

CO₂ FCAW에서 용접조건이 Fume발생량에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Welding Conditions on Fume Generation Rate in CO₂ Flux Cored Arc Welding

채 현 병* · 김 정 한* · 김 희 남**

H.B. Chae · J.H. Kim · H.N. Kim

(1998년 8월 19일 접수, 1998년 11월 11일 채택)

ABSTRACT

The use of flux cored arc welding(FCAW) process has grown dramatically since it has been developed because of the remarkable operating characteristics and the resulting weld properties. The feature that distinguishes the FCAW process from other arc welding processes is the enclosure of fluxing ingredients within a continuously fed tubular electrode. The benefits of FCAW process are the increased productivity due to continuous wire feeding, the metallurgical effects derived from the reactions with flux, and the shapes of weld bead formed by slag. However, FCAW process causes the problem in working environment because it generates much more fume than other welding processes. Recently, the welding fume became a hot issue in the field after some welders were diagnosed as manganese toxcosis and siderosis.

This study was started to investigate the characteristics of welding fume and utilize the results from the investigation to protect the welders from welding fume. As a first step, the effect of welding conditions on the fume generation rate(FGR) were investigated during FCAW process with CO₂ shielding. The considered welding conditions were welding current, arc voltage, travel speed, contact tube to work distance, and torch angle. The results showed that FGR was affected by all of these factors.

* 한국 생산기술 연구원

** 명지대학교 기계공학과

1. 서론

용접 와이어를 스폴에 감고 송급기에 의해 송급을 시작한 이래로 용접은 생산공정에서 급진적인 발전을 거듭해 왔다. Flux cored wire (FCW)는 1950년 대에 최초로 출현하였으며 높은 용착율 및 효율, 깊은 용입, 그리고 수려한 비드 외관 이외에도 피복아크 용접봉과 같은 뛰어난 성능을 용접공정에 자동화할 수 있다는 큰 장점을 유감없이 발휘해 왔다^{1,2)}. 최근 산업현장에서는 생산성 향상과 노동력 절감을 위한 용접공정의 자동화가 급속히 확산되어 가고 있는 추세에 있다. 따라서 FCW의 특성은 이와 같은 경향을 더욱 가속화하는 원동력이 되었고 FCW의 수요 또한 급증되고 있지만 flux cored arc welding에서 발생하는 많은 양의 용접흄에 대한 작업자의 안전과 작업장의 환경문제는 심각한 현안으로 대두되고 있다.

Fig. 1은 용접공정별로 단위 시간당 흄발생량을 나타내고 있다³⁾. 그림에서 보여지듯이 flux cored arc welding에서 용접흄의 문제가 가장 심각한 것을 알 수 있다. 또한 1996년에는 국내에서 최초로 용접사에게서 망간중독 환자가 발견되었고 최근에는 Cr중독에 의한 비중격천공이라는 병도 발견되어 신중 직업병으로 판명받았다. 선진국에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 저흄 FCW 개발과 작업자의 안전보호기구 개발

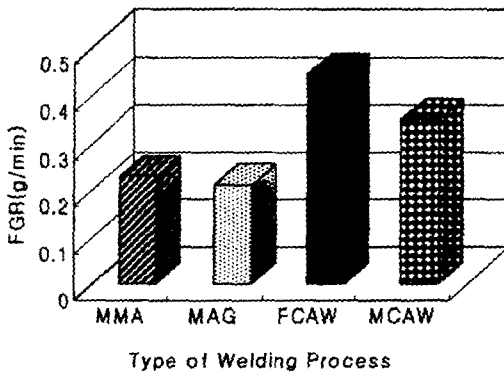


Fig. 1 The comparison of fume generation rate in some welding processes (welding current used: MMA-145A, MAG-190A, FCAW-250A, MCAW-290A)

에 많은 연구와 투자를 하고 있고 그에 대한 성과도 나타나고 있다²⁾.

국내에서는 노동부 고시 제 97-65호에서 용접흄에 대해 총 흄 노출허용농도를 5mg/m³이하로 규정하고 있고 그 구성성분에 대해서도 각각 노출기준을 규정하고 있다⁴⁾. 그러나 미국의 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서는 매년 각 유해원소에 대한 허용농도를 현실에 맞게 개정하여 적용시키고 있으나 국내에서는 과거 ACGIH에서 규정한 허용농도를 그대로 인용하여 사용하고 있으며 따라서 상대적으로 그에 대한 개정이 늦어지고 있어 유해성분의 노출기준이 전반적으로 높게 설정되어 있다. Table 1은 ACGIH의 허용농도와 국내의 노동부 노출기준을 서로 비교한 것이다^{4,5)}. 최근 작업자의 보호를 위해 노출기준을 강화해야 하는 현실과 Table 1에서와 같이 제시하는 선진국의 연구동향 및 결과와도 비교할 때 현실과 맞지 않는 부분이 상당하므로 관련규정의 시급한 정비 및 개정이 필요하다.

현재 우리 나라에서는 보건, 안전, 용접공정 및 용접재료 등 여러 분야에서 용접흄 관련 연구를 시작하는 단계에 있지만⁶⁾ 전반적으로 아직 연구가 미흡한 단계에 있고 FCW 흄에 대한 자료도 전무한 실정이다. 본 연구는 이와 같은 관점에서 향후 저흄 용접재료와 용접공정의 개발을 위한 기초자료 및 흄발생량 평가 표준시험법을 정립하기 위하여 전류, 전압, 용접속도, 토치 각 및 CTWD(Contact Tube to Work Distance)를 변수로 용접조건에 따른 흄발생량 변화를 실험·고찰하였다.

2. 실험장치 및 재료

흄발생량을 평가하기 위해서는 발생하는 흄을 정량적으로 측정할 수 있는 시스템이 요구되는데 이 시스템은 미소량의 용접흄을 정확하게 평가할 수 있어야 한다. 본 실험에 사용된 흄포집장치는 용접조건을 정확하게 조정 및 유지시킬 수 있도록 설계되었으며 데이터의 재연성을 확보하기 위해 여러 차례의 보정과정을 거쳤다⁷⁾.

용접에는 600A급 SCR제어형 용접기를 사용하

Table 1 The exposure limits of welding fume and its constituents in work places

Element	ACGIH TLV, mg/m ³ (1998)		노동부 노출기준, mg/m ³ (1998)	
	TWA	STEL	TWA	STEL
Aluminum	5	--	5	--
Beryllium, as Be	0.002	A1	0.002	--
Cadmium oxide	0.01(i) 0.002(ii)	A2 A2	0.05	--
Carbon monoxide	25ppm	--	50ppm	400ppm
Chromium, as Cr metal and Cr III compounds	0.5	A4	0.5	--
Cr VI compounds, as Cr				
Water soluble	0.05	A1	0.05	A1
Insoluble	0.01	A1		
Copper	0.2	--	0.1	--
Fluorides, as F	2.5	A4	2.5	3
Iron oxides	5	A4	5	--
Lead	0.05	A3	0.05	--
Manganese	0.2	--	1	3
Mercury				
· Alkyl compounds	0.01		0.03	0.01
· Aryl compounds	0.1			0.1
· Inorganic forms, including metallic mercury	0.025	A4		
Molybdenum	5 (soluble) 10 (insoluble)	--	5 (soluble) 10 (insoluble)	--
Nickel				
Elemental/metal	1.5 (i)	A5	1	--
Soluble	0.1 (i)	A4		
Insoluble	0.2 (i)	A1		
Nitrogen dioxide (NO ₂)	3ppm	A4	5ppm, A4	3ppm 5ppm
Ozone	0.1ppm (light work) 0.08ppm (moderate work) 0.05ppm (heavy work)	A4 A4 A4	0.1ppm	0.3ppm
Tin	2	--	2	--
Titanium dioxide, as TiO ₂	10	A4	--	--
Vanadium, as V ₂ O ₅	0.05(resp.)	A4	--	--
Zinc oxide	5	10	5	10
Calcium oxide	2	--	2	--
Magnesium oxide	10	--	10	--
Nitric oxide	25ppm	--	25ppm	--
Phosgene	0.1ppm	--	0.1ppm	--
Welding fume	5	--	5	--

(i) Inhalable fraction, (ii) Respirable fraction

A1: Confirmed human carcinogen, A2: Suspected human carcinogen, A3: Confirmed animal carcinogen

A4: Not classifiable as a human carcinogen, A5: Not suspected as a human carcinogen

였으며, 토치는 500A급 공병식을 사용하였다. 또한 흠발생량 측정을 위해 1mg과 0.1g 단위의 미소저울이 사용되었으며 포집 전과 후에 여과지의 건조를 위해 자연순환식 건조로가 사용되었다. Fig. 2에 본 실험의 개략도를 도시하였다.

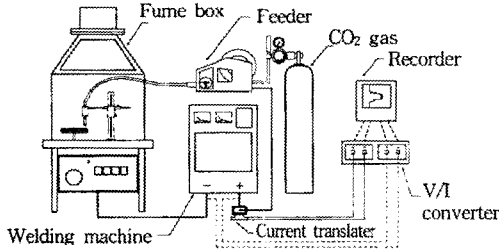


Fig. 2 Schematic drawing of fume collection system constructed

실험에 사용된 용접재료는 일반적으로 산업 현장에서 가장 많이 쓰이는 $\phi 1.2\text{mm}$ 의 CO₂용접용 FCW로써, KS D 7104(AWS E71T-1)에 해당하는 규격의 제품을 사용하였다. 시험편은 흠 포집장치 내의 turn table의 크기에 맞게 mild steel(SS 400)을 Fig. 3과 같이 260×260×21mm로 제작하였고 여과지는 pore size 0.6 μm , 크기는 254×203mm의 Whatman EPM 2000, 유리섬유 여과지를 사용하였다⁷⁾.

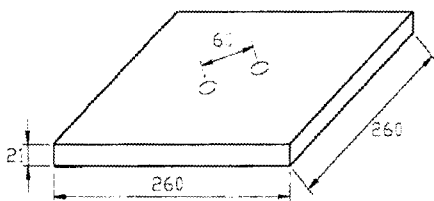


Fig. 3 Schematic drawing of specimen

3. 실험 방법

용접흠 발생량은 용접조건 뿐만 아니라 주어진 외부조건에도 많은 영향을 받는다. 특히 포집된 흠은 흡습성이 매우 강해서 주위 공기 중의 습도에 매우 민감하다. Fig. 4는 공기 중 습도 변화에 따른 포집된 흠의 흡습성을 나타내고

있다. 포집된 여과지는 건조로에서 약 1시간 정도 건조시켜 포집 중 흡수된 습기를 제거해야 하기 때문에 건조로 밖의 여과지는 매우 건조한 상태이다. 따라서 공기중의 습도가 높을 때에는 흠의 흡습시간이 매우 빨라진다. 그래프에서 보 여지듯이 50%이하의 습도에서는 그다지 현격한 무게변화를 볼 수 없으나 85, 70%와 같은 높은 습도에서는 흠의 흡습성이 두드러지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 측정장소의 환경적인 요인이 총 흠발생량 평가에 매우 큰 영향을 미친다는 것을 나타내며 비오는 날과 맑은 날의 측정데이터가 서로 다를 수 있다는 것을 의미한다. 또한 측정시 미소저울은 최소 30~60초의 안정화 시간이 요구되기 때문에 절대적인 데이터를 얻기 위해서는 측정장소의 습도를 50%이하로 유지시키기 위해 흠의 측정은 항온항습실에서 수행되어야 바람직하다고 사료된다. 또한 흠의 무게측정시 저울의 기계적인 오차와 눈금판독에도 오차가 존재하기 때문에 포집 전과정에 걸쳐 취급에 세심한 주의가 요구되며 반복된 흠 포집기술 습득을 통하여 이러한 오차들을 최소화하여야 한다.

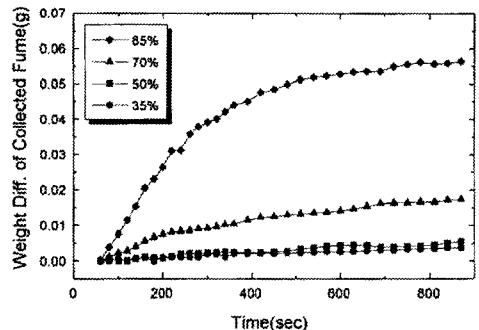


Fig. 4 The effect of humidity in measuring environment on the weight of fume collected

실험은 신뢰성있는 데이터 확보를 위하여 각 조건별로 최소 3회이상의 시료를 채취하여 중량 분석법으로 FGR(Fume Generation Rate)을 구하여 그 평균값을 취하였다. 실험에 사용된 용접조건은 먼저 용접분 제조업체에서 추천하는 전류와 전압범위 내에서 최적조건을 찾아 설정하고 이송속도, 토치각, CTWD에 따른 흠발생

량 변화에 대해 먼저 실험하였고, 전압 및 전류 순으로 하였다. 용접은 위치, 높이 및 각도를 정확하게 조정할 수 있는 토치홀더에 의해 지지되고 있는 용접토치를 이용해 속도 조절이 가능한 turn table 위에서 bead-on-plate용접법으로 수행하였다. 용접시간은 30초로 하였고 흡포집 시간은 He-Ne Laser를 이용하여 시각적으로 흡이 포집장치 내에서 보이지 않을 때까지의 시간인 7분으로 설정하였는데 Fig. 5에서 보여지듯이 5분 이상에서는 흡의 무게가 거의 일정한 것을 볼 수 있다. Table 2와 Table 3에 실험에 사용된 용접조건 및 흡발생량 평가과정을 개략적으로 나타내었으며 흡발생량 평가를 위한 계산식은 식(1)을 사용하였다.

$$\text{단위시간당 흡 발생량}(g_f/\text{min}) = \frac{\text{포집후 여과지의 무게}(g_f) - \text{포집전 여과지의 무게}(g_i)}{\text{용접 시간}(\text{min})} \dots\dots\dots (1)$$

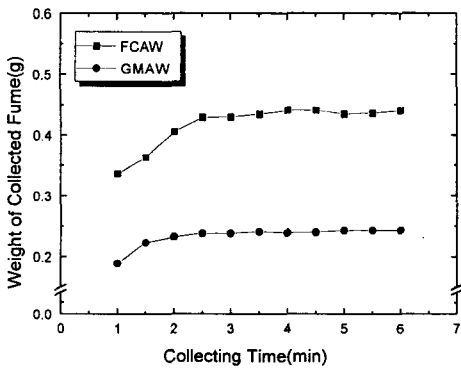


Fig. 5 The variation in the weight of collected welding fume as a function of collecting time for FCAW and GMAW

Table 2 Welding conditions used in the experiment

Welding Valuables	Range	Standard Condition
Current(A)	180~330	280
Voltage(V)	25~40	30
Flow rate(l/min)	10~30	20
Travel speed(mm/s)	3~12	6
Torch angle(deg)	90~45	90
CTWD(mm)	12~28	20

Table 3 The evaluation sequence of welding fume generation rate

흡 발생량 평가 순서
• 초기용접 조건을 설정한다.
• 모재의 무게를 잰다. 단, 수동용접일 경우에는 용접봉의 길이와 무게도 잰다.
• 여과지는 93~107℃의 건조로에서 약 한시간 이상 건조시킨 후 무게를 잰다.
• 여과지를 흡포집장치에 장착한다.
• 기록계를 작동시키고 용접을 시작한다.
• 소모된 용접 와이어의 양을 알기 위해 송급속도를 측정한다(자동 및 반자동 용접의 경우).
• 용접이 끝나면 포집장치로부터 조심스럽게 여과지를 탈착해 즉시 건조로에 넣는다.
• 약 한시간 이상 건조시킨 후 여과지의 무게를 잰다.
• 용접 후 용접모재의 무게를 측정하여 용착량을 계산하고 수동용접의 경우는 전류 용접봉의 길이와 무게를 측정한다.
• 주어진 계산식에 의해 흡 발생량을 산출한다.

4. 실험결과 및 고찰

아크용접시 아크에서 발생하는 높은 열은 용접부와 모재를 용융시켜 용접 와이어의 용융된 선단, 아크를 통해 이행중인 용적, 용융 pool 등의 표면으로부터 발생하는 금속 증기와 플렉스를 구성하는 물질의 증기도 또한 발생시킨다. 이렇게 발생된 고온의 증기가 높은 온도의 아크 영역으로부터 방출되어 주위의 차가운 공기와 만나게 되면 급속한 냉각에 따른 응축현상으로부터 미세한 고체입자를 형성하고, 그와 동시에 공기 중의 산소와 반응하여 산화되어 흡이 생성된다. 이렇듯 흡은 크게 증발, 응축 그리고 산화에 의해 생성된다고 말할 수 있다^{8,9)}. 흡은 에너지 밀도가 높은 열원의 에너지가 전도(conduction)에 의해 전달되어 용접부에 열을 집중시켜 용접 와이어를 용융시키게 되므로 용접부에 작용하는 단위면적당 입열되는 에너지 양이 흡발생량을 결정짓는다고 말할 수 있다. 따라서 각각의 용접조건들이 열원으로부터 용접부에 작용하는 입열량에 미치는 영향에 대해 알아본다면 흡발생량과의 관계도 유추할 수 있을 것이다. 용접시 입열량은 다음의 식(2)와 같이 표현된다.

$$\text{Heat Input} \propto \frac{VI}{S} \dots\dots\dots (2)$$

V=아크 전압, I=용접 전류, S=용접 속도

4.1 용접전류

용접전류는 흠발생량에 대해 직접적인 변수이다. 그것은 식(3)에서와 같이 용접전류가 와이어의 용융속도를 결정짓는 변수이기 때문인데 상수 a, b와 L_e 가 일정할 때 용접전류만이 용융속도에 관계한다¹⁰⁾.

$$MR = aI + bL_e I^2 \dots\dots\dots (3)$$

MR=용접봉 용융속도, kg/h

a=양극 또는 음극가열에 대한 비례상수, kg/h·A

A(크기는 극성과 용접봉의 성분에 의존하며 직류정극성의 경우, 음극재료의 이온화에너지에 따라 달라진다).

b=전기저항열에 대한 비례상수, kg/h·A²·mm

L_e =모재와 용접봉 간격, mm

I=용접 전류, A

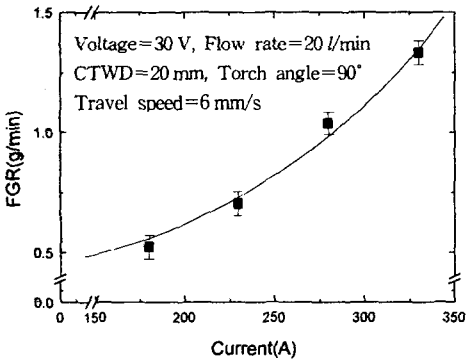


Fig. 6 The effect of welding current on fume generation rate

또한 Fig. 6에서 보여지듯이 실험에서도 용접 전류가 증가함에 따라 흠발생량도 현저하게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 용접전류를 증가시키는 것은 용접 와이어의 송급속도를 증가시키는 것이다. 그것은 곧 흠발생의 직접적인 원인인 용접봉의 소모량을 증대시키는 결과인 것이며 송급된 와이어를 용융시키기 위해 용접기는 전류를 상승시켜 전기적 입열량을 증가시키고 이에 따라 용접봉의 용융된 팁의 온도가 상승된다. 따라서 아크내의 온도가 상승되므로 용

적이 아크를 통과하는 동안 고온증기의 분출이 증가된다. 상기 식(3)에서 여러 가지 용접조건 중에서 용접전류가 흠 발생 전반에 가장 직접적으로 영향을 미치는 인자라고 생각된다.

4.2 아크전압

용접을 일종의 전기회로로 볼 때 아크길이는 이 회로에서 저항역할을 한다. 아크전압은 독립 변수로서 용접사의 임의대로 주어진다. 따라서 주어진 아크전압에 의해 아크길이와 폭이 결정되고 그것은 용접봉의 종류, 용접법 그리고 용접전원에 따라 달라지게 된다. 아크전압의 증가는 아크 길이와 아크 내의 플라즈마기류 증대를 촉진시키므로 아크의 내부로 주위 공기의 혼입 가능성이 증가할 뿐만 아니라 혼입된 산소와 이 행중인 용적이 반응할 수 있는 시간도 길어지게 된다. 또한 아크전압이 증가함에 따라 입열량도 증가하게 된다. 따라서 아크전압이 증가함에 따라 흠 발생의 원인인 고온의 금속증기가 다량 발생하게 되므로 흠발생량의 증가가 예측된다. Fig. 7에서 보여지듯이 전압의 증가에 따라 흠발생량은 증가하는 경향을 보이고 있다.

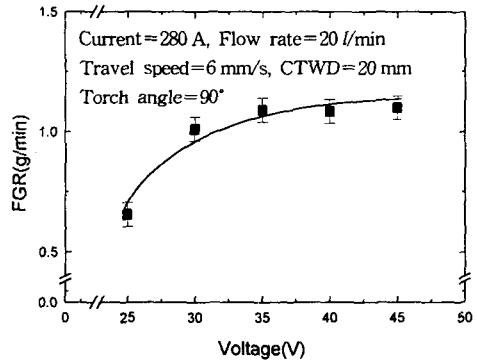


Fig. 7 The effect of arc voltage on fume generation rate

4.3 용접속도

Fig. 8에서 보여지듯이 용접속도의 증가에 따라 흠발생량은 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 식(2)에서와 같이 용접속도가 증가하면 입열량이 감소하기 때문인데 전류 및

전압이 일정할 때 용접속도는 용접부의 입열량을 결정짓는 중요 변수이다.

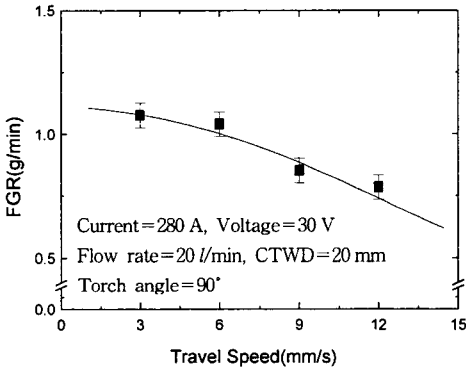


Fig. 8 The effect of travel speed on fume generation rate

용접속도가 감소하면 한 곳에 아크가 머무는 시간이 길어지므로 단위면적당 입열량이 증가하여 용융풀이 커지고 용융금속이 응고하는 시간도 증가하여 고온의 금속증기가 증발할 수 있는 시간도 증가할 뿐만 아니라 용융풀의 표면적 증가에 따른 증발 면적의 증가도 야기하게 된다.

4.4 Contact Tube to Work Distance

CTWD의 증가는 용접흄 발생에 영향을 미치는 가장 큰 변수인 전류의 감소를 유발하며 그것은 식(3)에서 L_e 의 증가에 기인하기 때문이다. 주어진 아크전압에 따라 아크길이는 결정되며 일정하다. Fig. 9에서 보여주는 것과 같이 CTWD가 증가하는 것은 아크길이를 제외한 L_e 만이 증가하는 것이고 L_e 가 증가하면 할수록 전기회로의 저항 역할이 커지게 되므로 전류가 감소하는 것이다. 실제로 상온에서는 큰 영향이 없으나 아크 주위는 고온이므로 내부저항은 증가하게 된다. 따라서 전류의 감소는 입열량의 감소로 이어지고 아크내의 온도를 감소시켜 용적의 온도를 저하시키게 되므로 흄발생량을 감소시키게 된다. Fig. 10에서 그 결과를 보여주고 있다.

4.5 토치각

모재에 대한 용접봉의 각도가 수직으로부터

감소되면 보호가스의 차폐효과가 감소하여 용접봉의 용융된 팁이 주위 산소에 노출될 가능성이 증가하게 되므로 용접흄 발생량이 증가하게 된다.

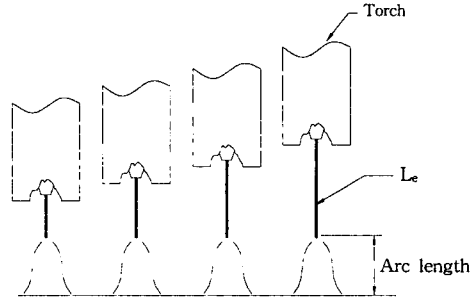


Fig. 9 The variation of electrode extension without changing arc length

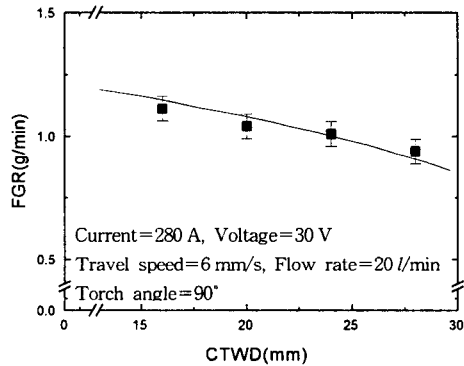


Fig. 10 The effect of contact tube to work distance on fume generation rate

그러나 Fig. 11에서와 같이 토치각이 75° 정도까지는 비교적 아크가 안정되어 전류 및 전압이 거의 변화가 없었음을 관찰할 수 있었는데 그 미만으로 감소되면 아크가 불안정해지고 스파터의 양도 많아져 매우 산만한 결과치를 보여주었다. 하지만 토치각이 감소함에 따라 현격한 흄발생량 차이는 볼 수 없었는데 이것은 본 실험에서 설정한 토치의 팁과 모재사이의 거리가 20mm로 비교적 가깝고 보호가스의 유량도 20 l/min으로 충분하므로 토치각의 감소에 따른 차폐효과 감소가 매우 적기 때문이라고 사료된다. 그러나 Fig. 12에서 보여지는 것처럼 토치각이

감소함에 따라 L_e 가 증가되는 결과를 볼 수 있는데 이것은 4.4절에서 설명한 CTWD효과와 같이 고온의 아크내에서 L_e 의 내부저항이 증가하기 때문이며 따라서 전류의 감소를 수반한 입열량의 감소가 그 직접적인 원인이라 사료된다.

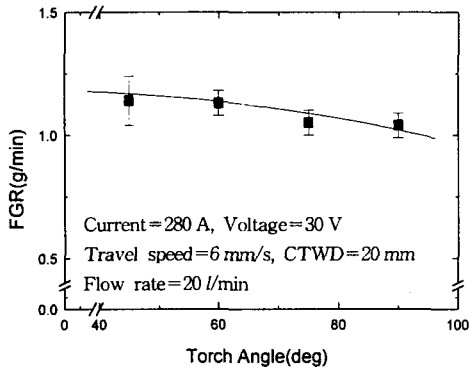


Fig. 11 The effect of torch angle on fume generation rate

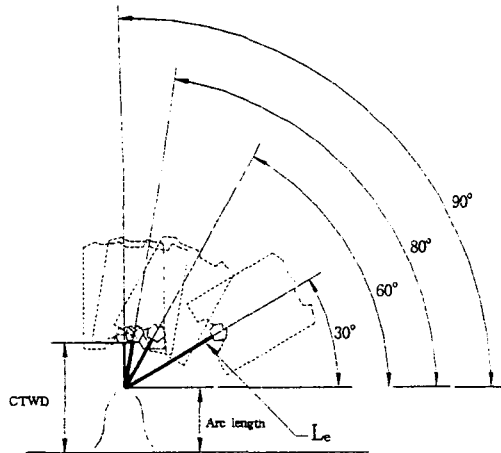


Fig. 12 The change in electrode extension by inclining torch angle

5. 결론

Flux cored arc welding시 용접조건이 흠발생에 미치는 영향에 대해 검토한 결과는 다음과 같다. 본 실험에서 변수로 사용된 용접전류, 아크전압, 용접속도, 토치각 및 CTWD이상 5개의 인자들 중 용접전류 및 아크전압과 용접속도는

입열량 관계식의 직접적인 변수들이고 토치각과 CTWD는 용접전류의 변화에 영향을 미치기 때문에 이 모든 인자들은 용접부에 작용하는 입열량의 개념으로써 설명될 수 있다. 입열량의 증가는 아크내의 온도상승과 더불어 용접 와이어의 용융을 촉진시키고 고온 금속증기량을 증대시켜 흠발생량의 증가에 직접적인 원인이 된다.

- 1) 용접전류는 흠발생량에 직접적으로 큰 영향을 미치는 인자로서 전기적 입열량 증가에 따른 와이어 용융속도의 상승으로 흠발생에 현저한 영향을 미친다.
- 2) 아크전압의 증가는 아크길이와 입열량의 증가를 야기하여 흠발생량을 증가시킨다.
- 3) 용접속도가 증가함에 따라 단위면적당 입열량 감소에 따라 흠발생량은 점차로 감소하는 경향을 보여준다.
- 4) 토치각이 감소함에 따라 흠발생량의 증가를 보이지만 용접전류 감소에 따른 입열량 감소로 상대적으로 그 영향은 매우 작은 것으로 나타났다.
- 5) CTWD의 증가는 용접전류의 저하를 야기하여 흠발생량의 감소를 유발하게 된다.

이 논문은 산업자원부의 공업기반기술사업의 지원으로 연구되었음.

참고 문헌

- 1) David Widgery, "Tubular Wire Welding", Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, pp. 3~8, 1994.
- 2) Stanley E. Ferree, "New Generation of Cored Wires Creates Less Fume and Spatter", Welding Journal, pp. 45~48, Dec. 1995.
- 3) J. Moreton, E.A. Smars, K.R. Spiller, "Fume emission when welding stainless steel", Metal Construction, pp. 794~798, Dec. 1985.
- 4) 노동부, "화학물질 및 물리적 인자의 노출기준", 노동부고시 제97-65호, pp. 6~67, 1998.
- 5) ACGIH, "TLVs® and BELs®", pp.15~77,

- 1998.
- 6) 김규상, “용접작업자의 건강관리”, 제30회 산업안전보건대회 용접작업 관리대책 세미나, 한국 산업안전관리공단, p. 67, 1997.
 - 7) 채현병, 김정한, 김희남, “Arc용접시 Fume 발생량 평가에 관한 연구”, 산업안전학회지, 제13권, 제2호, pp. 65~75, 1998.
 - 8) M. Kobayashi, “Some Considerations about the Formation Mechanisms of Welding Fume”, *Welding in the World*, 16-11/12, p. 238, 1978.
 - 9) R.F. Heile, “Particulate Fume Generation in Arc Welding Processes”, *Welding Journal*, 54-7, p. 201, 1975.
 - 10) American Welding Society, “Welding Handbook”, Vol. 1, pp. 32~34, pp. 54~55, 1991.
-