

플럭스 코어드 아크 용접 공정에서의 흠 형성량에 관한 연구

윤충식 · 백남원*

노동환경건강연구소
*서울대학교 보건대학원

A Study on Fume Formation Ratio on Flux Cored Arc Welding Process

Chung Sik Yoon and Nam Won Paik*

Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health,
*School of Public Health, Seoul National University

ABSTRACT

A study was conducted for the effects of input energy on fume formation ratios based on electrode($FFR_{electrode}(g/kg_{electrode})$), deposited metal($FFR_{weld}(g/kg_{weld})$) and slag($FFR_{slag}(g/kg_{slag})$) at CO₂ flux cored arc welding on stainless steel. Experiments were run in well designed welding fume box. Six types of flux cored wires were used and three levels of currents and voltages were given. The measured values of $FFR_{electrode}$, FFR_{weld} , FFR_{slag} are $7.90 \pm 1.47 g/kg_{electrode}$, $9.18 \pm 1.65 g/kg_{electrode}$, $71.8 \pm 24.2 g/kg_{slag}$ respectively. Fume formation ratios are not increased dramatically by input energy because of simultaneous increasing of melted electrodes, deposited metal and slag. The results indicate that the test of fume formation ratios in the research on production of low fume welding wire can be run at the fixed condition of input energy rather than various condition.

Key words : Welding fume, Fume formation ratio, Flux cored arc welding, Input energy

I. 서 론

용접작업은 금속의 물리적 상태를 변화시키는 과정이므로 강한 에너지가 필요하고 이런 에너지가 용접과정 중에 직간접으로 용접작업자에게 영향을 줌으로 항상 잠재적 건강위험이 있다. 용접작업중 발생하는 산업보건학적 유해인자는 여러 가지 금속성분을 포함한 용접 흠, 가스, 증기등이 있으며 물리적 인자로는 소음, 진동, 열, 전류, 이온화방사선, 비이온화 방사선 등이 있다. 이중 대표적 유해인자가 용접 흠이다.

용접 흠의 생성기작은 그 동안 많이 연구되어 왔다.¹⁾ 용접 흠의 발생량에 영향을 미치는 인자로는 용접 종류, 용접재료(주로 용접봉 또는 와이어), 용접 조건, 모재, 주위 환경(기류, 온도, 공간의 크기)으로 크게 분류할 수 있다. 이 중 용접 조건은 다시 사용전류, 전압 또는 아크길이, 전류의 극성, 보호가스, CTWD(Contact Tube to Work Distance), 금속 이행현상으로 구분할 수 있다.^{2,5)}

그러나 이러한 변수들은 상호 의존적이어서 흠 발생

량과 각 변수와의 상관관계를 고찰하는 것은 쉽지 않다.^{2,5)} 예를 들어 고전류 조건에서는 고전압을 사용하며, 고전압에서는 아크 길이가 길어지고, CTWD도 증가하게 된다. 금속 이행현상도 전류의 세기와 밀접하게 연관되어 있다. CO₂ 용접에서 200A 이하이면 단락이행(short circuit transfer)이 이루어지고, 그 이상에서는 입상이행(globular transfer)으로 천이한다.⁶⁾

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.^{7,8)} 흠 중의 금속성분은 모재보다 용가제에서 많이 발생하는데,^{7,8)} 85% 정도가 용가제에서 발생하고 15% 미만이 모재에서 발생한다.⁹⁾

용접 흠의 발생 특성을 기술하는 데는 흠 발생량과 흠 형성량을 사용한다. 일반적으로 많이 사용하는 흠 발생량(Fume Generation Rate; FGR)은 단위 시간당 발생된 용접 흠 양으로 정의된다. 용접에 대한 공학적인 접근이나 작업장의 적당한 환기 시스템을 구축하는데 유용하며 산업위생전문가들도 이 단위를 잘 사

용한다.

용접 흠 형성량(Fume Formation Ratio; FFR)은 단위 용융 와이어당 발생하는 흠 양으로 나타내는데 이는 용접의 생산성과 관련되므로 작업시 발생하는 총 흠의 감소와 관련하여 사용하며, 저 흠 용접봉 개발 때도 유용하게 사용된다. 단위 용융와이어당 흠 형성량 이외에도 단위 용착 금속량당, 단위 스패터 양당, 단위 슬래그 양당 발생하는 흠 양으로 흠 형성량을 정의하기도 한다.⁵⁾

저자는 플럭스 코어드 아크 용접에서 흠 발생량에 관한 연구 결과를 발표한 바 있다.⁹⁾ 본 연구는 흠 발생량에 관한 연구를 확장하여 스테인레스 강을 모재로 하고 CO₂를 보호가스로 하여 FCAW을 실시할 때 전류와 전압의 변화에 따른 흠 형성량의 변화를 평가하여 청정기술로써의 저 흠 용가재 개발의 기초자료를 마련하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

연구에 사용된 용접 흠 발생 및 채취장치는 이미 기술한 것처럼⁹⁾ 자동과 수동 용접을 할 수 있고 단위 시간당 용접 흠 발생량을 측정할 수 있도록 고안된 장치이다.

용가재는 우리 나라에서 많이 사용하고 있는 플럭스 코어드 와이어 2종과 외국산 4종(미국산 2, 스웨덴산 1, 일본산 1)을 선정하여 전류와 전압을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 단, 용접조건에서 가장 중요한 변수인 전류와 전압은 FCAW의 적정조건과 저전류·저전압, 고전류·고전압의 세 단계로 변화시켜 실험을 수행하였다. 사업장에서는 생산성을 높이기 위해 적정조건보다는 고전류·고전압을 사용하는 경향이 있다. 구체적인 용접 조건은 이미 발표한 다른 논문에서 언급하였다.⁹⁾

흠 형성의 특성을 규명하기 위하여 흠 형성량을 나타내는 FFR을 다음과 같이 정의하여 사용하였다.^{9),10)}

$$FFR_{\text{electrode}}(\text{g/kg}_{\text{electrode}}) = \frac{\text{Final Weight of Filter(g)} - \text{Initial Weight of Filter(g)}}{\text{Wire Feeding Length(m)} \times \text{Wire Unit Mass(kg/m)}} \quad (1)$$

$$FFR_{\text{weld}}(\text{g/kg}_{\text{weld}}) = \frac{\text{Final Weight of Filter(g)} - \text{Initial Weight of Filter(g)}}{\text{Final Weight of Base Metal(kg)} - \text{Initial Weight of Base Metal(kg)}} \quad (2)$$

$$\frac{\text{Final Weight Filter(g)} - \text{Initial Weight of filter(g)}}{\text{Slag Formed(kg)}} \quad (3)$$

한가지 조건당 3회의 용접을 수행하여 발생한 흠 량, 용착금속의 무게 및 슬래그의 무게를 각각 측정하였고 용융된 와이어가 스패터로 전이되는 비를 추정하기 위하여 다음 식을 사용하였다.

$$\text{Estimated spatter(\%)} = \left(\frac{\text{mass of melted wire} - (\text{mass of deposited metal} + \text{mass of fume} + \text{mass of slag})}{\text{mass of melted wire}} \right) \times 100 \quad (4)$$

용접을 수행하면서 전류, 전압, 입열량, CTWD, 용접 속도, 와이어 송급속도를 모니터링 하였고 각 조건에서 흠 양, 용착 금속의 질량, 슬래그의 질량을 측정하였다.

흠 형성량을 측정하기 위하여 용접을 수행하면서 발생하는 흠을 0.6 μm 공극을 갖는 254 mm×203 mm 크기의 유리 섬유 여과지(Whatman EPM 2000, England)를 사용하여 채취하여 중량법으로 측정하였다.^{11),12)}

III. 결과 및 고찰

Table 1은 FFR_{electrode}(g/kg_{electrode}), FFR_{weld}(g/kg_{weld}), FFR_{slag}(g/kg_{slag})을 나타낸 것이다. 이미 보고한 바와 같이⁹⁾ FGR은 입열량에 따라 증가한다. 입열량이 증가하면 와이어의 용융 속도가 증가하며, 이에 따라 용착 금속량, 슬래그 양도 증가한다. 입열량과 와이어 용융량의 상관계수는 0.98이었다.

FFR_{electrode}는 와이어 종류에 따라 다소 차이는 있지만 7.90±1.47 g/kg_{electrode}로 이것이 의미하는 바는 용접와이어 1kg이 용융될 때 흠이 평균 7.90 g 형성된다는 의미이다. 제품 U는 다른 제품에 비하여 흠 형성량이 5.70±0.75 g/kg_{electrode}으로 가장 적었다. 입열량에 따라 FGR이 비례적으로 증가하는 것과는 달리 Fig. 1에서 보듯이 FFR_{electrode}는 입열량의 증가에 따라 증가 경향이 뚜렷하지 않다. 증가한다 해도 기울기가 완만하고 용접 와이어 전체로 볼 때 입열량과의 상관계수 값도 0.07로 매우 낮다. 각 와이어 별로 입열량과 FFR_{electrode}와의 상관계수는 > 0.01(와이어 C), 0.18(와이어 S), 0.89(와이어 T), 0.98(와이어 U), 0.86(와이어 V), 0.82(와이어 W)의 순이었다. 와이어 별 상관계수의 차이가 심한 이유는 분명하지 않다.

FFR_{weld}는 와이어 종류에 따라 다소 차이는 있지만

Table 1. Fume formation ratios of several flux cored wires

Wire Types	Current A	Voltage V	Input Energy ^d kJ/min	No. of Samples	FFR g/kg _{electrode}		FFR g/kg _{weld}		FFR g/kg _{slag}	
					Mean	Sr ^b	Mean	Sr	Mean	Sr
C ^c	125	22.1	162	3	8.25	0.03	8.80	0.04	- ^d	-
	143	24.8	208	3	9.72	0.04	10.93	0.04	-	-
	177	24.3	250	3	7.75	0.16	8.81	0.15	-	-
	227	30.5	404	3	8.60	0.02	8.79	0.01	-	-
S	123	22.1	158	3	7.02	0.04	8.42	0.04	-	-
	179	25.3	264	3	7.07	0.01	8.37	0.04	53.20	0.03
	224	30.1	394	3	7.17	0.01	8.65	0.01	54.64	0.01
T	123	22.3	156	3	8.61	<0.01	10.08	<0.01	-	-
	186	25.1	272	3	9.80	0.03	11.53	0.04	100.66	0.01
	238	29.9	420	3	10.40	0.03	12.24	0.03	103.34	0.05
U	121	22.2	156	3	4.93	0.01	6.03	0.02	37.15	0.10
	185	25.0	272	3	5.75	0.03	6.94	0.02	43.74	0.08
	235	29.8	410	3	6.42	0.02	7.82	0.03	50.13	0.02
V	116	22.2	148	3	7.80	0.05	9.58	0.04	86.25	0.01
	183	25.1	268	3	9.29	0.01	10.85	0.01	97.36	0.01
	229	29.9	402	3	9.66	0.03	11.46	0.03	105.24	0.01
W	122	22.2	156	3	6.51	0.01	7.44	0.01	60.65	0.01
	181	24.8	264	3	7.60	0.01	8.77	<0.01	68.78	<0.01
	232	29.7	408	3	7.76	0.04	9.00	0.03	72.54	0.04

a : Input energy(kJ) described above is monitored by 'Arc Monitoring System 4.01' and has some differences from calculating using voltage and current.

b : Sr = Standard deviation/mean

c : One additional condition was applied to test current effect at constant voltage.

d : Amount of slag is not measured.

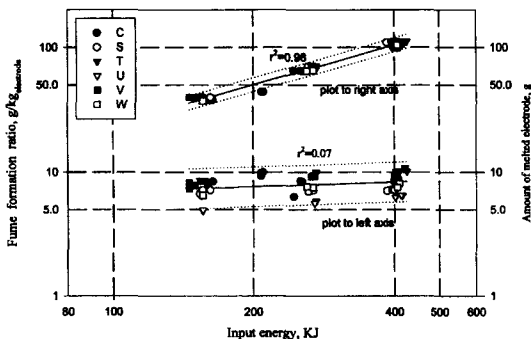


Fig. 1. Fume formation ratios based on melted electrodes and the amount of melted electrode formed from several flux cored wires as a function of input energy.

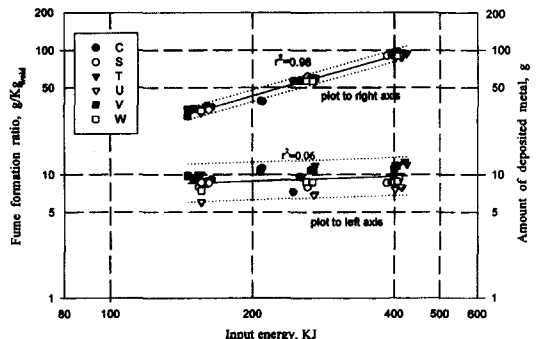


Fig. 2. Fume formation ratios based on deposited metal and the amount of melted electrodes formed from several flux cored wires as a function of input energy.

9.18±1.65 g/kg_{electrode} 인 바 이는 용착금속 1 kg이 형성 될 때 흙이 평균 9.18 g 형성된다는 의미이다. FFR_{weld} 값이 FFR_{electrode} 값보다 큰 이유는 용접와이어가 용융되면서 와이어의 내부에 존재하는 플럭스 증슬래그 형성이 용착금속으로 이행되지 못하기 때문이다. 이렇게

되면 실제로 용융 되는 와이어 양보다 용착금속량이 적어지게 되어 FFR_{weld} 값이 상대적으로 커지게 된다. 이러한 현상으로 미루어 보면 플럭스가 내재되어 있지 않은 일반 용접와이어를 사용할 때는 FFR_{weld} 값과 FFR_{electrode} 값이 비슷하리라고 추측할 수 있다. Fig. 2는

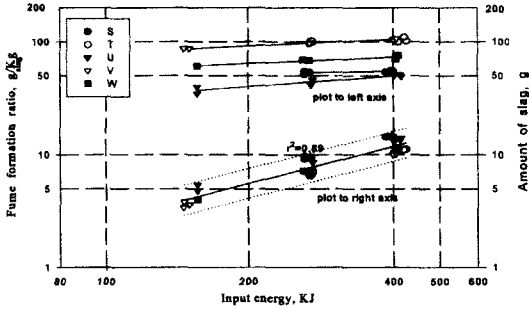


Fig. 3. Fume formation ratios based on slag and the amount of slag formed from several flux cored wires as a function of input energy.

FFR_{weld}를 나타낸 것이다. 이 그림은 입열량이 증가함에 따라 용융 와이어의 양이 증가하게 되면 용착 금속량도 같이 증가함을 보여주고 있다. FFR_{weld}의 발생 경향은 FFR_{electrode}와 비슷한 경향을 가지고 있다. 그 이유는 용착 금속의 대부분이 용접 와이어에서 기인하기 때문이다. 용접 와이어 종류를 구분하지 않았을 때 입열량과 FFR_{weld}의 상관계수는 0.06으로 낮았다. 용접 와이어 별로 입열량과의 상관계수는 0.04(제품 C), 0.12(제품 S), 0.87(제품 T), 0.98(제품 U), 0.88(제품 V), 0.85(제품 W)이었다.

AWS³⁾에서 와이어의 직경이 2.38 mm인 자체보호(self shielded) 스테인레스 강 플럭스 코어드 와이어를 사용하여 고전압(28~33 V)과 고전류(340~420)조건에서 실험하였을 때 FFR_{weld}는 6.97~12.32 g/kg_{weld}라고 한 보고와 비교하여 볼 때 용접재료, 전류, 전압, 보호가스 등 실험조건이 본 연구와 상이함에도 불구하고 본 실험 연구결과인 6.03~12.24 g/kg_{weld}와 매우 비슷하다. 이미 발표한 논문에서 설명하였듯이⁹⁾ FGR은 높은 전류조건 때문에 본 연구에서의 FGR 값보다 높았다. 그러나 높은 전류로 인하여 용착 금속량도 비례적으로 증가함으로 FFR_{weld}는 비슷한 결과가 나왔다고 사료된다.

FFR_{slag}는 Fig. 3과 같다. FFR_{slag}는 FFR_{electrode}나 FFR_{weld}보다 뚜렷한 증가 경향을 보이고 있다. 그 이유는 입열량의 증가에 따른 슬래그 증가량이 크지 않기 때문이다. 각 와이어의 상관계수는 0.35(제품 S), 0.17(제품 T), 0.89(제품 U), 0.98(제품 V), 0.86(제품 W)이었다. 한편 FFR_{slag}는 평균 71.8±24.2 g/kg_{slag}이었다.

와이어 종류별로 단위시간당 FGR, FFR_{electrode}, FFR_{weld}, FFR_{slag}의 차이를 명확히 설명할 수는 없다.⁵⁾ 본 연구와 같이 다른 조건이 동일하고 와이어 종류별로 FGR 및 FFR의 차이가 나는 이유는 와이어의 외피 금속성분 및 플럭스의 구성성분 함량의 차이에 기인한

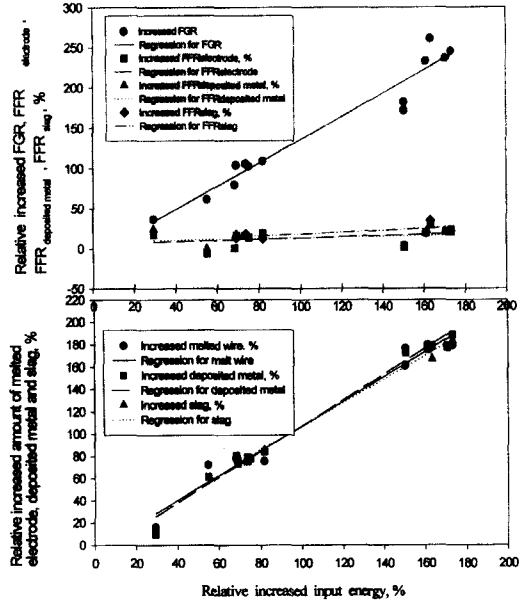


Fig. 4. Relative increases in the amount of FGR, FFR_{electrode}, FFR_{weld}, FFR_{slag}, melted electrode, deposited metal, and slag compared to those of the lowest input energy tested.

다고 할 수 있다.

Fig. 4는 가장 낮은 입열량 조건에 비해 입열량이 증가하면서 상대적으로 증가된 용융 와이어의 양, 용착 금속의 양, 슬래그의 양을 증가비로 나타내고(그림의 아랫부분), 이에 따른 FGR, FFR_{electrode}, FFR_{weld}, FFR_{slag}(그림의 윗부분)를 표시한 것이다. Fig. 5에서 보는 것처럼 입열량이 증가함에 따라 용융 와이어의 양, 용착 금속의 양, 슬래그의 양은 거의 직선적으로 비례하여 증가하여 저입열량에 비하면 최고 200%까지 증가하고 있다. FGR도 증가하지만 FFR_{electrode}와 FFR_{weld}, FFR_{slag}는 약간 증가되거나 거의 증가되지 않는 경향이였다. 주된 이유로는 이미 설명하였듯이 입열량이 증가하면서 비례적으로 용융 와이어 양, 용착 금속량, 슬래그 양이 비례적으로 증가하고 있기 때문이다. 입열량이 낮을때보다 높을 때 FGR은 약 250%까지 증가한다. 이러한 원인은 단위시간당 흠 발생량의 증가는 입열량에 따라 차이가 심함을 의미한다. 그러나 이미 설명하였듯이 FFR_{electrode}, FFR_{weld}, FFR_{slag}는 입열량 증가에 따라 최대 증가폭이 각각 30%이내였다.

IV. 결 론

스테인레스 강에 대한 플럭스 코어드 아크용접

(FCAW)을 용접 흠 발생장치에서 수행하였다. 이 때 흠 발생에 영향을 미치는 중요한 변수인 전류와 전압을 변화시키며, 흠 형성량(FFR)을 측정할 때 $FFR_{\text{electrode}}$, FFR_{weld} , FFR_{slag} 는 입열량이 증가하더라도 유의하게 증가하지는 않았다. 그 이유는 입열량 증가가 용융 와이어, 용착 금속, 슬래그도 동시에 증가시키기 때문이다. 측정된 평균 $FFR_{\text{electrode}}$, FFR_{weld} , FFR_{slag} 는 각각 $7.90 \pm 1.47 \text{ g/kg}_{\text{electrode}}$, $9.18 \pm 1.65 \text{ g/kg}_{\text{electrode}}$, $71.8 \pm 24.2 \text{ g/kg}_{\text{slag}}$ 이었다. 저 흠 용접봉이나 저 흠 용접와이어를 생산하여 흠 형성량을 측정하고자 할 때는 입열량에 따른 $FFR_{\text{electrode}}$, FFR_{weld} , FFR_{slag} 의 상대적인 증가 또는 감소량을 측정하는 것보다 한 조건에서 흠 형성량을 측정하는 것이 비용과 시간을 절감할 수 있는 방법임이 확인되었다.

참고문헌

- 1) Hewitt, P. J. and A. A. Hirst : A system approach to the control of welding fumes at source. *Ann. Occup. Hyg.* **37**(3), 297-306, 1993.
- 2) American Industrial Hygiene Association(AIHA) : Welding and health and safety-Resource manual. OH; AIHA, 5-33, 1984.
- 3) Zakhari, S. and J. Strange : Effect of welding on health III. Miami, Fl; *American Welding Society*, 1-5, 1983.
- 4) Voitkevich, V. : Chapter 2. Welding fume properties. In welding fumes-formation, properties and biological effects. England; Abington Publishing, 18-77, 1995.
- 5) American Welding Society : Fumes and gases in the welding environment(edited by Speight, F. Y. and H. C. Campbell). Miami, Fl; American Welding Society, 63-114, 1987(Reprinted).
- 6) Moreton, J., J. Betterley, H. Mathers, A. Nicholls, R. W. Perry, D. B. Ratcliffe and L. Svensson : Investigations of techniques for analysis of hexavalent chromium, total chromium and total nickel in welding fume: a co-operative study. *Ann. Occup. Hyg.* **27**(2), 137-156, 1983.
- 7) Palmer, W. G. and J. C. Eaton : Effects of welding on health IX. Miami, Fl; American Welding Society, 19-29, 1994.
- 8) Palmer, W. G. : Effects of welding on health IV. Miami, Fl; American Welding Society, 1-10, 1983.
- 9) 윤충식, 백남원 : 스테인레스 강에 대한 플럭스 코어드 아크 용접공정에서의 흠 발생량 및 입자 크기 분포에 관한 연구. *한국환경위생학회지.* **25**(2), 107-114, 1999.
- 10) 김정환, 채현병 : 아크용접시 흠 발생특성 및 흠의 포집/분석기술, 용접기술세미나-용접 흠발생 및 관련기술. *한국생산기술연구원세미나집*, 3-32, 1997.
- 11) 채현병, 김정환, 김희남 : Arc 용접시 fume 발생량 평가에 관한 연구. *한국산업안전학회지.* **13**(2), 65-75, 1998.
- 12) American Welding Society : Laboratory Method for Measuring Fume Generation Rates and Total Fume Emission of Welding and Allied Processes(ANSI/AWS F1.2-92). *American Welding Society, Florida, USA*, 1-8, 1992.