

국내 크롬 및 그 화합물의 노출실태 및 노출기준 개정 제안

김승원* · 피영규¹ · 백용준² · 정태진³ · 한정희⁴

계명대학교 공중보건학전공, ¹대구한의대학교 보건안전전공, ²사랑작업환경연구소, ³EHS프렌즈, ⁴산업안전보건연구원

Proposals to Revise the Occupational Exposure Limits for Aluminum in Korea

Seung Won Kim* · Young Gyu Phee¹ · Yong-Joon Baek² · Taejin Chung³ · Jeong-Hee Han⁴

Department of Public Health, Keimyung University,

¹Department of Health & Safety, Daegu Hanny University,

²Love Work Environment Research Institute,

³EHS Friends,

⁴Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

ABSTRACT

Objectives: The 12 occupational exposure limits(OELs) for chromium and its compounds in Korea were set by applying the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Threshold Limit Values (TLVs). However, this is significantly different from the TLVs after the existing TLVs were integrated and withdrawn in 2018, so it is necessary to review the revision.


Methods: Various documents related to chromium OELs were reviewed, including the ACGIH TLV Documentations for chromium and its compounds. A field survey was conducted targeting workplaces handling chromium and its compounds. Based on this, a revised OELs were proposed and a socio-economic evaluation was conducted.

Results: The OELs for chromium compounds in Korea was first enacted in 2002, and in 2007, the OELs for chromium (hexavalent) compounds (insoluble) was lowered from 0.05 mg/m³ to 0.01 mg/m³. In 2008, the OELs for strontium chromate was newly established as 0.0005 mg/m³, and in 2018, the OELs for calcium chromate was newly established as 0.001 mg/m³. Total chromium and hexavalent chromium were measured for each of 6 samples at 2 welding sites, 4 plating sites, and 2 spray coating sites. When comparing the average of the results measured by ICP, a total chromium analysis method, and the analysis results by IC, a hexavalent chromium analysis method, only workplace 4 was the same, and total chromium was evaluated more, and total chromium was evaluated at 0.0004 to 0.0027 mg/m³. And hexavalent chromium was evaluated as non-detection ~ 0.0014 mg/m³. Amendment ①: The exposure standard for hexavalent chromium is not divided into water soluble, insoluble, chromium ore processing, and other hexavalent chromium compounds, and is integrated into 0.01 mg/m³, which is the level of chromium (hexavalent) compound (insoluble)., OELs for chromium (metal) and chromium (trivalent) compounds are integrated into chromium (trivalent) compounds, and the exposure level is maintained. Amendment ②: As in the amendment ①, the OELs are integrated, but the level is lowered to 0.005 mg/m³, which is the OELs of OSHA, and there is a grace period of 4 years. Amendment ③: As in the amendment ①, the OELs are integrated, but the level is lowered to 0.0002 mg/m³, which is the exposure standard of ACGIH, and there is a grace period of 5 years.

Conclusions: Amendment ①: The change in the OELs is insignificant, so the cost required is small, and the

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

Received: June 4, 2024, Revised: June 16, 2024, Accepted: June 28, 2024

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

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

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

benefit/cost ratio is greater than 1, so there is no problem in applying the amendment. Amendment ②: In all scenarios except chromium 6(insoluble), the benefit/cost ratio is greater than 1, so it is thought that there will be no major problem in applying the amendment. Amendment ③: Since the benefit/cost ratio is less than 1 in all scenarios, it is thought that the total social benefit that can be obtained when applying the amendment is not large.

Key words: total chromium, chromium hexavalent, chromium trivalent, insoluble, soluble, inorganic compounds

I. 서 론

크롬은 지각에서 21번째로 흔한 원소이다(Krebs, 2006). 크로마이트 광석은 자연적으로 발생하는 형태의 크롬이다. 여기에는 철, 알루미늄 및 마그네슘과 함께 여러 Cr(III) 화합물이 포함된다. 크롬 금속은 1798년에 크롬 철광석에서 처음으로 분리되었다. 크롬 철광석의 채광은 주로 남아프리카, 카자흐스탄, 인도 및 터키에서 발생하며 함께 세계 크롬 자원의 95%를 차지한다. 중국은 주요 크롬 소비 및 강크롬 생산 국가이자 최고의 스테인리스강 생산국이다. 매년 미국은 전 세계 크롬철광 광석 생산량의 약 5%를 소비한다. 2014년 세계 크롬철광 광석 생산량은 2,900만 톤이었다(USGS, 2015).

금속 크롬과 크롬 화합물의 범위는 매우 다양하다. 원자가(0, +3, +6)에 따라 그 독성과 발암성에 차이가 크기 때문에 그 내용을 원자가 별로 섹션을 나누어 서 류화하였다. 크롬산 연(lead chromate)은 6가 크롬으로 분류되지만 별도의 documentation을 두었다. 크롬

의 원자가는 학문적으로는 -4, -2부터 +6까지 다양하게 존재할 수 있다. 그러나 일반적으로 금속 크롬[free metal Cr(0)], 크롬 3가인 크롬염(chromic salts), 6가 크롬인 크롬산(chromates)과 디크롬산(dichromates)이 산업적인 용도로 쓰이기 때문에 전술한 3가지 원자에 대한 화합물만 포함한다.

Park et al.(2020)이 보고한 크롬 및 그 무기화합물의 노출기준(occupational exposure limit, OEL) 분류는 총 12가지로, 용해도, 산화수(oxidation number) 등에 따라 다양하다(Table 1). 하지만, 크롬의 측정횟수는 크롬 3가와 6가 크롬(수용성 및 불용성)가 대부분이었다(85.6%). 크롬 3가, 6가 크롬(수용성 & 불용성), 크롬산 연(as Cr)의 연도별 추세는 증가하고 있다. 크롬산 연(as Cr)은 2013년부터 2017년까지 증가하다가 2018년부터 다시 감소하는 경향을 보인다. 크로밀 클로라이드, 칼슘 크로메이트 삼차부틸크롬산은 7년간 한 번도 측정되지 않았다.

Lee et al.(2015)은 크롬 도금 사업장에서 근로자의

Table 1. Revised ACGIH exposure limits for chromium(2018)

Substance	TWA (mg/m ³)	STEL (mg/m ³)
Metallic chromium, as Cr(0)	0.5(I)	-
Chromium(II) compounds	Deleted	
Trivalent chromium compounds, as Cr(III)	0.003(I)	-
Water-soluble chromium(VI) compounds	0.0002(I)	0.0005(I)
Insoluble chromium(VI) compounds		
Chromyl chloride, as Cr(VI)	0.0002(IFV)	0.0005(IFV)
Chromite ore processing	Refer to hexavalent and trivalent chromium compounds	
Lead chromate, as Cr(VI) * Exposure limit for "as Pb" was deleted	0.0002	0.0005
Zinc chromate	Deleted	
Strontium chromate	Deleted	
Calcium chromate	Deleted	

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; TLV: Threshold Limit Value; TWA: time-weighted average; STEL: short-term exposure limit; I: inhalable particulate matter; IFV: inhalable fraction and vapor

업무 및 사업장별 공기 중크롬 노출 농도 특성을 보고하였다. 공기 중 총크롬 농도는 연마작업($GM=21.6 \mu g/m^3$), 도금작업($GM=13.4 \mu g/m^3$) 및 기타 작업($GM=2.36 \mu g/m^3$) 순으로 높게 나타났다. Cr(VI) 농도는 도금작업($GM=4.15 \mu g/m^3$)이 가장 높았고 다음으로 연마작업($GM=1.86 \mu g/m^3$), 기타 작업($GM=1.28 \mu g/m^3$) 순이었다. 총크롬 및 6가 크롬 농도는 업무 간 유의한 차이가 있었다($p<0.05$). 이와 같이 도금작업자는 6가 크롬 노출농도가 높은 반면, 연마 작업자는 총크롬 농도가 더욱 높은 것으로 나타났다.

크롬 및 그 무기화합물은 5개의 노출기준(크롬(금속), 크롬(2가)화합물, 크롬(3가)화합물, 크롬(6가)화합물(수용성), 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물))으로 구분되어 있고, 그 외에 개별물질 7종(크로밀 클로라이드, 크롬광 가공(크롬산), 크롬산 연, 삼차부틸크롬산, 크롬산 아연, 스트론티움 크로메이트, 칼슘 크로메이트)의 노출기준이 따로 설정되어 있다. 우리나라의 유해인자 노출기준은 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) 허용농도(Threshold limit values, TLVs)를 준용하여 제·개정되어 왔으나, 현재 일부 물질에 대한 노출기준에 차이가 있다. 크롬 및 그 화합물에 대한 12개의 노출기준은 ACGIH TLV를 준용하여 설정된 것이나, 2018년 기존의 TLV가 통합 및 철회된 이후의 TLV*와는 상당 부분이 달라 개정에 대한 검토가 필요하다.

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

- 1) 국내외 크롬 및 그 화합물에 대한 노출기준 개정 현황을 조사하였다.
- 2) 국내 크롬 및 그 화합물 제조·취급 사업장 대상 작업자 노출 실태를 조사하였다.
- 3) 크롬 및 그 화합물 노출기준 변경 타당성 검토에 필요한 기술적·경제적 타당성을 조사하였다.

II. 연구방법

1. 문헌조사

크롬 및 그 화합물(이하 크롬 화합물) 노출기준 관련

국내외 현황 파악하기 위해 크롬 화합물 노출기준 관련 내용이 보고된 국내·외 논문 및 보고서 검토하였다. 국내 논문은 KISS(한국학술정보), 과학기술학회마을, DBPIA에서 '크롬 노출기준' '크롬 및 그 화합물', '6가 크롬', '2가 크롬', '3가 크롬', '크로밀 클로라이드', '크롬광 가공', '크롬산 연', '삼차부틸크롬산', '칼슘크로메이트' 등의 중심어를 입력하여 검색하였다. 국외논문은 Science Direct, EBSCO Host, PubMed, Google 학술검색 서비스를 이용하여 키워드로 'chromium occupational exposure limit', 'chromium compounds', 'chromite ore processing', 'lead chromate', 'zinc chromate' 등을 입력하여 검색하였다. 검토한 문헌을 정리하여 ACGIH TLV Documentation과 유사한 형식으로 노출기준 설정 근거 자료를 정리하였다. 특히, ACGIH에서 2018년 노출기준을 정리한 후 보고된 크롬 화합물에 대한 독성자료를 집중적으로 조사하였다.

2. 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사

다양한 형태의 크롬 화합물[크롬(금속), 크롬(2가)화합물, 크롬(3가)화합물, 크롬(6가)화합물(수용성), 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)]을 사용하는 10~15개 사업장을 대상으로 100개 전후의 시료채취를 진행하였다. 이때 각각의 크롬 화합물이 포함되도록 구성하였으며, 가용성 염 및 알킬 화합물을 제외한 금속분진, 피로파우더, 용접흄, 산화 크롬에 대해서는 총분진과 호흡성분진을 동시에 측정하여 노출기준 개정의 검토과정에서 활용하였다.

금속크롬 및 크롬(II, III)에 대한 측정 및 분석방법은 NIOSH 7300 ELEMENTS by ICP(Nitric/Perchloric Acid Ashing)을 참고하여 진행하였다(NIOSH, 2003a). 크롬(VI)에 대한 측정 및 분석방법은 6가 크롬(chromium, hexavalent)과 NIOSH CHROMIUM, HEXAVALENT 7605 by Ion Chromatography을 참고하여 IC 및 HPLC로 진행하였다(NIOSH, 2003b).

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

Table 2. General characteristics of surveyed workplace

Site No.	Process	Description
Site 1	Stainless steel welding	Manual welding using Fe-Cr welding rods containing 23-27% chromium and SUS cut wire welding rods containing 18-20% chromium
Site 2	Welding	Welded by hand using CSF-308 and 309, TGC-308 and 309 (containing approximately 20% or more chromium) welding rods
Site 3	Chromium plating	Chrome plating using chromate anhydride
Site 4	Hard chromium plating	Hard chrome plating using 99.7% chromic acid.
Site 5	Chromium plating	Chrome plating using chromate anhydride
Site 6	Chromium plating	Chrome plating using chromate anhydride
Site 7	Spray painting	Painted with paint containing 0~1% pigment yellow34(lead chromate)
Site 8	Spray painting	Painted with paint containing 0~1% pigment yellow34(lead chromate)

3. 노출기준 변경 타당성 검토 및 제안

한국산업안전보건공단에서 보유하고 있는 우리나라 작업환경측정 데이터베이스 중 최근 5년간 크롬 및 그 화합물에 대한 우리나라 작업환경측정 실시현황을 분석하였다. 데이터베이스에서 크롬 형태, 측정업체 수, 측정시료 수, 노출수준 등을 변수로 하여 자료를 추출하고 이에 대하여 노출기준 대비 10%, 50%, 100% 초과 여부를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 크롬 및 그 화합물의 특성

독성학적 문제점들을 논의하는 데 있어 크롬 및 그 화합물의 여러 산화상태를 구별하는 것이 중요하다. 3가 크롬은 음식과 식수로 동물에 투여되었을 때, 높은 용량에서 조차 해로운 영향을 주는 것 같지 않다(NRC, 1974). 크롬의 급성 및 만성 독성은 주로 6가 크롬 화합물에 원인이 된다. 시약 등급의 3가 크롬 화합물뿐만 아니라 산업장 3가 크롬 화합물 모두 6가 크롬에 의해 오염될 수 있다는 것이 밝혀졌기 때문에 실험을 통한 독성 평가는 어렵다(Petrilli & DeFlora, 1978; Le Vls & Majone, 1979). 특히, 화학물의 순수성이 알려져 있지 않을 때는 더욱 그렇다. 6가 크롬과 3가 크롬의 생물학적 효과의 감별이 어렵다. 왜냐하면 6가 크롬이 조직 내 세포막을 통과한 후 3가 크롬으로 즉시 환원되기 때문에(NRC, 1974), 관찰된 현상이 이러한 환원에 의한 영향인지, 세포에서 흡수된 후 리간드(ligand)에 의한 3가 크롬의 트래핑(trapping)에 의한 것이니 분명하지 않기 때문이다.

자료를 평가하는데 있어 또 다른 문제점은 투여 경로에 관한 것이다. 경구로 투여된 6가 크롬은 부분적으로 위산에 의해 3가 크롬으로 환원된다(Donaldson & Barreras, 1966). 이런 경우 효과의 유무는 주로 투여한 6가 크롬이 아니라 주로 3가 크롬에 의해 영향을 받을 것이기 때문이다.

2. 크롬 및 그 화합물 관련 노출기준

1) 주요 국가의 노출기준

IFA(Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung)의 GESTIS-Stoffdatenbank에서 제공하는 전 세계의 직업적 노출기준(International Limit Values)에 대한 정보에 따르면 크롬 및 그 화합물의 노출기준 분류는 총 30가지로 확인되었다(IFA, 2024). 크롬 화합물의 노출기준 구분은 수용성/불용성, 무기/유기, 산화수(oxidation number) 등에 따라 분류하고 있다. 우리나라는 6가 크롬 화합물에 대해서만 수용성과 불용성을 구분하고 있는데, 다른 국가에서는 2가, 크롬 3가 화합물을 용해도와 무기/유기를 추가하여 구분하기도 했다. 용해도와 무기/유기를 구분하지 않고 화합물 종류에 따른 분류도 존재했다.

우리나라 노출기준은 1986년 노동부고시 제86-45호로 제정되었다. 제정된 이후 여러 번 개정되었는데 크롬 및 그 화합물의 노출기준은 2002년(노동부고시 제2002-2호)에 대상물질이 대폭 확대되면서 개정되었다. 지금의 크롬 및 그 화합물의 노출기준과 비교해보면 당시 크롬(6가)화합물(불용성)의 노출기준은 0.05 mg/m³으로 현재보다 완화되어 있었으며 CAS No.도 크롬(금속)과 동일하게 사용하고 있었다. 발암성의 경우 당시에는

ACGIH의 발암성 구분을 사용하여 인체에 암이 확인된 물질인 A1으로 표기하였다. 2007년(노동부고시 제 2007-25호)에 크롬(6가)화합물(불용성)을 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)로 용어를 변경하면서 그 기준을 0.05 mg/m^3 에서 0.01 mg/m^3 로 강화하였다. 2008년(노동부 고시 제2008-26호)의 주요 개정 내용으로는 그 동안 사용하고 있던 크롬산 연(lead chromate, as Cr)의 노출기준을 0.05 mg/m^3 에서 0.012 mg/m^3 로 강화하고 lead chromate, as Pb를 신설하면서 그 기준을 0.05 mg/m^3 로 규정하였다. 또한 스트론티움 크로메이트(strontium chromate)에 대한 노출기준을 0.0005 mg/m^3 로 신설하였다. 칼슘 크로메이트의 노출기준은 2018년 3월 0.001 mg/m^3 로 신설되었다. 현재 활용되고 있는 2020년 크롬 및 그 화합물의 노출기준(고용노동부고시 제2020-48호)은 과거와 달리 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)과 크롬(6가)화합물(수용성)의 CAS No.와 발암성 표기가 변경되었다(MoEL, 2020).

미국 직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)의 허용노출기준(Permissible Exposure Limits, PELs)에서 크롬 및 그 화합물은 2가 크롬, 3가 크롬 및 6가 크롬으로 구분하고 있으며 2가 및 3가 크롬의 경우 PELs는 0.5 mg/m^3 이며, $5 \mu\text{g/m}^3$ 을 초과하는 공기 중 6가 크롬 농도에 노출되지 않도록 해야 하고 Action Level은 그 절반 수준인 $2.5 \mu\text{g/m}^3$ 이다(OSHA, 2006). 미국 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH) Threshold Limit Values(TLVs)에서 크롬 및 그 화합물은 크롬과 무기화합물(Chromium, [7440-47-3] and inorganic compounds)로 명기하고 있으며 크롬 금속(Metallic chromium, as Cr)은 0.5 mg/m^3 (흡입성)으로 우리나라 등과 유사하였다(ACGIH, 2020). 다만 3가 크롬화합물(수용성)은 TWA 0.003 mg/m^3 (흡입성)으로 설정되어 있었고 피부흡수(수용성)와 피부 및 호흡기 감각(DSEN, RSEN)을 표시하고 있었다. 6가 크롬(수용성)의 경우 더욱 엄격하게 TWA 0.0002 mg/m^3 (흡입성), STEL 0.0005 mg/m^3 (흡입성)로 설정하였고 발암성은 A1(인체 발암 확인)과 더불어 피부흡수(수용성)와 피부 및 호흡기 감각(DSEN, RSEN)을 표시하고 있었다. 또한 크로밀클로라이드(Chromyl chloride)도 TWA 0.0001 mg/m^3 (흡입성, 증기), STEL 0.00025 mg/m^3 (흡입성, 증기)로 설정하였고 발암성은 A1(인체 발암 확인)과 더불어 피부흡수(수용성)와 피부 및 호흡기 감각

(DSEN, RSEN)을 표시되어 있다.

영국 보건안전청(Health & Safety Executive, HSE)의 작업장 노출기준(Workplace Exposure Limit, WELs)은 개정되어 2020년 1월부터 시행 중이다. 크롬(chromium), 2가 크롬(chromium(II) compounds), 3가 크롬(chromium(III) compounds)은 모두 TWA 0.5 mg/m^3 으로 설정되어 있으며, 6가 크롬(Chromium(VI) compounds)은 0.01 mg/m^3 및 0.025 mg/m^3 (process generated)로 구분되어 있다. 또한 발암성, 감각표기가 있다. 특이한 점으로 모든 chromate 물질에 대한 기준이 전혀 설정되어 있지 않았다. 독일은 3가 크롬 화합물과 6가 크롬 화합물은 최대허용농도(Maximum Concentrations, MAKs) 자체를 삭제하고 있어 가장 강력한 규제를 하고 있는 것으로 판단된다. 일본 후생노동성의 작업환경측정법에 따른 작업환경평가기준에 관리농도에서 크롬산과 그 염은 크롬으로서 0.05 mg/m^3 , 중크롬산과 그 염도 역시 0.05 mg/m^3 로 설정되어 있다. 다만 모든 크로메이트류는 물질별로 설정하고 있지 않다(JSOH, 2020).

2) 화합물 형태별 노출기준

크롬 및 그 화합물의 형태별로 노출기준을 살펴보면 Table 3처럼 요약될 수 있다. 고용노동부의 크롬광가공(크롬산)에 대한 노출기준은 as Cr, 0.05 mg/m^3 으로 설정되어 있다. 벨기에, 캐나다-퀘벡, 뉴질랜드 모두 0.05 mg/m^3 로 채택하고 있다.

고용노동부의 크롬(금속)에 대한 노출기준은 0.5 mg/m^3 으로 설정되어 있다. 대부분의 국가인 벨기에, 캐나다, 핀란드, 이태리 등에서 우리나라와 동일한 수준을 채택하고 있었다. 다만 호주(2 mg/m^3), 유럽연합(2 mg/m^3), 남아공화국(1 mg/m^3)은 우리나라에 비해 낮은 수준으로 설정하고 있다.

고용노동부의 크롬(6가)화합물(불용성무기화합물)에 대한 노출기준은 0.01 mg/m^3 으로 설정되어 있다. 캐나다, 아일랜드, 이스라엘이 우리나라와 동일한 수준으로 규제하고 있었다. 한편, ACGIH TLV(0.0002 mg/m^3)보다 더 강력한 규제기준은 뉴질랜드로 0.00002 mg/m^3 를 채택하고 있으며 15분간 기준은 0.0005 mg/m^3 로 설정되었다.

우리나라 크롬산 연(lead chromate, as Cr)에 대한 노출기준은 0.012 mg/m^3 으로 설정되어 있다. 우리나라와 동일한 수준으로 노출기준을 설정한 국가는 캐나다,

Table 3. Occupational exposure limits for chromium and its compounds

Nation	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Chromite ore processing(chromate)			
Belgium, Canada-Québec, New Zealand, South Korea	0.05	-	-
Chromium, metal[7440-47-3]			
Austria, European Union	2	-	-
Belgium, Finland, Italy, Japan-JSOH, Norway, Netherlands, South Africa-Mining, USA-NIOSH	0.5	-	-
Canada-Québec	0.5	2	
South Africa	1	-	Inhalable fraction
Switzerland	0.5	-	Inhalable fraction
Chromium(VI) compounds, insoluble [7429-90-5]			
Australia	0.05	-	-
Canada-Ontario, Canada-Québec, Ireland, Israel, South Korea	0.01	-	-
New Zealand	0.00002	0.0005(1)	(1) 15 minutes average value
Chromium(VI) compounds, water-soluble compounds [7440-47-3]			
Canada-Québec, Israel, South Africa-Mining	0.05	-	-
South Africa	0.0004(1)(2)	0.001(1)(2)(3)	(1) Inhalable fraction (2) Skin (3) 15 minutes average value
Lead chromate(as Cr) [7758-97-6]			
Australia	0.05	-	-
Austria	0.05	0.2	inhalable aerosol
Belgium	0.01	-	Additional indication "C" means that the agent falls within the scope of Title 2 concerning carcinogenic, mutagenic and reprotoxic agents of Book VI of the Codex on well-being at work.
Canada-Ontario, Canada-Quebec, Israel, Singapore, South Korea	0.012	-	-
Ireland	0.012(1)	-	(1) as Cr(2) as Pb
	0.1(2)	-	
Norway	0.005	-	as Cr(VI)
Spain	0.012(as Cr)	-	-
	0.05(as Pb)	-	-
Sweden	0.005(1)	0.015(1)(2)	(1) Inhalable fraction(2) 15 minutes average value
The Netherlands	-	0.025(1)	(1) 15 minutes average value
Lead chromate(as Pb) [7784-40-9]			
Canada-Ontario, South Korea, Spain	0.05	-	-
Canada-Québec, Singapore	0.15	-	-
Ireland	0.012	-	-
Zinc chromates(as Cr) [13530-65-9]			
Australia, Canada-Ontario, Israel, Singapore, South Korea	0.01	-	-

Table 3. Continued

Nation	TWA(mg/m ³)	STEL(mg/m ³)	Notation
Austria	0.05(1)	0.2(1)(2)	(1) Inhalable fraction(2) 15 minutes average
Belgium	0.01	–	Additional indication “C” means that the agent falls within the scope of Title 2 concerning carcinogenic, mutagenic and reprotoxic agents of Book VI of the Codex on well-being at work.
Canada–Québec, USA–NIOSH	0.001	–	–
Finland	0.005	–	Including zinc potassium chromate
Hungary	–	0.01	–
Romania	0.01	–	as ZnCrO ₄
Spain	0.01(as Cr)	–	sen
Sweden	0.005(1)	0.015(1)(2)	(1) Inhalable fraction(2) 15 minutes average value
Switzerland	0.01	–	Inhalable aerosol
Netherlands	–	0.01	15 minutes average value
United Kingdom	0.05	–	–
Chromium(II) compounds(as Cr)[22541–79–3]			
Australia, Finland, Norway, South Korea, USA–NIOSH	0,5	–	–
New Zealand	0.05	–	–
Chromium(II) compounds(as Cr)[7440–47–3]			
Australia, Belgium, Canada–Québec, Finland, Israel, Italy, New Zealand, Norway, People's Republic of China, Poland, South Africa–Mining, South Korea, Sweden, USA–OSHA	0,5	–	–
Denmark	0,5	1,0	
European Union	2	–	Bold-type: Indicative Occupational Exposure Limit Value(IOELV) ~(for references see bibliography)
France	2	–	Italic type: Indicative statutory limit values
Germany(AGS)	2(1)(2)	2(1)(2)(3)	(1) Except chromium(III) sulphate, basic(CAS: 12336–95–7, 39380–78–4)(2) Inhalable fraction(3) 15 minutes average value
Hungary	0,5	2(1)	(1) 15 minutes average value
Ireland, Spain	2	–	–
Latvia	2	–	Insoluble Cr(II) and Cr(III) salts
Switzerland	0,5	–	Inhalable aerosol
Turkey	2	–	–
Chromium(III) compounds, as Cr [16065–83–1]			
Australia, Finland, Canada–Ontario, Japan(JSOH), New Zealand, Norway, Poland, South Korea, USA–NIOSH	0,5	–	–
Hungary	2	–	–

아일랜드, 이스라엘, 싱가포르, 스페인으로 확인되었다. 더 완화된 0.05 mg/m³를 채택하고 있는 국가는 오스트레일리아, 호주가 있었고, 단시간노출기준을 설정하고

있는 국가는 호주(0.2 mg/m³), 스웨덴(0.015 mg/m³) 및 네덜란드(0.025 mg/m³)가 있다.

우리나라 크롬산 아연(Zinc chromates, as Cr)에

대한 노출기준은 0.01 mg/m^3 으로 설정되어 있다. 우리나라와 동일한 노출기준을 설정한 국가는 오스트레일리아, 벨기에, 캐나다(온타리오), 이스라엘, 루마니아, 싱가포르, 스페인, 스위스가 있었다. 우리나라보다 크롬산 아연에 대한 노출기준이 강력한 국가는 캐나다(퀘벡, 0.001 mg/m^3), 핀란드 및 스웨덴(0.005 mg/m^3), 미국 NIOSH의 노출기준은 우리나라 기준보다 1/10 수준인 0.001 mg/m^3 로 설정되어 있다. 한편, 스페인은 크롬산 아연을 감작물질로 지정하고 있었고, 단기간 노출기준을 설정하고 있는 국가는 호주, 헝가리, 스웨덴 및 노르웨이가 있다.

크롬(2가)화합물(Chromium(II) compounds, as Cr, CAS No. 22541-79-3)의 노출기준이 설정되어 있는 국가는 우리나라를 포함하여 6개 국가로 다른 물질에 비해 채택하고 있는 국가가 많이 존재하지는 않았다. 우리나라는 크롬(2가)화합물의 노출기준을 0.5 mg/m^3 로 설정하고 있으며 뉴질랜드(0.05 mg/m^3) 이외에는 모두 우리나라 노출수준과 동일하게 설정되어 있다. 한편, 크롬(2가)화합물 중 현재 우리나라 노출기준 CAS No.와 동일한 Chromium and Cr(II); Cr(III) compounds insoluble as Cr[7440-47-3]의 경우 대부분의 국가에서 노출기준 $0.5 \sim 2 \text{ mg/m}^3$ 을 채택하고 있다. 우리나라 크롬(3가)화합물(Chromium(III) compounds, as Cr)에 대한 노출기준은 0.5 mg/m^3 으로 설정되어 있다. 대부분의 국가에서 우리나라와 동일한 노출수준으로 설정한 국가가 대부분이었으며 헝가리만 유일하게 2 mg/m^3 로 완화된 노출기준을 보이고 있었다.

3. 크롬 및 그 화합물에 대한 독성학적 고찰

1) 호흡기, 부식영향, 자극 및 감각

금속 Cr(0)에 대한 정보는 합금강 공장(Triebig et al., 1987)과 보일러 제조업체(Verschoor et al., 1988)에서 노동자의 신장 영향 가능성을 조사한 연구가 있다. $0.61 \text{ mg Cr(0)/m}^3$ 의 금속 크롬 및 기타 금속에 평균 7년 노출된 합금 철강 공장에 고용된 작업자는 총 단백질 및 일부 효소 활성에서 정상적인 소변 수준을 보였다(Triebig et al., 1987).

동물과 인간에 대한 연구에서 Cr(III) 화합물이 흡수될 때 건강에 미치는 악영향이 비교적 적다는 것을 확인하였다(ATSDR, 2012). Huvinen et al.(2002a)의 연구에서 Cr(III)에 대한 특정 노출 수준은 보고되지 않았지만 총 크롬 및 6가 크롬 수준은 확인되었다. non-Cr

(VI) 크롬, Cr(III)의 개인 노출 수준 중앙값은 11년에 걸쳐 0.030 mg/m^3 에서 0.004 mg/m^3 로 감소되었다. 이러한 결과로 $0.03 \text{ mg Cr(III)/m}^3$ 의 호흡기 증상에 대한 최소독성용량(lowest-observed-adverse-effect level, LOAEL)을 제안했으며 $0.004 \text{ mg Cr(III)/m}^3$ 에서 대부분의 증상이 상당히 감소했다. 크로마이트 광석(chromite ore) 그룹의 경우 $0.022 \text{ mg Cr(III)/m}^3$ 이었다. 이러한 결과는 상기도 자극에 대하여 가능한 LOAEL을 $0.25 \text{ mg Cr(III)/m}^3$ 의 평균 노출로 제안되었다(Huvinen et al., 2002b).

Lindberg & Hedenstierna(1983)의 연구에서 직업적으로 2.5년의 중앙 노출 기간 동안 $0.002 \sim 0.020 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ 에 노출된 노동자에게 비염($p < 0.05$), 점막 위축($p < 0.05$), 비강 궤양($p < 0.01$)의 유병률이 유의하게 증가했으며 폐기능 감소(FEV1, FVC, MMEF)가 발생되었다. 노출 대상자의 약 60%가 흡연자였지만 Cr(VI) 노출과 담배 흡연 사이의 일관된 연관성은 관찰되지 않았다. 그러나 주관적인 코 자극과 점막 위축의 징후가 0.002 mg/m^3 미만의 평균 8시간 TWA 수준에 노출된 4/19(노동자의 21%)에서도 나타났으므로 명확한 NOAEL을 정의하지 않았다. 비중격 손상은 평균 8시간 TWA 농도보다 크롬산(chromic acid)에 대한 단기 피크 노출과 더 좋은 상관관계가 있었다. “피크” 노출을 조사했을 때 다양한 비강 증상 및 징후에 대한 NOAEL이 $0.0002 \sim 0.0012 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ 범위에서 관찰되었다. 종합적으로 Cr(VI) 화합물에 대한 8시간 TWA가 $0.0002 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ ($0.2 \mu\text{g/m}^3$)이고 STEL이 $0.0005 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ ($1.0 \mu\text{g/m}^3$)임을 의미한다. 이러한 기준은 거의 모든 작업자를 상부 및 하부 호흡기의 심한 자극과 폐기능의 감소로부터 보호할 수 있다. Huvinen et al.(2002a, b)는 $0.0003 \sim 0.0005 \text{ mg Cr(VI)/m}^3$ 범위에서 Cr(VI)에 노출된 작업자에 대한 8시간 TWA NOAEL을 제안하며, 이는 Lindberg & Hedenstierna(1983)의 결과로부터 유도된 0.0002 mg/m^3 값과 유사하였다.

2) 발암성 및 유전독성

Cr(0)의 발암성 또는 유전독성에 대한 인체 연구는 확인되지 않았다. Cr(III) 화합물은 동물실험에서도 쥐에서 발암성에 대한 증거가 없다고 결론내렸다(U.S. NTP, 2010). 인간 대상 연구에서 과도한 폐암 사망에 기여하지 않았을 것이라고 결론지었다(Gibb et al.,

2000).

동물 실험 자료는 난용성(poorly soluble) Cr(VI) 화합물(예: 크롬산 아연)이 발암성인 반면 가용성 Cr(VI) 형태는 암을 유발하지 않는 것으로 나타났다(Laskin et al., 1969). 그러나 ATSDR(2012), IARC(2012) 및 NIOSH(2005, 2013)에 의해 요약된 많은 양의 후속 증거는 모든 Cr(VI) 화합물이 수성 매질에서의 용해도에 관계없이 발암 가능성이 있다고 밝혔다. 미국 NIOSH(2013)는 Cr(VI) 화합물에 대한 최근 기준과 관련된 기록에서 2개의 미국 코호트(Gibb et al., 2000; Luippold et al., 2003)에 대해 수행된 연구를 위험 평가를 위해 사용하기 가장 적합한 것으로 강조했다. NIOSH 조사자(Park et al., 2004; Park & Stayner, 2006)는 가장 포괄적인 분석을 수행하여 Cr(VI)과 폐암의 관계에 대한 값을 0.0002 mg/m^3 으로 제시하였고, 이러한 의미는 작업 수명 동안 1000명당 약 1명의 위험이 NIOSH의 Cr(VI) 화합물에 대한 권장 노출 기준(Recommended Exposure Limit)의 근간을 마련하였다(NIOSH, 2013). 업데이트된 코호트의 결과에 따르면 45년 동안 OSHA PEL($5 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$)에 지속적으로 노출되면 폐암 위험이 1000명당 8.3명으로 추산되었다. 45년 동안 NIOSH REL($0.2 \mu\text{g Cr(VI)}/\text{m}^3$)에 지속적으로 노출된 경우 위험은 작업자 1000명당 0.3명으로 추정되었다(Proctor et al., 2016).

크롬 3가와 6가는 인간 세포주에서 유전독성이 있는 것으로 나타났다. S 상 의존성 DNA 이중 가닥 파손은 크롬산나트륨에 노출된 배양된 인간 진피 섬유아세포에서 관찰되었다(Ha et al., 2003, 2004). 크롬산나트륨(sodium chromate)은 또한 배양된 인간 기관지 섬유아세포 및 기관지 상피 세포에서 농도 의존적 염색체 손상이 유도되었다(Holmes et al., 2006; Wise et al., 2006).

4. 국내 알루미늄 작업자 노출 실태조사

6가 크롬 취급 공정에서 크롬이 모두 6가 형태로 발생한다면 ICP를 이용한 총크롬 분석결과와 IC로 분석하는 6가 크롬의 분석결과가 동일한 수준인가를 파악하기 위한 이번 실태조사 결과는 아래와 같다.

사업장1은 크롬이 23~27% 함유된 Fe-Cr용접봉과 크롬이 18~20% 함유된 Sus Cut Wire용접봉을 사용하여 용접을 하는 곳이다. 용접이 이루어지는 작업위치에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터

로 각 7개를 측정하였다. 그 결과 <금속과 크롬3가>는 ICP(유도결합플라즈마)로 분석하여 평균 0.0023 mg/m^3 으로 평가되었고 <크롬(6가)화합물(불용성)>은 IC-UVD(이온크로마토그래피 분광검출기)로 분석하여 평균 0.0005 mg/m^3 으로 평가되었다. 사업장2는 주철 및 스테인레스 용접을 필요에 따라 진행하는 곳으로 크롬이 20%이상 함유된 용접봉 CSF-308와 309, TGC-308과 309들을 사용하여 스테인레스용접을 할 때 시료채취카트 2개를 용접대 주변에 설치하여 측정을 실시하였다. 그 결과 ICP법의 평균은 0.0004 mg/m^3 으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 분석되었다.

사업장3은 크롬산을 사용하여 도금의 마지막 과정으로 광택을 입히는 작업이다. 도금조와 작업공간이 협소하여 불가피하게 시료채취카트 대신 시료채취기구를 가방에 넣어 2세트로 준비하고 도금조 주변에 매달아 측정하였다. 그 결과 ICP법의 평균은 0.0012 mg/m^3 으로 평가되었고 IC-UVD법의 평균은 0.0002 mg/m^3 으로 평가되었다. 사업장4은 크롬산을 사용하여 경질크롬도금을 하는 곳으로 크롬도금조 주변에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 평균은 0.0014 mg/m^3 으로 평가되었고 IC-UVD법의 평균도 0.0014 mg/m^3 으로 평가되었다. 사업장5는 무수크롬산을 사용하여 도금과정 중 최종 크롬도금을 진행하는 곳으로 크롬도금조 옆에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 평균은 0.0004 mg/m^3 으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 분석되었다.

사업장7의 스프레이도장 공정은 pigment yellow34(크롬산납)가 0~1%포함된 UT6581-A-N7.0 등의 페인트로 스프레이도장을 하는 곳으로, 도장주변에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 크롬산연(as Cr)이 분석 평균이 0.00009 mg/m^3 으로, 크롬산연(as Pb)은 0.00009 mg/m^3 으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 평가되었다. 사업장8의 스프레이도장 공정은 pigment yellow34(크롬산납)가 17~27% 함유된 소부예나멜(상도) DNM-103(황색) 등을 사용하여 제품에 도장을 하는 곳으로, 공정 주변에 시료채취카트 2개를 설치하여 MCE필터와 PVC필터로 각 6개를 측정하였다. 그 결과 ICP법의 크롬산연(as Cr) 평균이 0.00025 mg/m^3 으로 평가되었고 IC-UVD법은 모두 불검출로 평

Table 4. Average chromium concentration by sampling site(unit: mg/m³)

Analytical method	Welding			Plating			Spray painting	
	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8
ICP	0.0027	0.0004	0.0012	0.0014	0.0004	0.0002	0.00009	0.00025
IC	0.0006	< LOD	0.0002	0.0014	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

가되었다.

총크롬 분석법인 ICP로 측정한 결과와 6가 크롬 분석법인 IC로 분석한 결과의 평균을 비교하면 사업장4만 동일하고 모두 총크롬이 더 많이 평가되었다. 총크롬은 0.0004~0.0027 mg/m³로 평가되었고, 6가크롬은 불검출~0.0014 mg/m³로 평가되었다.

5. 노출기준 변경 타당성 검토

1) 6가 크롬의 수용성과 불용성의 구분

수용성에 따른 독성의 차이는 동물 실험에서만 일부 보고되었다(Laskin et al., 1969). 미국 OSHA는 2006년 6가 크롬에 대한 노출기준을 제시하면서 동물 및 역학 증거를 심도있게 평가한 후 모든 6가 크롬을 발암성 물질로 간주하였다(OSHA, 2006). 여러 최신 역학 조사에서는 수성 매질에서의 용해도에 관계없이 발암 가능성이 있다고 밝혔다(NIOSH, 2005; ATSDR, 2012; IARC, 2012; NIOSH, 2013). 현재 수용성과 불용성을 구분하여 노출기준을 제시하는 나라는 캐나다 퀘벡 주, 이스라엘, 한국 등에 한정되고 있다. Park et al.(2020)도 수용성과 불용성을 현재 구분하고는 있으나, 두 구분 모두 발암성 구분이 1A이고 ACGIH TLVs 등 다수의 기관에서도 구분 없이 적용하므로 우리나라도 6가 크롬 화합물로 통합하는 것을 추천하였다. 크롬 노출이 가장 빈번한 공정인 용접작업에서 수용성과 불용성 크롬이 혼재하여 개별 측정이 필요한데 이는 작업자들이 측정기기의 착용을 거부하는 이유 중 하나이다. 수용성과 불용성 6가 크롬의 농도를 각각 결정하기 위해서는 별도의 분석과정이 필요하며, 둘을 통합하는 경우 노출 평가의 난이도 및 비용이 절감될 것으로 예상된다.

2) 노출관리 기술적 타당성

미국 OSHA는 최초로 6가 크롬에 대한 PEL을 1 µg/m³로 제안하였으나, 산업체 등에서 경제적, 기술적으로 실현 가능성에 대한 반론을 받고 최종적으로 5 µg/m³로 결정하였다(OSHA, 2006). 여기에는 이는 광범위하게 호흡보호구 사용을 해야 하는 요구 사항을

피하는 것이 현명하다는 OSHA의 오랜 견해가 반영되었다. OSHA는 호흡보호구가 공학적 관리 및 작업관행 관리보다 본질적으로 신뢰성이 떨어진다고 판단한다. 지속적으로 적절한 보호를 제공하려면 호흡보호구의 적절한 선택과 착용 및 적당하게 사용되고 유지되어야 한다. 이러한 조건은 준수하기 어려울 수 있고 인적 오류가 발생할 수 있기 때문에 OSHA는 호흡보호구 공학적 관리 및 작업관행 관리와 동일한 보호 수준이라고 생각하지 않는다. 제출된 증거 및 의견을 바탕으로 OSHA는 제안된 1 µg/m³의 PEL은 기술적으로 또는 경제적으로 실행 불가능하거나 용접, 항공 우주 페인팅, 크롬산염 안료 생산, 크롬 촉매 생산, 크롬 염료 생산, 일부 경질 크롬 전기도금 작업 및 전기도금 작업장을 포함하여 기준이 적용되는 많은 산업 및 작업에서 입증되지 못했다.

3) 총크롬(as Cr)로 6가 크롬 노출기준 대체

노출기준을 TLV 수준으로 낮추었을 때 발생할 수 있는 문제는 이에 맞는 검출한계(limit of detection, LOD)가 낮은 분석방법이 이용 가능해야한다는 것이다. 6가 크롬 대신 총크롬('as Cr')에 대한 분석으로 노출기준을 설정하면 LOD가 더 낮은 분석방법(예: ICP 분석 방법)을 이용할 수 있다. 구체적으로 6가 표준 크롬 분석법인 이온크로마토그래피-전도도검출기 혹은 이온크로마토그래피-분광검출기의 검출한계는 3.5 µg/sample인 반면, 유도결합플라즈마분광검출기(ICP)의 검출한계는 0.020 µg/sample이다. 이러한 대체의 단점은 6가 크롬 농도가 과대평가될 수 있다는 것이다.

대기 중에서 6가 크롬은 vanadium(V²⁺, V³⁺, VO₂⁺), Fe²⁺, HSO₃⁻ 및 AS³⁺ 등의 환원 물질에 의해 유의한 속도로 환원될 수 있다. 공기 중에서 6가 크롬은 3가보다 불안정하여 무기 또는 유기 환원성 물질 또는 산성조건에서 환원되며 대기환경과 유사한 조건의 실험환경에서 6가 크롬의 반감기는 13시간으로 보고된 바 있다(KOSHA, 2000). 6가 크롬의 이러한 불안정한 성질은 스프레이로 공기 중 분무됨으로써 공정의 환경

조성에 따라 산화환원되어 농도가 낮아지는 것으로 추측된다. 이런 이유로 정확한 공기 중 6가 크롬 농도를 평가할 수 없기 때문에 총크롬으로 분석하는 것이 고려되어야 한다.

IV. 결론 및 제언

1. 크롬 및 그 화합물에 대한 노출기준 개정안

저자들이 제안하는 개정안 3가지는 Table 5와 같이 요약될 수 있다. 6가 크롬 화합물의 종류에 상관없이 독성이 동일한 것으로 보고되고 있으며, 건강영향이 없는 수준은 ACGIH TLV 수준인 0.0002 mg/m³으로 여러 문헌에 보고되고 있다.

1) 개정안 ①

6가 크롬의 노출기준을 수용성, 불용성, 크롬광 가공, 그 외 6가 크롬 화합물로 구분하지 않고 통합하여 크롬(6가)화합물(불용성) 수준인 0.01 mg/m³으로 노출기준 통합하고 그 외 크롬(금속) 및 크롬(3가)화합물 등은 유지하는 안이다. 이 수준보다 낮은 노출기준을 가진 6가 크롬인 스트론티움 크로메이트와 칼슘 크로메이트는 현재 수준을 유지한다. 이 두 물질에 대한 노출기준은 각각 2008년 및 2018년에 추가되어 최신 독성자료들이 반영되어 있다고 볼 수 있다.

2) 개정안 ②

개정안 ①처럼 노출기준을 통합하되 그 수준을 OSHA

의 노출기준인 0.005 mg/m³으로 낮춘 후 4년의 적용유예 기간을 가진다. 이 수준보다 낮은 노출기준을 가진 6가 크롬인 스트론티움 크로메이트와 칼슘 크로메이트는 현재 수준을 유지한다. 이 두 물질에 대한 노출기준은 각각 2008년 및 2018년에 추가되어 최신 독성자료들이 반영되어 있다고 볼 수 있다.

3) 개정안 ③

개정안 ①처럼 노출기준을 통합하되 그 수준을 ACGIH의 노출기준인 0.0002 mg/m³으로 낮춘 후 5년의 적용유예기간을 가진다. 이렇게 되는 경우 크롬(3가) 화합물을 제외한 모든 노출기준이 ACGIH TLV와 동일하게 된다.

2. 제안된 노출기준 적용성 검토

1) 독성학적 설정 근거

6가 크롬 화합물의 종류에 상관없이 독성이 동일한 것으로 보고되고 있으며, 건강영향이 없는 수준은 ACGIH TLV 수준인 0.0002 mg/m³으로 여러 문헌에 보고되고 있으나, 기술적으로 성취하기 어려울 수 있으며, OSHA도 노출기준 개정 후 4년간의 적용유예기간을 가졌다.

2) 기타 고려사항

노출기준이 낮아지면서 시료 분석방법의 민감도에 대한 고려가 필요하다. 3가 크롬의 경우 기존 노출기준을 유지하기 때문에 문제가 되지 않는다. 원자흡광광도계

Table 5. Proposed occupational exposure limitis for chromium compounds

Compound	Occupational exposure limit(mg/m ³)					Notation
	MoEL	ACGIH	Proposal ①	Proposal ②	Proposal ③	
Chromite ore(chromate)	0.05	0.0002	0.01	0.005	0.0002	as Cr(IV)
Chromium(IV) (insoluble)	0.01					
Chromium(IV) (soluble)	0.05					
Chromate	0.012					
Zinc chromate	0.01					
Strontium chromate	0.0005					
Calcium chromate	0.001	0.5	0.5	0.5	0.5	as Cr
Chromium(metal)	0.5					
Chromium(II)	0.5					
Chromium(III)	0.5	0.003	C 0.1	C 0.1	C 0.1	-
tert-Butyl chromate	C 0.1	C 0.1				

법을 사용하는 크롬 분석방법의 검출한계는 $0.06 \mu\text{g}/\text{sample}$ 이다. 최소 6시간 동안 2.0 lpm 으로 시료를 채취하는 경우 흡인되는 공기의 양은 720 리터이며, 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 10배로 계산할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 $0.0008 \text{ mg}/\text{m}^3$ 으로 기본 장비를 그대로 사용하는 것에 문제 없다.

6가 크롬의 경우 모두 6가 크롬으로 가정하고 총크롬으로 분석하는 방법과 6가 크롬 이온을 분석하는 두 가지 측정방법이 있다. 6가 크롬 노출기준이 $0.005 \text{ mg}/\text{m}^3$ 또는 $0.0002 \text{ mg}/\text{m}^3$ 로 기존의 1/2(개정안 ②) 또는 1/50(개정안 ③)로 낮아지는 경우 분석이 어려워질 수 있다.

본 연구에서 사용한 두 분석방법의 검출한계는 ICP가 $0.4 \mu\text{g}/\text{sample}$ 이고 IC가 $0.02 \mu\text{g}/\text{sample}$ 이다. 최소 6시간 동안 2.0 lpm 으로 시료를 채취하는 경우 흡인되는 공기의 양은 720 리터이며, 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 10배로 계산할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 각각 $0.0056 \text{ mg}/\text{m}^3$ 및 $0.00028 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이 되어 IC를 사용하는 경우 개정안 ②의 적용은 문제 없지만 개정안 ③의 적용은 현실적으로 제한될 수 있다. ICP를 사용하는 경우 개정안 ②와 ③ 모두에서 문제가 생길 수 있다. 검량한계(LOQ)를 검출한계(LOD)의 3배로 계산할 때 분석할 수 있는 최소 농도는 낮아진다. 위험성평가 제도에서 노출수준을 구분하는 기준 중 하나가 노출기준의 10%인 것을 감안하면 새로운 노출기준이 적용되는 경우 검출한계 이하 농도에서는 위험성평가 제도의 시행에 문제가 생길 수 있다.

3) 개정안의 실태조사 적용

제안된 개정안을 실태조사된 자료에 적용했을 때 노출기준 초과비율을 계산하면 개정안 ③의 경우 전체적으로 51.0%의 초과비율이 발생한다. 개정안 ②의 경우 초과하는 시료가 사업장1에서 1개이지만, 노출기준의 절반을 초과하는 시료는 사업장1에서 3개이고 다른 사업장에서는 없었다.

감사의 글

본 연구는 2022년 안전보건공단 산업보건연구원 학술용역에 따라 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

References

- 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
- ASTDR. Toxicological profile for chromium. ASTDR. 2012
- Donaldson RM & Barreras RF. Intestinal absorption of trace quantities of chromium. *J Labor Clinic Med* 1966;68(3):484-493
- Gibb HJ, Lees PS, Pinsky PF, Rooney BC. Clinical findings of irritation among chromium chemical production workers. *Am J Ind Med* 2000;38(2):127-131
- Ha L, Ceryak S, Patierno SR. Chromium(VI) activates ataxia telangiectasia mutated(ATM) protein: Requirement of ATM for both apoptosis and recovery from terminal growth arrest. *J Bio Chem* 2003;278(20):17885-17894
- Ha L, Ceryak S, Patierno SR. Generation of S phase-dependent DNA double-strand breaks by Cr(VI) exposure: involvement of ATM in Cr(VI) induction of γ -H2AX. *Carcinogenesis*, 2004;25(11):2265-2274
- Holmes AL, Wise SS, Wise JP. Carcinogenicity of hexavalent chromium. In *J Med research* 2008; 128(4):353-372
- Huvinen M, Uitti J, Oksa P, Palmroos P, Laippala P. Respiratory health effects of long-term exposure to different chromium species in stainless steel production. *Occup Med* 2002a;52(4):203-212
- Huvinen M, Mäkitie A, Järventaus H, Wolff H, Stjernvall T et al. Nasal cell micronuclei, cytology and clinical symptoms in stainless steel production workers exposed to chromium. *Mutagenesis*, 2002b;17(5): 425-429
- IARC. Chromium(VI) compounds. Volume 100 C. A review of human carcinogens. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. 2012
- IFA. International limit values. IFA. 2024 [Accessed 6 May 2024] Available from: <https://ilv.ifa.dguv.de/substances>
- JSOH. Recommendation of occupational exposure limits (2020-2021). The Japan Society for Occupational Health. *Environ Occup Health Practice*; 2020
- Krebs RE. The history and use of our earth's chemical elements: a reference guide. Bloomsbury Publishing USA. 2006
- KOSHA. Research on improving the working environment at workplaces handling hazardous chemicals(Study

- on the redox characteristics of chromium in the air generated during the plating process). 2000-42-192. KOSHA. 2000
- Laskin S, Kuschner M, Drew RT. Studies in pulmonary carcinogenesis, in Hanna MG, Nettesheim P, Gilbert JR(eds): Inhalation Carcinogenesis. Oak Ridge, Tenn, US Atomic Energy Commission, 1969, p. 321-51
- Lee GY, Kim BW, Yong CS. Worker exposure assessment on airborne total chromium and hexavalent chromium by process in electroplating factories. J Kor Soc Occup Environ Hyg 2015;25(1):89-94 <http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.1.89>
- Levis AG & Majone F. Cytotoxic and clastogenic effects of soluble chromium compounds on mammalian cell cultures. Brit J Cancer 1979;40(4):523-533
- Lindberg E, Hedenstierna G. Chrome plating: symptoms, findings in the upper airways, and effects on lung function. Archives of Environmental Health: An International Journal, 1983;38(6):367-374
- Luippold RS, Mundt KA, Austin RP, Liebig E, Panko J et al. Lung cancer mortality among chromate production workers. Occup Environ Med 2003;60(6):451-457
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational exposure limits of chemical substances and physical agents. MoEL Notice of Korea 2020-48, MoEL; 2020
- NIOSH. NIOSH testimony on the Occupational Safety and Health Administration's proposed rule on occupational exposure to hexavalent chromium, OSHA Docket No. H-054A. NIOSH policy statements. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. 2005
- NIOSH. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Hexavalent Chromium. NIOSH. 2013
- NIOSH. NIOSH Manual of Analytical Methods(NMAM), ELEMENTS by ICP, Fourth Edition, 2003a
- NIOSH. NIOSH Manual of Analytical Methods(NMAM), CHROMIUM, HEXAVALENT 7605 by Ion Chromatography, Fourth Edition, 2003b
- NRC. Chromium. Washington, DC: The National Academies Press. 1974 <https://doi.org/10.17226/20099>
- NTP. NTP toxicology and carcinogenesis studies of chromium picolinate monohydrate(CAS No. 27882-76-4) in F344/N rats and B6C3F1 mice(feed studies). Natl Toxicol Program Tech Rep Ser. 2010;(556): 1-194
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Federal Register/Vol. 71. No. 39, 2006
- Park D, Yun YS, Park JM. Reduction of hexavalent chromium with the brown seaweed Ecklonia biomass. Environ Sci & Tech 2004;38(18):4860-4864
- Park JI, Choi SH, Lee AR, Go JE. Strategies for revising the Korean occupational exposure limits(KOELs) of metal compounds. 2020-OSHRI-708. 2020
- Park RM & Stayner LT. A search for thresholds and other nonlinearities in the relationship between hexavalent chromium and lung cancer. Risk Analysis: An International Journal, 2006;26(1):79-88
- Petrilli FL & De Flora S. Metabolic deactivation of hexavalent chromium mutagenicity. Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects. 1978;54(2):139-147
- Proctor DM, Suh M, Mittal L, Hirsch S, Valdes Salgado R et al. Inhalation cancer risk assessment of hexavalent chromium based on updated mortality for Painesville chromate production workers. J Exposure Sci & Environ Epi 2016;26(2):224-231
- Triebig G, Zschiesche W, Schaller KH, Weltle D, Valentin H. Studies on the nephrotoxicity of heavy metals in iron and steel industries", in: Occupational and Environmental Chemical Hazards. Cellular and Biochemical Indices for Monitoring Toxicity, Foa V, Emmett EA, Maroni M, Colombi A(eds.), Chichester, Ellis Horwood, 1987 pp.3 34-338
- USGS. Chromium statistics and information. 2015. [Accessed 3 May 2024] Available from <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/chromium-statistics-and-information>
- Verschoor MA, Bragt PC, Herbert RF, Zielhuis RL, Zwennis WC. Renal function of chrome-plating workers and welders. International archives of occupational and environmental health, 1988;60:67-70
- Wise SS, Holmes AL, Xie H, Thompson WD, Wise JP. Chronic exposure to particulate chromate induces spindle assembly checkpoint bypass in human lung cells. Chem res in Tox 2006;19(11):1492-1498

<저자정보>

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