

중대사고 이슈 리포트

重大事故 Issue Report

2022. 11.





초유폭약에 의한 일산화탄소 중독사망 위험

중앙사고조사단 예방조사기획팀 김욱 팀장

석회석광산의 일산화탄소 중독사고

통상 일산화탄소 중독사고의 경우는 발생원이 비교적 분명하다. 가스보일러, 내연기관, 연탄 또는 갈탄 등 현장에서 일산화탄소가 발생될 수 있는 원인을 특정 하는 것이 어렵지 않은 경우가 대부분이다.

하지만 지난 4월 제천의 모 석회석광산에서 발생한 일산화탄소 중독사고¹⁾의 경우는 그렇지 않았다. 초동 조사 실시결과에서는 유력한 일산화탄소 발생원으로 갱내에서 작업 중인 덤프트럭, 로더 등 중장비가 지목되었으나 그 수량 및 작업량을 볼 때 작업자 두 명이 동시에 쓰러질 정도의 일산화탄소가 발생되었는지 확신하기 어려웠다.

갱내에서 양수기 설치작업을 수행하다 쓰러졌다는 작업 정황상 경유를 원료로 하는 양수기를 설치하다 테스트 가동 중 불완전연소에 따라 발생한 일산화탄소에 의한 것이 아닌가라는 의견도 있었으나 초동조사 결과 해당 작업장에서는 전기 양수기를 사용한 것으로 확인되었다.

발생원을 특정하기 어려운 반면 사망자에 대한 부검결과는 일산화탄소 중독 사망으로 명확했다. 동맥혈의 일산화탄소혈색소농도(%COHb), 선홍색 시체얼룩, 근육과 장기의 특성 등²⁾일산화탄소 중독사망의 특징이 발견된 것이다.

또한 부상자의 진술도 특별한 원인은 모르겠으나 사망자가 정신을 잃고 쓰러진 것을 보고 도와주려다 본인도 쓰러졌다고 하는 등 유해가스 중독에 의한 사고 형태로 추정할 수밖에 없는 상황이었다.

발생장소와 작업의 위험성

이에 발생원 확인을 위한 추가 정밀사고조사를 실시한 결과 두 가지 위험요인이 발견되었다. 첫 번째는 장소의 위험성이다. 일반적으로 석회석은 노천광산(open-pit mine) 형태로 채굴작업이 이루어지나 해당 광산의 경우 CaO함량이 50%이상의 고품위 석회석을 채굴하기 위해 지하개발로 추진되었다.

이러한 지하개발 방식은 최근 석회석 자원의 고갈과 환경 규제 등에 따라 확대되는 추세이다. 또한 최근 석회석 자원의 생산량 증가를 위하여 광산의 심부화가 빠르게 진행되는 추세이며, 국내 석회석광산 중 가장 심부화된 곳은 갱구로부터 257m까지 굴진이 진행되어 있다고 한다.

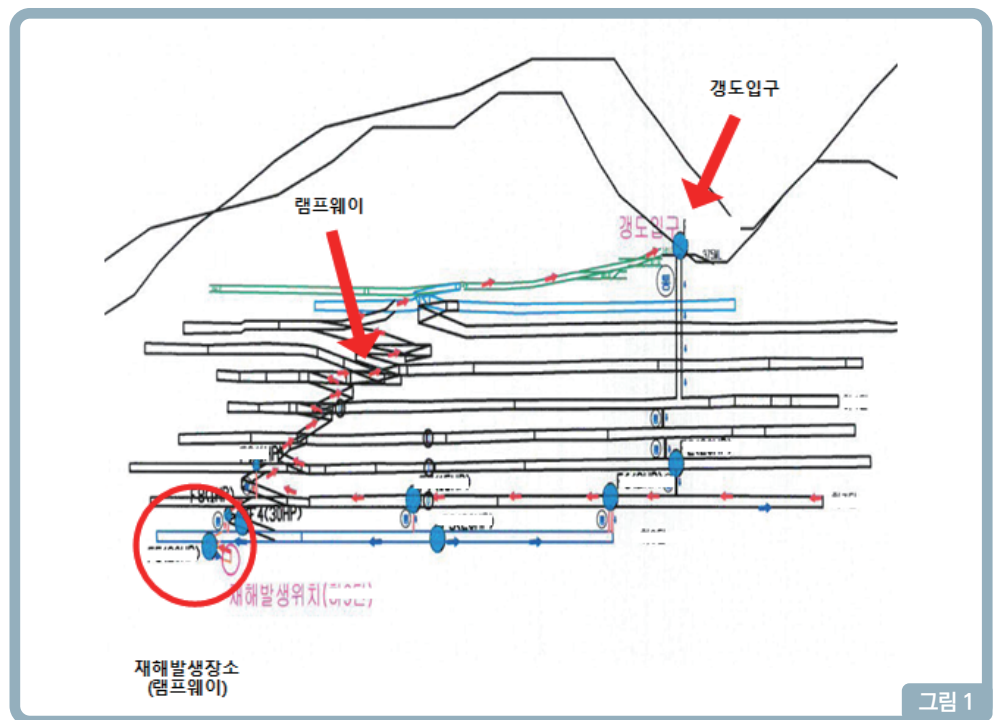
1) 제천 석회석광산 일산화탄소 중독 추정 사고... 2명 사상(연합뉴스, 매일경제, 한경 등, 2022. 4. 20)

2) 법의학(충남도립대학교 자료)

재해가 발생된 장소는 흔히 '막장'이라고 하는 현재 형성된 갱도의 맨 끝부분으로 갱도입구에서 수직으로 200미터가 넘게 들어간 최하단부의 램프웨이 부근이었다. 이러한 작업장 상황을 이해하려면 석회석광산의 특징을 알 필요가 있다.

폭이 좁고 경사진 갱도(사갱, 斜坑)가 많은 석탄광산과 달리 석회석광산은 대형덤프트럭이 다닐 수 있을 정도의 크기인 폭 10m, 높이 6m이상의 대단면 갱도 굴진방식이 적용된다. 석회석광체를 따라 여러 개의 단이 형성되고 각 단과 단 사이는 장비가 이동할 수 있도록 대형 건물의 지하주차장과 유사한 형태의 램프웨이가 만들어져 있다.

이렇게 형성된 최하단 램프웨이의 경우 하부공간이 맹갱도(blind entry) 형태로 통기가 어려워 유해가스에 의한 사고 위험이 있다³⁾.



[그림 1] 석회석광산의 램프웨이 (Rampway)와 맹갱도(blind entry) 형성모식도(예)

두 번째는 작업의 위험성이다. 전술한 바와 같이 지하에서 대단면 갱도 굴진을 위해서는 폭약이 사용된다. 폭약이란 화약류의 일종이다. 화약류란 외부의 자극에 따라 급격한 화학적 변화를 일으켜 다량의 가스와 함께 순간적으로 주위의 온도와 압력을 상승시켜 물체를 추진 또는 파괴하는 물질을 말한다.

화약류에는 화약, 폭약, 화공품 등이 있으며 이중 산업용 폭약으로는 질산염 또는 질산에스테르의 혼합폭약, 염소산염 또는 과염소산염 폭약, 함수폭약, 정밀폭약 등이 주로 사용된다.⁴⁾

석회석 광산 등에서 주로 사용되는 산업용 폭약은 통상 초유폭약이라고 불리는 초안유제폭약(ammonium nitrate fuel oil explosives, ANFO)이다. 초유폭약은 질산암모늄(NO_4NO_3)를 주성분으로 하여 연료유(주로 경유)를 1~10%가량 혼합한 폭약으로 습기에 약하고 전폭약이 필요하다는 단점이 있으나 안전성이 우수하고 성능이 좋아 노천광산, 대형석산개발 등 다양한 현장에서 사용된다.

국내에서는 (주)한화, (주)고려노벨화약 등의 업체에서 초유폭약 플러스, 뉴 안포 등의 제품명으로 판매되고 있다.

3) 이장우, 한국자원공학회지(KSMER) Vol.58, No. 2 (2021) pp.191-201

4) 김희창, 화약발파 제9권 제4호(1991. 12)

08 초유폭약 플러스 AMMONIUM NITRATE FUEL OIL EXPLOSIVES

ANFO Plus



그림 2

[그림 2] 국내에 판매되고 있는 초유폭약 제품 및 관련 작업장비(장전차량 및 장전기) 예(출처 : 업체 홈페이지 제품 설명자료)

갱내에서 굴진은 점보드릴에 의한 착암, 장입차량을 이용한 장약 장입, 발파 등의 공정을 통해 진행되는데 이때 초유폭약의 발파에 따라 다량의 가스⁵⁾가 발생된다. 폭약자체에서 발생하는 가스와 함께 폭약에 포함된 연료유의 불완전 연소 물질, 암석 등의 비산먼지 등이 섞인 발파가스에는 다양한 유해위험성이 있다.

주요 독성 성분으로는 일산화탄소(CO)와 질소산화물(NO_x)가 있으며 구성비, 천공상태 및 방법, 폭약의 보관기간, 수분에 의한 오염정도 등에 따라 발생정도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 미국 산업안전보건연구원(National Institute of Occupational Safety and Health)의 연구결과 연료유 함량이 높을수록 일산화탄소 발생량이 증가되며, 연료유의 함량이 6%일 때 유해물질 발생량은 초유폭약 1kg당 CO 20리터, NO_x 3.5리터, NO₂ 2리터 가량이 발생된다고 한다.

대단면 석회석광산의 경우 1일 300~600kg의 초유폭탄을 사용한 발파가 이루어진다고 할 때, 일산화탄소가 6~12m³까지 발생될 수 있다. 산소농도가 충분하지 않거나 현장여건에 따라 초유폭약 내의 경유의 불완전연소비율이 높을 경우 일산화탄소 발생은 더욱 증가될 수 있다.

이렇게 발생된 일산화탄소는 작업공간의 크기나 특성, 환기설비의 설치 및 가동상황에 따라 환기가 불충분한 특정장소에 체류될 수 있고 혈액의 헤모글로빈과 결합력이 산소보다 200배 이상 높은 일산화탄소의 특성상 질식재해가 발생할 가능성이 있다.

발생된 일산화탄소가 폭 14m, 길이 30m의 공간에 체류된다면 2,600~5,200ppm 가량의 수준으로 존재하여 15~20분가량 머물러도 중독사망의 위험이 있을 수 있다.

따라서 초유폭약 발파에 따라 발생된 일산화탄소(CO)는 디젤장비에서 발생된 일산화탄소와 함께 갱도 내 중독사고의 주요 원인이라고 할 수 있다.

5) 제품에 따라 1kg 당 970~975리터 가량의 가스 발생(제조사 홈페이지)

6) <https://cdc.gov/niosh/mining>

[그림 3] 초유폭약 발파 시 연료유
함유량에 따른 일산화탄소 발생량
(Rowland III and Mainiero, 2000)
(출처 : <https://cdc.gov/niosh/mining>)

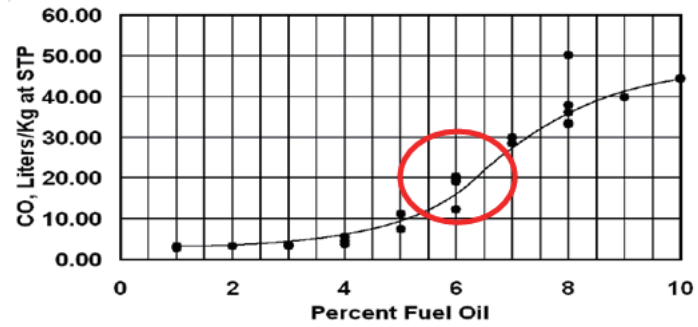


그림 3

[그림 4] 초유폭약 발파 시 연료유
함유량에 따른 질소산화물(NO₂, NO_x)
발생량
(Rowland III and Mainiero, 2000)
(출처 : <https://cdc.gov/niosh/mining>)

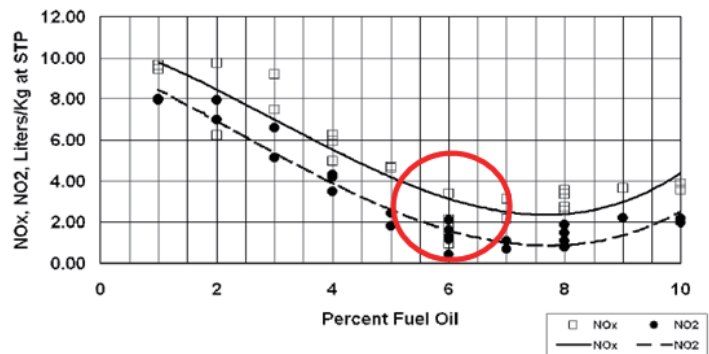


그림 4

광산 현황 및 안전보건 관리

국가광물정보센터의 국가광물자원지리정보망(KMRGIS)⁷⁾에 따르면 전국에 구축되어 있는 광산의 수는 1만 천여 개소이다. 전체의 60.6%는 금속광산(7,134개소)이며 비금속광산은 33.3%(3,913개소), 에너지광산(석탄 등) 6.1%로 구분되며, 지역별로는 강원도(1,667개소), 경상북도(1,307개소), 충청남도(755개소) 순으로 분포되어 있다.

[그림 5] 전국 광물자원 채굴을 위한
광산 설치 현황
(출처 : <https://kmrgis.net>)

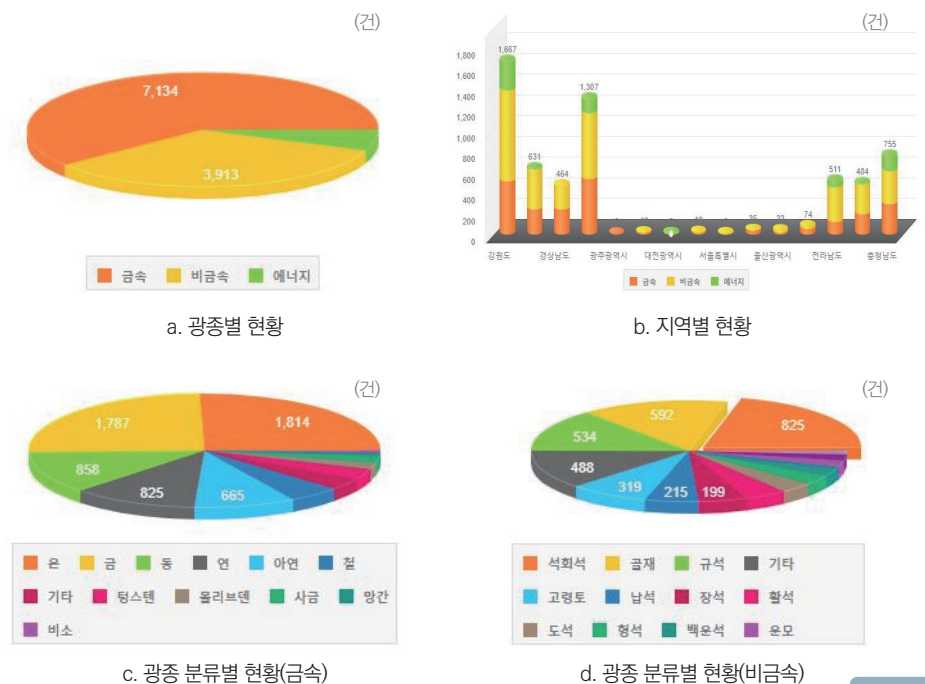


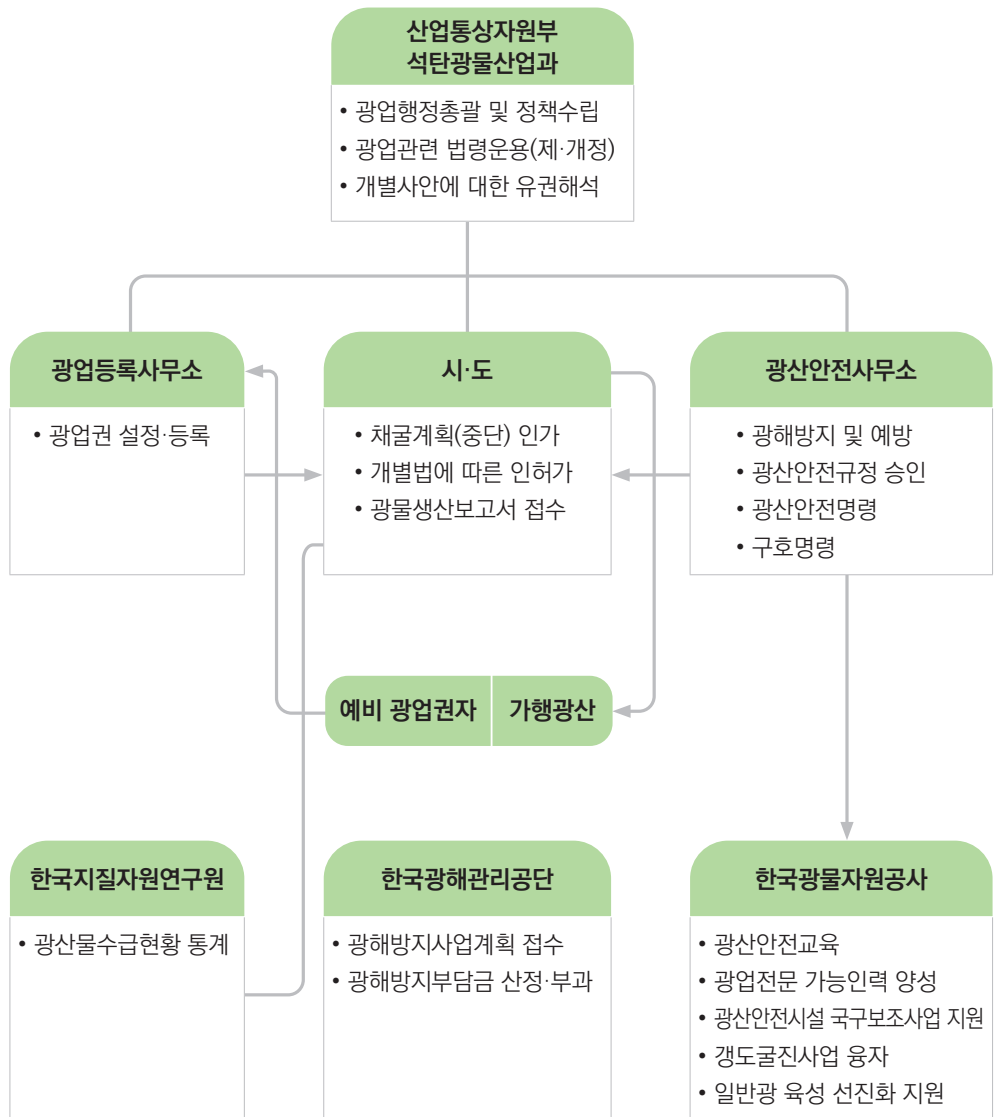
그림 5

7) Korea Mineral Resource Geographic Information System(홈페이지 <https://kmrgis.net>)

전체 광산 중 광업권을 가지고 채굴계획인가를 받아 실제 광물을 채굴 중인 광산을 가행(稼行)광산이라고 하는데 대부분은 석회석 및 고령토 등을 채굴하는 광산이며 그 외 규석, 규사, 운모, 금, 은, 철, 텅스텐 등 광물자원을 생산하고 있다.

산업통상자원부에 따르면 2019년 전국의 가행광산은 330개소이고 6,543명의 노동자가 종사하고 있다. 이들 광산에서 발생한 재해는 총 24건으로 사망자 4명, 중상 21명, 경상 13명이 발생되었다. 광산관련 업무를 총괄하는 행정기관은 산업통상자원부 석탄광물산업과이며 안전 관련으로는 동부, 중부, 서부, 남부 등 전국 4개 광산안전사무소가 설치되어 가행광산에 대한 정기적인 보안검사, 광산재해 및 광해방지업무를 수행하고 있다.

광산보안법 제19조에 따라 광산안전의 감독에 관한 사무는 산업통상자원부장관이 담당하며 고용노동부 장관 및 환경부 장관은 각각 광산근로자의 안전과 보호에 관한 사항과 광해의 방지에 관한 사항을 권고할 수 있다. 안전관련 법·기준으로는 「광산안전법」과 그에 따른 「광산안전기술기준」과 기술매뉴얼 성격의 「광산안전 매뉴얼」 등이 있다.



[그림 6] 광업관련 주요 행정기관
(출처 : 광산안전사무소 홈페이지)

광산안전에 관한 기술적인 내용을 가장 많이 담고 있는 「광산안전기술기준」은 광산안전법 제7조의2에 따라 2017년 제정되어 2021년 6월까지 7차례 개정되었다. 여기서는 작업장 환경기준을 안전하게 유지하기 위해 통기와 갱내가스에 대한 기술기준을 정하고 있으며, 여기서 정한 작업장 공기질에 관한 내용은 다음 (표1)과 같다. 또한 작업원의 수 등에 따라 갱내작업장의 통기량을 규정하고 있으며 내연기관 사용에 따른 통기량 증가를 명시하고 있다.(제11조)

표 1. 광산안전기술기준에 따른 갱내 공기질 관련 기준

구분	기준	비고
갱내 공기 산소함유량(제5조)	19% 이상	○ 재해구조작업 등 긴급상황 시 예외 규정 부여
유해가스(제6조)	일산화탄소(CO) 30ppm 이하 이산화탄소(CO ₂) 1% 이하 일산화질소(NO) 25ppm 이하 이산화질소(NO ₂) 3ppm 이하 이산화황(SO ₂) 2ppm 이하	○ 8시간 평균농도 기준 ○ 긴급상황 시 예외
부유 먼지(제7조)	3~5mg/m ³	○ 광산 종류별 별도 기준
메탄가스(제9조)	1.5% 이하	○ 전기설비 여부, 긴급상황 등에 따라 예외 가능

광산안전매뉴얼은 2015년 산업통산자원부와 한국광물자원공사에서 제작하였으며, 광산안전매뉴얼에는 일반안전지침과 재해유형별 예방지침, 순회점검 위험성 평가지침 등으로 구성되어 있으며, 이중 가스와 화약발파관련 재해예방부분이 기재되어 있으나 발파로 인한 일산화탄소 중독위험은 명시되어 있지 않다.

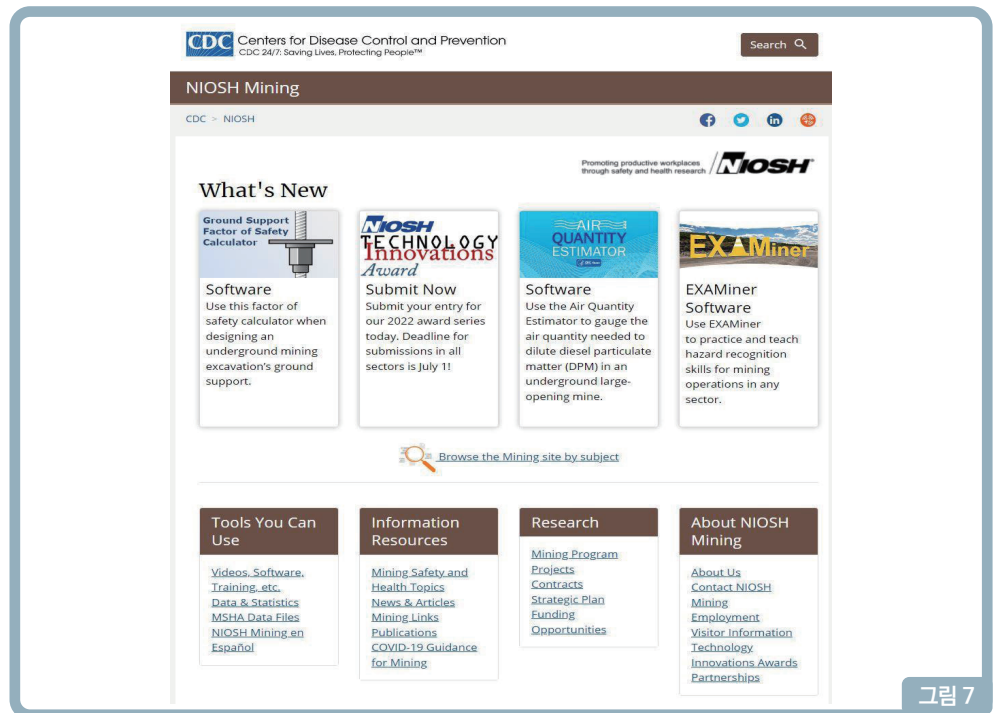
결론 및 예방대책

광산에서 발생하는 산업재해는 제조업 등 타 업종에 비해 발생건수나 규모가 적고, 작업여건이 지하라는 특성상 붕괴, 매몰, 폭발 등의 사고에 그간의 안전보건 관리 초점이 맞추어져 있다. 이번 사고의 경우도 현장에서 일산화탄소의 중독위험에 대해 인식과 대비가 부족했으며 특히 초유폭약에서 발생하는 일산화탄소에 대하여는 위험관리가 부족했던 것이 사실이다. 따라서 동종 재해 예방을 위해서 다음과 같은 예방대책이 필요하다.

① 발파에 따른 유해가스의 위험성 인식 및 관리

외국의 경우 미국 산업안전보건연구원(NIOSH)에서 광산관련 별도 홈페이지가 구축되어 안전보건에 대한 다양한 자료를 제공하고 있으며, 특히 갱내 디젤차량 및 장비 운행에 따른 디젤입자상 물질(diesel particulate matter, DPM) 발생 시뮬레이터(Air Quantity Estimator, AQM), 광산의 위험요인을 발견하고 예방훈련을 위한 전용 프로그램(EXAMiner) 등과 함께 다양한 동영상 및 연구자료 등의 기술자료를 제공하고 있다. (그림7) 이중 초유폭약의 발파가스에 대한 안전보건 권고사항은 다음과 같다.

- 유해한 흠(fume)/가스 발생을 최소화 시킬 것
- 흠(fume)/가스가 어느 방향으로 가는 가를 미리 확인하여 근로자나 주민이 피할 수 있도록 조치 할 것
- 흠(fume)/가스가 근로자나 주민에게 향하지 않도록 미리 조치 할 것
- 근로자나 주민이 있는 장소의 공기질을 모니터링하여 유해한 흠(fume)/가스가 발견될 경우 즉시 대피시킬 것
- 구조물이나 밀폐공간에 대해 일산화탄소(CO) 농도가 안전한 수준이 될 때 까지 지속적으로 환기할 것



[그림 7] 미국 산업안전보건연구소 (NIOSH) 광업안전보건 홈페이지
(출처 : <https://cdc.gov/niosh/mining>)

② 장소와 작업상황에 따른 환기 적정성 사전 검토

갱내에서 다량의 초유폭약을 사용한 발파작업시 작업자의 안전을 위하여 발파 등에 따른 유해가스 배출과 적정 공기공급을 위하여 환기가 필수적이다. 일반적으로 갱도의 환기(통기)를 위해서는 통기용 수갱에 설치된 배기팬(exhaust fan)과 갱내에 축류형 국부팬(axial-flow fan) 및 풍관, 풍문 등을 설치·가동하는 등의 방법을 사용하고 있으나 심부화가 많이 진행된 광산의 경우 환기효과가 제한적인 상황이 발생할 수 있다. 즉 모든 광산의 맹갱도 굴진시에는 일산화탄소 등에 의한 질식재해 또는 유해가스의 폭발 위험이 있을 수 있다는 의미이다. 한 연구⁸⁾에 따르면 대단면 갱도 통기를 위해 기존 축류형통기팬이 아닌 프로펠러 팬과 같은 저풍압 고풍량팬(fan)을 사용한 효율적 통기방법을 제시하고 있으므로 작업현장여건에 따라 위험성평가를 실시하여 적절한 통기방법을 고려한 뒤 작업을 실시하는 것이 타당하다.

8) 국내 석회석 광산의 지속적 개발을 위한 적정 통기기술 제안(이창우, 한국자원공학회지 Vol.5, No. 2(2021) pp.191-201)

③ 산업특성에 따른 안전기준 마련·준수

석회석 등 광산산업의 경우 지하채굴이 많아지고 작업의 심부화가 진행되는 특성에 따라 기존 안전기준에 대한 점검과 적정성에 대한 검토가 필요하다. 광산안전기술 등 갯도 내 작업자 안전보건을 위해 기존 기술기준 및 지침에 대해 이번 사고를 교훈삼아 보완작업이 이루어져야 하고 전국현장에 대한 교육과 안내가 이루어지길 바란다. 현장에서도 통기방법 및 통기장치에 대한 확인과 검토를 실시하는 등의 근로자의 생명과 건강을 지키기 위한 노력과 검토확인, 생산성, 작업의 시급성, 업체의 규모나 영세성 등 모든 제한요건보다 우선적으로 고려되고 이행되어야 할 것이다.

중대사고 이슈 리포트

重大事故 Issue Report



중대사고이슈리포트 2022. 11.

[2022-중앙사고조사단-313]

발행인 안종주
발행처 한국산업안전보건공단
울산광역시 중구 종가로 400(북정동)
문의처 052)703-0128
편집디자인 한국장애인문화인쇄협회
Tel. 02)2683-0955

