

## 국내 알루미늄 노출실태 및 노출기준 개정 제안

김승원\* · 피영규<sup>1</sup> · 백용준<sup>2</sup> · 정태진<sup>3</sup> · 이혜실<sup>4</sup>

계명대학교 공중보건학전공, <sup>1</sup>대구한의대학교 보건안전전공, <sup>2</sup>사랑작업환경연구소, <sup>3</sup>EHS프렌즈, <sup>4</sup>산업안전보건연구원

## Proposals for Revising the Occupational Exposure Limits for Aluminum in Korea

Seung Won Kim\* · Young Gyu Phee<sup>1</sup> · Yong-Joon Baek<sup>2</sup> · Taejin Chung<sup>3</sup> · Hye-Sil Lee<sup>4</sup>

*Department of Public Health, Keimyung University*

<sup>1</sup>*Department of Health & Safety, Daegu Hanny University*

<sup>2</sup>*Love Work Environment Research Institute*

<sup>3</sup>*EHS Friends*

<sup>4</sup>*Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA*

### ABSTRACT

**Objectives:** This study was intended to investigate the revision status of the occupational exposure standards for aluminum at home and abroad; to investigate worker exposure at domestic aluminum manufacturing and handling workplaces; to conduct social and economic evaluation for the revision of domestic aluminum exposure limits.

**Methods:** We investigated the current status of occupational exposure limits for aluminum at home and abroad, and analyzed supporting data. An exposure survey was conducted targeting domestic aluminum manufacturing and handling workplaces. Based on these, revised aluminum occupational exposure limits were proposed.

**Results:** The major aluminum exposure limits at home and abroad show a notable difference. The toxicity of aluminum, which was revealed through animal experiments and epidemiological investigations. The average concentration of aluminum in the air at 12 workplaces was 0.016 mg/m<sup>3</sup>, and the maximum was 0.0776 mg/m<sup>3</sup>. When total dust and respiratory dust were measured side by side and simultaneously for the same process, 12.1% of the total mass concentration of aluminum dust was respiratory dust. As a result of measuring and comparing the size distribution of dust with an optical particle counter in real time, 48.1% of the total dust in the form of welding fume and pyro-powder was respiratory dust. Based on the literature review and workplace survey, three proposals for changing the aluminum exposure limit were proposed. Proposal (1): For all types, 10 mg/m<sup>3</sup> is unified as the exposure limit except for soluble salts and alkyls. Proposal (2): 1(R) mg/m<sup>3</sup> as the exposure limit for all forms except soluble salts and alkyl. Proposal (3): 1(R) mg/m<sup>3</sup> for pyro-powder and welding fume, and 10 mg/m<sup>3</sup> for metal dust, aluminum oxide, and insoluble compounds as exposure standards. A pyro-powder was defined as dry aluminum powder of 200 mesh size (74 μm) or smaller (larger size classified as metal dust). Reason for setting: In the workplace survey, the ratio of respiratory dust to total dust was analyzed to be about 1:10, so it was judged that the domestic standard and the ACGIH standard were compatible.


**Conclusions:** In all scenarios according to the revision of the exposure standard, the B/C ratio was greater than 1 or only benefits existed, so it was evaluated as sufficiently reasonable as a result of the socio-economic evaluation.

**Key words:** pyro-powder, aluminum alkyl, soluble salt, respirable dust

\*Corresponding author: Seung Won Kim, Tel: +82-53-580-5197, E-mail: swkim@kmu.ac.kr  
1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, Republic of Korea

Received: February 25, 2024, Revised: March 18, 2024, Accepted: March 28, 2024

 Seung Won Kim <https://orcid.org/0000-0003-2960-5866>

 Young Gyu Phee <https://orcid.org/0000-0003-2011-7591>

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.

## I. 서 론

알루미늄(Al)은 규소(Si) 다음으로 지구상에 많이 존재하는 원소이다. 대기 중에서 내식성이 강하고 전기 및 열의 양도체이다. 밀도가 2.70 g/cm<sup>3</sup>으로 가볍고 부식성이 낮아 철(Fe) 다음으로 많이 생산된다. 전성과 연성이 좋아 박판(sheet)이나 선으로 쉽게 가공될 수 있다. 녹는점이 660℃로 상온 및 가공이 쉬우며 주조가 용이하다. 다른 금속과 합금이 잘 되기 때문에 원하는 특성에 따라 다양한 조합의 합금이 사용된다(ATSDR, 2008).

알루미늄 합금에 대한 국제규격은 다양한 종류들이 존재한다. 가장 많이 사용되는 알루미늄 종류는 알루미늄 모재를 추가 가공하여 제품을 생산하는 D6701과 주물을 생산하는 D6008이다(KS, 1993; KS, 2018). 가공용 알루미늄 합금의 규격은 D6701을 많이 사용한다. D6701 규격에서 알루미늄 합금은 4자리 숫자 또는 영문자의 조합으로 계열을 표시한다. 순수한 알루미늄을 1000 계열로 분류하고, 기타 첨가되는 주요 금속에 따라 세분된다. D6008 규격에서 알루미늄 주물은 2자리 영문자와 1자리 숫자, 그리고 다시 1자리 영문자의 조합으로 계열을 표시한다.

알루미늄 소재의 표면처리 종류에는 아노다이징(anodizing), 양극산화법, 혹은 알루미늄이트(allumite) 처리; 화성피막 처리(chemical conversion coating); 전기도금(electro-plating); 무전해도금(electroless plating); 진공도금(vacuum coating); 기타 도장, 테플론(Teflon) 처리 등이 존재한다(Kwon, 2004). 이들은 모두 산업체에서 많이 활용되고 있는 알루미늄의 표면처리 기술들이다. 아노다이징은 양극산화의 뜻으로 피처리물(알루미늄 부품)을 양극에 걸고 전해, 양극에서 발생하는 산소로 부품의 표면을 산화하여 생긴 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 기능

성을 이용한다. 화성피막처리는 200℃ 이하에서 화학적 혹은 전기화학적 처리로 소재금속의 이온과 화학성분 일부가 반응하여, 밀착력이 있고 분말이 없는, 비수용성의 부동태 방청피막을 만드는 것을 말한다. 아노다이징과의 차이는 전류를 인가하지 않고 변환피막(conversion coating)을 만든다는 점이다. 이 방법의 처리약제는 액체 혹은 용융염, 페이스트 혹은 증기 형태이다. 그리고 봉공공정(sealing) 혹은 염색공정이 후처리로 추가하여 포함되기도 한다. 알루미늄은 크로메이트 피막처리(chromate conversion coating)를 많이 활용하며, 내식성의 향상과 도장의 밀착력 향상 이외에, 80년대에 들면서 친수성 부여 목적의 롬 에어콘, 카 에어콘 열교환기, 송전선의 에너지 손실의 절감에 활용케 되었다.

‘알루미늄 및 그 화합물’(이하 ‘알루미늄’)의 국내 노출 기준은 현재 다섯 가지로 세분화(가용성염/금속분진/알킬/용접흡/피로파우더)되어있어 물질이 해당되는 분류에 따라 각기 다른 노출기준을 적용하여야 하나 각 세부분류 별 정의·기준 부재로 현장 적용이 어려운 실정이다. 최근 산업안전보건법 시행규칙이 개정됨(고용노동부령 제272호, 2019. 12. 26., 전부개정; 시행 2020. 1. 16)에 따라 알루미늄의 법적 규제 명칭은 하나로 통합되었으나 노출 기준은 여전히 세부분류를 구분하여 적용하도록 되어있어 노출기준 개정 필요성이 대두되었다(Table 1). 알루미늄의 국내 노출기준이 ACGIH TLV와 비교하여 현저히 높아 값의 적정성에 대한 재검토가 필요하였다. 알루미늄은 국내에서 지난 10년간 노출기준 개정이 이뤄지지 않은 유해인자이다.

이에 본 연구에서는 국내외 노출기준 및 실태조사 사업을 통해 알루미늄 노출기준 개정안을 제공하여 노동자들의 알루미늄 노출을 효율적으로 관리하는데 이바지하고자 하였다. 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

1) 국내외 알루미늄의 노출기준 개정 현황을 조사하였다.

**Table 1.** Legal regulatory name for aluminum in the Occupational Safety and Health Act

Status	Occupational Safety and Health Act Enforcement Rules [Appendix 21] List of Harmful Factors for Work Environment Monitoring	Occupational Safety and Health Act Notice [Appendix 1] Occupational Exposure Limits for Chemicals
Before revision (2019. 12. 26)	Aluminum and its compounds A) Metal dust B) Pyro-powder C) Fume D) Soluble salt E) Alkyl	Aluminum (soluble salt) Aluminum (metal dust) Aluminum (alkyl) Aluminum (welding fume) Aluminum (pyro-powder)
Current	Aluminum and its compounds	Same as above

- 2) 국내 알루미늄 제조·취급 사업장 대상 작업자 노출 실태를 조사하였다.
- 3) 알루미늄 노출기준 변경 타당성 검토에 필요한 기술적·경제적 타당성 조사하였다.

## II. 연구방법

### 1. 문헌조사

알루미늄 노출기준 관련 국내외 현황 파악하기 위해 알루미늄 노출기준 관련 내용이 보고된 국내·외 논문 및 보고서 검토하였다. 국내논문은 KISS(한국학술정보), 과학기술학회마을, DBPIA에서 ‘알루미늄 노출기준’, ‘알루미늄 피로파우더’, ‘알루미늄 흡’, ‘알루미늄 가용성 염’, ‘알킬 알루미늄’ 등의 중심어를 입력하여 검색하였다. 국외논문은 Science Direct, EBSCO Host, PubMed, Google 학술검색 서비스를 이용하여 키워드로 ‘aluminum occupational exposure limit’, ‘alkyl aluminum’ 등을 입력하여 검색하였다. 검토한 문헌을 정리하여 ACGIH TLV Documentation과 유사한 노출기준 설정 근거 자료를 작성하였다. 노출기준 설정의 근거가 되는 독성자료를 조사하였다. 동물실험 및 역학조사자료 등을 조사하였고, 동물실험에 대해서는 급성 및 아만성/만성 노출에 대한 자료를 조사하였

다. ACGIH에서 2008년 노출기준을 철회한 후 보고된 수용성염 및 알킬 알루미늄에 대한 독성자료를 집중적으로 조사하였다.

### 2. 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사

알루미늄 금속에 대한 측정 및 분석은 KOSHA GUIDE (알루미늄에 대한 작업환경측정·분석 기술지침, A-10-2015)을 기본으로 하였고(안전보건공단, 2015) NIOSH Method 7013(ALUMINUM and compounds, as Al)을 참고하여 진행하였다(NIOSH, 1994). 분석기기는 유도결합 플라즈마 방출 분광기(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometer; ICP-AES) 및 원자흡광 광도계법(atomic absorption spectrophotometer, flame)을 이용하였다. 일부 시료에 대해 두 분석방법을 병행하여 그 결과를 비교하였다.

총분진과 호흡성분진의 농도비를 계산하기 위하여 시료채취카드를 구성하여 동일한 공기중 농도의 병치 및 동시 평가를 시도하였다. 3대의 총분진 측정기 세트와 3대의 호흡성분진 측정기 세트를 한 박스에 넣어 유사한 공기질에 대한 평가를 시도하였다.

같은 카드 안에 광학입자계수기(Optical Particle Sizer Model 3330, TSI, MN)를 이용하여 분진 크기 분포를 실시간으로 측정하였다. 광학입자계수기의 공기

Table 2. General characteristics of survey workplace

Aluminum form	Site No.	Process	Description
Aluminum (soluble salt)	Site 1	Wastewater treatment	Aluminum sulfate input and wastewater treatment management
	Site 2	Wastewater treatment	Aluminum sulfate input and wastewater treatment management
Aluminum (metal dust)	Site 3	Cutting	Placing aluminum pipe into a cutting machine and cutting it
	Site 4	Grinding	Manual polishing of aluminum structures
	Site 5	Cutting	Putting aluminum sash into a cutting machine and process/assemble it after cutting
Aluminum (welding fume)	Site 6	Die casting	Collecting and managing products formed by injecting aluminum ingots (84-85%) into die casts
	Site 7	Casting	Producing alloy ingots by dissolving non-ferrous metals (containing about 0.8% aluminum)
	Site 8	Welding	Welding work using an ERCuAl-A1 welding rod containing 6-8.5% aluminum
Aluminum (pyro-powder)	Site 9	Powder painting	Spraying powdered paint to materials
	Site 10	Paint ixing	Mixing raw materials including aluminum powder
Aluminum oxide	Site 11	Polishing	Polishing the product surface with an abrasive (alumina)
	Site 12	Sanding	Automatic sanding with short balls containing 96.5% aluminum oxide

유입구는 박스 내 분진 측정기의 공기 유입구와 수평의 위치에 개구시켰다. 이 방법은 알루미늄 이외의 분진도 측정된다는 단점이 있다.

다양한 형태의 알루미늄 화합물(금속분진, 피로파우더, 용접흄, 가용성염, 알킬, 산화알루미늄)별로 2~3개 사업장을 선정하여 측정하였다(Table 2). 이때 각각의 알루미늄 화합물이 포함되도록 구성하였으며, 가용성염 및 알킬 화합물을 제외한 금속분진, 피로파우더, 용접흄, 산화알루미늄에 대해서는 총분진과 호흡성분진을 동시에 측정하여 노출기준 개정의 검토과정에서 활용하였다.

### 3. 노출기준 변경 타당성 검토

최근 3년간 알루미늄 및 그 화합물에 대한 우리나라 작업환경측정 실시현황을 파악하기 위해 한국산업안전보건공단에서 보유하고 있는 우리나라 작업환경측정 DB 중 개인정보 등 민감정보를 제외 한 2018년-2020년 자료를 제공받아 분석하였다. DB에서 알루미늄 형태(금속분진, 피로파우더, 용접흄, 가용성염, 알킬, 산화알루미늄), 측정업체 수, 측정시료 수, 노출 수준을 변수로 하여 자료를 추출하고 이에 대하여 노출기준 대비 10%, 50%, 100% 초과여부를 분석하였다.

알루미늄 형태(금속분진, 피로파우더, 용접흄, 가용성염, 알킬, 산화알루미늄)별 측정 및 분석 기술에 대한 문헌조사를 통해 노출기준의 변화시 검출한계(limit of detection, LOD)와 노출기준이 충분히 구별되는 수준인지 여부, 알루미늄 형태별 호흡성 분진의 비, 한국의 현실에서 실현 가능한 것인지에 대한 검토 고려하여 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 알루미늄의 제조 및 사용

알루미늄의 합금 및 연관제품 등의 생산에는 분말 형태로 가공된 알루미늄 분말이 많이 사용된다. 분말형의 알루미늄 화합물은 크기가 작아 호흡기 노출가능성이 클 뿐만 아니라 총분진 중 호흡성분진이 차지하는 비중이 커질 수 있다. 알루미늄 분말 용도에는 태양광 패널, 선풍 로션 및 경량 콘크리트와 같은 다양한 제품의 생산이 포함된다. 불꽃놀이와 폭발물 생산의 핵심 성분이기도 하다. 또한 수많은 페인트와 실런트에도 포함되어 있다. 알루미늄 분말은 발열 산화환원 반응(exothermic

oxidation-reduction reactions)을 생성하는 능력이 활용될 때 가장 인상적으로 사용된다. 혼합 금속 산화물을 알루미늄 분말과 혼합하면 현란하게 연소할 수 있고 짧은 시간에 많은 에너지를 생성할 수 있는 분말 화합물이 생성된다. 예를 들면 과염소산칼륨과 알루미늄 분말의 혼합물이 불꽃놀이에 사용된다. 두 화합물은 섬광과 폭발을 일으키는 격렬한 반응을 보인다. 분말 형태를 사용하는 폭발물은 취급하기에 훨씬 안전하기 때문에 불꽃놀이에 다른 금속보다 알루미늄을 사용한다. 로켓 연료도 알루미늄 분말을 사용하여 생산된다. 많은 경우 고체 로켓 연료는 일반적으로 원하는 종류의 반응을 생성하는 다른 화학 물질과 혼합된 알루미늄이다. 액체 로켓 연료에도 추가할 수 있다. 알루미늄 분말은 또한 야금(metallurgy)의 핵심 구성 요소로 사용된다. 이 방법에서 기본적 가공방법은 용융 금속에 분말을 첨가하는 것이다(Davis, 1993).

알루미늄 분말은 구형, 회전타원체, 과립형, 플레이크의 4가지 형태로 구분할 수 있다. 분무기(atomizer)를 사용하면 구형(spherical) 또는 회전타원체 형태(spheroidal)의 분말을 생산할 수 있다. 파쇄하여 분말을 생산하는 경우 과립형(granular)의 단계를 지나서 플레이크(flake) 형태로 미분된다. 구형 분말은 플레이크 형태에 비해 화학반응을 일으키는 에너지가 더 크게 필요하므로 플레이크 형태가 불꽃놀이 등의 목적에 많이 사용된다. 구형 분말을 미분하여 플레이크 형태로 만드는 것이 흔히 이용되는 최근의 알루미늄 분말 제조 방법이다. 알루미늄 분진의 폭발성은 입자크기의 함수이다. 200 메쉬(mesh) 이상의 크기에서만 산소 및 점화원이 있을 경우 분진운(dust clouds)이 폭발할 수 있다(Davis, 1993).

### 2. 주요 국가의 알루미늄 관련 노출기준

우리나라 노출기준은 1986년 노동부고시 제86-45호로 제정되었다. 그 이후 수차례 개정되었는데 알루미늄 노출기준은 2002년(노동부고시 제2002-2호)에 개정되었고, 그 기준이 현재까지 변화 없이 사용되고 있다. 현재는 고용노동부 고시 제2020-48호(2020.1.14)에 알루미늄 가용성 염, 금속분진, 알킬, 용접 흄, 피로파우더, 알파-알루미늄(산화알루미늄) 6개로 구분하고 있다.

미국의 직업적 노출기준(occupational exposure limit, OEL)은 크게 3가지로 구분된다. 미국 직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration,

OSHA)의 허용노출기준(Permissible Exposure Limits, PELs)에서 알루미늄은 크게 산화알루미늄과 알루미늄 금속으로 구분되며 총분진은 15 mg/m<sup>3</sup>, 호흡성분진은 5 mg/m<sup>3</sup>로 규정하고 있다(OSHA, 2020). 다만 우리나라 노출기준 상 불용성 화합물은 알루미늄 금속으로 적용이 가능하다. 미국 직업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 권장노출기준(Recommended Exposure Limits, RELs)에서 알루미늄은 알루미늄, 알루미늄(가용성 염) 및 알루미늄(피로파우더 및 용접흡)으로 구분되면 산화알루미늄은 노출기준이 제정되어 있지 않다(NIOSH, 2007). 3가지로 구분하고는 있지만 세부적으로는 수용성염, 알킬, 피로파우더 및 용접흡이 제시되어 포함되어 있다. 알루미늄, 알루미늄 금속, 알루미늄 파우더, 원소 알루미늄은 총분진 10 mg/m<sup>3</sup>, 호흡성 분진은 5 mg/m<sup>3</sup>로 규정되어 있으며 알루미늄(가용성 염과 알킬)은 2 mg/m<sup>3</sup>, 알루미늄(피로파우더 및 용접흡)은 5 mg/m<sup>3</sup>로 제시되어 있다. 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) 서한도(Threshold Limit Values, TLVs)에서 알루미늄은 알루미늄 금속과 불용성화합물로만 규정하고 있으며 호흡성분진으로 1 mg/m<sup>3</sup>을 제시하고 있다(ACGIH, 2020). 발암성 구분은 A4로 되어 있으며 임상증상으로 진폐, 하기도 자극(lower respiratory tract irritation) 및 신경독성으로 표기하고 있다. 다만 우리나라 알루미늄 노출기준에 제시되어 있는 금속분진, 피로파우더, 용접흡, 산화알루미늄 및 불용성 화합물은 적용이 가능하다.

영국 보건안전청(Health & Safety Executive, HSE)의 작업장 노출기준(Workplace Exposure Limit, WELs)은 The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002와 연계되어 있다. 알루미늄의 노출기준은 크게 알루미늄 알킬화합물, 알루미늄 금속, 산화알루미늄 및 알루미늄 가용성염으로 구분하고 있다. 알루미늄 알킬화합물과 알루미늄 가용성염은 2 mg/m<sup>3</sup>로, 알루미늄 금속과 산화알루미늄은 흡입성 분진 10 mg/m<sup>3</sup>, 호흡성 분진은 4 mg/m<sup>3</sup>로 규정되어 있다. 발암성 구분 및 피부흡수 표시는 되어 있지 않다(HSE, 2005).

일본의 경우 직업적 노출기준은 2개로 구분되어 있다. 일본직업보건학회(Japan Society for Occupational Health, JSOH)의 직업적 권장노출기준(Recommendation of occupational exposure limits, ROELs)에서 제시하고 있는 알루미늄에 대한 기준은 다른 국가와 차이가

있다. 일본은 분진을 별도의 기준으로 구분하고 있으며 그 종류는 3가지로 구분된다. 알루미늄의 경우 1종 분진에 해당되며 호흡성분진은 0.5 mg/m<sup>3</sup>, 총분진은 2 mg/m<sup>3</sup>로 제시되어 다른 국가에 비해 가장 엄격하게 관리하고 있다.

Deutsche Forschungsgemeinschaft의 알루미늄에 대한 최대허용농도(Maximum Concentrations, MAKs)는 흡입성입자(4 mg/m<sup>3</sup>)와 호흡성입자(1.5 mg/m<sup>3</sup>)로 구분하고 그 수준이 마련되어 있으며 물질은 알루미늄, 산화알루미늄 및 분진을 포함한 수산화알루미늄을 통합하여 제시하고 있다. 특히 임신위험그룹을 D로 표기하고 있었다(DF, 2020).

프랑스 INRS(National Research and Safety Institute for the Prevention of Work Accidents and Occupational Disease)에서는 알루미늄에 대한 비규제 한계치(Les valeurs limites d'exposition professionnelle, VLEP)를 살펴보면 크게 알루미늄 알킬화합물, 알루미늄 용접흡, 알루미늄 금속, 알루미늄 분말, 알루미늄 가용성염으로 구분된다. 알루미늄 알킬화합물과 알루미늄 가용성 염은 2 mg/m<sup>3</sup>로, 알루미늄 용접흡과 알루미늄 분말은 5 mg/m<sup>3</sup>, 알루미늄 금속은 10 mg/m<sup>3</sup>으로 설정되어 있다(INRS, 2020).

알루미늄 화합물의 형태별로 보면 알루미늄 가용성염의 경우 한국을 포함한 15개 국가에서만 노출기준을 채택하고 있고 대부분 2 mg/m<sup>3</sup>로 채택하고 있다. 알루미늄(알킬)에 대하여 노출기준을 유지하고 있는 국가는 14개국으로 확인되었다. Austria를 제외한 모든 국가에서는 우리나라와 동일하게 2 mg/m<sup>3</sup>를 채택하고 있다. 알루미늄(금속)에 대한 노출기준은 입자 크기에 따라 흡입성, 총분진 및 호흡성 등으로 다양하게 구분하고 있었다. 우리나라는 입자 크기 구분 없이 알루미늄(금속)에 대한 노출기준이 10 mg/m<sup>3</sup>으로 규정되어 있는데, 호주, 뉴질랜드, 싱가포르가 우리나라와 동일하다. 한편, 단시간노출기준(STEL)은 국가는 오스트리아, 덴마크만 설정하고 있었다. 오스트리아, 독일, 덴마크, 프랑스, 중국은 흡입성 및 호흡성입자로 구분하여 노출기준을 규정하고 있었고, 캐나다-온타리오주, 덴마크, 프랑스, 헝가리, 아일랜드, 스페인, 스위스, 영국은 흡입성/호흡성 aerosol로 구분하고 있었다. 일본, 미국 OSHA 및 NIOSH는 총분진과 호흡성분진에 대하여 각각 노출기준이 설정되었다. 대부분의 국가에서 미국 ACGIH TLV의 기준(aluminum metal and insoluble compounds, respirable particulate matter; 1 mg/m<sup>3</sup>)보다 완화된 노출기준을 설정하고 있는 것으로 확인되었

**Table 3.** Occupational exposure limits for aluminum and its compounds

Nation	TWA(mg/m <sup>3</sup> )	STEL(mg/m <sup>3</sup> )	Notation
<b>Aluminum soluble salts [7429-90-5]</b>			
Denmark	1	2	Calculated as Al
Finland	2	-	Calculated as Al
Norway	2	-	As Al
Sweden	1	-	Total dust
Switzerland	2	-	Inhalable
New Zealand	5	-	-
South Korea, Australiz, Belgium, Canada - Québec, France, Ireland, Singapore, Spain, United Kingdom	2	-	-
<b>Aluminum alkyl compounds [7429-90-5]</b>			
Austria	10 (1)	20 (1)(3)	(1) Inhalable fraction (2) Respirable fraction (3) 60-minutes average value
	5 (2)	10 (2)(3)	
Denmark	2	4	-
South Korea, Australia, Belgium, Canada - Québec, France, Ireland, New Zealand, Norway, Singapore, Spain	2	-	-
<b>Aluminum metal dust [7429-90-5]</b>			
Austria	10 (1)	20 (1)(3)	(1) Inhalable fraction (2) Respirable fraction (3) 60-minutes average value
	5 (2)	10 (2)(3)	
Canada-Ontario	1	-	Respirable aerosol and insoluble compounds
Denmark	5	10	Inhalable aerosol
	2	4	Respirable aerosol
France	10	-	Inhalable aerosol
	5	-	Respirable aerosol
Germany (DFG)	4	-	Inhalable aerosol
	1,5	-	Respirable aerosol
Hungary	6	-	Respirable aerosol
Ireland	1	-	Respirable fraction
Japan(JSOH)	0,5 (1)	-	(1) Respirable dust (2) Total dust: Total dust comprises particles with a flow speed of 50 to 80 cm/sec at the entry of a particle sampler.
	2 (2)	-	
Latvia	2	-	-
People's Republic of China	3	-	Inhalable fraction
South Korea, Australia, Canada-Québec, New Zealand, Singapore	10	-	-
Spain	10	-	Inhalable aerosol
	5	-	Respirable aerosol
Switzerland	3	-	Respirable aerosol
USA-NIOSH	10 (1)	-	(1) Total dust (2) Respirable fraction, pyro pwders, welding fumes (3) Soluble salts, alkyls
	5 (2)	-	
	2 (3)	-	

USA-OSHA	15	-	Total dust
	5	-	Respirable dust
United Kingdom	10	-	Inhalable aerosol
	4	-	Respirable aerosol
Denmark	5	10	Calculated as AI
<b>Aluminum welding fume [7429-90-5]</b>			
Denmark	5	10	Calculated as AI
Finland	1,5	-	Calculated as AI
South Korea, Australia, Canada - Quebec, France, New Zealand, Norway, Singapore, Spain	5	-	-
<b>Aluminum alpha-alumina [1344-28-1]</b>			
Australia	10	-	(1) This value is for inhalable dust containing no asbestos and < 1% crystalline silica.
Austria	10 (1)	20 (1)(3)	(1) inhalable fraction
	5 (2)	10 (2)(3)	(2) Respirable fraction (3) 60-minutes average value
Denmark	5	10	Inhalable aerosol
	2	4	Respirable aerosol
France	10	-	Respirable aerosol
Germany (DFG)	4	-	Inhalable aerosol
	1,5	-	Respirable aerosol
Hungary	6	-	Respirable aerosol
Ireland	10	-	Inhalable aerosol
	4	-	Respirable aerosol
Latvia	6	-	-
New Zealand	10	-	The value vor inhalable dust containing no asbestos and less than 1% free silica.
Poland	2,5	16	Aluminium trioxide as AI fume, total dust fume
	1,2	-	Respirable aerosol
Romania	2 (1)	5 (1)(2)	(1) Aerosol (2) 15 minutes average value
South Korea, Canada - Québec, Singapore, Norway	10	-	-
Spain	10	-	Inhalable aerosol
Sweden	5	-	Inhalable aerosol
	2	-	Respirable aerosol
Switzerland	3	-	Respirable aerosol
USA - OSHA	15	-	Total dust
	5	-	Inhalable aerosol
United Kingdom	10	-	Inhalable aerosol
	4	-	Respirable aerosol
<b>Aluminum pyro-powder(pyrophoric) [7429-90-5]</b>			
Germany (DFG)	4	-	Inhalable fraction
	1,5	-	Respirable fraction
Poland	2,5	-	Fume, total dust
	1,2	-	Fume, respirable dust
South Korea, Autralia, Canada - Québec, New Zealand, Norway	5	-	-

다. 알루미늄(용접 흄)의 노출기준을 보유하고 있는 국가는 우리나라를 포함하여 10개 국가로 확인되었다. 알루미늄(피로파우더)의 노출기준이 설정되어 있는 국가는 우리나라를 포함하여 7개 국가로 다른 물질에 비해 설정된 국가가 많이 존재하지는 않았다(Table 3).

### 3. 알루미늄 화합물에 대한 독성학적 고찰

현재까지 알루미늄 노출의 가장 많이 연구된 영향 중 하나는 언어 장애, 신경정신병적 이상 및 다초점 근간 대성 근경련을 포함하는 투석 뇌병증이다(Health Canada, 1998). 다른 더 미묘한 증상으로는 “테트라하이드로비오테린 대사 장애 및 여러 정신 운동 기능(예: 시각적 공간 인식 기억)의 이상”이 있으며, 이는 약간 상승된 혈청 알루미늄 수준( $59 \mu\text{g/L}$ )에서 발생하는 것으로 밝혀졌다. 또한, 투석 치매 환자에서 대뇌 피질을 포함한 많은 조직에서 알루미늄 수치가 상승한 것으로 나타났다. 투석액을 준비하는 데 사용되는 물의 알루미늄 수준과 치매 발병률 사이의 상관관계가 제안되었다. 그러나 신경 독성의 메커니즘은 확립되지 않았다(Health Canada, 1998). 알루미늄에 대한 신경독성을 확인하기 위해 수많은 연구가 수행되었다. 그러나 단일 통합 메커니즘이 확인되지 않았으며 대신 여러 메커니즘이 관련되었을 가능성이 있다(ATSDR, 2008). 쥐와 생쥐의 신경학적 발달과 신경행동학적 변화, 다른 종의 신경퇴행성 병리학적 변화에 대한 연구가 수행되었지만 노출 방법과 사용된 종의 다양성으로 인해 주요 작용 부위를 결정하기가 어렵다.

지난 50년 동안 의학 문헌은 알루미늄 분말의 생산 또는 사용과 주로 관련된 알루미늄 또는 산화알루미늄 분진으로 인한 진폐증이 있었지만 대부분 임상적으로 경미한 사례를 보였(Riihimaki & Aitio, 2012). 그러나 알루미늄 진폐증 발생은 시간이 지남에 따라 개선된 작업 조건(즉, 알루미늄 분진 노출 감소)의 결과로 급격히 감소했다. 폐의 폐활량 변화, 폐포 염증, 천식 및 기도 과민반응을 포함하여 알루미늄 흡입에 대한 여러 평가변수가 제안되었다(Riihimaki & Aitio, 2012). 이 연구에 따르면 알루미늄 작업자의 호흡기 부작용이 보고되었다. 그러나 알루미늄 작업자에서 문서화된 호흡기 문제는 일반적으로 작업장에서 알루미늄 이외의 독성 화학물질과 관련이 있다(Krewski et al., 2007). 역학 연구에 따르면 알루미늄 생산 근로자의 폐암 발병 위험이 증가했지만 이는 알루미늄 자체보다는 PAH(다

환성방향족탄화수소)에 노출되었기 때문이다(Krewski et al., 2007). 흡입 흡수 및 독성 메커니즘은 잘 알려져 있지 않지만 호흡기에 침착된 더 큰 알루미늄 함유 입자는 섬모 작용에 의해 위장관으로 제거된다는 가설이 제안되었다. 더 작은 알루미늄 입자의 경우 알루미늄이 폐를 관통하여 혈류로 용해되는 것으로 추측된다. ATSDR(2008)은 알루미늄이 다른 복합체를 쉽게 형성하기 때문에 알루미늄 분진 및 흄의 흡입으로 인한 특정 독성 메커니즘을 식별하기 어렵다고 정리했다.

알루미늄은 국제 암 연구 기관(IARC)에서 발암 물질로 분류되지 않았다(Krewski et al., 2007). 그러나 “알루미늄 생산(aluminum production)”은 인간에게 Group 1 발암성으로 분류되었다(IARC, 1998). 알루미늄 생산 근로자는 주로 다환 방향족 탄화수소(PAHs)에 노출된다. 이 산업 및 관련 탄소전극 제조산업의 직업적 노출은 PAH와 관련하여 가장 집중적으로 모니터링되었다. 이러한 직업 환경에서 다른 잠재적 노출은 다음과 같다. 이산화황 및 불화물; 불화알루미늄; 섬유상 사불화알루미늄 나트륨 입자; 형석; 알루미늄; 일산화탄소; 이산화탄소; 바나듐, 크롬 및 니켈과 같은 다양한 미량 금속; 석면; 극 고온; 및 높은 정적 자기장”(IARC, 1998).

### 4. 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사

사업장 1과 2는 공장내 폐수처리장으로 황산알루미늄을 직접 투입할 때와 폐수처리를 관리하는 과정에서 알루미늄이 가용성염으로 발생할 가능성이 있어 측정을 실시하였다. 사업장1과 2에서 호흡성분진이 미미한 차이로 높게 나왔으나 사업장1,2의 호흡성 결과가 가용성염 노출기준  $2 \text{ mg/m}^3$ 와 비교한다면 매우 낮아 호흡성 측정결과와 총분진 결과의 수치적 차이를 구별짓기 어려웠다.

금속분진 형태의 알루미늄을 사용하는 3개의 사업장에서 극단값을 제외한 평균을 요약하면 사업장 3은  $0.0008 \text{ mg/m}^3$ , 사업장 3는  $0.0004 \text{ mg/m}^3$ , 사업장 4는  $0.0003 \text{ mg/m}^3$ 으로 호흡성 결과와 비교해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

용접흡이 발생하는 3개 사업장 중 사업장 6을 제외한 2곳의 공정에서 측정한 6개의 호흡성 결과는 평균  $0.0096 \text{ mg/m}^3$ , 총분진 5개의 평균은  $0.0115 \text{ mg/m}^3$ 으로 평가되었다. 호흡성 분진 결과 중 극단값인  $0.0496 \text{ mg/m}^3$ 이 나타난 이유는 밝혀지지 않았다. 이 극단값을 제외한다면 평균  $0.0017 \text{ mg/m}^3$ 로 낮아진다.



피로파우더를 사용한다고 알려진 사업장 9는 분말 도료(알루미늄 1~20% 함유)를 스프레이로 분사하여 자재에 도포하는 공정이었다. 분말 도료에 함유된 알루미늄이 피로파우더 형태임이 MSDS등으로 확인되지 않았으나 상당수 측정기관에서 분체도료의 알루미늄을 피로파우더로 구분하여 측정하였던 것으로 추측된다. 그 결과는 호흡성은 평균 0.0019 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었고, 총분진의 평균은 0.0502 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었다. 사업장 10은 알루미늄 파우더를 첨가하여 믹싱하는 공정이다. 믹서 1에서 호흡성 평균 0.0001 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었고, 총분진 평균은 0.0014 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었다. 믹서 2에서 호흡성 평균 0.0004 mg/m<sup>3</sup>, 0.0017 mg/m<sup>3</sup>로 평가되었다.

요약하면, 알루미늄 실태조사를 호흡성과 총분진을 구별하여 측정한 결과 알루미늄 형태 구분없이 호흡성은 불검출-0.0024 mg/m<sup>3</sup>이었으며, 극단값을 제외하지 않더라도 총분진 평균결과는 불검출-0.0776 mg/m<sup>3</sup>로 국내 알루미늄 노출기준 중 가장 낮은 알루미늄(가용성 염) 2 mg/m<sup>3</sup>과 비교하더라도 낮은 수준으로 평가되었다. 실태조사 사업장 중 일부 사업장 4곳에서 ICP와 AA의 분석결과의 차이를 비교하였는데 슬라이드 'AA와 ICP 평균비교'에서처럼 3곳에서 AA 분석결과가 불검출, 검출한계 미만으로 낮게 평가되었다. 다만, 1곳만 수치상 결과값이 나왔으며, ICP결과 보다 높았다. 이 결과만을 비교했을 때 ICP로의 분석이 다소 재현성이 높은 것으로 추측된다.

5. 국내외 알루미늄 노출 수준

알루미늄 화합물에 대한 직업적 노출은 알루미늄 함유 분진의 흡입과 관련되어 있다. 그러나 이러한 작업자는 알루미늄만 포함하고 다른 물질이 없는 먼지에 노출되는 경우가 거의 없다. 따라서 노출에는 일반적으로 알루미늄 함량 외에 미세 입자 및 기타 독성 화학 물질의 혼합물이 포함된다. 예를 들어, 알루미늄 환원 작업자 중 방광암의 증가를 조사한 역학 연구에서 폴타르 피치의 휘발성 PAH가 실제로 원인 물질임을 발견되었다(Theriault et al., 1984). 금속 분진, 미세 입자, 독성 화학 물질(PAH 포함) 및 담배 연기를 포함한 다양한 물질 간의 상승 효과는 모두 알루미늄과 관련된 많은 산업 공정에서 작업자에게 나타나는 암 등의 원인이 될 수 있다.

국외에서 광부들은 또한 규폐증 예방제로 사용되는 McIntyre 분말 흡입을 통해 직업적으로 알루미늄에 노출되었다(Rondeau, 2002). 이 분말은 폐에 보호 코팅을

제공하여 광부 및 기타 작업자가 실리카 분진에 잠재적으로 노출되는 규폐증을 예방하는 데 도움이 되는 것으로 생각되었다. 이것은 15%의 원소 알루미늄과 85%의 산화 알루미늄으로 구성되어 있다(Rifat, 1990). McIntyre 분말을 투여하기 위해 작업자가 근무하기 전에 10분 동안 먼지를 흡입하는 가압 파이프를 통해 밀폐된 공간으로 부여된다(IDSP, 1992, Rifat, 1990). 이 관행은 캐나다, 미국, 멕시코, 칠레, 벨기에 콩고 및 서호주에서 널리 사용되었다(RCI, 2015). 캐나다에서는 매킨타이어 분말이 1944년부터 1979년까지 금과 우라늄 광부에게 제공되었다(Rifat, 1990, Beach et al., 2001).

국내의 경우 Kim et al.(2007)은 알루미늄 제조사업장을 방문하여 크기별 농도에 대한 상세한 조사를 하였다. 알루미늄 피 생산업체, 알루미늄 주조물 생산업체, 그리고 다이캐스팅 주물 생산업체를 대상으로 노출평가를 실시하였다. 다이캐스팅 용해로의 경우 분진 크기분포에서 흙 크기가 50% 이상을 차지하였고, 분진 중 알루미늄 성분의 비율이 9.9-17.9%를 차지하였다고 보고하였다. 알루미늄 용해로의 경우도 흙 크기의 비율이 60-60%를 차지하였고, 총분진 중 알루미늄의 비율은 5.0%-9.9% 범위로 나타났다. 알루미늄 농도는 다이캐스팅 용해로에서 0.068~0.512 mg/m<sup>3</sup>으로, 금속 용해로에서는 2.021~5.315 mg/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

6. 노출기준 변경 타당성 검토

1) 금속분진

알루미늄 금속분진은 알루미늄이나 그 합금으로 만든 판, 강, 관 등을 기계적으로 가공하는 과정에서 생성되며 큰 크기의 입자가 생성된 것으로 추정된다. 실태조사에서 노출농도가 낮은 편이었는데 생성된 입자가 커서 침강했기 때문으로 추정된다. 산화알루미늄 피막이 있는 쪽이 체내 알루미늄 용출을 줄일 수 있다.

2) 피로파우더

피로파우더는 건조 알루미늄 미세분말을 지칭하는 것으로 통용된다. Kraus et al.(2000)도 논문에서 “finely stamped, non-greased aluminum powder”라고 정의하였다. 여기서 미세함의 범위는 폭발성을 나타내는 200 메쉬 이하의 크기(74 μm)에 적용하는 것이 적절하다고 생각된다. 따라서 피로파우더의 노출기준을 적용하는데 혼돈이 없도록 “200 메쉬 크기(74 μm) 또는 그보다 작은 건조 알루미늄 분말”이라고 정확하게 정의해주는 것이 필요

해 보인다. 그 이상의 크기는 금속분진으로 분류될 수 있다.

### 3) 용접흙

알루미늄 용접흙의 경우 알루미늄이나 그 합금을 용접하는 과정에 생성되지만 Kim et al.(2007)의 연구에서 보고되었듯이 알루미늄 피를 만들거나 주물 공정에서 생성되는 흙의 크기가 작고 농도가 높아 용접흙 대신 흙을 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. 알루미늄 합금의 흙인 경우 다른 금속의 함량이 높아지면 알루미늄에만 호흡성분진 측정을 적용하는 경우 다른 금속은 총분진으로 측정해야 해서 근로자가 2개의 시료측정기를 착용해야하는 문제가 생길 수 있다.

### 4) 산화알루미늄

산화알루미늄이 금속 알루미늄과 다른 독성기전을 가지지 않고, 시료 분석방법 상 약간의 차이가 있지만 최종적으로는 알루미늄으로 분석하기 때문에 알루미늄과 같은 그룹으로 묶어서 관리하는 것에 무리가 없다고 생각된다. 최근에는 나노물질 크기로 사용되는 경우가 많으므로 크기에 있어 일부 공정에서는 호흡성분진으로 관리하는 것이 바람직하다.

### 5) 불용성 화합물

불용성 알루미늄 화합물은 범위가 지나치게 포괄적이다. 알루미늄은 규소 다음으로 지구에 많은 원소이기 때문에 장석, 운모, 고령토, 에메랄드 등의 광석에 다량 함유되어 있다. 알루미늄의 야금도 보크사이트와 같은 광석에서 추출하여 이루어진다. 불산알루미늄처럼 독성이 더 강한 원소와 결합되는 경우 그 원소에 맞는 기준을 적용하는 것이 더 적절하다. 기타 알루미늄 광석의 분말에 노출되는 경우 일반분진으로 취급하여도 무방할 것으로 예상된다.

### 6) 가용성염

가용성염은 백반(alum)처럼 식품용으로 사용되는 등 독성이 약한 편이고, 폐수처리 등에서 사용되는 가용성염은 물에 녹여서 사용하는 경우가 많으므로 노출가능성이 낮은 편이다. 독성자료의 경우 독성을 보고한 경우와 독성이 발견되지 않은 경우를 보고한 논문들이 혼재한다. ACGIH가 노출기준에서 제외했듯이 노출기준에서 제외하더라도 직업적 노출에서 오는 위험성이 크지 않을 것으로 추정된다.

### 7) 알킬

알킬 알루미늄은 알킬기( $R=C_nH_{2n+1}$ )와 알루미늄의 화합물(또는 + 할로젠 원소(X))의 화합물을 말하며, 일종의 유기금속 화합물이다. 종류로는 트리에틸 알루미늄(TEA)  $[(C_2H_5)_3Al]$ , 트리이소부틸 알루미늄  $[(C_4H_9)_3Al]$ , 디에틸 알루미늄 클로라이드  $[(C_2H_5)_2AlCl]$ , 트리메틸 알루미늄  $[(CH_3)_3Al]$ 을 들 수 있다. 탄소수가 4까지는 양의 대소에 무관하게 자연발화, 탄소수가 5 이상인 것은 점화하지 않으면 연소하지 않는다.

액상이고 위험물3류(자기발화성물질)로 분류된다. 금속성 물질이고 공기와 접촉하면 자연발화할 수 있기 때문에 보관시에도 불활성 기체를 봉입한다. 따라서 취급 과정에서 노출가능성이 매우 낮고, 과거 작업환경측정 결과를 보더라도 노출수준이 대부분 노출기준의 10% 이하로 매우 낮기 때문에 노출기준을 설정하는 것에서 얻는 이득이 크지 않을 것으로 판단된다.

### 8) 노출기준 개정안 고려사항

알루미늄 세분류별 특징 이외에 고려할 사항들은 다음과 같다. 알루미늄 합금이 사용되는 사업장에 대한 노출평가에서 알루미늄에 대해 호흡성분진을 적용한 노출기준을 적용하는 경우에 합금에 포함된 다른 금속에 대해 호흡성분진을 적용한 노출기준이 적용되지 않는 경우에는 동시에 2개 이상의 시료를 채취해야 하는 경우가 발생한다. 또한, 노출기준이 낮아지는 경우 현재 사용하는 분석방법이 낮아진 노출기준의 범위를 충분히 분석가능한지 검토할 필요가 있다.

## 7. 알루미늄 노출기준 개정안

본 연구진이 제안하는 개정안 3가지는 Table 4와 같이 요약될 수 있다. 알루미늄 용접흙 대신 흙을 적용하는 것이 타당해 보인다.

개정안 #1은 독성학적인 근거가 취약한 가용성염과 알킬을 제외하고 나머지는 현행 노출기준을 유지하는 것이다. 현행 노출기준을 유지하는 근거는 실태조사 결과 총분진과 호흡성분진의 비율이 약 10:1이기 때문에 현행 노출기준을 유지해도 ACGIH TLV와 호환가능하다는 것이다. 불용성 화합물의 경우 알루미늄이 지구상에서 규소 다음으로 풍부한 원소이기 때문에 불용성 화합물에 해당되는 대부분의 화합물이 일반분진에 해당하는 암석의 형태이며, 불화알루미늄처럼 더 독성이 강한 원소와 결합하는 경우 그 원소의 노출기준을 적용받을

**Table 4.** Proposed occupational exposure limits for aluminum compounds

Aluminum form	Occupational exposure limit(mg/m <sup>3</sup> )					Notation
	MoEL	ACGIH	Proposal #1	Proposal #2	Proposal #3	
Metal dust	10	1(R)	10		10	
Pyro-powder	5	1(R)	10		1(R)	R
Fume	5	1(R)	10	1(R)	1(R)	R
Aluminum oxide	10	1(R)	10		10	
Insoluble compounds	-	1(R)	10		10	As metal dust
Soluble salts	2	-	-	-	-	Lack of toxicity data and low possibility of exposure
Alkyl	2	-	-	-	-	

R: Respirable dust

Metal dust: Particulate matter generated during the processing of metal aluminum and its alloys.

Pyro-powder: dry aluminum powder of 200 mesh size (74 μm) or smaller.

Fume: Particulate matter generated during the process of processing aluminum above its melting point, such as welding and die casting.

Soluble salt: Aluminum compound used by dissolving in water.

Alkyl: Organic aluminum combined with an alkyl group, etc.

Aluminum oxide: See alumina.

Insoluble Compounds: Other insoluble aluminum compounds not classified as defined above.

수 있기 때문이다.

개정안 #2는 개정안 #1을 승계하면서 금속분진, 피로파우더, 용접흄, 산화알루미늄의 노출기준을 통합하여 총분진 10 mg/m<sup>3</sup>, 호흡성분진의 경우 1 mg/m<sup>3</sup>의 이중 노출기준을 적용하는 것이다. 10:1의 비율에 대한 근거는 개정안 #1에서 제시하였듯이 실태조사 결과이다. 미국 OSHA나 영국 HSE의 경우 두 기준을 동시에 제시하고 있다. 우리나라에서도 산화아연의 경우 ‘산화아연 분진’ 및 ‘산화아연’이라는 이름으로 호흡성분진과 총분진을 구분하여 노출기준을 제시하고 있다. 이 개정안의 장점은 산업위생전문가가 상황에 따라 적용할 노출기준을 선택할 수 있는 결정권이 있다는 것이다.

개정안 #3은 호흡성분진의 비율이 상대적으로 높을 것으로 추정되는 두 형태인 피로파우더와 흄에 호흡성분진의 노출기준을 적용하는 것이다. 구리에 대한 노출기준이 ‘구리(분진 및 미스트)’와 ‘구리(흄)’으로 구분되어 있고 각 노출기준의 비가 10:1인 것에서 보듯이 한국은 같은 유해물질에 대해 화학물질의 형태에 따라 다른 노출기준을 적용해온 전례가 존재한다.

### 8. 제안된 노출기준 적용성 검토

2018년부터 2020년까지 고용노동부에 보고된 작업환경측정자료를 근거로 노출기준 개정안을 적용했을 때 노출기준을 초과할 것으로 추정되는 측정건수를 계산하

였다. 현재 상황에서 노출기준 10% 미만인 경우가 대부분이고, 노출기준의 50~100%가 14건, 노출기준을 초과한 건수가 2건으로 파악된 바 있다. 개정안 #1, #2, #3의 총분진 노출기준은 기존과 동일하거나 또는 완화된 측면이 있어서 노출기준 초과할 가능성이 없는 것으로 추정하였다. 호흡성분진은 기존 총분진 작업환경측정결과와 직접비교를 통해 추정하기가 힘들므로 본 연구의 실태조사 결과(총분진:호흡성분진=10:1)보다는 좀 더 보수적인 판단을 위해 노출기준의 50%~100%와, 노출기준 초과를 포함하여 호흡성분진 노출기준 초과 건수를 추정하였다. 그 결과 개정안 #1은 모든 형태에 대해 초과 가능성이 없고, 호흡성분진을 적용하는 개정안 #2는 금속분진, 흄, 산화알루미늄에 대해 각각 2, 9, 3건의 초과 가능성이 있으며, 개정안 #3은 흄에 대해서만 9건의 초과가 예상되었다.

노출기준이 낮아지면서 시료 분석방법의 민감도에 대한 고려가 필요하다. 측정기관들이 금속분석을 위해서 AAS를 기본장비로 보유하고 있는 상황이다. 노출기준이 1 mg/m<sup>3</sup>으로 기존의 1/10로 낮아지는 경우 분석이 어려워질 수 있다. 본 연구에서 사용한 두 분석방법의 검출한계는 AAS가 2.486 μg/sample이었고 ICP가 0.068 μg/sample이었다. 최소 6시간 동안 2.0 lpm으로 시료를 채취하는 경우 흡인되는 공기의 양은 720 리터이며, 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 10로 계산

할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 0.035 mg/m<sup>3</sup>이 되어 새로 제안되는 노출기준 1 mg/m<sup>3</sup>의 3.5% 이상 농도에 서는 문제없이 작동할 수 있다. 위험성평가에서 노출수 준을 구분하는 기준이 노출기준의 10%인 것을 감안하 면 새로운 노출기준이 적용되는 경우에도 AAS로 시료 를 분석하는 것에 문제가 없을 것으로 추정된다.

#### IV. 결 론

알루미늄은 세분류에 따라 전세계적으로 노출기준이 나라마다 상이한 유해인자 중 하나이다. 미국 ACGIH 가 2008년 노출기준을 가용성염과 알킬을 제외한 세분 류를 통합해 1(R) mg/m<sup>3</sup>으로 제시했지만 이 노출기준을 따르는 나라는 거의 없었다. 미국의 OSHA는 금속분진, 산화알루미늄, 불용성화합물에 공통적으로 15/5(R) mg/ m<sup>3</sup>으로 노출기준을 적용하고 있다. 일본 일본직업보건 학회: 은 금속분진에 대해 2/0.5(R) mg/m<sup>3</sup>으로 노출기 준 제시하여 가장 엄격한 관리를 제안하고 있다.

알루미늄의 독성에 대한 자료는 두드러지거나 일관된 것을 찾기 어렵다. ACGIH가 노출기준 설정의 근거로 고려한 내용들 중에는 알루미늄 및 알루미늄 화합물에 장기간 노출되어 40년 동안 1.6 mg/m<sup>3</sup>을 호흡하는 것과 동일한 신체 부담이 신경학적 영향의 유병률을 증가시 킬 수 있다는 연구도 포함된다. 동물실험에서 쥐에서 산화알루미늄을 사용한 만성 흡입 연구는 NOAEL(no observed adverse effect level)을 2.45 mg Al/m<sup>3</sup>으로 설정하였다. TLV의 설정근거는 진폐(pneumoconiosis), 하기도 자극(lower respiratory tract irritation), 신 경독성(neurotoxicity)이다. 알루미늄 노출된 근로자에 대한 역학 연구가 부족하고 대부분 폐기능을 위주로 조 사되었다.

국내 알루미늄 제조·취급 사업장 대상 노출 실태조 사에서 알킬을 제외한 5개 세분류의 알루미늄 취급사업 장 12개소를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 12 개소 사업장의 공기 중 알루미늄 농도는 평균 0.016 mg /m<sup>3</sup>이었고, 최대치는 0.0776 mg/m<sup>3</sup>이었다. 동일공정에 대하여 총분진 및 호흡성분진을 병치 및 동시 측정하였 을 때 알루미늄 총분진 질량농도의 12.1%가 호흡성분 진이었다. 광학입자계수기로 분진의 크기분포를 실시간 으로 측정하여 비교한 결과 용접흡 및 피로파우더 형태 의 알루미늄은 총분진의 48.1%가 호흡성분진이었지만, 광학입자계수기는 알루미늄을 포함한 모든 분진을 계수

한다는 한계가 있다. 알루미늄을 측정한 2018-2020년 작업환경측정결과에서 알루미늄의 형태가 오분류되어 보고된 측정건수가 많았으며(예를 들면 피로파우더의 경우 30.0%로 추정), 실태조사에서 확인한 MSDS 자료 에서도 피로파우더에 대한 오분류가 존재했다.

문헌검토 및 실태조사 결과를 바탕으로 아래와 같은 알루미늄 노출기준 개정안을 3가지 제시하였다.

- 개정안 #1: 가용성염과 알킬을 제외한 모든 형태에 대해 10 mg/m<sup>3</sup>을 노출기준으로 통일
- 개정안 #2: 가용성염과 알킬을 제외한 모든 형태에 대해 1(R) mg/m<sup>3</sup>을 노출기준으로 제시
- 개정안 #3: 가용성염과 알킬을 제외하고 피로파우더와 흡에 대해 1(R) mg/m<sup>3</sup>, 금속분진, 산화알루미늄, 불용성화합물에 대해 10 mg/m<sup>3</sup>을 노출기준으로 제시

실태조사에서 호흡성분진과 총분진의 비율이 약 1:10으로 분석되어 국내 기준과 ACGIH의 기준이 호환성이 있다고 판단되고, 알루미늄 주요 독성증상 중 하기도(lower respiratory track) 자극이 포함되어 호흡성분진만을 대상으로 하는 것은 표적기관을 협소하게 설정하는 것으로 판단되었다.

호흡성분진으로 변경하여 노출기준은 1/10로 낮추는 경우에도 기존의 금속 분석장비인 AAS를 그대로 쓸 수 있을 것으로 전망된다. 노출기준이 ACGIH와 같이 변경된다 하여도 노출기준을 초과할 사업장은 100개 미만으로 추정된다. 이와 같은 연구 과정을 통해 피로파우더와 같이 정의가 모호한 세분류를 정비하고, 이후 노출기준 개정 시 TLV Documentation에 해당되는 노출기준 설정근거 서류를 정리를 시작하는 기회로 활용하는 것이 바람직하다.

#### References

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for aluminum. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service. 2008
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values(TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure indices(BEIs). ACGIH, Cincinnati(OH); 2020.
- Beach JR, de Klerk NH, Fritschi L, Sim MR, Musk AW et al. Respiratory symptoms and lung function in

- bauxite miners. 2001  
 International archives of occupational and environmental health 74(7):489-494
- Chung EK. A review on chemical occupational exposure limits in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2007;17(2):K1-K6
- Davis JR. Aluminum and aluminum alloys. in ASM Specially Handbook, ASM International, Metal Park, Ohio. 1993
- Deutsche Forschungsgemeinschaft(DF). Maximum Concentrations. 2020.
- Health and Safety Executive(HSE). EH40/2005 Workplace exposure limits. 2020. p. 9 [Accessed 6 August 2020] Available from: <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf>
- Health Canada. Aluminum. 1998
- Industrial Disease Standard Panel(IDSP). Interim report to the worker's compensation board on aluminum. Industrial Disease
- Standards Panel. IDSP Report of Findings No. 9. 1992
- International Agency for Research on Cancer(IARC). Aluminum production (Group 1). 1998
- Japan Society for Occupational Health(JSOH). Occupational exposure limits. 2020. Available from <https://www.sanei.or.jp/english/oels/index.html>
- Jeong JY, Choi SJ, Kho YL, Kim PG. Extensive changes to occupational exposure limits in Korea. Regul Toxicol Pharmacol 2010;58:345-348. DOI:10.1016/j.yrtph.2010.08.006
- Kim KY, Kim YS, Lee CM, Sim IS. Study on application of exposure limit in terms of generation pattern of chemicals: Aluminium & Tin. Occupational Safety and Health Research Institute. 2007
- Korean Standard. KS D 6008 Aluminium alloy castings. 1993
- Korean Standard. KS D 6701 Aluminium and aluminium alloy sheets and plates, strips and coiled sheets. 2018
- Kraus T, Schaller KH, Angerer J et al. Aluminum dust-induced lung disease in the pyro-powder-producing industry: Detection by high-resolution computed tomography. Int Arch Occup Environ Health 2000;73(1):61-64
- Krewski D, Yokel RA, Nieboer E, Borchelt D, Cohen J et al. Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide. Toxicol Environ Health B Crit Rev. 2007;10 Suppl 1(Suppl 1): 1-269
- Kwon HY. Introduction to Metal Surface Treatment Engineering. Gold Press. 2004. p. 301-302
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational exposure limits of chemical substances and physical agents. MoEL Notice of Korea 2020-48, 2020
- National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Manual of Analytical Methods(NMAM), ALUMINUM and compounds, as Al, Fourth Edition, 8/15/94
- National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH pocket guide to chemical hazards. 2007. [Accessed 6 August 2020] Available from <https://www.cdc.gov/niosh>
- National Research and Safety Institute for the Prevention of Work Accidents and Occupational Disease(INRS). Les valeurs limites d'exposition professionnelle. 2020
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Permissible Exposure Limits/OSHA Annotated Table Z-1. [Accessed 6 August 2020] Available from <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/table-z-1.html>
- Recommendation of occupational exposure limits(2020-2021). The Japan Society for Occupational Health. Environ Occup Health Practice 2020; 2
- Davis JR. Aluminum and aluminum alloys. ASM International. 1993
- Rifat SL, Eastwood MR, Crapper McLachlan DR, Corey PN. Effect of exposure of miners to aluminium powder. The Lancet 1990;336(8724):1162-1165
- Riihimaki & Aitio. Occupational exposure to aluminum and its biomonitoring in perspective. Crit Rev Toxicol. 2012 Nov;42(10):827-53. doi: 10.3109/10408444.2012.725027
- Rondeau. A review of epidemiologic studies on aluminum and silica in relation to Alzheimer's disease and associated disorders. 2002 Apr-Jun;17(2):107-21. doi: 10.1515/reveh.2002.17.2.107
- Theriat G, Cordier S, Tremblay C, Gingras S. Bladder cancer in the aluminium industry. The Lancet 1984; 323(8383):947-950

<저자정보>

김승원(교수), 피영규(교수), 백용준(대표), 정태진(대표), 이혜실(차장)