

용접흙 중 금속함량 변화에 관한 연구

윤충식[†] · 박동욱* · 박두용**

대구가톨릭대학교 · *한국방송통신대학교 · **한성대학교

A Study on the Content Variation of Metals in Welding Fumes

Chung Sik Yoon[†] · Dong Uk Park* · Doo Yong Park**

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Daegu, Korea

*Department of Environmental Health, Korea National Open University, Seoul, Korea

**Department of Industrial Safety Engineering, Hansung University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Concentration of welding fumes and their components is known to be hazardous to welder and adjacent worker. To determine the generation rates of metals in fumes, CO₂ flux cored arc welding on stainless steel was performed in well designed fume collection chamber. Variables were different products of flux cored wire(2 domestic products and 4 foreign products) and input energy(low-, optimal-, high input energy). Mass of welding fumes was determined by gravimetric method(NIOSH 0500 method), and 17 metals were analysed by inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy(NIOSH 7300 method). Flux cored wire tube and flux were analysed by scanning electron microscopy to determine their metal composition.

17 metals were classified by their generation rates. Generation rates of iron, manganese, potassium and sodium were all above 50mg/min at optimal input energy level. Generation rates of chromium and amorphous silica were 25~50mg/min. At 1~25mg/min level, nickel, titanium, molybdenum, and aluminum were included. Copper, zinc, calcium, lead, magnesium, lithium, and cobalt were generated below 1 mg/min. Generation rates of metal components in fumes were influenced by input energy, types of flux cored wire.

Flux cored wire was consisted of outer shell tube and inner flux. Iron, chromium, and nickel were the major components of outer tube. Flux contained iron, chromium, nickel, potassium, sodium, silica, and manganese. The use of flux cored wire can increase the hazards by increasing the amounts of fumes formed relative to that of solid wire. The reason might be the direct transfer of elements from the flux, since the flux is fine power. Ratio of metals to the fume of flux cored wire was lower than that of solid wire because non-metal components of flux were transferred. Total metal content of fumes in flux cored arc welding was 47.4(24.3~57.2) percent that is much lower than that of solid wire, 75.9 percent.

We found that generation rates of iron, manganese, chromium and nickel, all well known to cause work related disease to welder, increased more rapidly with increasing input energy than those of fumes.

To reduce worker exposure to fumes and hazardous component at source, further research is needed to develop new welding filler materials that decrease both the amount of fumes and hazardous components.

Keywords: Flux cored arc welding, Fume, Generation rate, Input energy, Stainless steel, Metal, Manganese, Chromium, Nickel, Carcinogen

† Corresponding author : Dept. of Occupational Health,
Catholic Univ. of Daegu, Korea
Tel : 053-850-3738, Fax : 053-850-3736
E-mail : csyoon@amare.ac.kr

I. 서 론

용접 흡의 발생량에 영향을 미치는 인자로는 용접 종류, 용가재(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.¹⁻⁴⁾ 정해진 용접에서 전류와 전압이 용접 흡의 발생에 가장 크게 영향을 미치는데⁵⁾ 일반적으로 전류와 전압이 증가하면 용접 흡량이 증가하게 된다.⁶⁾ 전류와 전압이 증가한다는 것은 입열량을 많이 주는 것이고 이에 따라 단위시간당 금속의 용융량이 증가하게 된다.

용접 흡중에는 다양한 금속이 존재한다. 기존의 보고된 연구결과에 의하면 용접 종류와 용가재 및 모재에 따라 다르기는 하나 용접과 관련하여 발생할 수 있는 금속은 Fe, Mn, Cr, Ni, Si, K, Na, Al, Ti, Mo, Li, Cu, Zn, Mg, Ca, Co, Pb 의 17가지가 주종을 이룬다.⁷⁾

피복아크용접에서 용접봉에 덮여져 있는 피복재와 같은 역할을 플럭스 코어드 아크용접에서는 외피인 금속튜브안에 있는 플럭스성분이 하게 된다. 플럭스는 아크 안정제, 가스발생제, 탈산제, 탈질제, 슬래그 생성제, 합금첨가제, 고착제 등의 역할을 하는데⁸⁾ 용가재 제조회사마다 첨가 성분 및 배합량이 다르고 기밀사항으로 되어 있다. 이런 플럭스 성분은 금속외피와 더불어 흡의 조성에 영향을 주게 된다.^{9,10)}

다양한 용접 조건을 제어하면서 흡의 거동을 파악하기 위해서는 실험실 실험이 이루어져야 하는데 이를 위해서 미국용접학회는 물론 우리나라도 일정한 KS 규격(KS D0061)을 정해놓고 있다.^{9,10)} 이러한 파일럿 실험 장치를 이용하여야 여러 가지 용접 변수를 제어하면서 용접 흡의 거동에 관한 연구를 할 수 있다. 그러나 용접 변수를 변화시키면서 각각의 금속함량변화에 관한

연구는 거의 이루어지지 않았다. 그 이유는 현장에서 이루어지는 용접을 대상으로 할 경우 용접조건을 임의로 변화시키기가 어렵고, 실험실 조건이라 하더라도 각 금속의 거동을 파악하기 위해서는 동시에 여러가지 금속을 분석하여야 하는데 전통적인 원자흡광분석기로는 여러가지 금속을 동시에 분석하기가 용이하지 않았기 때문이다.

용접 흡은 산업보건학적으로 중요한 유해물질이다. 흡 자체가 미세하여 호흡기를 통하여 쉽게 폐까지 도달할 수 있을 뿐 아니라 흡 중의 크롬, 니켈, 망간 등 몇몇 구성성분은 인체에 매우 해롭기 때문이다. 따라서 용접 흡은 그 농도는 물론이고 각 구성성분의 조성도 중요하다. 현장에서 근로자의 용접 흡에 대한 노출 연구는 많이 되어 있는데 역학조사자료 또는 용접 작업별로 용접 흡의 농도 또는 특정금속에 대한 노출정도를 해당작업에 대하여 파악하는 것이었다.

용접 흡의 거동과 용접 흡의 구성성분에 대한 연구는 흡의 농도 및 흡의 구성성분 파악에서 그치지 않고, 근로자의 건강보호 또는 작업환경 관리 측면에서 저흡 용가재 개발이라는 환경친화적인 제품의 생산까지 영향을 주고 있다. 예를 들어 피복아크 용접에서 피복재에 리튬이 첨가되면 6가 크롬의 생성이 억제된다는 보고¹¹⁾와 자외선의 발생을 줄여 오존생성억제로 6가 크롬 생성이 감소되었다는 보고도 있다.¹²⁾

본 연구의 목적은 용접에서 가장 중요한 변수인 전류와 전압을 변화시키며 용접 흡중에 존재하는 유해금속을 비롯한 여러 금속의 발생량과 흡 중 각 금속의 함량변화를 규명하는데 있다.

II. 연구방법

본 연구는 우리 나라 조선업에서 많이 사용되는 CO₂ 플럭스 코어드 아크용접(flux cored arc

welding)을 대상으로 하였다. 용가재는 우리나라에서 많이 사용하고 있는 플럭스 코어드 와이어 2종과 외국산 4종(미국산 2, 스웨덴산 1, 일본산 1)을 선정하였다. 단, 용접조건에서 가장 중요한 변수인 전류와 전압은 플럭스 코어드 아크 용접의 적정조건(이하 적정 입열량 조건이라 함), 저전류·저전압(이하 저 입열량 조건이라 함), 고전류·고전압(이하 고 입열량 조건이라 함)의 세 단계로 변화시켜 실험을 수행하였다. 사업장에서는 생산성을 높이기 위해 적정조건보다는 고전류·고전압을 사용하는 경향이 있다.

본 연구에서 중요한 변수인 전류와 전압은 용접기에 나타나는 명목상의 전류와 전압대신 Arc Monitoring System V4.1(O.I.S. Engineering Ltd. England)을 이용하여 용접기 출력단자에서 전류와 전압 및 입열량을 2초단위로 모니터링 하였다.

용접 흠 발생 및 채취장치는 이미 언급한 것처럼⁶⁾ 자동과 수동 용접을 할 수 있고 단위 시간당 용접 흠 발생량을 측정할 수 있도록 고안된 장치이다. 이 장치는 용접시간, 용접길이, 와이어 송급속도, 용접속도, 토치각도, CTWD 및 흠 채취

시간을 변화시키면서 각 변수를 모니터링 할 수 있도록 설계되었다.^{13,14)} 용가재의 종류 및 용접 조건은 표 1과 같다. 주된 변수인 전류와 전압을 동시에 표현하기 위하여 전류와 전압을 곱하여 입열량(J)=전류(I)·전압(V)·용접시간(sec))으로 표시하였다.

한 용접조건에서 금속 분석용 시료 3개를 동시에 채취하기 위하여 셀룰로스 막 여과지(pore size 0.8 μ m, diameter 37mm, Millipore, USA)가 장착된 3개의 카세트 홀더를 오리피스(nominal flow 2 l/min, 자체제작)와 Y자관을 연결하였다. 진공펌프(Model DOA-V152-AA, Waters, USA)를 이용하여 각 여과지에서 2.0 \pm 0.1 l/min으로 시료채취를 하였다. 각 여과에서의 유량은 시료채취 전후로 보정하였다. 시료는 상온에서 운반·저장한 후 분석하였다.

각 용접조건에서 금속의 발생량 및 함량뿐 아니라 용접 흠의 발생량도 측정하였다.⁶⁾ 용접 흠의 총량은 NIOSH 0500 방법을 적용하여 중량법으로 분석하였다. 시료는 수분의 영향을 제거하기 위해 칭량 전후에 습도를 조절하였고 공시료로 보정하였다.

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 ₂ (20L/min)
Nominal voltage(V) and current	: Low input energy(22V and 120A), Optimal input energy(25V and 180A) High input energy(30V and 230A)
Current characteristics	: DCEP(Direct Current Electrode Positive)
Welding machine	: Dyna Auto Super 600(Japan)
Electrode type	: C(SB 308L, 1.2 ϕ 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 ϕ AWS/ASME SFA 5.22 E 308LT-1. KS D3612 YF 308LC, Alloy Rod Korea, Korea)
Test plate	: SUS 304(260mm x 260mm x 10mm), Travel speed; 6 mm/sec
CTWD	: 14mm
Torch angle	: 90 °
Wire feeding rate	: 15.1m/min

채취된 여과지에서 금속을 분석하기 위하여 NIOSH 7300의 부록에 나와 있는 방법을 참조하였고 표 2의 조건으로 마이크로파 오븐으로 질산 2 ml을 첨가하여 전처리하였다. 전처리된 시료는 총 용량을 20 ml로 하여 유도결합플라즈마-원자흡광분석기(Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy; ICP-AES, Perkin Elmer, USA)로 분석하였다. 분석조건은 표 3과 같다. 단, 각 금속별로 분석에 용이한 파장을 선정하여 이용하였다. 모든 금속은 회수율을 구하여 보정하였다. 이렇게 구한 흡 중 금속의 양을 전체 흡량으로 나누어 각 금속의 흡중 함량을 구하였으며, 각 금속의 발생량은 흡 발생량과 흡중금속의 함량을 각 용접조건에서 계산하여 구하였다.

Table 2. Operating condition of microwave digestion system

Parameter	Stage		
	1	2	3
Power(W)	665	950	950
Temperature(°C)	100	140	160
Ramp Time(min)	5	15	20
Run Time(min)	3	10	15
No. of Vessel		12	

Table 3. Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopic conditions

Model	: Optima 3000 DV (Perkin-Elmer, USA)
Sample flowrate	: 1 ml/min
Electromagnetic power	: 1300 W
Detector	: Charge-coupled device (CCD) detector

용접 와이어의 금속 함량비를 알기 위하여 SEM-EDS(Scanning electron microscope-Energy dispersive spectrometer, Model JSM- 6330F, JOEL Co., Japan and Model Link ISIS, Oxford

Co., UK)를 이용하여 플렉스 코어드 와이어 외 피인 튜브와 내부의 플렉스를 따로 따로 분석하였다. 플렉스 코어드 와이어의 바깥부분은 금속의 성분이 일정하였으나 내재하는 플렉스 중에는 성분이 불균일하게 분포하여 분석 부위마다 함량의 차이가 심하였다. 따라서 플렉스내의 금속은 함량대신에 발견된 금속의 종류만을 결과에 표기하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 입열량 변화에 따른 흡과 흡중 금속의 발생량 변화

여러 가지 용접조건중 흡 발생량에 영향을 주는 것은 같은 용접종류에서는 전압과 전류가 가장 크다고 알려져 있다.⁵⁾ 표 4는 입열량(전류 및 전압)변화에 따른 흡의 발생량 및 금속의 단위시간당 발생량을 표시한 것이다. 1 분당 발생량이 1mg/min이하인 구리, 칼슘, 납, 망간, 리튬, 코발트는 합하여 기타(others)로 표시하였다.

용접와이어의 종류에 따라 차이는 있으나 입열량이 증가하면서 대부분의 금속 발생량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 단위시간당 입열량의 증가로 인해 용가재 및 모재의 용융량이 증가하고, 이에 따라 흡 및 금속의 발생량이 증가함을 의미한다. 즉, 적정 입열량 조건보다 과도한 전류와 전압을 주어 용접을 하게 되면 용접흡만 아니라 흡의 구성성분인 각 금속의 발생량도 같이 증가하는 것을 확인하였다.

용접와이어 제조회사에서 권장하는 적정 입열량 조건(용착금속의 성질이 양호한 조건)에서 실험했을 때 발생하는 각 금속량에 따라 17개 금속을 나눠보면 대략 4가지 그룹으로 구분할 수 있다. 첫 번째 그룹은 적정전류·전압조건에서 50 mg/min이상 발생될 수 있는 금속으로 철(45.3~56.8mg/min), 망간(17.9~60.5mg/min), 칼륨(10.5~70.6mg/min), 나트륨(10.5~83.7mg/min) 이 속한다. 두 번째 그룹은 적정 조건에

서 금속의 발생량이 25~50mg/min인 그룹으로 크롬(12.8~37.3mg/min), 실리카(17.6~33.3mg/min)가 포함되며, 세 번째 그룹으로는 금속의 발생량이 1~25mg/min인 것으로 니켈(5.3~7.1mg/min), 티타늄(5.3~24.6mg/min), 몰리브덴(0.02~7.3mg/min), 알루미늄(0.9~21.8mg/min)이 포함된다. 구리, 아연, 칼슘, 납, 마그네슘, 리튬, 코발트 등은 네 번째 그룹으로 발생량이 아주 적어 적정조건은 물론, 고 입열량 조건에서도 1.0mg/min 이상을 나타내지 않았다.

국산제품과 외국제품의 와이어를 구분하여 각 금속의 발생량 추이를 보면 철, 크롬, 니켈, 칼륨, 나트륨, 실리카 등은 제품간 발생량 차이와 입열량의 증가에 따라 발생량이 증가하는 특징이 있다. 적정 입열량 조건에서 망간은 국산와이어(U와 W)를 사용했을 때(42.8~60.5mg/min)가 외국제품(17.9~41.3mg/min)을 사용했을 때보다 발생량이 높는데 특히 국산제품 'U'의 망간 발생량이 가장 높았다. 이 이유를 명확히 설명할 수는 없지만 이 제품은 와이어 금속 튜브인 외피에서 망간이 1.15% 함유되어 있었고, 다른 제품은 모두 와이어의 외피에 망간이 함유되어 있지 않았다. 티타늄과 몰리브덴은 국산제품의 발생량이 훨씬 적는데 이들은 모두 플럭스에 존재하는 성분으로 국산 용접와이어에 이들 성분이 적게 함유되어 있다고 판단된다. 이들은 아크 안정제나 탈질제로 사용되는 성분인데, 이들이 흡 형성에 어떻게 영향을 미치는지는 확실하지 않다.

각 금속의 발생량 차이에 영향을 주는 인자는 용접와이어의 구성성분, 모재의 구성성분, 용접조건, 아크의 환경, 각 금속의 증발열 등 다양하다.⁷⁾ 본 연구에서는 동일한 모재(스테인레스스틸, SUS304), 일정한 전류·전압의 용접조건과 아크환경(CO₂용접)이 같은 상태에서 용접와이어의 여러 종류를 대상으로 실험을 했기 때문에 금속의 발생량의 차이를 보이는 주된 원인은 용접와이어에서의 금속 함량 때문일 것이다. 각 금속의 증발열이 금속의 발생량 차이에 크게 기여하지 못하는 이유는 용접할 때 아크의 온도가 수천도 이

상인데 이런 온도에서 모든 금속은 충분히 녹아 휘발가능 상태이기 때문이다. 본 연구에서도 각 금속의 발생량 차이는 금속의 증발성 순서보다는 함량차이에 기인하고 있는 것으로 생각된다. 즉, 어느 한 용접 종류에서 용접 조건이 주어지면 금속성분의 발생량에는 용가제와 모재의 금속함량이 크게 영향을 주게 되는데 특히 모재보다는 와이어에 속한 금속 함량이 더 큰 영향을 준다. 칼륨, 칼슘 등은 플럭스에 다량 함유되는 물질이다. Voitkevich(1995)⁷⁾에 의하면 흡은 85% 이상이 용가제에서, 15% 미만이 모재의 영향을 받으며 나트륨, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 티타늄, 불소(본 연구에서는 분석하지 않음)는 피복 용접봉인 경우 피복제에서, 플럭스 코어드 와이어인 경우 플럭스에서 유래하고, 철, 망간, 크롬, 니켈, 실리카 등은 용가제의 금속이나 플럭스, 또는 모재로부터 유래한다고 알려져 있다.

2. 플럭스 구성성분에 따른 금속의 발생량

플럭스를 구성하는 여러 성분은 흡의 발생량 뿐 아니라 각각 금속의 발생에도 영향을 주나 플럭스내 성분과 흡의 구성성분 사이 관계는 매우 복잡하다.⁵⁾

표 5는 본 연구에 사용된 용가제인 플럭스 코어드 와이어의 외피인 금속튜브와 내부의 플럭스로 구분하여 금속성분을 전자현미경으로 분석한 결과이며 그림 1은 현미경 사진(50배)이다. 그림에서 보듯이 플럭스 코어드 와이어는 외피인 금속 튜브가 내부의 플럭스를 둘러싸고 있다.¹⁰⁾ 외피인 금속튜브는 금속의 구성이 거의 균질하지만 튜브의 모양이 다르고, 내부의 플럭스는 여러 물질이 알갱이 형태로 불균일하게 분포되어 있으며 분석부위마다 함량이 달라 표 5에서는 존재여부만 표시하였다. 플럭스에 함유되어 있는 금속은 여러 용도로 사용되는데, 아크 안정제로는 티타늄, 칼륨, 나트륨, 리튬이 사용되고 슬래그 형성을 돕기 위해서는 Si가 사용된다. 탈산제로는 알루미늄, 망간, Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Al 합금이 사용되며, 탈질제인 Fe-Al, Fe-Ti 합금이 사용된다. 가스발생제로는 유기물과 광물이 사용되며,

합금 첨가제는 용착 금속의 화학조성을 조정하기 위해 여러 금속을 플럭스에 첨가하는 것이다.^{8,10,15,16)}

표 4의 흠 발생량 결과와 표 5의 플럭스 코어 드 와이어의 금속성분 분석결과를 비교하여 보면 흠중의 철, 크롬, 니켈은 외피와 플럭스 모두에서 유래되고, 칼륨, 나트륨, 실리카, 망간(와이어 U 제외)등 기타 금속성분은 모두 플럭스에만 존재하던 것이 용융물이 되어 흠으로 전이된다고 할 수 있다. 플럭스 중의 각 성분의 함유량은 전자

현미경 분석결과에서 보듯이 일정하지 않으나, 상대적으로 발생량이 많은 칼륨, 나트륨, 실리카 망간 등은 플럭스에도 많이 존재하고, 기타 아연, 구리 칼슘, 마그네슘, 리튬, 코발트 등은 소량존재하는 것으로 추정할 수 있다. 납은 표 4에서 기타(others)로 합하여 표시되었는데 국산 제품인 C 및 W에서만 극미량으로 발생하고 있는데 표 5에서 보듯이 와이어 외피나 플럭스에서 발견되지 않는 것으로 보아 첨가물보다는 와이어 제조과정의 오염물질로 추정된다.

Table 4. Generation rates of fumes and metals in several flux cored wires by input energy

Wire Types	Input Energy* KJ/min	No. of Samples	Generation Rate mg/min											
			Fume(Sr**)	Fe	Mn	Cr	Ni	K	Na	Si	Ti	Mo	Al	Others
C	162	3	312(0.03)	12.0(0.16)	17.2(0.07)	8.3(0.06)	1.2(0.09)	16.7(0.03)	6.7(0.02)	10.1(0.14)	1.5(0.06)	0.01(0.23)	1.1(0.43)	0.3(0.28)
	250	3	504(0.16)	56.8(0.26)	60.5(0.27)	36.9(0.25)	6.2(0.26)	60.8(0.26)	22.9(0.22)	33.3(0.29)	6.9(0.24)	0.02(2.00)	2.8(0.23)	0.9(0.42)
	404	3	848(0.02)	103.3(0.07)	85.4(0.05)	59.5(0.07)	11.6(0.07)	106.9(0.05)	33.2(0.07)	42.7(0.02)	11.8(0.05)	0.17(0.05)	5.1(0.19)	0.5(0.17)
S	158	3	279(0.04)	17.5(0.14)	9.1(0.12)	4.4(0.18)	2.0(0.15)	36.6(0.12)	10.4(0.10)	14.2(0.13)	9.9(0.12)	5.17(0.14)	3.8(0.11)	0.3(0.27)
	264	3	500(0.01)	45.3(0.14)	17.9(0.14)	37.3(0.29)	6.3(0.18)	52.1(0.08)	10.5(0.03)	19.7(0.13)	14.8(0.12)	7.3(0.10)	5.7(0.10)	0.3(0.20)
	394	3	787(0.01)	85.3(0.14)	31.9(0.18)	63.3(0.44)	10.8(0.25)	98.5(0.02)	25.3(0.08)	28.7(0.13)	23.1(0.11)	7.6(0.07)	10.2(0.09)	0.3(0.06)
T	156	3	344(<0.01)	22.1(0.01)	13.7(<0.01)	5.6(0.07)	2.5(<0.01)	38.0(0.01)	41.8(0.03)	20.9(0.01)	13.8(0.01)	5.2(0.03)	3.8(0.03)	0.9(0.15)
	272	3	698(0.04)	53.2(0.11)	26.0(0.07)	19.7(0.57)	6.3(0.18)	70.6(0.04)	68.9(0.03)	19.6(0.68)	22.3(0.02)	7.2(0.03)	6.5(0.03)	0.7(0.04)
	420	3	1157(0.04)	112.8(0.10)	53.1(0.14)	76.5(0.37)	14.5(0.17)	123.8(0.05)	123.3(0.04)	38.7(0.04)	36.6(0.06)	8.3(0.07)	11.0(0.06)	0.7(0.09)
U	156	3	189(0.01)	18.1(0.16)	11.3(0.19)	3.8(0.24)	1.4(0.17)	6.6(0.22)	27.8(0.20)	8.9(0.27)	6.3(0.20)	2.2(0.16)	0.5(0.30)	2.5(0.31)
	272	3	389(0.03)	52.8(0.12)	21.3(0.15)	31.6(0.53)	6.0(0.19)	10.5(0.04)	29.4(0.05)	17.6(0.07)	11.7(0.11)	3.7(0.02)	0.9(0.15)	2.0(0.30)
	410	3	682(0.03)	89.9(0.06)	31.6(0.08)	38.8(0.40)	9.9(0.12)	17.9(0.06)	51.4(0.03)	26.5(0.03)	17.1(0.07)	4.8(0.02)	1.3(0.08)	1.7(0.04)
V	148	3	311(0.05)	20.7(0.13)	20.3(0.14)	8.0(0.44)	1.7(0.08)	18.2(0.20)	50.6(0.23)	16.4(0.27)	13.4(0.16)	2.9(0.16)	13.3(0.19)	0.3(0.42)
	268	3	649(0.01)	65.6(0.04)	41.3(0.05)	27.4(0.26)	7.1(0.06)	35.8(0.07)	83.7(0.06)	20.3(0.16)	24.6(0.04)	4.2(0.05)	21.8(0.05)	0.3(0.36)
	402	3	1074(0.03)	123.2(0.07)	68.0(0.07)	68.1(0.18)	14.2(0.10)	59.6(0.06)	145.5(0.09)	21.4(0.14)	32.4(0.09)	3.8(0.27)	31.0(0.05)	0.3(0.64)
W	156	3	243(0.01)	20.9(0.14)	26.3(0.14)	5.9(0.44)	2.2(0.17)	35.7(0.12)	12.0(0.15)	10.2(0.43)	2.2(0.19)	0.04(0.14)	0.9(0.12)	0.2(0.21)
	264	3	495(<0.01)	49.2(0.14)	42.8(0.14)	12.8(0.22)	5.3(0.16)	68.1(0.14)	18.6(0.14)	23.7(0.07)	5.3(0.18)	0.1(0.13)	2.0(0.11)	0.3(0.28)
	408	3	808(0.04)	81.8(0.06)	52.8(0.06)	44.0(0.16)	9.7(0.07)	95.8(0.07)	25.7(0.10)	34.0(0.10)	9.6(0.09)	0.2(0.03)	3.2(0.06)	0.4(0.83)

* : Input energy(KJ) described above is monitored by 'Arc Monitoring System 4.01' and has some different values from that calculated using voltage and current.

** : Relative Standard Deviation

Table 5. Composition of outer shell and inner flux of several flux cored wires, analyzed by SEM-EDS

Wire Type	Composition of Outer Shell, %				Component Founded in Inner Flux
	Fe	Cr	Ni	Mn	
C	68.07	20.28	10.51	1.15	Fe, Cr, Al, Ti, K, Na, Mn, Ni, Si, Na, Zr
S	71.04	19.02	9.95	-	Fe, Cr, Al, Ti, K, Na, Mn, Si, Na, Mo
T	69.09	19.05	11.86	-	Fe, Cr, Al, Ti, K, Na, Mn, Ni, Si, Na, Mo, S
U	69.09	18.50	11.42	-	Fe, Cr, Al, Ti, K, Na, Mn, Si, Na, Mo,
V	70.36	19.72	9.92	-	Fe, Cr, Al, Ti, K, Na, Mn, Si, Na, Mo,
W	69.90	19.27	10.83	-	Fe, Cr, Al, Ti, K, Na, Mn, Ni, Si, Na,

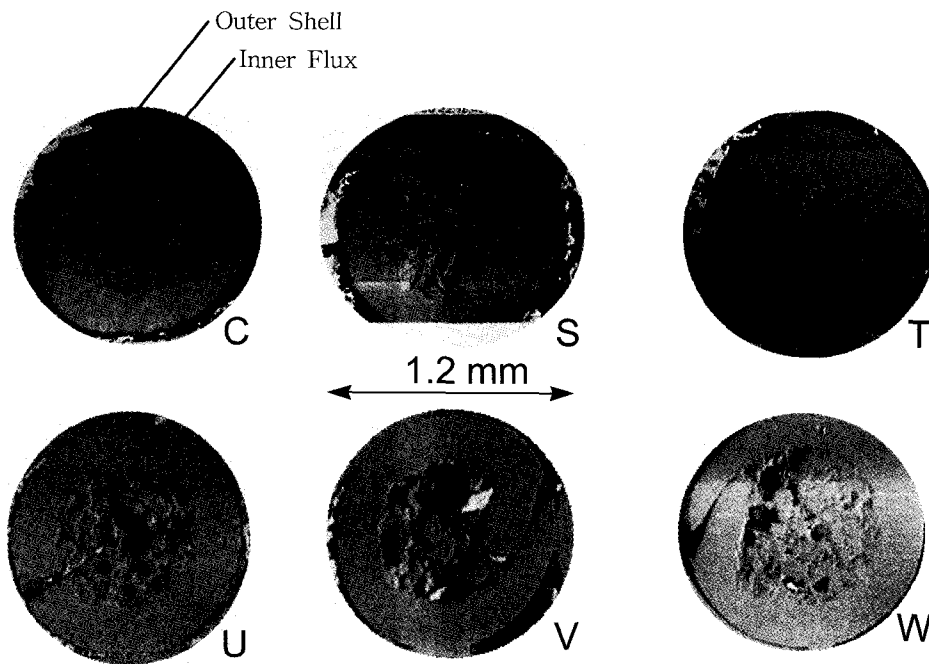


Figure 1. Cross sectional view of the flux cored wires used in this study(microviewed by SEM(50x)).

표 5에서 보듯이 플럭스코어드와이어의 외피인 금속 튜브 중 철 함량은 68~71%, 크롬은 18~20%, 니켈은 10~12%로 존재하지만 흡 중 각각의 함량은 3.9~13.6%, 1.5~8.0%, 0.4~1.5%로 낮아졌다. 튜브 중 금속의 함량보다 흡중 금속함량이 낮아지는 것은 플럭스의 비금속

성분의 전이 뿐만 아니라 플럭스에서 기인한 슬래그가 용융 풀(pool) 위에서 물리적인 차단막을 형성하여 흡의 생성기작인 증발-산화-응축 기작을 억제하고 또한 용융 풀의 소용돌이를 억제하여 용융 풀에서의 작은 입자의 물리적인 튕김(physical ejection)을 억제하기 때문이다.¹²⁾

플럭스에 존재하는 각각의 성분은 단독으로 또는 합금의 미세한 알갱이 형태로 존재하게 된다. 커다란 표면적을 갖는 미세한 금속 알갱이는 용접시 아크 부위에서 이탈하여 증발하기 용이하여 흡의 발생을 증가하게 하는데 기여할 수 있다. Hewitt와 Hirst⁵⁾는 와이어 외피보다 플럭스의 구성성분이 더 흡으로 전이되기 쉬어 솔리드 와이어로 용접할 때보다 플럭스 코어드 와이어로 용접할 때 흡 발생이 많다고 하였다. 따라서 플럭스 코어드 아크 용접은 일반 솔리드 와이어로 용접할 때보다 흡량은 증가하게 되나 흡중 금속 함량은 감소하게 된다. 그 이유는 흡의 많은 성분이 플럭스에서 유래되는데 이 플럭스에는 비금속 성분이 많기 때문이다.

3. 유해금속의 발생량 변화

산업보건측면에서 연구대상인 17가지 모든 물질보다는 유해성이 큰 금속의 발생량이 더 중요하다. 철폐증을 일으키는 철, 90년대 용접작업자에게서 망간중독으로 사회사건화되었던 망간, 발암성 물질인 크롬과 니켈은 산업보건학적으로 특별한 관심의 대상이 된다. 용접흡에 존재하는 실리카는 결정형이기보다는 무정형이라고 보고되었다.⁷⁾

입열량에 따른 흡의 발생량과 산업보건학적 관심이 되는 철, 망간, 크롬, 니켈의 발생율은 그림 2와 같다. 그림 2에서 보듯이 입열량이 증가함에 따라 흡량이 증가하면서 다른 금속도 증가한다. 네가지 유해금속 중에서 철의 발생량이 가장 많고 그 다음 크롬, 망간, 니켈 순이다. 와이어별 발생량의 차이를 보면 철과 니켈은 큰 차이를 보이지 않고 있는데 비해 망간과 크롬은 와이어별로 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 철과 니켈의 발생량은 그림 2에서 좁은 밴드를 형성하고 있는데 비해 상대적으로 망간과 크롬은 넓은 밴드를 형성하고 있다.

입열량이 증가함에 따라 흡량이 증가하는 것은 이미 언급하였거니와 금속의 발생량 증가는 흡량

의 증가와 다른 경향을 보였다. 표 4에서 보듯이 와이어 종류에 상관없이 낮은 입열량 조건($265 \pm 4.56 \text{kJ/min}$)에서 적정 입열량 조건($265 \pm 8.17 \text{kJ/min}$)으로 입열량이 변화될 때(1.70배)가 적정 입열량 조건에서 높은 입열량 조건($406.3 \pm 8.71 \text{kJ/min}$)으로 입열량이 변화될 때(1.53배)보다 입열량의 증가폭에 비해 거의 모든 금속의 발생량 증가가 뚜렷하다. 저 입열량에서 적정 입열량으로 변화할 때 흡 발생량의 경우 1.94(± 0.19)배인데 비해 철의 발생량은 3.03(± 0.89)배, 망간은 2.15(± 0.32)배, 크롬은 5.06(± 2.68)배, 니켈은 3.61(± 1.09)배가 되는데 비해 적정 입열량에서 고입열량으로 변화할 때는 흡의 발생량의 경우 1.66(± 0.06)배인데 비해 철의 발생량은 1.84(± 0.16)배, 망간은 1.64(± 0.24)배, 크롬은 2.39(± 1.08)배, 니켈은 1.89(± 0.24)배가 되었다. 즉 저 입열량에서 적정 입열량 조건으로 변할 때는 금속의 발생량이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 예를 들어 국산제품인 'C'와이어는 저입열량에서 적정 입열량(그림 2 x축의 중간지점)으로 될 때는 철의 발생량이 급격히 증가하는 특성을 보이고 있다. 'C'와이어의 이런 특성은 철뿐만 아니라, 망간, 크롬, 니켈 모두 공통된 현상이다. 그러나 적정 입열량에서 고 입열량으로 될 때는 흡의 발생량과 비슷한 경향으로 증가하는 특징을 보이고 있다.

그림 2에서 보듯이 용접조건이 모두 같을지라도 플럭스 코어드 와이어의 종류에 따라 각 금속의 발생량에 많은 차이가 나는 것은 용접 와이어를 이루고 있는 금속외피나 내부의 플럭스 성분이 흡중 유해금속의 발생에 중요한 역할을 한다는 것을 암시하고 있다. 따라서 용접와이어를 제조할 때 용접 특성뿐 아니라 흡의 발생특성을 고려하여 근로자의 건강영향은 물론 환경측면도 고려하여야 한다. 실제로 외국에서는 흡이 적게 발생하는 용가제의 개발에 많은 관심을 갖고 있다.

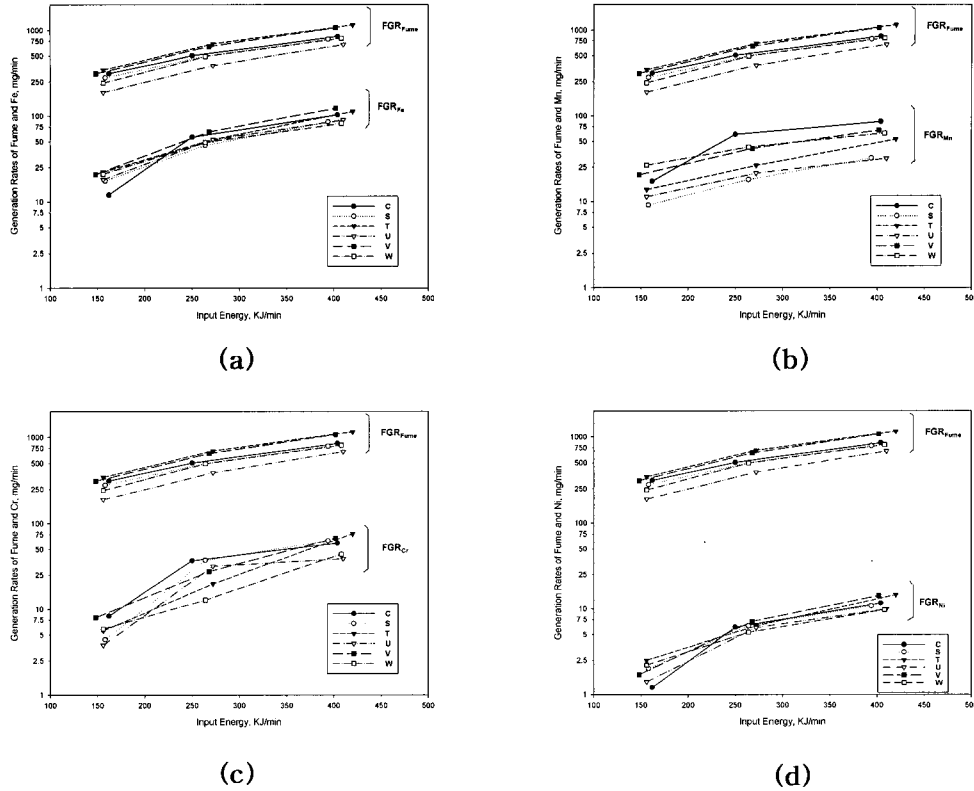


Figure 2. Generation rates of fumes, iron(a), manganese(b), chromium(c), and nikel(d).

4. 흡중 금속의 함량변화

용접 중 공기중으로 나오는 금속의 발생량과 흡중 금속의 함량변화는 다른 각도에서 해석할 수 있다. 금속의 발생량은 이미 고찰한 바와 같이 입열량이 증가하면서 증가하는 경향을 가지고 있는데 흡 중 금속의 함량은 그렇지 않을 수 있다. 그 이유는 입열량이 증가하면서 흡의 발생량과 금속의 발생량이 다르게 증가하고, 또한 각 금속마다 발생량이 다르기 때문에 흡중의 금속의 상대적인 함량은 용접조건에 따라 다르게 변화한다. 그림 3은 용접 흡 중에 존재하는 금속의 함량을 입열량 변화에 따라 용접 와이어별로 표시한 것이다. 그림 3에서 리튬, 마그네슘, 칼슘, 구리,

아연은 흡중 함량이 극미량이어서 합하여 표시하였다. 그림에서 보듯이 스테인레스 강용 플럭스 코어드 와이어 흡 중에 금속성분이 차지하는 비율은 평균 47.4(24.3~57.2)%였다. 문헌에서는 플럭스 코어드 아크 용접에서 발생하는 흡 중 금속함량이 28.7~77%에 이른다고 보고하였다.⁷

특이한 점은 입열량의 증가에 따라 각 금속의 발생량은 표 4에서 보듯이 증가하나 흡중 금속의 총 함량은 크게 변하지 않는다는 사실이다. 와이어 별로 관찰하면 제품 'C'와이어 만이 저 입열량 조건일 때 총 금속함량이 24.3%였다가 적정 입열량 조건에서 57.2%, 고 입열량 조건

에서 54%로 총 금속의 흡 중 변화가 심하였다, 한편, 제품 'S'는 입열량이 낮을 때, 적정할 때, 높을 때 흡중 금속함량이 각각 40.9%, 43.6%, 49.1%였고, 제품 'T'인 경우 (각각) 49.5%, 43.7%, 52.5%, 'U'는(인 경우) (각각) 48.5%, 49.4%,

44.1%이고, 제품 'V'인 경우 53.5%, 51.4%, 53.0%였고, 제품 'W'인 경우 48.1%, 46.3%, 45.6%로 나타났다. 용접와이어 제품간 각 금속의 함량 차이는 있었으나 한 제품내에서 흡중 금속함량은 크게 차이가 없었다.

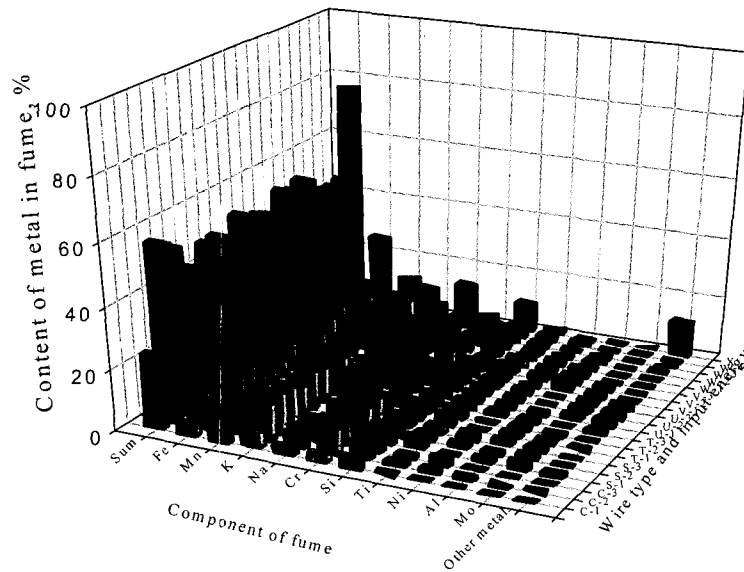


Figure 3. Composition of metals in fumes generated from flux cored arc welding as a function of input energy. (Product 'X' in x axis is a solid wire and have no flux in wire. -1, -2, -3 in x axis means the condition of input energy as follows;
 C-1, S-1, T-1, U-1, V-1, W-1 : Low input energy(156.0±4.56 kJ/min) tested.
 C-2, S-2, T-2, U-2, V-2, W-2 : Middle input energy(265.0±8.17 kJ/min) tested.
 C-3, S-3, T-3, U-3, V-3, W-3 : High input energy(406.3±8.71 kJ/min) tested.

흡 중 금속 이외의 다른 성분은 산소, 불소 및 자유 결합수를 포함하는데 이러한 성분은 위의 금속과 산화물 또는 불화물을 형성하는데 이러한 성분은 주로 플럭스에서 기인한다.⁷⁾ 그림 3에서 보듯이 흡중 철의 함량은 평균 9.4(3.9~13.6)%로 가장 높았고 칼륨이 9.3(2.6~14.7)%였다. 나트륨은 평균 7.4(2.2~16.3)%, 망간은 6.4(3.3~12.0)%, 크롬은 4.7(1.6~8.1)%, 실리카가 4.3(2.0~6.6)%, 티타늄이 2.5(0.4~3.6)%, 알루미늄이 1.1(0.2~4.3)%, 니켈이 1.1(0.4~1.5)% 함

유되었다. 이외에 다른 금속은 1% 미만으로 존재하였다. 리튬은 제품 'T'에만 0.3%함유되었고, 제품 'U'에는 마그네슘이 1.4%함유되었다. 제품 'U'와 'V' 이외의 다른 와이어에서는 철의 함량보다 칼륨의 함량이 높았다. 제품 'U'와 'V'는 칼륨의 함량이 낮은 대신 나트륨의 함량이 높았다. 이런 칼륨과 나트륨은 크롬이 더 유해한 불용성보다는 수용성 6가로 존재하게 하는데 기여를 하는 것으로 알려졌다.^{6,12)} 그림 3에서 용접 와이어 'X'제품은 플럭스가 없는 솔리드 와이

어(AWS E71 T-1)의 실험결과인데 이 제품에서는 금속성분이 전체 흠의 75.9%로 플럭스코어드 와이어의 47.4%보다 훨씬 많다. 이는 플럭스의 많은 성분이 금속이 아님을 의미한다.

칼륨은 플럭스에 존재하며 아크 안정제나 고착제로, 나트륨은 아크 안정제로 함유된다.¹⁰⁾ 이 두 성분을 합하면 평균 16.7%로 솔리드 와이어(제품 X)의 함량 16.7%와 함량비가 비슷하다. 솔리드 와이어에서는 플럭스가 없으므로 이들 성분이 금속와이어에 다른 금속과 같이 포함되어 있다. 이 성분은 와이어에서 아크 안정제로서 일정한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이들 성분 자체는 용접작업에서 보건학적으로 큰 문제를 야기하지 않으나 다음에서 고찰하는 바와 같이 크롬을 수용성의 6가 형태로 존재하게 하는 원인 물질로 작용할 수 있다.

그림 3에서 보듯이 입열량이 증가하면서 흠 중 함량비가 증가하고 있는 것은 철, 크롬, 니켈인데 이 세가지는 모두 금속 튜브의 주성분으로 전류의 영향을 직접 받는 부분이다.⁵⁾ 그러나 망간, 칼륨, 나트륨, 실리카, 티타늄, 알루미늄, 몰리브덴 등은 입열량이 증가하여도 발생량은 증가하나 흠 중 함량변화가 없거나 오히려 감소하고 있다. 이러한 경향은 전류가 증가하면 철, 크롬, 니켈의 흠 중 함량비가 증가하고, 망간은 별 변화가 없다고 한 보고⁹⁾와 잘 일치하고 있다.

흠의 구성성분과 함량에 플럭스가 영향을 미친다.⁶⁾ 플럭스의 구성성분은 흠으로 전이되어 와이어 외피인 금속 튜브 중 금속함량보다 흠 중 금속 함량이 낮아지게 하는데 기여한다. 그 이유는 플럭스에는 대개 금속성분보다 비금속 성분이 많기 때문이다. 이를 플럭스코어드 와이어의 구조로 일부 설명할 수 있다. 즉, 입열량에 따라 흠 중 함량이 증가하는 철, 크롬, 니켈은 모두 외피인 금속튜브에 존재하는 것이 특징이고, 입열량과 흠 중 함량의 상관성이 적은 성분은 내부에 플럭스 성분으로 존재한다. 플럭스코어드 아크 용접에서 아크 현상은 외피인 금속튜브에서 발생하고 내부의 플럭스는 그 복사열, 또는 열전도에

의해 용융되므로 내부 플럭스가 금속 튜브보다 늦게 녹거나 녹지 않는다.⁷⁾ 따라서 전류의 영향을 직접 받는 외피 성분만이 내부의 플럭스보다 입열량의 증가 영향을 더 직접적으로 받는다고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 주된 용접흠 발생변수인 전류와 진압을 변화시키면서 용접 흠 중에 존재하는 유해 금속을 비롯한 17가지 금속의 발생량과 금속의 흠 중 함량변화를 규명하였다. 용접 흠 발생 및 채취장치에서 여러 용접 조건을 모니터링하면서 6종의 스테인레스 강용 플럭스코어드 와이어를 사용하여 저입열량조건, 적정 입열량조건, 고 입열량 조건에서 실험하였다. 용접 흠량은 중량법으로, 각 금속은 마이크로웨이브 오븐으로 전처리하여 유도결합 플라즈마-원자발광분석기로 분석하였다. 주요 연구 목적에 따른 용접조건에 따른 흠발생량과 금속의 함량변화는 다음과 같다.

적정 입열량 조건에서 금속의 발생량에 따라 17개 금속을 구분하여 보면 50mg/min 이상 발생할 수 있는 그룹에는 철, 망간, 칼륨, 나트륨이 포함되고, 25~50mg/min의 발생량을 가지는 금속에는 크롬, 실리카가 포함된다. 발생량이 1~25mg/min인 그룹에는 니켈, 티타늄, 몰리브덴, 알루미늄이 포함되고, 구리, 아연, 칼슘, 납, 마그네슘, 리튬, 코발트 등은 발생량이 아주 적어 적정조건은 물론 고 입열량 조건에서도 1.0 mg/min 이하이다. 금속성분의 발생량에는 입열량, 플럭스 성분, 용가제와 모재의 금속함량이 크게 영향을 주게 되는데 특히 모재보다는 와이어에 속한 금속 함량이 더 큰 영향을 준다.

플럭스 코어드 와이어는 금속튜브와 플럭스로 구성되는데 스테인레스강 플럭스코어드 와이어인 경우 외피에는 철, 크롬, 니켈이 주로 존재하고, 플럭스에는 이와 더불어 칼륨, 나트륨, 실리카, 망간(와이어 U 제외) 등 기타 금속성분이 존재한

다. 플럭스 코어드 와이어는 일반 솔리드 와이어보다 흡량이 많은데 그 이유는 플럭스의 구성성분이 쉽게 흡으로 전이되기 때문이다. 그러나 흡중 금속의 상대적 함량은 적는데 그 이유는 플럭스중 많은 성분이 비금속이기 때문이다.

산업보건학적으로 관심이 되는 유해금속인 철, 망간, 크롬, 니켈은 입열량이 증가에 따라 흡발생량의 증가 크기보다 각 금속의 발생량이 더 크게 증가하였고 특히 저 입열량 조건에서 적정 입열량 조건으로 변할 때 더 심하였다. 이러한 발생량의 변화에는 플럭스코어드 와이어 외피와 더불어 플럭스가 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

플럭스코어드 아크 용접에서 발생하는 흡중 총 금속함량은 평균 47.4(24.3~57.2)%로 솔리드 와이어의 흡중 금속 함량 75.9%보다 훨씬 낮은 데 이는 플럭스에 비 금속 성분이 많기 때문이다. 입열량이 증가하면서 각각 금속의 발생량은 증가하나 흡 중 총 금속의 함량은 크게 변하지 않았다. 입열량이 증가하면서 흡중 함량이 증가한 금속은 철, 크롬, 니켈이고 망간을 비롯한 다른 금속은 흡중 함량이 변화가 없거나 다소 감소하였다. 이러한 특성은 플럭스코어드 와이어의 구조와 플럭스의 작용으로 일부 설명할 수 있다. 흡 중 철 함량은 9.4%, 크롬은 4.7%, 니켈은 1.6%, 망간 6.4%이었다. 선진국을 중심으로 흡의 특성과 흡중 구성성분의 규명을 통하여 저 흡 용가재나 발암성 성분의 함량을 낮추거나 대체 용가재 개발을 하려는 시도가 이루어지고 있다.

감사의 글

본 연구는 2001학년도 대구가톨릭대학교 연구비 지원에 의한 것입니다. 용접 체임버 사용에 대하여 적극적 배려를 해주신 한국생산기술연구원의 김정환 박사님, 전자현미경분석에 많은 도움을 주신 서울대학교 기초과학연구소의 이기라 선생에게 감사의 뜻을 드립니다.

참고문헌

1. American Industrial Hygiene Association (AIHA) : Welding and health and safety-resource manual. OH; AIHA, 5-33, 1984.
2. Zakhari, S. and J. Strange : Effect of welding on health III. Miami, FL; American Welding Society, 1-5, 1983.
3. Voitkevich, V. : Chapter 2. Welding fume properties. In welding fumes-formation, properties and biological effects. England; Abington Publishing, 18-77, 1995.
4. 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).
5. 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.
6. 윤충식, 백남원 : 스테인레스 강에 대한 플럭스 코어드 아크 용접공정에서의 흡 발생량 및 입자 크기 분포에 관한 연구. 한국환경위생학회지, 25(2), 107-114, 1999.
7. Voitkevich, V. : Chapter 2. Welding fume properties. In welding fumes-formation, properties and biological effects. England; Abington Publishing, 18-77, 1995.
8. 박종우 : 정밀 용접공학. 서울, 일진사, 15-60, 1997.
9. American Welding Society : Laboratory method for measuring fume generation rates and total fume emission of welding and allied processes(F1.2). Miami, FL, USA; American Welding Society, 1992.

10. 대한용접학회 : 용접·접합 편람. 서울; 대한용접학회, 531-575, 825-829, 1998.
11. Orr, J. L. : Effects of welding on health VIII. Miami, Fl; American Welding Society, 1-23, 1993.
12. Dennis, J. H., M. S. B. Mortaxavi, J. French, P. J. Hewitt and A. J. Redding : The effect of welding parameters on ultra-violet light emissions, ozone and Cr^{VI} formation in MIG welding. Ann. Occup. Hyg., 41(1), 95-104, 1997.
13. 한국생산기술연구원: Arc 용접에서 fume 발생특성 및 용접봉 송급성 평가기술. 한국생산기술연구원, 34-61, 1999.
14. 채현병, 김정환, 김희남 : Arc 용접시 fume 발생량 평가에 관한 연구. 한국산업안전학회지, 13(2), 65-75, 1998.
15. 강인찬 : 현대 용접공학. 서울, 도서출판 구민사, 1995. pp. 12-17.
16. 엄기원 : 최신용접공학. 서울, 동명사, 1-5, 1996.