라인

이름	작업장 라돈관리 가이드	라돈으로부터 근로자 건강보호를 위한 가이드
배포년월	2019. 2	2015. 6
수록내용	I. 개요 II. 용어의 정의 III. 라돈 농도의 측정과 관리계획 수립 IV. 라돈 농도수준에 따른 관리 부록 1. 라돈의 측정 및 평가 부록 2. 라돈 경고표지 부록 3. 라돈 농도의 선량 환산 부록 4. 생활주변방사선 안전 관리법 주요 내용	I. 라돈이란? II. 라돈의 유해성 III. 라돈의 유입 및 노출 경로 IV. 라돈의 직업적 노출 V. 라돈 관리기준 VI. 작업장 라돈관리

이 중 최근에 개발된 “작업장 라돈관리 가이드라인”은 (제)개정된 법규 정보 및 라돈관리를 위한 보다 실용적이고 기술적인 정보를 제공하고 있다. 또한 “작업장 라돈관리 가이드”는 최신의 법령 정보와 구체적인 실행내용을 제시하고 있어 질적 내용에 대해서는 보완할 부분을 찾기 어렵다. 그러나 본 연구에서, 제안한 근로자 건강검진 방안에 따라 해당 내용에 대한 추가 기술을 검토할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 현 가이드라인의 수정 사항은 다음과 같다.

[부록 5] 라돈 노출사업장의 근로자 건강검진

1) 대상

- 라돈노출사업장: 근로자가 작업 중 라돈에 직간접적으로 노출될 우려가 있는 작업장으로 다음의 장소는 제외.
 - 생활주변방사선안전관리법 제2조(정의)에 있는 원료물질, 공정부산물, 가공물질을 취급 및 사용하는 작업장
 - 라돈농도가 100 Bq/m³ 이하의 작업장
- 법령 근거
 - 산업안전보건법 시행규칙 [별표 13]: 특수건강진단·배치전건강진단·수시건강진단의 검사항목 - 물리적 인자

번호	유해인자	제1차 검사항목	제2차 검사항목
4	안전보건규칙 제573조제1호의2의 라돈 (단, 라돈 노출 작업장에 한정한다.)	(1) 직업력 및 노출력 조사 (2) 주요 표적기관과 관련된 병력조사 (3) 임상검사 및 진찰 호흡기계: 청진, 흉부방사선(후전면), 폐활량검사	임상검사 및 진찰 호흡기계: 흉부방사선(측면), 흉부 전산화 단층촬영

IV. 결론

1. 요약

본 연구는 라돈에 노출되는 작업자들에게 발생 가능한 건강영향을 예방관리하기 위한 기초자료를 구축하고 관리방안을 제안하고자 수행되었다. 국내외의 연구 및 업무상질병 사례에서 직업성 폐암 발생의 원인 인자로 분진 등의 전통적 유해인자 외에 라돈이 주요한 위험요인으로 제기되고 있다. 특히 유럽 국가들을 중심으로 작업장에서 라돈을 측정하는 프로토콜이 적용되고 있으며 작업장 라돈 관리 정책들이 제정, 운영되고 있는 것으로 파악되었다.

라돈에 대한 노출 형태는 원료 물질을 취급하거나 공정부산물 발생 하는 공정형태가 있으며, 원료 물질 등을 취급하고 있지는 않지만 작업장이 지하에 위치하여 NORM의 형태로 노출 가능한 작업장의 두 가지 형태가 존재한다. 본 연구에서는 이를 각각 의도적 노출 작업장과 비의도적 노출 작업장으로 구분하였으며 측정 및 관리방안 제시 등에 있어 이 두 형태를 구분하여 연구를 수행하였다.

두 가지 형태의 사업장 각 10여 개소에서 진행한 측정 결과, 의도적 노출 사업장 전체의 실내 라돈 노출 수준은 82.2 Bq/m^3 (기하평균), 비의도적 노출 사업장의 경우 140.1 Bq/m^3 (기하평균)으로 조사되어 비의도적 노출 사업장이 높은 경향을 나타내었다. 원료 취급 사업장의 경우 라돈 노출가능 작업이 상시로 이루어지기보다는 대부분 간헐적 형태로 발생 되는 점을 원인으로 생각할 수 있다. 또한, 이러한 측정 결과는 라돈으로 인한 작업자 건강 보호에 있어 비의도적 사업장을 법규의 테두리 안으로 관리해야 한다는 점을 시사한다.

우리나라의 생활주변방사선 안전 관리법(생방법)에서는 라돈 원료 취급 사업장에 대한 측정 및 관리계획 수립 등의 규정을 두고 있으며, 노출되는 근로

자에 대한 건강진단은 산업안전보건법의 규정에 따르도록 하고 있다. 그러나 건강진단에 대한 구체적 규정을 정해놓고 있지 않으며, 비의도적 노출 사업장은 생방법과 산안법 모두에서 작업자 건강보호에 대한 규정에 적용되지 않는다.

현재 정해진 라돈 노출기준 600 Bq/m^3 은 라돈 노출 특성을 의도적/비의도적으로 구분하고 있지 않으며, 가이드라인에서 제시하고 있는 농도수준 별 조치 기준 역시 노출의 형태를 구분하고 있지 않는 것으로 볼 수 있다. 따라서 라돈으로 인한 작업자 건강보호 규정 역시 원료 사업장과 비원료 사업장을 구분할 필요는 없다. 국내 전체 사업장을 대상으로 라돈 관리에 투입되는 비용과 폐암 예방에 대한 편익을 계산하였을 때, 비용편익 분석의 민감도를 구분하더라도 1.0 이상(최소 1.12)의 비용-편익비가 산출되어 라돈 노출 관리를 위한 규정이 필요한 것으로 판단되었다.

다만 의도적 노출 사업장의 경우 생방법과의 중복이 발생하므로 중복으로 인한 혼란이 생기지 않도록 하는 것이 필요하다.

2. 제언

본 연구에서는 라돈에 대한 작업자 노출 형태를 의도적 노출과 비의도적 노출로 구분하였으며, 관리방안에 대한 제언 역시 두 형태를 구분하여 제시하고자 한다.

의도적 노출 사업장의 경우 생방법에서 정하고 있는 바에 따라 측정 및 평가, 종합계획서 작성 등이 이미 시행되고 있어, 산안법에서 추가로 이들 사업장에 대한 작업환경측정, 작업장 관리 프로세스를 둘 필요는 없다. 다만, 의도적 노출 사업장에 대한 작업자 건강검진 규정은 생방법에서도 산안법을 따르도록 하고 있다. 그러나 산안법상에서는 라돈 노출 작업자를 대상으로 하는 건강검진 규정이 없어 이에 대한 신규 제정이 필요하다. 현행 산안법에서는 방사선 노출 작업자만을 대상으로 하나 이는 폐암 진단을 고려한 지침으로 볼 수 없으므로 호흡기질환에 대한 구체적인 의학적 검토가 수반되어야 할 것이다.

비의도적 노출 사업장의 경우에도 관리는 필요하며 본 연구에서 수행된 비용편익 분석 결과, 예상되는 편익 효과도 긍정적인 것으로 파악되었다. 비의도적 노출 사업장에서 법적 관리에 적용이 되는 기준은 현재 100 Bq/m^3 로 정하고 있는 바, 대상 사업장 구분 기준인 100 Bq/m^3 초과 여부를 판단하기 위하여 최초 전수조사가 필요하다. 그러나 자연발생 라돈의 발생이 우려되는 사업장을 지하 사업장이라고 할 때 대부분 영세지하 사업장이 이에 해당할 수 있고 이러한 경우 초기 측정비용이 문제가 될 수 있어 국고 재원 마련 필요성이 제기될 수 있다. 전수 측정이 어려운 경우 현실적 방안으로 체크리스트 도입을 통하여 위험 사업장을 먼저 선별하고 이를 대상으로 측정 진행하는 방안도 고려되어야 한다.

비의도적 노출 사업장 중 100 Bq/m^3 이상 사업장의 경우, 생방법에 제외되며, 이에 대한 산안법 규정이 제시되어야 한다. 이를 위해서는 정기적 모니터링 방

법과 주체, 주기 등에 대한 논의가 필요하며, 이들 사업장의 근로자에 대한 건강검진은 상기 의도적 노출 사업장에서 제시한 원칙을 따르도록 한다.



[그림 IV-1] 라돈 관리방안 제안

VI. 참고문헌

김기연, 조만수, 김태윤. 실내공기질 관리실태 및 규제강화 방안 연구-라돈을 중심으로. 산업안전보건연구원 연구보고서. 2015.

정은교, 권지운, 김갑배 등. 라돈의 직업적 노출실태 및 평가방안 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서. 2014.

정은교, 장재길, 김갑배 등. 라돈의 직업적 노출실태 및 관리기준 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서. 2015.

정은교, 장재길, 김종규 등. 인산석고 취급공정에서의 라돈농도 및 유효선량 수준 평가. 한국산업보건학회지 2018;28(3):283-291.

최은희, 김수근, 정명희 등. 지각방사선(라돈)의 직업적 노출기준 및 관리기준 마련방안 연구. 산업안전보건연구원 연구보고서. 2017.

Adegun IK, Anyaegbuna BE, Olayemi OA et al. Radon concentration assessment in bank cellars in three Nigerian cities. Niger J Tech. 2019; 38(4): 957-964.

Alharbi SH, Akber RA. Radon and thoron concentrations in public workplaces in Brisbane, Australia. J Environ Radioact 2015; 144: 69-76.

Bucci S, Pratesi G, Viti ML et al. Radon in workplaces: first results of an extensive survey and comparison with radon in homes. Radiat Prot Dosimetry 2011; 145(2-3): 202-205.

Clouvas A, Xanthos S, Takoudis G. Indoor radon levels in Greek schools. J Environ Radioact 2011; 102: 881-885.

Colgan PA, Currivan L, Fenton D. An assessment of annual whole-body occupational radiation exposure in Ireland (1996-2005). Radiat Prot Dosimetry 2008; 128(1): 12-20.

Darby S, Hill D, Deo H. Residential radon and lung cancer - detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe. *Scand J Work Environ Health* 2006; 32(1): 1-4.

Daraktchieva Z, Howarth CB, Gooding TD et al.. Validation scheme for organisations making measurements of radon in UK buildings: 2018 revision. Public Health England. 2018.

Denman AR, Lewis GTR, Brennen SE. A study of radon levels in NHS premises in affected areas around the UK. *J Environ Radioact* 2002; 63: 221-230.

Espinosa G, Golzarri JJ, Angeles A et al. Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in Mexico using nuclear track methodology. *Radiat Meas* 2009; 44: 1051-1054.

Gillmore GK, Phillips PS, Denman AR et al. Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves. *J Environ Radioact* 2002; 62: 165-179.

Hutchings S, Cherrie JW, Van Tongeren M et al. Intervening to reduce the future burden of occupational cancer in Britain: what could work? *Cancer Prev Res* 2012; 5(10): 1213-1222.

Iyogi T, Ueda S, Hisamatsu S et al. Radon concentration in indoor occupational environments in Aomori Prefecture, Japan. *J Environ Radioact* 2003; 67: 91-108.

Jeon JS, Yoon JC, Lee HC et al. A noticeable change in indoor radon levels after platform screen doors installation in Seoul subway station. *J Korean Soc Atmos Environ* 2012;28(1):59-67. <http://dx.doi:10.5572/KOSAE.2012.28.1.059>.

Kauppinen T, Toikkanen J, Pedersen D et al. Occupational exposure to

carcinogens in the European Union. *Occup Environ Med* 2000; 57(1): 10-18.

Keil AP, Richardson DB, Troester MA. Healthy worker survivor bias in the Colorado Plateau uranium miners cohort. *Am J Epidemiol* 2015; 181(10): 762-770.

Mulas D, Garcia-Orellana J, Casacuberta N et al. Dose assessment to workers in a dicalcium phosphate production plant. *J Environ Radioact* 2016; 165: 182-190.

Oikawa S, Kanno N, Sanada T et al. A survey of indoor workplace radon concentration in Japan. *J Environ Radioact* 2006; 87: 239-245.

Olszewski J, Kacprzyk J, Kamiński Z. Assessment of radiation exposure of miners to radon and its daughter products in selected non-ferrous metal mines. *Med Pr* 2010; 61(6): 635-639.

Organo C, Lee EM, Menezes G et al. Investigation of occupational radiation exposures to NORM at an Irish peat-fired power station and potential use of peat fly ash by the construction industry. *J Radiol Prot* 2005; 25(4): 461-474.

Park RM, Bailer AJ, Stayner LT et al. Gilbert SJ. An alternate characterization of hazard in occupational epidemiology: years of life lost per years worked. *Am J Ind Med* 2002; 42(1): 1-10.

Park DS, Jung WS, & Jung BC. Influence of Ventilation on the Subway Radon Level. *JKSR* 2000;3(2):97-102.

Rahman SU, Rafique M, Matiullah, et al. Radon measurement studies in workplace buildings of the Rawalpindi region and Islamabad Capital area, Pakistan 2010; 45: 421-426.

Reichelt A, Reineking A, Lehmann KH, et al. Radon in workplaces. *Environm Sci* 2000; 32(28).

Righi S, Verita S, Albertazzi A, et al. Natural radioactivity in refractory manufacturing plants and exposure of workers to ionising radiation. *J Environ Radioact* 2009; 100(7): 540-546.

Ruano-Ravina A, Narocki C, Lopez-Jacob MJ et al. Indoor radon in Spanish workplaces. A pilot study before the introduction of the European Directive 2013/59/Euratom. *Gac Sanit* 2018; doi: 10.1016/j.gaceta.2018.05.006. [Epub ahead of print]

Sánchez AM, Pérez JT, Sánchez ABR, et al. Radon in workplaces in Extremadura(Spain). *J Environ Radioact* 2012; 107: 86-91.

Statistics Korea(KOSTAT). Salary based on industry / worker Size / job type [serial online] 2015 [cited 2019 February 05]; Available from:URL: http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1190011

Synnott H, Fennell S, Pollard D et al. Radon in Irish Primay and post-Primay Schools. The Results of a National Survey. 2004.

Tirmarche M, Baysson H, Telle-Lamberton M. Uranium exposure and cancer risk: a review of epidemiological studies. *Rev Epidemiol Sante Publique* 2004; 52(1): 81-90.

Urso P, Ronchin M, Lietti B et al. Evaluation of radon levels in bank buildings: results of a survey on a major Italian banking group. *Med Lav* 2008; 99(3): 216-233.

Vaupotič J, Slovenian approach in managing exposure to radon at workplaces. *Nukleonika* 2010; 55(4): 565-571.

Veiga LH, Melo VP, Amaral EC et al. Feasibility study for a long-term follow-up in a historical cohort of Brazilian coal miners. *J Radiol Prof* 2007; 27(3): 349-360.

Whicker JJ, McNaughton MW. Work to save dose: contrasting effective

dose rates from radon exposure in workplaces and residences against the backdrop of public and occupational regulatory limits. *Health Phys* 2009; 97(3): 248-256.

Wiegand K, Dunne SP. Radon in the workplace-a study of occupational exposure in BT underground structures. *Ann Occup Hyg* 1996; 40(5): 569-581.

Zablotska LB, Lane RS, Frost SE, Thompson PA. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma mortality (1950-1999) and incidence (1969-1999) in the Eldorado uranium workers cohort. *Environ Res* 2014; 130: 43-50.

VII. 부록



원료물질보관창고 측정



원료물질보관창고 측정



원료물질 및 건식유약



계근 공정



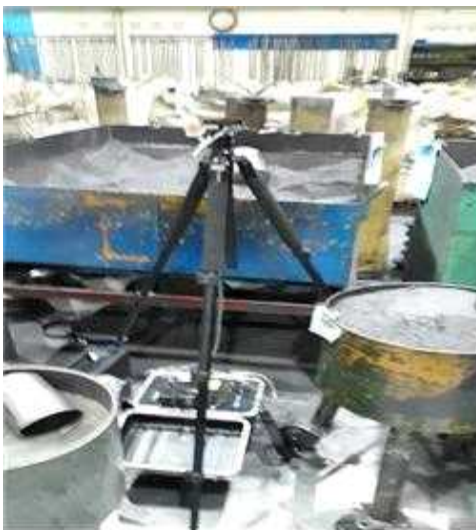
원료물질 혼합 공정



**스프레이 공정(혼합된 원료물질
분사)**



시유 공정



성형 공정



**유동조(원료물질 첨가 및
공정부산물 발생) 공정 직후**



선별 공정



지하공동구 측정 현황



터널 내 측정 현황



터널 내 측정 현황



대규모 사업장 가스공급시설
지하 공간 측정 현황



상업건물 지하 창고 측정 현황



**연구교육시설 지하 창고
측정 현황**



**대규모 사업장 지하 주차장
측정 현황**



**연구교육시설 지하 기계실
측정 현황**



**대규모 사업장 지하 화학물질
저장소 측정 현황**

Abstract

A policy study for prevention of health disorders of radon-exposed workers

OBJECTIVES: It is necessary to identify workers who have been exposed to risk factors for radon exposure and to develop mitigation measures that can be applied to exposed workers. This study was carried out to suggest basic evidences to evaluate workers' radon exposure and to establish preventive measures for health hazards based on it.

METHODS: This study classified the workplace with radon-raw materials as the 'intentional exposure sites' and the workplace with natural radioactive material as 'unintentional exposure sites.' Radon measurements were carried out in 21 intentional and unintentional exposure sites. To suggest the policy, domestic and foreign laws were reviewed. In addition, based on the 600 Bq/m³ set as the exposure limit, the cost-benefit analysis was conducted by identifying the costs of the reduction measures and the health effects of the reduction measures as benefits. The costs were divided into direct costs and indirect costs.

RESULTS: Literature review shows that occupational health effects from radon are focused on lung cancer. In Korea, radon is recognized as an important risk factor in epidemiological investigations of workers with lung

cancer, and some occupational diseases and causal relationships have been recognized. In the results of field measurements of 21 worksites, indoor radon exposure levels were 82.2 Bq/m³ (geometric mean) about all intentional exposure sites and 140.1 Bq/m³ (geometric mean) about all unintentional exposure sites. 10-year period cost-benefit analysis was applied in this research according to each Radon exposure levels (over 100, 300 and 600 Bq/m³) of 'Radon management guide in the workplace' by Ministry of Employment and Labor.

The net benefits were ₩ 3,165,582,722 (via geometric mean), ₩ 11,025,537,132 (via arithmetic mean) and ₩ 3,068,809,345 (via maximum level). Each of the benefit-cost ratios were 1.12 - 2.02 and therefore, every benefit is higher than cost.

CONCLUSIONS: In the case of intentional exposure workplaces, measurement, evaluation and comprehensive plan preparation have already been made, as prescribed by other ministry's act. However, the provisions on measurement methods, health examinations, etc. need to be supplemented by the Occupational Safety and Health Act. In the case of unintentional exposure, management is also necessary, and the expected benefits from such management are also positive. Future research will need to discuss how to monitor, who and how often.

Key words: radon, cost-benefit analysis, radon management guide

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 을지대학교 산학협력단

연구책임자 : 서성철 (을지대학교 보건환경안전학과 교수)

연 구 원 : 최은희 (을지대학교 간호학과 교수)

김기연 (서울과학기술대학교 안전공학과 교수)

임대성 (한성보건안전기술원 대표)

조용민 (㈜스마티브 생명환경연구소 연구소장)

이철민 (서경대학교 화학생명공학과 교수)

이동현 (㈜EHS기술연구소 대표)

권철웅 (을지대학교 산학협력단 연구지원센터 연구원)

남궁선주 (서경대학교 화학생명공학과 연구교수)

진영화 (한국라돈협회 팀장)

연구상대역 : 정은교 (선임연구위원, 직업환경연구실)

〈〈연 구 기 간〉〉

2019. 04.12 ~ 2019. 10. 31

본 연구는 산업안전보건연구원의 2019년도 위탁연구 용역사업
에 의한 것임

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

라돈 노출 근로자 건강장해 예방을 위한 정책 연구

(2019-연구원-1425)

발 행 일 : 2019년 11월 30일
발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 고 재 철
연구 책임자 : 을지대학교 교수 서 성 철
발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
주 소 : (44429) 울산광역시 중구 중가로 400
전 화 : (052) 7030-881
F A X : (052) 7030-337
Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>
