

도금사업장에서 발생하는 공기 중 6가 크롬의 노출평가

안지현 · 피영규^{1*}

대구한의대학교 산업보건연구소, ¹대구한의대학교 보건학부

Exposure Assessment of Airborne Hexavalent Chromium in the South Korea Plating Industry

Ji-hyun An · Young Gyu Phee^{1*}

Institute of Industrial Health, Daegu Haany University

¹*Faculty of Health Science, Daegu Haany University*

ABSTRACT

Objectives: The purpose of this study was to identify the exposure level of airborne hexavalent chromium in the plating industry and the exposure level compared to domestic and international occupational exposure limits.

Methods: A total 92 samples were collected from ten industrial plating sites. Hexavalent chromium samples were collected using a three-stage cassette equipped with a 37 mm, 5 µm pore size PVC filter. The analysis was performed by ion chromatography.

Results: The geometric mean of hexavalent chromium concentration in the plating industry was 0.052 µg/m³, and it was found that the average exposure level was 0.8 times the South Korean exposure limit. When applying the US ACGIH TLV, however, the average concentration was more than twice as high.

Conclusions: The South Korean exposure limit for hexavalent chromium needs to be strengthened due to significant differences in exposure levels according to domestic and international occupational exposure limits. Furthermore, respiratory and dermal sensitization should be labeled.

Key words: Concentration, hexavalent chromium, plating


I. 서 론

크롬(Chromium)은 지각에서 21번째로 흔한 원소이며, 단단하면서 광택을 가지고 있는 회색의 금속 물질로 2, 3 또는 6의 수가이다(Krebs, 2006; ACGIH, 2011). 일반적으로 환경 중에 존재하는 형태는 주로 3가와 6가 크롬이며, 6가 크롬은 다시 수용성과 불용성으로 구분된다(Jung, 1995). 6가 크롬 화합물은 크롬도금을 포함하여 크롬 합금, 스테인리스의 용접과 연삭, 목재보존 등 여러 산업 분야에서 사용되어 공기 중 노출이 가능하다(WHO, 1986). 특히 국내 도금업종은 노

동집약적이고 영세하여 열악한 작업환경에서 근무하는 노동자들에게 각종 직업병이 유발될 수 있다(Park et al., 1989).

도금이란 표면처리 작업으로 재료표면에 얇은 금속 막을 입히는 작업을 말한다. 재료 표면에 어떤 금속을 입힐 것이냐에 따라 크롬도금, 아연도금, 니켈도금, 금도금, 은도금 등으로 구분된다. 도금 업종에 주로 사용되는 크롬은 수용성의 6가 크롬인 무수크롬산으로 공기 중으로 발생하는 크롬 미스트에 대하여 특별한 주의가 요구된다(Lee & Shin, 2003). 이러한 크롬은 오래전부터 호흡기를 자극하여 기관지염, 급성폐렴 등을 유발한다고 알려져 왔다

*Corresponding author: Young Gyu Phee, Tel: 053-819-1590, Fax: 053-819-1209, E-mail: yphee@dhu.ac.kr
Faculty of Health Science, Daegu Haany University, 1 Hannydae-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 38610
Received: March 5, 2024, Revised: March 22, 2024, Accepted: March 29, 2024

 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.

(Baetjer, 1950; Meyers, 1950; Princi et al., 1962). 특히 6가 크롬 화합물의 노출로 인한 폐암은 대부분 20년 이상의 잠복기를 가지며(Silverstein et al., 1981), 고농도에 장시간 노출 시 유발되는 것으로 알려져 있다(Hamilton & Hardy, 1974). 이러한 이유로 국제 발암연구기구(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 6가 크롬을 인체에 대해서 폐암과 비강 및 부비동암을 증가시키는 충분한 근거가 있다고 판단하여 인체 발암성 확인 물질인 Group 1로 구분하였다(IARC, 2012). 또한 미국 정부 산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서도 6가 크롬이 인간에게 폐암 및 비강암 증가에 대한 충분한 근거가 있다는 점을 감안하여 A1으로 분류하고 있다(ACGIH, 2018). 그리고 우리나라에서도 6가 크롬 화합물을 인체 발암성 확인 물질인 Group 1A로 표기하고 있다(MoEL, 2020).

우리나라는 노동자에게 중대한 건강장해를 유발하여 사회적 물의를 일으킨 6가 크롬 등을 작업장 내 노출수준을 허용기준 이하로 유지하도록 규제성격으로 관리하고 있다. 현재 「산업안전보건법」 상 허용기준은 6가 크롬 화합물의 경우 불용성 0.01 mg/m³, 수용성 0.05 mg/m³이며, 노출기준과 동일하게 설정되어 있다(MoEL, 2020; MoEL, 2023).

그러나 선진외국의 경우 우리나라의 허용기준 및 노출기준과 달리 6가 크롬 화합물을 수용성과 불용성에 대한 독성이 동일하다고 판단하고 있다. 전 세계적으로 6가 크롬에 대하여 가장 강력한 직업적 노출기준은 미국 국립직업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH)의 권장노출기준(Recommended Exposure Limits, RELs)과 ACGIH의 서한도(Threshold Limit Values, TLVs)로 0.0002 mg/m³이다(ACGIH, 2018; NIOSH, 2023). 또한 규제기준인 미국 직업안전보건청(Occupational Safety & Health Administration, OSHA)의 허용노출기준(Permissible Exposure Limits, PELs)도 0.005 mg/m³로 우리나라에 비해 10배 강화된 수준으로 관리하고 있다(OSHA, 2023).

이렇듯 6가 크롬에 대한 인체 발암성과 호흡기 및 피부 감각 우려 증가로 선진외국은 선제적으로 직업적 노출기준을 엄격하게 관리하고 있다. 그러나 우리나라는 2007년 6가 크롬 화합물(불용성)에 대한 노출기준을

0.05 mg/m³에서 0.01 mg/m³으로 강화한 이후 아직까지 그대로 유지하고 있어 선진외국의 노출기준과 비교하여 노출수준을 확인할 필요가 있다. 또한 그동안 6가 크롬 노출 사업장을 대상으로 농도를 파악하는 연구가 일부 진행되었지만 도금사업장을 대상으로 수행한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 도금사업장의 규모, 도금 대상, 월간 사용량 등에 따른 6가 크롬에 대하여 노출농도와 노출수준을 확인하고, 노출농도에 영향을 미치는 요인을 파악하여 향후 도금업종 노동자의 직업병 예방을 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 연구대상

도금사업장에서 발생하는 공기 중 6가 크롬의 노출실태를 파악하기 위하여 2021년 1월부터 2023년 11월 까지 대구·경북 지역 소재 10개소를 대상으로 92개의 시료를 채취하였다. 사업장 규모는 노동자 수 5인 미만 사업장과 5~10인 미만 사업장이 각각 4개소였고, 10인 이상 사업장은 2개소로 조사되었다. 또한 도금 대상은 기계부품 도금이 7개소, 안경테 도금 2개소 및 샤프트 도금 1개소가 있었으며, 도금 대상은 달랐지만 모두 무수크롬산을 이용한 크롬 도금을 실시하고 있었다.

2. 연구방법

1) 공기 중 6가 크롬의 채취

공기 중 6가 크롬 채취방법은 NIOSH 공정시험법 7605를 준용하였으며, 37 mm 카세트홀더에 PVC (Polyvinyl Chloride, diameter 37 mm, pore size 5 μm, SKC) 필터를 장착하고 고용량 펌프(Gilian GilAir3, Sensidyne, USA)를 사용하였다(NIOSH, 2003). 고용량 펌프의 유량은 건식유량보정계(Auto Flowmeter, Bios, USA)를 사용하여 측정 전·후 확인하였고 평균값을 활용하였다.

2) 시료의 분석

6가 크롬의 정량분석을 위하여 NIOSH 공정시험법 7605의 분석방법에 따라 진행하였다(NIOSH, 2003). 전처리가 완료된 시료와 표준물질은 분광 검출기(visible absorbance detection)가 장착된 이온 크로

마토그래피(Ion Chromatography, IC, ICS-1100, Thermo, USA)를 이용하였다.

3) 자료의 분석

조사된 자료들은 MS Excel 2016(Microsoft, USA)에 입력하였고, 통계분석은 SPSS(Version 20.0K, USA) 프로그램을 사용하였다. 공기 중 6가 크롬의 농도는 Sapiro-Wilks의 정규성 검정결과 대수정규분포를 보여 기하평균과 기하표준편차로 표현하였고 결과의 이해를 위하여 산술평균과 표준편차도 포함하여 제시하였다. 불검출 농도는 검출한계(Limit of Detection, LOD)를 $\sqrt{2}$ 로 나누어 산출하였다. 원재료의 크롬 함유량별 공기 중 6가 크롬의 노출농도 비교는 Mann Whitney U-test를 사용하였고, 사업장 규모, 도금 대상, 월간 사용량의 농도 비교는 Kruskal-Wallis test를 이용하였다. 한편, 공기 중 6가 크롬 농도에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 온도, 습도, 도금 대상, 국소배기장치 제어속도 등을 독립변수로 설정하여 다중회귀분석을 실시하였다.

III. 결 과

1. 연구대상의 일반적 특성

1) 채취 시료의 특성

도금사업장 10개소에서 채취한 시료 수는 모두 92개 이었으며, 규모별로는 5~10인 미만인 사업장에서 채취한 시료가 57.6%(53개)로 가장 많았으며, 도금 대상 시료채취 수는 기계부품 도금 73.9%(68개), 안경테 도금 13.0%(12개) 순이었다(Table 1). 또한 원재료의 6가 크롬 함유량 90% 이상에서 채취한 시료 수가 73.9%(68개)이었고, 원재료의 월간 사용량의 경우 10 kg 이상 100 kg 미만이 43.5%(40개)로 가장 많았다.

2) 사업장의 대기환경 등 특성

6가 크롬이 노출되는 도금사업장의 실내온도는 평균 19.5°C이었고, 상대습도는 평균 37.7%로 확인되었다(Table 2). 또한 국소배기장치의 후드 제어풍속은 평균 0.49 m/sec로 조사되었다.

Table 1. General characteristics of the samples

Variables		Number of samples	Percentage(%)
No. of workers	<5	23	25.0
	5-9	53	57.6
	≥10	16	17.4
Plating object	Mechanical part	68	73.9
	Shaft	12	13.0
	Glasses frame	12	13.0
Cr content(%)	<90	24	26.1
	≥90	68	73.9
Monthly Usage(kg)	<10	34	37.0
	10-99	40	43.5
	≥100	18	19.6
Total		92	100.0

Table 2. General characteristics of indoor environmental conditions

Classification	Mean±S.D**	Minimum	Maximum
Temperature(°C)	19.54±3.80	10.90	27.10
Relative humidity(%)	37.72±9.04	22.20	55.20
Capture velocity(m/sec) of LEV*	0.492±0.21	0.22	0.84

*LEV : Local exhaust ventilation

**S.D. : Standard deviation

Table 3. Airborne exposure concentrations of hexavalent chromium by workplace size (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Classification		N*	GM** (GSD†)	Mean±S.D. †	Range	p-value
No. of workers	<5	23	0.062(8.326)	0.771±2.362	0.007~11.084	0.161
	5-9	53	0.046(5.554)	0.170±0.296	0.004~1.287	
	≥10	16	0.068(7.239)	0.641±1.577	0.009~5.004	
Plating object	Mechanical part	68	0.055(6.588)	0.390±1.404	0.004~11.084	0.001
	Shaft	12	0.092(8.277)	0.837±1.795	0.009~5.004	
	Glasses frame	12	0.021(2.795)	0.038±0.052	0.007~0.181	
Ch content(%)	<90	24	0.058(4.423)	0.130±0.141	0.004~0.474	0.062
	≥90	68	0.050(7.203)	0.498±1.586	0.004~11.084	
Monthly usage(kg)	<10	34	0.021(3.147)	0.049±0.084	0.007~0.420	0.001
	10-99	40	0.059(5.702)	0.203±0.329	0.004~1.287	
	≥100	18	0.215(9.639)	1.513±2.859	0.009~11.084	
Total		92	0.052(6.378)	0.402±1.373	0.004~11.084	

*N : Number of samples

**GM : Geometric mean

†GSD : Geometric standard deviation

†S.D. : Standard deviation

2. 일반적 특성에 따른 6가 크롬의 노출농도

도금사업장의 공기 중 6가 크롬의 농도는 기하평균 0.052 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다(Table 3). 규모별로는 10인 이상 사업장의 기하평균이 0.068 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았지만 규모별 농도 차이는 통계적 유의성이 없었다. 또한 도금 대상은 샤프트 도금이 기하평균 0.092 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기계부품 도금(0.055 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 안경테 도금(0.021 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 노출농도가 유의하게 높았다($P<0.01$). 그리고 원재료의 크롬 함유량별 6가 크롬 농도는 유의한 차이가 없었지만, 월간 사용량의 경우 100 kg 이상의 기하평균 농도가 0.215 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 10 kg 미만(0.021 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 10~100 kg 미만(0.059 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 유의하게 높은 수준이었다($P<0.01$).

3. 국내외 직업적 노출기준에 따른 6가 크롬의 노출수준

도금사업장에서 채취한 공기 중 6가 크롬 농도를 일반적 특성별로 국내외 직업적 노출기준과 비교한 수준을 Table 4에 제시하였다. 전체적으로 6가 크롬의 노출농도는 우리나라의 직업적 노출기준과 일본의 직업적 권장노출기준(Recommendation of Occupational Exposure Limit, ROEL)인 0.05 mg/m^3 대비 평균 0.07~3.30% 수준이었다. 그러나 ACGIH의 TLV 및 NIOSH의 REL의 0.0002 mg/m^3 을 적용할 경우 규모

별로 5인 미만 사업장의 노출기준 초과수준은 3.85배, 도금 대상은 샤프트 도금 4.18배, 크롬 함유량 90% 이상 2.49배, 월간 사용량 100 kg 이상에서 7.57배로 높게 확인되었다. 또한 프랑스의 6가 크롬 노출기준(Occupational Exposure Limit Value, OELV) 0.001 mg/m^3 대비 노출농도는 5인 미만 사업장이 77.1%, 샤프트 도금 83.7%, 크롬 함유량 90% 이상 49.8%, 월간 사용량 100 kg 이상이 151.3% 수준으로 나타났다. 한편, 6가 크롬에 대한 미국의 법적기준인 OSHA PEL 핀란드의 LV(Limit Value)는 0.005 mg/m^3 이며 노출수준은 0.76%~30.26%로 확인되었고, 영국의 WEL(Workplace Exposure Limit, WEL)인 0.01 mg/m^3 을 적용할 경우 평균 노출수준은 4.02%로 나타났다.

4. 공기 중 6가 크롬 노출농도에 영향을 미치는 요인

도금사업장에서 발생하는 공기 중 6가 크롬 농도에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위하여 다중회귀분석을 수행한 결과 모형은 통계적으로 유의하였으며 설명력은 34.3%이었다(Table 5). 6가 크롬 농도의 영향 요인으로는 실내온도, 사용량 및 도금작업으로 온도가 높고 월간 사용량이 많으며 샤프트 도금에 해당될수록 농도가 높은 것으로 나타났다.

Table 4. Exposure levels of airborne hexavalent chromium by national occupational exposure limit

Classification	N**	Mean(%)±S.D.					
		KoEL [†] & JSOH ROEL [‡]	ACGIH TLV [§] & NIOSH REL	OSHA PEL [¶] & FIN LV ^{**}	UK WEL [‡]	France OELV [§]	
No. of workers	<5	23	1.54±4.72	385.40±1180.84	15.42±47.23	7.71±23.62	77.08±236.17
	5-9	53	0.34±0.59	85.04±148.25	3.40±5.93	1.70±2.96	17.01±29.65
	≥10	16	1.28±3.15	320.42±788.56	12.82±31.54	6.41±15.77	64.08±157.71
Plating object	Mechanical part	23	0.78±2.81	194.85±702.14	7.79±28.09	3.90±14.04	38.97±140.43
	Shaft	53	1.67±3.59	418.36±897.67	16.73±35.91	8.37±17.95	83.67±179.53
	Glasses frame	16	0.07±0.11	18.99±25.88	0.76±1.04	0.38±0.52	3.80±5.18
Cr content(%)	<90	24	0.26±0.28	64.95±70.71	2.60±2.83	1.30±1.41	12.99±14.14
	≥90	68	1.00±3.17	249.11±793.19	9.96±31.73	4.98±15.86	49.82±158.64
Monthly usage(kg)	<10	34	0.10±0.17	24.34±42.12	0.97±1.68	0.49±0.84	4.87±8.42
	10-99	40	0.40±0.66	101.32±164.46	4.05±6.58	2.03±3.29	20.26±32.89
	≥100	18	3.03±5.72	756.55±1429.57	30.26±57.18	15.13±28.59	151.31±285.91
Total		92	0.80±2.75	201.07±686.36	8.04±27.45	4.02±13.73	40.21±137.27

*Exposure level(%) : (National occupational exposure limits / concentrations of hexavalent chromium) × 100

**N : Number of samples

†KoEL : Ministry of Labour. Korean Occupational Exposure Limits

‡JSOH RoEL: Japan Society for Occupational Health, Recommended Occupational Exposure Limits

§ACGIH TLV : American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Threshold limit values

||NIOSH REL : National Institute for Occupational Safety and Health, Recommended Exposure Limits

¶OSHA PEL : Occupational Safety & Health Administration, Permissible Exposure Limits

**FIN LV : Finland, Limit Values

‡UK WEL : United Kingdom, Workplace Exposure Limits

§France OELV : France, Occupational Exposure Limit Values

Table 5. Factors affecting the concentrations of hexavalent chromium in plating industries

Dependent variable	Independent variable	β	t-value	p-value	Model R-square	
Airborne hexavalent chromium concentration (μg/m ³)	Temperature(°C)	0.300	3.237	0.002*	0.343	
	Relative Humidity(%)	-0.077	-0.749	0.456		
	No. of workers	-0.006	-0.047	0.963		
	Capture velocity(m/sec)	0.068	0.426	0.671		
	Cr content(%)	-0.039	-0.313	0.755		
	Monthly Usage(kg)	1.959	4.621	0.001*		
	Plating object					
	Mechanical part	-0.238	-0.468	0.641		
	Shaft	-7.592	-3.504	0.001*		
	Glasses frame	Reference group				

IV. 고 찰

크롬(Cr)은 원자번호 24, 상대 원자량 51.996이며, -2가부터 +6가까지 산화상태로 존재할 수 있지만 0, +2, +3 그리고, +6가 상태가 흔하다. 이 중 3가와 6가 크롬이 공중보건학적으로 중요하며, 두 산화상태가 인

간을 포함한 살아있는 생물에 미치는 영향과 특성은 상당히 다르다(WHO, 1988). 이 중 6가 크롬은 피부와 점막에 매우 자극성이 있어 피부와 기도에 감각(sensitization)을 유발할 수 있다. 또한 6가 크롬은 심각한 부식성을 갖고 있어 피부궤양(chrome holes), 구강궤양, 비염, 비중격 천공 등이 유발될 수 있다(IPCS,

2013). 그러나 가장 중요한 것은 6가 크롬 화합물이 폐암 및 비강암을 유발하는 발암물질로 확인되었다는 것이다(ATSDR, 1989, 2012; HSE, 1989; IARC, 1990; WHO, 1988, 2013; NIOSH, 2013).

도금공정은 취급하는 화학물질의 종류도 많고 노동자에 대한 유해위험도(hazard potential class)가 높은 것으로도 보고되고 있다(ACGIH, 2011). 우리나라 도금업체 수는 6,385개소에 노동자 수는 65,158명으로 알려져 있다. 특히 도금사업장의 87.5%가 노동자 수 20인 미만이며 대부분 영세성으로 인해 열악한 작업환경에서 근무함에 따라 각종 중금속 중독이 유발될 수 있다(MoEL 2019). 크롬도금 중 6가 크롬은 공기 중으로 발생되며, 다른 도금에 비해 효율성이 낮기 때문에 도금조에서 공기방울이 많이 발생된다. 이때 다량의 미스트가 공기 중으로 방출될 수 있어 위해하다. 크롬도금에서 취급하는 화학물질 중 무수크롬산은 6가 크롬으로 알려져 있으며, 6가 크롬은 3가 크롬에 비해 호흡기 흡수율이 높다(Aitio et al. 1984). 이러한 이유로 우리나라는 크롬 및 그 화합물에 대하여 정기적인 작업환경 측정 의무를 부과하고 관리대상물질로 지정하여 국소배기장치 설치 및 호흡용 보호구 착용도 의무화하고 있다. 또한 6가 크롬 화합물은 별도로 특별관리대상물질로도 지정하여 규제하고 있다(MoEL, 2024).

본 연구에서 도금사업장의 6가 크롬에 대한 노출농도는 기하평균 $0.052 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.004 \sim 11.084 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 우리나라 노출기준을 적용할 경우 초과되는 시료는 없는 것으로 나타났다. 국내 도금사업장에서 발생하는 공기 중 6가 크롬의 노출수준을 확인한 연구로 Paik et al.(1993)은 도금공정 개인시료의 평균농도가 $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.05 \sim 37.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고, Yi et al.(2015)은 개인시료의 평균농도 $2.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.09 \sim 113.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, Bae(2020)는 개인시료의 평균농도 $0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.00 \sim 4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 본 연구결과에 비해 높은 수준으로 발표하였다. 이러한 농도 차이는 사용량, 국소배기시설 등의 영향도 있을 수 있지만 그 동안 6가 크롬에 대하여 환경부가 2021년 제한물질로 규제(2023년 시행)하고 고용노동부도 허용기준 대상물질 및 특별관리물질로 지정하는 등 지속적인 규제정책으로 인한 것으로 추정된다(MoE, 2022). 한편, 외국의 경우 Cohen & Kramkowski(1973)는 6가 크롬 평균농도를 $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제시하였고, Yunisova & Pavlovskaja(1975)는 금속 표면에 크롬 도금 시 작업장 내 공기 중 6가 크롬

농도를 $0.04 \sim 0.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ 범위로 보고하였다. 또한 전기 도금 공장에서 공기 중 크롬산 증기의 농도는 $0.1 \sim 1.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ 로 보고된 바 있다(Gomes, 1972). 이는 외국에서 1970년대 수행된 연구이며 국가별 규제 정책의 차이로 현재 우리나라의 도금사업장에 비해 작업환경에 상당한 열악했기 때문인 것으로 판단된다.

도금사업장에서 6가 크롬의 농도에 영향을 미치는 요인을 확인하기 위하여 다중회귀분석을 실시한 결과 실내환경 특성 변수인 온도와 사업장 특성인 월 사용량 및 도금대상으로 확인되었다. 다만 국소배기장치의 제어속도가 영향요인으로 유의하지 않았는데 이는 Park et al.(1993)이 도금사업장을 대상으로 제어속도를 확인하고 제어속도별 공기 중 6가 크롬 농도는 유의한 차이가 없다는 결과와 유사하였다.

선진외국은 우리나라와 달리 6가 크롬을 불용성과 수용성으로 구분하지 않고 6가 크롬 화합물로 직업적 노출기준을 설정하고 있다. 현재 우리나라의 6가 크롬 화합물(수용성)의 노출기준을 $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$ 로 고시하고 있다(MoEL, 2020). 그러나 미국 NIOSH의 RELs과 ACGIH TLVs는 $0.0002 \text{ mg}/\text{m}^3$ 로 우리나라 노출기준에 비해 250배 강화된 수준이며, 법적 기준인 OSHA PELs도 $0.005 \text{ mg}/\text{m}^3$ 로 10배 강하게 규제하고 있다. 따라서 본 연구의 도금사업장에서 채취한 6가 크롬에 대한 농도는 모두 우리나라 노출기준을 초과하지 않았지만, ACGIH TLVs($0.0002 \text{ mg}/\text{m}^3$)를 적용할 경우 초과수준이 평균 2배이고, 특히 월간 사용량이 100 kg 이상인 경우 약 7.56배 초과하는 것으로 확인되었다. ACGIH의 경우 6가 크롬 화합물에 대한 노출기준 설정 근거를 호흡기 감작을 최소화하고 이미 감작된 개인의 경우 천식 반응의 가능성을 줄여야 하지만 지속적으로 심각한 반응이 발생할 수 있다는 것을 감안하였다(ACGIH, 2018). 또한 공기 중 노출 수준이 낮은 경우에도 피부 접촉과 그로 인한 감작 위험을 방지하기 위해 적절한 관리가 필수적이라고 제언하고 있다. 한편, 영국의 WELs(Workplace Exposure Limits, WELs)의 6가 크롬 노출기준은 $0.01 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이며, 프랑스의 직업적 노출기준치(Occupational Exposure Limit Values, OELVs)도 $0.001 \text{ mg}/\text{m}^3$ 로 설정되어 있다(Raymond, 2015; HSE, 2023). 따라서 우리나라의 6가 크롬에 대한 노출기준은 개정될 필요가 있으며, 호흡기 및 피부 감작에 대한 표기도 필요하다.

제한점으로 연구대상이 대구·경북 지역에 소재한

도금사업장으로 한정되어 우리나라 전체로 확대 해석하기에는 다소 무리가 있다. 또한 Yi et al.(2015)은 6가 크롬 농도에 영향을 줄 수 있는 도금작업뿐만 아니라 연마 및 다른 작업의 수행 여부와 크롬의 산화상태를 고려해야 한다고 제언한 바 있지만 이러한 점을 감안하지 못해 작업환경에 대한 노출평가에 대한 해석도 한계성을 지닌다. 향후 총크롬 농도와 6가 크롬의 농도 비교 분석이 필요하며, 정확한 평가를 위해서는 해당 업무와 크롬의 산화환원상태를 고려할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 도금사업장 10개소를 대상으로 공기 중 6가 크롬의 노출농도와 국내의 직업적 노출기준 대비 노출수준을 확인하였고, 6가 크롬 농도에 영향요인을 파악하였다. 그 결과 도금사업장 6가 크롬 농도의 기하평균은 $0.052 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 규모별로는 5인 미만 및 10인 이상 사업장, 도금 대상은 샤프트도금, 원재료 내 크롬 함유량 90% 미만, 원재료 사용량이 많을수록 높은 수준이었다. 또한 우리나라 노출기준 적용 시 노출수준이 평균 0.8배로 확인되었지만 미국 ACGIH의 노출기준을 적용하면 평균 2배 이상의 농도에 노출되고 있는 것으로 조사되었다. 그리고 도금사업장 6가 크롬 농도의 영향요인은 온도, 월 사용량, 도금 대상으로 나타났다.

따라서 5인 미만 사업장, 샤프트 도금작업은 국소배기 장치 제어속도 대한 법적기준을 준수하고 호흡용 보호구를 반드시 착용할 필요가 있다. 또한 6가 크롬 농도의 저감대책으로 작업장 온도는 가급적 낮게 유지시키고 사용량을 줄일 수 있는 다양한 노력도 요구된다. 특히 6가 크롬에 대한 국내 직업적 노출기준은 선진외국과 현저한 차이를 보여 우리나라 노출기준은 사회경제성 평가를 통해 강화여부를 고려할 필요가 있고, 호흡기 및 피부감작에 대한 표기도 병행되어야 할 것이다.

References

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Documentation of chromium and inorganic compounds, 7th Edition. Cincinnati, OH; 2011. p. 19
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Documentation of TLVs. Chromium and inorganic compounds. Cincinnati (OH); 2018. 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); 2020. p. 1-3
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for chromium. US Public Health Service, Atlanta, GA. 1989. p. 2
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for chromium. US Dept of Health and Human Services, Atlanta, GA. 2012.p. 7
- Aitio A, Jarvisalo J, Kiilunen M, Tossavainern A, Vaittinen P. Urinary excretion of chromium as an indicator of exposure to trivalent chromium sulphate in leather tanning. *Int Arch Occup Environ Health* 1984;54: 241-249
- Bae CS. Evaluation of exposure characteristics of hazardous factors using employee exposure assessment database of plating processes. Graduate school of Youngnam University. GyoungBuk; Youngnam University Press. 2020. p. 14-17
- Baetijer AM. Pulmonary carcinoma in chromate worker, *Arch Ind Hyg Occup Med* 1950;2:505
- Meyers JB. Acute pulmonary complication following inhalation of chromic acid mist. *Arch Ind Hyg* 1950;2:742
- Cohen SR, Kramkowski RS. Health hazard evaluation determination report, NIOSH Pub. No. 72-118-104. Cincinnati: NIOSH; 1973. p. 1
- Gomes ER. Incidence of chromium-induced lesions among electroplating workers in Brazil. *Ind Med* 1972; 41(12): 21-25
- Hamilton A, Hardy AH. *Industrial toxicology*, 3rd ed., Publishing sciences group Inc; 1974. p. 1-3
- Health and Safety Executive(HSE). Toxicity review 21: The toxicity of chromium and inorganic chromium compounds. HSE, London, UK; 1989. p. 11
- Health and Safety Executive(HSE). EH40/2005 Workplace exposure limits. p. 9 [Accessed 6 August 2023] Available from: <https://www.hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf>
- International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Volume 49, Chromium, nickel and welding. IARC, Lyon, France; 1990 p. 2-4

- International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Volume 100c, Chromium(VI) compounds. IARC, Lyon, France; 2012 p. 1-6
- International Program on Chemical Safety(IPCS). Inorganic chromium(VI) compounds. concise international technical assessment document 78. World Health Organization, Geneva, Switzerland; 2013. p. 7-8
- Jung GC. Industrial Poisoning Handbook, 1995. Sin-gwang Press; 1995. p. 228-230
- Krebs RE. The history and use of our earths chemical elements: A reference guide, 2nd ed, p 96. Green wood publishing group, Santa Barbara, CA; 2006. p. 13
- Lee BK, Shin YC. Comparison of sampling filters for airborne hexavalent chromium in plating operation. Kor J Env Hlth 2003;29(2):69-76
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). 2017 Industrial accident. Ministry of Employment and Labor; 2019. p. 24-36
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Exposure limits for chemical substances and physical agents(MoEL Public Notice No. 2020-48).; 2020. p. 56
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Industrial Safety Health Act Enforcement. Ministry of Employment and Labor; 2023. p. 24
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Industrial safety & health regulations. Ministry of Employment and Labor; 2024. p. 24
- Ministry of Environment(MoE). Designation of prohibited & restricted substances(MoE Public Notice No. 2022-248); 2022. p. 5-6
- Park DU, Park DY, Shin YC, Oh SM, Chung KC. Evaluation on the efficiencies of local exhaust system and airborne concentrations of total chromium, hexavalent chromium and nickel in some electroplating plants. Korean Soc Occup Environ Hyg 1993;3(1):68-77
- Paik NW, Jung MS, Lee HK, Yun CS, Jun HK et al. A Study on worker exposure to chromium and degreasing solvent at electroplating operation in small industry in Korea. J Korean Soc Occup Environ Hyg 1993;3(1):110-126
- Park JG, Roh JH, Lee KJ, Moon YH. Health hazards of plating worker. Kor J of Occup Med 1989;1(2): 218-227
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Chromium, hexavalent 7605 by Ion chromatography. In manual of analytical methods, 4th ed, NIOSH, 2003. p. 1-4
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH pocket guide to chemical hazards. [Accessed 6 September 2023] Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/>
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Criteria for a recommended standard: occupational exposure to hexavalent chromium. DHHS(NIOSH) Publication No 2013 128, NIOSH, Cincinnati, OH; 2013. p. 26
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH pocket guide to chemical hazards. [Accessed 6 August 2023] Available from <https://www.cdc.gov/niosh>
- Occupational Safety & Health Administration(OSHA). Permissible exposure limits/OSHA annotated table Z-1. [Accessed 6 January 2024] Available from <https://www.osha.gov/annotated-pels/table-z-1>
- Princi F, Miller LE, Davis A, Cholak J. Pulmonary disease in workers exposed to ferrochrome alloys. J Occup Med 1962;4:301
- Raymond V, Martine G, Pierre G, Christine G, Catherine HL et al. Occupational exposure to chrome VI compounds in French companies: results of a national campaign to measure exposure(2010-2013). Ann Occup Hyg 2015;59(1):41-51
- Silverstein M, Mirer F, Kotelchuck D, Silverstein B, Bennet M. Mortality among workers in a die-casting and electroplating plant, Scand j work environ health 1981;suppl 4:156-165
- World Health Organization(WHO). International programme on chemical safety(IPCS). environmental health criteria 61. chromium. World Health Organization Press.; 1988. p. 23-26
- Yi GY, Kim B, Shin YC. Worker exposure assessment on airborne total chromium and hexavalent chromium by process in electroplating factories. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2015;25(1):89-94
- Yunisova HK, pavlovskaja GS. The effect of regimen of chrome plating on the properties of chromine. Protect Metal 1975;2:248-250

<저자정보>

안지현(연구원), 피영규(교수)