



알루미늄 노출기준 개정을 위한 국내 실태조사 및 사회경제적 영향 분석 연구

OSHRI

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



연구보고서

알루미늄 노출기준 개정을 위한 국내 실태조사 및 사회경제적 영향 분석 연구

김승원·피영규·백용준·정태진

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



제 출 문

산업안전보건연구원장 귀하

본 보고서를 “알루미늄 노출기준 개정을 위한 국내 실태조사 및 사회경제적 영향 분석 연구”의 최종 보고서로 제출합니다.

2021년 10월

연구진

연구기관 : 계명대학교 산학협력단
연구책임자 : 김승원 (교수, 계명대학교)
연구원 : 피영규 (교수, 대구한의대학교)
연구원 : 백용준 (대표이사, 사랑작업환경연구소)
연구원 : 정태진 (대표이사, EHS프렌즈)

요약문

- 연구기간 2021년 5월 ~ 2021년 10월
- 핵심 단어 가용성염, 금속분진, 피로파우더, 알킬, 불용성화합물
- 연구과제명 알루미늄 노출기준 개정을 위한 국내 실태조사 및 사회경제적 영향 분석 연구

1. 연구배경

‘알루미늄 및 그 화합물’(이하 ‘알루미늄’)의 국내 노출기준은 현재 다섯 가지로 세분화(가용성염/금속분진/알킬/용접흄/피로파우더)되어있어 물질이 해당되는 분류에 따라 각기 다른 노출기준을 적용하여야 하나 각 세부분류별 정의·기준 부재로 현장 적용이 어려운 실정이다. 최근 산업안전보건법이 개정됨에 따라 알루미늄의 법적 규제 명칭은 하나로 통합되었으나 노출기준은 여전히 세부분류를 구분하여 적용하도록 되어있어 노출기준 개정 필요성이 대두되었다.

알루미늄의 국내 노출기준이 ACGIH TLV와 비교하여 현저히 높아 값의 적정성에 대한 재검토가 필요하다. 알루미늄은 지난 10년간 노출기준 개정이 이뤄지지 않은 유해인자이다.

2. 주요 연구내용

○ 국내외 알루미늄 노출기준 현황

국내외 주요 알루미늄 노출기준은 다음과 같이 다소 큰 차이를 보인다.

- 한국 고용노동부: 5가지로 세분화하고 각 분류별로 서로 다른 노출기준을 제시하고 있으며 불용성화합물에 대한 노출기준이 없음
- 미국 ACGIH: 2008년 가용성염과 알킬을 제외한 세분류를 통합해 1(R) mg Al/m³으로 노출기준 제안
- 미국 OSHA: 금속분진, 산화알루미늄, 불용성화합물에 공통적으로 중량분석 기준 15/5(R) mg/m³으로 노출기준 관리
- 일본 일본직업보건학회: 금속분진에 대해 2/0.5(R) mg/m³으로 노출기준 제시하여 가장 엄격한 관리 제안

○ 알루미늄 독성 자료 정리

동물실험 및 역학조사를 통해 밝혀져 국외에서 노출기준의 설정근거가 된 알루미늄의 독성은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 알루미늄 노출된 근로자에 대한 역학 연구가 부족하고 대부분 폐기능을 위주로 조사된 반면, 독성은 알루미늄 화합물의 경구 투여를 통한 동물 실험이나 수생동물 생태독성 자료가 대부분임
- 알루미늄 용접공 및 알루미늄 생산 작업자를 대상으로 경미한 신경독성을 조사한 연구에서 1.6 mg/m³ 수준에서 장기간(40년) 노출되면 유사한 증상이 나타날 수 있다고 추정함
- 쥐에서 산화알루미늄을 사용한 만성 흡입 연구는 NOAEL(no observed adverse effect level)을 2.45 mg Al/m³으로 설정
- 알루미늄 가용성 화합물에 대한 독성 정보는 경구 노출 실험이 일부 있지만 충분하지 않고, 알킬 화합물은 독성 정보가 부족할 뿐만 아니라 반응성이 매우 높아 주의 깊게 취급되기 때문에 노출 가능성이 낮음

- TLV의 설정근거: 진폐(pneumoconiosis), 하기도 자극(lower respiratory tract irritation), 신경독성(neurotoxicity)

○ 국내 알루미늄 제조·취급 사업장 대상 노출 실태조사

알킬을 제외한 5개 세분류의 알루미늄 취급사업장 12개소를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 12개소 사업장의 공기중 알루미늄 농도는 평균 0.016 mg/m³이었고, 최대치는 0.0776 mg/m³이었음
- 동일공정에 대하여 총분진 및 호흡성분진을 병치 및 동시 측정하였을 때 알루미늄 총분진 질량농도의 평균 12.1%가 호흡성분진이었음
- 광학입자계수기로 분진의 크기분포를 실시간으로 측정하여 비교한 결과 용접흄 및 피로파우더 형태의 알루미늄은 총분진의 평균 48.1%가 호흡성분진이었음(단, 광학입자계수기는 알루미늄을 포함한 모든 성분의 분진을 계수함)
- 알루미늄을 측정한 2018-2020년 작업환경측정결과에서 알루미늄의 형태가 오분류 되어 보고된 측정건수가 많았으며(예를 들면 피로파우더의 경우 30.0%로 추정), 실태조사에서 확인한 MSDS 자료에서도 피로파우더에 대한 오분류가 존재했음

○ 알루미늄 노출기준 개정안 제시

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

- 개정안 (1): 가용성염과 알킬을 제외한 모든 형태에 대해 10 mg/m³을 노출기준으로 통일

- 개정안 (2): 가용성염과 알킬을 제외한 모든 형태에 대해 1(R) mg/m³을 노출기준으로 제시
- 개정안 (3): 가용성염과 알킬을 제외하고 피로파우더와 흙에 대해 1(R) mg/m³, 금속분진, 산화알루미늄, 불용성화합물에 대해 10 mg/m³을 노출기준으로 제시
- 설정 근거: 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 판단됨

○ 노출기준 개정에 따른 사회경제성 평가

노출기준 개정안에 따른 모든 시나리오에서 B/C Ratio가 1보다 크거나, 편익만 존재하므로 사회·경제성 평가결과 충분히 타당한 것으로 평가되었다.

3. 연구 활용방안

- 정책적 기대효과: 국내외 노출기준 및 실태조사사업을 통해 수집한 정보를 바탕으로 알루미늄 노출기준을 개정하여 알루미늄 노출을 효율적으로 관리하는데 이바지함
- 기술적 기대효과: 알루미늄에 대한 국내외 노출기준 및 그 설정근거에 대해 정리된 자료를 활용할 수 있고, 실태조사사업을 통해 다양한 업종에 대해 수집된 최신 노출자료를 활용할 수 있음

4. 연락처

- 연구책임자 : 계명대학교 교수 김승원
- 연구상대역 : 산업안전보건연구원 산업화학연구실 차장 이혜실
 - ☎ 042) 869-0354
 - E-mail: loveseal@kosha.or.kr

목 차

I. 서론	1
1. 연구배경	3
1) 연구의 필요성	3
2) 연구목적	4
II. 연구방법	5
1. 연구내용 및 범위	7
2. 연구방법	9
1) 문헌조사	9
2) 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사	10
3) 노출기준 변경 타당성 검토	15
4) 알루미늄 노출기준 개정을 위한 사회성·경제성 평가	16
III. 연구결과	19
1. 문헌조사 및 자료 분석	21
1) 알루미늄의 특성 및 종류	21

목 차

2) 알루미늄의 사용 및 제조	32
3) 노출수준 고찰	44
4) 주요 국가의 알루미늄 관련 노출기준	49
5) 국내외 알루미늄 화학물질별 노출기준	58
6) 알루미늄에 대한 독성학적 고찰	69
2. 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사	82
1) 실태조사 대상 특성	82
2) 알루미늄 형태별 노출 수준	84
3) 일부 사업장 알루미늄 노출 수준	89
4) 알루미늄 형태별 분진 크기 분포	92
5) 소결	95
3. 노출기준 변경 타당성 검토	97
1) 알루미늄 화학물질별 정의 및 고려사항	97
2) 노출기준 개정안	100
3) 노출기준의 적용성 검토	103
4. 사회경제성 평가	105
1) 규제영향 분석 절차 및 내용	105
2) 규제영향 평가 결과	105

IV. 결론 및 제언	123
1. 요약	125
2. 제언	126
참고문헌	127
Abstract	131
부 록	135
1. 실태조사 사업장 개요	135
2. 알루미늄에 대한 Documentation of TLVs	161

표 목차

〈표 I-1〉 알루미늄에 대한 관련 법규정	3
〈표 II-1〉 연구내용 및 범위	7
〈표 III-1〉 알루미늄의 특성 및 용도	22
〈표 III-2〉 알루미늄 합금에 대한 국제규격	23
〈표 III-3〉 한국 가공용 알루미늄 합금의 규격(D6701)의 호환성	24
〈표 III-4〉 한국 가공용 알루미늄 합금(D6701)의 계열별 특성 및 용도	25
〈표 III-5〉 주물용 알루미늄 종류 및 특성	27
〈표 III-6〉 작업환경측정 결과(2018-2020년)의 분포	44
〈표 III-7〉 2020년 피로파우더 측정 중 건조 알루미늄 분말 추정 공정	45
〈표 III-8〉 우리나라 알루미늄의 노출기준	49
〈표 III-9〉 알루미늄의 OSHA PELs	50
〈표 III-10〉 알루미늄의 NIOSH RELs	51
〈표 III-11〉 알루미늄의 ACGIH TLVs	52
〈표 III-12〉 알루미늄의 영국 WELs	53
〈표 III-13〉 알루미늄의 일본 ROEs	54
〈표 III-14〉 알루미늄의 독일 MAKs	55
〈표 III-15〉 알루미늄의 프랑스 VLEPs	56
〈표 III-16〉 알루미늄 화합물의 노출기준 정보	58
〈표 III-17〉 알루미늄(가용성 염) / aluminum(soluble salts)	59
〈표 III-18〉 알루미늄(알킬) / aluminum(alkyl compounds)	60
〈표 III-19〉 알루미늄(금속분진) / aluminum(metal dust)	61

〈표 III-20〉 알루미늄(용접 흠) / aluminum(welding fume)	64
〈표 III-21〉 산화알루미늄(알파-알루미나) / α -alumina	65
〈표 III-22〉 알루미늄(피로파우더) / aluminum powder(pyrophoric)	68
〈표 III-23〉 알루미늄에 대한 직업적 노출기준	78
〈표 III-24〉 실태조사 사업장 현황	82
〈표 III-25〉 알루미늄(가용성염) 실태조사 결과	84
〈표 III-26〉 알루미늄(금속분진) 측정결과	86
〈표 III-27〉 알루미늄(용접흠) 측정결과	86
〈표 III-28〉 알루미늄(피로파우더) 측정결과	87
〈표 III-29〉 산화알루미늄 측정결과	88
〈표 III-30〉 사업장3에서 ICP분석과 AA분석 비교	89
〈표 III-31〉 사업장7에서 ICP분석과 AA분석 비교	90
〈표 III-32〉 사업장12에서 ICP분석과 AA분석 비교	90
〈표 III-33〉 사업장10-1에서 ICP분석과 AA분석 비교	91
〈표 III-34〉 알루미늄 노출기준 개정안	100
〈표 III-35〉 산화아연 노출기준	102
〈표 III-36〉 구리 노출기준	102
〈표 III-37〉 개정안 적용시 노출기준 초과 건수 추정	103
〈표 III-38〉 개정안에 따른 규제영향평가 필요여부	106
〈표 III-39〉 개정안에 따른 규제 시나리오	107
〈표 III-40〉 비용항목과 관련된 국내법 조항	108

표 목차

〈표 III-41〉 개정안별 예정 노출기준 초과 사업장수(추정)	109
〈표 III-42〉 사업장당 비용 환산(분석기간 30년)	110
〈표 III-43〉 호흡성 분진(R) 측정비용(예상)	111
〈표 III-44〉 알루미늄 형태별 노출인구수	111
〈표 III-45〉 통계적 인간생명가치의 미래시점 환산	112
〈표 III-46〉 지불의사금액의 미래시점 환산	113
〈표 III-47〉 시나리오별 사회적 총비용(분석기간 30년)	115
〈표 III-48〉 WTP로 추정한 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 5.5%)	117
〈표 III-49〉 WTP로 추정한 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 3%) ..	118
〈표 III-50〉 사회적 비용-편익 비교(분석기간 30년)	120

그림목차

[그림 Ⅱ-1] 시료채취 카트의 구성	14
[그림 Ⅱ-2] 사회경제성 평가 절차	17
[그림 Ⅲ-1] 알루미늄 분말의 형태	36
[그림 Ⅲ-2] 기본적인 분무(atomization) 알루미늄 분말 생산 공정	38
[그림 Ⅲ-3] 분무 알루미늄 등급별 입자크기 분포	39
[그림 Ⅲ-4] 분무 알루미늄 분말	40
[그림 Ⅲ-5] bright 알루미늄	41
[그림 Ⅲ-6] 플리터(flitter) 알루미늄	41
[그림 Ⅲ-7] 알루미늄 메쉬 크기에 따른 폭발성	42
[그림 Ⅲ-8] 알루미늄 분말 타입에 따른 제조법 및 사용처	42
[그림 Ⅲ-9] 폭발물로 사용되는 알루미늄 분말의 형태에 따른 메쉬 사이즈와 겉보기 밀도	43
[그림 Ⅲ-10] 다이캐스팅 용해로에서 입자상물질의 크기 분포 및 알루미늄 성분비	48
[그림 Ⅲ-11] 알루미늄(가용성염) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포	92
[그림 Ⅲ-12] 알루미늄(금속분진) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포	93
[그림 Ⅲ-13] 알루미늄(용접흄) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포	93
[그림 Ⅲ-14] 알루미늄(피로파우더) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포	94
[그림 Ⅲ-15] 산화알루미늄 사업장의 입자크기별 질량농도 분포	94
[그림 Ⅲ-16] 알루미늄(알킬)의 2020년(하)전국 작업환경측정 결과 요약	96

I. 서론



I. 서론

1. 연구 배경

1) 연구 필요성

- ‘알루미늄 및 그 화합물’(이하 ‘알루미늄’)의 국내 노출기준은 현재 다섯 가지로 세분화(가용성 염/금속분진/알킬/용접 흠/피로파우더)되어있어 물질이 해당되는 분류에 따라 각기 다른 노출기준을 적용하여야 하나 각 세부분류별 정의·기준 부재로 현장 적용이 어려움
- 최근 산업안전법이 개정됨에 따라 알루미늄의 법적규제 명칭은 하나로 통합되었으나 노출기준은 여전히 세부분류를 구분하여 적용하도록 되어있어 노출기준 개정 필요성이 대두됨

〈표 1-1〉 알루미늄에 대한 관련 법규정

구분	산업법 시행규칙 [별표21] ‘작업환경측정 대상 유해인자’ 목록	화학물질 및 ‘물리적 인자의 노출기준’ 고시 목록
개정 전	알루미늄 및 그 화합물 가) 금속분진 나) 피로파우더 다) 흠 라) 가용성 염 마) 알킬	알루미늄(가용성 염) 알루미늄(금속분진) 알루미늄(알킬) 알루미늄(용접 흠) 알루미늄(피로파우더)
현재	알루미늄 및 그 화합물	상동

- 알루미늄의 국내 노출기준이 ACGIH TLV와 비교하여 현저히 높아 값의 적정성 재검토 필요
- 알루미늄은 지난 10년간 노출기준 개정이 이뤄지지 않음

2) 연구목적

- 국내외 알루미늄의 노출기준 개정 현황을 조사한다.
- 국내 알루미늄 제조·취급 사업장 대상 작업자 노출 실태를 조사한다.
- 알루미늄 제조·취급 사업장 조사 등을 통해 기 노출기준설정물질의 노출기준 변경 타당성 검토에 필요한 기술적·경제적 타당성 조사한다.
- 국내 알루미늄 노출기준 개정을 위한 사회성·경제성 평가 실시한다.

II. 연구방법



II. 연구방법

1. 연구내용 및 범위

본 연구의 연구 내용은 <표 II-1>과 같다.

<표 II-1> 연구내용 및 범위

연구내용	세부 목표	범위 및 세부 내용
<ul style="list-style-type: none"> • 국내외 알루미늄의 노출기준 개정 현황 조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 알루미늄 노출기준의 설정 현황 조사 • 국외 알루미늄 노출기준 설정 현황 조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 알루미늄 노출기준의 설정 배경 및 변천사 조사 • ACGIH, 유럽연합 등의 알루미늄에 대한 노출기준 설정 현황 조사
<ul style="list-style-type: none"> • 국내 알루미늄 제조·취급 사업장 대상 작업자 노출 실태조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 노출기준 설정 대상(금속분진, 피로파우더, 흙, 가용성 염, 알킬)별 노출 평가 • 기존 측정자료의 분석 	<ul style="list-style-type: none"> • 알루미늄 노출 인구(업종, 규모, 농도 등)를 분석하여 대표성 있는 평가대상 선정 후 노출 평가 • 관련 연구결과 및 안전보건공단이 보유한 작업환경측정결과 및 작업환경실태조사 등을 분석
<ul style="list-style-type: none"> • 노출기준 변경 타당성 검토에 필요한 기술적·경제적 타당성 조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 노출기준이 설정된 대상물질 별 차이가 발생한 원인 조사 • 노출기준 변경이 타당한 경우 비용편익분석에 필요한 자료 조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 노출기준설정 대상별 측정 및 분석 과정에 대한 기술적 조사 • 본 연구의 실태조사 결과 및 기존 작업환경측정 결과를 분석하여 노출 규모 평가 • 노출기준 변경시 발생할 수 있는 경제적 효과 추정

<ul style="list-style-type: none"> 알루미늄 노출기준 개정을 위한 사회성·경제성 평가 실시 	<ul style="list-style-type: none"> 노출수준 및 건강영향 등을 고려하여 비용편익분석 	<ul style="list-style-type: none"> 알루미늄의 유해성 평가(국내외 문헌검토, 최신 유해성 정보 확인) 알루미늄의 위험성 평가(국내 취급 및 노출실태 조사) 알루미늄의 국내법상 규제 수준을 검토하고 그에 따른 사회경제성 평가 실시 알루미늄의 산업안전보건법상 적절한 규제 방안을 제시(노출기준 목록, 작업환경측정, 특수건강진단, 특별관리물질 대상 여부 등 검토)
--	--	---

2. 연구방법

1) 문헌조사

(1) 알루미늄 특성 및 종류

알루미늄의 기본 특성 및 종류를 조사하여 알루미늄 노출기준을 세분화할 때 필요한 관련 자료를 확보하였다. 피로파우더의 경우 정확한 정의를 모르고 노출기준이 적용되고 있는 상황이라 알루미늄 분말의 생산 및 종류에 대해 조사하였다.

알루미늄 및 그 합금의 종류 및 특성을 조사하였다. 알루미늄 용접흡 측정시 알루미늄 합금을 이용하는 경우 다른 금속이 공존하게 된다. 다른 금속에 대한 측정방법이 충분진이고 알루미늄만 호흡성분진인 경우 근로자에게 개인용 시료채취기를 2개 착용하도록 요구해야하는 상황이 생길 수 있다. 다른 금속의 성분비에 대한 알루미늄 합금의 종류를 조사하였다.

(2) 알루미늄 노출기준 관련 자료의 systemic review

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 Documentation 과 유사한 노출기준 설정 근거 자료를 작성하였다.

(3) 알루미늄 독성자료 검토

노출기준 설정의 근거가 되는 독성자료를 조사하였다. 동물실험 및 역학조사자료

등을 조사하였고, 동물실험에 대해서는 급성 및 아만성/만성 노출에 대한 자료를 조사하였다. ACGIH에서 2008년 노출기준을 철회한 후 보고된 수용성염 및 알킬 알루미늄에 대한 독성자료를 집중적으로 조사하였다.

2) 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사

(1) 알루미늄 측정 및 분석

가. 알루미늄 금속분진의 측정

알루미늄 금속분진에 대한 시료채취는 아래와 같은 방법으로 진행하였다.

- 시료채취매체: 막여과지(mixed cellulose ester (MCE) filters)
- 유량: 1~3 L/min
- 공기량: 최대 400 L, 최소 10 L
- 운반: 여과지의 시료포집 부분이 위를 향하도록 하고 마개를 닫아 밀폐된 상태에서 운반
- 시료의 안정성: 안정함
- 공시료: 시료 세트 당 2~10개의 현장 공시료

알루미늄 금속분진에 대한 분석은 아래와 같은 방법으로 진행하였다.

- 분석기술: 유도결합 플라즈마 방출 분광기(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometer; ICP-AES)
- 분석대상물질: Al
- 전처리: 진한질산(HNO₃) 6 mL
- 최종용액: 10% HNO₃, 10 mL, 1000 µg/mL 세슘(Cs)
- 검량선: Al³⁺ 표준용액 in 10% HNO₃
- 범위: 50~5000 µg/sample
- 검출한계: 2 µg/sample
- 정밀도: 0.03

호흡성분진은 사이클론을 이용하여 필터카세트 이전 단계에서 크기별로 분리하여 여과지에 호흡성분진만 채취하였다.

나. 알루미늄 금속의 분석

알루미늄 금속에 대한 분석방법은 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 원자흡광광도계법(atomic absorption spectrophotometer, flame)을 이용하였다. 일부 시료에 대해 두 분석방법을 병행하여 그 결과를 비교하였다.

시료의 전처리는 다음 절차를 따랐다.

- (a) 카세트필터 홀더를 열고 시료와 공시료를 깨끗한 비이커로 옮긴 후 질산 6 mL를 넣고 시계접시를 덮은 후, 가열판에서 가열하였다.
- (b) 산 용액이 약간 노란색으로 변하며, 용액이 투명해질 때까지 산 용액을 조금씩 첨가하여 유기 금속을 완전히 파괴시켰다.
- (c) 시료 용액이 투명해지면, 시계접시와 비이커를 10% 질산용액으로 행군 후 다시 비이커를 가열판에 놓고, 용액이 약 0.5 mL 정도가 남을 때까지 가열하였다.
- (d) 비이커를 3~5 mL 10% HNO₃ 용액으로 행군 후, 잔류물을 다시 5분간 가열하였다.
- (e) 비이커를 상온으로 식혀서 10 mL 용량 플라스크에 옮겨 담고, 0.2 mL 50 mg/mL 세슘 용액을 첨가한 후, 10% HNO₃ 용액으로 플라스크 표선을 맞췄다.

검량선 작성 및 회수율 계산은 다음 절차를 따랐다.

- (a) 알루미늄 0~500 $\mu\text{g}/\text{sample}$ 이 되도록 2.0 mL 50 mg/mL 세슘 용액이 함유되어 있는 100 mL 용량 플라스크에 10% 질산용액을 사용하여 최소 5개의 표준 용액을 제조하였다. 이번 연구의 표준 용액은 AAS 방법 20, 40,

80 ppm으로 제조하였으며, ICP 방법은 100, 200, 400, 800, 1000 ppb로 제조하였다.

- (b) 표준용액을 공시료 및 시료와 함께 분석한다.
- (c) 표준용액 농도($\mu\text{g}/\text{mL}$)에 따른 흡광도 결과를 바탕으로 검량선 그래프를 작성하였다.
- (d) 작성한 검량선에 따라 보통 10개의 시료를 분석한 후, 표준용액을 이용하여 분석기기 반응에 대한 재현성을 점검한다. 재현성이 나쁘면 검량선을 다시 작성하고 시료를 분석하였다.
- (e) 막여과지에 알고 있는 양의 분석대상물질을 첨가한 시료(spike 시료)로 아래와 같이 회수율(recovery) 시험을 실시하여 현장 시료 분석값을 보정하였다.

회수율 시험 및 보정은 다음 절차를 따랐다.

- (a) 예상 시료량이 포함되도록 3가지 이상의 수준 및 각 수준별로 3개 이상의 시료를 만들었다.
- (b) 하룻밤 방치한 후 '시료전처리' 과정과 동일하게 전처리하고 현장 시료와 동일하게 분석한 후 회수율을 다음과 같이 구하였다.
- ※ 회수율 = 분석값/첨가량
- (c) (b)에서 구한 회수율로 시료의 분석값을 다음과 같이 보정한다. 수준별로 회수율의 차이가 뚜렷하면 수준별로 보정하였다.
- 보정 분석값 = 현장시료 분석값/회수율

분석과정은 다음과 같았다.

- (a) 유도결합플라즈마분광광도계(ICP) 및 원자흡광광도계(AAS)의 기기를 작동시켜 최적화시킨 후 396.153 nm에서 알루미늄 흡광도를 측정한다. 만일 방해물질이 존재할 경우 다른 파장을 선택하여 분석하였다.
- (b) 표준용액, 공시료, 현장시료, 그리고 회수율 검증시료를 흡입시켜 납의 흡광도를 측정하고 기록을 저장하였다.
- (c) 적당한 비율로 표준용액을 희석하여 알루미늄 금속의 검출한계를 구한다. 이 분석방법의 검출한계는 2 $\mu\text{g}/\text{sample}$ (AAS) 및 0.05 $\mu\text{g}/\text{sample}$ (ICP)

수준으로 알려져 있으며 이번 연구에서 검출한계는 $0.3027 \mu\text{g/L}$, 정량한계 $1.5137 \mu\text{g/L}$ (AAS) 및 $0.0075 \mu\text{g/L}$, 정량한계 $0.0375 \mu\text{g/L}$ (ICP)이었다.

농도 계산은 다음 절차를 따랐다.

- (a) 측정된 흡광도를 이용하여 그에 상응하는 시료의 금속 농도(C_s)와 공시료의 평균값(C_b)을 계산하였다.
- (b) 시료의 용액 부피(V_s)와 공시료 부피(V_b)를 이용하여 채취된 공기중(V) 채취물질의 농도(C)를 계산하였다.
- (c) 다음 식에 의하여 해당물질의 농도를 구하였다.

산화알루미늄(알루미나, Alumina, Al_2O_3)의 분석의 경우 알루미늄 금속방법과 대부분의 과정은 유사하지만 이 방법으로는 전처리되지 않는다. 따라서 알루미나를 용해시키기 위해서는 붕산 리튬(Lithium borate)융합분말을 이용하거나 LiBO_2 , NH_4O_3 및 NaBr 을 혼합한 용액을 가하여 회화시킨 후 분석하였다.

다. 시료채취 카트 구성 및 분진 크기 분포 측정

총분진과 호흡성분진의 농도비를 계산하기 위하여 시료채취카트를 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 카트 안에 광학입자계수기(Optical Particle Sizer Model 3330, TSI, MN)를 이용하여 분진 크기 분포를 실시간으로 측정하였다. 광학입자계수기의 공기 유입구는 박스 내 분진 측정기의 공기 유입구와 수평의 위치에 개구시켰다. 이 방법은 알루미늄 이외의 분진도 측정된다는 단점이 있다.



[그림 II-1] 시료채취 카트의 구성

라. 실태조사 대상 사업장 선정

다양한 형태의 알루미늄 화합물(금속분진, 피로파우더, 용접흄, 가용성염, 알킬, 산화알루미늄)별로 2~3개 사업장을 선정하는 것을 목표로 하였다. 모든 형태를 포괄하여 100개 이상의 시료채취를 진행하는 것을 목표로 하였다. 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

(1) 알루미늄 측정자료 분석

최근 3년간 알루미늄 및 그 화합물에 대한 우리나라 작업환경측정 실시현황을 파악하기 위해 한국산업안전보건공단에서 보유하고 있는 우리나라 작업환경측정 DB를 분석하였다. DB에서 다음을 변수로 하여 자료를 추출하고 이에 대하여 노출기준 대비 10%, 50%, 100% 초과여부를 분석하였다.

- 알루미늄 형태(금속분진, 피로파우더, 용접흄, 가용성염, 알킬, 산화알루미늄)
- 측정업체 수
- 측정시료 수
- 노출 수준

(2) 알루미늄 측정 및 분석 기술 분석

알루미늄 형태(금속분진, 피로파우더, 용접흄, 가용성염, 알킬, 산화알루미늄)별 측정 및 분석 기술에 대한 문헌조사를 통해 노출기준의 변화시 아래 사항들을 고려하여 분석하였다.

- 검출한계(LOD)와 노출기준이 충분히 구별되는 수준인지 여부
- 알루미늄 형태별 호흡성 분진의 비
- 한국의 현실에서 실현 가능한 것인지에 대한 검토

4) 알루미늄 노출기준 개정을 위한 사회성·경제성 평가

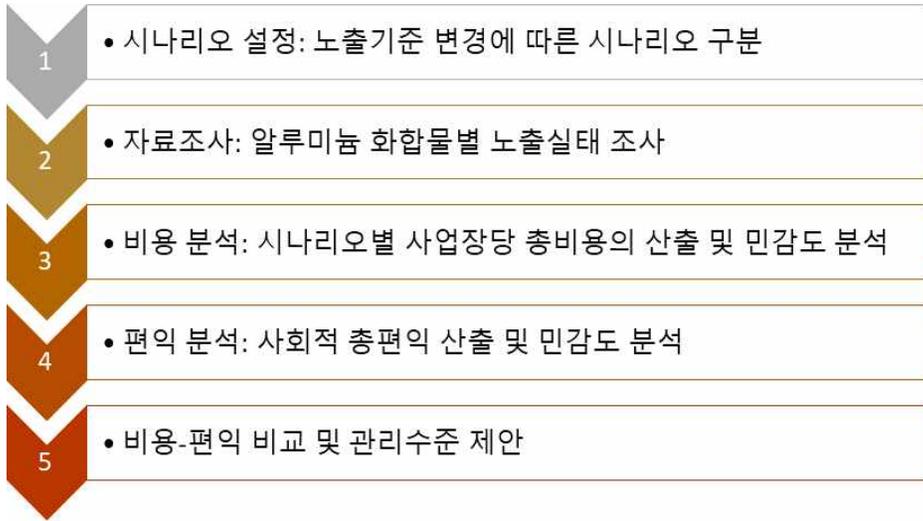
알루미늄의 유해성·위험성 평가 후 규제에 따른 사회적·경제적 비용과 편익에 대한 타당성·적합성을 조사·분석하고자 하며 다음 사항들을 고려하였다.

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

알루미늄의 산업안전보건법 규제로 인해 야기되는 사회·경제적 비용, 편익, B/C ratio를 통한 정량적 평가를 진행하였다.

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

사회성·경제성 평가는 [그림 II-2]와 같은 절차로 수행하였다.



[그림 II-2] 사회·경제성 평가 절차

Ⅲ. 연구결과



Ⅲ. 연구결과

1. 문헌조사 및 자료 분석

1) 알루미늄의 특성 및 종류

(1) 알루미늄의 특성

알루미늄의 물리적 및 화학적 성질을 보면 다음과 같다.

- 원자기호 : Al
- 원자번호: 13
- 원자량: 26.9815
- 비중: 2.70
- 용점: 659.7℃
- 비열(20℃): 0.215 cal/g/℃
- 선열팽창계수(20℃): 23.9 micro-in/℃/sec
- 열전도도(20℃): 0.53 cal/cm²/cm per ℃/sec
- 전기저항(20℃): 2.655 microhm-cm
- 용해: 알칼리, 염산, 황산
- 불용해: 질산, 아세트산, 암모니아

알루미늄은 규소(Si) 다음으로 지구상에 많이 존재하는 원소이다. 대기 중에서 내식성이 강하고 전기 및 열의 양도체이다. 밀도가 2.70 g/cm³으로 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. 알루미늄 특성 및 이를 활용한 용도를 정리하면 아래

표와 같다.

〈표 III-1〉 알루미늄의 특성 및 용도

구분	특성	용도
경량	비중이 2.7로 구리(Cu) 8.9, 철(Fe) 7.9의 약 1/3	자동차, 항공기, 선박
표면처리	화학연마, 아노다이징 등 다양한 표면처리	화장품용기, 식기, 장식품
반사율	높은 반사율(85~98%), 높은 적외선 및 자외선 반사율	반사판, 조명판, 난방기, 단열재
열전도도	열전도도 238 W/m.k로 철의 3배 수준	냉난방기, 열교환기
전기전도도	구리의 65%	송전케이블
내식성	표면에 자연산화피막 형성	식품포장용기
무독성	식품류와 화학적 반응이 없음	음료캔류
저온성	온도 저하시 강도 상승(-200℃)	액화천연가스 플랜트 설비
비자성	전자장의 영향을 받지 않음	메모리디스크, 파라볼라 안테나
성형성	우수한 성형성	화장품 캡, 주방용품
주조성	합금 및 주조에 용이함	다이캐스팅, 구조재

(2) 알루미늄 합금의 종류

알루미늄 합금에 대한 국제규격은 아래와 같은 종류들이 존재한다. 다른 재료와 마찬가지로 알루미늄 합금 지금(地金)은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 "일차 합금(신괴)"이며, 다른 한 쪽은 "재활용 합금(재생괴)"이다. 가장 많이 사용되는 알루미늄 종류는 알루미늄 모재를 추가 가공하여 제품을 생산하는 D6701과 주물을 생산하는 D6008이다.

〈표 Ⅲ-2〉 알루미늄 합금에 대한 국제규격

KS	JIS	ASTM	SAE	BS	DIN	ISO	기타	내용
D 2303	H 2103	(n/a)	(n/a)	(n/a)	(n/a)	(n/a)	(n/a)	알루미늄 재생 지금(재생괴)
D 2304	H 2102	(n/a)	(n/a)	1490	EN576	R115	(n/a)	알루미늄 지금(신괴)
D 2330	H 2211	B179	J452	1490	1727-5	(n/a)	(n/a)	주물용 알루미늄 합금 지금
D 2331	H 2118	B179	J452	1490	1725	3522	(n/a)	다이캐스팅용 알루미늄 합금 및 알루미늄 재생 합금 지금
D 6006	H 5302	B85/B8 6	J452	1490	1725	3522	NF A57-7 02 FSQQ- A-591 F	알루미늄 합금 다이캐스팅
D 6008	H 5202	B26M/ B108	(n/a)	1490	1725-2	3522	NF A57-7 02	알루미늄 합금 주물
D 6701	H 4000	B209M	(n/a)	EN485 -2/EN 573-3	EN485 -2/EN 573-2	6361/2 90	FS QQ-A- 250	알루미늄 및 알루미늄 합금의 판 및 조
D 6713	H 4090	B313M /B547 M	(n/a)	(n/a)	(n/a)	(n/a)	(n/a)	알루미늄 및 알루미늄 합금 용접관
D 6759	H 4100	B221M	(n/a)	1474/E N573- 3	1748-1	6362/2 09	FS QQ-A- 200	알루미늄 및 알루미늄 합금 압출 형재
D 6761	H 4080	B221M /B210 M	(n/a)	1474/1 471/EN 573-3	1746-1 /EN573 -3	6362/2 09	FS QQ-A- 200 FSWW -T-700	이음매 없는 알루미늄 및 알루미늄 합금판
D 6763	H 4040	B221M /B211 M	(n/a)	1474/1 475/EN 573-3	1725-1 /1747- 1	6362/2 09	FS QQ-A- 200	알루미늄 및 알루미늄 합금봉 및 선

KS	JIS	ASTM	SAE	BS	DIN	ISO	기타	내용
					1790-1 /EN573 -3		FSQQ- A-209	
D 6770	H 4140	B247M	(n/a)	1472/E N573- 3	EN586 -2/EN 573-3	(n/a)	FS QQ-A- 367H	알루미늄 및 알루미늄 합금 단조품
SAE	Society of Automotive Engineers				미국 자동차기술자협회			
BS	British Standard				영국규격협회			
DIN	Deutsches Institute fuer Nomung				독일규격협회			
ISO	International Standardization Organization				국제표준화기구			
NF	Association Francaise de Normalisation				프랑스표준협회			
FS	Federal Specification				미국 연방규격			

가공용 알루미늄 합금의 규격은 D6701을 사용하며, 이 규격은 세부 내용에 있어서 다른 국제 규격들과 아래와 같이 호환된다.

〈표 III-3〉 한국 가공용 알루미늄 합금의 규격(D6701)의 호환성

규격	KS, JIS	ASTM	BS	NF	DIN	ISO
규격명	D6701 H4000	B209	EN485-2 EN573-3	(n/a)	EN485-2 EN573-2	6361209
호환성	A1050	1050	1050A	1050A	Al99.5	Al99.5
	A1100	1100	-	1100	-	Al99.0Cu
	A3003	3003	-	3003	AlMn1Cu	AlMn1Cu
	A5005	5005	5005	5005	AlMg1	AlMg1(B)
	A5052	5052	-	5052	AlMg2.5	AlMg2.5
	A6061	6061	6061	6061	AlMg1SiCu	AlMg1SiCu

D6701 규격에서 알루미늄 합금은 아래처럼 분류되고 4자리 숫자 또는 영문자의 조합으로 계열을 표시한다. 순수한 알루미늄을 1000 계열로 분류하고, 기타 첨가되는 주요 금속에 따라 세분된다. 이를 표로 정리하면 아래와 같다.

- 1000계 : 순수 알루미늄
- 2000계 : Al-Cu 합금

- 3000계 : Al-Mn 합금
- 4000계 : Al-Si 합금
- 5000계 : Al-Mg 합금
- 6000계 : Al-Mg-Si 합금
- 7000계 : Al-Zn-Mg 합금

〈표 III-4〉 한국 가공용 알루미늄 합금(D6701)의 계열별 특성 및 용도

계열	기호	주요성분	합금특성	용도	
1000	1080	순도 99.80 이상	강도 낮지만 열, 전기 전도성 높고, 성형성, 접성, 내식성 양호	반사판, 조명기구, 장식품, 화학물탱크, 전선재 등	
	1070	순도 99.70 이상			
	1050	순도 99.50 이상			
	1100	순도 99.00 이상	강도 비교적 낮으나 성형성, 용접성, 내식성 양호	건축용재, 전기기구, 일반기물, 각종용기. 강도 요구하지 않는 성형품	
2000	2014	Cu: 3.9~5.0% Si: 0.5~1.2% Mn: 0.4~1.2%	내식성은 떨어지나 열간가공성 양호	항공기 및 부품, 각종 구조재 등	
		2017	Cu: 3.5~4.5% Mn: 0.4~1.0% Mg: 0.4~0.8%	강도 높고 절삭가공성 우수 하지만 내식성, 용접성 나쁨	광학기계 부품, 기계나사제품, 각종 구조재 등
		2024	Cu: 3.8~4.9% Mn: 0.3~0.9% Mg: 1.2~1.8%	2017보다 강도 높고, 절삭가공성 양호하고 공경화후의 인공시효성이 크며, 내응력과 부식성 양호	항공기 외판, 구조재 부품, 단조재 등
3000	3003 3203	Mn: 1.0~1.5%	강도 1100보다 약간 높고 용접성, 내식성 양호	차량용재, 선박용재, 건축재, 일반기물, 각종용기	
	3004	Mn: 1.0~1.5% Mg: 0.3~1.3% Si: ≤0.3%	3003보다 강도 높고 알루미늄p drawing성이 우수하며 내식성 양호	캔(몸통), 전구 베이스(base), 컬러 도장판, 지붕재	

계열	기호	주요성분	합금특성	용도
5000	5005	Mg: 0.5~1.1%	3003과 유사한 강도. 내식성, 용접성, 가공성 양호	차량 내장재(저응력 부품의 구조재) 조리기구, 일반기물 등
	5052	Mg: 2.2~2.8% Cr: 0.15~0.35%	내식성(내해수성)이 뛰어나고 용접성 양호	성형성, 선박구조재, 연료탱크, 가정용기구
	5082	Mg: 4.0~5.0% Zn: ≤0.25% Si: ≤0.2% Cr: ≤0.15%	5083에 가까운 강도. 성형성 우수	내식성 캔(뚜껑) 등
	5154	Mg: 3.1~3.9% Cr: 0.15~0.35%	5052와 5083의 중간 강도. 약간 떨어지나 내식성, 용접성 양호	성형성 차량용재, 선박용재, 압력용기 등
	5083	Mg: 4.0~4.9% Mn: 0.4~1.0% Cr: 0.05~0.25%	비열처리 합금중 최고의 강도. 약간 떨어지나 내식성, 용접성 양호	성형성 차량용재, 선박용재, 압력용기, 용접구조용재 등
	5N01	Mg: 0.2~0.6%	화학 또는 전해연마 후 아노다이징하면 뛰어난 광택성을 가지며 성형성, 내식성, 용접성 양호	반사판, 색상판, 고급기물, 장식품
6000	6061	Mg: 0.8~1.2% Si: 0.4~0.8% Cu: 0.15~0.4% Cr: 0.04~0.35%	내식성, 용접성 좋고 중간정도의 강도를 갖으며 냉간가공성은 열처리합금으로서는 양호	차량, 선박 등 수송구조재, 광학기기 등
	6063	Mg: 0.45~0.9% Si: 0.2~0.6%	아노다이징성과 압출가공성 우수	건축용 샤시/문 등 내/외장용 등
7000	7075	Zn: 5.1~6.1% Mg: 2.1~2.9% Cu: 1.2~2.0% Cr: 0.18~0.28%	2024보다 강도 높고, 중 최고 강도	알루미늄합금 항공기용재, 스포츠용구 등
	7N01	Zn: 4.0~5.0% Mg: 1.0~2.0% Mn: 0.2~0.7%	용접성, 내식성 비교적 좋고 고강도이며 상온에서 시효성 있음	차량용재, 용접구조재 등
	7003	Zn: 5.0~6.5% Mg: 0.5~1.0% Si: ≤0.3%	용접구조용 압출합금으로 강도 약간 낮으나 압출성 양호	7N01보다 차량용재, 오토바이 바퀴 림(rim) 등

D6008-1993 규격에서 알루미늄 주물은 아래처럼 분류되고 2자리 영문자와 1자

리 숫자, 그리고 다시 1자리 영문자의 조합으로 계열을 표시한다. 순수한 알루미늄을 1000 계열로 분류하고, 기타 첨가되는 주요 금속에 따라 세분된다. 이를 표로 정리하면 아래와 같다.

〈표 III-5〉 주물용 알루미늄 종류 및 특성

종류	기호	합금계	주형의 구분	참고		
				상당 규격	합금의 특색	용도 예시
주물1종A	AC1A	Al-Cu	금형 사형	ASTM: 295.0	기계적 성질이 우수하고, 절삭성이 좋으나, 주조성이 좋지 않음	기어하우징, 컴프레서 커넥팅로드, 철도차량용 시트프레임, 가전용부품, 자전거부품, 항공기용 피팅류,
주물1종B	AC1B	Al-Cu-Mg	금형 사형	ASTM: 204.0 ISO AICu4 MgTi NF: AU5GT	기계적 성질이 우수하고, 절삭성이 좋으나, 주조성이 좋지 않으므로 주조방안에 주의 필요	가전용부품, 중전기부품, 자전거부품, 항공기부품
주물2종A	AC2A	Al-Cu-Si	금형 사형		주조성이 좋고, 인장강도는 높으나 연신율이 적다. 일반용으로 우수	메니폴드, 디프캐리어, 펌프바디, 실린더헤드, 자동차 하체부품
주물2종B	AC2B	Al-Cu-Si	금형 사형	ASTM: 319.0	주조성이 좋고, 일반용으로 가장 널리 사용	실린더헤드, 밸브바디, 크랭크케이스, 클러치하우징
주물3종A	AC3A	Al-Si	금형 사형		유동성이 우수하고, 내식성도 좋으나 내력이 낮음	케이스류, 커버류, 하우징류의 얇은 것, 복잡한 모양의 것
주물4종A	AC4A	Al-Si-Mg	금형 사형		주조성이 좋고 인성이 우수하며 강도가 요구되는 대형주물에 사용	메니폴드, 브레이크 드럼, 미션케이스, 크랭크케이스, 기어박스, 선박차량용 엔진부품

종류	기호	합금계	주형의 구분	참고		
				상당 규격	합금의 특색	용도 예시
주물4종B	AC4B	Al-Si-Cu	금형 사형	ASTM: 333.0	주조성이 좋고, 인장강도는 높으나 연신율이 적어 일반용으로 가장 널리 사용	크랭크케이스, 실린더헤드, 매니폴트, 항공기용 전장품
주물4종C	AC4C	Al-Si-Mg	금형 사형	ASTM: 356.0 ISO: AISi7Mg(Fe)	주조성이 우수하고, 내압성, 내식성도 좋음	실린더블록, 유압부품, 미션케이스, 플라이휠하우징, 항공기부품, 소형엔진부품, 펌프부품
주물4종CH	AC4CH	Al-Si-Mg	금형 사형	ASTM: A356.0 ISO: AISi7Mg	주조성이 우수하고, 기계적 성질도 우수 고급주물에 사용	자동차용 Wheel, 항공기용 엔진부품 및 유압부품
주물4종D	AC4D	Al-Si-Mg	금형 사형	ASTM: A355.0 ISO: AISi5CuMg	주조성이 우수하고, 기계적 성질도 좋음 내압성이 요구되는 것에 사용	엔진용 수냉실린더 헤드, 실린더블록, 연료펌프바디, 기어하우징, 항공기용 유압부품
주물5종A	AC5A	Al-Cu-Ni-Mg	금형 사형	ASTM(AA):24 2.0 ISO: AICu4Ni2Mg2	8종과 함께 내열용으로 사용 고온에서 인장강도가 높지만 주조성은 좋지 않음	공냉실린더 헤드, 선박 대형디젤기관용 피스톤, 항공기용 엔진부품 등
주물7종A	AC7A	Al-Mg	금형 사형	ASTM(AA):51 4.0	내식성이 우수하고 인성과 양극산화성이 좋지만 주조성은 좋지 않음	가선용금구, 선박용부품, 조각소재, 사무기기, 의자, 항공기 등

종류	기호	합금계	주형의 구분	참고		
				상당 규격	합금의 특색	용도 예시
주물8종A	AC8A	Al-Si-Cu-Ni-Mg	금형	ASTM(AA):33 6.0	내열성이 우수하고 내마모성도 좋으며 열팽창계수가 작음(Low-Ex합금) 인장강도도 높음	자동차. 디젤기관용 피스톤, 선박용피스톤, 활차, 베어링
주물8종B	AC8B	Al-Si-Cu-Ni-Mg	금형		내열성이 우수하고 내마모성도 좋으며 열팽창계수가 작고 인장강도도 높음	자동차 피스톤, 활차, 베어링
주물8종C	AC8C	Al-Si-Cu-Mg	금형	ASTM(AA):33 2.0	내열성이 우수하고 내마모성도 좋으며 열팽창계수가 작고 인장강도도 높음	자동차 및 Heavy duty용 피스톤, Pully, 베어링
주물9종A	AC9A	Al-Si-Cu-Ni-Mg	금형		내열성이 우수하고 열팽창계수가 작고 내마모성은 좋으나 주조성이나 절삭성은 좋지 않음	피스톤(공랭2사이클용) 등
주물9종B	AC9B	Al-Si-Cu-Ni-Mg	금형		내열성이 우수하고 열팽창계수가 작고 내마모성은 좋으나 주조성과 절삭성은 좋지 않음	피스톤(디젤기관용, 수랭 2사이클용), 공랭실린더 등

(3) 알루미늄 소재의 표면처리

알루미늄 소재의 표면처리 종류에는 다음과 같은 것들이 존재한다. 이들은 모두 산업체에서 많이 활용되고 있는 알루미늄의 표면처리 기술들이다.

- 아노다이징(anodizing), 양극산화법, 혹은 알루미이트(allumite) 처리
- 화성피막 처리(chemical conversion coating)
- 전기도금(electro-plating)

- 무전해도금(electroless plating)
- 진공도금(vacuum coating)
- 기타: 도장, Teflon 처리

아노다이징은 양극산화의 뜻으로 피처리물(알루미늄 부품)을 양극에 걸고 전해, 양극에서 발생하는 산소로 부품의 표면을 산화하여 생긴 산화알루미늄(Al_2O_3)의 기능성을 이용한다. 양극산화란 즉 양극(anode)과 산화(oxidizing)의 합성어(ano-dizing)이다. 양극산화의 가장 대표적인 소재는 Al이고, 그 외 Mg, Zn, Ti, Ta, Hf, Nb 등도 있다. 알루미늄을 양극에서 산화하면 표면이 반은 침식되고, 반은 산화알루미늄(Al_2O_3)피막이 형성된다. 이 피막의 우수한 기능성을 다음과 같이 이용하게 된다.

- (1) 모스경도가 90으로 상당히 단단하여 내마모성이 우수하다.
- (2) 피막이 치밀한 산화물로 내식성이 우수하다.
- (3) 피막은 다공성(porosity)으로 염료로 염색할 수 있고, 기능성 물질을 흡착/삽입하여 그 특성을 활용도 하고, 흡착력을 이용하여 도장의 일종으로 활용한다.
- (4) 피막은 전기적으로 부도체이다.

아노다이징의 용도는 장식용, 건축용, 경질(hard)용, 내식용, 축전지(콘덴서)용 등이다. 미국 ASTM 규격(B580)에 따르면 코팅의 등급이 A에서 G까지 존재하며 A등급의 피막두께가 최소 50 마이크로미터로 가장 두껍고 뒤고 갈수록 얇아져서 G등급은 최소 1 마이크로미터이다. 아노다이징 처리를 위한 욕조(bath)의 대표적인 종류로는 크롬산법, 수산법, 인산법 등을 들 수 있다.

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 룸 에어컨, 카 에어컨 열교환기, 송전선의 에너지 손실의 절감에 활용케 되었다.

2) 알루미늄의 사용 및 제조

(1) 알루미늄 분말의 사용

알루미늄의 합금 및 연관제품 등의 생산에는 분말 형태로 가공된 알루미늄 분말이 많이 사용된다. 분말형의 알루미늄 화합물은 크기가 작아 호흡기 노출가능성이 클 뿐만 아니라 충분한 중 호흡성분진이 차지하는 비중이 커질 수 있다.

알루미늄 분말 용도에는 태양광 패널, 선텐 로션 및 경량 콘크리트와 같은 다양한 제품의 생산이 포함된다. 불꽃놀이와 폭발물 생산의 핵심 성분이기도 하다. 또한 수 많은 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 방법은 기본적으로 용융 금속에 분말을 첨가한다. 첨단 장비 분말을 사용하여 구성 부품을 직접 제조할 수도 있습니다.

가) 금속성 페인트(metallic paint)

많은 페인트에도 알루미늄 분말이 사용된다. 이러한 페인트와 함께 사용할 때의 목적은 페인트에 금속성 광택을 부여하는 것이다. 알루미늄은 화려한 은색 외관을 만들어 페인트를 더욱 매력적으로 보이게 할 수 있다.

나) 알루미늄 산화물 분말

화합물은 알루미늄 분말과 산소를 혼합한 결과이며 Al_2O_3 의 화학식을 갖는다. 이 형태가 다른 산화물보다 더 풍부하게 발견되며 알루미늄(III) 산화물이라고 한다. 산화알루미늄은 금속 알루미늄이 풍화되는 것을 막는 핵심 구성 요소이다. 금속 알루미늄은 대기 중 산소와 매우 반응성이 높기 때문에 반응하여 더 이상의 산화를 막는 작은 층을 형성한다. 많은 금속 합금이 이 특성을 사용하며 보호를 위해 이 화합물로 코팅된다.

다) 불꽃놀이용 흑색 알루미늄 분말(dark aluminum powder)

플래시 분말(flash powder)이라고도 하며 주로 화합물 반응의 폭발 효과에 사용된다. 분말은 염소산 칼륨(potassium chlorate), 질산 칼륨(potassium nitrate) 및 황을 사용하여 만들 수 있다. 이러한 혼합물은 다양한 효과를 내기 위해 다양한 방식으로 혼합된다. 일부는 반응이 발생할 때 생성되는 큰 소리에 사용되며 일부는 생성하는 빛에 사용된다. 이처럼 플래시 파우더는 조명용으로 사용될 수 있으며 과거에는 카메라에 사용되었다.

라) 분말 코팅

보호용 또는 광이 나는 외형 등의 이유로 활용된다. 보호용의 경우 알루미늄 분말은 화합물과 혼합되어 잘 반응하지 않는 산화물을 형성한다. 도료용 분말 코팅은 일반적으로 대상 도료에 자동차 도료 등에 사용되는 것과 같이 반짝이는 느낌을 주기 위한 것이다. 분체도장이 가능하며, 어떤 종류의 화합물을 사용하느냐에 따라 최종 효과에 차이가 발생한다.

분말 코팅은 분말이 미세한 미스트 형태로 분사되기 때문에 스프레이 장비를 사용하여 수행된다. 이러한 작업에 가장 중요한 것은 적절한 종류의 노즐이 있는 페인트 총, 보호복(overall) 및 고글이다. 이러한 종류의 스프레이 코팅은 일반적으로 산업 분야에서 수행된다.

스프레이 페인팅에 사용할 수 있는 색상 유형에는 제한이 없다. 그러나 주의해야 할 한 가지 중요한 점은 이러한 색상이 모든 종류의 스프레이 페인트 작업에 항상 적합한 것은 아니라는 점이다. 예를 들어, 자동차에서는 멋지게 보일 수 있는 색상이 건물에서는 원하는 효과를 얻지 못할 수도 있다.

마) 기타 용도

경량기포 콘크리트(autoclave aerated concrete, AAC) 단일 성능이 매우 우수한 콘크리트 기반 재료로 고층 건물과 고온 변형이 있는 건물에 적합하다. 또한, 절단 및 가공 등이 용이하여 건설에 빠른 적용이 가능하다. 석영모래(quartz sand), 석회질재료, 시멘트 등이 재료로 사용되며, 제조사 기포제 및 기타 혼화제가 혼합되며, 소량의 알루미늄 분말이 사용되기도 한다. AAC를 혼합하여 형태에 주조할 때, 알루미늄 분말은 수산화칼슘과 물과 반응하여 수소를 형성한다. 수소 가스는 직경 3 mm 까지 가스 거품을 일으키며 혼합물의 부피를 2배로 늘려준다. 포밍 과정이 끝나면 수소는 대기 중으로 빠져나와 공기로 대체된다.

지문 채취에 가장 많이 사용되는 것이 알루미늄이다. 지문 가루(fingerprint powder)는 범죄 현장 수사관 및 기타 법 집행 기관에서 지문을 가루로 만드는 데 사용하는 미세한 가루이다. 손가락, 손바닥 또는 발에 마찰 능선 피부에 의해 남은 잔류물에 분말 입자를 부착시키기 위한 다양한 방법이 포함된다. 알루미늄 플레이크가 알루미늄 분말보다 민감도(지문 잔류물에 부착되고 다른 표면에는 부착되지 않는 성질)가 더 높지만 알루미늄 분말이 더 다양한 표면에 적용가능하기 때문에 후자가 더 많이 이용된다.

테르밋(thermite)은 금속 분말(연료)과 금속 산화물(산화제)을 혼합한 화공품이다. 열을 받으면 발열 및 산화·환원 반응을 일으킨다. 폭발성 물질은 아니지만 좁은 면적에 순간적으로 극도의 고열을 발생시킬 수 있다. 생긴 꼴과 작동 기작 모두 다른 연료-산화제 혼합물인 화약과 유사하다. 테르밋 제작시 연료로는 알루미늄, 마그네슘, 타이타늄, 아연, 규소, 붕소 등 다양한 물질이 사용될 수 있으나 끓는점이 높고 가격이 싼 알루미늄이 가장 흔하게 사용된다. 산화제로는 산화비스무트, 삼산화붕소, 이산화 규소, 산화크롬, 이산화망간, 산화 철, 산화 구리, 산화납 등이 사용된다.

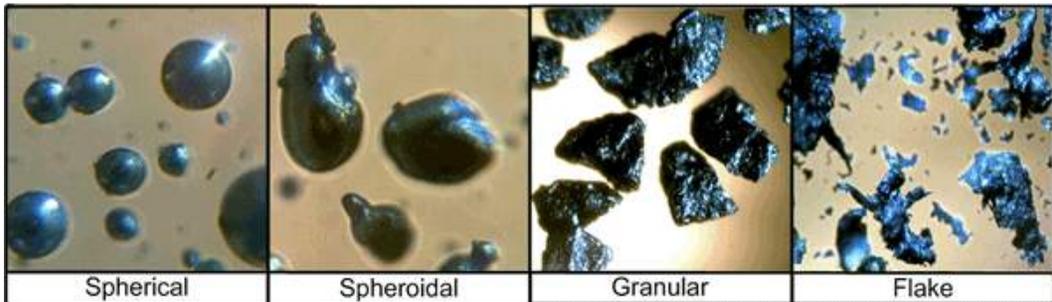
내화물 또는 내화재료(refractory)는 열, 압력 또는 화학적 공격에 의한 분해에 강하고 고온에서 강도와 형태를 유지하는 물질이다. 일반적으로 실리콘, 알루미늄, 마그네슘, 칼슘, 지르코늄과 같은 물질의 산화물 또는 탄화물(carbides), 질화물(nitrides) 등과 같은 비산화물로 구성된다.

고체로켓연료는 산화제와 알루미늄 분말의 혼합물이 많이 사용된다. 과염소산과 암모니아의 염인 과염소산 암모늄(ammonium perchlorate)은 강력한 산화제이다. 알루미늄 분말과 과염소산 암모늄은 결합제, 폴리부타디엔, 아크릴로니트릴 또는

PBAN에 의해 고정된다. 그런 다음 고무지우개와 같은 형상의 혼합물을 강철 케이스에 충전한다. 연소될 때 과염소산암모늄의 산소는 알루미늄과 결합하여 산화알루미늄, 염화알루미늄, 수증기 및 질소 가스와 많은 에너지를 생성한다. 물과 나노크기 알루미늄 분말의 혼합물도 로켓 추진제로 사용된다.

(2) 알루미늄 분말의 제조

알루미늄 분말은 [그림 III-1]처럼 4 가지 형태로 구분할 수 있다. 분무기(atomizer)를 사용하면 구형(spherical) 또는 회전 타원체 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 제조방법이다.



[그림 III-1] 알루미늄 분말의 형태

알루미늄 분말은 최초에 플레이크(flake) 형태로 생산되고 판매되었다. 1900년경에 미국에서 Bessemer dry stamping 공정을 이용하여 생산하였다. 쇄광기(stamp mill)를 이용하여 분말을 생산하는 것은 비효율성과 공기와 혼합되어 폭발물이 생성될 수 있는 위험성 때문에 운영이 쉽지 않았고 치명적인 화재들이 여러 건 발생하였다.

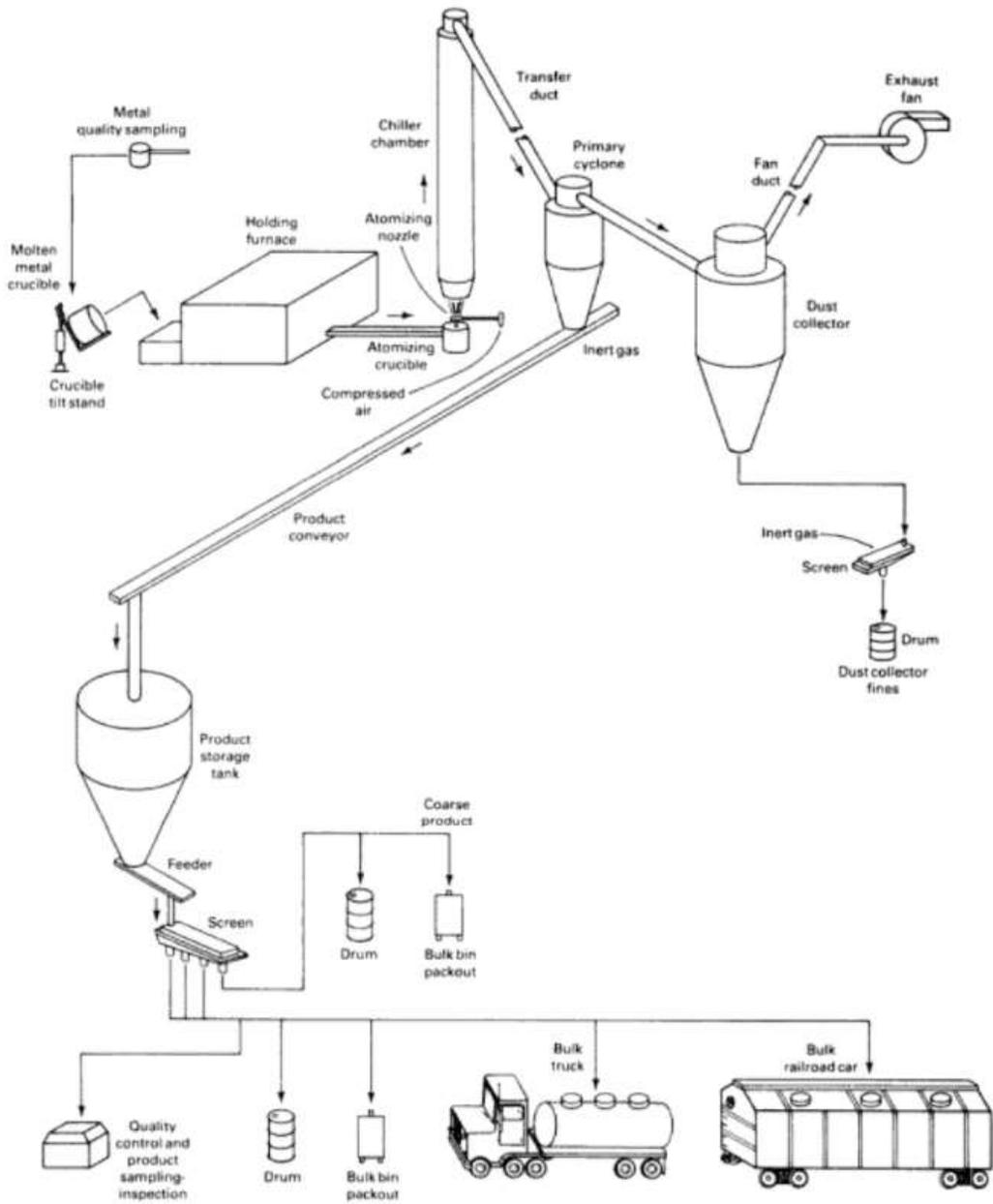
1920년 말에 두 가지 혁신이 일어났다. 볼밀(ball mill)을 사용하여 안전하게 플레이크를 생산할 수 있게 되었고, 현재에도 이 공정이 사용되고 있다. 분무(atomization) 공정이 도입되어 구형 분말을 생산할 수 있게 되었다.

초기에는 분무로 생산한 알루미늄 분말은 플레이크 염료(pigment)를 생산하는 원재료로만 사용되었다. 2차 세계대전 이후 알루미늄을 이용한 고성능 폭발물이 개발되면서 구형 분말에 대한 주요 시장이 생성되었다. 전후에 화학물질 생산, 야금 제품, 상업용 발파제(commercial blasting agent), 로켓 연료, 제약 등의 분야로 사

용처가 증가하였다.

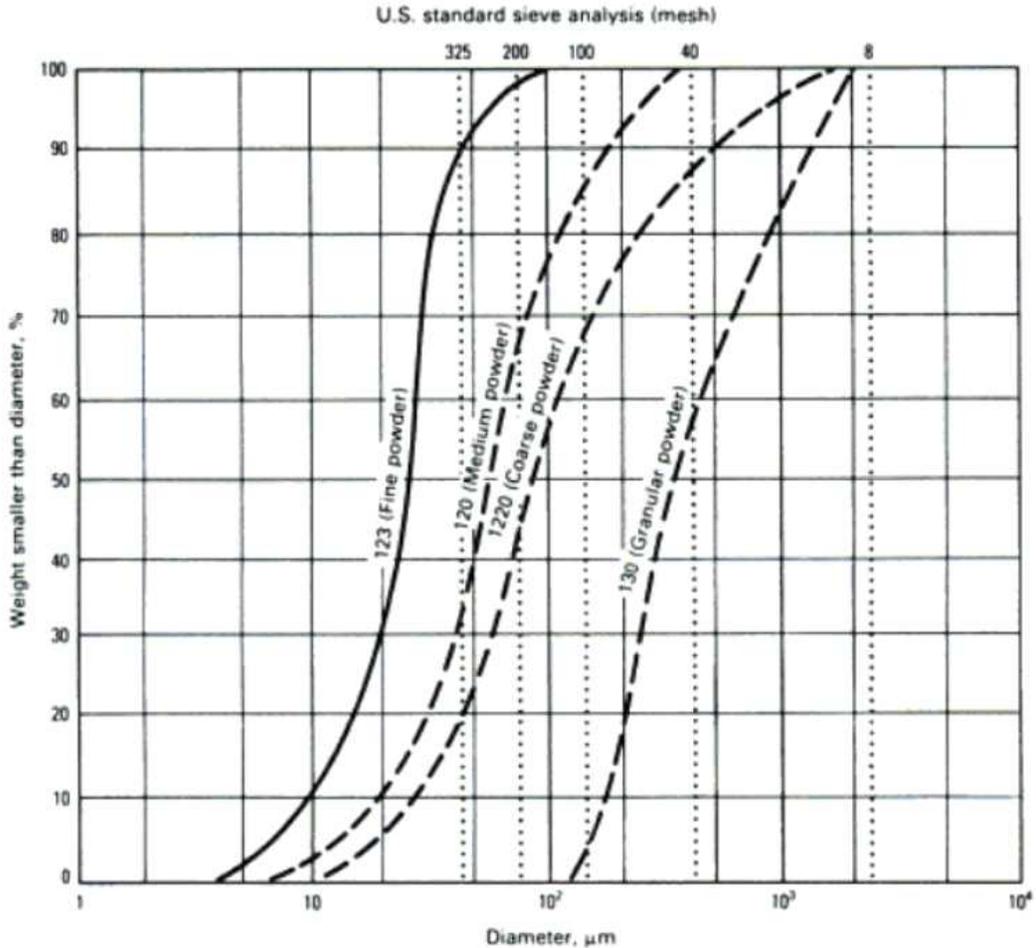
이러한 개별적인 요구를 충족하기 위해 현재는 과립, 구형 및 코팅된 구형 분말, 고순도 분말, 합금용 분말, 혼합된 분말(blended powders), dedusted atomized powders 등의 형태로 다양한 등급의 알루미늄 분말이 생산된다.

분무된 알루미늄 분말은 용융된 알루미늄을 분무하여 생산한다. 분무기(atomizer) 끝에 뚫린 작은 구멍을 통해 분출된 후 압축공기나 불활성 가스에 노출되면서 작은 입자로 부서진다. 이때는 불규칙한 모양이며 크기별로 분류하여 포장된다([그림 III-2] 참고).



[그림 Ⅲ-2] 기본적인 분무(atomization) 알루미늄 분말 생산 공정

미세입자분산측정기(micromerograph)로 분석한 알루미늄 분말의 입자 크기에 따른 구분은 [그림 III-3]과 같다.



[그림 III-3] 분무 알루미늄 등급별 입자크기 분포

분무 알루미늄 분말은 제한된 용도만 있지만 불꽃놀이에 점점 더 많이 사용되고 있다(구형 또는 스피들 모양의 입자가 플레이크보다 점화하기가 더 어렵기 때문이다). 실제로 120 메쉬보다 더 큰 입자는 사용할 수 없으며 상업용 분무 분말은 일반적으로 300+ 메쉬이고 색상은 밝은 회색에서 회색이다. 반짝이 효과 및 기타 특수 별에 필요하다.



[그림 Ⅲ-4] 분무 알루미늄 분말

플레이크 알루미늄은 3가지 타입으로 분류될 수 있다.

첫 번째는 페인트 등급 알루미늄으로도 알려진 "bronze"이다. 이 폭신한 분말(fluffy powder)은 페인트를 만드는 데 사용되며 입자 크기가 매우 미세하다(때로는 2μ 미만). 페인트 알루미늄은 일반적으로 반응성을 감소시키는 그리스 또는 스테아린(함유량은 1~4중량%로 다양함)을 포함한다. 그럼에도 불구하고 bronze는 미술용품점에서 쉽게 얻을 수 있으며 상당히 좋은 은 효과(silver effect)를 생성한다. 구성성분에서 "bright" 알루미늄이 언급되는 모든 곳에서 사용할 수 있다.

두 번째 플레이크 알루미늄은 대부분의 목적에서 bronze로 대체할 수 있는 실제 "bright" 또는 "brilliant" 분말이다. bright는 일반적으로 120 메쉬(nominal 메쉬 크기 120-200)를 통과하며 bronze와 같이 매우 폭신하고 엽상의 물질(fluffy and leafing mass)이다. 후자와의 주요 차이점은 brilliant 파우더가 그리스/스테아린(최대 중량 기준 0.5%)이 적거나 다른 재료로 코팅되어 있어 bronze 등급만큼 기름지지(fatty) 않다. 그들은 많은 목적을 위해 연료로 사용되며 은 효과를 얻을 수 있다.



[그림 III-5] bright 알루미늄

세 번째 플레이크 등급은 bright 알루미늄보다 더 큰 메쉬 크기의 플레이크 분말을 의미하는 "flitter"이다. "fine", "middle" 및 "coarse" 플레이크/플리터로 판매된다. 일반적으로 미세한 플리터는 80-120 메쉬, 중간 플리터는 30-80 메쉬, 거친 플리터(=coarse flake)는 10-30 메쉬이다.



[그림 III-6] 플리터(flitter) 알루미늄

알루미늄 분진의 폭발성은 입자크기의 함수이다. 메시 200 이상의 크기에서만 산소 및 점화원이 있을 경우 분진운(dust clouds)이 폭발할 수 있다.

Powder mesh fraction	Lower explosive limit(a), oz/ft ³	Relative explosibility
-40+100	No ignition	None
-100+140	No ignition	None
-140+200	No ignition	None
-200+270	0.111	Strong
-270+325	0.090	Strong
-325	0.045	Severe

(a) Values for kilograms per cubic meter are exactly the same

[그림 III-7] 알루미늄 메시 크기에 따른 폭발성

등급별 폭발물에서 사용되는 알루미늄 분말의 제조방법 및 사용처는 아래와 같다.

Table 10 Preparation and uses of aluminum powder used in explosives

Aluminum powder	Manufacturing method	Intended use
Type I, grade A	Atomization and milling	Primer composition
Type I, grade B	Atomization and milling	Pyrotechnics
Type II, grade C	Atomization or grinding	Pyrotechnics
Type II, grade D	Atomization or grinding	Plain incendiary thermite
Type II, grade E	Atomization or grinding	High-explosive incendiary projectiles
Type III, grade F	Atomization	Heavy explosives

[그림 III-8] 알루미늄 분말 타입에 따른 제조법 및 사용처

폭발물(explosives)로 사용되는 알루미늄 분말을 형태([그림 III-1] 참고)별로 등급(type 및 grade)을 구분했을 때 기준이 되는 입자크기 및 겉보기 밀도(apparent density) 범위를 아래 그림에서 확인할 수 있다. [그림 III-8]의 분류보다 grade F에서 보듯이 class는 조금 더 세분된 것을 볼 수 있다.

Table 11 Classification and apparent density of aluminum powder used for explosives

Classification	Mesh size, nominal	Apparent density, g/cm ³	
		min	max
Type I, flaked			
Grade A(a), class 1	~325	...	0.30
Grade B(b), class 2	~100	(c)	(c)
Grade B(b), class 3	~20	...	0.50
Type II, grained or atomized			
Grade C(d), class 4	~50	0.90	1.10
Grade D(e), class 5	~12	0.90	1.10
Grade E(f), class 6	~100	0.95	1.20
Type III, atomized, grade F(g)			
Class 6	~100	0.95	1.20
Class 7	~40	0.95	...
Class 8	~12	0.95	...
Class 9(h)	~325	0.95	...

(a) 85% Al. (b) 93.0% Al. (c) No determination. (d) 91.5% Al. (e) 92.5% Al. (f) 96.0% Al. (g) 98.75% Al. (h) For hexachloroethane white smoke mixtures

[그림 III-9] 폭발물로 사용되는 알루미늄 분말의 형태에 따른 메쉬 사이즈와 겉보기 밀도

3) 노출수준 고찰

(1) 작업환경측정자료 분석

가) 현행 노출수준

안전보건공단 2018-2020 작업환경측정 결과를 요약하면 노출기준 대비 4가지 수준으로 나누어 보면 아래 표와 같다. 대부분이 노출기준의 10% 이하 수준에서 노출되고 있고 노출기준을 초과하는 경우는 용접흡에서 2건만 보고되었다.

〈표 III-6〉 작업환경측정 결과(2018-2020년)의 분포

구분	노출기준의 10% 이하	10% 초과, 50% 이하	50% 초과, 100% 이하	노출기준 초과	총합계
금속분진	116,816	201	2		117,019
피로파우더	4,396	6			4,402
용접흡	150,118	214	7	2	150,341
산화알루미늄	95,069	113	3		95,185
가용성염	48,875	114	2		48,991
알킬	9,582	2			9,584
총합계	424,856	650	14	2	425,522

나) 피로파우더의 오분류

안전보건공단 작업환경측정 자료 중 2020년 피로파우더 항목으로 측정된 자료를 추출하여 세세분류를 기준으로 정리하였을 때 결과는 아래와 같았다. 전체 피로파우더 측정건수 1,699건 중 피로파우더의 정의(건조 알루미늄 분말)에 맞게 분류된 것으로 보이는 측정건수는 1,189건(70.0%)으로 나머지 30.0%는 오분류된 것으로 추정된다. 가장 많은 측정건수는 도료/도장, 합성수지, 화장품 순서였다. 알루미늄의 공기중 농도는 반도체 소재 제조업에서 0.011 mg/m³으로 가장 높았다. 최대치는 0.121 mg/m³으로 화학제품을 생산할 때 촉매로 사용하는 경우가 가장 높았다.

〈표 III-7〉 2020년 피로파우더 측정 중 건조 알루미늄 분말 추정 공정

세세분류	측정건수	백분율	알루미늄 농도, mg/m ³	
			평균	최대치
도료/도장	562	47.3	0.003	0.029
건설	48	4.0	0.006	0.012
합금/주조	80	6.7	0.001	0.003
합성수지	283	23.8	0.001	0.011
화장품	137	11.5	0.002	0.090
반도체	30	2.5	0.011	0.069
색소	49	4.1	0.004	0.033
촉매	56	4.7	0.007	0.121
합계	1,189	100		

(2) 문헌에 나타난 알루미늄 노출수준

가) 국외 문헌

알루미늄 화합물은 수처리의 명반(황산알루미늄)과 연마재 및 로 라이닝(furnace linings)의 알루미늄과 같은 다양한 산업적 용도를 가지고 있다(ATSDR, 2008). 알루미늄에 대한 직업적 노출은 금속의 정제뿐만 아니라 항공기, 자동차 및 금속 제품과 같은 알루미늄 제품을 사용하는 산업과 알루미늄 용접에서도 발생한다. 알루미늄 생산에는 3 단계가 포함된다. (i) 보크사이트 광석에서 알루미늄을 추출하고 수산화알루미늄으로 침전시키고 산화알루미늄으로 전환한다. (ii) 산화물을 빙정석에 용해시키고 전기분해하여 순수한 용탕을 생성하고; (iii) 용융 알루미늄을 주조 공장의 잉곳(ingot)에 붓는다(ATSDR, 2008). 다양한 알루미늄 화합물에 대한 노출은 추출 및 정제 단계의 수산화알루미늄 및 산화물, potroom의 불화알루미늄(타르 피치 휘발성 물질 및 PAH 포함), 주조장의 알루미늄 흙과 함께 공정 전반에 걸쳐 발생한다(ATSDR, 2008; IARC).

직업적으로 알루미늄에 노출된 근로자에 대해 수행된 대부분의 연구는 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 콜타르 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 암처럼 그럴듯한 원인이 된다.

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 산화알루미늄으로 구성되어 있다(Rifat, 1990). McIntyre 분말을 투여하기 위해 작업자가 근무하기 전에 10분 동안 먼지를 흡입하는 가압 파이프를 통해 밀폐된 공간으로 부유된다(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).

나) 국내 문헌

김기연 등(2007)은 알루미늄 제조사업장을 방문하여 크기별 농도에 대한 상세한 조사를 하였다. 알루미늄 괴 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/m³으로, 금속 용해로에서는 2.021~5.315 mg/m³으로 나타났다.

<표 III-23> 다이캐스팅 용해로에서의 발생 물질 거리별 입경 특성과 알루미늄 함유 비율

	용해로 (0m)			용해로 (5m)			용해로 (10m)		
	중량분석 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Al (%)	Ratio* (%)	중량분석 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Al (%)	Ratio (%)	중량분석 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Al (%)	Ratio (%)
- 1차 측정									
>0.25 μm	0.113	0.021	18.6	0.177	0.041	23.2	0.087	0.010	11.5
1.0-2.5 μm	0.056	0.036	64.3	0.159	0.056	35.2	0.072	0.027	37.5
0.5-1.0 μm	0.028	0.006	21.4	0.084	0.023	27.4	0.058	0.013	22.4
0.25-0.5 μm	0.085	0.010	11.8	0.168	0.048	28.6	0.043	0.012	27.9
<0.25 μm	0.160	0.011	6.9	0.401	0.024	6.0	0.072	0.006	8.3
Total	0.442	0.084	19.0	0.989	0.192	19.4	0.332	0.068	20.5
Fume [†]	0.273	0.027	9.9	0.653	0.095	14.5	0.173	0.031	17.9
Ratio [‡]	61.8	32.1		66.0	49.5		52.1	45.6	
- 2차 측정									
>0.25 μm	0.254	0.046	18.1	0.298	0.068	22.8	0.178	0.043	24.2
1.0-2.5 μm	0.217	0.091	41.9	0.412	0.158	38.3	0.180	0.061	33.9
0.5-1.0 μm	0.066	0.022	33.3	0.125	0.036	28.8	0.086	0.021	24.4
0.25-0.5 μm	0.443	0.069	15.6	0.828	0.214	25.8	0.238	0.063	26.5
<0.25 μm	0.461	0.056	12.1	0.987	0.036	3.6	0.312	0.007	2.2
Total	1.441	0.284	19.7	2.650	0.512	19.3	0.994	0.195	19.6
Fume	0.970	0.147	15.2	1.940	0.286	14.7	0.636	0.091	14.3
Ratio	67.3	51.8		73.2	55.9		64.0	46.7	

[그림 III-10] 다이캐스팅 용해로에서 입자상물질의 크기 분포 및 알루미늄 성분비(김기연 등, 2007)

4) 주요 국가의 알루미늄 관련 노출기준

(1) 우리나라의 노출기준

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

〈표 Ⅲ-8〉 우리나라 알루미늄의 노출기준

일련 번호	유해물질의 명칭		화학식	노출기준(mg/m ³)		비고 (CAS번호 등)
	국문표기	영문표기		TWA	STEL	
375	알루미늄(가용성 염)	Aluminum(soluble salts)	Al	2	-	[7429-90-5]
376	알루미늄(금속분진)	Aluminum(metal dust)	Al	10	-	[7429-90-5]
377	알루미늄(알킬)	Aluminum(alkyls)	Al	2	-	[7429-90-5]
378	알루미늄(용접 흠)	Aluminum(welding fumes)	Al	5	-	[7429-90-5]
379	알루미늄(피로파우더)	Aluminum(pyro powders)	Al	5	-	[7429-90-5]
386	알파-알루미나	α-Alumina	Al ₂ O ₃	10	-	[1344-28-1]

(2) 미국의 노출기준

미국의 직업적 노출기준(occupational exposure limit, OEL)은 크게 3가지로

구분된다.

가) OSHA PELs

미국 직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)의 허용노출기준(Permissible Exposure Limits, PELs)에서 알루미늄은 크게 산화알루미늄과 알루미늄 금속으로 구분되며 총분진은 15 mg/m^3 , 호흡성분진은 5 mg/m^3 로 규정하고 있다. 다만 우리나라 노출기준 상 불용성 화합물은 알루미늄 금속으로 적용이 가능하다.

〈표 III-9〉 알루미늄의 OSHA PELs

Substances	CAS No.	노출기준(mg/m^3)	
		TWA	STEL
alpha-Alumina Total dust Respirable dust	1344-28-1	15 5	
Aluminum Metal (as Al) Total dust Respirable dust	7429-90-5	15 5	

나) NIOSH RELS

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 용접흄)으로 구분되면 산화알루미늄은 노출기준이 제정되어 있지 않다. 3가지로 구분하고는 있지만 세부적으로는 수용성염, 알킬, 피로파우더 및 용접흄이 제시되어 포함되어 있다. 알루미늄, 알루미늄 금속, 알루미늄 파우더, 원소 알루미늄은 총분진 10 mg/m^3 , 호흡성 분진은 5 mg/m^3 로 규정되어 있으며 알루미늄(가용성 염과 알킬)은 2 mg/m^3 , 알루미늄(피로파우더 및 용접흄)은 5 mg/m^3 로 제시되어 있다.

〈표 III-10〉 알루미늄의 NIOSH RELs

Substances	CAS No.	노출기준(mg/m ³)		Remarks
		TWA	STEL	
alpha-Alumina	1344-28-1	-	-	
Aluminum	7429-90-5	10(Total) 5(Resp)		Aluminium, Aluminum metal, Aluminum powder, Elemental aluminum
Aluminum (soluble salts and alkyls, as Al)	-	2		
Aluminum (pyro powders and welding fumes, as Al)	-	5		

다) ACGIH TLVs

미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) 서한도(Threshold Limit Values, TLVs)에서 알루미늄은 알루미늄 금속과 불용성화합물로만 규정하고 있으며 호흡성분진으로 1 mg/m³을 제시하고 있다. 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, 용접흄, 산화알루미늄 및 불용성화합물은 적용이 가능하다.

〈표 III-11〉 알루미늄의 ACGIH TLVs

Substances[CAS No.](Documentation data)	노출기준(mg/m ³)			MV	TLV Basis
	TWA	STEL	Notations		
Aluminum metal[7429-90-5] and insoluble compounds(2007)	1R	-	A4	26.98 Varies	Pneumococcosis, LRT irr, neurotoxicity

(3) 영국의 노출기준(WELs)

영국 보건안전청(Health & Safety Executive, HSE)의 작업장 노출기준(Workplace Exposure Limit, WELs)은 The Control of Substances Hazardous to Health Regulations 2002와 연계되어 있다. 알루미늄의 노출기준은 크게 알루미늄 알킬화합물, 알루미늄 금속, 산화알루미늄 및 알루미늄 가용성염으로 구분하고 있다. 알루미늄 알킬화합물과 알루미늄 가용성염은 2 mg/m³로, 알루미늄 금속과 산화알루미늄은 흡입성 분진 10 mg/m³, 호흡성 분진은 4 mg/m³로 규정되어 있다. 발암성 구분 및 피부흡수 표시는 되어 있지 않다.

〈표 III-12〉 알루미늄의 영국 WELs

Substances	CAS No.	Workplace exposure limit(mg/m ³)		Comments
		Long-term exposure limit (8-hr TWA reference period)	Short-term exposure limit (15 minute reference period)	
Aluminium alkyl compounds	-	2		
Aluminium metal inhalable dust respirable dust	7429-90-5	10 4	- -	
Aluminium oxides inhalable dust respirable dust	1344-28-1	10 4	- -	
Aluminium salts, soluble	-	2		

(4) 일본의 노출기준(OELs)

일본의 경우 직업적 노출기준은 2개로 구분되어 있다. 일본직업보건학회(Japan Society for Occupational Health, JSOH)의 직업적 권장노출기준(Recommendation of occupational exposure limits, ROELs)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/m³, 총분진은 2 mg/m³로 제시되어 다른 국가에 비해 가장 엄격하게 관리하고 있다.

〈표 III-13〉 알루미늄의 일본 ROEs

	Dusts	OEL(mg/m ³)	
		Respirable dust	Total dust
Class 1	Aluminum	0.5*	2**

*: Respirable crystalline silica and respirable dust consist of particles captured by the following collection efficiency, R (dae).

$$R(d_{ae}) = 0.5[1 + \exp(-0.06d_{ae})] [1 - F(x)]$$

d_{ae} : aerodynamic diameter of particle (μm), $F(x)$: cumulative distribution function of the standardized normal variable

$$x = \ln(d_{ae}/\Gamma)/\ln(\Sigma), \ln \text{ natural logarithm, } \Gamma = 4.25 \mu\text{m}, \Sigma = 1.5$$

** : Total dust comprises particles with a flow speed of 50 to 80 cm/sec at the entry of a particle sampler.

(5) 독일의 노출기준(MAKs)

Deutsche Forschungsgemeinschaft의 알루미늄에 대한 최대허용농도(Maximum Concentrations, MAKs)는 흡입성입자(4 mg/m³)와 호흡성입자(1.5 mg/m³)로 구분하고 그 수준이 마련되어 있으며 물질은 알루미늄, 산화알루미늄 및 분진을 포함한 수산화알루미늄을 통합하여 제시하고 있다. 특히 임신위험그룹을 D로 표기하고 있었다.

〈표 III-14〉 알루미늄의 독일 MAKs

Substances [CAS number]	Formula	MAK(mg/m ³)	Peak limitation	Pregnancy risk group
Aluminium- [7429-90-5], Aluminium oxide- [1344-28-1; 1302-74-5] and Aluminium hydroxide- [21645-51-2] containing dusts (inhalable fraction)	Al	4	-	D
Aluminium- [7429-90-5], Aluminium oxide- [1344-28-1; 1302-74-5] and Aluminium hydroxide- [21645-51-2] containing dusts	Al	1.5	-	D

Substances [CAS number]	Formula	MAK(mg/m ³)	Peak limitation	Pregnancy risk group
(respirable fraction)				

* Group D: Either there are no data for an assessment of damage to the embryo or foetus or the currently available data are not sufficient for classification in one of the groups A-C.

(6) 프랑스의 노출기준(VLEs)

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 용접흄, 알루미늄 금속, 알루미늄 분말, 알루미늄 가용성염으로 구분된다. 알루미늄 알킬화합물과 알루미늄 가용성 염은 2 mg/m³로, 알루미늄 용접흄과 알루미늄 분말은 5 mg/m³, 알루미늄 금속은 10 mg/m³으로 설정되어 있다.

〈표 III-15〉 알루미늄의 프랑스 VLEPs

Désignation	N° CAS	VLEP8h (mg.m-3)	FT n°	Année
Aluminium (composés alkylés)	-	2	-	1987
Aluminium (fumées de soudage)	-	5	306	1987
Aluminium (métal)	7429-90-5	10	306	1985

Désignation	N° CAS	VLEP8h (mg.m-3)	FT n°	Année
Aluminium (pulvérulent)	7429-90-5	5	306	1987
Aluminium (sels solubles)	-	2	306	1985
Aluminium (trioxyde de di-)	1344-28-1	10	306	1985

5) 국내외 알루미늄 화합물질별 노출기준

IFA(Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung)의 GESTIS-Stoffdatenbank에서 전 세계의 직업적 노출기준(International Limit Values)에 대한 정보가 제시되어 있다. 알루미늄 화합물의 노출기준 분류는 총 11가지로 확인되었다. 우리나라 직업적 노출기준에 알루미늄은 알루미늄 알킬, 알루미늄 금속, 산화알루미늄, 알루미늄 피로파우더, 알루미늄 가용성 염, 알루미늄 용접흄 6종에 대하여 설정되어 있어 이를 국내의 노출기준과 비교하였다.

〈표 III-16〉 알루미늄 화합물의 노출기준 정보

Substance	Remark	CAS No.
Aluminium alkyl compounds	as Al	7429-90-5
Aluminium fluoride		7784-18-1
Aluminium fluoride	as F	7784-18-1
Aluminium hydroxide containing dusts	7429-90-5	21645-51-2
Aluminium metal	-	7429-90-5
Aluminium (welding fume)	1344-28-1	
Aluminium, metal and its compounds, insoluble, respirable fraction		7429-90-5 1344-28-1
Aluminium, metal and oxide		7429-90-5 1344-28-1
Aluminium oxides		1344-28-1
Aluminium powder (pyrophoric)		7429-90-5
Aluminium; salts, soluble		

(1) 알루미늄(가용성염)

고용노동부의 알루미늄(가용성 염)에 대한 노출기준은 2 mg/m³으로 설정되어 있다. 덴마크(1 mg/m³), 스웨덴(1 mg/m³, 총분진) 및 뉴질랜드(5 mg/m³)를 제외하고 대부분의 국가에서 알루미늄(가용성 염)에 대한 노출기준을 2 mg/m³로 채택하고 있다.

〈표 III-17〉 알루미늄(가용성 염) / aluminum(soluble salts)

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Australia	2		
Belgium	2		
Canada - Québec	2		
Denmark	1 (1)	2	(1) Calculated as Al
Finland	2 (1)		(1) Calculated as Al
France	2		
Ireland	2		
New Zealand	5		
Norway	2 (1)		(1) as Al
Singapore	2		
South Korea	2		
Spain	2		
Sweden	1 (1)		(1) Total dust
Switzerland	2 inhalable aerosol		
United Kingdom	2		

(2) 알루미늄(알킬)

고용노동부의 알루미늄(알킬)에 대한 노출기준은 2 mg/m³으로 설정되어 있다. 알루미늄(알킬)의 노출기준은 가용성 염과 마찬가지로 ACGIH에서는 노출기준을 철회한 물질이다. 알루미늄(알킬)에 대하여 노출기준을 유지하고 있는 국가는 14개국으로 확인되었다. Austria를 제외한 모든 국가에서는 우리나라와 동일하게 2 mg/m³를 채택하고 있다.

〈표 III-18〉 알루미늄(알킬) / aluminum(alkyl compounds) [7429-90-5]

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Australia	2		
Austria	10 (1)	20 (1)(3)	(1) Inhalable fraction (2) Respirable fraction (3) 60 minutes average value
	5 (2)	10 (2)(3)	
Belgium	2		
Canada - Québec	2		
Denmark	2	4	
France	2		
Ireland	2		
New Zealand	2		
Norway	2		
Singapore	2		
South Korea	2		
Spain	2		

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Switzerland	2 (1)		(1) Inhalable aerosol
United Kingdom	2		

(3) 알루미늄(금속)

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/m³으로 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/m³)보다 완화된 노출기준을 설정하고 있는 것으로 확인되었다.

〈표 III-19〉 알루미늄(금속분진) / aluminum(metal dust) [7429-90-5]

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Australia	10		
Austria	10 (1)	20 (1)(3)	(1) Inhalable fraction
	5 (2)	10 (2)(3)	(2) Respirable fraction (3) 60 minutes

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
			average value
Canada-Ontario	1 (1)(2)		(1) Respirable aerosol (2) and insoluble compounds
Canada-Québec	10		
Denmark	5 inhalable aerosol	10 inhalable aerosol	
	2 respirable aerosol	4 respirable aerosol	
France	10 inhalable aerosol		
	5 respirable aerosol		
Germany(DFG)	4 (1)		(1) Inhalable fraction (2) Respirable fraction
	1,5 (2)		
Hungary	6 respirable aerosol		
Ireland	1 (1)		(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		

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
New Zealand	10	.	
People's Republic of China	3 (1)	.	(1) Inhalable fraction
Singapore	10	.	
South Korea	10	.	
Spain	10 inhalable aerosol	.	
	5 respirable aerosol	.	
Switzerland	3 respirable aerosol	.	
USA-NIOSH	10 (1)	.	(1) Total dust (2) Respirable fraction, pyro powders, 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	.	

(4) 알루미늄(용접흡)

우리나라 알루미늄(용접흡)에 대한 노출기준은 5 mg/m³으로 설정되어 있다. 알루미늄(용접 흡)의 노출기준을 보유하고 있는 국가는 우리나라를 포함하여 10개 국가로 확인되었다. 그 노출기준의 수준은 대부분 5 mg/m³로 제시되어 있지만 핀란드는 보다 강화된 1.5 mg/m³으로 규정하고 있다. 알루미늄(용접흡)에 대한 노출기준은 미국 ACGIH TLV에서 “알루미늄 금속 및 불용성화합물, 호흡성 입자물질(Aluminum metal and insoluble compounds, respirable particulate matter)에 해당되어 1 mg/m³으로 상당히 강화된 수준이다.

〈표 II-20〉 알루미늄(용접 흡) / aluminum(welding fume) [7429-90-5]

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Australia	5		
Canada - Québec	5		
Denmark	5	10	Calculated as Al
Finland	1,5 (1)		(1) calculated as Al
France	5		
New Zealand	5		
Norway	5		
Singapore	5		
South Korea	5		
Spain	5		

(5) 산화알루미늄

우리나라 산화알루미늄에 대한 노출기준은 TWA 10 mg/m³으로 설정되어 있다. 이와 더불어 단기간노출기준(STEL)을 설정하고 있는 국가는 오스트리아, 덴마크, 폴란드, 루마니아가 있었다.

산화알루미늄은 알파-알루미나로 불리기도 하며, 외국의 경우 알루미늄(금속)과 유사하기 입자 크기에 따라 노출기준을 구분하는 경우가 대부분이었다. 다만 우리나라를 포함한 3개 국가는 입자크기 구분 없이 노출기준을 설정하고 있었다.

한편 산화알루미늄에 대하여 흡입성 및 호흡성으로 구분하는 국가는 오스트리아, 아일랜드, 스웨덴, 스위스, 영국, 스페인, 덴마크, 프랑스, 독일 등이 있었다. 충분진 및 호흡성분진에 대한 구분은 폴란드와 미국 OSHA가 해당되었으며 미국 OSHA PEL의 노출기준은 충분진 15 mg/m³으로 가장 높은 수준이었고, 반면 미국 ACGIH의 노출기준은 1 mg/m³으로 우리나라 기준인 10 mg/m³의 1/10로 매우 강화된 수준이다.

〈표 III-21〉 산화알루미늄(알파-알루미나) / α -alumina [1344-28-1]

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Australia	10 (1)		(1) This value is for inhalable dust containing no asbestos and < 1% crystalline silica.
Austria	10 (1)	20 (1)(3)	(1) inhalable fraction (2) Respirable fraction (3) 60 minutes average value
	5 (2)	10 (2)(3)	
Canada - Québec	10		
Denmark	5 inhalable aerosol	10 inhalable aerosol	Calculated as AI
	2 respirable aerosol	4 respirable aerosol	

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
France	10 respirable aerosol		
Germany (DFG)	4 inhalable aerosol		
	1,5 respirable aerosol		
Hungary	6 respirable aerosol		
Ireland	10 (1)		(1) Inhalable fraction (2) Respirable fraction
	4 (2)		
Latvia	6		
New Zealand	10 (1)		(1) The value vor inhalable dust containing no asbestos and less than 1% free silica.
Norway	10		
Poland	2,5 (fume, total dust)	16	Aluminium trioxide as Al fume, total dust fume; respirable dust
	1,2 (fume, respirable dust)		
Romania	2 (1)	5 (1)(2)	(1) Aerosol (2) 15 minutes average value
Singapore	10		
South Korea	10		

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Spain	10 (1)		(1) Inhalable fraction
Sweden	5 inhalable aerosol		
	2 respirable aerosol		
Switzerland	3 respirable aerosol		
USA - OSHA	15 total dust		
	5 inhalable dust		
United Kingdom	10 inhalable aerosol		
	4 respirable aerosol		

(6) 알루미늄(피로파우더)

알루미늄(피로파우더)의 노출기준이 설정되어 있는 국가는 우리나라를 포함하여 7 개 국가로 다른 물질에 비해 설정된 국가가 많이 존재하지는 않았다. 우리나라는 입자 크기 구분없이 5 mg/m³으로 설정되어 있는데 호주, 캐나다-퀘벡, 뉴질랜드 및 노르웨이와 동일하다. 미국 ACGIH TLV의 경우 알루미늄(피로파우더)는 “알루미늄 금속 및 불용성화합물, 호흡성 입자물질(aluminum metal and insoluble compounds, respirable particulate matter)에 포함되어 1 mg/m³으로 다른 국가에 비해 상당히 강화된 수준이다.

〈표 III-22〉 알루미늄(피로파우더) / aluminum powder(pyrophoric) [7429-90-5]

국가	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Australia	5		
Canada - Québec	5		
Germany (DFG)	4 (1)		(1) Inhalable fraction
	1,5 (2)		(2) Respirable fraction
New Zealand	5		
Norway	5		
Poland	2,5 (fume, total dust)		Fume, total dust Fume, respirable dust
	1,2 (fume, respirable dust)		
South Korea	5		

6) 알루미늄에 대한 독성학적 고찰

(1) 알루미늄 화합물

알루미늄은 은백색 금속으로 가볍고 보크사이트와 같은 미네랄을 함유한 알루미늄에서 얻을 수 있다. 알루미늄은 공기, 물 및 토양에서 자연적으로 발생하는 지각에서 가장 풍부한 금속이자 세 번째로 풍부한 원소이다. 알루미늄 화합물은 산화알루미늄(Al_2O_3), 염화알루미늄(AlCl_3 , aluminum chlorohydrate), 수산화알루미늄($\text{Al}(\text{OH})_3$), 젖산알루미늄(aluminum lactate), 인화알루미늄(AlP), 인산알루미늄(AlPO_4) 및 질산알루미늄(aluminum(NO_3)₃) 등이 있다. 작업장에서 알루미늄 노출 가능성 및 현재의 체계적인 검토와 관련하여 알루미늄 원소 및 산화알루미늄(즉, 알루미늄이나) 가장 관련성이 높은 것으로 간주된다.

(2) 인간에 대한 알루미늄 독성 동태학(toxicokinetics) 및 독성 역학(toxicodynamics)

알루미늄과 그 화합물은 공기 중 분진과 입자 흡입, 음식과 물 섭취, 피부 접촉을 통해 인체로 흡수될 수 있다. 알루미늄은 섭취 및 흡입 경로를 통해 잘 흡수되지 않으며 기본적으로 피부로는 흡수되지 않는다(ATSDR, 2008).

이 체계적인 검토와 가장 관련이 있는 두 가지 유형의 알루미늄은 원소 알루미늄(Al)과 산화알루미늄(Al_2O_3)이다. 정보가 있는 경우 이러한 특정 유형의 알루미늄과 관련하여 흡수, 분포, 대사 및 제거/배설이 논의지만 대부분의 경우 구별되지 않는다.

알루미늄은 혈액, 소변 및 대변을 통해 측정할 수 있으며 도처에 있는 특성과 많은 식품 및 소비재에 존재하기 때문에 건강한 사람에게도 일상적으로 검출된다. 알루미늄 바이오마커 자료가 노출의 급격한 변화를 나타내지 않는다는 것이 일반적으로 수용되지만, 알루미늄에 안정적이고 지속적으로 노출되는 경우 요 중 알루미늄 측정이 적절한 지표가 될 수 있다.

가) 흡수

흡입 후 흡수되는 알루미늄의 비율은 독성 동태학적 연구에서 보고되지 않았다. 그러나 1.5-2%의 부분 흡수는 공기 중 알루미늄 수준과 소변 배설을 기반으로 추정되었다(Yokel & MacNamara, 2001). 또한, 알루미늄 분진에 비해 알루미늄 흡에 노출된 개인에서 폐에서 혈류로 알루미늄의 흡수가 더 높다고 제안되었으며, 이는 입자 크기 및 상대 흡수에 대한 이해와 일치한다(ATSDR, 2008). 여러 동물 연구에서 산화알루미늄에 흡입 노출된 후에도 알루미늄이 폐에 잔존하는 것이 발견되었다. 그러나 다른 조직이나 혈청에서는 유의한 증가가 발견되지 않았으며 이는 폐에서 발생하는 흡수보다 정체됨을 나타낸다(Steinhagen et al., 1978; Stone et al., 1979).

음식과 식수에 존재하는 알루미늄은 위장관에서 잘 흡수되지 않는다(ATSDR, 2008). 여러 인체 연구에서 식수를 통한 투여 후 알루미늄 흡수 효율이 0.07-0.39%로 추정되었다. 소변과 뼈의 부분 생체이용률을 고려한 다른 연구에서는 흡수율이 0.04-0.06%인 것으로 나타났으며, 간과 뇌 수준을 고려할 때 흡수율은 0.1%로 추정되었다(Jouhanneau et al., 1993; 1997). 식이에서 알루미늄 생체이용률은 알루미늄의 형태와 구연산과 같은 복합물을 형성할 수 있는 다른 식품 성분의 존재에 크게 의존된다. 사용 가능한 증거에 따르면 알루미늄의 경구 흡수는 화학적 형태에 따라 10배 차이가 날 수 있다(ATSDR, 2008).

피부 흡수의 경우 제한된 자료가 활용 가능하다. 그러나 발한 억제제에 존재하는 알루미늄 클로로하이드레이트 염은 0.012%의 흡수율로 두 명의 대상에 대해 검사되었다(Flarend et al., (2001).

나) 분포

알루미늄은 약 30-50 mg의 신체 부담과 1-3 $\mu\text{g}/\text{L}$ 의 전형적인 혈청 수준을 갖는 건강한 개인의 모든 신체 조직에서 자연적으로 발생하는 것으로 발견될 수 있다(ATSDR, 2008). 알루미늄의 전체 신체 부담 중에서 약 절반은 뼈에서, 1/4은 폐에서 찾을 수 있다(Ganrot, 1986). 성인의 폐에 있는 알루미늄의 정상 수치는 체중 kg당 20 mg이며 흡입된 불용성 알루미늄 화합물의 축적으로 인해 나이가 들수록 증가한다(ATSDR, 2008). 흡입 노출 후 알루미늄의 분포에 관한 제한된 정보를 이용할 수 있다. 그러나 한 연구에서는 알루미늄을 흡입한 것으로 추정되는 사망한 석공

의 폐, 림프절, 간 및 비장에서 높은 수준의 알루미늄을 발견했다. 알루미늄 화합물을 흡입하면 입자 크기에 따라 침착된다. 큰 입자는 숨을 내쉬거나 상부 호흡기에 갇히는 반면 작은 입자는 폐포에 도달하여 혈액으로 이동될 수 있다(ATSDR, 2008). 일단 혈류에 들어가면 알루미늄은 트랜스페린과 결합하는 혈장에 거의 독점적으로 존재하는 것으로 생각됩니다(> 90% 알루미늄은 이러한 방식으로 결합하는 것으로 추정). 알루미늄이 신체의 기관과 조직으로 세포로 흡수되는 것은 주로 트랜스페린의 결합으로 인해 느린 과정으로 생각된다(Ganrot, 1986).

다) 대사

살아있는 유기체에서 알루미늄은 4가지 다른 형태로 존재하는 것으로 생각된다. ① 자유 이온; ② 저분자량 복합체로서; ③ 물리적으로 결합된 거대분자 복합체, ④ 공유결합된 거대분자 복합체(ATSDR, 2008). 자유 이온 Al^{+3} 은 많은 다른 구조와 물질에 쉽게 결합하므로 대사 운명은 이러한 결합 복합체의 친화도와 대사에 의해 크게 결정된다. 일반적으로 저분자량 복합체는 더 큰 거대분자 복합체보다 대사적으로 더 활동적이다. 알루미늄은 또한 본질적으로 비가역적이며 대사를 억제하는 매우 안정적인 거대분자와 결합을 형성할 수 있다(ATSDR, 2008).

라) 제거와 배설

흡입 및 경구 노출 후 흡수된 알루미늄의 주요 배설 경로는 소변을 통한 것이다. 알루미늄의 자연적 존재와 일반적인 식품을 통한 섭취로 인해 모든 사람들은 소변에 일정 수준의 알루미늄을 함유하게 된다. 다양한 금속의 혈액 및 소변 수치 조사에서 혈액 알루미늄 농도는 일반적으로 $10 \mu\text{g}/\text{dL}$ 미만이었다(ATSDR, 2004). 노출되지 않은 사람의 소변 알루미늄 농도의 평균값은 $4\sim 11 \mu\text{g}/\text{l}$ 범위에 있는 것으로 보고되었다(Sinczuk et al., 2003).

증거에 따르면 소변 배출은 노출 후 7.5일에서 9일 사이의 첫 번째 단계와 6.8주에서 24주 사이의 두 번째 단계의 배설 반감기로 두 단계로 존재한다(Sjogren et al., 1985; 1988; 1990). 이전에 알루미늄에 노출되지 않은 새로운 알루미늄 제련소 작업실 작업자의 알루미늄 흡수 및 배설에 대한 연구에서 Rollin et al.(2001)은 36개월에 걸쳐 평균 기준선 농도 $24 \mu\text{g}/\text{l}$ 에서 $49 \mu\text{g}/\text{l}$ 로 알루미늄의 소변 배설이 선

형 증가하는 것을 보여주었다. 저자들은 이것이 알루미늄의 소변 제거 속도가 느리다는 것을 시사한다고 결론지었다.

마) 노출과 영향의 바이오마커(biomarker)

영향에 대한 바이오마커는 "크기에 따라 확립된 또는 잠재적인 건강 손상 또는 질병으로 인식될 수 있는 유기체 내에서 측정 가능한 생화학적, 생리학적 또는 기타 변경"으로 정의되었다(NAS/NRC 1989).

알루미늄은 혈액, 소변 및 대변에서 측정할 수 있으며 어디에나 있고 많은 식품에 존재하기 때문에 건강한 사람에게서 일상적으로 발견된다. 그러나 알루미늄 노출 및 특정 건강 결과에 대한 지침은 사용할 수 없다. 산업 질병 표준 패널(IDSP)이 발표한 1992년 보고서에 따르면 "혈액이나 소변 알루미늄 수치는 직업 건강 위험을 예측하거나 알루미늄의 신체 부담을 추정하는 데 좋은 지표가 아니다"라고 명시되어 있다. 1992년 이후 이 보고서에 대한 업데이트가 없었지만 ATSDR(2004)은 알루미늄이 잘 흡수되지 않기 때문에 노출 수준을 소변 또는 혈청 수준과 동일시하는 것이 불가능하다고 언급하였다. 24시간 소변 시료가 신체에 알루미늄이 존재하는지 여부를 결정하는 데 가장 좋지만 노출 수준을 결정하기 위해 외삽할 수는 없다. 또한 알루미늄으로 인한 영향의 바이오마커로 사용할 수 있는 단순하고 비침습적인 검사는 알려져 있지 않았다(ATSDR, 2008). IDSP는 또한 알루미늄 노출의 양과 제거를 우회하고 대신 신체에 흡수되어 조직에 축적되는 알루미늄의 양을 구별하는 것의 중요성에 대해 논의했다(IDSP, 1992).

“불행하게도 노출 수준은 혈청 또는 소변 수준과 매우 정확하게 관련될 수 없다. 주로 알루미늄은 어떤 경로로도 매우 잘 흡수되지 않고 특히 경구 흡수는 다른 동시 섭취에 의해 상당히 영향을 받을 수 있기 때문이다. 높은 노출 수준이 소변 수준에 반영된다는 표시가 있지만 많은 양의 알루미늄이 빠르게 배설될 수 있으므로 이를 정량화할 수 없다. 알루미늄은 대변에서도 측정할 수 있지만 흡수를 추정하는 데 사용할 수는 없다”(ATSDR, 2008).“

그럼에도 불구하고 알루미늄에 대한 직업적 노출에 대한 많은 역학 연구는 노출의 지표로 바이오 모니터링 측정을 사용한다. 알루미늄 바이오마커 자료가 알루미늄 노출의 급격한 변화를 나타내지 않는다는 것은 일반적으로 인정되지만 근로자의 알루미늄 바이오모니터링 자료의 장기적 안정성에 관한 정보는 제한적이다. 섹션 2.2.4

에 설명된 알루미늄 흡수 및 제거의 느린 생물학적 과정을 고려할 때 알루미늄에 대한 안정적이고 지속적인 노출의 경우 알루미늄 생체 모니터링 조치가 적절한 지표가 될 수 있다. Kiesswetter et al (2009)은 알루미늄 용접공 및 참조 대상에 대한 종단 연구에서 반복적인 생체 모니터링 측정을 수행했다. 4년 동안 3번의 반복 측정에는 공기 중의 총분진, 교대 전후의 알루미늄 혈장 농도 및 크레아티닌 보정 알루미늄 소변 농도가 포함되었다. 알루미늄 신체 부담에 대한 교대 전후 측정 사이에는 현저한 차이가 없었으며, 이는 알루미늄-플라즈마 및 뇨 중 알루미늄 자료가 알루미늄 노출의 급격한 교대 의존적 변화의 지표로 적합하지 않음을 시사한다. 그러나 알루미늄-플라즈마는 먼저 노출과 전반적인 관계가 좋지 않고 측정 기간에 따른 높은 변동성을 보여주었지만, 교대 후 크레아티닌이 보정된 뇨 중 알루미늄은 외부 분진 노출과 상당한 상관관계를 보였다. 또한 알루미늄/g 크레아티닌은 모든 검사에서 노출된 작업자와 노출되지 않은 작업자를 명확하게 구분한 반면, 알루미늄-플라즈마는 그렇지 않았다.

바) 독성 및 생물학적 타당성의 메커니즘

알루미늄 독성의 정확한 생물학적 메커니즘은 알려져 있지 않지만 생물학적 시스템에서 양이온(예: 마그네슘)과 경쟁하고 2차 메신저 시스템 및 칼슘 가용성에 영향을 미치며 세포핵의 구성요소에 결합하는 것으로 밝혀졌다(ATSDR, 2008). 알루미늄 독성이 발생한 경우 표적 기관은 폐, 뼈 및 중추 신경계로 보인다. 알루미늄에 대한 인체 독성에 대한 특정 분자 메커니즘은 확인되지 않았다(ATSDR, 2008).

(3) 신경독성(Neurotoxicity)

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. 알루미늄 독성의 메커니즘을 완전히 설명하기에는 증거가 충분하지 않지만 몇 가지 일반적인 과정이 확인되었다. 예

를 들어, 특정 종(예: 고양이, 토끼, 흰 족제비 및 인간이 아닌 영장류)에 대한 연구에서 특정 노출(예: 뇌내 및 수조 내 투여)에 대한 뇌 뉴런 내의 세포골격 단백질의 변화를 확인했다. 이러한 변화는 다른 신경퇴행성 장애에서 확인된 것과 유사하여 비정상적인 신경 기능이 세포골격 변화와 관련될 수 있음을 시사한다(ATSDR, 2008). 설치류에서 관찰된 신경 행동 효과(예: 운동 독성, 학습 및 기억)의 변화는 세포골격 병리학의 변화를 나타내지 않았지만 알루미늄이 다음에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다(ATSDR, 2008):

- i. 혈액-뇌 장벽의 투과성;
- ii. 콜린성 활동(Cholinergic activity);
- III. 신호 전달 경로;
- iv. 지질 과산화;
- v. 뉴런 글루타메이트 산화질소 순환 GMP 경로; 그리고,
- vi. 필수 미량 원소(예: 철)의 대사

ATSDR(2008)은 동물 연구에서 인간에 대한 이러한 영향을 외삽하는 것은 인간 데이터베이스의 한계로 인해 결정적으로 결정할 수 없다고 언급하고 있다. 알루미늄의 독성에 대한 정보는 충분하지 않다. 그 이유는 많은 연구가 신장 결핍증이 있는 개인에 대해 수행되었기 때문이다.

알루미늄 독성과 관련하여 가장 높은 위험에 처한 인구는 신부전 환자이다. 초기 연구에 따르면 투석을 받은(100%) 요독증 환자와 투석을 받지 않은(82%) 알루미늄의 신체 부담이 증가했다(Alfrey, 1980). 신장 기능의 감소는 신체의 알루미늄 배설 능력을 방해하고 인산염의 위장 흡수 감소 및 투석을 통한 알루미늄 섭취의 증가는 알루미늄의 신체 부담을 증가시켰다. 요독증 환자의 이러한 증가된 신체 부담은 투석 뇌병증(투석 치매), 골 독성 및 조혈 독성과 관련이 있었다(ATSDR, 2008). 알루미늄 노출과 신경학적 영향 사이의 가능한 연결을 처음으로 확립한 것은 이 초기 작업이었다. 그러나 이 인구집단은 신부전으로 인해 고 위험군으로 간주되며 이러한 연구의 결과 및 결과를 건강한 개인에게 외삽하는 것은 곤란하다.

결과적으로, 현재까지 알루미늄 노출의 가장 많이 연구된 영향 중 하나는 언어 장애, 신경정신병적 이상 및 다초점 근간대성 근경련을 포함하는 투석 뇌병증이다(Health Canada, 1998). 다른 더 미묘한 증상으로는 "테트라하이드로비오테린 대

사 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).

알루미늄 분진과 흡에 노출된 작업자의 미묘한 신경학적 영향이 관찰된 연구가 있지만 이러한 연구는 만성 노출과 신경학적 효과 사이의 관계에 대한 암시적인 증거만 제공한다. 동물의 알루미늄 독성은 더 잘 이해될 수 있다. 그러나 만성적인 저용량 알루미늄이 같은 방식으로 사람에게 나타날 것인지 여부는 아직 결정되지 않았다(ATSDR, 2008).

(4) 폐독성(Lung Toxicity)

지난 50년 동안 의학 문헌은 알루미늄 분말의 생산 또는 사용과 주로 관련된 알루미늄 또는 산화알루미늄 분진으로 인한 진폐증이 있었지만 대부분 임상적으로 경미한 사례를 보였다(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(다환성방향족탄화수소)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 것이 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 흡입 흡입으로 인한 특정 독성 메커니즘을 식별하기 어렵다는 사실을 논의했다.

"영향이 먼지 과부하로 인한 것인지 아니면 알루미늄으로 인한 것인지를 결정하기 위해 폐 독성의 메커니즘을 평가하려면 추가 흡입 연구가 필요하다. 신경계를 포함한 광범위한 잠재적 종말점을 조사하는 흡입 연구는 흡입된 알루미늄의 가장 민감한 효과를 확인하는 데 유용할 것이다"(ATSDR, 2008).

(5) 뼈 독성(Bone Toxicity)

뼈가 부드러워지는 골연화증은 건강한 사람과 신부전이 있는 사람에게서 알루미늄 노출과 관련이 있다(ATSDR, 2008). 이 결과는 궤양, 산통 또는 위염과 같은 위장관 장애의 증상을 치료하기 위해 알루미늄 함유 제산제를 섭취한 결과이다. 독성 메커니즘은 식이 인에 대한 제산 결합이며 인의 위장관 흡수를 억제한다. 골연화증과 구루병은 인의 신체 부담 감소에 기인할 수 있다(ATSDR, 2008).

(6) 발암성(Carcinogenicity)

알루미늄은 국제 암 연구 기관(IARC)에서 발암 물질로 분류되지 않았다(Krewski et al., 2007). 그러나 "알루미늄 생산(aluminum production)"은 인간에게 발암성으로 분류되었다(Group 1):

"알루미늄 생산에서 직업적 노출의 발암 효과에 대한 역학 연구의 충분한 증거가 있었는데, 이는 방광암의 지속적인 과도함과 폐암의 다소 덜 일관된 과도함을 보여주는 비교적 많은 연구를 기반으로 한다."(IARC, 2010).

알루미늄 제련소 노동자의 관점에서 IARC 모노그래프는 다음과 같이 기술하고 있다.

"전반적으로, 코호트 연구는 알루미늄 제련소에서의 작업과 방광암 위험 사이의 연관성을 강력하게 지지한다. 혼란이나 우연은 결과를 설명하지 못할 것이다. 알루미늄 제련소에서 직업적 노출로 인해 방광암 위험이 증가한다. 알루미늄 생산 산업의

모든 역학 연구는 아니지만 여러 연구에서 폐암 위험 증가가 발견되었다. 일부 연구는 B[a]P-years 측면에서 용량-반응 경향을 보여주기도 한다. 흡연이나 우연으로 인한 혼란은 결과를 설명하지 못한다. 이러한 관찰에 기초하여, 폐암 위험이 알루미늄 제련소에서의 작업과 인과적으로 연관되어 있다는 증거가 있다. 노출 상황, 특히 알루미늄 제련소의 PAH 수준은 산업 부서마다 다르며 사용되는 공정에 따라 다르다. 그러나 이러한 다양한 노출 상황과 관련된 암 위험을 분산시키기에는 자료가 충분하지 않다”(IARC, 2010).

보고서는 구성 요소별 암 위험을 결정하기 위해 알루미늄 생산과 관련된 개별 화학 물질 노출을 분리하는 것이 불가능하다는 점을 지적하지만 PAH는 IARC에서 검토한 연구에서 우려되는 주요 노출이었다.

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, 2010).

(7) 사망률(Mortality)

페인트, 폭발물 및 불꽃놀이에 사용되는 미세 분말 금속 알루미늄의 흡입으로 인한 여러 사망이 보고되었다. 그러나 분진 수준은 51 mg Al/m^3 의 호흡 가능한 먼지 농도와 함께 극도로 높았다($615\text{--}685 \text{ mg Al/m}^3$). 이러한 사건은 수십 년 전의 일이며 생산 기술의 개선으로 이러한 유형의 노출이 크게 감소했다(Mitchell et al., 1961). 또한 동물에 대해 수행한 실험 중 급성 및 만성 노출 후 알루미늄 또는 알루미늄 화합물에 대한 흡입 노출로 사망한 사례는 없다(ATSDR, 2008).

알루미늄 섭취와 관련하여 사람에게 경구 노출된 후 알루미늄 관련 사망에 대한 보고는 없었다. 섭취하면 생명을 위협할 수 있는 한 가지 알루미늄 화합물은 알루미늄 인화물이지만 독성은 섭취 후 체내에서 생성되는 포스핀 가스에서 비롯된다(ATSDR, 2008).

(8) 직업적 노출기준(occupational exposure limits)의 독성학적 근거

미국 직업안전보건청(OSHA), 미국산업위생전문가협회(ACGIH), 미국 국립직업 안전보건연구소(NIOSH)를 비롯한 여러 기관에서 다양한 형태의 알루미늄에 대한 직업적 노출에 대한 기준치를 설정했다. 산화알루미늄, 알루미늄 분말(원소) 및 알루미늄 용접 흠에 대한 값은 <표 III-23>과 같이 보고되어 있다.

〈표 III-23〉 알루미늄에 대한 직업적 노출기준

국가	OSHA PEL (mg/m ³)	ACGIH TLV (mg/m ³)	NIOSH REL (mg/m ³)	UK 8-hr OELV (mg/m ³)	Australia TWA (mg/m ³)
Aluminum Oxide (respirable fraction)	5	1	Not established	4	Not established
Aluminum Oxide (total dust)	15	1	Not established	10	10
Aluminum (as Al), Metal (total dust)	15	Not established	10	10	10
Aluminum (as Al), Welding Fumes	Not established	Withdrawn in 2004	5	Not established	5

직업적 노출기준은 다양한 유형의 건강 평가변수를 기반으로 한다. 예를 들어, 알루미늄 금속(총분진)에 대한 OSHA 허용노출기준(PEL)은 물리적 자극을 근거로 하고, NIOSH 권장노출기준(REL)은 알루미늄 금속(총분진)을 기반으로 하여 폐 섬유증 및 알루미늄 용접 흠에 대한 기준이며, NIOSH 권장노출기준(REL)은 폐 섬유증을

악화시킬 수 있는 폐 변화뿐만 아니라 진폐증 및 기관지염과 같은 만성 호흡기 질환을 근거로 한다.

기타 잠재적인 건강 영향 및 위험에는 호흡기 영향, 특히 알루미늄 분진 또는 흡에 노출된 근로자의 폐기능 장애 및 섬유화가 포함된다(ATSDR, 2008). 지속적이고 반복적인 호흡 장애, 반복적인 쉼썩거림, 천식 발작 및 의사가 진단한 천식을 보고한 알루미늄 주물 공장 작업자에게서 증가된 호흡기 증상이 보고되었다(van Rooy et al. 2011). 이러한 결과는 대조군으로 사용된 내부 참조 그룹뿐만 아니라 일반 모집단 샘플과 비교하여 기록되었다(van Rooy et al., 2011). 또한 알루미늄 먼지와 연기에 장기간 직업적으로 노출되면 담즙정체(cholestasis) 증상이 나타날 수 있다(Bogdanovic and Bulat, 2008).

(9) 메타 분석

알루미늄 노출에 대한 여러 문헌 검토 및 메타 분석이 완료되었다. 알루미늄에 대한 만성적인 직업적 및 비직업적 노출과 불리한 건강 상태에 초점을 맞춘 이러한 검토의 요약이 제공된다. 초점의 대부분은 알루미늄과 치매 및 관련 장애 사이의 잠재적 연관성에 있다. 이러한 연구 중 일부의 주요 결과와 전반적인 결론은 아래에서 논의된 다음 McIntyre 분말에 대한 직업적 노출과 관련하여 맥락화된다.

알루미늄 작업자의 신경 행동 효과 크기 추정치를 결합하기 위해 메타 분석이 수행되었다(Meyer-Baron et al., 2007). 분석에서 고려된 최종 대상에는 449명의 노출된 피험자와 315명의 비교 대상을 조사한 9개의 연구가 포함되었다. 요 중 알루미늄 농도는 13~133 $\mu\text{g}/\text{l}$ (평균) 범위였으며 총 6개의 신경심리학적 검사가 고려되어 10개의 성능 변수가 생성되었다. 숫자 기호(digit symbol) 신경 행동 검사에서 통계적으로 유의한 성능 저하가 발견되었다. 그러나 다른 중요한 효과는 확인되지 않았다. 저자는 연령, 교육 및 알코올 소비의 교란인자를 조사하기 위해 탐색적 접근 방식을 사용했으며 교란을 보정하면 효과 크기가 더 작아짐을 발견했다. 따라서 저자는 교란 효과의 가능성을 배제할 수 없음이 인정되었다. 그들은 "알루미늄이 인지 능력에 미치는 영향을 확인하고 차별화하기 위해 추가 연구가 필요하다"고 결론지었다(Meyer-Baron et al., 2007).

알루미늄과 알츠하이머병에 대한 직업적 노출을 구체적으로 조사한 보다 최근의 메타 분석은 Virk and Eslick(2015)에 의해 수행되었다. 이 분석은 직업적 알루미늄 노출과 알츠하이머병 위험 사이의 연관성을 체계적으로 정량화하기 위한 것이며 2015년까지 발표된 통제된 직업적 연구를 포함했다. 1,056명의 참가자를 포함한 3개의 사례-대조 연구는 포함 기준을 충족했다: Graves et al.(1998), Gun et al.(1997), 그리고 Salib et al.(1996). 분석 결과 직업적 알루미늄 노출은 알츠하이머병과 관련이 없는 것으로 나타났다(Odds Ratio 1.00; 95% 신뢰구간 0.59-1.68). 저자들은 그들의 발견이 알츠하이머병의 발병기전에서 알루미늄의 원인적 역할을 지지하지 않는다고 결론지었다. 그러나 그들은 "노출을 보다 정확하게 확인하는 전향적 연구가 없으면 알루미늄의 역할을 완전히 배제할 수 없다"고 결론지었다(Virk and Eslick, 2015).

상당한 수의 연구에서 음용수의 높은 알루미늄 수치가 인지 장애 및 알츠하이머병 치매의 위험 증가와 관련이 있다고 보고되었다. 포괄적인 문헌 조사에서 식수 내 알루미늄과 알츠하이머병에 대한 13건의 발표된 역학 연구 중 9건은 상대적 위험이 일반적으로 높지는 않았지만 통계적으로 유의미한 양의 관계를 보여주었다(Flaten, 2001). 대부분의 연구는 지리적 지역의 알츠하이머병 발병률과 식수 내 알루미늄 농도 간의 관계를 연구했다는 점에서 생태학적 설계였다. 더욱이, 그들의 해석에서 주요 문제는 높은 알루미늄 농도에서도 식수가 알루미늄의 총 식이 섭취량의 일부에만 기여한다는 것이다.

최근 검토에서 알루미늄에 대한 만성 노출과 알츠하이머병 위험에 대한 메타 분석이 완료되었다(Wang et al., 2016). 분석에는 직업적 노출 및 비직업적 노출(예: 식수)을 포함한 모든 경로를 통한 알루미늄 노출이 포함되었다. 총 8건의 역학 연구(10,567명 포함)가 메타 분석에 포함되었다. 4개의 직업 및 4개의 식수 연구. 전반적인 결과는 알루미늄에 만성적으로 노출된 개인이 알츠하이머병에 걸릴 확률이 71% 더 높은 것으로 나타났다(OR: 1.71, 95% 신뢰 구간 1.35~2.18).

이 메타 분석에서 만성 노출은 100 $\mu\text{g/L}$ 이상의 음용수 내 알루미늄 농도, 알루미늄의 상당한 일일 소비 또는 알루미늄에 대한 직업적 노출로 정의되었다. 하위 그룹 분석에서 식수(1.95, 95% CI: 1.47-2.59)의 알루미늄 노출을 조사한 연구의 효과 추정치는 직업적 알루미늄 노출(1.25, 95% CI: 0.80~1.94). 이러한 결과는 직업적으로 알루미늄에 노출된 사람들이 공공 식수를 통해 노출된 지역 사회보다 훨씬

더 높은 수준의 알루미늄 수치를 경험할 것이라는 점을 감안할 때 의문이 제기된다. 이 결과는 다양한 출처의 알루미늄의 다양한 생체이용률을 반영할 수 있다. 예를 들어, 알루미늄은 위장관에서 잘 흡수되지 않지만 음용수 공급에 존재할 수 있는 유기 물질이 있는 경우 흡수가 증가할 수 있다. 한편, 식수에서 평균적으로 소비되는 알루미늄의 양은 총 알루미늄 식이 섭취량의 약 4%에 불과하다는 점에 유의하는 것이 중요하다. 저자들은 메타 분석의 한계가 알루미늄 노출의 다른 출처(의약품, 가공 식품, 예방 접종, 자외선 차단 로션, 탈취제 및 기타 출처 포함)에 대한 고려 부족과 용량-반응 관계에 대한 고려되지 않았다고 설명한다(Wang et al., 2016). 연구 결과의 장점은 연구 간에 상당한 이질성이 없고 명백한 출판 편향이 없다는 것이다.

종합적으로, 알루미늄 노출 및 건강 영향에 대한 역학 문헌의 체계적인 검토 및 메타 분석은 품질, 접근 방식 및 결과에서 다양하다. 이러한 고찰과 알루미늄, 특히 McIntyre 분말에 대한 직업적 노출 가능성과 관련하여 알루미늄과 관련하여 용량-반응 관계가 아직 해결되지 않은 것이 분명하다. 알루미늄은 신체 조직으로 흡수되지 않고 오히려 소변과 대변을 통해 대부분 배설된다는 데 일반적으로 동의된다. 또한 알루미늄은 어디에서나 볼 수 있는 특성으로 인해 식수, 식품 및 널리 사용되는 소비재(예: 발한 억제제, 의약품 등)에 알루미늄이 존재한다는 사실로 인해 직업적 노출 가능성이 복잡해진다. 알루미늄과 신경계 장애 사이의 연관성을 지지하는 일부 역학 연구가 있었지만 증거의 우세는 신경계 결과의 원인으로서 환경 알루미늄의 중요한 역할에 반대한다.

2. 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사

1) 실태조사 대상 특성

알루미늄 형태별로 가용성염, 금속분진, 용접흄, 피로파우더, 산화알루미늄으로 구분하여 각 형태마다 2~3개의 사업장을 선정하여 해당 공정 및 기기 주변에서 지역 측정을 하였다. 다만, 알킬에 대해서는 사용업체의 출입이 제한되는 등 어려움이 있어 실태조사를 실시하지 못하였다. 알킬 외 각 형태별 호흡성 분진과 총분진의 차이 및 크기 분포를 파악하기 위하여 총분진과 호흡성 분진을 동시에 측정하였고, 각 사업장마다 OPS를 이용한 크기 분포 측정을 실시하였다.

〈표 III-24〉 실태조사 사업장 현황

유해인자 형태	번호	공정	작업내용
알루미늄 (가용성염)	사업장 1	폐수처리	황산알루미늄 투입 및 폐수처리 관리
	사업장 2	폐수처리	황산알루미늄 투입 및 폐수처리 관리
알루미늄 (금속분진)	사업장 3	절단	알루미늄 파이프를 절단기에 넣고 절단
	사업장 4	연마	알루미늄 구조물 수동연마
	사업장 5	절단	알루미늄 샷시를 절단기에 넣고 절단 후 가공/조립
알루미늄 (용접흄)	사업장 6	다이캐스팅	알루미늄괴(84~85%)를 다이캐스트에 주입하여 성형된 제품을 수거 및 관리
	사업장 7	용해	비철금속을 용해하여 합금괴 제조(알루미늄 함유 0.8%전후)
	사업장 8	용접	알루미늄이 6-8.5%함유된 ERCuAl-A1용접봉을 사용하여 용접작업
알루미늄 (피로파우더)	사업장 9	분체도장	가루형태의 도료를 스프레이 분사하여 자재에 도포할 때 발생

유해인자 형태	번호	공정	작업내용
	사업장 10	믹싱1, 2	알루미늄 파우더를 비롯한 원자재들을 첨가하여 믹싱
산화알루미늄	사업장 11	표면연마	연마재(알루미나)로 제품 표면에 광택
	사업장 12	자동샌딩	산화알루미늄이 96.5%함유된 쇼트볼로 자동샌딩하는 과정에서 쇼팅 대상물의 입출고 및 관리

2) 알루미늄 형태별 노출 수준(ICP로 분석)

(1) 알루미늄(가용성염)

사업장 1과 2는 공장내 폐수처리장으로 황산알루미늄을 직접 투입할 때와 폐수처리를 관리하는 과정에서 알루미늄이 가용성염으로 발생될 가능성이 있어 측정을 실시하였다. 동일한 곳에서 3개의 나일론 사이클론과 3개의 총분진용 카세트홀더로 측정하였다. ICP로 분석한 결과 사업장 1은 나일론 사이클론으로 측정한 호흡성 결과가 평균 0.00004 mg/m³으로 분석되었고, 카세트홀더로 측정한 총분진은 모두 불검출로 분석되었다. 사업장 2는 호흡성 결과가 평균 0.0006 mg/m³으로 분석되었고, 총분진은 평균 0.0004 mg/m³으로 분석되었다.

사업장1과 2에서 호흡성분진이 미미한 차이로 높게 나왔으나 사업장1,2의 호흡성 결과가 가용성염 노출기준 2 mg/m³와 비교한다면 매우 낮아 호흡성 측정결과와 총분진 결과의 수치적 차이를 구별짓기 어려웠다.

〈표 III-25〉 알루미늄(가용성염) 실태조사 결과

mg/m ³	호흡성 결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
사업장1	0.0001	0.00002	불검출	0.00004	불검출	불검출	불검출	불검출
사업장2	불검출	0.0018	불검출	0.0006	0.0012	불검출	불검출	0.0004

(2) 알루미늄(금속분진)

사업장3은 알루미늄 폴대를 잘라서 텐트를 만드는 업체로 table saw를 이용하였다. 동일한 곳에서 3개의 나일론 사이클론과 3개의 총분진용 카세트홀더로 측정하여 ICP로 분석한 결과 호흡성의 경우 평균 0.0009 mg/m³으로 분석되었고, 총분진은 평균 0.0776 mg/m³으로 분석되었다. 총분진 결과 중 극단값인 0.2313 mg/m³을 제외한

다면 평균 0.0008 mg/m^3 로 호흡성의 결과와 비슷한 수준으로 낮아진다.

사업장4는 알루미늄 구조물을 수동으로 연마하는 공정에서 3개의 나일론 사이클론과 3개의 총분진용 카세트홀더로 측정하여 ICP로 분석한 결과 호흡성의 경우 평균 불검출로 분석되었고, 총분진은 평균 0.0390 mg/m^3 으로 분석되었다. 총분진의 극단값인 0.1163 mg/m^3 을 제외하면 평균 0.0004 mg/m^3 로 매우 낮아진다.

사업장5의 측정공정은 창호를 만드는 과정에서 창호 틀에 삽입되는 알루미늄 샷시를 절단하는 곳이었다. table saw로 샷시를 절단하고 조립하는 과정 중 알루미늄 절단분진이 발생하고 있었다. 공정 내에 각각 4개의 나일론 사이클론과 4개의 총분진용 카세트홀더를 이용하여 측정한 후 ICP로 분석한 결과의 평균은 각각 0.0013 mg/m^3 , 0.0064 mg/m^3 으로 평가되었다. 총분진 결과 중 극단값인 0.0239 mg/m^3 를 제외하면 0.0003 mg/m^3 으로 매우 낮아져 호흡성 결과와 구분되는 차이가 없어진다.

알루미늄(금속분진)의 극단값 발생현상은 각 사업장의 절단, 연마분진의 크기가 상대적으로 크며, 작업자가 작업하는 과정에서 총분진의 카세트 홀로 굽은 입자의 분진이 날라 들어갔을 때 큰 결과 차이를 만드는 것으로 추측된다. 이를 방지하기 위해 Sample Pot에 측정기기를 담아 현장조사를 진행했으나 틈현상을 완전히 막지 못한 것으로 보인다. 호흡성 결과에서는 극단값이 나타나지 않았는데 사이클론은 총분진의 카세트보다 입경이 큰 분진이 유입되기 어렵고 사이클론을 통과할 때 다시 한번 걸러지기 때문이라 여겨진다.

다시 3개의 사업장에서 극단값을 제외한 평균을 요약하면 사업장1은 0.0008 mg/m^3 , 사업장2는 0.0004 mg/m^3 , 사업장3은 0.0003 mg/m^3 으로 호흡성 결과와 비교해 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

〈표 III-26〉 알루미늄(금속분진) 측정결과

mg/m ³	호흡성 결과					총분진 결과				
	시료1	시료2	시료3	시료4	평균	시료1	시료2	시료3	시료4	평균
사업장3	0.0009	0.0003	0.0014		0.0009	0.0012	0.2313	0.0003		0.0776
사업장4	불검출	불검출	불검출		불검출	0.0001	0.0006	0.1163		0.0390
사업장5	0.0014	0.0015	0.0011	0.0010	0.0013	0.0005	0.0239	0.00001	0.0010	0.0064

(3) 알루미늄(용접흡)

사업장6은 알루미늄괴(84-85%)를 다이캐스트에 주입하여 성형하는 곳으로 3개의 호흡성 측정 결과 모두 불검출로 분석되었고, 3개의 총분진 결과 평균 0.0061 mg/m³으로 평가되었다.

사업장7은 비철금속을 용해하여 합금괴를 제조(알루미늄 함유 0.8% 전후)하는 곳으로 용해공정 근처에서 호흡성 3개, 총분진 3개를 측정하였다. 그 결과 호흡성은 모두 불검출로 평가되었고, 총분진의 평균은 0.0088 mg/m³로 평가되었다.

사업장8은 알루미늄이 6~8.5% 함유된 ERCuAl-A1 용접봉을 사용하여 용접을 하는 공정 2곳에서 측정을 하였고 세부결과는 표와 같다. 2곳의 공정에서 측정한 6개의 호흡성 결과는 평균 0.0096 mg/m³, 총분진 5개(1개의 시료는 측정 중 훼손으로 불용처리)의 평균은 0.0115 mg/m³으로 평가되었다. 호흡성 분진 결과 중 극단값인 0.0496 mg/m³이 나타난 이유는 밝혀지지 않았다. 이 극단값을 제외한다면 평균 0.0017 mg/m³로 낮아진다.

〈표 III-27〉 알루미늄(용접흡) 측정결과

mg/m ³	호흡성 측정결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
사업장6	불검출	불검출	불검출	불검출	0.0181	0.00012	불검출	0.0061

mg/m ³	호흡성 측정결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
사업장7	불검출	불검출	불검출	불검출	0.0047	0.0044	0.0172	0.0088
사업장8-1	0.0019	0.0011	0.0017	0.0016	0.0044	0.0326	/	0.0185
사업장8-2	0.0496	0.0022	0.0013	0.0177	0.0058	0.0034	0.0041	0.0044

(4) 알루미늄(피로파우더)

사업장9는 분말 도료(알루미늄 1~20% 함유)를 스프레이로 분사하여 자재에 도포하는 공정에서 호흡성 3개, 총분진 3개를 측정하였다. 분말 도료에 함유된 알루미늄이 피로파우더 형태임이 MSDS등으로 확인되지 않았으나 상당수 측정기관에서 분체 도료의 알루미늄을 피로파우더로 구분하여 측정하였던 것으로 추측된다. 그 결과는 호흡성은 평균 0.0019 mg/m³로 평가되었고, 총분진의 평균은 0.0502 mg/m³로 평가되었다.

사업장10은 알루미늄 파우더를 첨가하여 믹싱하는 공정이다. 믹싱1과 믹싱2로 나누어 측정하였다. 믹싱1에서 호흡성 2개, 총분진 2개를 측정하였고 믹싱2에서 호흡성 3개, 총분진 3개를 측정하였다. 그 결과 사업장10-1 믹싱1에서 호흡성 평균 0.0001 mg/m³로 평가되었고, 총분진 평균은 0.0014 mg/m³로 평가되었다. 사업장 10-2 믹싱2에서 호흡성 평균 0.0004 mg/m³, 0.0017 mg/m³로 평가되었다.

〈표 III-28〉 알루미늄(피로파우더) 측정결과

mg/m ³	호흡성 측정결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
사업장9	0.0019	불검출	불검출	0.0019	0.0405	0.0358	0.0743	0.0502
사업장10-1	0.0002	불검출	/	0.0001	0.0023	0.0005	/	0.0014
사업장10-2	0.0003	0.0006	0.0004	0.0004	0.0018	0.0017	0.0017	0.0017

(5) 산화알루미늄

사업장11은 알루미나를 연마재로 사용하여 제품표면에 광택을 내는 표면연마 공정에서 3개의 나일론 사이클론과 3개의 총분진용 카세트홀더로 측정하여 ICP로 분석하였다. 그 결과 호흡성의 경우 평균 0.0008 mg/m³으로 분석되었고, 총분진은 평균 0.0025 mg/m³으로 분석되었다.

사업장12는 산화알루미늄이 96.5% 함유된 쇼트볼로 자동 샌딩하는 과정에서 작업자가 쇼팅 대상물의 입출고 및 관리를 하고 있으며, 이 작업자의 작업동선 뒤쪽에 측정위치를 선정하였다. 3개의 호흡성 측정 결과 평균 0.0009 mg/m³로 분석되었고, 3개의 총분진 결과 평균 0.0023 mg/m³로 평가되었다.

〈표 III-29〉 산화알루미늄 측정결과

mg/m ³	호흡성 측정결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
사업장11	0.0000 3	0.0014	0.0010	0.0008	불검출	0.0035	0.0041	0.0025
사업장12	0.0015	0.0003	0.0009	0.0009	0.0025	0.0032	0.0011	0.0023

3) 일부 사업장 알루미늄 노출 수준(AA로 분석)

알루미늄 형태별 실태조사를 진행하며 몇 개의 사업장을 선정하여 ICP sample pot 옆에 별도의 sample pot으로 AA분석용 시료를 측정하였다. 각 sample pot은 밀접하게 배치하여 측정조건이 동일하도록 하였다.

그 결과 동일 사업장에서 ICP분석 결과와 AA분석 결과를 비교할 때 2개 사업장은 AA분석결과가 낮게 평가되었고 다른 2개의 사업장의 경우 AA가 높게 나왔다. 세부 결과는 아래와 같다.

금속분진이 발생하는 사업장3에서는 ICP분석 결과 평균은 0.0009 mg/m³으로 분석되었고, 총분진은 평균 0.0776 mg/m³으로 분석된 반면, AA분석 결과는 호흡성, 총분진 모두 불검출로 평가되었다.

〈표 III-30〉 사업장3에서 ICP분석과 AA분석 비교

mg/m ³	호흡성 결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
ICP분석	0.0009	0.0003	0.0014	0.0009	0.0012	0.2313	0.0003	0.0776
AA분석	불검출							

사업장7은 용해공정으로 3개의 호흡성 측정과, 3개의 총분진을 AA로 분석한 결과 호흡성 측정결과는 불검출, 총분진 결과 평균은 0.0016 mg/m³으로 평가되었다. ICP 분석의 경우 호흡성은 동일하게 불검출, 총분진 결과 평균은 0.0088 mg/m³로 AA결과에 5.5배가 된다.

〈표 III-31〉 사업장7에서 ICP분석과 AA분석 비교

mg/m ³	호흡성 결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
ICP분석	불검출	불검출	불검출	불검출	0.0047	0.0044	0.0172	0.0088
AA분석	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출	검출한 계미만	0.0000

사업장12는 산화알루미늄이 96.5% 함유된 쇼트볼로 자동 샌딩하는 공정으로 3개의 호흡성 측정을 ICP로 분석한 결과 평균 0.0009 mg/m³로 분석되었고, 3개의 총분진은 평균 0.0023 mg/m³로 평가되었다. 반면 AA로 분석이 호흡성 평균 0.0024 mg/m³, 총분진 평균 0.0070 mg/m³으로 ICP분석보다 높게 평가되었다.

〈표 III-32〉 사업장12에서 ICP분석과 AA분석 비교

mg/m ³	호흡성 결과				총분진 결과			
	시료1	시료2	시료3	평균	시료1	시료2	시료3	평균
ICP분석	0.0015	0.0003	0.0009	0.0009	0.0025	0.0032	0.0011	0.0023
AA분석	0.0029	0.0015	0.0029	0.0024	검출한 계미만	0.0068	0.0102	0.0070

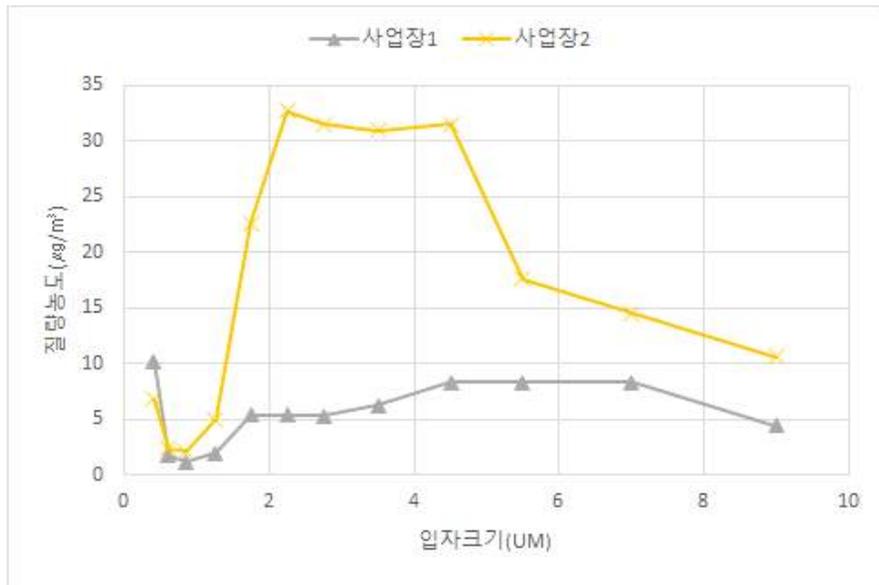
사업장10-1은 알루미늄 파우더를 다른 재료와 믹싱하는 공정으로 2개의 호흡성 측정과 2개의 총분진을 AA로 분석 한 결과 각각의 평균은 불검출, 검출한계미만으로 평가되었다.

〈표 III-33〉 사업장10-1에서 ICP분석과 AA분석 비교

mg/m ³	호흡성 측정결과			총분진 결과		
	시료1	시료2	평균	시료1	시료2	평균
ICP분석	0.0002	불검출	0.0001	0.0023	0.0005	0.0014
AA분석	불검출	불검출	불검출	검출한계 미만	검출한계 미만	검출한계 미만

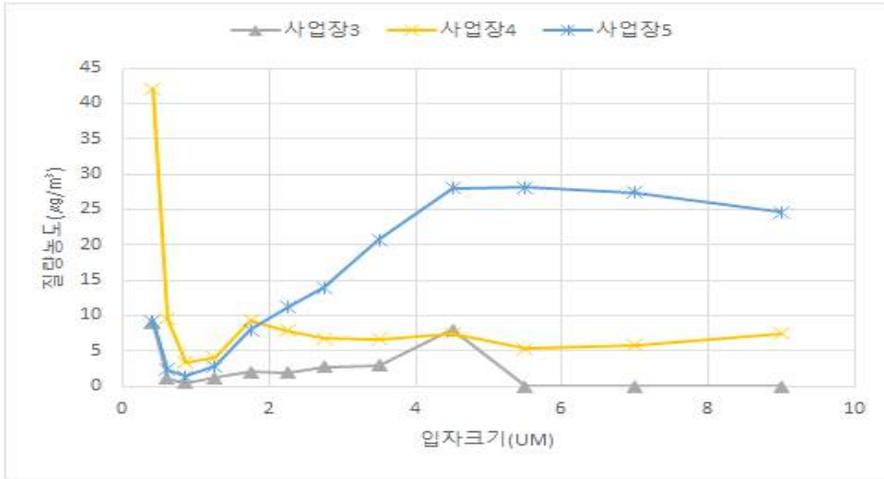
4) 알루미늄 형태별 분진 크기 분포

알루미늄을 사용하는 사업장의 입자크기를 측정하여 비교하였다. 가용성염 발생 사업장의 입자크기는 사업장1의 경우 비교적 고루 분포하나, 사업장2는 2-5 μm 가 상대적으로 높게 분포하고 있었다.



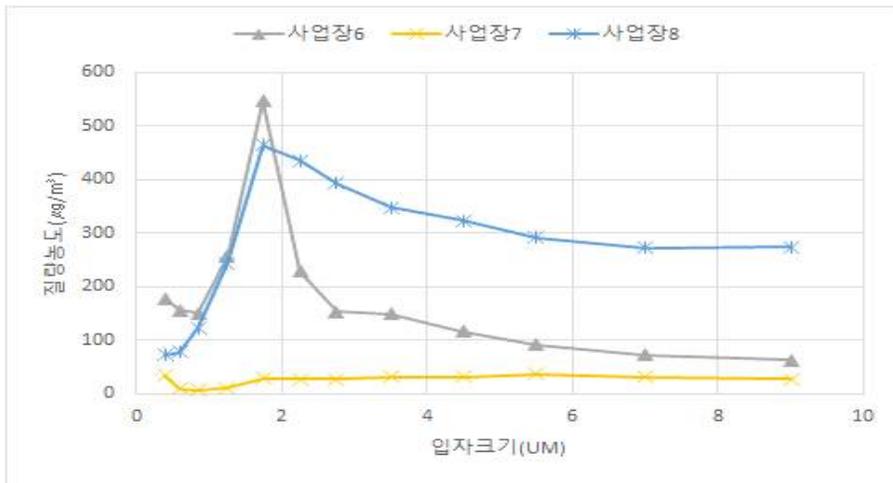
[그림 III-11] 알루미늄(가용성염) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포

금속분진 발생 사업장의 입자크기는 사업장3의 경우 비교적 고루 분포하나, 사업장4는 1 μm 이내 입자량이 많았다. 사업장5는 4-10 μm 구간에서 높게 분포하고 있었다.



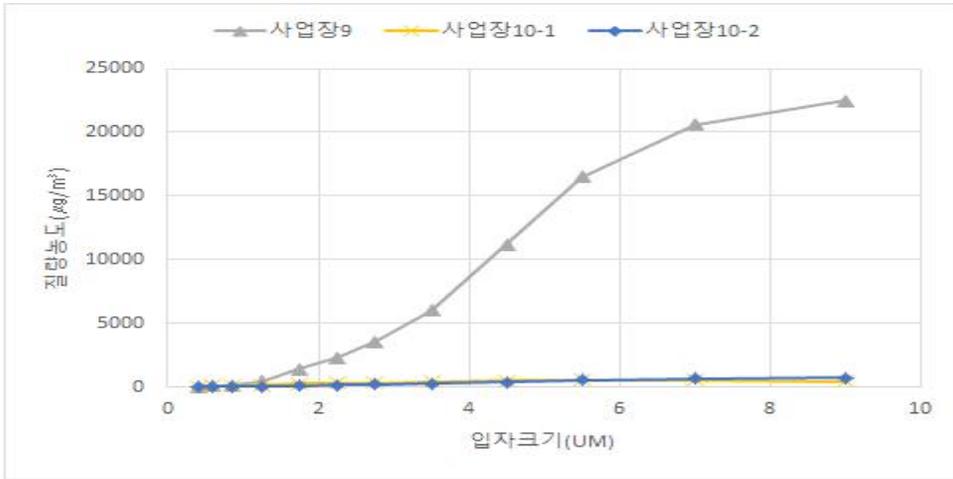
[그림 III-12] 알루미늄(금속분진) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포

사업장6과 사업장8은 2 μm 전후 높은 산구조로 분포하였고, 사업장7은 상대적으로 낮은 농도로 고르게 분포하고 있었다.



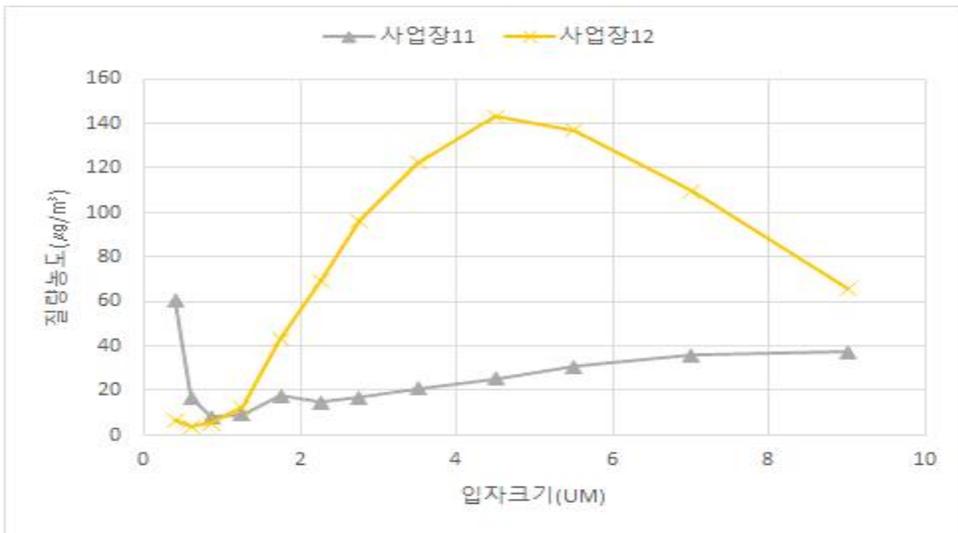
[그림 III-13] 알루미늄(용접흄) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포

사업장9는 입자크기가 커질수록 질량농도가 증가하는 분포였으며, 사업장10-1과 10-2는 입자크기가 커질수록 질량농도가 증가하는 분포이나 사업장9에 비해 질량농도가 상당히 낮았다.



[그림 III-14] 알루미늄(피로파우더) 사업장의 입자크기별 질량농도 분포

사업장11은 1 μm 아래에서 높았다가 낮아져 입자크기가 증가하며 점진적으로 증가하였고, 사업장12는 4-6 μm 에서 높은 산구조를 이루고 있었다.



[그림 III-15] 산화알루미늄 사업장의 입자크기별 질량농도 분포

5) 소결

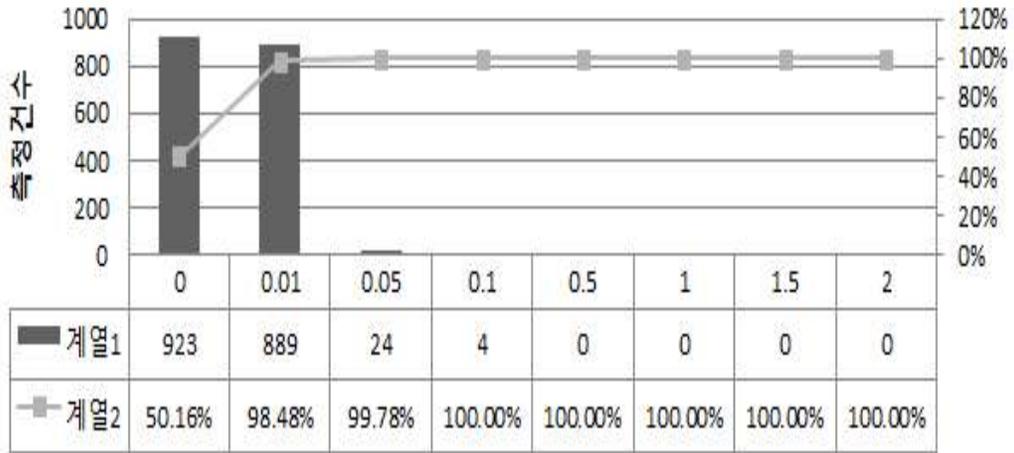
알루미늄 실태조사를 호흡성과 총분진을 구별하여 측정한 결과 알루미늄 형태 구분없이 호흡성은 불검출-0.0024 mg/m³이었으며, 극단값을 제외하지 않더라도 총분진 평균결과는 불검출-0.0776 mg/m³로 국내 알루미늄 노출기준 중 가장 낮은 알루미늄(가용성염) 2 mg/m³과 비교하더라도 낮은 수준으로 평가되었다.

실태조사 사업장 중 일부 사업장 4곳에서 ICP와 AA의 분석결과의 차이를 비교하였는데 슬라이드 'AA와 ICP평균비교'에서처럼 3곳에서 AA 분석결과가 불검출, 검출한계 미만으로 낮게 평가되었다. 다만, 1곳만 수치상 결과값이 나왔으며, ICP결과보다 높았다. 이 결과만을 비교했을 때 ICP로의 분석이 다소 재현성이 높은 것으로 추측된다.

알루미늄(피로파우더)로 측정을 한 사업장 중 2곳을 협조를 구하여 측정을 진행하였는데 해당 업체가 보유한 MSDS상에는 피로파우더라고 기재되어 있지 않았고 알루미늄 파우더라고 되어있었다. 다만, 피로파우더를 알루미늄 파우더와 동의어로 이해하고 적용하고 있었던 것으로 추측된다. 다양한 형태의 알루미늄 파우더 중에 피로파우더가 속하지만 알루미늄 파우더가 피로파우더와 동의어는 아닌데 정보부족 등으로 상당수 알루미늄 파우더 취급 사업장의 측정이 피로파우더로 평가되고 있는 것으로 사료된다.

제3류 위험물인 알킬알루미늄은 상온에서 액체상태로 공정에서 사용은 탱크에서 직접 주입되어 촉매 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 사용처는 업종별로 기타 비철 금속 압연, 압출 및 연신제품제조업(알루미늄 화학물질 유통 사용 실태조사-박종수) 등이며, 이번 실태조사에서 측정을 진행하고자 한 곳은 모 발전소였다. 그러나 코로나 방역수칙과 보안의 이유로 최종 출입이 허가되지 않았다.

공단 K2B에 전송된 알루미늄(알킬)의 2020년도 하반기 전국 작업환경측정 결과는 1840건에 대해 불검출~0.0779(평균 0.0010) mg/m³으로 평가되었다. 결과값은 0.01 이하에 98.48%로 집중되었고 노출기준 2 mg/m³의 5% 내에서 모든 결과가 집중되어 있어 평가값이 대체로 낮음을 가늠할 수 있었다.



[그림 III-16] 알루미늄(알킬)의 2020년(하) 전국 작업환경측정 결과 요약

3. 노출기준 변경 타당성 검토

1) 알루미늄 화학물질별 정의 및 고려사항

(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 등(2000)도 논문에서 “finely stamped, non-greased aluminum powder”라고 정의하였다. 여기서 미세함의 범위는 폭발성을 나타내는 200 메쉬 이하의 크기($74 \mu\text{m}$)에 적용하는 것이 적절하다고 생각된다. 따라서 피로파우더의 노출기준을 적용하는데 혼돈이 없도록 “200 메쉬 크기($74 \mu\text{m}$) 또는 그보다 작은 건조 알루미늄 분말”이라고 정확하게 정의해주는 것이 필요해 보인다. 그 이상의 크기는 금속분진으로 분류될 수 있다.

(3) 용접흄

알루미늄 용접흄의 경우 알루미늄이나 그 합금을 용접하는 과정에 생성되지만 김기연 등(2007)의 연구에서 보고되었듯이 알루미늄 괴를 만들거나 주물 공정에서 생성되는 흄의 크기가 작고 농도가 높아 용접흄 대신 흄을 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. 알루미늄 합금의 흄인 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) $[(C_2H_5)_3Al]$, 트라이소부틸 알루미늄 $[(C_4H_9)_3Al]$, 디에틸 알루미늄 클로라이드 $[(C_2H_5)_2AlCl]$, 트리메틸 알루미늄 $[(CH_3)_3Al]$ 을 들 수 있다. 탄소수가 4까지는 양

의 대소에 무관하게 자연발화, 탄소수가 5이상인 것은 점화하지 않으면 연소하지 않는다.

액상이고 위험물3류(자기발화성물질)로 분류된다. 금수성 물질이고 공기와 접촉하면 자연발화할 수 있기 때문에 보관시에도 불활성 기체를 봉입한다. 따라서 취급 과정에서 노출가능성이 매우 낮고, 과거 작업환경측정결과를 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.

2) 노출기준 개정안

본 연구진이 제안하는 개정안 3가지는 아래와 같이 요약될 수 있다. 알루미늄 용접흄 대신 흄을 적용하는 것이 타당해 보인다.

〈표 III-34〉 알루미늄 노출기준 개정안

알루미늄 화합물	노출기준(mg/m ³)					메모
	고용노동부	ACGIH	개정안# 1	개정안# 2	개정안# 3	
금속분진	10	1(R)	10		10	
피로파우더	5	1(R)	10		1(R)	R 측정 권장
흄	5	1(R)	10	1(R)	1(R)	R 측정 권장
산화알루미늄	10	1(R)	10		10	
불용성 화합물	-	1(R)	10		10	일반분진과 동일
가용성염	2	-	-	-	-	독성자료 부족 및 노출가능성 낮음
알킬	2	-	-	-	-	독성자료 부족 및 노출가능성 낮음

R: 호흡성분진

금속분진: 금속 알루미늄 및 그 합금의 가공 과정에서 발생하는 입자상물질

피로파우더: 200 메쉬 크기(74 μm) 또는 그보다 작은 건조 알루미늄 분말

흄: 용접과 다이캐스팅 등 알루미늄을 녹는점 이상의 상태에서 가공하는 과정에서 발생하는 입자상물질

가용성염: 물에 녹여 사용하는 알루미늄 화합물

알킬: 알킬기 등과 결합된 형태의 유기 알루미늄

산화알루미늄: 알루미나 참고

불용성 화합물: 상기된 정의로 분류되지 않은 기타 불용성 알루미늄 화합물

(1) 개정안 #1

이 개정안은 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 수 있기 때문이다.

이 개정안의 단점은 10:1이라는 비율이 모든 경우에 적용될 수 없기 때문에 분말이나 흡 형태로 알루미늄 분진이 발생하는 일부 사업장에서는 호흡성분진이 ACGIH의 노출기준 이상의 수준에 노출될 수 있다는 점이다. 하지만 ACGIH의 노출기준 설정 근거 중 하기도 자극(lower respiratory track irritation)은 황산화물 분진의 크기에서도 발생할 수 있는 것이므로 호흡성분진만을 측정할 때 생기는 오류를 줄여줄 수 있다.

(2) 개정안 #2

이 개정안은 개정안 #1을 승계하면서 금속분진, 피로파우더, 용접흡, 산화알루미늄의 노출기준을 통합하여 총분진 10 mg/m³, 호흡성분진의 경우 1 mg/m³의 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.

〈표 III-35〉 산화아연 노출기준

일련 번호	유해물질의 명칭		화학식	노출기준				비 고 (CAS번호 등)
	국문표기	영문표기		TWA		STEL		
				ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	
280	산화아연 분진	Zinc oxide(Respirable fraction)	ZnO	-	2	-	-	[1314-13-2] 호흡성
281	산화아연	Zinc oxide	ZnO	-	5	-	10	[1314-13-2]

(3) 개정안 #3

개정안 #3은 호흡성분진의 비율이 상대적으로 높을 것으로 추정되는 두 형태인 피로파우더와 흡에 호흡성분진의 노출기준을 적용하는 것이다. 아래 구리의 예에서 보듯이 한국은 같은 유해물질에 대해 화학물질의 형태에 따라 다른 노출기준을 적용해온 전례가 존재한다.

〈표 III-36〉 구리 노출기준

일련 번호	유해물질의 명칭		화학식	노출기준				비 고 (CAS번호 등)
	국문표기	영문표기		TWA		STEL		
				ppm	mg/m ³	ppm	mg/m ³	
10	구리(분진 및 미스트)	Copper(Dust & mist, as Cu)	Cu	-	1	-	2	[7440-50-8]
11	구리(흡)	Copper(Fume)	Cu	-	0.1	-	-	[7440-50-8]

3) 노출기준의 적용성 검토

(1) 호흡성분진 적용시 노출기준 초과 예상 사업장 규모

2018년부터 2020년까지 고용노동부에 보고된 작업환경측정자료를 근거로 노출기준 개정안을 적용했을 때 노출기준을 초과할 것으로 추정되는 측정건수는 아래 <표 Ⅲ-37>과 같다. 앞선 <표 Ⅲ-6>에서 노출기준 10% 미만인 경우가 대부분이고, 노출기준의 50~100%가 14건, 노출기준을 초과한 건수가 2건으로 파악된 바 있다. 한편 <표 Ⅲ-34>에서 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<표 Ⅲ-34>.

<표 Ⅲ-37> 개정안 적용시 노출기준 초과 건수 추정

구분	개정안별 초과 건수(추정)		
	개정안 #1 총분진 적용시	개정안 #2 호흡성분진 적용시	개정안 #3
금속분진	0(기준동일)	2(호흡성)	0(기준동일)
피로파우더	0(기준동일)	0(호흡성)	0(호흡성)
흙	0(기준동일)	9(호흡성)	9(호흡성)
산화알루미늄	0(기준동일)	3(호흡성)	0(기준동일)
가용성염	0(기준동일)	-	-
알킬	0(기준동일)	-	-
총합계	0	14	9

(2) 기타 고려사항

노출기준이 낮아지면서 시료 분석방법의 민감도에 대한 고려가 필요하다. 측정기관들이 금속분석을 위해서 AAS를 기본장비로 보유하고 있는 상황이다. 노출기준이 1 mg/m^3 으로 기존의 1/10로 낮아지는 경우 분석이 어려워질 수 있다.

본 연구에서 사용한 두 분석방법의 검출한계는 AAS가 $2.486 \text{ } \mu\text{g/sample}$ 이었고 ICP가 $0.068 \text{ } \mu\text{g/sample}$ 이었다. 최소 6시간 동안 2.0 lpm 으로 시료를 채취하는 경우 흡인되는 공기의 양은 720 리터이며, 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 10로 계산할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 0.035 mg/m^3 이 되어 새로 제안되는 노출기준 1 mg/m^3 의 3.5% 이상 농도에서는 문제없이 작동할 수 있다. 위험성평가에서 노출수준을 구분하는 기준이 노출기준의 10%인 것을 감안하면 새로운 노출기준이 적용되는 경우에도 AAS로 시료를 분석하는 것에 문제가 없을 것으로 추정된다.

4. 사회경제성 평가

1) 규제영향 분석 절차 및 내용

새로운 규제를 신설하거나 강화하는 경우 중앙행정기관의 장은 행정규제기본법 제 7조에 따라 규제영향분석서를 작성하여야 하며, 규제의 신설 또는 강화의 필요성, 규제 목적의 실현 가능성, 피규제 집단과 국민이 부담하는 비용과 편익 분석 등을 작성토록 하고 있다. 또한 고용노동부에서는 화학물질의 유해성·위험성 평가에 관한 규정 제17조(사회성·경제성 평가 대상)를 통해서 화학물질의 유해성 및 노출에 따른 위험성이 상당하여 적절한 관리가 필요한 화학물질에 대하여 사회성·경제성을 평가하도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 알루미늄 노출기준 개정을 제안하였다. 연구자의 개정 방안 실행으로 야기되는 규제영향은 앞선 연구방법론에서 언급된 바와 같이 ‘시나리오 설정 → 자료조사 → 비용분석 → 편익분석 → 비용·편익 비교 및 관리수준 제안’ 순으로 진행하였다.

2) 규제영향 평가 결과

(1) 시나리오 설정

알루미늄에 대한 규제수준 변경에 따라 비용부담자들이 준수해야 할 관리 및 조치 사항이 달라지기 때문에 예상되는 규제 시나리오를 설정할 필요가 있다. 연구결과에서 언급된 규제수준은 <표 III-34>와 같이 개정안 #1, #2, #3으로 구분된다. 각 개정안에서 물질별로 규제의 신설 또는 강화에 따른 규제영향평가가 필요하며, 변경이 없는 경우 평가가 필요하지 않다. 물질별 개정안 #1, #2, #3에 따른 구체적인 신설 또는 강화의 내용은 <표 III-38>과 같으며, 2안 4건, 3안 2건의 평가가 필요하다. 1안의 경우 변경내용이 없거나, 규제완화에 해당되므로 규제영향평가가 필요하지 않다.

〈표 III-38〉 개정안에 따른 규제영향평가 필요여부

물질명	현재 노출기준(mg/m ³)	개정안(mg/m ³)	규제 신설 또는 강화여부	규제영향평가 필요여부(O,X)
금속분진	10	1안 : 10	변경내용 없음	X
	10	2안 : 1(R)	규제신설	O
	10	3안 : 10	변경내용 없음	X
피로 파우더	5	1안 : 10	규제완화	X
	5	2안 : 1(R)	규제신설	O
	5	3안 : 1(R)	규제신설	O
흙	5	1안 : 10	규제완화	X
	5	2안 : 1(R)	규제신설	O
	5	3안 : 1(R)	규제신설	O
산화 알루미늄	10	1안 : 10	변경내용 없음	X
	10	2안 : 1(R)	규제신설	O
	10	3안 : 10	변경내용 없음	X
불용성 화합물	-	1안 : 10	변경내용 없음	X
	-	2안 : 1(R)	규제신설	O
	-	3안 : -	변경내용 없음	X
가용성염	2	1안 : -	규제완화	X
	2	2안 : -	규제완화	X
	2	3안 : -	규제완화	X
알킬	2	1안 : -	규제완화	X
	2	2안 : -	규제완화	X
	2	3안 : -	규제완화	X

산업안전보건법 시행규칙 [별표 21, 22]에 따르면 ‘알루미늄 및 그 화합물’을 작업환경측정대상 유해인자, 특수건강진단 대상 유해인자로 규정하고 있고, 안전보건기준에 관한 규칙 [별표 12]에 관리대상 유해물질로 규정하고 있다. 앞서 언급된 알루미늄 금속분진외 총 7개의 물질은 ‘알루미늄 및 그 화합물’으로 통칭할 수 있으므로, 관련된 현행 규제는 작업환경측정, 특수건강진단 및 관리대상 유해물질에 대한 산업안전보건법상 규제라 볼 수 있다. 본 연구에서 규제영향평가가 필요한 금속분진, 피로파우더, 흙, 산화알루미늄 4가지 물질은 현행법에서도 특수건강진단 대상 유해인자이므로 특수건강진단에 대한 신규 규제가 발생하지 않는다. 그러나 4가지 물질의 호흡성분진(R) 노출기준이 추가된다면 작업환경측정대상 유해인자가 추가되고, 노출기준을 초과하는 경우 공학적 대책 및 관리를 위한 비용이 추가된다고 볼 수 있으므로 규제영향평가지 검토되어야 한다. 개정안에 따른 신규 규제 발생여부는 <표 Ⅲ-39>와 같다.

〈표 Ⅲ-39〉 개정안에 따른 규제 시나리오

시나리오	물질명	현재 노출기준 (mg/m³)	개정안 (mg/m³)	신규 규제 발생여부(O, X)		
				측정	특검	관리대상
#1	금속분진	10	2안 : 1(R)	O	X	O
#2	피로 파우더	5	2안 : 1(R)	O	X	O
#3		5	3안 : 1(R)	O	X	O
#4	흙	5	2안 : 1(R)	O	X	O
#5		5	3안 : 1(R)	O	X	O
#6	산화 알루미늄	10	2안 : 1(R)	O	X	O

(2) 자료조사

가) 알루미늄 노출기준 개정 관련 국내법 검토

본 연구는 알루미늄 노출기준 개정과 관련된 연구이므로 산업안전보건법에 관한 국내법 조항을 살펴볼 필요가 있다. 법 개정으로 인한 비용 부담자의 비용항목은 <표 III-40>과 같다.

〈표 III-40〉 비용항목과 관련된 국내법 조항

비용항목	법조항	내용
국소배기장치 설치 및 유지관리비용	산업안전보건기준에 관한 규칙	제422조(관리대상 유해물질과 관계되는 설비) 사업주는 근로자가 실내작업장에서 관리대상 유해물질을 취급하는 업무에 종사하는 경우에 그 작업장에 관리대상 유해물질의 가스·증기 또는 분진의 발산원을 밀폐하는 설비 또는 국소배기장치를 설치하여야 한다.
보호구 및 보호복 지급 및 유지관리비용	산업안전보건기준에 관한 규칙	제450조(호흡용 보호구의 지급 등) - 생략 -
유해위험방지 계획서 작성비용	산업안전보건법	제42조(유해위험방지계획서의 작성·제출 등) ① 사업주는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 이 법 또는 이 법에 따른 명령에서 정하는 유해·위험 방지에 관한 사항을 적은 계획서(이하 “유해위험방지계획서”라 한다)를 작성하여 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 고용노동부장관에게 제출하고 심사를 받아야 한다. - 종략 - 2. 유해하거나 위험한 작업 또는 장소에서 사용하거나 건강장해를 방지하기 위하여 사용하는 기계·기구 및 설비로서 대통령령으로 정하는 기계·기구 및 설비를 설치·이전하거나 그 주요 구조부분을 변경하려는 경우. - 이하 생략 -
특별안전·보건교육 비용	산업안전보건법	제29조(근로자에 대한 안전보건교육) - 종략 - ③ 사업주는 근로자를 유해하거나 위험한 작업에 채용하거나 그 작업으로 작업내용을 변경할 때에는 제2항에 따른 안전보건교육 외에 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 유해하거나 위험한 작업에 필요한 안전보건교육을 추가로 하여야 한다. - 이하 생략 -

비용항목	법조항	내용
작업환경측정 비용	산업안전보건법	제125조(작업환경측정) ① 사업주는 유해인자로부터 근로자의 건강을 보호하고 쾌적한 작업환경을 조성하기 위하여 인체에 해로운 작업을 하는 작업장으로서 고용노동부령으로 정하는 작업장에 대하여 고용노동부령으로 정하는 자격을 가진 자로 하여금 작업환경측정을 하도록 하여야 한다. - 이하 생략 -
특수건강진단 비용	산업안전보건법	제130조(특수 건강진단 등) ① 사업주는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 근로자의 건강관리를 위하여 건강진단(이하 "특수건강진단"이라 한다)을 실시하여야 한다. 다만, 사업주가 고용노동부령으로 정하는 건강진단을 실시한 경우에는 그 건강진단을 받은 근로자에 대하여 해당 유해인자에 대한 특수건강진단을 실시한 것으로 본다. - 이하 생략 -

나) 노출기준 초과사업장 추정

〈표 Ⅲ-37〉에서 알루미늄 측정건수는 동일 사업장의 중복 산정의 가능성을 배제할 수 없으나 자료접근의 한계 및 비용분석시 보수적 접근을 위해서 노출기준 초과 사업장수를 초과건수와 같은 사업장수로 추정하여 비용분석 자료로 이용하였다(표 Ⅲ-41).

〈표 Ⅲ-41〉 개정안별 예정 노출기준 초과 사업장수(추정)

구분	개정안 #2 1(R) mg/m ³ 적용시		개정안 #3 1(R) mg/m ³ 적용시	
	초과건수(추정)	초과사업장수(추정)	초과건수(추정)	초과사업장수(추정)
금속분진	2	2	0	0
피로파우더	0	0	0	0
흙	9	9	9	9
산화알루미늄	3	3	0	0
총합계	14	14	9	9

다) 사업장당 비용항목

최상준 등(2019)의 연구에서는 김태운 등(2014)의 사업장당 2014년 시점 비용을 법적용 예상 시점인 2021년 시점으로 환산한 바 있다. 본 연구 역시 연구년도로 부터 2년 후인 2023년 시점으로 비용을 환산하였고 결과는 <표 III-42>와 같다. 미래 시점의 화폐가치를 현재 시점으로 환산하기 위한 할인율은 기존의 연구에서 활용한 5.5%, 3%를 활용하였고, 분석기간은 만성적 건강영향을 고려하여 30년으로 설정하였다. 비용 항목중에서 노출기준을 초과하는 사업장의 경우는 국소배기장치 설치 및 유지관리비용과 유해위험방지계획서 작성비용이 추가로 발생할 수 있다.

<표 III-42> 사업장당 비용 환산(분석기간 30년)

비용 항목	2014년 시점 사업장당 총비용		2023년 시점 사업장당 총비용	
	할인율 5.5%	할인율 3%	할인율 5.5%	할인율 3%
국소배기장치 설치 및 유지관리비	325,634,856	365,741,898	527,233,531	477,210,221
밀폐설비 설치 및 유지관리비	253,577,982	296,245,852	410,566,658	386,533,644
보호복 및 보호구 지급비용	93,812,162	122,348,948	151,890,734	159,637,626
세척시설 및 용기 등 관리비용	206,254,314	271,566,450	333,945,179	354,332,622
유해위험방지계획서 작성비용	252,866,543	332,938,828	409,414,772	434,409,655
특별안전보건교육 비용	323,685,553	426,183,263	524,077,425	556,072,493
작업환경측정 평균 비용(면제 또는 횡수조정 대상이 아닌 경우)	84,594,024	111,152,564	136,965,700	145,028,885
작업환경측정 평균 비용(면제 또는 횡수조정 대상인 경우)	29,142,641	38,292,058	47,184,683	49,962,450
특수건강진단 비용	85,771,208	112,676,605	138,871,672	147,017,413

비용 항목	2014년 시점 사업장당 총비용		2023년 시점 사업장당 총비용	
	할인율 5.5%	할인율 3%	할인율 5.5%	할인율 3%
특별관리물질 취급일지 작성비	2,995,829	3,702,671	4,850,530	4,831,146
특별관리물질 고지비용	2,995,829	3,702,671	4,850,530	4,831,146

라) 호흡성분진(R) 측정비용

앞선 <표 III-6>에서 3년간(2018~2020년) 측정건수를 제시한 바 있다. 이를 1년 측정건수(예상)로 환산하기 위해 3으로 나누었고, 2021년 알루미늄 중량분석법 측정 수수료인 47,500원을 곱하여 연간 사회적 총 측정비용을 구하였다<표 III-43>.

<표 III-43> 호흡성 분진(R) 측정비용(예상)

구분	3년간 측정건수	1년간 측정건수(예상)	건당 측정정비용(원)	연간 사회적 총 측정비용(원)
금속분진	117,019	351,057	47,500	16,675,207,500
피로파우더	4,402	13,206	47,500	627,285,000
흙	150,341	451,023	47,500	21,423,592,500
산화알루미늄	95,185	285,555	47,500	13,563,862,500

마) 노출인구수

알루미늄 및 그 화합물에 노출되는 인구수는 기존 작업환경측정제도가 시행되고 있었으므로 과거 작업환경측정 자료를 통해 확인하였다<표 III-44>.

<표 III-44> 알루미늄 형태별 노출인구수

물질명	노출인구수
금속분진	42,237

물질명	노출인구수
피로파우더	1,699
흙	51,235
산화알루미늄	28,537

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

신영철 등(2019)은 화학물질 관리를 위한 사회경제성 분석 기반 구축(III) 연구에서 화학물질 규제를 통해 얻는 편익으로서 조기사망감소 편익을 산출하기 위한 통계적 인간생명가치(VSL) 및 화학물질로 인한 건강장해를 회피하기 위한 지불의사금액(WTP, Willingness To Pay) 등의 자료를 제안한 바 있다. 2019년 시점 자료를 법 적용 예상 시점인 2023년 시점으로 편익을 환산할 필요가 있고, 결과는 <표 III-45, 46>과 같다. 기존의 연구에서 할인율을 5.5%, 3%로 활용하였으므로, 물가상승률 5.5%, 3%를 활용하여 2019년으로부터 4년 후의 화폐가치를 환산하였다.

<표 III-45> 통계적 인간생명가치(신영철 등, 2019)의 미래시점 환산

구분	2019년 시점 VSL(백만원)	2023년 시점 VSL(백만원)		비고
		물가상승률 5.5%	물가상승률 3%	
하한값	1,333	1,651	1,500	국내 기존 VSL의 메타회귀분석 대푯값
화학물질-만성	2,533	3,138	2,851	화학물질-만성위험
화학물질-급성	3,740	4,633	4,209	화학물질-급성위험
상한값	5,145	6,374	5,791	미국 EPA 및 ECHA 사용값 편익이전 평균값

<표 Ⅲ-46> 지불의사금액(신영철 등, 2019)의 미래시점 환산

구분	WTP(원/년)	2023년 시점 WTP(원/년)		
		물가상승률 5.5%	물가상승률 3%	
인간건강	발암성	37,004	45,841	41,648
	잠재건강	30,986	38,386	34,875
	생식영향	10,438	12,931	11,748
	발달영향	9,195	11,391	10,349
	호흡기/심혈관	11,353	14,064	12,778
환경생태	잔류성	23,990	29,719	27,001
	생물농축성	20,372	25,237	22,929
	환경영향	21,488	26,620	24,185
	수계영향	7,841	9,714	8,825
	대기영향	7,070	8,758	7,957
	토양영향	6,577	8,148	7,402
	인간외의 생물영향	17,517	21,700	19,716

(3) 비용분석

개정안 #2, #3에 따라 호흡성분진(R) 노출기준이 추가된다면 작업환경측정대상 유해인자가 추가에 따른 측정비용이 발생되고, 측정결과 노출기준을 초과하는 경우 <표 Ⅲ-42>에 따른 국소배기장치 설치 및 유지관리비, 유해위험방지계획서 작성비용이 추가된다. 다만 개정안 #2의 경우 충분진을 선택할지 호흡성분진을 선택할지의

문제이므로 측정비용상의 변화가 없고, 개정안 #3은 기존의 충분진 측정대신 호흡성 분진을 측정하는 경우이므로 마찬가지로 작업환경측정 비용상의 변화가 없다. 따라서 각 시나리오에 따른 사회적 사업장당 총비용은 아래 식에 의해 추산되었다.

- 시나리오에 따른 사회적 총 비용 = (국소배기장치 설치 및 유지관리비 + 유해위험방지계획서 작성비용) × 초과 사업장수 + 연간 사회적 총 측정비용(0원)

물질별 신규규제가 발생하는 시나리오는 총 6개로서 시나리오별 사회적 총비용은 <표 III-47>에 정리하였다.

〈표 III-47〉 시나리오별 사회적 총비용(분석기간 30년)

시나리오	물질명	현재 노출기준 (mg/m³)	개정안 (mg/m³)	사업장당 추가비용	사업장수	측정 비용	사회적 총비용
#1	금속분진	10	2안 : 1(R)	할인율(5.5%): 936,648,303 할인율(3%): 911,619,876	2	0	할인율(5.5%): 1,873,296,606 할인율(3%): 1,823,239,752
#2	피로 파우더	5	2안 : 1(R)	할인율(5.5%): 936,648,303 할인율(3%): 911,619,876	0	0	0
#3		5	3안 : 1(R)	할인율(5.5%): 936,648,303 할인율(3%): 911,619,876	0	0	0
#4	흙	5	2안 : 1(R)	할인율(5.5%): 936,648,303 할인율(3%): 911,619,876	9	0	할인율(5.5%): 8,429,834,727 할인율(3%): 8,204,578,884
#5		5	3안 : 1(R)	할인율(5.5%): 936,648,303 할인율(3%): 911,619,876	9	0	할인율(5.5%): 8,429,834,727 할인율(3%): 8,204,578,884
#6	산화 알루미늄	10	2안 : 1(R)	할인율(5.5%): 936,648,303 할인율(3%): 911,619,876	3	0	할인율(5.5%): 2,809,944,909 할인율(3%): 2,734,859,628

(4) 편익분석

시나리오 #1~#6에서 알루미늄 노출기준에 대한 개정을 통해 얻을 수 있는 건강 편익은 <표 III-45>의 통계적인간생명가치(VSL, Value of Statistical Life)와 <표 III-46>의 화학물질의 건강장해를 회피하기 위한 지불의사금액(WTP, Willingness To Pay)을 이용하였고, 편익의 수혜자는 <표 III-44>와 같이 작업환경측정자료를 통해 파악하였다.

가) VSL을 활용한 편익 분석

1인당 VSL은 <표 III-45>와 같이 신영철 등(2019)이 제시한 값을 법적용 예상시점인 2023년 기준으로 환산하였다. 만성적인 건강장해를 감안하여 분석기간을 30년으로 설정하였고, 할인율은 5.5%와 3%를 적용코자 하였다. 한편 신영철 등(2019)에 의하면 화학물질별 초과발암위해도를 근거로 연간 위해저감인구수를 구하고, 이 인구수에 VSL값을 곱하여 편익을 산정하는 방안을 제시하고 있다. 그러나 알루미늄은 발암성으로 분류되지 않은 물질이며, 위해저감인구수를 설정하기에는 이용 가능한 정보가 부족하므로, VSL을 활용한 편익분석은 적절치 않아 생략하기로 한다.

나) WTP를 활용한 편익 분석

1인당 WTP는 <표 III-46>와 같이 신영철 등(2019)이 제시한 값을 법적용 예상시점인 2023년 기준으로 환산하였다. 만성적인 건강장해를 감안하여 분석기간을 30년으로 설정하였고, 미래시점의 화폐가치를 현재화하기 위한 할인율 계수는 할인율 5.5%일 때 15.3, 3%일 때 20.2로 알려져 있다(김승원 등, 2020). 알루미늄의 유해성 특성을 감안하여 인간건강 영향중 잠재건강과 호흡기/심혈관 질환을 회피하기 위한 WTP를 사용하였다.

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

〈표 III-48〉 WTP로 추정된 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 5.5%)

시나리오	물질명	현재 노출기준 (mg/m ³)	개정안 (mg/m ³)	1인당 WTP(원)	노출 인구수	5.5%할인율 (계수)	사회적 총편익(원)
#1	금속분진	10	2안 : 1(R)	52,450	42,237	15.3	33,894,558,945
#2	피로 파우더	5	2안 : 1(R)	52,450	1,699	15.3	1,363,422,015
#3		5	3안 : 1(R)	52,450	1,699	15.3	1,363,422,015
#4	흙	5	2안 : 1(R)	52,450	51,235	15.3	41,115,318,975
#5		5	3안 : 1(R)	52,450	51,235	15.3	41,115,318,975
#6	산화 알루미늄	10	2안 : 1(R)	52,450	28,537	15.3	22,900,514,445

〈표 III-49〉 WTP로 추정된 사회적 총편익(분석기간 30년, 할인율 3%)

시나리오	물질명	현재 노출기준 (mg/m ³)	개정안 (mg/m ³)	1인당 WTP(원)	노출 인구수	3%할인율 (계수)	사회적 총편익(원)
#1	금속분진	10	2안 : 1(R)	47,653	42,237	20.2	40,656,939,172
#2	피로 파우더	5	2안 : 1(R)	47,653	1,699	20.2	1,635,441,429
#3		5	3안 : 1(R)	47,653	1,699	20.2	1,635,441,429
#4	흙	5	2안 : 1(R)	47,653	51,235	20.2	49,318,329,391
#5		5	3안 : 1(R)	47,653	51,235	20.2	49,318,329,391
#6	산화 알루미늄	10	2안 : 1(R)	47,653	28,537	20.2	27,469,447,952

(5) 비용-편익 비교

〈표 Ⅲ-47, 48, 49〉를 이용해 사회적 비용과 편익을 재정리하였고, 할인율별, 시나리오별 B/C Ratio를 구하였다〈표 Ⅲ-50〉. 모든 시나리오에서 B/C Ratio가 1보다 크거나, 편익만 존재하므로 개정안 #2, #3 모두 사회·경제성 평가결과 충분히 타당한 것으로 평가되었다.

〈표 III-50〉 사회적 비용-편익 비교(분석기간 30년)

시나리오	물질명	현재 노출기준 (mg/m ³)	개정안 (mg/m ³)	사회적 총비용(C)		사회적 총편익(B)		B/C Ratio	
				할인율 5.5%	할인율 3%	할인율 5.5%	할인율 3%	할인율 5.5%	할인율 3%
#1	금속분진	10	2안 : 1(R)	1,873,296,606	1,823,239,752	33,894,558,945	40,656,939,172	18.1	22.3
#2	피로 파우더	5	2안 : 1(R)	0	0	1,363,422,015	1,635,441,429	편익만 존재	편익만 존재
#3		5	3안 : 1(R)	0	0	1,363,422,015	1,635,441,429	편익만 존재	편익만 존재
#4	흙	5	2안 : 1(R)	8,429,834,727	8,204,578,884	41,115,318,975	49,318,329,391	4.9	6.0
#5		5	3안 : 1(R)	8,429,834,727	8,204,578,884	41,115,318,975	49,318,329,391	4.9	6.0
#6	산화 알루미늄	10	2안 : 1(R)	2,809,944,909	2,734,859,628	22,900,514,445	27,469,447,952	8.1	10.0

(4) 관리수준 제안

앞선 <표 Ⅲ-50>에서 개정안에 따른 모든 시나리오가 사회·경제성 평가결과 충분히 경제성이 있는 것으로 평가되었으므로, 개정안 2(시나리오 #1, 2, 4, 6) 또는 3안(시나리오 #3, 5)을 묶어서 제안하거나, 또는 물질별로 따로 개정안을 제안해도 무방한 것으로 평가되었다.

IV. 결론 및 제언



IV. 결론 및 제언

1. 요약

알루미늄은 세분류에 따라 전세계적으로 노출기준이 나라마다 상이한 유해인자 중 하나이다. 미국 ACGIH가 2008년 노출기준을 가용성염과 알킬을 제외한 세분류를 통합해 1(R) mg/m³으로 제시했지만 이 노출기준을 따르는 나라는 거의 없었다. 미국의 OSHA는 금속분진, 산화알루미늄, 불용성화합물에 공통적으로 15/5(R) mg/m³으로 노출기준을 적용하고 있다. 일본 일본직업보건학회: 은 금속분진에 대해 2/0.5(R) mg/m³으로 노출기준 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/m³를 호흡하는 것과 동일한 신체 부담이 신경학적 영향의 유병률을 증가시킬 수 있다는 연구도 포함된다. 동물실험에서 쥐에서 산화알루미늄을 사용한 만성 흡입 연구는 NOAEL(no observed adverse effect level)을 2.45 mg Al/m³으로 설정하였다. TLV의 설정근거는 진폐(pneumoconiosis), 하기도 자극(lower respiratory tract irritation), 신경독성(neurotoxicity)이다. 알루미늄 노출된 근로자에 대한 역학 연구가 부족하고 대부분 폐기능을 위주로 조사되었다.

국내 알루미늄 제조·취급 사업장 대상 노출 실태조사에서 알킬을 제외한 5개 세분류의 알루미늄 취급사업장 12개소를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 12개소 사업장의 공기중 알루미늄 농도는 평균 0.016 mg/m³이었고, 최대치는 0.0776 mg/m³이었다. 동일공정에 대하여 총분진 및 호흡성분진을 병치 및 동시 측정하였을 때 알루미늄 총분진 질량농도의 12.1%가 호흡성분진이었다. 광학입자계수기로 분진의 크기분포를 실시간으로 측정하여 비교한 결과 용접흡 및 피로파우더 형태의 알루미늄은 총분진의 48.1%가 호흡성분진이었지만, 광학입자계수기는 알루미늄을 포함

한 모든 분진을 계수한다는 한계가 있다. 알루미늄을 측정된 2018-2020년 작업환경측정결과에서 알루미늄의 형태가 오분류되어 보고된 측정건수가 많았으며(예를 들면 피로파우더의 경우 30.0%로 추정), 실태조사에서 확인한 MSDS 자료에서도 피로파우더에 대한 오분류가 존재했다.

2. 제언

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

- 개정안 (1): 가용성염과 알킬을 제외한 모든 형태에 대해 10 mg/m³을 노출기준으로 통일
- 개정안 (2): 가용성염과 알킬을 제외한 모든 형태에 대해 1(R) mg/m³을 노출기준으로 제시
- 개정안 (3): 가용성염과 알킬을 제외하고 피로파우더와 흙에 대해 1(R) mg/m³, 금속분진, 산화알루미늄, 불용성화합물에 대해 10 mg/m³을 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 분석 장비인 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.

참고문헌

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Aluminum metal and insoluble compounds. Documentations of the threshold limit values and biological exposure indices, 7th Ed. ACGIH, Cincinnati(OH); 2015
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Aluminum metal and insoluble compounds. Documentations of the threshold limit values and biological exposure indices, 7th Ed. ACGIH, Cincinnati(OH); 2019a
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Guide to occupational exposure values. ACGIH, Cincinnati(OH); 2004. p. 5-6
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Guide to occupational exposure values. ACGIH, Cincinnati(OH); 2011. p. 5-6
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values(TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure indices(BEIs). ACGIH, Cincinnati(OH); 2002. p. 13
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values(TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure indices(BEIs). ACGIH, Cincinnati(OH); 2019b. p. 12
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values(TLVs) for chemical substances and physical agents & biological exposure indices(BEIs). ACGIH, Cincinnati(OH); 2020.

- Chung EK. A review on chemical occupational exposure limits in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2007;17(2):K1-K6
- Health and Safety Executive(HSE). EH40/2005 Workplace exposure limits.
- Health and Safety Executive(HSE). EH40/2005 Workplace exposure limits. p. 9 [Accessed 6 August 2020] Available from: <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf>
- Jeong JY, Choi SJ, Kho YL, Kim PG. Extensive changes to occupational exposure limits in Korea. Regul Toxicol Pharmacol 2010;58:345-348. DOI:10.1016/j.yrtph.2010.08.006
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational exposure limits of chemical substances and physical agents. MoEL Notice of Korea 2020-48, 2020
- National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH Manual of Analytical Methods(NMAM), ALUMINUM and compounds, as Al, Fourth Edition, 8/15/94
- National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH pocket guide to chemical hazards.
- National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH pocket guide to chemical hazards. [Accessed 6 August 2020] Available from <https://www.cdc.gov/niosh>
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Permissible Exposure Limits/OSHA Annotated Table Z-1.
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Permissible Exposure Limits/OSHA Annotated Table Z-1. [Accessed 6 August 2020] Available from <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-1.html>
- Recommendation of occupational exposure limits(2020-2021). The Japan Society for Occupational Health. Environ Occup Health Practice 2020; 2

- 고용노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준. 2020 고용노동부고시 제 2002-8
- 노동부. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준. 2002 노동부고시 제 2002-8
- 박승현, 김세동. ACGIH TLV가 전면 개정된 알루미늄 화합물의 노출기준 관리. 한국산업보건학회지 2020: 30(3): 249-255
- 윤충식. 새 국제표준규격에 의한 수용성 유해금속의 평가. 한국산업보건학회지 2003: 13(3): 1-10
- 정규철, 산업중독편람, 신광출판사
- 한국산업안전보건공단, 알루미늄에 대한 작업환경측정·분석 기술지침(KOSHA GUIDE A-10-2015), 2015

Abstract

A study on the domestic workplace survey and socioeconomic impact analysis for the revision of occupational exposure limits for aluminum

Objective: 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 to revise domestic aluminum exposure limits.

Results: The major aluminum exposure limits at home and abroad show a big difference as follows. (Ministry of Employment and Labor) It is subdivided into 5 categories, and different exposure limits are presented for each category, and there are no exposure limits for insoluble compounds. (ACGIH) In 2008, the exposure limit was presented as 1(R) mg/m³ by integrating the subcategories excluding soluble salts and alkyls. (OSHA) Proposed exposure limit of 15/5(R) mg/m³ common to metal dust, aluminum oxide, and insoluble compounds. (Japan) Strict management by suggesting an exposure limit of 2/0.5(R) mg/m³ for metal dust.

The toxicity of aluminum, which was revealed through animal experiments and epidemiological investigations and became the basis for setting exposure limits abroad, can be summarized as follows. Proposed that the same body burden equivalent to breathing 1.6 mg/m³ for 40 years with prolonged exposure to aluminum and aluminum compounds may increase the prevalence of neurological effects. Chronic inhalation study using aluminum oxide in rats set NOAEL (no observed adverse effect level) to 2.45 mg Al/

m³. Basis for the establishment of TLV: pneumoconiosis, lower respiratory tract irritation, neurotoxicity.

The following results were obtained by examining 12 aluminum handling workplaces in 5 subcategories excluding alkyl. The average concentration of aluminum in the air at 12 workplaces was 0.016 mg/m³, and the maximum was 0.0776 mg/m³. 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. In the 2018-2020 work environment measurement reports that measured aluminum, there were a lot of reported measurements in which the type of aluminum was misclassified (for example, 30.0% for pyro-powder). There was an MSDS containing misclassification for pyro-powder in the field study.

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/m³ is unified as the exposure limit except for soluble salts and alkyls. Proposal (2): 1(R) mg/m³ as the exposure limit for all forms except soluble salts and alkyl. Proposal (3): 1(R) mg/m³ for pyro-powder and welding fume, and 10 mg/m³ 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. Targeting only respiratory dust is judged to narrow the target organ.

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 alkyls, soluble salts



부록 1

실태조사 사업장별 개요

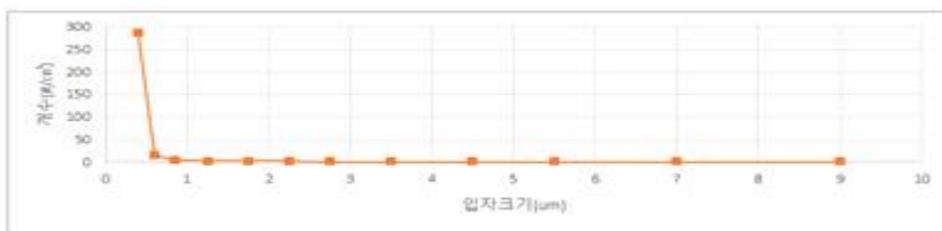
사업장명	사업장1	대상공정	폐수처리
소재지	인천 미추홀구	조사일자	2021년 7월 26일
대상물질	알루미늄(가용성염)		
작업상황	황산알루미늄 투입 및 폐수처리 관리		
측정결과	호흡성	불검출~0.0001(평균 0.00004)/m ³	
	총분진	불검출	

측정사진

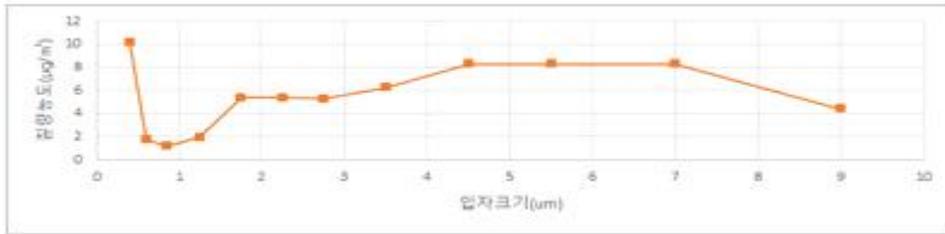


OPS

[입자개수]



[질량농도]



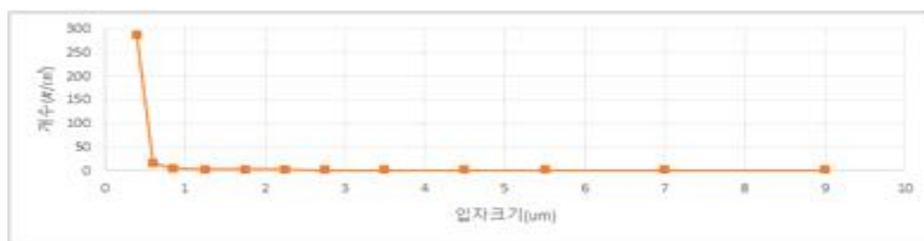
사업장명	사업장2	대상공정	폐수처리
소재지	인천 미추홀구	조사일자	2021년 9월 7일
대상물질	알루미늄(가용성염)		
작업상황	황산알루미늄 투입 및 폐수처리 관리		
측정결과	호흡성	불검출~0.0018(평균 0.0006)/m ³	
	총분진	불검출~0.0012(평균 0.0004)/m ³	

측정사진

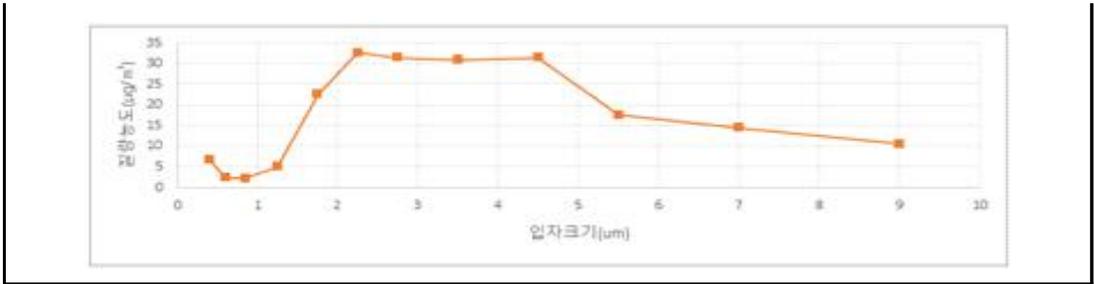


OPS

[입자개수]



[질량농도]



사업장명	사업장3	대상공정	절단
소재지	인천 서구	조사일자	2021년 7월 16일
대상물질	알루미늄(금속분진)		
작업상황	원형관을 자동 절단기기에 투입하여 절단작업을 반복		
측정결과	호흡성	0.0003~0.0014 (평균 0.0009)/m ³	
	총분진	0.0012~0.2313(평균 0.0776)/m ³	

작업배치도



(샘플러 위치)

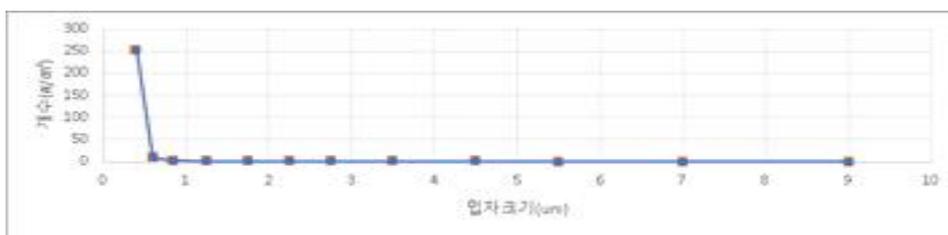
절단기기



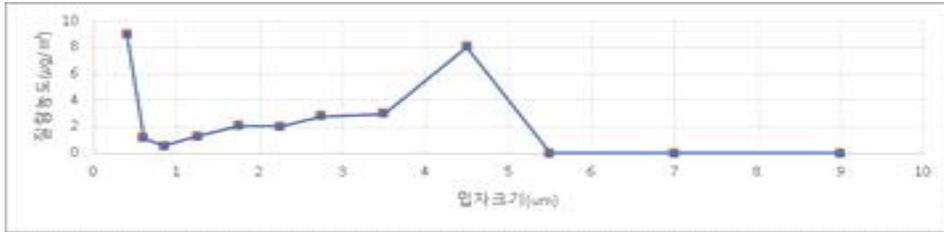
(원관 적재)

OPS

[입자개수]



[질량농도]



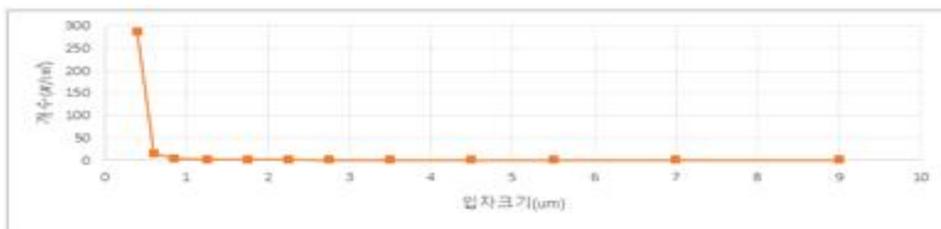
사업장명	사업장4	대상공정	연마
소재지	인천 미추홀구	조사일자	2021년 7월 29일
대상물질	알루미늄(금속분진)		
작업상황	알루미늄 구조물을 연마기로 수동연마		
측정결과	호흡성	불검출	
	총분진	0.0001~0.1163(평균 0.0390)/m ³	

측정사진

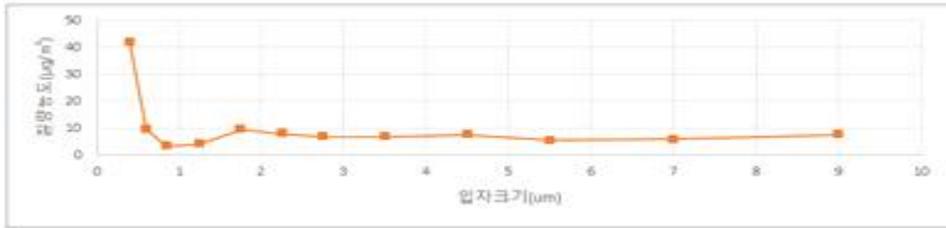


OPS

[입자개수]



[질량농도]



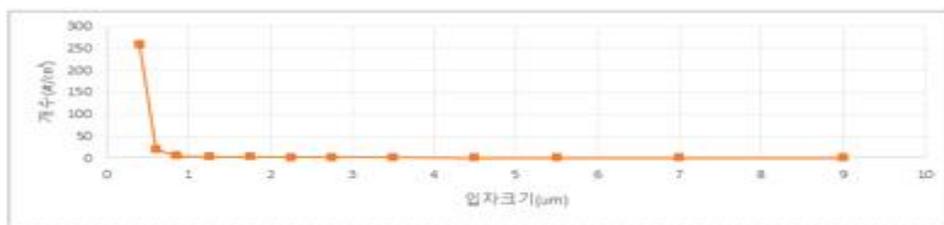
사업장명	사업장5	대상공정	절단
소재지	인천 부평구	조사일자	2021년 9월 15일
대상물질	알루미늄(금속분진)		
작업상황	알루미늄 샷시를 절단기에 넣고 절단 후 정리		
측정결과	호흡성	0.0010~0.0015(평균 0.0013)/m ³	
	총분진	0.00001~0.0239(평균 0.0064)/m ³	

측정사진

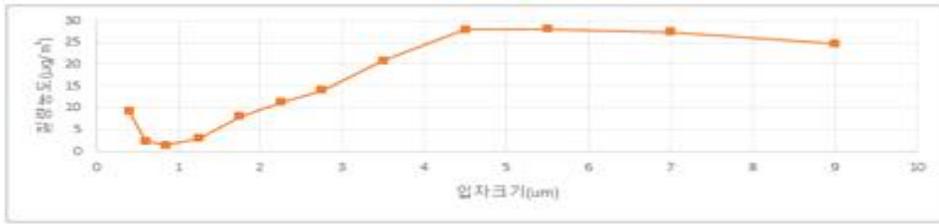


OPS

[입자개수]



[질량농도]



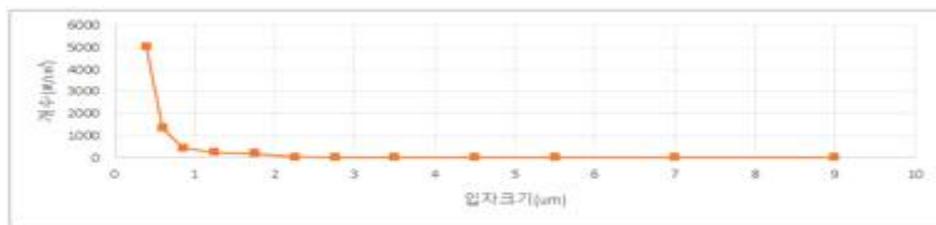
사업장명	사업장6	대상공정	다이캐스팅
소재지	인천 미추홀구	조사일자	2021년 8월 19일
대상물질	알루미늄(용접흡)		
작업상황	알루미늄괴(84~85%)를 다이캐스트에 주입하여 성형된 제품을 수거 및 관리		
측정결과	호흡성	불검출	
	총분진	불검출~0.0181(평균 0.0061)/m ³	

측정사진

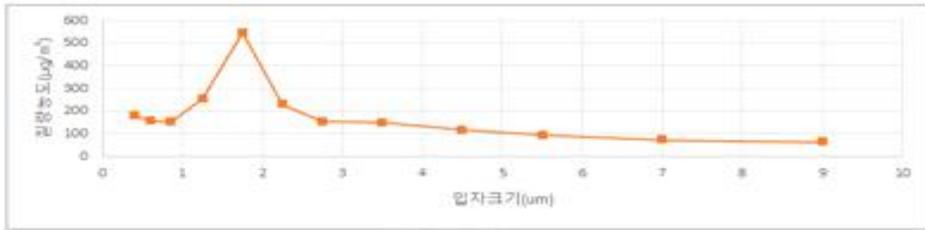


OPS

[입자개수]



[질량농도]



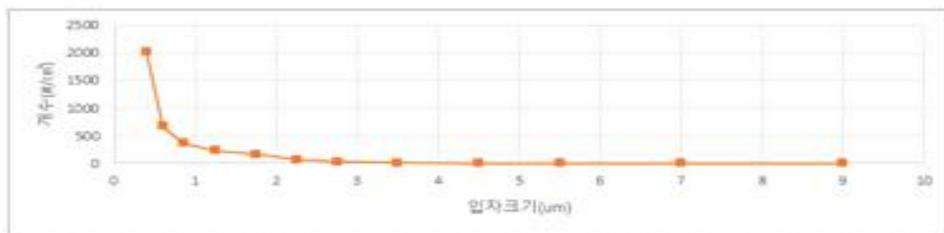
사업장명	사업장7	대상공정	용해
소재지	경기 김포시	조사일자	2021년 8월 24일
대상물질	알루미늄(용접흡)		
작업상황	비철금속을 용해하여 합금괴 제조(알루미늄 함유 0.8%전후)		
측정결과	호흡성	불검출	
	총분진	0.0044~0.0172(평균 0.0088)/m ³	

측정사진

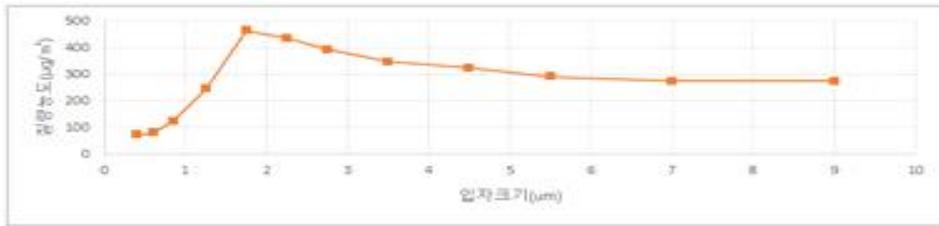


OPS

[입자개수]



[질량농도]



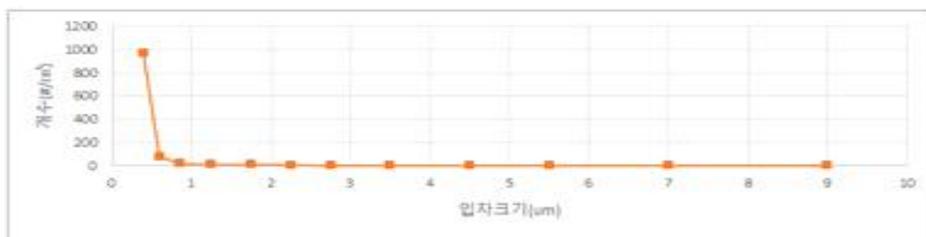
사업장명	사업장8	대상공정	용접1, 2
소재지	인천 미추홀구	조사일자	2021년 8월 25일
대상물질	알루미늄(용접흡)		
작업상황	알루미늄이 6~8.5%함유된 ERCuAl-A1용접봉을 사용하여 용접작업		
측정결과	호흡성	공정 1 : 0.0011~0.0019(평균 0.0016)/m ³ 공정 2 : 0.0013~0.0496(평균 0.0177)/m ³	
	총분진	공정 1 : 0.0044~0.0326(평균 0.0185)/m ³ 공정 2 : 0.0034~0.0058(평균 0.0044)/m ³	

측정사진

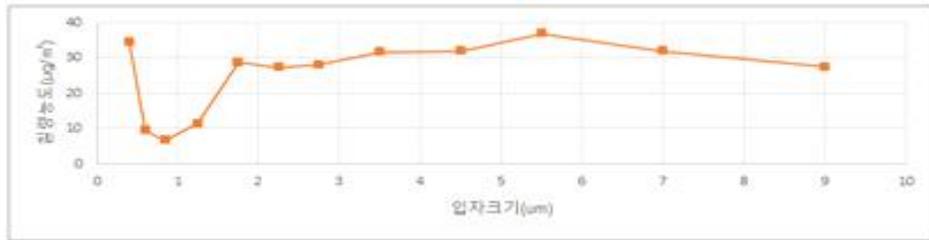


OPS

[입자개수]



[질량농도]



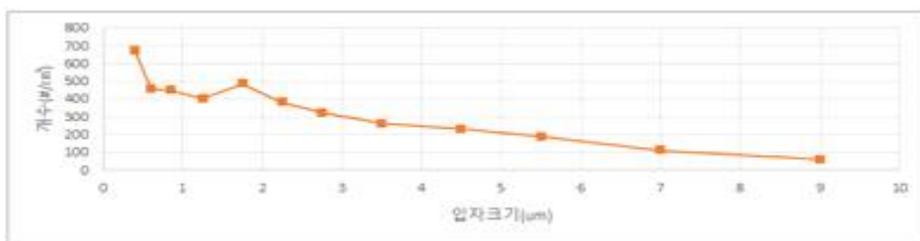
사업장명	사업장9	대상공정	분체도장
소재지	인천 서구	조사일자	2021년 9월 14일
대상물질	알루미늄(피로파우더)		
작업상황	분말 도료(알루미늄 파우더 1~20%함유)를 스프레이로 분사하여 자재에 도포		
측정결과	호흡성	불검출~0.0019(평균 0.0006)/m ³	
	총분진	0.0358~0.0743(평균 0.0502)/m ³	

측정사진

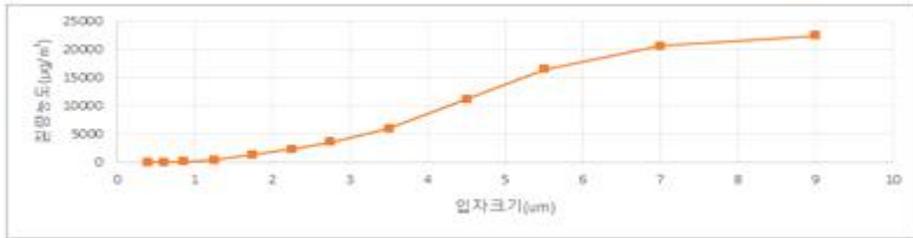


OPS

[입자개수]



[질량농도]



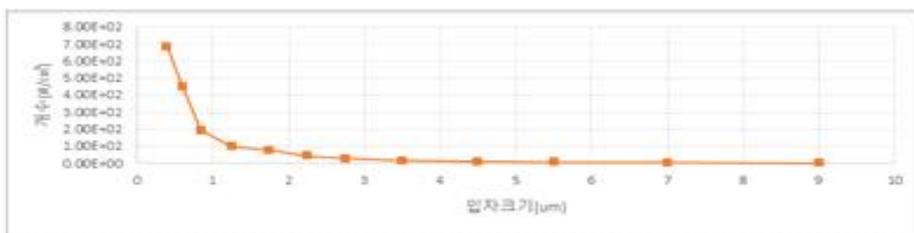
사업장명	사업장10	대상공정	믹싱1, 2
소재지	경기 김포시	조사일자	2021년 9월 27일
대상물질	알루미늄(피로파우더)		
작업상황	알루미늄 파우더(원자재)를 첨가하여 믹싱		
측정결과	호흡성	공정 1 : 불검출~0.0002(평균 0.0001)/m ³ 공정 2 : 0.0003~0.0006(평균 0.0004)/m ³	
	총분진	공정 1 : 0.0005~0.0023(평균 0.0014)/m ³ 공정 2 : 0.0017~0.0018(평균 0.0017)/m ³	

측정사진

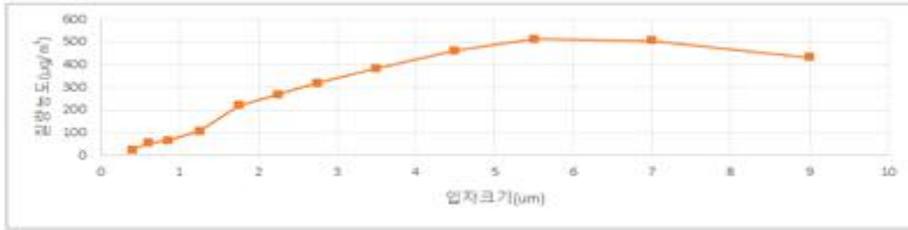


OPS

[입자개수]



[질량농도]



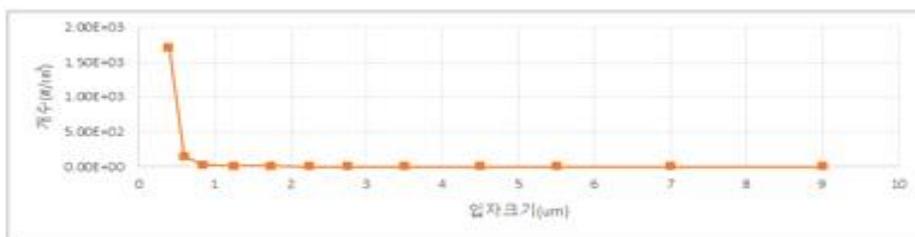
사업장명	사업장11	대상공정	표면연마
소재지	인천 부평구	조사일자	2021년 9월 17일
대상물질	산화알루미늄		
작업상황	분말 도료(알루미늄 파우더 1~20%함유)를 스프레이로 분사하여 자재에 도포		
측정결과	호흡성	0.00003~0.0014(평균 0.0008)/m ³	
	총분진	불검출~0.0041(평균 0.0025)/m ³	

측정사진

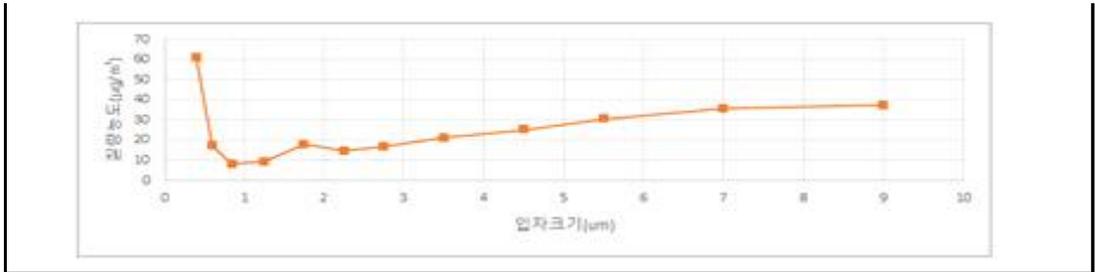


OPS

[입자개수]



[질량농도]



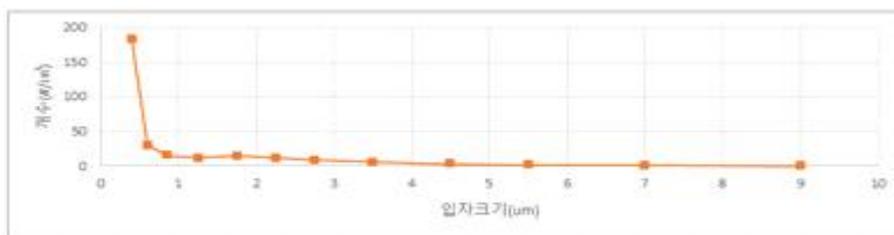
사업장명	사업장12	대상공정	자동샌딩
소재지	인천 남동구	조사일자	2021년 9월 2일
대상물질	산화알루미늄		
작업상황	산화알루미늄이 96.5%함유된 쇼트볼로 자동샌딩하는 기기의 자재 입출고 관리		
측정결과	호흡성	0.0003~0.0015(평균 0.0009)/m ³	
	총분진	0.0011~0.0032(평균 0.0023)/m ³	

측정사진

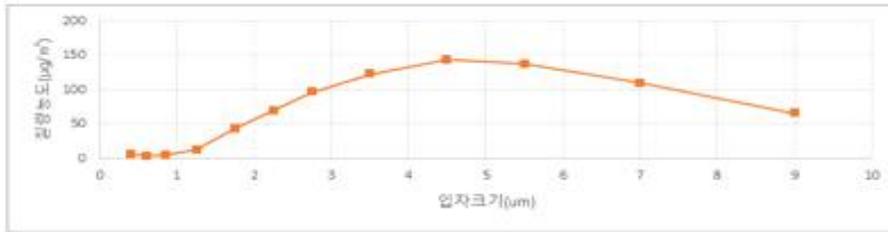


OPS

[입자개수]



[질량농도]



부록 2

알루미늄에 대한 Documentation of TLVs

알루미늄에 대한 Documentation of TLVs

미국 ACGIH에서는 2007년 Notice of intended change에서 알루미늄에 대한 모든 노출기준을 삭제하고 “알루미늄 금속 및 불용성화합물(Aluminum metal and insoluble compounds)로 개정하면서 호흡성 입자물질, 1 mg/m³으로 변경하였다.

주요 개정 이유는 일반적으로 알루미늄은 거의 흡수되지 않으며 폐의 점액섬모운동에 의한 정화작용으로 빠르게 제거되지만 장기간 노출 시 체내에 축적되지 때문에 노출기준을 호흡성분진 1 mg/m³로 제안하고 있으며 이 기준 이하에서는 진폐증과 신경독성 장애를 예방할 수 있는 수준이기 때문이라고 언급하고 있다. 또한 알루미늄(가용성 염), 알루미늄(알킬) 및 알루미늄(피로파우더) 등에 대해서는 독성자료가 불충분하다고 설명하고 있으며 자세한 변경 사유는 아래와 같다(ACGIH, 2007; 김기연 등, 2007).

1) 요약

알루미늄 금속 및 불용성 알루미늄 화합물에 대해 1 mg/m³의 TLV-TWA(호흡성 fraction)가 권장된다. 일반적으로 이러한 형태의 알루미늄은 잘 흡수되지 않으며 점액섬모 및 기관지폐포 청소(예: 폐포 대식세포)에 의해 폐에서 쉽게 제거가 된다. 그러나 장기간 노출되면 알루미늄이 체내에 축적된다는 증거가 있다. 높은 수준(100 mg/m³-년)의 알루미늄 분진(2.5 mg/m³에서 40년 노출에 해당)에 노출된 작업자에서 방사선 사진 및 경미한 폐 기능 변화가 관찰되었다.

동물 연구에서 2.5 mg/m³의 낮은 농도의 호흡성 입자에서 육아종 반응 및 기관지폐포 세척액의 생화학적 변화를 포함하여 불용성 형태의 알루미늄이 호흡기관에 미치는 영향이 입증되었다. 여러 연구에 따르면 알루미늄에 장기간 흡입 노출되면 40년 동안 1.6 mg/m³ 흡입에 해당하는 신체 부담이 발생하여 미묘한 신경학적 결함이 발생할 수 있다. 이 범위의 공기 중 농도는 100 g/L의 뇨 중 알루미늄 수준에 해당하며, 이는 신경학적 영향의 임계값을 나타내는 것으로 보인다.

따라서 1 mg/m³의 TLV-TWA, 호흡성 입자 물질은 폐와 신경계에 대한 잠재적인 역효과로부터 충분히 보호되어야 할 필요가 있다. 권장되는 TLV-TWA는 불용성 알

루미늄 화합물(예: 알루미늄 금속, 산화알루미늄, 스탬프 알루미늄(stamped aluminum), 보크사이트 광석 분진의 알루미늄, 에머리)에 적용된다. 가용성 알루미늄 화합물, 알킬 알루미늄 화합물, 알루미늄 금속 플레이크(aluminum metal flake) 및 , 산화 억제 오일로 코팅된 분말(powder coated with oxidation-inhibiting oils)에 대한 독성 자료는 부적절하다.

알루미늄의 특정 화합물은 예를 들어 안티몬화알루미늄, 불화알루미늄, 인화알루미늄 및 셀렌화알루미늄과 같이 구성 성분에 존재하는 다른 원소로 인해 건강에 위험을 줄 수 있다. 이러한 화합물에 대한 TLV에 대한 논의를 위해 개별 TLV® 문서(예: 안티몬, 불소, 인 및 셀레늄)를 참조하면 된다.

알루미늄 화합물이 발암성이라는 증거는 없다. 따라서 인체 발암 물질로 분류할 수 없는 A4 표기한다. 피부 또는 SEN 표기를 평가하는 데 사용할 수 있는 자료가 존재하지 않는다.

2) 물리화학적 성상

알루미늄은 은백색의 가단성, 연성, 금속성 원소이다. 이 물질은 지구에서 3번째로 풍부한 원소로 지각의 8.3%를 구성하며 주로 복합 규산염(silicates)이다. 알루미늄은 양쪽성으로 알루미늄 염과 알루미늄산염을 형성한다. 원소 알루미늄의 물리적 및 화학적 특성은 다음과 같다(Kirk-Othmer, 1983; IPCS, 1997; Merck, 2002; ATSDR, 1998; Dinman, 2000).

- Atomic weight: 26.98
- Density (g/cm³ at 25°C): 2.7
- Melting point: 660°C
- Boiling point: 2327°C
- 용해도: 물, 진한 질산 및 뜨거운 아세트산에 불용성; 알칼리, 염산 및 황산에 용해된다.
- 반응성: 산소와 반응하여 열을 생성함. 질소, 황 및 탄소와 고온 및 산소 부재 시 반응하여 각각 질화알루미늄, 황화알루미늄 및 탄화알루미늄을 생성한다. 이는 수산화나트륨과 수산화칼륨과 강한 무기산에 의해 강력하고 빠르게

반응하여 수소를 생성하고 촉매의 존재 하에 할로젠 및 염소화 탄화수소와 적극적으로 반응한다. 알루미늄과 알칼리 또는 무기산이 접촉하면 수소 가스가 생성되어 공기 중에서 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다. 물은 알루미늄으로 화재에 사용해서는 안 되며 모래, 활석 또는 염화나트륨으로 제어해야 한다. 용융 알루미늄은 물과 격렬하게 반응하여 격렬한 폭발을 일으킬 수 있다.

알루미늄은 전기와 열의 좋은 전도체이다. 구리보다 파운드당 2배의 전기를 전도하고 스테인리스강보다 9배 많은 열을 전도한다. 알루미늄 금속은 산소와 반응하여 열을 생성한다. 산소와의 반응은 금속 표면에 얇은 산화알루미늄 보호층을 생성한다. 이 보호 필름은 두께가 약 20~30 옹스트롬에 불과하다. 얇지만 이 코팅은 금속에 단단히 결합되어 있다. 산화막은 또한 긁히면 자가 치유되며 지속적으로 부식을 방지하는 역할을 한다.

알루미늄과 그 화합물의 특성과 용도에 대한 유용한 정보는 Patty의 Industrial Hygiene and Toxicology(Dinman, 2000), The Merck Index(2002), Kirk-Othmer Encyclopedia(1983)에서 찾을 수 있다. 두 개의 보고서가 주목할만 한데 하나는 미국 독성 물질 및 질병 등록부(U.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR, 1998), 다른 하나는 화학 물질 안전에 관한 국제 프로그램(International Programme on Chemical Safety)에 대한 자료이다 (IPCS, 1997).

3) 직업적 노출의 주요 발생원(major sources of occupational exposure)

알루미늄은 가장 널리 사용되는 비철금속이다. 알루미늄 금속 및 합금의 용도에는 전선, 산업 및 가정 건설, 자동차 및 항공기 프레임 및 가전 제품 부품이 포함된다. 식품 산업의 주요 용도에는 조리 기구, 음료 용기 및 식품 포장용 호일에 함유된다. 알루미늄 화합물은 화장품 및 탈취제/발한 억제제(염화알루미늄)에 사용된다. 공공 음용수 처리에서 촉매(염화알루미늄) 및 응집제로서; 제약 용도(예: 제산제, 진통제, 소독제); 동물용 제품; 및 화학 반응에서 응집제 및 응고제로도 사용된다. 미세하게

분할된 알루미늄 금속 분진 또는 플레이크는 thermit 용접과 불꽃놀이 및 페인트 제조에 사용된다.

알루미늄 알킬의 주요 용도는 촉매이다. 이 화합물 그룹의 독성에 관한 정보는 비교적 적지만, 튀는 경우 피부나 눈을 부식시키는 것으로 알려져 있다(Dinman, 2000).

자연적으로 발생하는 많은 형태의 알루미늄이 있으며, 이는 대부분 다른 원소와 결합된 산화물 및 규산염이다. 여기에는 아래와 같은 물질이 포함된다.

- 장석
- 운모
- 고령토($H_4Al_2Si_2O_9$)
- 마그네슘 알루미늄 규산염($Al_2O_3 \cdot MgO \cdot SiO_4$)
- 스피넬($MgO \cdot Al_2O_3$)
- 석류석($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$)
- 크리소베릴($BeO \cdot Al_2O_3$)
- 에메랄드($2BeO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$)
- 터키옥($Al_2(OH)_3 \cdot PO_4 \cdot H_2O$)

알루미늄의 가장 중요한 상업적 광석은 보크사이트이다. 보크사이트는 산화알루미늄(Al_2O_3), 옥시수산화알루미늄(Al_2OOH), 수산화알루미늄($Al(OH)_3$)을 비롯한 수화된 산화알루미늄의 혼합물이다. 보크사이트 광석은 주로 노천 채굴 방법으로 회수된다. 광석은 드릴링, 발파 및 삽질로 제거된 다음 분쇄, 선별, 건조, 밀링 및 추가 처리를 위해 보내진다. 바이엘 공정에서는 전처리된 광석을 소다회 및 석회와 혼합한 다음 볼 밀에서 밀링된다. 광석의 알루미늄은 알루미늄산 나트륨으로 용해된다. 그 후 액체는 볼 밀에서 배출되고 가열된 탱크 또는 소화조로 이동된다. 고형물, 주로 모래, 철 및 기타 규산염은 바닥에 가라앉고 제거한다. 그 후 액체는 열려 있는 큰 통으로 펌핑된다. 용해된 알루미늄은 Vat에서 결정화되어 바닥으로 떨어진다. 침전물은 침전 탱크로 펌핑되어 가성 소다와 석회를 제거하기 위해 세척된다. 침전물은 하소되어 산화물에서 금속으로의 환원을 위해 사일로로 옮겨진다. 환원은 탄소 전극을 사용하여 전해 방식으로 수행된다. 환원 과정은 $980^\circ C$ 에서 유지되는 용융 빙정석($3NaF \cdot AlF_3$)으로 채워진 셀 또는 포트에서 발생한다. 무거운 직류가 부유된 양극에

서 알루미늄산나트륨과 용융된 빙정석을 통해 음극으로 흐른다. 전류는 양극 탄소 전극과 결합하는 산소를 제거한다. 용융 알루미늄은 포트에서 수집된다. 포트 룸 작업자는 셀 포트(예: 불화수소, 불화물 염, 빙정석, 이산화황 및 아크롤레인) 또는 전극(예: 콜타르 피치 휘발성 물질 및 다환 방향족 탄화수소)의 오염 물질에 잠재적으로 노출된다.

4) 동물연구

(1) 급성/아급성

Llobet et al.(1987)은 쥐와 생쥐에서 질산알루미늄, 염화알루미늄, 브롬화알루미늄, 황산알루미늄을 포함한 알루미늄 화합물의 급성 경구 및 복강 내(IP) 검사 결과를 보고하였다. 이들 화합물 모두는 경구 LD₅₀ 값이 1,598에서 > 9,000 mg/kg 범위이고 복강 내(IP) LD₅₀ 값이 610에서 1,587 mg/kg 범위인 비교적 낮은 수준의 급성 독성을 보였다.

Thomson et al.(1986)은 수컷 Fischer 쥐를 대상으로 한 급성 4시간 흡입 연구에서 황동과 알루미늄에 대한 폐 반응을 평가하기 위해 기관지 폐포 세척을 사용했다. 수컷 쥐 그룹은 10, 50, 100, 200 또는 1,000 mg/m³ 수준의 미세하게 분할된 알루미늄 분진에 노출시켰다(질량 중앙값 공기역학적 직경[MMAD] = 1.58 μm). 생리적 및 조직학적 변화에 대한 평가는 노출 후 24시간, 14일 및 3개월에 이루어졌다. 알루미늄 분진에 노출되어도 폐 기능에는 변화가 없었다. 그러나 50 mg/m³에서 세척액 매개변수에 지속적인 효소 및 세포학적 변화가 있었고 200 mg/m³에서 폐 및 폐문 림프절에서 미세육아종(microgranuloma) 발생의 현미경적 증거가 있었다.

알루미늄 화합물을 사용한 기관 내 삽입 연구는 이들이 섬유화 특성을 갖지 않음을 나타낸다(Ess et al., 1993). Tornling et al.(1993)은 불소가 흡착되지 않은 산화알루미늄 40 mg을 기관 내 점적하면 피브로넥틴 농도만 증가하는 반면, 불소가 부착된 산화알루미늄은 기관지폐포 세척(BAL)에서 대식세포와 호중구를 크게 증가시킨다는 것을 보여주었다. 이것은 후자의 불화물 관련 입자의 더 큰 자극 가능성을 나타낸다. 알루미늄 화합물(예: 수산화알루미늄 및 인산알루미늄)은 인간 및 동물용

백신의 보조제로 사용된다(Gupta, 1998). 면역 능력이 있는 세포의 자극, 호산구 증가증의 유도 및 대식세포의 활성화를 통해 흡착된 항원과 함께 이러한($<10\text{ m}$) 입자의 존재에 의해 면역화가 향상된다.

Rimaniololet al.(2004)는 시험관 내에서 분리된 대식세포에 대한 수산화알루미늄 아주반트의 효과를 조사하고 입자가 포함된 대식세포가 항원 특이적 기억 반응을 유도할 수 있는 수지상 세포(즉, 성숙한 항원제시 대식세포)의 고전적인 세포 표면 마커를 나타낸다는 것을 확인하였다.

(2) 아만성/만성

가) 경구(oral)

Hicks et al.(1987)은 한 달 동안의 섭취 연구를 수행하였다. 인산알루미늄나트륨과 수산화알루미늄을 사용한 쥐에서. 식이에서 각각 30,000 ppm 또는 14,470 ppm의 최고 투여량(302 mg/kg/day에 해당)을 투여했을 때 치료 관련 효과 또는 뼈에 알루미늄 침착이 관찰되지 않았다. Katz et al.(1984)은 70 mg/kg/day의 용량으로 6개월 동안 인산알루미늄나트륨을 개에게 섭취시켰다. 그들은 음식 소비의 감소를 발견했지만 체중 감소와 다른 효과는 확인할 수 없었다. Peterson et al.(1990)은 개를 대상으로 유사한 연구를 수행했으며 인산 알루미늄 나트륨으로만 체중 감소를 언급하였다.

Walton(2007)은 6마리의 기억 훈련된 Wistar 쥐에게 16개월 동안 1.5 mg/kg/day의 양으로 알루미늄에 노출시킨 후 식수에 노출시켰고 지속적으로 보상을 받는 교대 T-maze 작업에서 그들의 성과를 평가하였다. 중년(12-23개월) 및 노년(>24 개월) 동안 매주 6마리 중 2마리는 평균 기억 점수가 상당히 낮았고 행동 징후를 보였다. 저자는 더 많은 수의 동물과 다른 종을 사용하여 이 연구를 반복할 것을 권장하였다.

나) 흡입(inhalation)

Drew et al.(1974)는 5-6주 동안 33 mg/m³ 농도의 염화알루미늄에 노출된 24마리의 수컷 골든 시리아 햄스터가 폐포 벽이 두꺼워지고 대식세포의 초점이 증가했다고 보고하였다.

Steinhagen et al.(1978)은 pH 7에서 불용성으로 간주되는 염화알루미늄을 사용하여 Fischer 쥐와 기니피그에서 흡입 연구를 수행하였다. 동물 그룹은 0, 0.25, 2.5 또는 25 mg/m³(1.2~1.6 m 알루미늄 클로로하이드레이트의 질량 증가 공기역학적 직경))의 농도에서 6개월 동안 노출시켰다(6개월 동안 6시간/일, 5일/주). 가장 낮은 농도에서는 폐포 대식세포의 수가 약간만 증가하였다. 더 높은 농도에서는 폐포 대식세포의 병소로 구성된 폐 병변(육아종 반응)이 명백하게 나타났다. 같은 조사자들은 같은 농도를 사용한 장기간 연구에서도 기니피그를 21개월 동안 노출시켰고 쥐가 24개월 동안 노출되었다는 결과를 보고하였다(Stone et al., 1979). 그러나 이 연구에서는 조직학적 검사가 수행되지 않았다. 고용량 기니피그의 기관지주위 림프절에서 알루미늄 농도가 증가하여 이 종의 lymphatic clearance가 입증되었다. 또한 고용량 쥐의 부신에서도 증가된 Al 수준이 측정되었다.

Sprague-Dawley 쥐 50마리로 구성된 그룹을 5개월 동안 1.8 mg/m³ 농도의 염화알루미늄(알루미늄의 가용성 형태)과 1.3 mg/m³ 농도의 호흡성 분진 불화알루미늄에 6시간/일, 주 5일 노출시켰다(Finelli and Que Hee, 1981) 회수된 폐포 대식세포의 수에는 영향이 없었다. 그러나 두 그룹의 동물 모두 lavage fluid에서 증가된 리소자임 수준(lysozyme levels)을 보여주었다. 이러한 효소 변화의 중요성은 알려져 있지 않다.

Piggot et al.(1981) 암컷 50마리와 수컷 Wistar 쥐 50마리를 Saffil 알루미늄 섬유(96% 산화알루미늄)에 86주 동안 2.18~2.45 mg/m³ 농도로, 그리고 크리소타일 석면에 4.6 mg/m³ 농도로 노출시켰다. 그들은 chrysotile에서 섬유증(fibrosis)을 발견했지만 알루미늄 산화물 섬유에서는 발견하지 못했다. 알루미늄 섬유에 대한 폐 반응은 최소화되었으며 일반적으로 착색된 폐포 대식세포 그룹에 국한되었으며 위상차 현미경으로 볼 때 섬유 조각을 볼 수 있었다.

다) 발암성(carcinogenicity)

Leonard와 Gerber(1988)는 알루미늄과 그 화합물이 발암성을 나타내는 징후가 없다고 언급하였다. Stanton(1974)은 내화성 산화알루미늄의 섬유를 피하 주사하거나 흉막 내 이식하면 Piggot et al.(1981)의 후속 작업으로 국소 육종을 생성하기 때문에 발암 가능성이 있는지 의문을 제기하였다. 그러나 이전에 논의한 바에 따르면 이러한 연구원들은 알루미늄이 이러한 성장의 원인이 아니라 이물질에 대한 비특이

적 반응으로 유도되었다는 결론을 내렸다.

라) 유전독성(genotoxicity)

여러 연구에 따르면 알루미늄의 다양한 화합물은 염색체에 포함된 DNA와 상호작용을 할 수 있다. Manna & Das(1972)는 마우스에서 염화알루미늄을 장기간 IP 투여한 후 골수 세포가 세포 분열과 염색분체 이상에서 용량 관련 감소를 보였다고 보고하였다. Roy et al.(1991)의 연구에서도 황산알루미늄에서도 동일한 결과를 보였다. 그러나 산화알루미늄, 염화알루미늄 및 알루미늄을 사용한 다른 생체내 분석은 음성으로 확인되었다(Leonard and Gerber, 1988; Bhamra와 Costa, 1992; Nishioka, 1975).

마) 생식/발달 독성(reproductive/developmental toxicity)

Domingo(1995)는 알루미늄 화합물의 생식 및 발달 독성을 검토하고 다양한 경로를 통해 비교적 고용량의 가용성 알루미늄 화합물을 투여한 후 동물에 미치는 영향에 대한 보고를 요약하였다. 대표적인 연구는 아래에 간략하게 설명되어 있다.

Bernuzzi et al.(1986, 1989)는 160-200 mg/kg 염화알루미늄 또는 젖산염(aluminum chloride or lactate)으로 수태된 쥐에게 경구 치료를 하면 어미에 영향을 미치지 않지만 이유 후 사망률을 증가시키고 새끼의 신경 운동 발달을 지연시킨다는 것을 보여주었다. 같은 그룹의 조사자들은 임신 2주와 3주 동안 400 mg/kg의 양으로 알루미늄 젖산염에 노출된 수태된 쥐의 새끼가 조작적 조건화에서 감소를 나타냈다는 것을 보여주었다(Muller et al., 1990). Cherroret et al.(1992)은 생후 5일에서 17일까지 젖산알루미늄(0, 100, 200 mg/kg/day)으로 새끼 쥐를 경구 삽입으로 처리한 결과 뇌에서 콜린 아세틸트랜스퍼라제(choline acetyltransferase) 활성이 감소했지만 학습 능력에는 변화가 없다는 것을 관찰하였다. 200 mg/kg/day에서 관찰된 방사형 미로 테스트에서 일반적인 활동이 약간 감소하였다.

임신한 쥐에게 75~200 mg/kg의 염화알루미늄을 복강 내 투여하면 심각한 모체 독성, 배아 사망 및 태아 흡수가 발생하였다(Bennett et al., 1975). 대조적으로, 수산화알루미늄의 불용성 형태를 약 1,100 mg/kg의 고용량으로 쥐에게 복강 내 주사했을 때 모체 또는 태아 독성이 관찰되지 않았다(Domingo, 1989; Gomez et al.,

1990).

Muller et al.(1992) 수유 중인 새끼에 대한 효과를 평가하기 위해 분만 후 처음 12일 동안 염화알루미늄(10 mg Al/kg/일)을 쥐에게 복강 내 주사하였다. 모유의 알루미늄 수치가 높아졌음에도 불구하고 강아지 혈장이나 조직에서는 측정할 수 있는 수치가 없었다. 새끼의 출생 후 성장 지연은 관찰된 모체의 음식 섭취량의 현저한 감소와 관련이 있었다.

바) 흡수, 분포, 대사 및 배설(absorption, distribution, metabolism, and excretion)

알루미늄 화합물, 특히 불용성 화합물은 위장관에서 최소한의 흡수를 나타내므로 실험동물에서 섭취 시 비교적 낮은 수준의 급성 독성을 나타낸다.

Ananeet al.(1995)은 마우스의 피부와 코 점막에 놓인 염화알루미늄의 경피 및 점막 흡수를 연구하였다. 최소한의 섭취가 관찰되었지만 염화알루미늄의 알려진 자극 효과 때문에 연구는 제한적이었다.

실험적 증거로서 Greger et al.(1986)과 Greger & Powers(1992)는 위장관에서 수산화알루미늄의 흡수가 매우 낮다는($0.01 \sim 0.04\%$) 결론을 지지하였다. 낮은 경구 생체이용률(Low oral bioavailability)($0.01-0.05\%$)과 최소 신체 부담은 Ecelbarger & Greger(1991)에 의해 보고된 수산화알루미늄을 사용한 한 달 간의식이 섭취 연구에서도 언급되었다.

Priest(2004)는 1990년에 사용할 수 있게 된 방사성 표지된 ^{26}Al 기술을 사용하여 알루미늄의 약물동력학을 요약하고 알루미늄이 골격과 뇌에 소량 축적되고 위장관에서 제한된 흡수 후에 소변으로 신속하고 거의 완전히 제거된다는 결론을 내렸다. 방사성 표지된 ^{26}Al 흡입 연구도 태그가 지정된 산화알루미늄을 사용하여 수행되었다. 결과는 그 물질이 불용성 분진으로 작용한다는 것을 확인하였다. 하루 후 약 45%가 폐에서 제거되었으며 저울의 폐에서 느리게 기계적 제거가 이루어졌다. 72일 후, 알루미늄은 0.2%만이 폐에 남았다. 폐는 소량의 흡입된 불용성 알루미늄에 대해 장기간 격리를 제공할 수 있다.

Schlesinger et al.(2000)은 기관 내 점적 후 Sprague-Dawley 쥐에서 산화알루미늄의 축적과 제거를 평가하였다. 쥐에게 전기 집진기(MMAD = $1.2 \text{ }\mu\text{m}$)를 통해 얻

은 제련소 등급 알루미늄 1 mg/kg(~0.25 mg)을 20주 동안 매주 한 번 주입하였다. 쥐 그룹은 노출 기간 동안과 노출 후 최대 19주까지 주기적으로 희생되었다. 알루미늄은 불꽃 및 비불꽃 원자흡수분광법으로 측정되었다. 노출된 쥐는 약 500 g Al/g 조직의 폐 부담까지 노출기간 동안 꾸준히 알루미늄이 축적되었다. 노출 후 19주의 기간 동안 9%만 제거되었다. 뇌, 뼈, 신장, 간 및 비장과 같은 폐 이외의 조직은 본질적으로 동일하지만 약간 높은 수준의 알루미늄 수치를 보였다(0.17~2.63 g Al/g 조직).

Perl & Good(1987)은 알루미늄이 비강-후각 상피에서 신경 경로를 통해 뇌로 직접 수송될 수 있다는 것을 동물에서 입증하였다.

위장관에서의 낮은 흡수율에도 불구하고, 연구에 따르면 경구 섭취는 정상 조건에서 일일 총 알루미늄 섭취량의 약 95%를 차지한다(IPCS, 1997).

식이 및 식수원에서 일생에 걸쳐 인간이 알루미늄에 노출되는 것으로 추정되는 범위는 하루 2~7 mg이다(Prist et al., 1995).

Sjogren et al.(1985)는 이전에 노출되지 않은 지원자와 6명의 용접공(3명의 단기 및 3명의 장기)에서 알루미늄의 노출 및 소변 배출에 대하여 조사하였다. 이전에 노출되지 않은 지원자에게 노출된 후 소변 알루미늄 농도는 3에서 15-414 g/L로 증가하고 반감기가 8시간으로 감소하였다. 용접공은 2.4 mg/m³(범위 0.3~10.2 mg/m³)의 평균(8시간 TWA) 알루미늄 농도에 노출되었다. 0.08~2년 및 18~20년 노출된 용접공의 소변 알루미늄 농도는 각각 5~44 g/L 및 296~366 g/L 이었다. 저자는 최근(1~5일) 공기 중 농도(8시간 TWA)(mg/m³(X₁))와 용접 흡에 노출된 기간(X₂)을 기반으로 소변 농도(Y)를 계산하는 방정식을 아래와 같이 제안하였다.

$$Y = 42.0X_1 + 7.42X_2 + 6.60$$

저자들은 단기 용접공과 장기 용접공에서 배설물의 차이가 장기 용접공에서 천천히 배출되는 것이 우세하다고 설명하였다.

이 작업을 확장하여 Sjogren et al.(1988)은 23명의 용접공에서 알루미늄의 노출과 소변 배설을 관련시켰다. 공기 농도는 0.2에서 5.3 mg/m³ 사이로 다양했으며 중앙값은 1.1 mg/m³ 이었다. 해당 소변 알루미늄 농도는 6~564 g/L 범위였으며 중앙값은 82 g/L 이었다. 무노출 기간 전후의 측정을 통해 두 개의 기능적 저장 구획이 더 일찍 관찰되었음을 확인하였다: 하나는 제거 속도가 빠르고 다른 하나는 제거 속도가 느리다는 것이다.

Elinder et al.(1991)은 장골 생검(iliac bone biopsies)과 혈액 및 소변의 추가 측정을 제공하기 위해 자원한 이 23명 그룹의 2명의 장기(20세 및 21세) 용접공의 노출과 소변 알루미늄 배설을 비교하였다. 1982년에 1주일 동안 공기를 모니터링한 후 이 두 용접공의 경우 8시간 동안 TWA 알루미늄에 노출된 8.9 mg/m³ 및 3.0 mg/m³은 각각 약 350 및 325 g/L의 소변 알루미늄 농도에 해당되었다. 1989년 뼈 생검에서 소변 수치가 약 107~250 g/L로 떨어졌을 때 뼈의 알루미늄 농도가 18~29 g/g인 것으로 나타났다.

Röllin et al.(1996)은 84명의 알루미늄 제련소 작업자의 혈청 및 소변 내 알루미늄 농도와 노출 정도에 대한 상관성을 확인하였다. 노출 그룹은 낮음(0.035 mg/m³), 중간(0.35 mg/m³) 및 높음(1.47 mg/m³)으로 구분시켰다. 농도는 충분진 수준으로 표시하였다. 전체 중 호흡성 분율은 한 포트 룸에서 52%, 다른 포트 룸에서 87% 이었다. 혈청 알루미늄 농도는 고노출 그룹(7.15 g/L)에서 대조군(4.76 g/L) 이상으로만 상승하였다. 대조군과 3개의 노출 그룹에서 소변 중 알루미늄 농도는 각각 23.7, 33.2, 76.0 및 133.3 g/L이었다.

4) 인체연구

a. 사례보고 및 사례연구(Case reports and case studies)

Shaver & Riddell(1947)은 알루미늄 연마제를 제조하는 사업장에서 일하여 알루미늄에 노출되는 작업자에게 심각한 호흡기 질병이 발생하는 것을 보고하였다. 그 작업자는 점진적으로 기침, 새근거림, 가쁜 숨, 자발적 기흉을 보였다. 폐조직 검사결과 세포膜的 섬유형성과 교원질섬유의 덩어리가 둥글게 뭉쳐있었다. 작업은 2000°C의 전기로에서 보크사이트를 태운 생석회와 산화철, 코크스 혼합물을 가열하는 작업을 포함한다. 흡의 큰 부피는 보크사이트가 35~65%, 15~25%는 비결정형 실리카, 실리카를 포함하지 않는 물질, 크리스트바라이트가 차지한다. 직업병 문헌에 따르면 이러한 사례는 Shaver' disease에 속한다.

Goraleski(1947)은 1938년에서 1945년 사이 독일에서 알루미늄 피로파우더의 포장작업, stamping 작업이나 갈아 엮는 작업 등을 한 작업자 중 빠르고 치명적인 폐섬유종 질환을 일으킨 250 사례를 연구하였다. 이러한 질환은 알루미늄증이라고

불렀다. 이 질환의 잠복기는 1년 미만에서 5년까지 보였다. 폐섬유증은 빠르게 폐의 심각한 기능적 손상을 가져왔다.

자발성 기흉은 많은 사례에서 보고되었다. 수포와 소엽 폐기종도 발생되었다. 이는 스테아린을 기초물질로 만드는 윤활제를 사용하는 알루미늄 피로파우더의 제조 이전으로 알려져 있다. 스테아린 윤활제는 알루미늄 파우더에 밀착한다. 미네랄 오일을 기초로 만든 윤활제를 대체판 이 윤활제는 입자가 폐포에 흡입되었을 때 알루미늄 표면에서 쉽게 제거된다. 이 알루미늄 입자는 결과적으로 섬유증 같이 폐조직에 좋지 않은 영향을 강하게 유발시킨다. 스테아린 윤활제는 사용을 막아 관련 질환도 멈춰진 상태이다.

Micheel et al.(1961)은 페인트와 폭죽, 폭발물 생산에 이용되는 미세하게 조각 되어진 알루미늄 금속 파우더에 노출되는 근로자 등 2명의 사망을 보고하였다. 그 파우더에 알루미늄 금속이 81% 포함되어 있고, 17%는 산화알루미늄이었다. 죽은 1명은 공장의 몹시 오염된 장소에서 작업하는 19살 청년이었다. 채취한 공기에서 분진의 농도는 615 mg/m^3 에서 685 mg/m^3 (호흡성분진)의 농도이었다. 그 노동자는 공장 에서 2년 후 폐세포간에 섬유증을 보였다. 다른 4명의 노동자는 마디사이의 섬유증을 보였다.

McLaughlin et al.(1962)은 폐 섬유증과 급성 뇌질환과 간질발작으로 진행되었던 사업장에서 만성적으로 알루미늄 파우더에 노출되었던 노동자의 사망을 보고하였다. 사망 이전에 그 노동자는 기억 상실, 신경 쇠약, 불안, 니파변화, 편측부전마비, 반응 저하 등 신경학 상 이상 증상을 보였다. 알루미늄의 직업적 노출은 노동자의 신경학적 증후를 야기시킨다. 저자는 이런 사업장에서 같은 형태의 작업을 수행하고 신경학적으로 이상 징후가 없는 다른 노동자와 실험을 진행했다.

Elinder & Sjogren(1986)은 기존의 논문에서 알루미늄 분진의 노출과 폐섬유증 사이의 용량반응 관계에 대하여 요약하여 정리했다. Hunter et al.(1944)은 연마제의 분진에 호흡성분진으로 $0.1 \sim 2.7 \text{ mg/m}^3$ 수준에 노출된 9명 중 섬유증으로 진단된 노동자를 발견하지 못했다. 그러나 섬유증은 무극성용매(미네랄 오일)로 코팅된 알루미늄 조각을 포함하는 파우더를 분쇄하는 작업에 노출된 노동자들에게 관찰되었다.

Swensson et al.(1962)은 $4 \sim 50 \text{ mg/m}^3$ 에 노출되는 55명의 노동자들에 대한 연구를 보고하였다. Mitchell et al.(1961)은 $50 \sim 100 \text{ mg/m}^3$ 수준에 노출되었을 때 27명 중 6명이 섬유증이 나타나는 것을 보고하였다.

Giks & Churg(1990)은 알루미늄 연마제 사업장에서 산화알루미늄에 노출된 9명의 노동자를 관찰하였다. 그 노동자는 폐기능 이상과 흉부 X-ray에서 비정상적인 소견을 보였다. 폐조직의 현미경적 검사에서 세포사이에 섬유종과 폐조직의 심한 금속 농도가 증가됨을 보였다. 이는 산화알루미늄과 석면, 실리카를 포함한다. 작업 이력에서 장기간 높은 농도의 분진 노출은 44.8 mg/m^3 로 보고되었다.

5) TLV의 요약

알루미늄 및 알루미늄 화합물에 노출된 근로자에 대한 역학 연구는 상대적으로 적다. Townsend et al (1985, 1988)은 정련에 종사하는 작업자의 폐 기능 및 흉부 X선 연구를 수행하였다. 알루미늄 및 알루미늄 제품 생산. 비흡연 근로자는 최소한의 폐기능 변화와 최소한의 흉부 X선 변화를 보였다. 저자들은 이러한 변화가 충분진으로 $100 \text{ mg/m}^3\text{-years}$ 를 초과하는 누적 노출 수준에서 초기의 심한 분진 노출과 관련이 있다고 언급하였다.

알루미늄 포트 룸 작업자가 폐쇄성 폐 기능 변화와 천식을 일으킨다는 많은 연구가 있다. 이는 알루미늄이나 그 화합물 때문이 아니라 불소, 콜타르 피치 휘발성 물질, 및 이산화황. 유사하게, 알루미늄 포트 룸 작업자의 폐기종으로 인한 초과 사망률은 위에서 언급한 포트 룸 노출과 담배 흡연과 혼동될 가능성이 가장 높다.

알루미늄 용접공 및 알루미늄 생산 작업자에게서 미묘한 신경학적 영향이 보고되었다. 보고된 연구는 정확하지 않지만 일부에서는 알루미늄 및 알루미늄 화합물에 장기간 노출되어 40년 동안 1.6 mg/m^3 를 호흡하는 것과 동일한 신체 부담이 신경학적 영향의 유병률을 증가시킬 수 있다고 제안하고 있다. 이 범위의 공기 중 농도는 100 g/L 의 소변 알루미늄 수준에 해당하며, 이는 신경학적 영향의 임계값을 나타내는 것으로 보인다.

쥐에서 산화알루미늄을 사용한 만성 흡입 연구는 NOAEL(no-observed-adverse-effect level)을 2.45 mg Al/m^3 으로 설정하였다(Piggot et al., 1981). 불용성 형태의 알루미늄에 대해 쥐를 대상으로 한 만성 흡입 연구는 2.5 mg Al/m^3 농도의 호흡성 입자에서 미미한 호흡기 영향을 보였다(Stone

et al., 1979). 이러한 수준 이상의 반복 노출은 폐 중량 증가, 폐포 대식세포 수 증가 및 육아종 반응을 포함하여 동물에서 호흡기 영향을 유발하는 것으로 보고되었다 (Steinhagen et al., 1978).

이용 가능한 동물 및 인체자료를 기반으로, 호흡성 입자상 물질인 1 mg Al/m^3 의 TLV-TWA가 알루미늄의 불용성 형태에 권장되며, 그 중 일부는 알루미늄 금속, 산화알루미늄, 스템프 알루미늄, 보크사이트 광석 분진과 에머리의 알루미늄을 포함한다.

동물실험 연구에서 알루미늄의 가용성 화합물이 비교적 높은 경구 투여량에서 모체 및 태아 독성을 일으킬 수 있다는 증거가 보고되었다. 또한, 투석액의 알루미늄 수치 상승으로 인해 신장 기능이 손상된 혈액투석 환자에서 뇌병증이 관찰되었다. 그럼에도 흡입 후 알루미늄의 영향을 평가하고 TLV를 설정하기 위해 가용성 형태에 대한 자료가 충분하지 않다. 알루미늄 알킬은 반응성이 매우 높은 화학 물질이다. 그러나 사용이 증가함에도 불구하고 이러한 화합물에 대한 공개된 독성 정보는 부족하다. 따라서 TLV-TWA는 가용성 알루미늄 화합물 및 알킬 알루미늄 화합물에 대해 권장되지 않는다. 마찬가지로, TLV-TWA는 산화 억제 오일로 코팅된 알루미늄 금속 플레이크 및 분말(powder coated with oxidation-inhibiting oils.)에는 권장되지 않는다.

알루미늄의 특정 화합물은 예를 들어 안티몬화알루미늄(aluminum antimonide), 불화알루미늄(aluminum fluoride), 인화알루미늄(aluminum phosphide) 및 셀렌화알루미늄(aluminum selenide)과 같이 구성 성분에 존재하는 다른 원소로 인해 건강에 위험을 줄 수 있다. 이러한 화합물에 대한 TLV에 대한 논의를 위해 개별 TLV® 문서(예: 안티몬, 불소, 인 및 셀레늄)를 참조하면 된다.

직업적 노출과 관련이 없는 노출 경로인 동물에 이식하는 경우를 제외하고 알루미늄과 그 화합물이 발암성이라는 증거는 없다(Pigott et al., 1981; Leonard and Gerber, 1988). 따라서 알루미늄 화합물에 대한 암 분류는 A4로 인체 발암 물질로 분류할 수 없다.

알루미늄 화합물에 대한 피부(Skin) 또는 SEN 표기를 증빙할만한 자료는 없다. 작업자의 직업성 천식은 작업실 환경의 다른 오염 물질에 의해 유발되는 것으로 추정된다.

6) TLV의 근거

진폐(Pneumoconiosis); 하기도 자극(lower respiratory tract irritation); 신경독성(neurotoxicity)

7) TLVs 개정 연혁

알루미늄 노출은 1977년에 처음 알루미늄 화합물(aluminum and compounds)로 금속 및 산화알루미늄(metal and aluminum oxide) TLV-TWA 10 mg/m³, 피로파우더 및 용접흄(pyro powders and welding fumes) 5 mg/m³, 가용성 염과 알킬(soluble salts and alkyls, PNOC) 2 mg/m³ 3가지로 구분하였다. 그러나 1988년 산화알루미늄이 알루미늄 화합물에서 삭제되고 독립적인 노출기준으로 설정되었다. 알루미늄의 노출기준은 2008년 알루미늄과 불용성 화합물로 개편되면서 기존 알루미늄 및 화합물의 구분은 철회되었다.

알루미늄 화합물과 관련된 구체적인 노출기준의 변천사는 아래와 같다.

알루미늄과 그 화합물, Al

1977 제안 :	TLV-TWA 10 mg/m ³ 금속과 산화알루미늄 TLV-TWA 5 mg/m ³ 피로파우더와 용접흄 TLV-TWA 2 mg/m ³ 가용성 염과 알킬류(PNOC)
1979-1987 :	TLV-TWA 10 mg/m ³ 금속과 산화알루미늄 TLV-TWA 5 mg/m ³ 피로파우더와 용접흄 TLV-TWA 2 mg/m ³ 가용성 염과 알킬류(PNOC)
1979-1985 :	TLV-STEL 20 mg/m ³ 금속과 산화알루미늄
1965:	비활성 또는 물리적 자극을 주는 미립자, TLV-TWA 15 mg/m ³ 또는 50 mppcf 이하
1984 :	금속과 산화알루미늄에 대한 TLV-STEL을 철회 제안
1986 :	TLV-STEL 철회
1988 :	알루미늄 항목에 포함된 산화알루미늄을 철회하고 다른 항

	목으로 도입
1988-2003 :	TLV-TWA 5 mg/m ³ , B2, 용접흡-충분진(달리 지정되지 않음)
	2004 : 부록 B: 가용한 조성물질 철회
1988-현재 :	TLV-TWA 10 mg/m ³ 금속
	TLV-TWA 5 mg/m ³ 피로파우더
	TLV-TWA 2 mg/m ³ 가용성 염과 알킬류(PNOC)
2007 제안 :	채택된 문서와 TLV 철회. 알루미늄과 불용성 화합물로 도입
2008:	채택된 문서와 TLV 철회. 알루미늄과 불용성 화합물로 도입

알런덤(Alundum)

1946-1947:	MAC-TWA 50 mppcf
1948-1959:	MAC-TWA 50 mppcf

산화알루미늄

1960-1961:	TLV-TWA 50 mppcf
1962-1964:	제외
1965:	비활성(inert) 또는 공해성 입자(nuisance particulate), TLV-TWA 15 mg/m ³ 또는 50 mppcf 이하

알런덤(Al₂O₃)/강옥

1966-1969:	비활성(inert) 또는 공해성 입자(nuisance particulate), TLV-TWA, 석영 1% 미만 충분진의 15 mg/m ³ 또는 50 mppcf 이하
1970-1977:	공해성 입자(nuisance particulate), TLV-TWA, 석영 1% 미만 충분진의 10 mg/m ³ 또는 30 mppcf 이하
1978-1979:	공해성 입자(nuisance particulate), TLV-TWA, 석영 1% 미만 충분진의 10 mg/m ³ 또는 30 mppcf 또는 호흡성분

진 5 mg/m³

산화알루미늄

1980-1981: 공해성 입자(nuisance particulate), TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진의 10 mg/m³ 또는 30 mppcf 또는 호흡성분진 5 mg/m³

알파-알루미나(Al₂O₃)

1982-1985: 공해성 입자(nuisance particulate), TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진의 10 mg/m³ 또는 30 mppcf 또는 호흡성분진 5 mg/m³

1986-1987: 공해성 입자(nuisance particulate), TLV-TWA, 결정형 규산 1% 미만 총분진의 10 mg/m³

산화알루미늄

1988-현재: TLV-TWA, AL, 석면을 함유하지 않고 1% 미만의 결정형 규산 총분진 10 mg/m³

1995 제안: A4, 인간 발암물질로 분류 불가

1996-현재: A4

2007 제안 : 채택된 문서와 TLV에서 철회, 알루미늄과 수용성 화합물로 도입

에머리(Emery)

1965-1971: TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진 15 mg/m³ 또는 50 mppcf, 공해성 분진

1970 제안: TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진 10 mg/m³ 또는 30 mppcf 또는 호흡성분진 5 mg/m³, 공해성 분진

1972-1975: TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진 10 mg/m³ 또는 30 mppcf, 공해성 분진

1976-1985: TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진 10 mg/m³ 또는 30

	mppcf 또는 호흡성분진 5 mg/m ³ , 공해성 분진
1976-1985:	TLV-STEL, 20 mg/m ³
1986:	TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진의 10 mg/m ³ 또는 30 mppcf 또는 호흡성분진 5 mg/m ³ , TLV-STEL 삭제
1986:	TLV-TWA, 석영 1% 미만 총분진 10 mg/m ³ , 공해성 분진
1988:	공해성분진 철회
1988-현재:	TLV-TWA, 석면을 함유하지 않고 1% 미만의 결정형 규산을 함유한 총분진 10 mg/m ³
2007 제안:	채택된 문서와 TLV 철회. 알루미늄과 불용성 화합물 도입

알루미늄과 불용성 화합물

2007 제안 :	TLV-TWA, 1 mg/m ³ , 호흡성분진, A4, 인간 발암물질 분류 불가
2008:	TLV-TWA, 1 mg/m ³ , 호흡성분진, A4, 인간 발암물질 분류 불가

8) 알루미늄에 직업적 노출과 유해성

국제노동기구(International Labour Organization) 및 세계보건기구(World Health Organization)에서는 United Nations Environment Programme으로 International Programme on Chemical Safety를 발간하고 있다. Environmental Health Criteria 194는 알루미늄에 대한 내용으로 직업적 노출과 유해성에 대한 부분만 발췌하여 번역하였다.

이 섹션에서는 근로자가 알루미늄 금속 및 알루미늄 화합물에 노출되는 직업에서 관찰되는 영향을 다루고 있다. 혼합 분진 및/또는 화학적 혼합물에 노출되는 경우 알루미늄 노출과 그러한 작업자에 대한 연구 결과 사이의 인과 관계를 추론할 수 없다.

(1) 호흡기 영향(Respiratory tract effects)

Dinman(1988b)과 Abramson et al.(1989)은 알루미늄 산업 종사자의 호흡기 질환에 대해 자세히 검토하였다.

가) 제한성 폐질환(Restrictive pulmonary disease)

역사적으로 폐섬유증은 알루미늄 산업 내에서 다양한 OBS와 관련이 있다. 면도기 병, Shaver's disease(1940년대에 기술됨)은 커런덤 연마제의 생산과 관련된 규폐증의 한 형태이었다(Shaver & Riddell, 1947). 폐 섬유증과 관련된 역사적으로 중요한 또 다른 직업적 노출은 폭발물 및 불꽃놀이 제조에 사용되는 것을 포함하여 매우 미세한 스탬프 알루미늄 분말(일반적으로 $< 1 \mu\text{m}$)에 노출된 "화약 분말" 작업자에 의해 경험되었다(Doese, 1938; Meyer & Kasper, 1942, Mitchell et al., 1961, Jordan, 1961, McLaughlin et al., 1962, Gross et al., 1970). 그 과정에서 오일과 용제는 자연적으로 발생하는 산화를 방지하기 위해 입자를 코팅하는 데 사용되었으며 거의 모든 섬유화가 광물성 오일 코팅 입자에 노출된 작업자에게서 보고되었다. 그 과정은 더 이상 사용되지 않으며(Dinman, 1988a) 1960년 이후로 한 건의 사례만 보고되었다(McLaughlin et al., 1962). 이 증후군은 산화되지 않은 알루미늄 금속의 잠재적인 폐 영향을 나타내지만 이러한 노출은 자연에서 발생하지 않는다.

산화알루미늄에 노출된 작업자의 9건(평균 노출 기간 25년)에 대한 보고서에서 비정상적인 흉부 방사선 사진과 3건의 사례에서 병리학적 폐 기능이 기술되었다(Jederlinic et al., 1990). 이들 3명의 환자로부터 생검을 취하고 전자현미경 및 microprobe 분석으로 분석하였다. 간질성 섬유증(Interstitial fibrosis)이 주요 조직학적 소견이었다. 금속은 배경 수준보다 몇 배나 많은 양으로 발생했으며 대부분은 산화알루미늄이었다. 저자는 산화알루미늄이 이들 근로자의 간질 섬유증 발병의 가장 가능성 있는 원인이며 석면이 배제될 수 있다고 언급하였다. 결정형 실리카(free silica)를 포함한 "혼합 분진"에 대한 노출도 설명이 가능하다고 하였다.

이 노출을 제외하고 알루미늄 노출과 관련된 병리학적 소견은 혼합 노출을 나타내며 알루미늄에만 기인할 수 없다. 실리카 또는 기타 금속과 같은 기타 노출을 고려해야 한다.

나) 폐쇄성 폐질환(Obstructive pulmonary disease)

천식(Asthma)

1차 알루미늄 제련(포트 룸 천식)과 관련된 잠재적으로 지속되는 직업성 천식이 지난 35년 동안 보고되었다. 가역적 증상, 기류 제한 및 증가된 기관지 반응성이 설명되었다(O'Donnell et al., 1989). 가능한 원인은 자극성 공기 중 미립자 및 병정석(나트륨 알루미늄 불화물), 기체 불화수소 및 알루미늄에 흡착될 수 있는 기타 물질로 인한 입자이다. 그러나 알루미늄 포트 룸 작업자의 불소 노출 수준 사이의 밀접한 관계는 배제할 수는 없다.

만성기관지염(Chronic bronchitis)

알루미늄 생산 및 가공은 작업장에서 분진과 미립자에 높은 수준으로 노출될 수 있다. 이탈리아에서는 알루미늄 노출과 진폐증의 가능한 연관성이 조사되었다(Saia et al., 1981). 만성 기관지염 증상은 노출된 작업자 119명 중 39%, 대조군 119명 중 13%에서 발견되었다. X-선 검사 결과 노출된 작업자의 29%와 대조군의 15%에서 작은 불규칙한 음영(small irregular opacities)이나 기관지폐 형태의 진폐증의 한 종류가 나타났다.

대규모 알루미늄 생산 회사의 Arkansas 작업장에서 근무하는 2086명의 노동자에 대한 사례 연구가 수행되었다(Townsend et al., 1985). 연구에 따르면 장기간의 높은 누적 분진 노출은 보크사이트 정제소 및 알루미늄 기반 화학 제품 공장에서 활동하는 근로자의 폐 기능 수준 감소와 관련이 있었다. 이 집단에 대한 후속 연구(Townsend et al., 1985)는 작업장에서 폐 기능과 관련된 분진의 호흡기 영향에 관한 결론을 지지하였다.

단면 연구(Sjögren & Ulfvarson, 1985)에서 64명의 알루미늄 용접공과 64명의 연령이 일치하는 대조군(비용접 산업 근로자)에서 만성 기관지염의 유병률 증가가 관찰되었지만 폐 기능에는 영향을 미치지 않았다. 알루미늄 용접공의 만성 기관지염 유병률은 스테인리스 스틸이나 철로 작업하는 용접공의 유병률과 유사하였다.

다) 중추신경계 영향(Central nervous system effects)

직업적인 알루미늄 노출과 관련하여 인지 기능 장애, 운동 기능 장애 및 말초 신경병증을 비롯한 여러 신경학적 영향이 발생하였다. 약 13년 동안 알루미늄 흙에 노출된 용접공은 알루미늄에 노출되지 않은 철도 트랙 용접공보다 훨씬 더 많은 신경

정신병 증상(질문에서 긍정적인 답변으로 확인됨)을 보였다(Sjögren et al., 1990). 이 연구에 사용된 설문 방법론과 관련된 잠재적인 편향에도 불구하고 용량-반응 효과가 나타났다. 추가 연구(Sjögren et al., 1994b)에서 38명의 알루미늄 노출 용접공(중양값 소변 알루미늄 수준, $22\mu\text{g/L}$; 노출 시간 중양값, 4.5년)을 39명의 철 노출 용접공 그룹과 비교하였다. 반복적인 운동 기능의 속도에서 약간의 감소가 발견되었지만 다른 신경 생리학적 또는 신경심리학적 매개변수에서는 차이가 없었다.

미세하게 분쇄된 알루미늄(85%)과 산화알루미늄(15%) 분말의 혼합물은 규폐증을 예방하기 위해 1944년에서 1979년 사이에 사용되었다. 지하의 금과 우라늄 광부들은 각 교대 전에 10분 동안 탈의실에서 20,000-34,000 입자/ml 공기(약 30 mg/m^3)의 알루미늄 분진 농도에 노출되었다(Rifat et al., 1990). 코호트에서 알루미늄 분말에 대한 노출 범위는 6개월에서 36년 사이로 확인되었다. 약 375 mg의 알루미늄 분말이 각 광부에서 연간 퇴적된 것으로 계산되었다.

1955년과 1979년 사이에 지방 흉부 클리닉에서 검사한 29,000명의 지하 광부로부터 6604명의 코호트를 포함하는 샘플 채취 구조로 구성하였다. 이 코호트에서 두 개의 샘플을 추출하였다. 한 대상 집단은 나이와 캐나다 온타리오주에서 첫 채굴 경험이 있는 연도 및 총 채굴 시간에 따라 조정된 369명의 노출된 광부와 369명의 노출되지 않은 일치된 광부로 구성되었다. 두 번째 대상 집단은 노출된 인구와 노출되지 않은 인구에서 동일한 수의 무작위로 뽑힌 678명의 광부로 구성하였다. 1988년과 1989년 사이에 추적 가능한 광부들을 인터뷰하고 심리 측정 검사를 수행하였다. 하나 이상의 검사에서 손상된 인지 검사 점수와 비율은 노출된 광부에게 불리하게 나타났고, 위험 증가에 긍정적인 노출 관련 경향이 설명되었다.

Hosovski et al.(1990)은 $4.6\sim 11.5\text{ mg/m}^3$ 공기의 작업장 알루미늄 농도에 노출된 알루미늄 주조 공장의 작업자 87명(평균 연령 40.7세)과 최소 6년의 노출 시간을 연구하였다. (1990). 연령, 직업, 연공서열, 사회적 지위가 일치하는 비노출 근로자 60명을 대조군으로 선정하였다. 알코올을 섭취하거나 검사 전 1개월 이내에 향정신성 약물을 복용한 근로자를 제외하고 정신운동 및 심리측정 검사를 수행하였다. 복잡한 반응 시간, 안구 운동 협응 및 조작 검사 합계에서 대조군과 비교하여 노출된 작업자에서 유의한 차이가 나타났다. Weschler Adult Intelligence Scale(WAIS)에서는 기억력 소검사(memory subtest)에서 가장 유의미한 차이가 발견되었다.

대조적으로, Bast-Petersen et al.(1994)은 광범위한 심리 측정 검사에서 주조

공장 작업자(8) 또는 작업실 작업자(14)의 소규모 그룹에서 어떠한 손상도 발견하지 못하였다. 후드가 없는 pot에 4년 이상 노출된 알루미늄 포트 룸 작업자 집단은 인지 기능 손상 및/또는 운동 제어 결함의 발병률이 증가한 것으로 나타났다. 그러나 알루미늄 또는 기타 잠재적인 신경독이 원인 물질인지 여부를 결정하기 위한 생화학적 조사가 충분하지 않았다(Longstreth et al., 1985; White et al., 1992).

알루미늄 공장의 ball mill 구역에서 한 남자가 13.5년 동안 초미세 알루미늄 분말에 노출된 경우, 개인은 급속하게 진행되는 뇌병증으로 사망했고 그의 뇌에서 알루미늄 수치가 상승된 것으로 밝혀졌다(McLaughlin et al., 1962).

라) 암(Cancer)

알루미늄 및 그 화합물에 대한 인체 노출로 인한 암 위험을 분류할 수 있는 정보가 충분하지 않다.

마) 유전독성(Genotoxicity)

요약에서, Haugen et al.(1983)은 알루미늄 공장에 고용된 근로자의 말초 혈액 림프구에서 자매 염색분체 교환의 수가 증가하지 않는다고 보고하였다. 알루미늄에 대한 경구 노출 후 알루미늄이 인체에 미치는 유전적 영향에 관한 보고는 없다.

바) 생식독성(Reproductive toxicity)

알루미늄 노출 후 인체의 생식 독성에 관한 정보는 없다.

사) 특별 위험 아집단(Subpopulations at special risk)

투석액 또는 비경구 용액에 알루미늄이 포함되어 있거나(Alfrey et al., 1972; Klein, 1991) 주요 공급원이 알루미늄 함유 경구 인산염 결합제인 경우 만성 신부전 환자에서 알루미늄 중독이 몇 주 또는 몇 달에 걸쳐 발생하였다. 신부전으로 고통을 받는 환자에서 혈청 및 조직 알루미늄 농도의 증가가 관찰되었다. 신부전 환자의 뇌에서 증가된 알루미늄 함량은 투석 뇌병증 또는 투석 치매로 불리는 신경계 증후군 발병의 주요 원인인 것으로 보인다. 특정 형태의 골연화증과 소구성, 저색소성 빈혈의 발병도 알루미늄에 기인된다(Ward, 1991).

알루미늄 중독은 알루미늄을 제거하지 않고 수돗물로 만든 혈액투석액을 사용함으로써 발생된다(Elliot et al., 1978). 여과, 연화, 탄소 흡수, 역삼투 및 탈이온화의 조합으로 수처리를 도입한 후 이러한 임상 증후군이 예방되었다. 신장 전문의는 투석액과 약물로 인한 알루미늄 노출을 제한한다. 이는 미국, 캐나다, 일본 및 EEC의 지침 도입을 따른다. 결과적으로, 대부분의 투석 센터에서 투석액이 모니터링되고 알루미늄 수준이 $0.4 \mu\text{mol/L}$ ($10 \mu\text{g/L}$) 미만으로 유지된다. 탄산칼슘과 같은 무알루미늄 인산염 결합제는 바람직하게는 경구 약물에 사용된다. 투석을 받지 않은 미숙아를 포함하여 신장 장애 환자에서 동일한 임상 증후군이 설명되었으며, 이는 알루미늄 함유 의약품 및 비경구 용액으로부터의 알루미늄 축적의 결과이다(Finberg et al., 1986).

아) 뇌병증(Encephalopathy)

투석 뇌병증은 1972년에 처음 기술된 장기간의 혈액 투석의 합병증이다(Alfrey et al., 1972). 주요 증상은 언어 장애에 이어 치매, 경련 및 간대성 근경련이 발생된다. 평균 투석 기간은 48개월이었고 투석액은 처리되지 않은 수돗물로 만들어졌다. 영향을 받은 환자의 뇌, 근육 및 뼈 조직에서 알루미늄 함량이 증가한 것으로 나타났다. 유럽과 미국의 다른 투석 센터에서도 동일한 결과가 보고되었다. 뇌병증의 많은 발병은 일반적으로 $200 \mu\text{g/L}$ 이상의 고농도 알루미늄을 함유한 투석액의 사용과 관련하여 설명되었다(Flendrig et al., 1976; McDermott et al., 1978; Alfrey, 1978).

6개의 투석 센터에서 균일한 임상 분류를 사용하여 투석 뇌병증을 앓고 있는 55명의 환자를 대상으로 한 연구에서 투석액을 통한 알루미늄에 대한 누적 노출이 증가함에 따라 투석 뇌병증의 발병률이 유의하게 증가하였다(Schreeder et al., 1983).

영국의 투석 센터에 대한 역학 연구에 따르면 투석액을 준비하기 위해 알루미늄 농도가 $50 \mu\text{g/L}$ 미만인 물을 사용하는 센터에서는 뇌병증이 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. 뇌병증의 발병률은 알루미늄의 물 농도가 높을수록 점진적으로 증가하였다. 유럽 투석 및 이식 협회 등록 위원회는 영국, 스페인, 그리스 및 스칸디나비아의 특정 지역에서 뇌병증 클러스터를 보여주는 유럽 조사를 수행했다. 영국에서는 이 지역에 있는 환자의 92%가 연화된 수돗물로 만든 투석액으로 치료를 받았다

(Kerr & Ward, 1988). 알루미늄 농도가 낮은 투석액을 투여한 27명의 장기간 혈액 투석 환자에서 명백한 알루미늄 독성의 징후는 관찰되지 않았으며(Altmann et al., 1989) 이들 대상체는 혈청 알루미늄 수준이 약간만 상승하였다. 그러나 숫자 코딩을 포함한 정신 운동 기능의 여러 테스트에서 결함이 발견되었다.

자) 골연화증(Osteomalacia)

골연화증은 만성 신부전 환자, 투석액의 알루미늄에 노출된 환자, 또는 고인산혈증을 조절하기 위해 수산화알루미늄 치료를 받은 신부전 영아에서도 관찰되었다(Ward et al., 1978; Andreoli et al., 1984). 뼈 통증, 근육병증, 병적 골절 및 비타민 D 요법에 대한 열악한 반응은 부분 및 완전 치유되지 않는 골절, 골감소증 및 석회화된 뼈 면적의 감소를 포함하는 방사선학적 변화를 동반하는 골연화증의 특징적인 증상이다(Simpson et al., 1973). 투석에 사용되는 체액에서 알루미늄을 제거하면 골연화증의 발병률이 감소하였다. 과도한 위험이 없는 수준은 $30 \mu\text{g/L}$ 이하로 추정되었다(Platts et al., 1984). 혈액투석을 통해 치료를 받는 신질환 환자에서 뼈의 알루미늄 함량이 증가하며, 이 알루미늄은 성공적인 신장 이식 후에도 뼈에 남아 있을 수 있다(Ellis et al., 1979). 골연화증 환자의 알루미늄은 주로 골질과 석회화 기질 사이의 경계면에 위치하는 것으로 밝혀졌다(Cournot-Witmer et al., 1981). 알루미늄으로 인한 비타민 D 내성 골연화증은 진행성 대사성 골 질환이다. 무질서한 뼈 형성에 대한 메커니즘은 아직 명확하지 않다.

차) 소구성 빈혈(Microcytic anaemia)

알루미늄 중독 투석 10명의 환자에 대한 연구에서 소구성 빈혈이 관찰되었다. 이 질병은 투석수의 탈이온화 후에 가역적이었다(Touam et al., 1983). 과량의 알루미늄이 소구성 빈혈을 유발하는 메커니즘은 아직 밝혀지지 않았다(Wills & Savory, 1983, 1989).

카) Occupationally exposed populations에 대한 소결

미세 알루미늄 미립자에 장기간 높은 수준으로 노출되는 근로자는 건강에 악영향을 미칠 위험이 증가할 수 있다. 그러나 알루미늄의 부작용과 관련하여 어느 정도 확

실하게 직업적 노출 한계를 개발할 수 있는 자료가 충분하지 않다. 광유 윤활제로 가장 자주 코팅된 스탬프된 피로 알루미늄 분말에 노출되면 폐 섬유증(알루미늄증)이 발생하는 반면, 다른 형태의 알루미늄에 노출되면 폐 섬유증을 유발은 입증되지 않았다. 보고된 대부분의 사례는 다른 잠재적인 섬유화 인자에 노출되었다. 자극성 천식은 황산알루미늄, 불화알루미늄 또는 사불화알루미늄 칼륨의 흡입 및 알루미늄 생산 중 화장실 내의 복잡한 환경과 관련이 있다.

연구진

연구기관 : 연구기관명

연구책임자 : 김승원 (교수, 계명대학교)

연구원 : 피영규 (교수, 대구한의대학교)

연구원 : 백용준 (대표이사, 사랑작업환경연구소)

연구원 : 정태진 (대표이사, EHS프렌즈)

연구보조원 : 유주연 (기술위원, 사랑작업환경연구소)

연구보조원 : 정정임 (팀장, 사랑작업환경연구소)

연구보조원 : 김기행 (전문위원, EHS프렌즈)

연구기간

2021. 5. 6. ~ 2021. 10. 31.

본 연구는 산업안전보건연구원의 2021년도 위탁연구 용역사업에 의한 것임

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

산업안전보건연구원장

**알루미늄 노출기준 개정을 위한 국내 실태조사 및
사회경제적 영향 분석 연구
(2021-산업안전보건연구원-630)**

발행일 : 2021년 10월 31일

발행인 : 산업안전보건연구원 원장 김은아

연구책임자 : 계명대학교 교수 김승원

발행처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주소 : (44429) 울산광역시 중구 종가로 400

전화 : 042-869-0354

팩스 : 042-863-9001

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

I S B N : 978-89-93948-94-3