

중소기업 도금공정에서의 6가 크롬 폭로에 관한 연구

서울대학교 보건대학원

정 회 경 · 백 남 원

— Abstract —

A Study on Worker Exposure to Hexavalent Chromium in Plating Operation

Hoe Kyeong Cheong and Nam Won Paik

School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

This study was performed at eleven small-sized plating factories located in Seoul, Incheon, Ansan, and Taejeon from July 21 to October 6, 1992. The major objectives of this study were to evaluate worker exposure to hexavalent chromium and local exhaust ventilation (L.E.V.) systems at the chromium plating operations. The most suitable L.E.V. systems for chromium plating tanks were designed as examples for recommendation to the industry. The results are summarized as follows.

The range of chromium plating operations investigated included decorative, hard, and black chromium plating on several kinds of parts. Most of plating tanks were not equipped with proper control methods against emission of hexavalent chromium mists and workers were not wearing appropriate personal protectives.

The airborne hexavalent chromium concentrations showed an approximate lognormal distribution. The geometric means of both personal and area samples were within the Korean and ACGIH standards, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. However, in comparison with the NIOSH criterion, $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, the geometric means of personal samples at two factories and the geometric means of area samples at two factories exceeded it. The geometric means of personal and area samples of high exposure groups (above the NIOSH criterion) were 7 and 27 times higher than those of low exposure groups (below the NIOSH criterion), respectively. The L.E.V. systems of high exposure groups were improperly designed, and the factory with the highest exposure level had no L.E.V. systems at all on chemical etching process. Whereas at factories of low exposure groups, mist control methods such as mist suppressants, tank cover, and/or auxiliary L.E.V. systems were added to L.E.V. systems.

The evaluation of L.E.V. systems showed that there was no chromium plating opera-

tion satisfying the ACGIH criteria for capture velocity, slot velocity, and exhaust rate simultaneously. To increase performance of L.E.V. systems, it must be designed to minimize the impact of boundary layer separation. Push-pull ventilation hood and downward plenum ventilation hood were suggested for the Korean industry.

Key Words: Hexavalent Chromium, Chromium Plating Operation, Lognormal Distribution, Local Exhaust Ventilation System, Boundary Layer Separation, Push-Pull Ventilation, Downward Plenum Ventilation.

I. 서 론

도금사업장에서는 크롬도금, 동도금, 아연도금, 니켈도금, 주석도금, 금도금 및 은도금 등 많은 종류의 도금을 하고 있으며, 6가 크롬화합물, 니켈 및 구리 등의 각종 중금속과 염산, 황산 및 초산 등의 산류, 수산화나트륨, 수산화칼륨 등의 알칼리류, 시안화칼륨, 시안화나트륨 등의 시안화합물, 탈지 및 세척제로 트리클로로에틸렌, 1-1-1-트리클로로에탄 등의 각종 유해물질을 다량으로 사용하기 때문에 작업환경이 매우 열악한 상태에 놓여 있다(Cralley와 Cralley, 1989, 한국산업안전공단, 1991). 1992년 현재 상공부에 등록된 우리나라의 도금사업장은 516개소에 총 종업원수가 8,639명이고, 사업장 규모별로 보면 50인 이하 사업장이 500개소(99.9%), 50인 이상 사업장이 16개소(3.1%)이다(대한상공회의소, 1992). 즉 대부분의 도금사업장이 영세하고 작업장이 협소한 중소기업이다. 따라서 도금사업장에서 사용하는 각종 유해물질에 폭로된 근로자들의 건강이 문제가 되고 있는 실정이다.

특히 이들 유해물질중에서 크롬도금에 사용되는 무수크롬산 형태인 6가 크롬은 강력한 부식작용과 산화작용을 갖고 있어 작업자가 폭로되면 피부궤양, 급성 피부염, 알러지성 습진성 피부염, 점막궤양, 비중격천공, 알러지성 천식반응 및 신장장애 등을 유발하는 물질이다. 또한 호흡기를 통한 만성적인 폭로는 폐암을 일으키는 것으로 알려져 있다(Rinehar와 Gad, 1986; Langard, 1990; 조규상, 1991).

도금작업을 할 때 크롬도금탱크에 공급되는 음극전류(cathode current)의 효율이 약 20% 밖에

안되어 대부분의 에너지가 물의 전기분해를 통하여 도금액 구성물질을 미스트 형태로써 작업환경중으로 방출하는데 쓰인다. 따라서 크롬도금 작업자가 6가 크롬에 대한 직업적 폭로는 크롬도금 작업시에 크롬도금탱크에서 비산된 크롬 미스트 형태로써 주로 호흡기를 통해 이루어지며 노출된 피부를 통해서도 흡수된다(NIOSH, 1984; Cralley와 Cralley, 1989).

1990년도 우리나라 근로자의 특수건강진단 결과를 보면 직업병 유소견자가 총 7,680명(유소견율 1.16%)으로 진폐 3,949명, 소음성난청 3,510명, 납중독 117명, 크롬중독 74명 및 기타 30명 순으로 나타났다. 도금업에서는 463개 대상사업장에서 5,228명의 수검자중에 직업병 유소견자가 70명(유소견율 1.28%)이고 크롬중독 53명, 소음성난청 14명 및 진폐 3명 순이었다(대한산업보건협회, 1990). 1991년도에는 직업병 유소견자가 총 7,152명(유소견율 1.07%)으로 소음성난청 3,982명, 진폐 3,028명, 크롬중독 63명, 납중독 41명 및 기타 38명이었다. 도금업에서는 575개 대상사업장에서 5,380명의 수검자중에 직업병 유소견자가 63명(유소견율 1.19%)이고 크롬중독이 53명, 소음성난청 9명 및 진폐 2명으로 나타났다(대한산업보건협회, 1991). 따라서 도금업에서 나타난 크롬중독이 90년도에 전체 크롬중독 74명중 53명(71.6%), 91년도에 63명중 53명(84.1%)으로 대부분을 차지하고 있다.

우리나라 노동부와 미국정부산업위생전문가협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)는 작업환경중 6가 크롬에 대한 허용기준을 0.05 mg/m^3 ($50 \mu\text{g/m}^3$)으로 정하고 있으며, 6가 크롬 불용성 화합물에 대해서는 인체 발암성물질인 'A1'으로 규정하고 있

다(노동부, 1991; ACGIH, 1992). 또한 미국국립 산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)에서는 1975년 이후로 불용성 6가 크롬화합물에 대한 작업환경 허용기준을 0.001 mg/m^3 ($1 \mu\text{g/m}^3$)로 권고하고(NIOSH, 1975; ACGIH, 1986) 있어, 6가 크롬을 취급하는 도금사업장 및 취급 근로자에 대한 엄격한 관리를 하여야 한다.

그러나 우리나라 도금사업장에 대한 정확한 작업환경측정 자료가 부족하며 6가 크롬에 대한 작업환경평가는 없는 실정이다. 1990년에 최 등은 직업병 연구소에서 수행한 도금업 근로자의 혈청 중 중금속농도 연구에서 총크롬과 니켈에 대한 작업환경 폭로농도 및 혈청중 농도를 평가하였다(최호준과 김해정, 1990). 이 연구에서도 인체 발암성 물질인 6가 크롬에 대한 작업환경 평가는 이루어지지 않았다.

그러므로 크롬도금공정에서 사용하는 6가 크롬에 대한 정확한 작업환경 평가를 통해서 크롬도금공정의 6가 크롬 폭로실태를 파악하고 이를 통한 크롬도금공정의 작업환경 개선대책 수립이 요망된다.

본 연구의 목적은 중소기업 크롬도금 공정에서 6가 크롬 폭로에 대한 작업환경 조사연구를 통해 크롬도금공정의 6가 크롬 폭로를 관리하기 위한 기초 자료를 제공하는 데 있다. 따라서 본 연구의 구체적 목적은 아래와 같다.

- (1) 50인 이하의 도금사업장을 대상으로 크롬도금공정의 공기중 6가 크롬 농도를 측정하여 크롬도금 작업자의 폭로실태를 평가한다.
- (2) 크롬도금 공정의 6가 크롬 농도와 크롬도금 작업자의 폭로에 영향을 미치는 작업환경 요인들을 분석한다.
- (3) 크롬도금 탱크의 국소배기시설을 평가하고 공학적인 작업환경 개선을 위한 가장 적절한 국소배기시설을 제시한다.

II. 대상 및 방법

1. 대상

본 연구에서는 1992년 7월 21일부터 10월 6일까

지 서울, 인천, 안산 및 대전 지역에 위치한 50인 이하의 중소기업 도금사업장 11개소의 크롬도금 공정을 대상으로 하였다. 이들 사업장의 크롬도금 공정에서는 여러가지 기계부속품과 장식품에 크롬도금 작업과 도금 전처리, 수세 및 도금 후처리작업을 하고 있었다.

2. 방법

(1) 시료채취

본 연구에서 시료채취와 분석은 NIOSH 공정시험법 7600 방법(NIOSH, 1984)을 따라 진행하였다. 개인시료는 $5 \mu\text{m}$ pore size PVC 막여과지(Nuclepore, No. 36180, USA)에 시료채취 전후에 비누거품으로 유량을 보정한 고유량 개인용 시료채취펌프(HFS, Gilian, USA)를 연결하여 1-4 Lpm으로 크롬도금 작업자 전원에 대해 8시간의 작업시간 동안 작업자의 호흡위치에서 채취하였다. 장소시료는 크롬도금탱크 주위와 작업통로 및 도금전처리 작업대에서 개인시료와 같은 조건으로 채취하였다. 또한 현장 공시료(blank)를 단위 크롬도금 공정당 2개 이상 채취하였다. 시료채취 직후에 시료포집 카세트에서 플라스틱 핀셋으로 PVC 막여과지를 꺼내어 20ml 병에 넣고 테프론 필름으로 봉한후 냉장보관하여 실험실로 옮겼으며 시료는 냉동보관하면서 2주 이내에 분석하였다.

(2) 시료분석

각 시료병에 0.5 N 황산용액을 일정량 넣어 6가 크롬을 추출한 후에 diphenylcarbazide 용액을 첨가하여 CrO_4^{2-} -diphenylcarbazide 착염을 형성시켜 발색시킨 다음 분광광도계(UV-Visible spectrophotometer, Gilford, USA)로 540nm 파장에서 흡광도를 측정하여 분석하였다. 5개 농도의 6가 크롬 표준액을 만들어 분석하여 검량선을 작성하고 회수율과 공시료로 보정하여 정량하였다.

(3) 국소배기시설 평가

크롬도금탱크의 규격과 여기에 설치되어 있는 국소배기시설의 형태와 크기를 측정하였고, 국소배기시설의 성능은 Velometer(ALNOR, USA)를 사용하여 후드의 제어속도와 slot 입구에서의 slot 속도를 측정하였으며, 도금탱크의 단위 표면적당

배기유량을 산출하였다. 국소배기시설이 없는 사업장과 국소배기시설이 있으나 고장난 상태로 작동하지 않는 사업장 및 국소배기시설 설치 구조상 측정이 불가능한 사업장은 측정하지 않았다. 또한 크롬도금탱크에 설치된 국소배기시설과 도금작업자의 작업위치, 후드로 유입되는 기류의 방향을 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 도금 사업장의 특성

(1) 크롬도금공정의 일반현황

연구 대상 크롬도금공정은 표 1에서 보는 바와 같이 50인 이하의 중소도금사업장으로서 8개 사업장은 시계줄, 각종 금속부품 및 플라스틱부품에 장식크롬도금을 하는 공정이었으며, 3개 사업장은 자동차 엔진밸브와 자동차 피스톤링에 공업용 경질크롬도금작업을 하는 공정으로 모든 크롬도금공정이 전기도금방법을 사용하고 있었다. D사업장의 크롬도금공정에서는 장식크롬도금과 흑크롬도금(금속부품의 표면에 반사가 없는 흑크롬 피막을 입히는 도금) 작업을 동시에 하고 있었으며 크롬도금 후에 도금된 크롬을 0.5-1 μm 정

도로 깎아 내는 화학연마작업도 하고 있었다.

사업장의 규모에 상관없이 크롬도금탱크는 1-3개, 크롬도금작업자는 1-4인으로 이들은 도금 전처리작업, 크롬도금작업, 수세 및 도금 후처리 작업을 연속적으로 하였다. 도금작업은 대부분 도금작업자가 직접 도금 부품을 도금탱크에 넣어 도금하는 수동도금작업이었으며, F사업장은 전도금공정이 자동화되어 있어 도금작업자는 도금 전후에 컨베이어에서 도금 부품을 걸고 떼어내는 작업을 주로 하였다. A와 B사업장은 작업공정에 따라 일주일에 3-4일 정도 부정기적으로 크롬도금을 하며 나머지 사업장은 계속해서 도금작업을 하는 상태였다. 측정당시에는 A사업장과 G사업장의 제 2공정은 크롬도금작업이 없었고 J사업장은 오전에만 도금작업을 하였다.

크롬도금작업시에는 항상 미스트 방지용 호흡마스크를 착용하여 호흡기를 통한 폭로를 방지하고, 고무장갑, 장화, 고무앞치마를 착용하여 크롬액에 피부가 노출되지 않도록 하여야 하나 실제 작업장에서 4가지 모두를 착용하고 작업하는 곳은 K사업장 한 곳 뿐이었다. K 및 J사업장을 제외한 나머지 사업장은 가장 중요한 호흡마스크를 착용하지 않고 장갑과 장화만을 착용하고

Table 1. General Status of Chromium Plating Operation by Plants

Plant	No.of Worker (Plater)	No.of Plating Tank	Plating Type	Plating Materials	Personal Protectives
A	23(1)	1	Decorative Plating	Watch Case & Band	None
B	50(1)	1	"	Metal Parts	Gloves, Footwear
C	5(1)	1	"	"	Gloves, Footwear Apron
D	15(4)	2	Black Chromium & Decorative Plating	"	Gloves, Footwear
E	5(2)	1	Decorative Plating	Plastice Parts	Gloves, Footwear Apron
F*	30(4)	1	"	Metal Parts	Gloves, Footwear
G	46(2)	2	"	"	Gloves, Footwear Aporn
H	12(4)	2	Hard Chromium	Automobile Engine Valve	Gloves
I	25(2)	3	"	Automobile Piston Ring	Gloves, Footwear Apron
J	6(3)	3	"	Automobile Engine Valve	Cotton Mask Gloves, Footwear
K	30(1)	1	Decorative Plating	Metal Parts	Mist Mask, Aporn Gloves, Footwear

* Automated Plating Operation Plant

있었다.

(2) 크롬도금탱크 및 도금작업조건

각 사업장의 크롬도금공정에 있는 크롬도금탱크는 Open Surface Tank 였으며 그 크기 및 도금작업조건은 표 2와 같다. 크롬 미스트의 발생원인 크롬도금탱크의 표면적은 0.41-2.52m²로 크롬도금탱크에 따라 차이가 났다.

크롬도금액의 일반적인 성분조성은 크롬산-황산으로 무수크롬산 250 g/L의 농도를 사용하여 무수크롬산 대 황산을 99:1의 비율로 함유하는 것이 표준조성인데, 각 도금공정에서는 무수크롬산 180-400 g/L의 농도로 사용하고 있었다.

도금할 금속부품에 흘러주는 음극전류는 200-10,000 A로 도금형태 및 도금종류에 따라 큰 차이가 있었다. 도금탱크의 온도는 30-75°C였으며, 도금부하량(음극전류×도금시간: Ampere×Hour)은 도금작업이 없었던 A사업장과 G사업장의 제 2공정을 제외하고 972-36,000 Ampere×Hour로 음극전류에 따라 각 사업장의 도금공정별로 차이가 있었다.

크롬도금탱크에서 도금작업시에 작업환경중에

서 비산하는 크롬 미스트를 감소시키는 방법은 국소배기시설 이외에도 미스트 억제제(표면장력을 감소시켜 미스트 형성을 억제), 부유 플라스틱 불(도금액의 표면적을 증가시켜 미스트 형성을 억제), 탱크덮개(도금액 표면에서 발생한 크롬 미스트를 차단) 등이 있는데(NIOSH, 1984; Cralley와 Cralley, 1989) 세 가지 방법을 모두 사용하는 도금공정은 한 곳도 없었다. D사업장의 장식 크롬도금공정과 C, E 및 G사업장이 미스트 억제제를 사용하고 있었으며, A, I, J사업장이 도금작업시에 완전한 탱크덮개를 하였고, B, H사업장은 도금탱크를 반만 덮고 작업하였다. D사업장의 후 크롬도금공정과 F, K사업장은 위의 세 가지 미스트 감소방법을 한 가지도 사용하지 않았다. 그러나 D사업장을 제외하고 F사업장은 도금공정이 자동화 되어 있어 도금작업자들은 도금탱크에 거의 접근하지 않았고, K사업장은 도금탱크에 보조 국소배기시설을 설치하여 작업하고 있었다.

2. 크롬도금공정의 공기중 6가 크롬의 폭로농도 분포 및 평가

일반적으로 작업환경중 유해물질의 농도분포는

Table 2. Chromium Plating Tank and Plating Conditions by Plants

Plant	Tank Surface Area(m ²)	Chromic Acid Ratio (g/L)	Cathode Current (A)	Plating Load (AxH)	Temperature (°C)	Mist Control Methods
A	0.52	240	250	—	52	Full Cover
B	1.33	180	765	5,100	55-57	Half Cover
C	0.48	250	200	972	45-5	Mist Suppressants
D	Black Dr.					
	1.37	400	750-800	9,688	<30	None
	Decorative Cr					
	0.71	250-300	500	4,000	45-50	Mist Suppressants
E	0.41	200	300-400	2,042	15-29	"
F	2.52	240	6,000-10,000	36,000	45-50	None
G	Plating:1					
	1.28	200-22	600	4,800	50-55	Mist Suppressants
	PLating:2					
	0.67	"	200	—	"	"
H	2.00	250	1,300-1,500	11,260	60	Half Cover
I	0.96	250	510	3,060	55	Full Cover
J	0.44	250-300	2,800-3,200	9,000	70-75	Full Cover
K	1.40	200	600-800	5,600	45-50	None

* Plating Load; Cathode current x Plating time (Ampere x Hour)

정규분포보다는 대수정규분포(lognormal distribution)를 하는 것으로 알려져 있다(ACGIH, 1989). 그림 1은 연구대상 도금공정전체의 개인시료와 장소시료의 6가 크롬 농도를 대수누적분포로 나타낸 것이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서도 6가 크롬의 농도분포가 근사적으로 대수정규분포를 하고 있음을 알 수 있다.

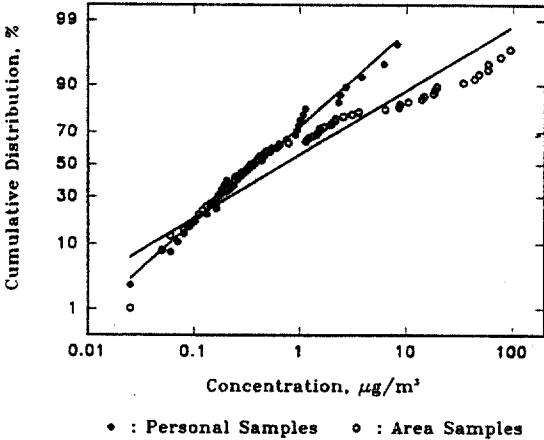


Fig. 1. Cumulative Distribution of Cr(IV) Concentrations by Type of Samples.

따라서 각 공정별 개인시료와 장소시료의 6가 크롬 평균농도 및 표준편차를 기하평균과 기하표준편차로 구하여 평가하였고, 각각의 농도값은 작업시간 동안의 실측 시간가중평균치(Time-Weighted Average, TWA)로 나타내었다.

그림 1에 나타낸 개인시료와 장소시료의 누적분포를 6가 크롬 농도(C)의 대수정규확률분포함수로 표현하면 아래와 같다.

개인시료 : 기하평균(Geometric Mean, GM) = $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$

기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD) = 4.59

$$f(C) = 1/(\log_{10} 4.59 \sqrt{2\pi}) \text{Exp}(\log_{10} C - \log_{10} 0.45)^2 / (\log_{10}^2 4.59)$$

장소시료 : 기하평균(Geometric Mean, GM) = $0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$

기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD) = 9.32

$$f(C) = 1/(\log_{10} 9.32 \sqrt{2\pi}) \text{Exp}(\log_{10} C - \log_{10} 0.70)^2 / (\log_{10}^2 9.32)$$

위에서 보면 개인시료와 장소시료의 기하평균은 큰 차이가 없으나 장소시료의 기하표준편차가 약 2배 정도로 개인시료보다 장소시료의 분포범위가 매우 넓은 것으로 나타났다. 왜냐하면 개인시료는 크롬도금 작업자가 도금전처리, 크롬도금 및 도금후처리작업 등 작업공정에 따라 탱크주위와 도금전처리 작업대 등으로 이동하는 상태에서 채취되었으나 장소시료는 6가 크롬 농도가 높은 크롬도금탱크 주위, 작업통로 및 6가 크롬 농도가 낮은 도금전처리 작업대에서 고정된 상태로 채취되었기 때문에 각 사업별로 장소시료의 6가 크롬 농도의 분포차이가 개인시료보다 크게 나타났다.

각 사업장별로 측정한 개인시료와 장소시료의 6가 크롬 농도 분포는 표 3, 4와 그림 2, 3에서 보는 바와 같다.

표 3과 4에 나타난 것처럼 개인시료의 전체 평균농도는 $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 범위 $<0.05 - 37.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고, 장소시료의 전체 평균농도는 $0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 범위 $<0.05 - 153.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 따라서 전체 평균농도는 우리나라 노동부와 ACGIH의 작업환경허용기준농도 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하지 않았다. 그러나 장소시료의 6가 크롬의 농도 범위가 매우 넓어 D와 H사업장에서의 허용기준 농도에 근접한 농도를 보이거나 초과하는 시료도 있었다.

그러나 6가 크롬에 대한 엄격한 기준인 NIOSH의 허용기준 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비교할 때는 그림 2와 3에서 나타난 것처럼, D, E사업장의 개인시료 평균농도가 각각 $2.40, 2.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 초과하였으며, D, H사업장의 장소시료 평균농도가 각각 $18.50, 1.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 초과하는 상태였다.

표 5는 개인시료와 장소시료중에서 노동부 허용기준 및 NIOSH 기준을 초과하는 시료수를 각 사업장별로 나타낸 것이다. 개인시료는 총 38개로 노동부 허용기준을 초과하는 시료는 없었으나 NIOSH 기준을 초과하는 시료가 10(26.3%)개였다.

사업장별로는 D사업장이 6개(15.8%)로 가장 많았고, E사업장이 2개(5.3%), H사업장이 2개(5.3%)씩이었다. 장소시료는 총 96개로 D사업장

Table 3. Hexavalent Chromium Concentrations by Plants : Personal Samples

Plant	No. of Sample	Cr(IV) Concentrations, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		GSD**
		GM*	Range***	
A	—	—	—	—
B	3	0.39	0.31-0.45	1.23
C	6	0.17	<0.05-0.73	3.12
D	8	2.40	0.09-37.4	5.47
E	2	2.94	1.06-8.13	4.22
F	2	0.18	0.16-0.20	1.17
G	1	0.53	—	—
H	6	0.50	0.16-1.12	2.37
I	3	0.19	0.16-0.27	1.33
J	3	0.27	0.06-0.94	4.01
K	4	0.11	<0.05-0.24	2.06
Overall	38	0.45	<0.05-37.4	4.59

* GM : Geometric Mean

** GSD : Geometric Standard Deviation

*** <0.05: Cr(IV)concentration lower than the limit of detection

Table 4. Hexavalent Chromium Concentrations by Plants : Area Samples

Plant	No. of Sample	Cr(IV) Concentrations, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		GSD**
		GM*	Range***	
A	16	0.32	<0.05-1.52	2.77
B	9	0.36	0.11-1.20	2.41
C	5	0.49	0.33-1.16	1.65
D	21	18.50	1.44-153.0	4.41
E	5	0.81	0.20-3.51	3.35
F	5	0.14	0.05-0.24	1.89
G	7	0.09	0.05-0.16	1.50
H	12	1.11	0.10-47.4	6.41
I	7	0.13	0.05-1.92	3.58
J	6	0.10	<0.05-0.29	2.20
K	3	<0.05	<0.05	—
Overall	96	0.70	<0.05-153.0	9.32

의 시료 7개(7.3%)가 노동부 허용기준을 초과하였으며, NIOSH 기준을 초과하는 시료는 35개(36.5%)로 D사업장이 21개(21.9%), E사업장 2개(2.1%), H사업장 6개(6.3%) 등이었다.

따라서 11개 사업장중에서 D사업장의 6가 크롬 폭로수준이 개인시료의 평균농도 $2.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위, $0.09-37.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 장소시료의 평균농도 $18.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $1.44-153.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 가장 높았으며, E사업장이 개인시료의 평균농도 $2.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $1.06-8.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 장소시료의 평균농도 $0.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $0.20-3.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었

고, H사업장이 개인시료의 평균농도 $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $1.16-1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 장소시료의 평균농도 $1.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $1.10-47.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 NIOSH 기준보다 높은 폭로수준을 보였다.

이들 사업장을 살펴보면 D사업장은 흑크롬도금, 장식크롬도금 및 화학연마작업을 연속적으로 하였는데 장식크롬도금탱크에만 미스트 억제제를 약간 사용하고 있었으며 다른 미스트 감소방법은 사용하지 않았다. 각각의 도금탱크에 국소배기시설이 설치되어 있었으나 부적절한 상태였고, 특히 화학연마공정에서는 황색의 크롬 미스트가 심

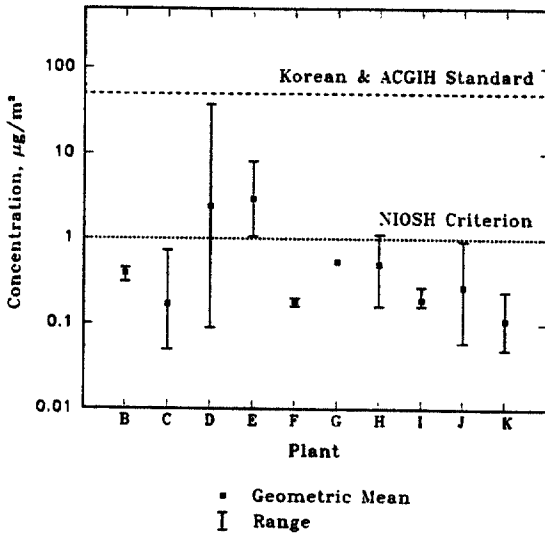


Fig. 2. Cr(IV) Concentrations by Plant: Personal Samples.

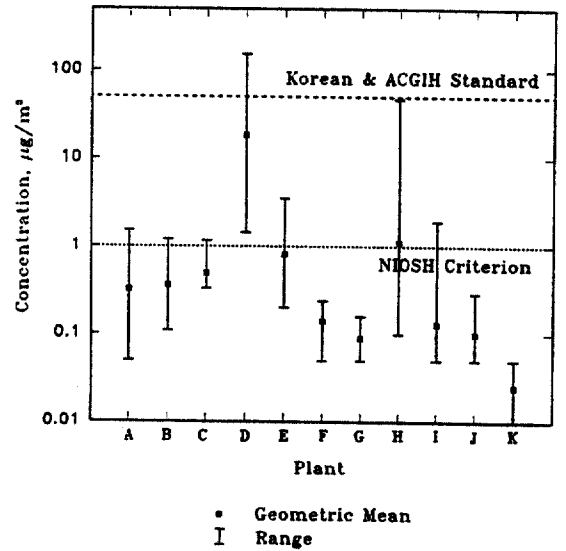


Fig. 3. Cr(IV) Concentrations by Plant: Area Samples.

Table 5. Distribution of Cr(IV) Concentrations Classified by the Korean Standard ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and the NIOSH Criterion ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Plant	Personal Samples				Area Sample			
	Total No.	<1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 < $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Total No.	<1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 < $\mu\text{g}/\text{m}^3$
A	—	—	—	—	16	13	3	—
B	3	3	—	—	9	8	1	—
C	6	6	—	—	5	4	1	—
D	8	2	6	—	21	—	14	7
E	2	—	2	—	5	3	2	—
F	2	2	—	—	5	5	—	—
G	1	1	—	—	7	7	—	—
H	6	4	2	—	12	6	6	—
I	3	3	—	—	7	6	1	—
J	3	3	—	—	6	6	—	—
K	4	4	—	—	3	3	—	—
Total No.	38	28	10	—	96	61	28	7

하게 발생하였는데 여기에는 국소배기시설이 설치되어 있지 않아 도금공정 내부 전체가 심하게 오염되어 있는 상태였다. E사업장은 크롬도금 탱크에 설치된 국소배기시설이 고장나 작동이 안되는 상태에서 미스트 억제제만 사용하고 있었다. H사업장은 도금작업장 중앙에 도금액 제조통이 열려진 채로 노출되어 있었고, 도금작업장 바닥 전체가 크롬도금액으로 젖어 있는 상태였다. 따라서 이들 사업장의 오염원 근처의 장소시료가

높은 농도분포를 보였다. 나머지 6개 크롬 농도가 비교적 낮은 사업장들은 국소배기시설을 갖추고 있었고, 미스트 억제제나 탱크덮개 등을 추가적으로 사용하였으며, J사업장은 도금작업실 천정에서 공기를 공급해 주고, K사업장은 도금탱크에 보조 국소배기시설을 설치하여 작업하고 있었다.

그림 4는 연구대상 11개 도금사업장을 고농도 폭로 사업장(D, E 및 H사업장)과 저농도폭로 사업장(A, B, C, F, G, I, J 및 K사업장)으로 구별하

여 개인시료와 장소시료의 6가 크롬폭로 농도를 기하평균과 범위로 나타낸 것이다.

그림 4에 나타난 것처럼 고농도 폭로 사업장의 6가 크롬폭로 농도는 개인시료와 장소시료 모두 NIOSH 기준 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 노동부 허용기준 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이였고 저농도 폭로 사업장의 6가 크롬폭로 농도는 모두 NIOSH 기준이하였다.

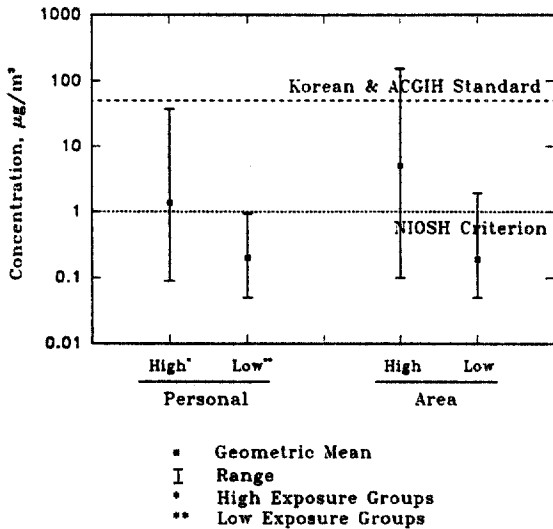


Fig. 4. Cr(IV) Concentrations by Type of Sampling and Exposure Group.

고농도 폭로 사업장의 개인시료 평균농도는 $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $<0.09-37.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 으로 저농도 폭로 사업장의 개인시료 평균농도 $0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $<0.05-0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 7배 높았고, 장소시료는 고농도 폭로 사업장의 평균농도가 $5.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위 $<0.05-1.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 27배 높았다.

그림 5는 장소시료의 6가 크롬 농도를 각 사업장의 장소시료 평균농도로 표준화하여, 도금탱크 표면 중심으로부터 시료채취 장소까지의 거리별로 나타낸 농도분포이다.

일반적으로 독립된 오염원에서 발생된 유해물질의 작업환경중 농도는 오염원으로부터 거리가 증가할수록 감소한다. 작업환경중 6가 크롬 농도가 크롬도금탱크로부터의 거리에 역비례하는 것으로 단순화하여 본 결과 그림 5와 같이 나타났다 (회귀식 : $C/M = 0.153 + 1.890/X, r^2 = 0.50$). 그림

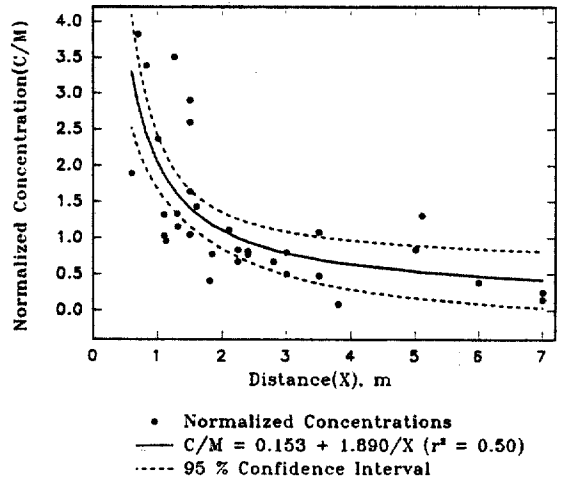


Fig. 5. Distribution of Normalized Cr(IV) Concentrations from Center of Plating Tank's Surface.

5에서 보는 바와 같이 탱크표면 중심에서부터 거리가 증가할수록 공기중 6가 크롬폭로농도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 여기에서 표준화 농도 1은 무차원수로 각 사업장의 평균농도를 나타내고 있는데, 탱크표면 중심으로부터 2m 이내의 거리에서 평균농도 이상을 보였다. 따라서 수동으로 도금작업을 하는 경우에는 도금작업자가 도금탱크 바로 앞에서 도금할 부품을 도금탱크에 넣고, 도금후에는 도금탱크 옆에서 도금된 부품에 묻어 있는 도금액을 물로 씻는 수세작업을 하기 때문에 도금작업시 6가 크롬 폭로를 줄이기 위해 미스트 방지용 호흡마스크 및 개인 보호장구를 반드시 착용하도록 하며 크롬 도금작업이외의 다른 작업을 할 때는 크롬탱크에서 가급적 멀리 떨어진 곳에서 해야할 것이다.

3. 국소배기시설의 평가 및 설계

(1) 크롬도금탱크의 국소배기시설 평가

오염물질이 전체 작업환경중으로 퍼지기 전에 가능한한 오염 발생원에서 가장 가까운 곳에서 오염물질을 제거하는 것이 바람직하며, 이것은 국소배기시설을 통해서 이루어진다. 따라서 국소배기시설은 작업환경을 공학적으로 관리하는 가장 중요한 방법이다.

표 5와 그림 6, 7, 8은 각 사업장의 크롬도금탱크에 설치되어 있는 국소배기 시설의 형태와 제어

속도, slot 속도 및 도금탱크의 단위 표면적당 후드의 배기유량을 정리한 것이다. 11개 사업장 중에서 9개 사업장은 slot형 국소배기시설이 설치되어 있었고, C사업장은 국소배기시설이 설치되어 있지 않은 상태에서 도금탱크위의 천정에서 송풍기로 배기하고 있었으며, E사업장은 국소배기시설이 완전히 고장나 작동하지 않고 있었다.

따라서 D, E사업장의 국소배기시설의 성능은 측정하지 못하였으며 H사업장의 slot 속도와 I사업장의 제어속도, slot 속도는 도금탱크에 설치된 국소배기시설의 설치 구조상 측정이 불가능하였다.

ACGIH에서는 6가 크롬을 독성강도 'A', 발생률 '1'로 규정하여 Open Surface 크롬도금탱크에 설치하는 국소배기시설의 최소제어속도를 0.76 m/s(150 fpm), slot 속도를 10.16 m/s(2,000

fpm), 그리고 탱크의 면비(너비/길이)에 따라 탱크의 단위 표면적당 배기유량을 0.762-1.270 m³/s/m²(150-250 cfm)으로 최소기준으로 정하고 있다(ACGIH, 1988; ACGIH, 1992). 여기에서 제어속도는 후드 앞 어떤 지점에서의 공기속도로서 발생된 오염공기를 방해기류를 극복하고 후드로 흡입하는데 필요한 기류이며, slot 속도는 slot 개구면을 통과하는 기류를 말한다. 따라서 도금탱크에서 발생하는 6가 크롬을 효과적으로 제어하기 위해서는 ACGIH에서 제시하는 최소 기준을 달성하여야 한다.

그러나 실제 측정결과를 보면 도금탱크의 면비는 1 이하로써 적절하였으나 그림 6에서처럼 제어속도는 A사업장의 원형 slot 후드에서 1.00-1.20 m/s로 적합하였고 나머지 8개 사업장의 국소배기시설은 <0.25-0.65 m/s로 불량한 상태였다.

Table 6. Characteristics of Existing Local Exhaust Ventilation at Plating Tank by Plants

Plant	Ventilation Type	Capture Velocity (m/s)	Solt Velocity (m/s)	Exhaust Rate (m ³ /s/m ³)	Aspect Ratio (W/L)
A	Circular Slot	1.00-1.20	2.10 (1.80-2.50)	0.033	1.00
B	3 sides Slots	0.20-0.65	3.50 (0.50-4.60)	0.190	0.21
C	None	—	—	—	0.75
D	Black Cr: 1 side Slot	<0.25	1.80-3.00	0.380	0.36
	Decorative Cr: 1 side Slot	<0.25	2.00-2.65	0.455	0.51
E	1 side Slot (Not Operating)	—	—	—	0.83
F	2 sides Slots	<0.25	12.50	1.323	0.57
G	Plating 1: 1 side Slot	0.35 (0.1-0.7)	0.25-2.70	0.436	0.57
	Plating 2: 1 side Slot	<0.25	0.92	0.236	0.74
H	4 sides Slots	<0.25	—	0.511	0.55
I	4 sides Slots	—	—	1.143	0.38
J	3 sides Slots	0.35-0.55	2.50-3.50	0.280-0.391	0.36
K	1 side Slot (Auxiliary LEV* 3 sides Slots)	0.25	0.48-3.50	0.238	0.58
ACGHI Criteria		0.76	10.16	0.762-1.270	

* Auxiliary Local Exhaust Ventilation

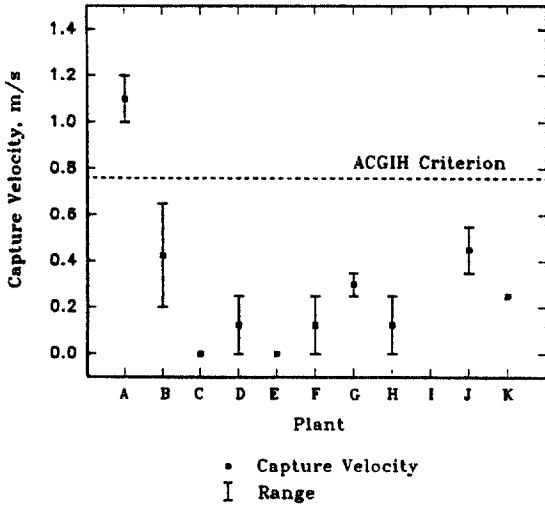


Fig. 6. Capture Velocity Levels of Existing Local Exhaust Ventilation at Plating Tank by Plants.

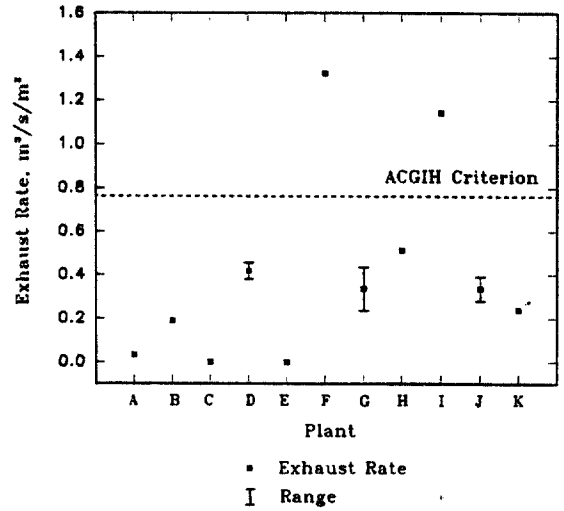


Fig. 8. Exhaust Rate Levels of Existing Local Exhaust Ventilation at Plating Tank by Plants.

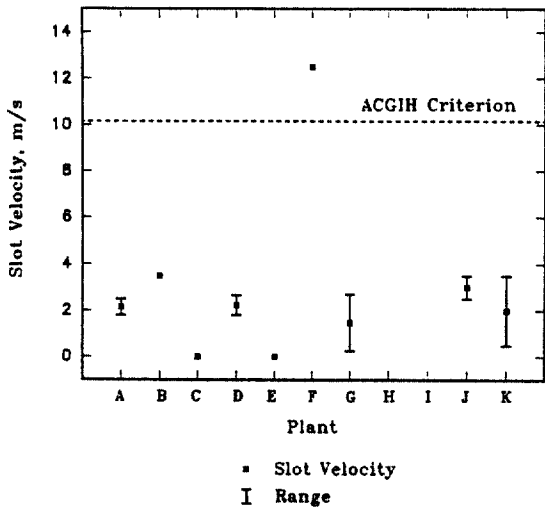


Fig. 7. Slot Velocity Levels of Existing Local Exhaust Ventilation at Plating Tank by Plants.

Slot 속도는 그림 7에서 보는 바와 같이 F사업장만 12.50 m/s로 ACGIH 기준 이상이었고 나머지 사업장은 0.25-3.50 m/s로 저조하였다.

또한 탱크의 단위 표면적당 배기유량은 그림 8처럼 F사업장이 1.323 m³/s/m², I사업장이 1.143 m³/s/m²로 적합한 상태였고 그외 7개 사업장은 0.033-0.511 m³/s/m²로 ACGIH 기준 이하였다.

따라서 3가지 모두 ACGIH 기준을 만족하는 크롬도금공정은 한 곳도 없었으나 F사업장과 I사업

장의 크롬도금공정은 어느 정도 적절한 상태였다.

6가 크롬 농도가 높았던 D, E 및 H사업장의 국소배기시설을 살펴보면 E사업장의 국소배기시설은 완전히 고장나 작동되지 않는 상태였고, D, H사업장의 국소배기시설은 제어속도가 0.25 m/s 이하로 ACGIH 기준보다 많이 뒤떨어졌다. 특히 가장 높은 6가 크롬 폭로농도를 보인 D사업장은 흑크롬도금과 장식크롬도금 공정 이외에도 화학연마공정이 있었는데 화학연마작업시에 화학연마통에서 황색의 크롬미스트가 매우 심하게 발생함에도 불구하고 국소배기시설이 설치되어 있지 않아 작업환경을 심하게 오염시키고 있었다. 따라서 화학연마통에 적절한 국소배기시설을 설치하고 기타의 미스트 감소방법을 추가적으로 사용하여 작업환경을 관리하여야 할 것이다.

(2) 경계층 분리 효과를 고려한 국소배기시설의 설계(George 등, 1990; Kim과 Flynn, 1991)

앞에서 살펴보았듯이 각 사업장의 크롬도금탱크에 설치된 국소배기시설은 ACGIH 기준에 비하여 성능이 매우 뒤떨어지고 있다. 국소배기시설의 성능을 향상시키기 위해서는 제어속도와 slot 속도를 증가시켜 주어야 하는데 이에 따른 큰 용량의 송풍기로 교체하는 것 이외에도 기본적으로 고려해야 할 문제가 있다.

이론적으로 살펴보면 국소배기시설은 산업공정 만큼이나 크기, 모양, 구조가 다양하지만 모든 국소배기시설에 공통된 기본적인 설계변수는 제어 속도이고, 이 제어속도의 결정은 국소배기 후드의 공기 흐름을 기술하는 유체역학적 모형에 의한다. 이 모형에서는 기본적으로 공기는 점성이 없고, 압축되지 않으며 회전이 없는 일정한 흐름을 갖는 이상 유체(ideal flow)로 가정한다. 이 가정은 방해물이 없는 자유 유체(free flow)에서 성립하나 작업자가 후드로 유입되는 공기 흐름의 경로에 중요한 방해가 되면 두가지 중요한 문제가 발생한다.

첫째, 후드로 흘러 들어가는 공기에 대한 물리적 방해작용(존재 자체로써)을 하여 Laplace 방정식 해(solution)의 경계조건에 혼란을 초래하여 제어속도가 달라지게 된다.

둘째, 기류가 둥근 물체를 지날 때 경계층(boundary layer)이 물체 표면에 형성되는 것이다. 유체의 일부가 물체의 표면에 접촉되어 표면근처에서 유체의 얇은 층이 마찰력에 의해 속도가 늦어져 경계층이 형성되고 공기의 점성이 중요한 역할을 함으로써 이상유체에 대한 기본 가정이 깨어지게 된다. 즉 그림 9처럼 경계층이 분리된다 (Frank, 1987).

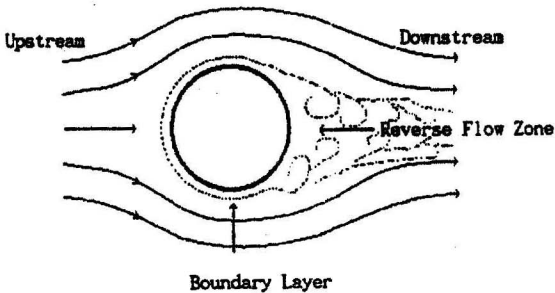


Fig. 9. Boundary Layer Separation Around a Circular Cylinder in Uniform Flow.

마찰이 없는 유체라면 유체의 입자는 둥근 물체의 상류(upstream)쪽에서 가속되고 하류(downstream)쪽에서 감속된다. 따라서 Bernoulli 방정식에 의해 상류쪽에 압력이 감소하고 하류쪽에서 압력이 증가하게 된다. 경계층 내부에 큰 속도 기울기에 의해 큰 마찰력의 발생으로 유체 입자의

운동에너지 대부분이 실린더 상류쪽에서 손실되어 하류쪽의 압력이 증가되는 부분에서 계속 흘러나갈 만한 운동에너지가 없어지게 된다. 결국 유체입자는 정지하게 되고 진행방향으로 압력의 증가(압력의 역기울기)로 인하여 반대방향으로 움직이기 시작한다. 소용돌이가 형성되어 점차 커지고 실린더 표면에서 분리되어 하류로 움직인다.

이 역류 영역의 실질적 중요성은 국소배기시설에 대한 전형적인 위치에서 근로자가 일할 경우에 있다. 즉 일반적으로 근로자들은 그들과 상방배기형의 국소배기시설 사이에 오염원을 두고 일하도록 되어 있다. 실제 연구 대상 도금사업장에서 대부분의 국소배기시설이 전형적인 방향으로 설치되어 있었다. 이런 방향에서 근로자는 기류의 장애물이 되고 경계층 분리가 일어나게 되어 역류 영역과 난류 혼합이 바로 근로자의 앞부분에 형성된다. 만약 오염원이 이 영역이 이 영역에 놓이면 그림 10에서 보는 바와 같이 오염물질이 근로자에게 거꾸로 흘러가 호흡위치에 심각한 오염물질 농축을 일으킬 수 있게 된다.

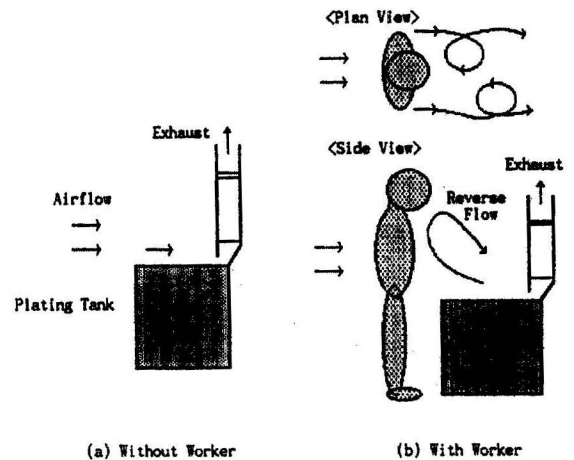


Fig. 10. Airflow Pattern at the Front of Typical Local Exhaust Ventilation.

따라서 경계층 분리에 의한 영향을 최소화하고 효과적인 국소배기시설을 설계하기 위해서는 작업자의 위치가 공기 흐름과 90°가 되도록 하거나 그림 11처럼 Push-Pull형 배기 후드 또는 하방 배기 후드형으로 국소배기시설을 설계하여야 한다.

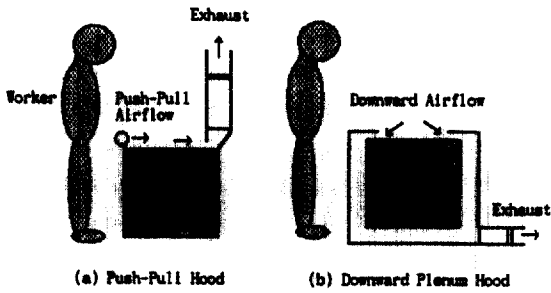


Fig. 11. Airflow Pattern at the Front of Push-Pull and Downward Plenum Local Exhaust Ventilation Hood.

IV. 결 론

본 연구에서는 1992년 7월 21일부터 10월 6일까지 서울, 인천, 안산 및 대전지역에 위치한 50인 이하의 도금사업장 11개소를 대상으로 크롬도금 공정에 대한 각 사업장별 6가 크롬 폭로수준 및 작업환경을 평가하였다. 또한 크롬도금탱크에 설치되어 있는 국소배기시설의 형태와 성능을 측정, 평가하였고 크롬도금공정에서 발생하는 6가 크롬을 공학적으로 관리하기 위한 가장 적절한 국소배기시설을 제시하였다.

1. 연구대상 크롬도금공정은 각종 부품에 장식 크롬도금, 산업용 경질크롬도금 및 흑크롬도금을 하는 것으로, 대부분의 사업장이 종합적인 6가 크롬 미스트 관리대책 및 개인보호장비를 제대로 갖추지 않고 작업하고 있었다.

2. 공기중 6가 크롬 농도는 대수정규분포를 하였으며, 개인시료의 전체 평균이 $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위, $<0.05 - 37.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 장소시료의 전체 평균이 $0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위; $<0.05 - 153.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 우리나라 노동부와 ACGIH의 작업환경 허용기준 농도 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하지 않았다. NIOSH의 허용기준 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비교할 때는 일부 사업장에서 개인시료와 평균농도가 초과하였다.

3. 개인시료는 38개 모두 노동부 허용기준을 초과하지 않았으나 NIOSH 기준을 초과하는 시료가 10개(26.3%)였다. 장소시료는 96개중에 한 사업장의 시료 7개(7.3%)가 노동부 허용기준을 초과하였고, NIOSH 기준을 초과하는 시료는 35개(36.5%)였다.

4. 고농도 폭로 사업장들은 각각의 도금탱크에 설치되어 있는 국소배기시설의 성능이 부적절하거나, 고장나 작동이 안되는 상태였다. 특히 한 사업장의 화학연마공정에는 국소배기시설이 설치되어 있지 않아 도금공정 내부 전체가 심하게 오염되어 있는 상태였다. 저농도 폭로 사업장들은 국소배기시설을 갖추고 있었고, 그외에도 미스트 억제제, 탱크덮개, 보조 국소배기시설 등을 추가적으로 사용하고 있었다.

5. 고농도 폭로 사업장의 개인시료 평균농도는 $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 저농도 폭로 사업장의 개인시료 평균농도 $0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 7배 높았고, 장소시료는 고농도 폭로 사업장의 평균농도가 $5.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 저농도 폭로 사업장의 평균농도 $0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 27배 높았다.

6. 작업환경중 6가 크롬 농도는 크롬도금탱크로부터의 거리(X)에 역비례하는 것으로 나타났는데 (회귀식: $C/M = 0.153 + 1.890/X$, $r^2 = 0.50$), 탱크표면 중심으로부터 2m이내의 거리에서 평균농도 이상을 보였다.

7. 국소배기시설의 성능 측정결과 제어속도, Slot속도 및 탱크 단위 표면적당 배기유량 3가지 모두 ACGIH 기준을 만족하는 크롬도금공정은 한 개도 없었으나 일부 사업장의 크롬도금공정은 어느 정도 적절한 상태였다.

8. 국소배기시설의 제어속도, slot 속도 및 배기유량은 통계학적으로 유의하지 않으나 공기중 6가크롬 농도에 역의 상관성을 나타내었다.

9. 경계층 분리에 의한 역류의 영향을 최소화하고 효과적인 국소배기시설을 설치하기 위해서는 작업자의 위치가 공기 흐름과 90° 가 되도록 하거나, Push-Pull형 배기 후드 또는 하방 배기후드 형태로 국소배기시설을 설계하여야 한다.

10. 국소배기시설이외의 작업환경관리 방법으로 미스트 억제제, 탱크덮개 및 부유 플라스틱물 등을 각각의 크롬도금공정에 적절히 사용하여 크롬도금탱크에서 작업환경중으로 비산하는 크롬미스트를 최대한으로 방지하도록 한다.

참 고 문 헌

노동부: 유해물질 허용농도, 노동부고시제 91-21, 노동

- 부, 1991
- 대한산업보건협회 : 특수건강진단종합연보, 대한산업보건협회, 1990
- 대한산업보건협회 : 특수건강진단종합연보, 대한산업보건협회, 1991
- 대한상공회의소 : 전국기업체총람, 대한상공회의소, 1992
- 조규상 : 산업보건학, 수문학, 1991. 305-310
- 최호춘, 김해정 : 도금업 근로자의 혈청중 중금속 농도 - 크롬 및 니켈 도금업 근로자의 작업환경과 혈청중 크롬 및 니켈 농도, 근로복지공사 중앙병원부설 직업병연구소, 직연보 20-90-9, 1990
- 한국산업안전공단 : 업종별 작업환경 관리기법, 유해 91-112-4, 한국산업안전공단, 1991
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) : *Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices*, Cincinnati, Ohio, ACGIH, 1986, 139-140
- ACGIH : *Industrial Ventilation—A Manual of Recommended practice*, 20th ed, Lansing, Mich, ACGIH, 1988
- ACGIH : *Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants*, 7th ed, ACGIH, 1989, 21-33
- ACGIH : *Industrial Ventilation - A Manual of Recommended Practice*, 20st ed, Lansign, Mich, ACGIH, 1992
- ACGIH : *Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1992-1993*, Cincinnati, Ohio, ACGIH, 1992.
- Cralley LV, Cralley LJ : *In-Plant practices for Job Related Health Hazards Control*, Vol.2, *Engineering Aspects*, John Wiley & Sons, Inc., 1989
- George DK, Flynn MR, Goodman R : *The impact of boundary layer seperation on local exhaust design and worker exposure*. *Appl Occup Env Hyg* 1990 : 5 (8) : 501-509
- Kim TH, Flynn MR : *Airflow pattern around a worker in a uniform freestream*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1991 : 52 (7) : 287-296
- Kim TH, Flynn MR : *Modeling a worker's exposure from a hand-held source in a uniform freestream*. *Am Ind Hyg Assoc J* 1991 : 52(110) : 458-463
- Langard S : *One hundred years of chromium and cancer : A review of epidemiological evidence and selected case reports*. *Am J Ind Med* 1990 : 17 : 189-215
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) : *Criteria for a Recommended Standard—Occupational Exposure to Chromium ()*, DHHS (NIOSH) Publication No. 84-100, Cincinnati, Ohio, NIOSH, 1975
- NIOSH : *Control Technology Assessment : Metal Plating and Cleaning Operations*, U.S. Dept. of Health and Human Services, Public Health, Service, NIOSH, 1984
- NIOSH : *NIOSH Manual of Analytical Methods*, 3rd ed., DHHS (NIOSH) Publication No. 84-100, Cincinnati, Ohio, NIOSH, 1984
- Rinehart WC, Gad SC : *Current concepts in occupational health : metals chromium*. *Am. Ind Hyg Assoc J* 1986 : 47 (11) : 696-698
- White FM : *Fluid Mechanics*, 2nd ed. New York, McGraw-Hill Book Company, 1987, 386-389