

모 조선업체 아크 용접 작업자의 공기중 6가 크롬 및 니켈 노출에 관한 연구

한국산업안전공단 산업보건연구원, 서울대학교 신소재공동연구소*

신용철 · 이광용 · 이나루 · 오세민 · 강성규 · 문영한 · 이기라*

— Abstract —

Welder's Exposure to Airborne Hexavalent Chromium and Nickel during Arc Welding in a Shipyard

Yong Chul Shin, Gwang Yong Yi, Na Roo Lee, Se Min Oh,
Seong Kyu Kang, Young Hahn Moon, Ki Ra Lee*

*Industrial Health Research Institute, Korea Industrial Safety Corporation,
Research Institute of Advanced Materials, Seoul National University**

The aim of this study was to evaluate welders' exposure to hexavalent chromium (Cr(VI)) and nickel (Ni) during welding operations in a Korean shipyard. The airborne Cr(VI) and Ni concentrations were measured during metal inert gas (MIG) welding on mild and stainless steel, and manual metal arc (MMA) welding on mild steel. The geometric mean (GM) of Cr(VI) concentrations inside the welding helmet during MIG welding on mild steel were 0.0018 mg/m³ inside a ship section, and 0.0015-0.0026 mg/m³ at the welding shops. All of the personal breathing zone air samples were below the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Threshold Limit Value (TLV[®]) of 0.01 mg/m³. Conversely, eighty-eight percent (21 of 24) of the personal breathing zone air samples exceeded the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) recommended exposure limit of 0.001 mg/m³. Ni was not detected on 20 of 23 air samples collected during MIG welding on mild steel. The three Ni samples above the limit of detection ranged from 0.015 to 0.044 mg/m³. The GM of Cr(VI) concentrations during MMA welding on mild steel were 0.0013 mg/m³, but Ni was not detected in the air samples during this operation. It is assumed that the airborne Cr(VI) and Ni during mild steel welding were derived from the base metals which contained about 0.03% Cr and 0.03% Ni. The GM of airborne total Cr, Cr(VI) and Ni concentrations during MIG welding on stainless steel were 4.02, 0.13 and 0.86 mg/m³, respectively, and the levels of Cr(VI) and Ni were above the ACGIH-TLV[®]. Cr(VI) comprised about 35.5% of the total chromium (Cr) from MIG welding on mild steel, and about 8.4% of total Cr from MIG welding on stainless steel. The

ratios of Cr(VI) to total Cr were significantly different among welding shops. It was concluded that welders were exposed to high levels of Cr(VI) and Ni during welding on stainless steel, and were exposed to low levels of Cr(VI) even during welding on mild steel.

Key Words : Hexavalent chromium, Nickel, Total chromium, Metal inert gas welding, Manual metal arc welding, Mild steel, Stainless steel

I. 서 론

최근 국내에서는 모 조선업체 용접공중 비중격천공(nasal septum perforation) 환자가 발생되어 직업병으로 인정된 바 있다. 일반적으로 크롬 도금업종에서 6가 크롬(hexavalent chromium, Cr(VI))에 의한 비중격천공이 많이 보고되고 있으나 용접작업에서 이 직업병이 발생된 것은 세계적으로 극히 드문 사례이며 그 원인은 Cr(VI)과 니켈(nickel, Ni)이 함유된 용접 fume이 주요 원인으로 추정되고 있다(산업보건연구원, 1998).

Cr과 Ni은 스테인레스강(stainless steel)의 주요 성분으로 비교적 높은 함량으로 함유되어 있으며, 이 합금은 비슷한 조성의 용접전극으로 용접하는데 이와 같은 용접작업에서는 발암물질로 알려져 있는 Cr(VI)과 Ni이 발생될 수 있다(NIOSH, 1988). 용접 중에 발생하는 용접 fume에 의한 폐암 발생은 아직까지 논란이 되고 있으나 많은 연구에서 용접 fume에 노출된 용접공의 폐암 위험을 보고하고 있으며(Beaumont and Weiss, 1981; Steenland et al., 1986; Schoenberg, 1987; Sjogren, 1980; Gerin et al., 1984; Sjogren et al., 1987), 특히 일부 연구에서는 스테인레스강 용접과 폐암 위험간에는 강한 연관성이 있다고 보고하고 있으며(Sjogren, 1980; Gerin et al., 1984; Sjogren et al., 1987), 폐암 원인물질로는 용접 fume중의 Ni 및 Cr으로 추정하고 있다(Sjogren et al., 1987). International Agency for Research on Cancer(IARC, 1990)에서는 용접 fume을 "Group 2B(possibly carcinogenic to human)"로, Cr(VI)와 Ni 화합물을 "Group 1(carcinogenic to humans)"으로 규정하고 있다.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH, 1998)에서는 용접

fume을 "A2(suspected human carcinogen)로, 수용성 Cr(VI) 화합물(water-soluble hexavalent chromium compounds) 및 비수용성 Cr(VI) 화합물(insoluble hexavalent chromium compounds, not otherwise classified, NOC)을 인체발암물질(confirmed human carcinogen, A1)로 규정하고 Threshold Limit Value(TLV)를 각각 0.05 mg/m³ 및 0.01 mg/m³로 설정하고 있다. 이 협회에서는 용접 중에 발생하는 Cr은 비수용성 Cr(VI)으로 규정하고 있으며 이 물질에 계속적으로 노출되는 경우 폐암 증가와 관련성이 있다고 주장하고 있다(ACGIH, 1995). 우리 나라 노동부(1998)는 수용성 및 비수용성 Cr(VI)의 노출기준을 모두 0.05 mg/m³로 규정하고 있다. 한편, National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH, 1994)에서는 암을 예방하기 위한 Cr(VI)의 Recommended Exposure Limit(REL)를 0.001 mg/m³로 설정하고 있다.

우리 나라 노동부(1998)에서 설정하고 있는 Ni 노출기준은 수용성 Ni 화합물 0.1 mg/m³(as Ni), Ni 금속 1 mg/m³이다. ACGIH(1998)는 Ni 금속, 수용성 Ni 화합물 및 비수용성 Ni 화합물에 대한 TLV를 Ni 원소로서 각각 1.5 mg/m³, 0.1 mg/m³ 및 0.2 mg/m³로 설정하고 있으며 특히 비수용성 Ni을 A1으로 규정하고 있다(ACGIH, 1998). NIOSH(1977)에서는 모든 형태의 무기 Ni 화합물의 REL을 0.015 mg/m³로 설정하고 있다.

외국에서는 스테인레스강 용접중 이들 금속을 대상으로 연구는 많이 진행되어 왔으나 조선업종에서 많이 사용되는 Cr과 Ni이 미량 함유되어 있는 연강(mild steel) 용접을 대상으로 한 연구는 매우 제한되어 있다. 국내에서는 용접 근로자의 용접 fume 노출에 관한 논문(신용철 등, 1997; 광영순 및 백남원, 1997)이 발표된 적이 있으나 잠재적인 폐암 유발 물질인 Cr(VI) 및 Ni에 대한 연구는 발표된 적이 없다. 공기중 Cr(VI) 및 Ni에 의한 건강장해를 예방하

기 위해서는 이들 물질에 대한 정확한 노출평가와 대책수립이 필요하나 국내에서는 이에 대한 연구가 없는 실정이다. 본 연구의 목적은 모 조선업체의 연강 및 스테인레스강 용접공정을 대상으로 용접조건에 따른 공기중 총크롬(total Cr), Cr(VI) 및 Ni 농도와 총크롬중 Cr(VI) 비율을 평가하는 데 있다.

II. 대상 및 방법

1. 대상

연구 대상업체는 선박, 선박용 엔진, 철 구조물, 산업용 플랜트, 중장비를 제작하는 조선업체로 최근 6명의 비중격천공 환자가 발생한 사업장이었다. 연구대상 부서는 부두에서 선체(hull), 선실, 탱크를 용접하는 선체건조부(inside ship sections), 선실생산부(welding shop A), 선각판넬조립부(welding shop B), 선각소조립부(welding shop C) 및 기계 또는 설비를 제작하는 중기계 공장(welding shop D) 등 5개 부서였다.

중기계 공장을 제외한 다른 부서에서는 주요 모재는 Cr, Ni, Mo 등이 미량 함유된 연강이었고 metal inert gas(MIG) 용접 또는 manual metal arc(MMA) 용접을 모두 사용하고 있었으나 주요 용접종류는 MIG 용접이었다. MIG 용접 와이어(wire electrode)는 직경 1.2 mm 또는 1.4 mm의 'Supercored 71(AWS E71-1)' 와이어를 사용하고 있었다. 1.4 mm 직경의 와이어는 선각소조립부(welding shop C) 한 개 부서에서만 사용되고 있었다. 일부 근로자는 강판을 가접(취부, spot welding)할 때 MMA 용접을 실시하고 있었으며 취급하는 피복 용접봉(coated electrode)은 직경 4 mm의 'S-7016(AWS E7016)' 및 'S-7028(AWS E7028)'이었다. 한편, 기계, 설비 등을 제작하는 중기계공장(welding shop D)에서는 직경 1.2 mm의 'Shield Bright 309 MOL(AWS A5.22 E309 MOL TO-1)' 및 'Shield Bright 316L(AWS A5.22 E316 LTO-1)' 을 사용하여 MIG 용접방법으로 스테인레스강을 용접하거나 스테인레스강에 탄소강을 접합시키고 있었다. 이 작업장에서는 스테인레스강 용접뿐 만 아니라 MIG 용접에 의한 연강용접도 이루어지고 있었으며 사용 용접와이어 종류는 직경 1.2 mm의 'Dualshield 7100(AWS E71T-1)'

이었다. MIG 용접에서 불활성 가스로 CO₂가 사용되고 있었다. 용접을 할 때 이용된 전류 및 전압은 각각 150-350 ampere 및 16-40 volt였다. 부두에서 선체를 조립하는 용접 작업자는 엔진 실, 원유탱크 내부 등 밀폐된 공간에서 작업을 하고 있었으나 이들 작업장소에는 대부분 환기시설이 없거나 가동되지 않는 상태였다. 옥내 용접작업장에는 주로 블록(block)을 조립하기 때문에 부분적으로 밀폐된 공간에서 용접이 이루어지는 경우가 많았다.

2. 방법

1) 용접봉과 모재중 Cr 및 Ni 성분 확인

용접봉의 성분을 확인하기 위해 재료를 길이 1 cm 정도 잘라 지름 2 cm의 시료 지지대(sample holder)에 올려놓은 다음, scanning electron microscop(Model JSM-6330F, JEOL Co., Japan)/energy dispersive spectrometer(Model Link ISIS, Oxford Co., UK)(SEM/EDS)로 분석하였다. 이 방법에 의한 분석결과와 함께 해당 용접봉의 품질 규격서에 제시되어 있는 용착 금속(weld metal) 분석자료를 참고하여 용접봉 중에 존재하는 성분을 확인하였다. 강판의 조성은 각 제품의 품질 보증서에 제시되어 있는 자료를 이용하였다.

2) 공기시료 채취 및 분석

공기 중 Cr(VI) 시료는 NIOSH Method 7600(NIOSH, 1994)에 따라 PVC 여과지(공극크기 5.0 μm, 직경 37 mm)에 채취한 후 알칼리 용액(2% NaOH/3% Na₂CO₃)으로 추출하였다. 운반 및 보관 과정에서 Cr(VI)의 환원을 방지하기 위해 시료 채취 즉시 알칼리 용액을 5 mL 정도 첨가하였으며(신용철, 1997), 추출용액 중 Cr(VI)을 Ionpac NGI(Dionex Corp.) precolumn/Ionpac AS7 separator column(Dionex Corp.)을 분리한 후 ion chromatograph(Model ED-40, Dionex Corp.)/ visible absorbance detector(Model SC100, Thermoseparation Products Co.)로 분석하여 정량하였다(EPA, 1991). 이 방법에 대한 회수율을 2-30 μg 수준에서 구하였고 이렇게 구한 회수율로 시료중 Cr(VI) 양을 보정하였다.

공기중 총크롬 및 Ni 시료는 mixed cellulose ester membrane(MCE) 여과지(공극 0.8 μm, 직경

37 mm)에 질산(HNO₃)과 과염소산(HClO₄)을 4:1로 혼합한 용액 1 mL를 첨가한 후 초음파 오븐(MDS 2100, CEM, Corp. U.S.A.)으로 회화시켰다. 시료 중 총크롬 및 Ni 양은 원자흡광분석계(Varian 300 Plus, Australia)로 정량하였다. 총크롬의 경우 5-60 µg 수준에서, Ni의 경우 10-60 µg 수준에서 회수율을 구하여 시료 중 Cr(VI) 양을 보정하였다.

개인시료의 경우 용접 헬멧 안과 밖에서 채취하였으며 대부분의 근로자에 대해 오전, 오후로 나누어 2개의 시료를 채취하였다. 일부 근로자에 대해 헬멧 안팎에서 시료를 동시에 채취하여 시료 값을 서로 비교하였다. 용접작업 주위와 발생원에서 몇 개의 장소시료를 채취하여 배경농도와 발생원에서의 농도를 측정하였다. 총크롬과 Cr(VI)의 비를 구하기 위해 총크롬 및 Cr(VI) 시료채취기를 나란히 설치하여 동시에 시료를 채취하였다.

3) 자료분석 및 평가

측정 자료는 대수정규분포를 하기 때문에 대표값과 산포도는 각각 기하평균(geometric mean, GM) 및 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)로 나타내었다. 노출기준에 대해 근로자의 노출수준을 평가하기 위해서 오전, 오후의 농도를 합하여 8시간-시간가중평균농도(8hr-TWA)를 산출하였다. 근로자의 노출 수준은 총크롬, Cr(VI) 및 Ni에 대한 노동부 노출기준, ACGIH TLV 및 NIOSH REL과 비교하여 평가하였다. 분산분석(ANOVA) 및 t-검정법을 이용하여 부서간 자료 차이를 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 용접재료중 Cr 및 Ni 함량

1) 용접봉

Fig. 1은 대상 사업장에서 주로 사용되고 있었던 연강용 피복아크 용접봉(S-7028), 연강용 MIG 용접 와이어(Supercored 71) 및 스테인레스강용 MIG 용접와이어(Shield Bright 309 MOL)의 성분을 분석한 스펙트럼이다. 그림에서 보듯이 'S-7028'에는 주성분인 Fe(78.8%)를 비롯하여 Si(2.03%), Mn(1.2%), Ca(1.6%) 등이 주로 존재하였으며 'Supercored 71' 제품에는 Fe(88%), Si(0.16%), Ca(0.53%),

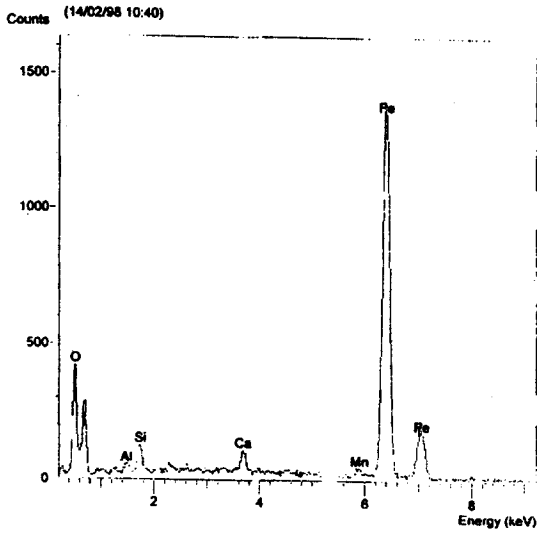
Cr(0.22%) 등이 검출되었다. 그러나 이 두 가지 제품을 포함한 연강용 피복아크 용접봉 및 연강용 MIG 용접와이어의 성분 분석결과 Cr과 Ni은 검출되지 않았다. 이와 같이 연강 용접에 사용되는 용접와이어나 피복 용접봉에는 Cr과 Ni이 함유되어 있지 않으므로 이들은 Cr과 Ni의 발생원이 아님을 알 수 있었다.

스테인레스강 용접 와이어인 'Shield Bright 309 MOL'에는 Fig. 1에서 보듯이 Cr 및 Ni의 피크가 뚜렷하게 나타났다. 이 용접 와이어에는 Fe(65%), Cr(18.6%), Ni(7.0%), Si(0.66%), Mn(0.90%), F(0.92%), Al(0.37%)이 함유되어 있었으나 Ca은 함유되지 않는 것으로 나타났다. 다른 스테인레스강 용접와이어 제품인 'Shield Bright 316L'에 함유되어 있는 Cr과 Ni은 각각 18.8% 및 6.6%로 전자 제품과 유사한 수준이었으나 Al과 F는 검출되지 않았다. 이와 같이 스테인레스강용 용접 와이어에는 Cr과 Ni이 비교적 높은 함량으로 존재하는 것으로 나타났다. 용접와이어의 제품 규격서에 제시되어 있는 조성은 용접에 의해 발생된 용착금속의 조성을 말하는데 전자 제품의 Cr과 Ni 함량은 각각 22% 및 12%로 SEM/EDS에 의한 결과보다는 약간 큰 값을 보이고 있었다. 한편, 연구 대상에는 포함되지는 않았지만 저합금강용 피복아크 용접봉과 내열강용 용접 와이어에는 4% 이하의 Cr과 1% 이하의 Ni이 존재하는 것으로 나타났다.

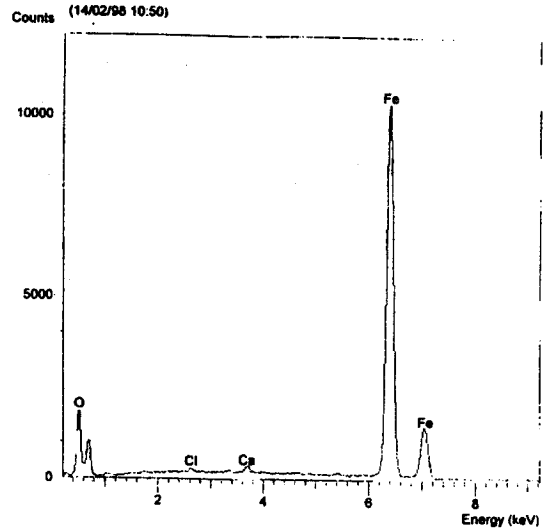
2) 철판(모재)

연구대상 용접 부서에서 사용하고 있었던 강판 10개 제품의 성분 보증서에 의하면 1종의 제품을 제외한 모든 제품에는 Cr과 Ni이 각각 0.03%(0.02-0.04%) 및 0.03%(0.01-0.09%)로 함유되어 있는 것으로 나타났다. 이들 금속 외에 Mo, V 등의 원소가 미량 포함되어 있었으며 각 성분의 존재와 그 함량은 철판의 종류에 따라 차이가 있었다.

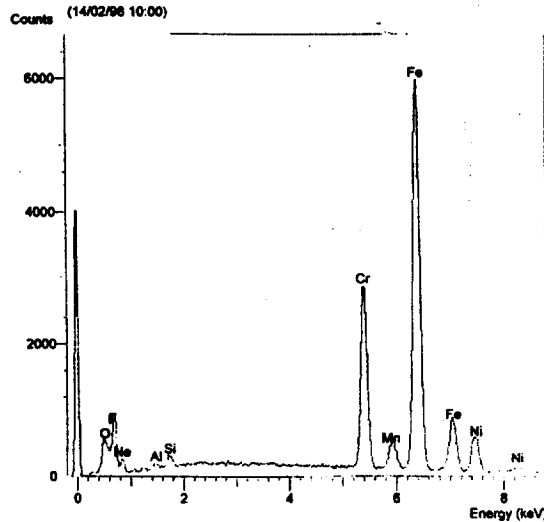
일반적으로 강철(steel)에는 탄소강(carbon steel), 저합금강(low-alloy steel), Cr-Mo강 및 스테인레스강이 포함된다. 탄소강은 C, Mn, Si가 1-2% 정도 함유되어 있는 강판이며, 저합금강(low-alloy steel)은 Cr, Ni, Mo, V 등의 전체량이 약 3% 정도 함유되어 있는 탄소강을 말한다. Cr-Mo강은 Cr과 Mo이 각각 1% 및 0.5%에서 9% 및 1%까지 다양한 비율로 함유되어 있는 탄소강이며 스테인레스강은 주 합



Coated electrode for mild steel: S-7028



MIG electrode for mild steel: Supercored 71



MIG electrode for stainless steel: Shield Bright 309 MOL

Fig. 1. Energy dispersive spectrums of welding electrodes.

금원이 Cr 및 Ni인 탄소강이다(AIHA, 1984). 연구 대상 강철중 1종은 순수한 탄소강이었다. 스테인레스 강을 제외한 다른 강철에는 Cr, Ni, Mo, V 등이 미량 함유되어 있었으나 이 금속들의 함량은 저합금강의 기준에는 미달하였다. 저합금강에 해당되지 않는 양이지만 Cr, Ni, Mo, V 등을 미량 첨가함으로써 강철의 강도를 강화시킨 것으로 판단된다.

성분 보증서에 제시되어 있는 스테인레스강판의 Cr 함량은 평균 17.9%(17.6-18.1%)이었고 Ni의 함량은 평균 10.6%(8.3-10.6%)이었다. 2종의 스테인레스강중 한 제품에 Mo이 함유되어 있는 것을 제외하고는 두 제품의 조성은 서로 유사하였다. 스테인레스강용 용접 와이어의 Cr과 Ni 함량은 스테인레스강과 서로 유사하였다. 스테인레스강과 스테

Table 1. Worker's Exposure Levels to Airborne Cr(VI) and Ni, determined inside and outside Helmet, during MIG Welding on Mild Steel

Sampling Site/ Electrode Type	Total Cr				Cr(VI)				Ni	
	N	GM, mg/m ³	Range, mg/m ³	GSD	N	GM, mg/m ³	Range, mg/m ³	GSD	N	Range, mg/m ³
Inside ship section										
/Supercored 71(1.2ø)										
Inside helmet	9	0.0018	0.0011-0.0038	1.7	5	0.0027	0.0014-0.0050	1.6	5	N.D. ^a
Outside helmet	4	0.0031	0.0019-0.0043	1.4	-	-	-	-	-	-
Welding shop A&B/ Supercored 71(1.2ø)										
Inside helmet	9	0.0015	0.0008-0.0028	1.6	6	0.0036	0.0019-0.0048	1.4	6	N.D.
Outside helmet	2	0.0036	0.0012-0.0110	4.8	-	-	-	-	-	-
Welding shop C/Sup- ercored 71 (1.4ø)										
Inside helmet	6	0.0021	0.0020-0.0068	2.1	5	0.0037	0.0015-0.0410	4.0	5	N.D.
Background	2	0.0005	0.0004-0.0006	1.3	-	-	-	-	2	N.D.-0.044
Welding shop D/Dua- lshield 7100(1.2ø)										
Inside helmet	9	0.0026	0.0016-0.0066	1.7	7	0.0134	0.0013-0.0883	5.9	6	N.D.-0.017
Total										
Inside helmet	33	0.0020	0.0008-0.0068	1.7	23	0.0052	0.0013-0.0410	3.9	21	N.D.-0.044 ^b
Outside helmet	6	0.0033	0.0012-0.0110	2.1	-	-	-	-	-	-

Note: N=Number of samples; GM=Geometric mean; GSD=Geometric standard deviation

^aN.D.=Lower than the limit of detection(0.005 mg/m³)

^bNi was detected in 3 samples(0.015-0.044 mg/m³).

인레스강 용접 와이어에는 Cr과 Ni이 높은 비율로 함유되어 있으므로 용접작업중 근로자는 이들 금속에 고농도로 노출될 가능성이 있으리라 본다.

2. MIG/연강 용접중 공기중 총크롬, Cr(VI) 및 Ni 농도

연강을 MIG 용접(MIG/연강용접)하는 과정에서 공기 중에 Cr 금속과 금속산화물이 저 농도로 발생하며 또한 Cr(VI)도 존재하는 것으로 나타났다. Cr과 Ni이 0.03% 정도로 미량 함유된 연강을 MIG 용접하는 동안 측정된 공기중 총크롬, Cr(VI) 및 Ni 농도는 Table 1 및 Fig. 2와 같다.

1) 공기중 총크롬 농도

Table 1 및 Fig. 2과 같이 용접 헬멧 안에서 측정된 총크롬 농도의 평균은 0.0052 mg/m³로 나타났고 부서별 총크롬 농도의 평균은 0.0027-0.0134 mg/m³

로 나타났다. 각 시료의 값을 노출기준과 비교한 결과, 우리 나라 노동부와 ACGIH가 규정하고 있는 노출기준(노동부, 1998; ACGIH, 1998) 0.5 mg/m³를 초과하는 시료는 없었다. 가장 높은 농도 분포를 보인 D 부서는 다른 부서에 비해 총크롬 농도가 유의하게 높았다(p<0.05). 이 부서의 농도가 높은 이유는 주변에서 스테인레스강 용접을 하고 있어 여기서 발생하는 Cr의 영향을 받았던 것으로 여겨진다. 선체 내는 거의 밀폐된 공간이기 때문에 Cr 농도가 높을 것으로 예상되었으나 비교적 낮게 나타났다. 옥내 작업장에서도 부분적으로 밀폐된 블록 내에서 용접하는 경우가 많았고 작업량도 서로 다르기 때문에 선체와 옥내 작업장(A, B, C)의 농도간에는 유의한 차이가 없었던 것으로 판단된다.

2) 공기중 Cr(VI) 농도

Table 1에서 보는 바와 같이 MIG/연강 용접중

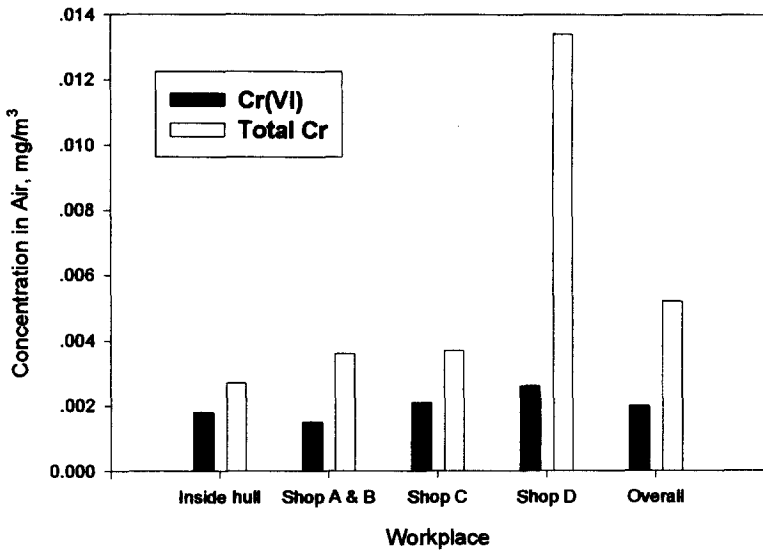


Fig. 2. Average concentrations of airborne total Cr and Cr(VI) inside helmet during metal inert gas welding on mild steel by sampling site.

공기중 Cr(VI) 농도의 전체 평균은 용접 헬멧 안쪽에서는 0.0020 mg/m³, 바깥쪽에서는 0.0033 mg/m³로 나타났다. 각 부서별로 헬멧 밖의 농도를 비교한 결과 밖의 농도는 안쪽의 농도보다 약 1.5-2배 높은 것으로 나타났다.

1.2 mm의 용접 와이어를 사용하는 A 및 B 작업장과는 달리 C 작업장의 경우 직경 1.4 mm의 용접 와이어를 사용하고 있었다. 이들 작업장에서 사용되었던 용접 와이어 종류는 동일하였고 작업환경 조건은 서로 유사하였다. 이와 같이 동일한 제품이나 직경이 다른 용접 와이어를 사용하는 경우 공기중 Cr(VI) 농도 차이를 비교한 결과, 1.2 mm 용접 와이어의 경우 0.0015 mg/m³, 1.4 mm의 경우에는 0.0021 mg/m³으로 나타나 직경이 클 경우 약간 높은 경향을 보이나 두 값간에는 통계적으로 유의한 차이는 없었다(p>0.05). 일반적으로 직경이 큰 경우 공기 중에 발생하는 fume 양은 많은 것으로 알려져 있으나(ACGIH, 1984), 대상 용접봉에는 크롬이 함유되지 않았고 또한 작업량등 작업조건에 있어 차이가 있어 직경에 따른 농도차이가 뚜렷하지 않았던 것으로 판단된다.

직경 1.2 mm 'Dualshield 7100' 와이어를 사용하는 작업장(welding shop D)의 Cr(VI) 농도는 평균 0.0026 mg/m³(범위 0.0016-0.0068 mg/m³)로 다른 부서보다 높은 경향을 보이나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(p>0.05). 그러나 앞에서 언급한 바와

같이 총크롬 농도는 다른 부서보다 유의하게 높았다.

Table 2는 용접 근로자의 Cr(VI) 노출농도(8 hr-TWA)를 각 물질의 노출기준과 비교하여 평가한 결과이다. MIG/연강 용접근로자의 Cr(VI) 노출농도(8 hr-TWA)는 평균 0.0018 mg/m³로 우리나라 노동부 노출기준(0.05 mg/m³)과 ACGIH의 TLV(0.01 mg/m³)보다 낮았으나 NIOSH의 REL(0.001 mg/m³)의 값보다는 높은 수준이었다. 대상 근로자중 노출농도가 노동부의 노출기준이나 ACGIH TLV를 초과하는 근로자는 없었으나 NIOSH REL을 초과하는 근로자 수는 87.5%였다.

3) 공기중 Ni 농도

Ni는 대부분의 연강에는 0.03% 정도 함유되어 있어 용접중에 발생되리라 예측되었지만 작업공간에서 채취한 약 500 L의 공기 중에 존재하는 Ni의 양은 일부시료를 제외하고는 대부분 검출한계 미만(<0.005 mg/m³)으로 나타났다(Table 1 참조). 가장 높은 농도는 0.044 mg/m³이었으나 노동부 노출기준 1 mg/m³는 물론 ACGIH TLV 0.2 mg/m³에도 미달하였다. 그러나 이 시료를 포함한 3개 시료가 NIOSH REL 0.015 mg/m³을 초과하였다.

3. MMA/연강 용접중 공기중 총크롬, Cr(VI) 및 Ni 농도

Table 3은 연강을 MMA 용접(MMA/연강 용접)

Table 2. Time-Weighted Average Concentrations of Cr(VI) and Number of Personal Samples Exceeding the Occupational Exposure Limits during MIG Welding on Mild Steel

Workplace/Electrode	N	Cr(VI) Conc., mg/m ³ (8hr-TWA)		No. of Samples Exceeding the Standard	
		GM	Range	MOL & ACGIH	NIOSH
Inside ship section/ Supercored 71, 1.2ø	9	0.0018	0.0008-0.0038	0	8 (88.9) ^a
Welding shop A& B/ Supercored 71, 1.2ø	6	0.0014	0.0010-0.0025	0	5 (87.5)
Welding shop C/ Supercored 71, 1.4ø	4	0.0035	0.0004-0.0050	0	3 (75.0)
Welding shop D/ Dualshield 7100, 1.2ø	5	0.0026	0.0016-0.0041	0	5 (100)
Total	24	0.0018	0.0004-0.0050	0	21 (87.5)

Note: N=Number of samples(All samples were collected inside welding helmets or shields); 8hr-TWA=8-hour time weighted average; GM=Geometric mean; MOL=Korean Ministry of Labor (the standard: 0.05 mg/m³); ACGIH=American Conference of Governmental Industrial Hygienists(the Threshold Limit Value: 0.01 mg/m³); NIOSH=National Institute for Occupational Safety and Health(the Recommended Exposure Limit: 0.001 mg/m³)

^aPercent

Table 3. Airborne Cr(VI) and Ni Concentrations within Breathing Zone inside Helmet during MMA Welding on Mild Steel* at Welding Shop B & C

Metal	Concentration in Air			
	N	GM, mg/m ³	Range, mg/m ³	GSD
Total Cr	3	0.0010	0.0010-0.0011	1.1
Cr(VI)	6 ^a	0.0013	0.0006-0.0043	2.1
Ni	3	N.D. ^b		

Note : N=Number of samples; GM=Geometric mean; GSD=Geometric standard deviation

*The electrodes used were 'S-7028' and 'S-7016'.

^aThe values of 3 samples were greater than the Recommended Exposure Limit of National Institute for Occupational Safety and Health.

^bN.D.=Lower than the limit of detection (0.005 mg/m³)

중 근로자의 호흡위치에서 측정된 공기중 Cr(VI), 총크롬 및 Ni 농도를 나타낸 것이다. 이 용접 작업 중 공기중 Cr(VI) 농도의 기하평균은 0.0013 mg/m³로 NIOSH REL을 초과하는 수준이었으나 Ni 농도는 모두 검출한계 미만이었다. 6개의 시료중 Cr(VI)에 대한 노동부 노출기준 및 ACGIH TLV를 초과하는 시료는 없었으나 3개 시료는 NIOSH

기준을 초과하였다. 사용 용접봉은 2종이었고 이들을 SEM/EDS로 분석한 결과, 크롬이 검출되지 않았던 것으로 보아 공기중 크롬은 철판중에 함유된 미량의 크롬으로부터 유래된 것으로 판단된다.

4. MIG/스테인레스강 용접중 공기중 총크롬, Cr(VI) 및 Ni 농도

Table 4는 스테인레스강을 MIG 용접(MIG/스테인레스강 용접)에서의 근로자 호흡위치에서 공기중 Cr(VI), 총크롬 및 Ni 농도를 측정된 결과이다. 이 용접작업 중 공기중 총크롬 농도는 평균 4.02 mg/m³이었으며 최고 농도는 9.75 mg/m³이었고, 4개 시료 모두 0.05 mg/m³를 초과하였다. 이와 같이 공기중 Cr 농도가 높은 이유는 스테인레스강과 스테인레스강 용접와이어에 비교적 높은 함량으로 존재하는 Cr이 용접 중에 공기 중으로 다량 발생하기 때문이다.

총크롬과 동시에 측정된 공기 중 Cr(VI) 평균 농도는 0.13 mg/m³(0.04-0.94 mg/m³)로 노동부 노출기준 및 ACGIH TLV를 초과하는 수준이었다. 이 용접 작업중 측정된 5개 시료중 0.05 mg/m³를 초과하였다. 특히 fume 발생위치에서 3-15분 동안 채취한 시료의 Cr(VI) 농도는 평균 0.49 mg/m³로 매우 높은 수준이었다.

Table 4. Airborne Concentrations of Total Cr, Cr(VI) and Ni during MIG Welding on Stainless Steel* at Welding Shop D

Metal	Breathing zone(Personal sample)				Source^(Area sample)			
	N	GM, mg/m ³	Range, mg/m ³	GSD	N	GM, mg/m ³	Range, mg/m ³	GSD
Total Cr	4	4.02	1.19-9.75	2.6	1	26.4	-	-
Cr(VI)	5	0.13	0.04-0.94	3.8	4	0.49	0.14-2.00	3.2
Ni	4	0.86	0.22-2.02	2.6	1	1.05	-	-

Note: N=Number of samples; GM=Geometric mean; GSD=Geometric standard deviation

*The electrodes used were 'Shield Bright 309 MOL' and 'Shield Bright 316L'.

^Sample was collected for 3-15 minutes at 20 cm distance from welded surface.

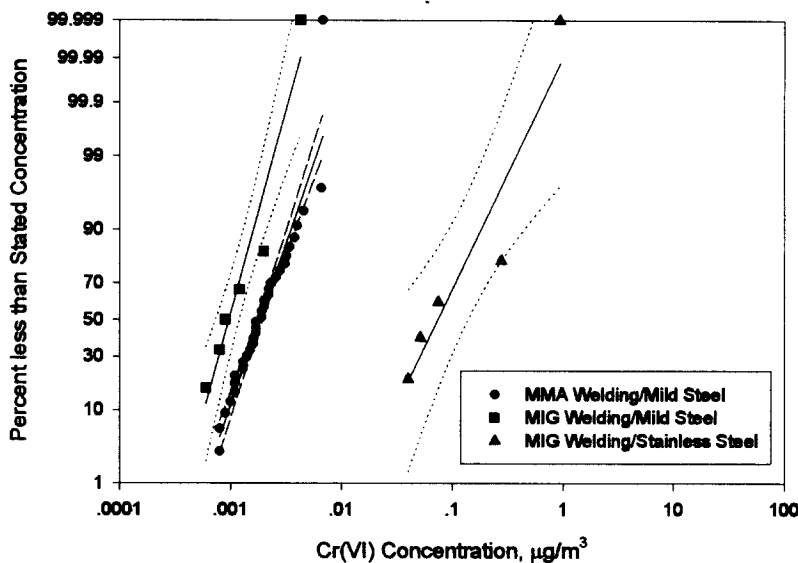


Fig. 3. Distribution of airborne Cr(VI) concentrations by welding type.

근로자 호흡위치에서의 평균 Ni 농도는 0.86 mg/m³로 노동부 노출기준 1 mg/m³에는 미달하였으나 ACGIH TLV 0.2 mg/m³를 초과하는 수준이었다. 근로자 호흡위치에서 측정된 4개 시료 모두 ACGIH TLV를 초과하였고 노동부 기준을 초과하는 시료는 2개였다. 발생원에서 측정된 Ni이 단시간 농도는 1.05 mg/m³으로 나타나 스테인레스강 용접시 비교적 높은 농도의 Ni이 공기 중으로 발생하는 것을 알 수 있었다. Ni은 SEM/EDS 분석결과에 의하면 용접 와이어에 약 7%, 스테인레스강에 약 9% 정도로 함유되어 있는 것으로 나타나 근로자는 용접중 고농도의 Ni에 노출될 수 있다. 한편, 용접재료 중 Cr 및 Ni의 함량 비에 비해 공기 중 두 금속 농도 비의 차이가 더 큰 것으로 나타났는데, 이것은 Cr의 증기압이 높아 공기중으로 발생하는 Cr fume의 비율이 상

대적으로 높기 때문인 것으로 생각된다.

5. 용접형태별 Cr(VI)농도 비교

Fig. 3은 용접형태별 공기중 Cr(VI) 농도 분포를 비교한 것이다. Cr(VI) 농도는 MIG/스테인레스강 > MIG/연강 > MMA/연강 순으로 높았다. 스테인레스강 용접에서의 공기중 Cr(VI) 농도는 연강 용접에서보다 약 100배 정도 높은 수준이었다. MIG/연강 용접에서의 Cr(VI) 농도는 MMA/연강 용접에서보다 약간 높은 경향을 보이나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(P>0.05). MIG 용접작업에서 Cr(VI) 농도가 약간 높은 경향을 보인 것은 MMA 용접보다 MIG용접에서 용접와이어 소모량이 많기 때문인 것으로 보인다. MMA 용접작업은 간헐적으로 이루어지기 때문에 공기중 fume 발생량이 상대

Table 5. Ratio of Cr(VI) Concentration to Total Chromium Concentration in MIG Welding on Mild or Stainless Steel

Sampling Site	Type of Steels and Electrodes	No. of Sample Pairs	Range of Cr(VI) Conc., mg/m ³	Range of Total Cr Conc., mg/m ³	Ratio of Cr(VI) to Total Cr, %
Inside ship section	Mild/Supercored 71 (dia. 1.2mm)	4	0.0013-0.0020	0.0014-0.0050	56.4±24.6 ^a
Welding shop A & shop B	Mild/Supercored 71 (dia. 1.2mm)	3	0.0008-0.0019	0.0039-0.0048	29.8±9.5
Welding shop C	Mild/Supercored 71 (dia. 1.4mm)	4	0.0004-0.0040	0.0005-0.0410	41.5±37.8
Welding shop D	Mild/Dualshield 7100 (dia. 1.2mm)	5	0.0017-0.0066	0.0146-0.0883	9.7±3.6
Total		16	0.0004-0.0066	0.0005-0.0883	35.5±28.5
Welding shop D	Stainless/Shield Bright MOL 309&316L (dia. 1.2mm)	4	0.08-2.0	1.20-26.4	8.4±1.5

^aArithmetic mean ± standard deviation

적으로 적었다. 두 용접형태간 총 크롬 농도는 유의한 차이가 있었다(P<0.05).

6. 총크롬 농도에 대한 Cr(VI) 농도 비

Table 5는 각 부서별에서 MIG/연강 용접 및 MIG/스테인레스강 용접중 동시에 짝을 지어 채취한 총크롬에 대한 Cr(VI) 비를 나타낸 것이다. 총크롬에 대한 Cr(VI) 농도 비 값의 분포는 정규분포를 하므로 산술평균을 구하였다.

연강을 MIG 용접할 때 발생하는 공기 중 총크롬 농도에 대한 Cr(VI) 농도 비의 전체 평균은 35.5%였다. D 작업장에서의 농도 비는 평균 9.7%로 다른 네 작업장의 농도 비(평균 47.2%)보다 유의하게 낮았다(p<0.01). D 작업장은 다른 종류의 용접 와이어를 사용하였으며 작업조건에 있어서 큰 차이가 없었으나 농도비가 크게 다른 것으로 보아 Cr(VI)의 발생을 저해하거나 생성된 Cr(VI)의 환원을 촉진하는 요인이 존재하는 것으로 추정된다.

MIG/스테인레스강 용접에서 동일 근로자 및 동일 장소에서 동시에 측정된 총크롬에 대한 Cr(VI) 농도 비는 평균 8.4%, 최소값 6.3%, 최대값 9.7%로 나타났다. 이 용접공정에서의 총크롬중 Cr(VI) 비율은 'Supercored 71'을 사용한 연강/고장력강 MIG 용접공정의 값(평균 47.2%)과는 차이가 있었다. 그러나 스테인레스강 용접 작업이 있던 작업장소와 인접한 위치에서 'Dualshield 7100'을 사용하

여 연강을 MIG 용접하는 작업에서 측정된 두 금속의 농도 비(평균 9.7%)와 유사하였다.

MMA/연강 용접중 Cr(VI) 농도가 총크롬 농도보다 약간 높은 경향을 보이는데, 시료채취대상 근로자 및 채취시간 등이 서로 다르고 또한, MMA 용접 전극에 존재하는 Ca이 생성된 Cr(VI)과 결합하여 안정한 형태로 유지되기 때문에 Cr(VI)의 비율이 높은 것으로 추정된다. Gray et al.(1983)은 MMA 용접에서는 용접전극에 존재하는 염기성 금속의 작용으로 Cr(VI) 비율이 높다고 보고한 바 있다.

IV. 고 찰

ACGIH(1995)에서는 용접공정에서 발생된 Cr(VI)을 비수용성 Cr(VI) 화합물(insoluble Cr(VI) compounds, not otherwise classified)로 규정하고 있다. 그러나 Pedersen et al.(1987)은 용접 fume에 존재하는 Cr(VI)은 대부분 수용성 형태이고 비수용성 형태는 매우 적은 양(약 0.5%)이라고 보고하였다. Stern(1977)은 MMA/스테인레스강 fume에 존재하는 총크롬중 수용성 Cr(VI) 함량은 67-92%였다고 보고하였다 이들 연구에 의하면 용접중 발생하는 fume에는 수용성 Cr(VI)의 비율이 높다는 것을 알 수 있다. Cr(VI) 화합물은 수용성 비수용성 여부에 관계없이 암을 유발하는 물질이나 수용성 및 비수용성 Cr(VI)이 인체에 미치는 독성학적인 차이에 대한 자

료는 충분하지 않으며 각 형태의 측정방법에 대한 명확한 기준도 없다(Perderson et al., 1987). 앞으로 용접공정에서 발생하는 수용성 및 비수용성 Cr(VI) 화합물의 측정방법 확립, 용접 fume 중 Cr(VI) 용해도 특성, 이들 형태의 독성학적인 차이, 특히 발암성 위험도의 차이에 대한 연구가 필요하다고 본다. 두 형태의 독성차이가 뚜렷하다면 각 형태의 Cr(VI)을 구분하여 평가하는 것이 바람직하다.

ACGIH(1998)에서는 금속 Ni, 수용성 Ni 화합물 및 비수용성 Ni 화합물에 대한 TLV를 다르게 설정하고 있는데, 이들 중 비수용성 Ni 화합물만을 인체발암물질(A1)로 규정하였고 TLV를 0.2 mg/m³로 설정하고 있다. 이와 같이 용접 fume 중에 존재하는 Ni의 건강위험과 평가기준은 Ni의 존재형태 또는 수용성에 따라 다르므로 근로자 노출 평가시 이러한 점을 고려하여야 한다. 비수용성의 Ni 화합물에는 nickel oxide(NiO, Ni₂O₃), nickel carbonate(Ni₂CO₃), nickel subsulfide(Ni₃S₂) 등이 포함되며, 수용성의 Ni 화합물에는 nickel chloride, nickel sulfate, nickel nitrate 등이 포함된다(ACGIH, 1995). Voitkevich(1995)는 스테인레스강 용접 흠에 존재하는 Ni의 형태는 대부분 NiO 형태로 존재하며 금속 Ni도 일부 존재할 수 있으나 그 양은 극히 적은 양이라고 하였다. 용접공정에서의 Ni의 존재형태, 수용성 및 독성에 대한 자료는 불충분하므로 이에 관한 연구가 필요하다. 또한 수용성 및 불용성 Ni를 구분해서 측정할 수 있는 방법이 개발되어야 할 것이다. 비수용성 Ni에 대한 ACGIH(1998)의 TLV는 0.2 mg/m³이므로 본 연구에서 MIG/스테인레스강 용접중 발생한 Ni이 비수용성이라고 가정했을 때 모든 시료가 Ni 노출기준을 초과하는 것으로 나타났다.

Karlsen et al.(1994)은 MMA/스테인레스강 용접중 선체내 근로자의 수용성 Cr(VI) 및 Ni의 평균 노출농도는 각각 0.140 mg/m³(0.004-0.640 mg/m³) 및 0.050 mg/m³(0.0028-0.150 mg/m³), 옥내 작업장 근로자의 경우 각각 0.012 mg/m³(비검출-0.084 mg/m³) 및 0.014 mg/m³(0.0055-0.039 mg/m³)로 보고하였다. 본 연구 결과 옥내에서 MIG/스테인레스강 용접중 근로자 호흡위치에서 측정된 공기중 Cr(VI) 및 Ni 농도는 Karlsen et al.(1994)이 보고한 값보다 높았다. Sjogren(1987)은 스테인레스강 용접

중 근로자의 평균 노출 농도는 0.11 mg/m³로 보고하였으며 본 연구결과와 유사하였다.

지금까지 용접공정에서의 Cr(VI) 노출위험은 주로 스테인레스강 용접에 대해서만 강조되어 왔다. 반면, 연강에는 일반적으로 Cr이 함유되지 않은 것으로 알려져 있으므로 이를 용접하는 근로자의 Cr(VI) 노출위험은 잘 인식되지 않았다. 그러나 Cr은 연강 용 용접 전극에는 함유되어 있지 않으나 취급되고 있는 대부분의 연강에는 0.03% 정도 함유되어 있었다. 본 연구결과 연강을 용접 하는 중 Cr(VI)이 발생되며 용접 작업자는 저 농도의 Cr(VI)에 노출될 수 있는 것으로 나타났다. 연강 용접중 발생하는 Cr(VI)은 연강에 미량 함유된 Cr에 기인하는 것으로 판단된다.

Gray et al.(1983)은 작업장에서 MIG/스테인레스강 용접중 유리섬유여과지로 동시에 채취한 총크롬에 대한 Cr(VI) 농도비는 평균 3.9%(3.5-4.8%)이고 임핀저에 채취한 시료의 경우 평균 13.2%(범위 10.3-18.5%)였다. Table 5에서 보듯이 본 연구에서는 MIG/스테인레스강 용접중 PVC 여과지로 측정된 Cr(VI)의 농도는 총크롬 농도의 8.4%(6.7-9.6%)로 나타났다. 이 값은 Gray et al.(1983)이 유리섬유여과지로 측정했을 때의 값보다 약 2 배 높았으나 임핀저로 채취했을 때의 값보다는 약간 낮았다. 본 연구에서는 시료채취 직후 알칼리로 처리하였기 때문에 운반 및 보관 중 PVC 여과지상의 Cr(VI)이 환원되는 것을 일부 방지한 것으로 추정된다. Karlsen et al.(1994)은 모재 중의 Cr 및 Ni 함량은 각각 20% 및 10%이지만 용접에 의해 발생된 fume에 존재하는 두 금속의 함량은 용접작업 장소간에 큰 차이가 있었다고 보고하였다. Cr(VI)의 발생량이나 Cr(VI)의 함량은 모재 종류 또는 조성, 용접전극 종류 또는 조성, 용접조건(용접전류, 전압, 자외선 발생량) 및 주위 환경에 존재하는 물질, 기후조건 등의 영향을 받으리라 추정되며 두 연구결과의 차이는 이러한 요인들의 차이에 기인하였다고 추측된다.

Table 5에서 보듯이 'Dualshield 7100' 용접와이어를 사용하는 부서(D)에서 MIG/연강 용접중 총크롬중 Cr(VI) 비율은 약 10%로 나타났다. 이 비율은 다른 MIG/연강용 와이어인 'Supercored 71'을 사용하는 용접중 나타난 비율(29.8-56.4%)보다 유의

하게 낮았다($p < 0.01$). 'Supercored 71' 용접와이어를 사용하는 부서에서의 Cr(VI) 비율이 높은 것이 용접와이어에 존재하는 Ca과 Cr(VI)이 결합하여 안정한 Cr(VI) 화합물이 형성되었기 때문으로 추정된다. 반면 'Dualshield 7100' 용접 와이어에는 Ca이 존재하지 않아 Cr(VI)의 환원이 많이 진행되었던 것으로 보인다. 피복아크 용접봉에 존재하는 Na, K, Ca이 Cr(VI)과 결합하여 Cr(VI)의 환원을 방지하며(Koponen, et al., 1981; Gray et al., 1983), Zn, Al, Mg과 같은 고활성 금속은 Cr(VI)의 발생과 환원에 영향을 미친다는 보고(Dennis et al., 1996)가 있다. 한편, MIG 용접중 Cr(VI) 함량은 지금까지 보고된 자료(Gray et al., 1983)에 비해 본 연구에서 얻은 결과는 비교적 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 Ca에 의해 Cr(VI)이 환원이 방지된 효과가 있지만, 염기성 용액(2% NaOH/3% Na₂CO₃)으로 추출중 일부의 Cr(III)이 Cr(VI)로 산화되었을 가능성도 배제할 수 없다. 용접 fume에 존재하는 Cr(VI)을 분석하기 위해 NIOSH(1994) 방법에 따라 여과지상의 Cr(VI)을 추출하는 과정에서 일부의 Cr(III)가 Cr(VI)로 환원되었다는 보고가 있다(Zatka, 1985; Pedersen et al., 1987).

MIG/연강 용접을 하는 부서중 한 부서(D)에서 다른 부서에 비해 총크롬 농도가 유의하게 높았으나 ($p < 0.05$), Cr(VI) 농도는 약간 높은 경향을 보이나 유의한 차이는 없었다($p > 0.05$). 이 부서의 경우 주변의 스테인레스강 용접으로부터 발생한 Cr의 영향을 받아 총크롬 농도가 높았으나, 총크롬 중 Cr(VI) 비율이 상대적으로 낮기 때문에 Cr(VI) 농도가 차이가 없게 나타난 것으로 보인다.

총크롬 농도에 대한 Cr(VI) 농도비는 MIG/연강 용접의 경우 약 35%였으나 MMA/연강 용접에서는 총크롬과 Cr(VI) 농도는 서로 비슷하였다. 일반적으로 MMA/스테인레스강 용접에서의 총크롬중 Cr(VI) 비율은 MIG/스테인레스강 용접에서보다 더 높은 것으로 알려져 있다(Gray, et al., 1983, Koponen, et al., 1981). 그 이유는 MMA 용접의 경우 피복용접봉에 함유되어 있는 Ca, K, Na과 같은 염기성 금속과 결합하여 안정한 Cr(VI) 화합물을 형성하나, MIG 용접의 경우 불활성가스가 크롬이 Cr(VI)으로 산화되는 것을 방지하고, 또한 chromate(CrO₄²⁻)를 형성할 수 있는 염기성 산화물

이 존재하지 않기 때문인 것으로 알려져 있다.(Gray, et al., 1983, Koponen, et al., 1981).

도금공정에서의 Cr(VI)에 의해 비중격천공이 발생한다는 사실은 널리 알려져 있으나(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1993), 국내 용접공정에서 비중격 환자가 발생한 사례는 세계적으로 처음 있는 일이다. 다만 Jindrichova(1978)가 0.75 mg/m³의 Cr에 노출되었던 스테인레스강 용접 근로자의 35%에서 비중격 미란(nasal erosion)이 관찰되었다고 보고한 바 있다. 국내에서 발견된 비중격천공 환자는 6명으로 이들이 용접에 종사한 기간은 12-21년이었다. 이들 중 1명은 경질도금작업을 1년 5개월 한 경력이 있었고 다른 1명은 스테인레스강 용접을 주로 한 경력이 있었다. 일반적으로 도금공정에서 Cr과 Ni에 의한 비중격 천공이 발생한 사례가 많이 보고되어 왔고(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1993), 대상 사업장의 스테인레스강 용접에서 공기중 Cr(VI) 및 Ni 농도가 각각 0.13 mg/m³ 및 0.86 mg/m³로 노출기준을 초과하는 수준으로 밝혀졌으므로 두 근로자에게서 발생한 비중격 천공은 Cr(VI)과 Ni에 의한 것이라고 강하게 추정된다. 한편, 두 사람을 제외한 4명은 연강 용접 부서에서만 종사한 것으로 알려져 있다. 본 연구결과 MIG/연강 용접 근로자의 Cr(VI) 노출 농도는 평균 0.0018 mg/m³, 공기중 Ni 농도는 대부분 검출한계 미만으로 나타나 이들이 연강 용접만 하였을 경우 Cr(VI)과 Ni의 노출 수준은 낮을 것이다. 그러나 이들 4명의 근로자가 현재 연강을 용접하고 있지만 과거에 간헐적으로 스테인레스강을 용접함으로써 고농도의 Cr(VI) 및 Ni에 노출되었을 가능성을 배제할 수 없다. 과거의 작업환경 측정자료에서 연강 용접 부서의 Cr 농도가 최고 0.26 mg/m³인 시료가 나타난 사실은 이와 같은 추정을 뒷받침해 준다. 또한 이들 대부분은 선체내 밀폐된 작업공간이 많은 선체건조부에서 작업을 하였을 뿐만 아니라 약 10년 전에는 보호구를 착용하지 않았기 때문에 예전에는 Cr을 비롯한 용접 fume에 고농도로 노출되었을 가능성이 높다.

한편, 비중격천공을 유발할 수 있는 물질로는 크롬산 제조공정, 도금공정 등에서 발생하는 크롬산이 가장 널리 알려져 있다. 이와 같은 사실에 근거할 때 용접 fume에 존재하는 물질중 Cr(VI) 비중격천

공 원인물질로 강하게 의심되나 fume에 존재하는 Ni등과 같은 다른 물질의 상가적인 영향도 배제할 수 없기 때문에 용접공에서의 비중격천공 원인 물질에 대해서는 현재로서는 단정짓기가 어렵다.

Gray et al.(1983)은 수용액을 담은 입편저에 채취한 시료의 농도가 여과지에서 채취한 시료보다 2-5배 정도 높았으며, 용접작업 중 근로자는 바로 생성된 fume에 노출되지만 여과지로 시료를 채취하는 과정에서 Cr(VI)이 환원되기 때문에 여과지로 시료를 채취하는 경우 실제 노출량을 과소 평가할 수 있다고 주장하였다. 본 연구에서는 PVC 여과지를 사용하여 Cr(VI) 시료를 채취하였기 때문에 Gray et al.이 주장에 근거하면 실제 근로자의 Cr(VI) 노출량은 본 연구결과보다 높을 것으로 예상된다. 입편저에 의한 방법은 Cr(VI)의 환원을 방지할 수 있으나 개인노출 평가에는 부적합하기 때문에 현재의 PVC 여과지법에 의한 측정결과를 보정하는 방안 및 새로운 시료채취매체의 개발에 대한 연구와 함께 용접공정에서 발생된 공기 중 Cr의 산화환원 특성에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 연강 및 스테인레스강을 MIG 용접하는 근로자를 대상으로 공기 중 Cr(VI)과 Ni 농도를 평가한 것이다. Cr(VI) 노출위험이 크다고 알려진 MMA/스테인레스강 용접에 대한 연구는 본 연구에서 제외되어 있으므로 이에 대한 연구가 필요하리라 본다. 앞으로 여러 업종의 용접공에 대한 Cr(VI)과 Ni 노출평가와 함께 용접작업과 폐암과의 연관성을 규명하는 역학연구가 수행되어야 할 것이다. 현재까지 용접 fume 또는 이중에 존재하는 Cr(VI) 및 Ni에 의한 폐암발생 위험이 강하게 제기되고 있으므로 이에 대한 적절한 대책이 요구된다.

V. 결 론

본 연구는 모 조선업체의 아크 용접공정을 대상으로 용접종류 및 용접조건에 따른 공기중 총크롬, Cr(VI) 및 Ni 농도 특성을 평가하였으며 본 연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 대상 업체에서는 MIG/연강 용접을 주로 실시하고 있었으며 이 용접중 공기중 총크롬 및 Cr(VI) 평균농도(GM)는 각각 0.0052 mg/m³ 및 0.0020 mg/m³이었다. 근로자 24명의 시간이

중 평균농도(TWA)는 평균 0.0018 mg/m³이었다. 공기중 Ni은 대부분 검출한계 미만이었으나 일부시료(n=3)에서 <0.015-0.044 mg/m³ 수준으로 검출되었다. 본 연구결과 조선업종에서 사용되는 대부분의 연강에 Cr과 Ni이 각각 0.03% 정도 포함되어 있어 용접작업중 Cr(VI)과 Ni이 저농도로 발생하는 것으로 나타났다.

2. MIG/스테인레스강 용접중 호흡위치에서 측정된 공기중 총크롬 농도는 평균(GM) 4.02 mg/m³이었고 Cr(VI) 농도는 평균(GM) 0.13 mg/m³로 스테인레스강 용접중 근로자는 고농도의 총크롬과 Cr(VI)에 노출되는 것으로 나타났다. MIG/스테인레스강 용접중 공기 중 Ni 농도는 평균 0.86 mg/m³로 나타났다.
3. 총크롬에 대한 Cr(VI) 농도 비는 MIG/연강 용접의 경우 평균 35.5%, MIG/스테인레스강 용접의 경우 평균 8.4%로 나타났다. MIG/연강 용접 부서중 한 부서는 다른 부서에 비해 농도 비가 유의하게 낮았다(p<0.05). 부서별 총크롬중 Cr(VI) 비율차이는 주위 환경조건, 용접재료, 용접조건 등의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 특히 MIG/연강 용접에서 Cr(VI) 비율이 높은 이유는 용접 와이어에 함유되어 있는 염기성 금속인 Ca과 반응하여 안정한 형태의 Cr(VI) 화합물이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.
4. 본 연구결과 용접 작업자는 Cr(VI) 및 Ni에 노출되기 때문에 이 조선업체에서 발생한 비중격천공은 이들 물질에 의해 유발되었을 가능성이 가장 높으나 용접 재료 및 용접 fume에는 매우 다양한 물질이 함유되어 있기 때문에 현재로서는 이들의 복합적인 영향을 배제할 수 없다. 용접공정에서의 비중격천공 위험과 그 원인물질에 대한 정보가 부족하므로 앞으로 이에 대한 추가적인 독성 및 역학 연구가 필요하다.
5. 스테인레스강 용접에서는 고농도의 Cr(VI)과 Ni이 발생되며 연강 용접시에도 모재에 이들 금속이 미량 함유되어 있는 경우 저농도의 Cr(VI)과 Ni이 공기 중 발생하는 것으로 나타났다. 이들은 폐암 및 비중격천공 유발 위험이 있는 물질로 의심되므로 이러한 건강장해를 예

방하기 위해 이들 물질에 대한 노출 관리가 필요하다.

REFERENCES

곽영순, 백남원: 모 조선조의 밀폐된 작업장에서의 공기 중 용접흄 및 중금속 농도에 관한 조사연구. 한국산업위생학회지 1997; 7(1): 107-126.

노동부: 화학물질 및 물리적인자의 노출기준. 노동부고시 제97-65호, 노동부, 1998.

산업보건연구원: 용접사에서 발견된 비중격천공에 대한 역학조사결과보고서. 교육자료 센타 98-3-4,

산업보건연구원, 1998.

신용철, 이광용, 박승현, 이나루, 정지연, 박정근, 오세민, 문영환: 용접공정에서 발생된 공기중 흄의 조성과 농도에 영향을 미치는 요인에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1997; 7(2):181-195.

신용철: 도금공정 공기 중 6가 크롬의 환원 및 보정에 관한 연구. 서울대학교 보건대학원 박사학위논문, 1997; p. 80.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry : Toxicological Profile for Chromium. Prepared by Syacuse Research Corporation and Clement International Corporation under Contract No. 205-88-0608. Atlanta, Georgia, U.S. Department of Health and Human Services, 1993.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH): Documentation of Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices, 6th ed.. ACGIH, Akron, OH, 1995.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH): Welding Health and Safety Resource Manual. ACGIH, Akron, OH, 1984.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH): 1998 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, and Biological Exposure Indices. ACGIH, Cincinnati, OH, 1998.

American Industrial Hygiene Association(AIHA): Welding Health and Safety Resource Manual. AIHA, Akron, OH, 1984; p. 19.

Beaumont, J.J. and N.S Weiss: Lung Cancer among Welders. J. Occup. Med. 1981; 23(12): 839-844.

Dennis, J.H., M.J. French, P.J. Hewitt, S.B. Mortazavi and C.A.J. Redding: Reduction of Hexavalent Chromium Concentration in Fumes From Metal Cored Arc Welding by Addition of Reactive Metals. Ann. Occup. Hyg. 1996; 40(3): 339-344.

Gray, C.N., A. Goldstone, P.R.M Dare, P.J. Hewitt: The Evolution of Hexavalent Chromium in Metallic

Aerosols. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1983; 44(6):384-388.

Gerin, M., J. Siemiatycki, L. Richardson, J. Pellerin, R. Lakhani, R. Dewar: Nickel and Cancer Associations from a Multicancer Occupational Exposure Case-referent Study: Preliminary Findings. IARC Sci Publ 1984; 53: 105-115.

International Agency Research on Cancer(IARC): Chromium, Nickel and Welding. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemical to Humans. 1990; 49: 447.

International Agency Research on Cancer(IARC): Chromium and Chromium Compounds. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemical to Humans. 1990; 49: 49.

International Agency Research on Cancer(IARC): Nickel and Nickel Compounds. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemical to Humans. 1990; 49: 257.

Jindrichova, J.: Chromium-induced Injuries in Electric Welders(In German). Z Gesamte Hyg. Ihre Grenzgeb 1976; 24(2): 86-88.

Karlsen, J.T., G. Farrants, T. Torgrimsen, and A. Reith: Chemical Composition and Morphology of Welding Fume Particles and Grinding Dusts. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1992; 53:290-297.

Koponen, M., T. Gustafsson, P.L. Kalliomaki and L. Pyy: Chromium and Nickel Aerosols in Stainless Steel Manufacturing, Grinding and Welding. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1981; 42(8): 596-601.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards, DHHS(NIOSH) Pub. No. 94-116. Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 1994, pp. 70-73.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): Criteria for a Recommended Standard - Occupational Exposure to Inorganic Nickel. DHEW(NIOSH) Pub. No. 77-164. NTIS Pub. No. PB-274-201. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1977.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): Criteria for a Recommended Standard: Welding, Brazing, and Thermal Cutting. DHHS(NIOSH) Publication No. 88-110. NIOSH, Cincinnati, OH, 1988.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): Method 7600: Chromium, Hexavalent. In NIOSH Manual of Analytical Methods(NMAM), 4th Ed., Edited by P.M Eller, DHHS/NIOSH Pub. No. 94-113. Cincinnati, OH, NIOSH, 1994.

Pedersen, B., E. Thomsen, R.M. Stern: Some Problems in Sampling, Analysis and Evaluation of Welding Fumes Containing Cr(VI). *Ann. Occup. Hyg.* 1987; 31(3): 325-338.

Schoenberg, J.B., A. Stemhagen, T.J. Mason, J. Patterson, J. Bill, R. Altman: Occupation and Lung Cancer Risk among New Jersey White Males. *JNCI* 1987; 79(1): 13-21.

Sjogren, B.: A Retrospective Cohort Study of Mortality among Stainless Steel Welders. *Scan. J. Work. Environ. Health* 1980; 6: 197-200.

Sjogren, B., A. Gustavsson, L. Hedstrom: Mortality in Two Cohorts of Welders Exposed to High- and Low-levels of Hexavalent Chromium. *Scan. J. Work. Environ. Health* 1987; 13: 247-251.

Steenland, K., J. Beaumont, R. Hornung: The Use of Regression Analyses in a Cohort Mortality Study of

Welders. *J. Chron. Dis.* 1986; 39(4): 287-294.

Stern, R.M.: A Chemical, Physical and Biological Assay of Welding Fumes. In: *The Hungarian-Finnish-Scandinavian Symposium on Industrial Dust Problems*. Institute of Occupational Health, Helsinki 1977; 44-58.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA): Method 218.6: Determination of Dissolved Hexavalent Chromium in Drinking Water, Groundwater and Industrial Wastewater Effluents by Ion Chromatography. Cincinnati, OH, EPA, 1991.

Voitkevich V. : *Welding Fumes - Formation, Properties and Biological Effects*. Abington Publishing, Abington Hall, Cambridge CB1 6AL, 1995.

Zatka, V.J.: Speciation of Hexavalent Chromium in Welding Fumes Interference by Air Oxidation of Chromium. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J* 1985; 46(6): 327-331.