

## 플럭스 코어드 아크 용접 중 발생하는 총 크롬 및 6가 크롬의 함량 변화

노동환경건강연구소<sup>1)</sup>, 서울대학교 보건대학원<sup>2)</sup>, 한국생산기술연구원<sup>3)</sup>, 한국방송대학교<sup>4)</sup>  
윤충식<sup>1)†</sup> · 백남원<sup>2)</sup> · 김정환<sup>3)</sup> · 박동욱<sup>4)</sup> · 하권철<sup>2)</sup> · 최상준<sup>2)</sup> · 김신범<sup>1)</sup> · 채현병<sup>3)</sup>

### -Abstract-

### Content Variation of Total Chromium and Hexavalent Chromium in Flux Cored Arc Welding

Chung Sik Yoon<sup>1)†</sup> · Nam Won Paik<sup>2)</sup> · Jeong Han Kim<sup>3)</sup> · Dong Uk Park<sup>4)</sup>  
Kwon Chul Ha<sup>2)</sup> · Sang Jun Cho<sup>2)</sup> · Shin Bum Kim<sup>1)</sup> · Hyun Byung Chae<sup>3)</sup>

*Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health, School of Public Health,<sup>1)</sup>  
Seoul National University<sup>2)</sup>, Korea Institute of Industrial Technology<sup>3)</sup>,  
Department of Environmental Health, Korea National Open University<sup>4)</sup>*

The practice of welding stainless steel is known to produce various valance states of chromium. CO<sub>2</sub> flux cored arc welding on stainless was performed in fume collection chamber. Content of total chromium and hexavalent chromium in fumes, content of hexavalent chromium in total chromium, solubility of hexavalent chromium were investigated.

Content of total chromium in fumes increases from 2~3% to 7~9% as a function of input energy, but hexavalent chromium, less than 1.2% in fumes, is not related to input energy. Hexavalent chromium in fumes exists as solubles up to 90%.

Content of total chromium in flux cored arc welding fumes and solubility of hexavalent chromium are similar to shielded metal arc welding fumes, but content of hexavalent chromium is similar to metal inert gas welding fumes. These characteristics are relevant to flux of wires and CO<sub>2</sub> shielding gas.

**Key Words** : hexavalent chromium, flux cored arc welding, fume generation rate, alkaline extraction, ion chromatography

접수일 : 1999년 8월 16일, 채택일 : 2000년 1월 26일

† 교신저자 : 경기도 구리시 인창동 527-44, 노동환경건강연구소

Tel) 0346-550-1063, Fax) 0346) 550-1173, E-mail) csyoon@yahoo.com

## 1. 서 론

용접 작업 중 발생하는 유해인자는 흠, 가스 및 증기, 열, 소음으로 대별할 수 있다(Burgess, 1995). 이 중에서 산업보건학적으로 주요 관심사는 용접 흠의 농도와 구성성분에 관한 것이다(Orr, 1993; Zakhari and Strange, 1983). 특히 6가 크롬은 발암성 때문에 용접 작업에서 6가 크롬을 정확히 측정 분석하려는 연구와 흠 중 6가 크롬을 감소시키려는 연구가 지속되고 있다.

흠 중 6가 크롬을 감소시키기 위해서는 발생하는 흠의 총량을 감소시키므로써 흠 중에 함유된 크롬도 같이 감소시키는 방법과 흠 중에 함유된 크롬의 함량만을 감소시키는 방법이 있으며 이 두 가지 관점에서 연구가 진행되고 있다. 어느 방법을 적용하더라도 흠의 발생 특성을 이해하고, 6가 크롬의 특성을 규명하는 것이 선행되어야 한다.

지금까지의 용접 흠 생성기작에 관한 연구(Hewitt and Hirst, 1993)와 용접 흠의 발생량에 영향을 미치는 용접 조건에 관한 연구(Voitkevich, 1995; AWS, 1987; AIHA, 1984; Zakhari and Strange, 1983)를 통하여 제시되고 있는 용접 흠 발생 주요 조건은 용접의 종류, 용접재료(주로 용접봉 또는 와이어), 용접 조건, 모재, 주위 환경(기류, 온도, 공간의 크기)으로 크게 분류할 수 있다. 이중 용접 조건은 다시 사용전류, 전압 또는 아크길이, 전류의 극성, 보호가스, CTWD(contact tube to workpiece distance), 금속 이행현상으로 구분할 수 있는데 용접 흠의 발생에는 용접 전류가 가장 큰 영향을 미친다.

그러나 이들 변수들은 상호 의존적이어서 흠 발생량과 각 변수와의 상관관계를 고찰하는 것은 쉽지 않다(AWS, 1987; AIHA, 1984). 예를 들어 고전류 조건에서는 고전압을 사용하며, 고전압에서는 아크 길이가 길어지고, CTWD도 증가하게 된다. 또한 흠 발생에 영향을 주는 금속 이행현상도 전류의 세기와 밀접하게 연관되어 있다.

일반적으로 피복 금속 아크 용접(Shielded Metal Arc Welding; SMAW)과 플럭스 코어드 아크 용접(Flux Cored Arc Welding; FCAW)에서 흠 발생량이 가장 많은 것으로 보고되고 있다(Palmer and Eaton, 1994; Palmer, 1983). 흠 중의 금속성분은 모재보다 용가재(filler material)에서 많이 발생하는데(Palmer and Eaton, 1994; Palmer, 1983), 85 % 정도가 용가재에서 발생하고 15 %미만이 모재에서 발생한다(Voitkevich, 1995).

SMAW나 가스 금속아크 용접(Gas Metal Arc Welding; GMAW)의 흠 발생 특성과 6가 크롬에 대한 연구도 수행되었다. 스테인레스 강에 대한 SMAW는 GMAW보다 많은 양의 크롬을 발생시키는 것으로 보고되어 왔고(Ulfvason, 1981) 용접 종류에 따른 6가 크롬의 형성, 6가 크롬의 수용성 여부 등 크롬의 특성을 설명하고자 하는 연구가 있었다(Palmer, 1983). 또한 SMAW에서 슬래그 중의 크롬의 산화, 크롬과 피복재의 알카리 산화물과의 반응에 의한 6가 크롬의 수용성을 설명하였고, MIG(Metal Inert Gas)용접에서 산소의 결핍과 알카리 산화물의 부재로 수용성 6가 크롬이 소량으로 존재하거나 존재하지 않고 대부분 불용성으로 존재함을 설명하기도 하였다(Koponen et al., 1981).

용접의 종류나 용가재에 따라 대개 용접 조건이 설정되어 있고 용가재 제조회사는 대개 용가재의 종류에 따라 적절한 전류와 전압을 제시하고 있다(대한 용접 학회, 1998). 그러나 사업장에서는 생산성을 높이기 위해 적정조건보다 높은 전류·전압을 사용하는 것이 일반적이다.

흠 발생량에 대한 전류 및 전압의 영향은 많은 연구가 이루어졌으나 흠 중에 존재하는 총 크롬 및 6가 크롬의 함량과 전류와 전압이 미치는 영향과의 상관관계를 파악하고자 하는 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 우리 나라 산업현장의 용접작업에서 이루어지고 있는 작업의 일반성을 고려하여 널리 사용되고 있는 CO<sub>2</sub> 플럭스 코어드 아크 용접을

대상으로 전류 및 전압의 변화에 따른 총 크롬 및 6가 크롬의 함량 변화를 규명하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1) 시료의 채취

이 연구에 사용된 용접 흠 발생 및 채취장치는 그림 1에서 제시한 것과 같이 자동과 수동 용접을 할 수 있고 단위 시간당 용접 흠 발생량을 측정할 수 있도록 고안되었다. 이 장치는 용접시간, 용접길이, 와이어 송급속도, 용접속도, 토치각도, CTWD(Contact Tube to Workpiece Distance) 및 흠 채취시간을 변화시키면서 각 변수를 모니터링 할 수 있도록 설계되었다(한국생산기술연구원, 1998; 채현병 외, 1998). 용가재의 종류 및 용접 조건은 표 1과 같다. 주된 변수인 전류와 전압을 동시에 표현하기 위하여 입열량(J, 주열(J)=전류(I)·전압(V)·용접시간(sec))으로 표시하였다.

한 용접조건에서 6가 크롬 분석용 시료 3개와 총 크롬을 포함한 금속 분석용 시료 3개를 동시에 채취하기 위하여 PVC 여과지(GLA-5000, poresize 5  $\mu$ m, diameter 37 mm, Gelman Sciences, USA)가 장착된 카세트 홀더와 셀룰로스 막 여과지(pore size 0.8  $\mu$ m, diameter 37 mm, Millipore, USA)가 장착된 3개의 카세트 홀더를 오리피스(nominal flow 2 L/min, 자체제작)와 Y자관을 이용하여 연결한 다음 진공펌프(Model DOA-V152-AA, Waters, USA)를 이용하여 각 여과지에서 2.0 $\pm$ 0.1 L/min으로 시료채취가 되도록 고안하였다. 각 여재에서의 유량은 시료채취 전후로 보정하였다. 채취한 PVC 여과지는 바로 원심분리 튜브에 넣어 냉장운반 및 저장하였다. 중금속 분석을 목적으로 채취한 셀룰로스 여과지는 상온에 저장하였다. 용접 흠 중 6가 크롬 및 총 크롬의 함량은 무게 함량비로 표시하였다.

용접 흠의 총량은 NIOSH 0500 방법을 적용하여 6가 크롬을 분석하기 위한 PVC여과지를 중량법으로 분석하였다. 시료는 수분의 영향을 제거하기 위

해 칭량 전후에 습도를 조절하였고 공시료로 보정하였다.

### 2) 크롬 및 6가 크롬의 분석

6가 크롬을 분석하는 데 있어 기존에 보고된 고온의 알카리 추출 방법은 3가 크롬이 6가로 산화가 많이 일어나는 방법이다(윤충식, 1999). 따라서 윤(1999)이 제안한 알카리 용액을 첨가한 후 45분동안 초음파(Model NS-300, Nihonseiki kaisha Ltd., Japan) 처리를 하여 6가 크롬을 추출하는 방법을 적용하였다. 구체적인 실험 순서는 다음과 같다.

- (1) 시료채취 후 즉시 원심분리 튜브에 넣은 PVC 여과지의 무게를 칭량한 후 5ml의 알카리용액(2% 수산화나트륨/3% 탄산나트륨)을 넣는다.
- (2) 고순도(99.995%이상)의 질소가스를 5분동안 추출액속에 흘려주어 용존산소를 제거한다.
- (3) 마개를 막아 공기의 흐름을 차단하여 공기 중 산소의 침입을 막고 초음파 처리(28kHz, 210W)를 45분동안 실시한다.
- (4) 위 용액을 50ml 용량의 원심분리 튜브로 옮기고 미리 질소가스를 흘려준 3차 증류수로 원래의 원심분리 튜브를 2 ~ 3차례 세척하여 50 ml의 원심분리 튜브에 합한다.
- (5) 증류수를 이용하여 최종 용량을 25ml로 한다.
- (6) 주사기 여과지를 이용하여 여과한 다음 분석에 이용한다.
- (7) 분석은 이온크로마토그래피를 이용하여 분석한다.
- (8) 원래의 PVC여과지는 남아있는 금속 및 크롬을 분석하기 위하여 마이크로파 오븐에 의한 회화 처리를 한다.

### 3) 총 크롬, 칼륨, 나트륨의 분석

용접을 할 때 발생하는 6가 크롬의 특성을 규명하기 위하여 각 용접조건에서 6가 크롬의 발생량뿐 아니라 용접 흠의 발생량, 총 크롬의 발생량도 측

Table 1. Welding conditions and materials for generating fume and chromium

Welding parameters	
Welding type and method	: Flux cored arc welding, beads on plate
Welding time(sec)	: 30
Shielding gas	: CO <sub>2</sub> (20 L/min)
Nominal voltage(V)	: 22, 25, 30
Nominal current(A)	: 120, 180, 230
Current characteristics	: DCEP(Direct Current Electrode Positive)
Welding machine	: Dyna Auto Super 600(Japan)
Electrode type	: C(SB 308L, 1.2 ∅ AWS/ASME SFA 5.22 E 308LT-1, KS D3612 YF 308LC, Alloy Rod Korea, Korea) S(CROMA CORE DW 329AP, Elga, Sweden) T(AVESTA FCW 2205H, AWS A5.22 E 2209 TO-4, USA) U(Esab OK Tubrod, USA), V(WEL FCW, 329J2L, Nippon Welding Rod CO., Japan) W(Shield Bright 308 Xtra, 1.2 ∅ AWS/ASME SFA 5.22 E 308LT-1, KS D3612 YF 308LC, Alloy Rod Korea, Korea)
Test plate	: SUS 304(260mm × 260mm × 10mm), Travel speed: 6mm/sec
CTWD	: 14 mm
Torch angle	: 90 °
Wire feeding rate	: 15.1 m/min

정하였다.

크롬은 칼륨이나 나트륨 성분과 화합물 형태로 존재한다고 보고되고 있으므로(Voikevich, 1995) 이들 금속성분의 함량 규명도 중요하다. 총 크롬을 포함한 칼륨, 나트륨 분석을 위하여 포집한 시료는 NIOSH 7300의 부록에 제시된 방법을 응용하여 전처리 한 다음 총 용량을 20 ml로 하여 유도결합플

라스마-광학발광분석기(ICP-OES)로 분석하였다. 크롬 및 다른 금속은 회수율을 보정하였다.

4) 용접 흠 중 크롬 및 6가 크롬의 평가  
용접 흠 중 총 크롬의 함량은 총 크롬 양을 흠 무게로 나누어 구하였다. 흠 중 6가 크롬 함량은 6가 크롬 양을 흠의 무게로 나누어 구하였다. 총 크

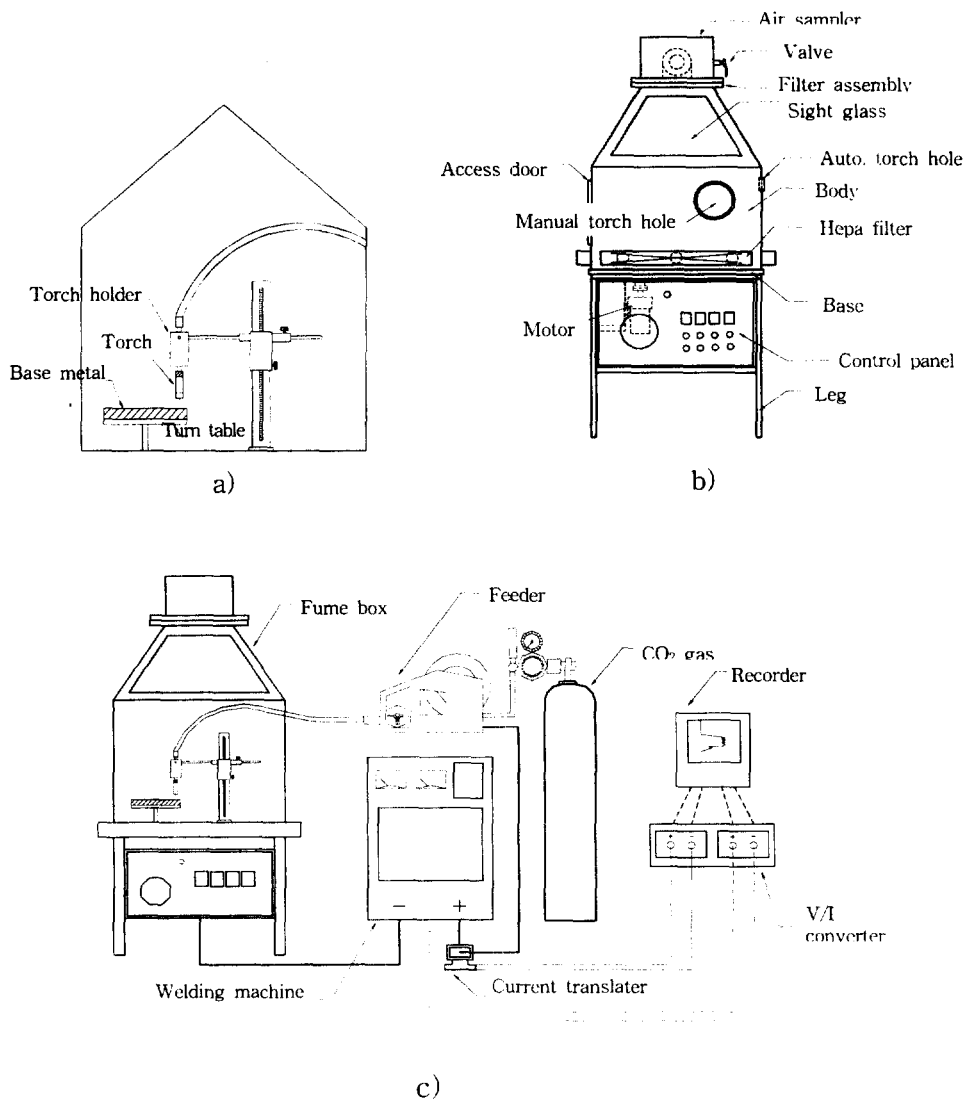


Fig. 1. Schematic drawing of the fume collection chamber which has the capability of exact control of welding conditions.

- a) internal view of fume collection chamber which shows the torch holder.
- b) external view of fume collection chamber.
- c) overall welding equipment and fume collection system.

크롬 중 6가 크롬의 함량은 6가 크롬 양을 총 크롬 양으로 나누어 구하였다. 6가 크롬 중 수용성 6가 크롬의 함량을 알기 위하여 위에서 설명한 6가 크롬의 전처리 방법 중 알카리 추출 용액대신 증류수를 이용하여 전처리 하였다. 증류수로 추출 후 나머지 크롬 양을 알기 위하여 증류수 추출 한 여과지는 다시 알카리 추출 용액으로 추출하여 잔류 6가 크롬 양 및 총 크롬 양을 구하였다.

### III. 결과 및 토의

#### 1) 용접 흠 중 총 크롬의 함량

용접 흠 중 총 크롬의 함량비는 표 2와 같다. 입열량, 즉 용접 전류와 전압이 증가하면서 단위시간당 흠 발생량(Fume Generation Rate; FGR)의 증가(윤충식과 백남원, 1999)보다 흠 중 크롬의 함량비는 더 증가하여 저 입열량 조건에서 흠 중 2~3%였던 총 크롬 양은 입열량이 증가하면서 9%까지 증가하고 있다. 이것이 의미하는 바는 입열량(전류와 전압)이 증가하면서 크롬이 다른 성분에 비해 흠 중으로 많이 전이된다는 것을 의미한다. 그러나 그 경향은 FGR처럼 일정하지는 않다. 그 이유는 흠에는 여러 구성성분이 존재하고 각각의 결합 형태와 증발열, 그리고 금속간의 복잡한 상호작용 때문에 일정한 경향을 기대할 수는 없다. 용접의 종류가 다르기는 하지만 SMAW에서도 전류가 증가하면 크롬의 함량이 증가한다고 보고되어 있다(Palmer, 1993).

입열량에 의한 금속의 증기압 증가만으로는 크롬의 함량비 증가를 설명할 수 없으며 각 금속간의 반응, 그리고 흠 입자의 크기와 금속의 흠 속에서의 위치, 다른 가스상 물질의 존재 등 복합적인 요인을 고려하여야 한다. 크롬 함량비 변화의 또 다른 중요한 요소는 용적의 이행형태이다. 저전류 영역에서는 단락이행(short circuit)이 일어나게 되지만 전류가 증가하면서 용적이 방울처럼 떨어지는 입상이행(globular transfer)이 일어나게 되는데 이

중간단계에서는 단락이행이 입상이행으로 천이되는 천이전류 구간이 존재한다(김정환과 채현병, 1997; Hewitt and Hirst, 1993).

본 연구에서 입열량이 중간인 곳(표 2에서 전류 180A, 전압 25 V 근처와 그림 2에서 x축의 중간부근)이 천이전류에 해당된다. CO<sub>2</sub> 용접에서는 스프레이 이행현상은 나타나지 않는다(대한용접학회, 1998). 단락이행현상이 일어나면 금속의 증발보다는 금속이 용적으로부터 폭발현상에 의한 떨어짐에 의해 공기 중으로 튀어나가는 결과를 유발하게 된다. 입상이행이 되면 용융된 용적이 용접 와이어 선단에 매달려 있다가 용융 풀로 떨어져는데 전압이 높을수록 용융 용적의 비행거리가 길어져 산화와 증발이 일어날 수 있는 시간이 길어지게 된다. 그러나 입상이행에서는 공기중으로 튀어나가는 현상보다는 증발에 의한 영향을 더 많이 받게 된다. 따라서 입열량이 작은 영역보다 큰 쪽에서 증발에 의한 영향이 크다고 할 수 있다. 천이전류에서는 이 두 가지가 혼합되어 진행되므로 일률적으로 적용하여 설명하기가 어렵다. 표 2에서 중간 입열량 부분에서 크롬 함량비의 변이가 큰 것도 천이전류 구간이기 때문이라고 판단된다.

표 3은 몇몇 연구자들이 보고한 용접 흠 중 존재하는 크롬 함량비를 요약한 것이다. 대부분의 연구자들은 용접 전류와 전압을 잘 기술하지 않음으로써 본 연구와 같은 전류·전압에 의한 경향을 파악하지 않고 용접의 종류에 따른 함량비만을 언급하고 있다. 또한 국내에서 많이 사용되는 CO<sub>2</sub> 용접에 대한 자료는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서 보는 것처럼 같은 종류의 용접이더라도 입열량이 증가하면서 흠 중 크롬의 함량은 크게 변하고 있다. 따라서 크롬의 발생에는 입열량이 큰 변수로 작용한다고 할 수 있다.

FGR 자료(윤충식과 백남원, 1999)와 표 2의 흠 중 크롬의 함량비 자료를 이용하면 크롬의 발생량을 다음식으로 계산 할 수 있다.

Table 2. Chromium content in fumes generated from several flux cored wires

Wire types	Current A	Voltage V	Total input energy kJ/min	No. of samples	FGR g/min		Total Cr content in fume, %	
					Mean	Sr	Mean	Sr
C	124	22.0	158	3	0.31	0.03	2.6	0.06
	182	24.3	258	3	0.50	0.16	7.3	0.25
	230	30.5	412	3	0.85	0.02	7.0	0.07
S	123	22.3	158	3	0.28	0.04	1.6	0.18
	176	25.3	260	3	0.50	0.01	7.5	0.29
	235	30.0	414	3	0.79	0.01	8.0	0.44
T	121	22.3	154	3	0.34	<0.01	1.6	0.07
	187	25.1	274	3	0.70	0.04	2.8	0.57
	231	30.0	408	3	1.16	0.04	6.6	0.37
U	120	22.2	154	3	0.19	0.01	2.0	0.24
	187	25.3	272	3	0.39	0.03	8.1	0.53
	224	29.9	392	3	0.68	0.03	5.7	0.36
V	116	22.0	146	3	0.31	0.05	2.6	0.44
	180	25.0	264	3	0.65	0.01	4.3	0.26
	228	29.9	400	3	1.07	0.03	6.3	0.18
W	123	22.4	160	3	0.24	0.01	2.4	0.44
	184	24.9	275	3	0.50	<0.01	2.6	0.22
	219	25.4	334	3	-	-	5.1	0.03
	230	29.8	404	3	0.81	0.04	5.5	0.16

Note : Total input energy(kJ/min) described above is monitored by 'Arc Monitoring System 4.01' and has some different values from calculating using voltage and current.

$$FGR_{Cr} = FGR \times C_{Cr}$$

여기서

$FGR_{Cr}$  : 크롬의 단위시간당 발생량, mg/min

$C_{Cr}$  : 흠 중 크롬의 함량비율

그림 2에서 보듯이 입열량이 작은 저전류·저전압 조건일 때는 크롬의 단위시간당 발생량이 3.8 ~ 8.3 mg/min였는데 입열량이 중간 범위일때 발생량이 급격히 증가하여 12.8 ~ 37.3 mg/min이었다. 입열량이 가장 높은 조건에서는 38.8 ~ 76.5 mg/min이었다. 각 와이어별로 저입열량에서 중간 입열량으로 변화할 때 크롬의 발생량 증가비는 평균 5.06(범위 2.16 ~ 8.53)배 증가하였고 중간 입열량 조건에서 높은 입열량 조건으로 변할 때 크롬의 발

생량 증가비는 2.39(범위 1.61 ~ 3.88)배였다.

크롬 발생량 증가비가 차이가 나는 이유는 입열량뿐 아니라 입열량에 따른 용융금속의 이행현상 차이로 일부 설명가능하다. 저입열량(저전류·저전압) 조건일때는 단락 현상에 의해 금속의 이행이 일어나는데 이때는 표면적이 작기 때문에 증발되기가 힘들다. 그러나 천이 전류를 거쳐 입상이행이 일어나면 용적이 방울처럼 떨어지게 되어 용융 액적의 표면적이 상대적으로 커지게 된다. 따라서 급격한 증가가 예상된다. 또한 단락이행중일 경우는 플릭스가 녹지 않고 아크를 지나 직접 용융 플로우 이행할 수 있는데 이런 조건에서 플릭스의 구성성분이 증발될 기회는 상대적으로 적어지게 된다 (Voitkevich, 1995). 그림 2에서 보듯이 입열량에 따

Table 3. Chromium content of stainless steel welding fumes by several researchers

Researcher	Chromium contents, %		
	SMAW/SS	MIG/SS	FCAW/SS
Ulfvarson(1981)	4	8.3	-
French et al.(1983)	-	8.4 ~ 11.7	-
Voitkevich(1995)	0.5 ~ 7	8 ~ 25	2~5
Kimura et al.(1979)	4.9	15.8	-
Stern(1981)	3.8	9.8	-
Pedersen et al.(1987)	4.22±0.26	10.51±0.5	-
This Study(1999)	-	-	저전류·저전압 : 2~3 중전류·중전압 : 3~8 고전류·고전압 : 6~8

Note : The current and voltage are fixed in other study.  
Some researchers designated FCAW/SS to MIG/SS.

른 크롬의 발생량에 관한 함수의 지수값은 2.38로  
흡 발생량 함수의 지수값 1.19(윤충식과 백남원,  
1999)보다 커서 크롬의 발생량이 입열량에 따라 급  
격히 증가함을 알 수 있다.

2) 용접 흡 중 6가 크롬의 함량  
용접 흡 중 총 크롬 양은 입열량이 증가하면서 증  
가하는 경향을 나타냈다. 그러나 표 4에서 보듯이  
6가 크롬의 경우 약간의 변동은 있지만 거의 일정

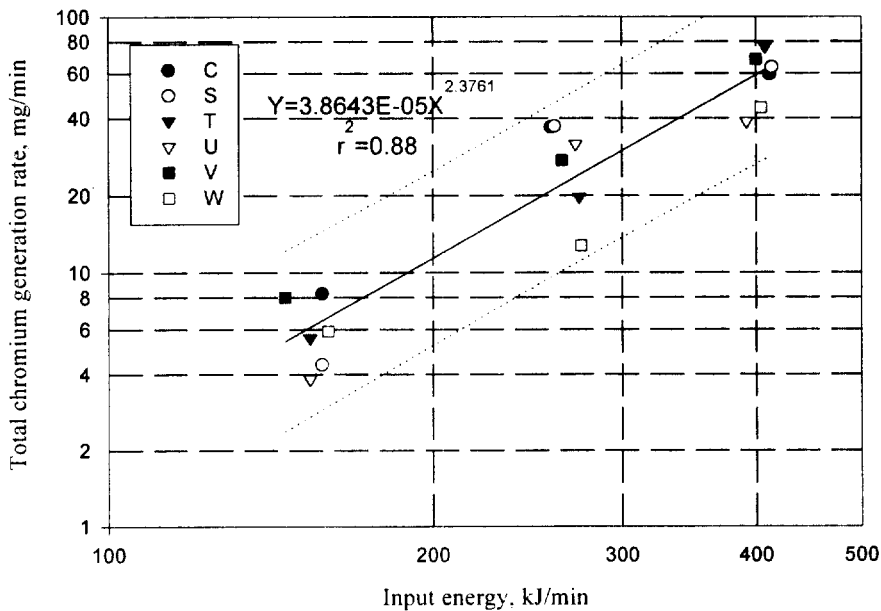


Fig. 2. Total chromium generation rates from flux cored arc welding as a function of input energy.



한 수준을 유지하고 있다. 즉, 용접 흠 양이 증가하면서 6가 이외의 다른 크롬의 양이 증가하거나, 6가 크롬이 비례적으로 많이 발생되더라도 빠른 환원기작에 의해 3가로 환원되는 것으로 추정할 수 있으며 이러한 경향은 다른 연구결과(Dennis et al., 1996)와 아주 유사하다.

그러나 용접 와이어 종류별로는 큰 차이가 있어서 흠 중 약 1% 정도가 6가 크롬으로 존재하는 종류가 있는 반면 국산 용접 와이어의 6가 크롬은 총 흠 양의 약 0.15 ~ 0.42%에 해당되었다. 이런 차이에 대한 원인은 더욱 연구되어야 할 분야이다.

용접 조건이 다소 다르기는 하지만 Dennis 등 (1996)은 전압이 증가(전압이 증가하면 입열량이 증가함)하면서 FGR이 증가한다고 하였고, 6가 크롬의 함량비는 약간 변동이 있지만 0.2% 수준을 유지한다고 하였다. 다른 논문에서도 본 연구에 사용된 플럭스 코어드 와이어를 사용하였을 때 흠 중 총 크롬은 9.25%, 6가 크롬은 0.27 %를 차지한다고 하였다(Dennis et al, 1997).

CO<sub>2</sub>를 보호가스로 한 본 실험의 용접 흠 중 6가 크롬의 함량비는 1% 이내로 Stern(1981)의 연구결과와 잘 일치한다. Voitkevich(1995)는 플럭스 코어드 와이어를 사용했을 때 총 크롬은 2 ~ 5%이고 6가 크롬의 함량은 1.5 ~ 4%로 보고하였으나 보호가스가 언급되어 있지 않다. 알콘이나 헬륨같은 비활성 가스대신 CO<sub>2</sub>를 사용하는 경우나 MAG (Metal Active Gas)용접의 경우 CO<sub>2</sub> 농도가 증가할수록 6가 크롬의 함량은 감소한다(Dennis et al., 1997). 그 이유는 CO<sub>2</sub>가 6가 크롬의 발생에 기여하는 오존을 파괴하고(Dennis et al, 1997; Hewitt and Madden, 1986), 고온의 아크분위기에서 열분해된 CO<sub>2</sub>로부터 산소가 발생되는데 이 산소는 안정한 크롬 3가의 산화물(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 형성하기 때문에 6가 크롬으로의 산화를 어렵게 한다. 또한 고온일수록 크롬은 spinel oxide(FeO · Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)로 변환되어 산화되기가 힘들다(Dennis et al., 1997).

문헌고찰 결과(표 3 과 표 5)와 본 연구결과를 비교하여 보면 FCAW에서의 6가 크롬의 함량은

MIG(Metal Inert Gas)용접에서의 함량비와 경향이 유사하고 총 크롬의 함량비는 SMAW흠의 함량비와 비슷하다. 이런 흥미로운 경향에 대하여 다음과 같이 추론하여 볼 수 있다.

MIG 용접에서 총 크롬의 함량이 높은 이유는 흠의 대부분은 용접 와이어(솔리드 와이어)에서 발생하는데(Voitkevich, 1995) 스테인레스용 MIG 용접 와이어는 피복제나 플럭스 성분이 없어 와이어 중의 크롬, 니켈의 함량비(예; 18 % Cr/8 % Ni)가 비슷하게 용접 흠으로 전이하거나 금속간의 약간의 증발열 차이로 흠 중 크롬의 함량이 와이어의 크롬 함량과 약간의 차이밖에 나지 않는다. MIG 용접에서는 불활성 가스를 사용함으로 크롬을 산화시킬 수 있는 산소가 없게 되고 알카리 산화물이 없는 솔리드 와이어(solid wire)를 사용하기 때문에(대한용접학회, 1998) 존재하는 크롬이 6가 크롬으로 산화되기가 힘들어(Palmer, 1983) 6가 크롬 함량은 낮게 된다.

SMAW나 FCAW에서는 피복제나 플럭스가 존재하여 용가재 전체의 크롬 함량은 낮아지게 된다. 따라서 용접 흠 중 크롬의 함량도 낮아지게 된다. SMAW에서는 알카리 산화물이 존재하여 6가 크롬을 형성하기가 쉬워 6가 크롬의 함량은 MIG 용접보다 높게 된다(Orr, 1993). FCAW에서는 알카리 산화물이 존재(Voitkevich, 1995)함에도 불구하고 SMAW보다 6가 크롬의 함량이 낮게 나타나는데 그 이유는 다음 두 가지로 설명할 수 있다. 첫째, 플럭스의 대부분 물질은 비전도 물질로 와이어의 내부에 존재하여(대한용접학회, 1998) 입열량의 영향을 적게 받고 경우에 따라서는 플럭스 자체가 녹지 않고 용융 풀로 직접 들어가게 되어 알카리 산화물과 반응하여 6가로 되는 기회를 적게 갖게 된다. 저 전류조건에서 플럭스가 녹지 않고 용융 풀로 이행되는 현상은 고속 카메라로 확인되었다(대한용접학회, 1998). 둘째, 앞서 설명한 바와 같이 보호가스로 사용되는 CO<sub>2</sub>가 오존을 파괴하고 3가 크롬의 형성을 촉진시켜 6가 크롬 양을 낮추는 역할을 한다.

Table 4. Hexavalent chromium content in fumes generated from several flux cored wires

Wire type	Current A	Voltage V	Total input energy kJ/min	No. of samples	Cr(VI) content in fume, %	
					Mean	Sr
C	124	22.0	158	3	0.42	0.08
	145	24.8	216	3	0.31	0.11
	182	24.3	258	3	0.25	0.20
	230	30.5	412	3	0.37	0.13
S	123	22.3	158	3	0.93	0.10
	176	25.3	260	3	1.16	0.02
	235	30.0	414	3	0.94	<0.01
T	121	22.3	154	3	0.89	0.05
	187	25.1	274	3	0.96	0.05
	231	30.0	408	3	1.05	0.01
U	120	22.2	154	3	0.52	0.03
	187	25.3	272	3	0.66	0.01
	224	29.9	392	3	0.72	0.09
V	116	22.0	146	3	0.46	0.04
	180	25.0	264	3	0.43	0.07
	228	29.9	400	3	0.61	0.01
W	123	22.4	160	3	0.19	0.01
	184	24.9	275	3	0.15	0.03
	219	25.4	334	3	0.21	<0.01
	230	29.8	404	3	0.22	0.03

Note : Total input energy(kJ/min) described above is monitored by 'Arc Monitoring System 4.01' and has some different values from calculating using voltage and current.

Table 5. Hexavalent chromium content of stainless steel welding fumes by several researchers

Researcher	Cr(VI) content, %		
	SMAW/SS	MIG/SS	FCAW/SS
French et al(1983)	-	0.27~2.26	-
Voitkevich(1995)	0.5~5	0.2~1	1.5~4
Pedersen et al.(1987)	3.27~3.85	0.32~0.54	-
This Study(1999)	-	-	0.15~1.15

Note : Some researchers designated FCAW/SS to MIG/SS

6가 크롬의 단위 시간당 발생량은 총 크롬의 발생량과 마찬가지로 FGR과 6가 크롬의 함량비로부터 계산 할 수 있다. 플럭스 코어드 와이어의 6가 크롬 발생량은 저입열량 조건에서는 큰 차이가 없이 0.46 ~ 3.07mg/min 이었다가 입열량이 증가함에 따라 발생량의 변화폭도 커져서 와이어 제품별로 1.80 ~ 12.16mg/min에 이르게 된다. 국산 제품인 C와 W는 입열량의 증가에 따른 변화폭이 크지 않고 6가 크롬의 발생량도 낮아 0.46 ~ 3.16mg/min이하로 발생하였다.

### 3) 총 크롬 중 6가 크롬의 함량

용접 흠에 존재하는 크롬 중 6가 크롬의 함량비는 그림 3에서 보듯이 입열량이 증가하면서 계속 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 실제로 6가 크롬의 양이 감소하여 나타나는 현상이 아니라 입열량이 증가하면서 총 크롬의 양이 증가하는데 비해 6가 크롬은 거의 증가하지 않거나 약간 증가하기 때문에 상대적으로 총 크롬 중 6가 크롬의 양은 감소하는 것처럼 나타나는 것이다.

입열량이 작은 22 V, 120 A 수준에서는 용접 와이어 종류별로 매우 넓은 총 크롬 중 6가 크롬 함량비를 나타내어 약 8 ~ 60% 사이였으나 입열량이 증가하였을 때는 20 %이하로 함량비가 감소하였다. 특히 국산 제품은 입열량에 따른 6가 크롬의 함량비 변화가 4 ~ 21% 정도로 가장 적었다. 용접조건(전류, 전압 및 보호가스)과 용접기의 형식이 다르기는 하지만 Dennis 등(1997)의 연구에서는 플럭스 코어드 와이어로 스테인레스 강 용접을 할 때 총 크롬 중 6가 크롬의 함량비가 2.9 ~ 26%범위에 있다고 보고하였다. 신 등(1998)은 MIG 용접을 할 때 용접 작업장에서 총 크롬에 대한 6가 크롬의 함량비는 6.3 ~ 9.7%라고 하였다. 본 연구에서는 다른 연구와는 달리 6가 크롬의 총 크롬 중 함량비는 일정한 것이 아니라 입열량에 의해 많은 영향을 받고 있음을 나타내고 있다.

### 4) 6가 크롬 중 수용성 6가 크롬의 함량

6가 크롬 중 수용성 6가 크롬은 표 6에서 보듯이 약 80 ~ 90%에 해당하며 용접 와이어별로 큰 차

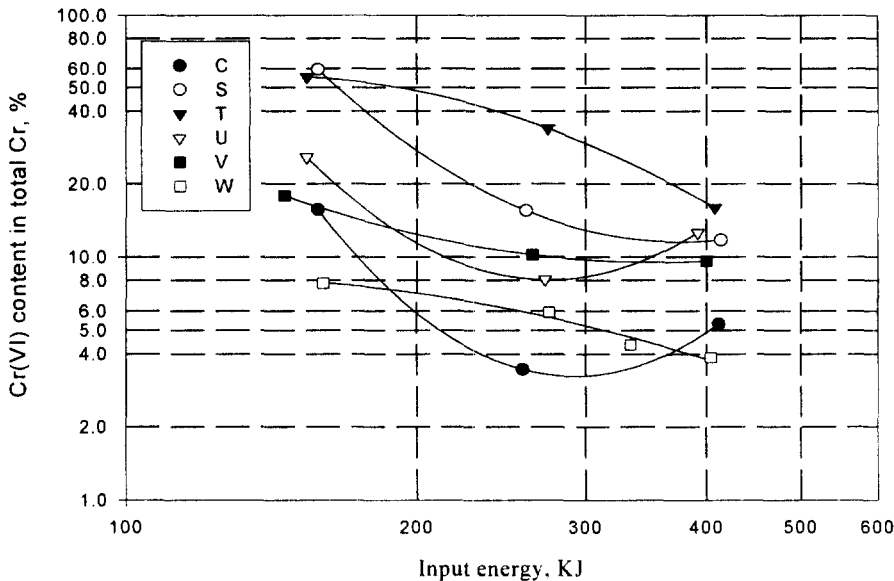


Fig. 3. Hexavalent chromium content in total chromium by input energy.

이는 없었다. 따라서 FCAW 흠 중 대부분의 6가 크롬은 수용성 형태로 존재함을 알 수 있다. SMAW 흠에 존재하는 6가 크롬도 대부분 수용성인데, 이들이 수용성인 이유는 발생하는 크롬이 피복제에 존재하는 칼륨이나 나트륨과 반응하여  $K_2CrO_4$ ,  $K_2CrO_7$ ,  $Na_2CrO_7$ ,  $Na_2CrO_4$ ,  $K_2NaCrF_6$  등을 형성하기 때문이다(Kponen et al., 1981; Voitkevich, 1995). 본 연구에서 사용한 와이어의 플렉스에도 칼륨이나 나트륨이 들어 있으므로(윤충식, 1999) 크롬이 이들과 결합하여 수용성 형태의 6가 크롬을 형성한다고 할 수 있다. 칼륨은 SMAW의 피복제나 FCAW의 플렉스에 아크 안정제나 고착제로, 나트륨은 아크 안정제로 함유된다(대한용접학회, 1998). 흠 중 이 두 성분을 합하면 와이어간의 차이는 있으나 평균 16.72%였다. 이들 성분은 플렉스 코어드 와이어에서 아크 안정제로서 일정한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이들 성분 자체는 용접작업에서 보건학적으로 큰 문제를 야기하지 않으나 이미 언급한 것처럼 크롬을 수용성의 6가 형태로 존재하게 하는 원인물질로 작용할 수 있다. 위에서 총 크롬의 함량비는 SMAW와 비슷하고 6가 크롬의 함량비는 MIG 용접과 비슷한 것을 설명하였거니와 6가 크롬의 수용성 여부는 SMAW와 비슷하다고 할 수 있다.

#### IV. 요약 및 결론

흠 발생량(FGR)에 영향을 미치는 중요한 변수인 전류와 전압을 변화시키며  $CO_2$  플렉스 코어드 아크 용접에서 총 크롬 양 및 6가 크롬 양, 각각의 발생량, 수용성 6가 크롬 함량의 변화를 분석하였다. 단, 전류와 전압이 동시에 변함으로 이들을 모두 표현할 수 있는 입열량으로 표현하였다.

입열량이 증가하면서 FGR의 증가보다 총 크롬의 함량비 증가가 훨씬 크다. 총 크롬은 저 입열량일 때(전류 120 A, 전압 22 V) 흠의 2 ~ 3 %이고 고 입열량일 때(전류 230 A, 전압 30 V) 함량비가 7 ~ 9 %까지 증가한다. 흠 중 6가 크롬의 함량은 1.2 %이하로 입열량 증가에 따른 6가 크롬의 증가 경향은 뚜렷하지 않다. 흠 중 6가 크롬의 80 ~ 90 %는 수용성으로 존재한다. FCAW에서 발생하는 흠 중 크롬의 함량비와 6가 크롬의 수용성 여부는 SMAW와 비슷하고, 6가 크롬의 함량비는 MIG 용접의 그것과 비슷하다. 이러한 현상은 플렉스의 구성성분과 보호가스인  $CO_2$ 에 의한 영향으로 설명할 수 있다.

Table 6. Soluble fraction of hexavalent chromium by wire type

Wire type	No. of samples	Soluble fraction of Cr(VI)	
		Mean %	Sr
S	3	85.1	0.09
T	3	80.1	0.04
U	3	89.5	0.03
V	3	86.1	0.05
W	3	87.0	0.07

## REFERENCES

김정한, 채현병. 아크용접시 흡 발생특성 및 흡의 포집/분석기술, 용접기술세미나-용접 흡발생 및 관련기술. 한국생산기술연구원 세미나집; 1997. (3-32쪽)

대한용접학회. 용접·접합 편람. 서울, 대한용접학회; 1998.(531-575쪽)

윤충식. 용접 공정의 흡 발생량과 공기중 6가 크롬에 관한 연구. 서울대학교 보건대학원(박사학위논문); 1999.(53-94쪽)

한국생산기술연구원. Arc 용접에서 Fume 발생특성 및 용접봉 송급성 평가기술(중간보고서), 한국생산기술연구원; 1998.(33-59쪽)

신용철, 이광용, 이나루, 오세민, 강성규, 문영환, 이기라. 모 조선업체 아크 용접작업자의 공기중 6가 크롬 및 니켈 노출에 관한 연구. 한국산업위생학회지 1998;8(2):209-223

윤충식, 백남원. 스테인레스 강에 대한 플럭스 코어드 아크 용접에서의 흡 발생량 및 입자 크기 분포에 관한 연구. 한국환경위생학회지 1999;25(2):1-7  
채현병, 김정한, 김희남. Arc 용접시 fume 발생량 평가에 관한 연구. 한국산업안전학회지 1998;13(2):65-75

American Welding Society. *Fumes and gases in the welding environment*(edited by Speight, F. Y. and H. C. Campbell). Miami, Fl; American Welding Society; 1987(Reprinted). p. 63-114.

Burgess WA. Chapter 10. Welding. In *recognition of health hazards in industry*. 2nd edition, New York; John Wiley & Sons Inc.; 1995. p. 167-204

Dennis JH, French MJ, Hewitt PJ, Mortaxavi SB, Redding AJ. 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

Dennis JH, Mortaxavi SB, French MJ, Hewitt PJ, Redding AJ. The effect of welding parameters on ultra-violet light emissions, ozone and Cr<sup>VI</sup> formation in MIG welding. Ann Occup Hyg 1997;41(1):95-104

Hewitt PJ, Hirst AA. A system approach to the control of welding fumes at source. Ann Occup Hyg 1993;37(3):297-306

Kimura S, Kobayashi M, Godai T, Minato S. Investigation on chromium in stainless steel welding fumes, Welding J 1979;58:195s-204s

Koponen M, Gustafsson T, Kalliomaki P, Pyy L. Chromium and nickel aerosols in stainless steel manufacturing, grinding and welding. Am Ind Hyg Assoc J 1981;42:596-601

Orr, JL. *Effects of welding on health VIII*. Miami, Fl; American Welding Society, 1993;1-23

Palmer WG. *Effects of welding on health IV*. Miami, Fl, American Welding Society, 1983;1-10

Pedersen B, Thomsen E, Stern RM. Some problems in sampling, analysis and evaluation of welding fumes containing Cr(VI). Ann Occup Hyg 1987;31:325-338

Stern RM. Process-dependent risk of delayed health effects for welders. Environ Health Perspect 1981;41:235-253

Ulfvarson U. Survey of air contaminants from welding. Scan J Work Env Health 1981;7(Suppl. 2):1-28

Voitkevich V. Chapter 2. Welding fume properties. In *welding fumes-formation, properties and biological effects*. England, Abington Publishing, 1995;18-77

Zakhari S, Strange J. *Effect of welding on health III*. Miami, Fl, American Welding Society, 1983;1-5