

아연정광의 성분분석 및 챔버내 산소소모량 평가

박해동* · 황은송

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Analysis of Components and Oxygen Consumption Rate for Zinc Concentrates in a Closed Chamber

Hae Dong Park* · Eun Song Hwang

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objective: This study was conducted to identify the cause of suffocation accident.

Methods: We analyzed the components of zinc concentrates by ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectroscopy) and tested the oxygen consumption by zinc concentrates in a 13.2-liter closed chamber.

Results: Zinc, sulfur and iron were the main components of the four types of zinc concentrates, and accounted for 76~89% by weight. Zinc concentrates (0.5 or 0.927 kg) depleted the oxygen concentration from 20.9% to 7.4~18.9% during seven days. The rate of oxygen consumption was in the range of 3.0~11.0 mM/day · kg-sample at 21~24°C and around 95% of free air space within the closed chamber.

Conclusion: Since zinc concentrate consumes oxygen in a confined space, measures should be taken to prevent suffocation accident (such as ventilation and monitoring of oxygen concentration).

Key words: oxygen consumption, zinc concentrate, confined space, suffocation accident

I. 서 론


최근 10년간(2012~2021년) 발생한 질식재해는 총 196건(사망 165명, 부상 175명)이었으며, 사망자의 비율(47.4%)이 일반적 사고성 재해(1.1%)보다 약 44배 높은 수준이었다(MoEL, 2022a). 1999년부터 2007년까지 발생한 220 건의 질식재해를 분석한 결과, 작업장 소별 질식재해 발생현황은 오폐수처리장에서 가장 많았으며(44건), 맨홀(40건), 저장용기(40건), 작업장내부(16건), 지하작업장(16건), 배관내부(15건) 및 선박(15건) 등의 순으로 많았다. 기인물별 질식재해 발생현황은 산소결핍(69건), 일산화탄소(48건), 황화수소(40건), 유 기용제(32건)의 순으로 분석된 바 있다(Yoo et al,

2009). 한국의 밀폐공간 관련 사망자 천인을 평균(12.8%)은 미국(6.0%)과 일본(5.6%)보다 약 두 배 높았으며, 업종별로는 건설업(33%), 제조업(26%), 서비스업(11%)에서 발생이 많았다. 재해자수는 원청업체(181명)가 하청업체(123명)보다 많았으며, 재해자의 연령은 40대(93명), 30대(82명), 50대(66명) 순으로 많았고, 경력은 2~5년(46명), 10~20년(40명)의 순이었다(Lee et al., 2016). 또한, 생강 저장굴에서 산소농도는 초기(봄) 21% 수준이었으나, 환기가 되지 않은 여름(6월, 9월)에는 16% 수준이었고 환기 후 작업시(7월)에는 19%수준이었다(Kim et al., 2018). 1945년부터 2019년까지 소방공무원의 비화재 출동 중 순직 및 부상사례를 조사한 결과, 밀폐공간 질식재해사례는 1996년부터 8건이

*Corresponding author: Hae Dong Park, Tel: 052-703-0883, E-mail: workenv@kosha.or.kr
400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan

Received: February 9, 2023, Revised: March 2, 2023, Accepted: March 29, 2023

 Hae Dong Park <https://orcid.org/0000-0002-3497-0369>

 Eun Song Hwang <https://orcid.org/0000-0003-3487-2096>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

었으며, 요구조자는 모두 사업장의 근로자였다(Lee et al., 2019). 질식재해의 다양한 발생작업 중에서 선박 하역작업과 관련된 재해는 '11년 인천항 원목 하역(사망 1명), '12년 울산항 동정광석 하역(사망 1명), '13년 군산항 원목 하역(사망 1명), '20년 충남보령 석탄 하역(사망 1명)작업에서 발생하였다(KOSHA, 2021b).

산업안전보건기준에 관한 규칙(별표 18)에서 규정한 밀폐공간 중 제7항은 '석탄·아탄·황화광·강재·원목·건설유·어유 또는 그 밖의 공기 중의 산소를 흡수하는 물질이 들어 있는 탱크 또는 호퍼 등의 저장시설이나 선창의 내부'이다(MoEL, 2022b). 국제해상고체선적화물규칙(IMSBC Code)에 따르면 황화금속(zinc concentrates, lead concentrates, copper concentrates and low-grade middling concentrates)의 유해요소로 산소소모 및 독성흡 발생과 함께 발열 및 산화반응이 발생할 수 있다고 규정하고 있다. 따라서 선적 화물칸의 출입은 환기가 되고 공기 중 산소농도가 조사될 때까지 출입이 허가되면 안 된다고 규정하고 있다(MSC, 2019). 또한, 제조사의 아연정광 물질안전보건자료에서도 동일한 내용이 취급방법으로 기술되어 있다.

그럼에도, 국내에서 2021년 3월 선박에서 아연정광을 하역하기 위하여 준비작업을 하던 중 질식재해(사망 2명, 부상 1명)가 발생하였다. 이에 아연정광의 성분분석과 챔버 내에서 아연정광의 산소소모율을 조사함으로써 질식재해의 원인을 밝히고자 하였다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 평가시기 및 시료

실험은 두 차례에 걸쳐서 수행되었다. 먼저, 질식재해 사고발생장소에서 수거된 아연정광 시료(1종: A)를

이용하여 2021년 3월에 성분분석과 산소소모량을 실험하였다(1차 실험). 이후 사고발생물질과 유사한 아연정광 시료(3종: B, C, D)를 중앙해양안전심판원으로부터 제공받아 2021년 6~7월에 성분분석과 산소소모량을 실험하였다(2차 실험). 중앙해양안전심판원은 시료와 함께 냄새, 선적시 습도(운송가능습도) 등 화물정보를 추가적으로 제공하였다. 사고조사자료 및 화물정보에 따른 시료의 주요 특성은 아래 Table 1과 같았다.

2. 성분분석

아연정광 별크시료는 운반되어 온 용기 내에서 스테인리스스틸 막대를 이용하여 혼합한 후, A 시료 9~13.6 mg, B, C, D 시료는 4.3~6.2 mg 사이의 무게로 각각의 시료마다 2~3개의 분석용 시료를 준비하였다. 무게를 측정한 시료는 100 mL 비이커에 넣고, 왕수(37% 염산 : 70% 질산 = 3:1) 5 mL를 넣은 후 30분간 상온에 두었다가 가열판에서 120℃로 가열하였다. 시료가 완전히 녹을 때까지 왕수를 추가하면서 가열하였으며, 아연정광 시료가 완전히 녹은 후 왕수가 소량만 남도록 휘발시키고, 상온에서 식힌 후 20 mL 용량플라스크로 옮겼다. 증류수 5 mL를 비이커에 넣고 표면을 세척하여 용량플라스크에 넣었다(3회). 증류수를 첨가하여 최종액량을 20 mL로 하였다. 처리된 시료를 실린지 필터(0.2 µm, PTFE filter, Thermo Fisher Scientific Inc. USA)로 거른 후 유도결합플라즈마 분광분석기(iCAP7400DUO, Thermo Fisher Scientific Inc. USA)를 이용하여 성분을 분석하였다. 유도결합플라즈마 분광분석기로 분석가능한 모든 원소를 분석대상으로 선택한 후, 공시료(blank)와 샘플을 분석하여 검출 가능성이 있는 원소 12종(Zn, S, Fe, Pb, Ca, Cu, Mg, Cd, Mn, Ag, Ba, As)을 선택하였다. 샘플별로 분석한

Table 1. List of samples

Sample	Compound	Color & form	*Humidity at shipping (acceptable humidity for transport)	Shipping site	Source
A	zinc concentrates	brown, powder	-	Australia townsville	Accident
B	zinc concentrates	brown, powder	5.21% (8.9%)	Australia port pirie	Similar material
C	zinc concentrates	gray, powder	11.43% (15.1%)	Australia karumba	
D	zinc concentrates	gray, powder	8.53% (8.83%)	Chille chacabuco	

*Humidity at shipping : Cargo information from Korean Maritime Safety Tribunal

결과의 평균값을 사용하여 중량비율을 계산하였으며, 원소별 분석상 검출한계는 중량비 약 0.01%였으나, 중량비 0.1% 미만인 경우에는 불검출로 기술하였다. 모든 시료에서 불검출인 3종(Ag, Ba, As)은 결과분석에서 제외하였다.

3. 산소소모량 평가 및 유해가스 모니터링

아연정광 벌크시료는 전자저울을 이용하여 무게(1차 927 g, 2차 500 g)를 측정 후, 챔버에 투입하였다(Figure 1). 시료별로 각 1회씩 약 7일간 실험하였으며, 실험이 종료된 후에는 챔버 내부를 실험실내 공기로 충분히 환기를 시키고, 복합가스측정기(MultiRAE pro PGM6248, Honeywell, USA)의 산소농도가 20.9% 임을 확인 한 후 다음 실험을 수행하였다. 복합가스측정기와 온습도측정기(Thermo Recorder TR-72wf, T&D corp. Japan)를 챔버 내부에 두고 1분 단위로 측정값을 저장하였다. 1차 실험(2021년 3월)에서 사용한 복합가스측정기는 2대(동일모델)이며, 한 대는 산소센서가 장착된 것이며, 다른 한 대는 이산화황, 황화수소, 일산화탄소 센서를 장착한 장비였다. 2차 실험(2021년 6~7월)에서는 산소센서가 장착된 복합가스측정기 1대만을 사용하였다. 복합가스측정기는 펌프식으로 공기를 흡입하는 내장된 펌프를 가동하였으며(250 ml/min), 온습도측

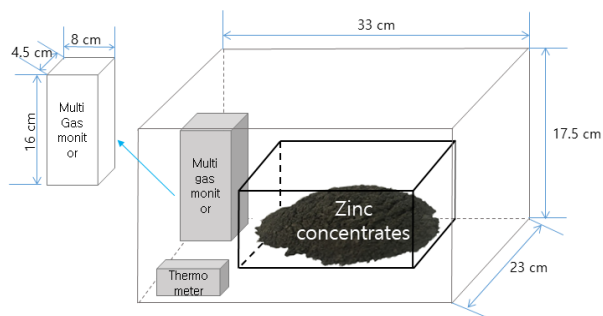


Figure 1. Settings of test chamber

정기는 확산방식이었다. 챔버의 내용적은 약 13.2리터였으며, 사용된 복합가스측정기의 부피는 1대당 약 0.6리터였다. 복합가스측정기를 챔버 내에 설치한 후 질소가스(99.999%)를 챔버에 주입하고 닫은 후 농도를 관찰하여 챔버의 밀폐상태를 확인하였다. 초기 산소농도는 11.2%였으며, 10시간동안 농도를 관찰한 결과 장비의 분해능인 0.1% 이하의 변화로 확인되었다.

III. 결과 및 고찰

1. 아연정광의 성분분석

아연정광 벌크시료의 성분분석결과는 Table 2와 같았다. 아연의 함량이 46~50% 수준으로 가장 높았으며, 시료별 차이도 크지 않았다. 황은 18~31%, 철은 3~12%, 납은 1.3~5.6% 수준이었다. 시료 A는 납을 분석하지 않아 함량이 확인되지 않았다. 정성 및 정량된 원소의 합계는 78~90% 수준이었으며, 주요 원소 3종(아연, 황, 철)의 함량이 76~89%로 대부분을 구성하였다.

벌크시료의 성분분석시 건조과정을 거치지 않고 전처리하여 중량비율을 계산하였다. 중앙해양안전심판원에서 제공받은 화물정보에서 아연정광(B,C,D)은 선적시 수분함량이 5~11%였으므로, 분석당시에도 일정량의 수분이 시료에 포함되어 있었을 것으로 생각되나, 수분함량에 대한 별도의 분석은 시행하지 않았다.

아연정광(시료 A) 제조사의 물질안전보건자료에서는 성분별 중량비율은 아연(as zinc sulphidic compounds) <78%, 비결정형 산화구소 <40%, 철(as iron sulphidic compounds) <25%, 납(as lead sulphidic compounds) <15%, 구리(as copper sulphidic/oxide compounds) <5%, 카드뮴(as cadmium sulphidic compounds) <1%, 등으로 기술되어 있었다(KOSHA, 2021a). 시료의 분석결과는 물질안전보건자료의 성분별 함량 기준에 부합하는 것으로 나타났으나, 성분별 함량은 최대값 기준으

Table 2. Chemical compositions of bulk samples

(Unit: %w/w)

Sample	Zn	S	Fe	Pb	Ca	Cu	Mg	Cd	Mn	Sum
A	49.7	30.7	8.8	NA*	0.6	0.2	0.2	0.1	<LOD**	90.3
B	47.6	28.2	3.1	5.6	0.2	0.6	<LOD	0.1	0.1	85.6
C	47.1	19.6	10.5	3.7	0.1	0.5	<LOD	0.2	0.3	82.1
D	46.1	17.7	11.9	1.3	0.3	0.5	0.1	0.2	0.5	78.6

*NA: Not analyzed(excluded from the target compound)

**<LOD: Below the limit of detection (LOD=0.1%)

로 표기되어 넓은 범위를 포괄하고 있었다. 4개 시료에서 동일하게 아연, 황 및 철이 주요물질로 분석되었다.

2. 산소소모량

밀폐된 챔버를 이용한 아연정광의 산소소모량 실험결과는 Figure 2와 같았다. 1차 실험(시료 A)에서 챔버를 실험조건에 따라 세팅한 후, 5시간 만에 산소농도가 20.6%에서 20.0%로 감소하였다. 이에, 환기를 시키면서 복합가스측정기의 상태를 관찰하였고, 환기 시 산소농도가 실험실 내부의 산소농도인 20.9% 수준으로 회복되는 것을 확인하였다. 이후, 복합가스측정기를 다시 챔버에 넣어 실험하였다. 약 160시간(6.7일) 경과 후 산소농도는 7.4% 수준으로 낮아졌다. 챔버의 상부 전체를 개방하였을 때 산소농도는 1~2분만에 18.8%로 증가하였다. 2차 실험에서도 약 7일간의 실험을 종료한 후 챔버 상부를 개방했을 때 산소농도는 약 30분 이내에 20.9%로 측정되었다.

2차 실험에서는 벌크시료를 넣지 않고 나머지 조건은 동일한 상태(blank)에서 먼저 실험하였는데, 6일 동안 산소농도는 20.9%에서 변화가 없었다. 그러므로, 장비의 드리프트(drift, 측정환경의 변화가 없음에도 시간의 경과에 따라 반응값이 서서히 감소하거나 증가하는 현상) 특성이 산소농도평가에 영향을 주지는 않았을 것으로 판단된다. 동일한 시료량에서 챔버 내의 산소농도 감소속도는 C > D > B의 순으로 평가되었다. 산소소모량의 직선회귀식의 기울기는 -0.29~-0.86으로 나타났으며, 이는 실험조건에서 1일 동안 산소농도가 0.29~0.86% 낮아지는 것을 의미한다. 직선회귀식의 결정계수는 0.950~0.998로 나타났다.

시료 A의 직선회귀식의 기울기는 -1.94로 시료 B,

C, D에 비해서, 단위시간당 산소농도의 감소가 큰 것으로 나타났다. 그러나, 이는 사용된 시료의 양을 고려하지 않은 것이므로, 4개 시료를 비교해 보기 위하여 단위 중량당 산소소모속도를 아래와 같이 계산하였다.

$$OCR = \frac{V(C_0 - C_1)/100}{R(T_1 - T_0)W_s} \times 1000$$

OCR: Oxygen consumption rate(mM/day · kg sample), V: volume of chamber, C₁: oxygen concentration at the end of the test(%), C₀: oxygen concentration at the start of the test(%), R: volume of 1 mol oxygen at test temperature and pressure, T₁: elapsed time from the start time(day), T₀: start time(day), W_s: weight of test sample(kg)

단위시간 및 단위중량당 산소소모속도는 Table 3과 같았다. 산소소모속도는 A > C > D > B의 순으로 빨랐으며, 시료 A가 시료 B에 비해서 약 3.8배 빨랐다.

실험 당시 온도는 시료 A가 다른 시료에 비해서 약 2℃ 정도 낮았는데, 시료 A는 3월에 실험을 하였고 다른 시료는 6~7월에 실험하였기 때문에 실내온도에 의한 영향인 것으로 판단된다. 각 실험별 온도의 표준편차는 0.6℃ 이하로 실험기간동안 일정하게 유지되었다. 실험실내 습도도 3월에는 약 20%로 낮았으며, 6~7월에는 약 62~82% 수준으로 차이가 있었다. 챔버 내의 상대습도는 실험시작 후 15~30분 이내에 포화농도수준으로 증가하였으며, 실험이 종료되어 용기를 개방할 때까지 유지되었다. 시료 C는 실험 중 온습도측정기의 데이터저장을 수행하지 않아서, 육안으로 관찰하고 체크

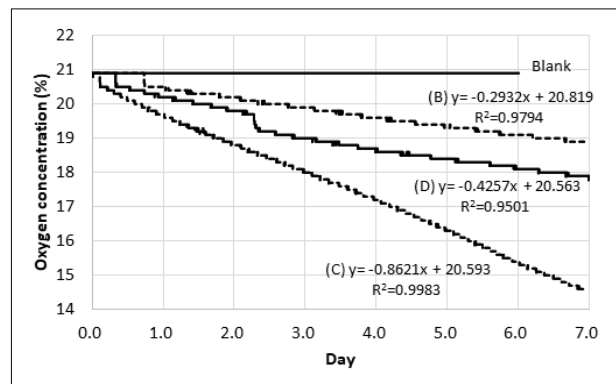
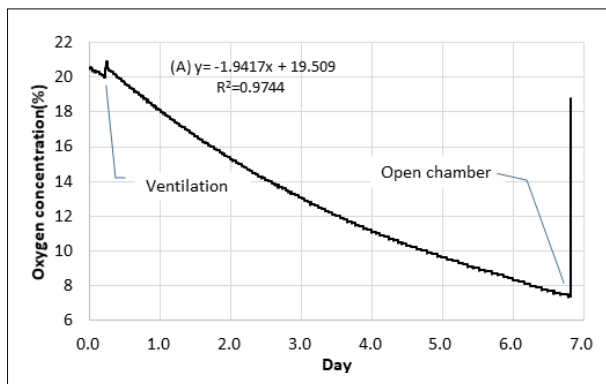


Figure 2. Oxygen depletion curve (Sample : (A), (B), (C), (D))

해 두었던 11개의 측정값에서 평균과 표준편차를 산출하였다. 벌크시료내의 수분 함량은 별도로 분석하지 않았으나, 화물정보 자료에 의하면 아연정광 시료(B, C, D)는 선적 당시 약 5~11%의 함수율을 보였으며, 운반할 수 있는 수분의 함량은 8~15%로 규정하고 있었다(Table 1). 그러므로, 벌크시료내의 수분이 증발되어 챔버 내부의 습도가 포화수준으로 증가한 것으로 판단된다.

실험에 사용된 산소센서는 전기화학식이며, 측정범위 0~30%(부피비), 분해능 0.1%, 반응시간 15초, 온도범위 -20~50℃ 및 사용 상대습도 0~95%(응축이 일어나지 않는 환경)의 사양을 갖고 있었다(Honeywell, 2019). 일반적으로 센서는 습도의 영향을 받을 수 있다. 그러나, 챔버 내의 온도변화가 거의 없는 상태에서 벌크 시료내의 수분이 증발하여 습한 환경을 조성한 것이므로, 응축의 우려는 없는 것으로 판단되었다. 또한, 장비에 수분제거용 필터(PTFE 25 mm, 0.2 μ m pore size, Water trap external filter)를 장착하여 사용하였으므로 수분에 의한 영향은 낮았을 것으로 생각된다.

직독식 센서는 여러 가지 방해물질에 의해서 영향을 받을 수 있으며, 산소센서는 수소가스가 1%존재할 경우 -2%의 반응값을 보인다. 수소가스에 의해서 영향을 받는 센서 중에서 일산화탄소가 있으며, 수소가스가 100 ppm 존재시 일산화탄소는 40 ppm으로 반응한다(Honeywell, 2018). 1차 실험에서 사용된 복합가스측정기에는 일산화탄소센서가 있었으며, 실험시작 후 약 3시간 만에 40 ppm으로 농도가 증가하였으나, 이후에는 약 6.5일간 40~60 ppm 수준에서 일정하게 유지되었다. 실험기간 7일 동안 산소농도는 지속적으로 감소하였으나, 일산화탄소농도는 일정 농도를 유지하였으

로, 실험조건에서 수소가스발생에 따른 산소농도 감소는 아닌 것으로 판단된다.

선박의 화물칸을 모형으로 제작하여 고철을 넣고, 화물칸 부피의 약 80%가 공기로 차 있는 상태에서 공기 중 산소농도의 감소속도를 평가한 연구가 있었다(Burke, 2020). 밀폐된 화물칸에서는 산소농도가 19.5%까지 낮아지는데 평균 1.45시간(10℃) 또는 0.3시간(23℃)이 걸렸다. 개방된 화물칸에서도 산소농도가 19.5%까지 낮아지는데 평균 1.91시간(10℃) 또는 0.84(23℃)시간이 걸렸다. 본 연구에서는 밀폐된 챔버의 약 95%가 공기로 채워진 상태였는데, 산소농도가 19.5%까지 낮아지는데 걸리는 시간은 7.4~108시간이었다. 이는 본 연구와 기존 연구의 시험환경에서 큰 차이가 있었는데, 특히 화물칸(또는 챔버) 부피대비 적재된 화물이 차지하는 부피의 비율에서 큰 차이가 있었다.

다양한 고고학적 금속유물(뭇, 화살촉 등)을 밀폐용기에 넣고, 상대습도 20~50%에서 실험한 산소소모율은 0~12 mbar/yr/g으로 평가되었다(Thickett, 2021). 상대습도 50%에서 실험한 최고 산소소모율은 약 8 mbar/yr/g이었으며, 이는 실험용기의 부피(1리터)와 온도(문헌에서 구체적인 값이 없어 20도로 가정함)를 고려하여 환산하면 약 0.97 mM/day · kg-시료에 해당한다. 본 연구의 산소소모량(4.56~11.03 mM/day · kg-시료)이 더 높았으며, 이는 본 연구의 높은 상대습도와 문헌에서의 고고학적 유물의 상태 등 시료특성의 영향이 있었을 것으로 추정된다.

본 실험은 질식재해 사고현장에서 채취된 아연정광 1종과 이와 유사한 아연정광 3종을 대상으로 실험하였으며 다음과 같은 제한점들이 있었다. 먼저, 실험에 사용한 벌크시료는 현장조사에서 수거된 시료 또는 관련기

Table 3. Test conditions and oxygen depletion rate

Sample	Temperature (°C) AM [*] ±SD ^{**} (range)	R.H. [†] (%) AM±SD(range)	Sample weight (kg)	Oxygen consumption rate (mM/day · kg-sample)
A	21.4±0.6 (20.5~22.9)	97.2±10.9 (17~100)	0.927	11.03
B	23.6±0.2 (23.1~23.8)	95.7±11.0 (62~100)	0.5	3.00
C	23.7 ± 0.1 (23.3~24.1)	100±0 (100)	0.5	9.47
D	23.2±0.4 (22.4~23.9)	97.3±1.9 (88~100)	0.5	4.56

*AM: Arithmetic mean, **SD: Standard deviation, [†]R.H.: Relative humidity

관이 제공한 시료로서, 보존기간 및 방법 등에 대한 구체적인 자료는 없었다. 둘째, 벌크시료의 성분분석시 수분의 함량은 별도로 분석되지 않았으며, 분석된 금속성분의 중량비율은 시료별로 78~90.3% 였다. 수분 및 분석이 되지 않은 성분이 있었다. 셋째, 챔버 내에서 산소소모량을 시험한 것은 시료별로 1회 수행되었다. 마지막으로, 본 실험은 질식재해 원인조사를 목적으로 제한된 기간과 시료를 사용하여 챔버 내에서 실험하였으며, 사고현장 또는 일반적인 선적상황과 차이가 있을 수 있다. 이러한 여러 제한점에도 불구하고, 본 실험은 아연정광을 담은 공간에서 산소결핍이 발생할 수 있음을 확인할 수 있는 결과였다.

IV. 결 론

밀폐공간 질식재해와 관련하여 아연정광 4종의 성분을 분석한 결과, 아연, 황 및 철이 중량비 76~89%로 대부분을 구성하고 있었다. 챔버 내에서 아연정광의 산소소모량을 약 7일간 평가한 결과, 산소농도가 7.4~18.9%로 감소하였다. 실제 환경에서 저장 공간 대비 공기의 부피, 저장물(아연정광 등)의 표면적, 온도/습도 및 공기흐름 등 환경에 따라서 산소소모속도는 크게 다를 것이나, 시간의 경과에 따라 산소결핍이 발생함은 명확하다. 그러므로, 관련 작업에서는 반드시 산소농도 확인과 환기절차를 지켜서 안전하게 작업을 수행하여야 할 것이다.

References

Burke D., Alnasser M. Oxygen depletion in enclosed spaces. J Marine Engineering & Technology. 2020;19(4):291-294. (doi:10.1080/20464177.2020.1715757)
Honeywell. MultiRAE series user's guide. 2019.
Honeywell. Technical note TN-114 Sensor specifications

and cross-sensitivities. 2018.
Lee JH, Kang TS. Fire fighters' Asphyxiation Incidents during confined space rescue in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg. 2019;29(4):590-602. (doi:10.15269/JKSOEH.2019.29.4.590)
Lee JW, Kim TH, Ha HC, Piao CX, Ahn KS. Analysis of suffocating accidents in confined spaces in the past 10 years (2005-2015). J Korean Soc Occup Environ Hyg. 2016;26(4):436-444. (doi:10.15269/JKSOEH.2016.26.4.436)
Kim HC, Lee MJ, Kim IS, Lee KS, Seo MT et al. Research on the safety and health management and asphyxiation gas concentration in ginger storage tunnel. J Korean Soc Occup Environ Hyg. 2018; 28(2):222-229. (doi:10.15269/JKSOEH.2018.28.2.222)
KOSHA(Korean Occupational Safety and Health Agency). Incident report(No.2021-99-11-003). 2021a
KOSHA(Korean Occupational Safety and Health Agency). KOSHA Alert. (No.2021-1). 2021b
MoEL(Ministry of Employment and Labor). Thorough guidance on safety and health management to prevent suffocation accident. Available from: URL: https://moel.go.kr/local/boryeong/info/dataroom/view.do?bbs_seq=20220700907. 2022a.
MoEL(Ministry of Employment and Labor). Regulations on occupational safety and Health standards. 2022b.
MSC(The Maritime Safety Committee). Amendments to the international maritime solid bulk cargoes code. MSC 101/24/Add.3 Annex7, 276-277. 2019.
Thickett D. Oxygen depletion testing of metals. Heritage. 2021;4:2377-2389. (doi:10.3390/heritage4030134)
Yoo KM, Park HH, Chung KJ. A study on statistics for accidents in confined space in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg. 2009;19(4):363-369

<저자정보>

박해동(연구위원), 황은송(과장)