

용접공정에서 발생된 공기중 흙의 조성과 농도에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

산업보건연구원

신용철 · 이광용 · 박승현 · 이나루 · 정지연 · 박정근 · 오세민 · 문영한

— Abstract —

A Study on Factors Affecting Airborne Fume Composition and Concentration in Welding Process

Yong Chul Shin, Gwang Yong Yi, Seung Hyun Park, Na Roo Lee,
Jee Yeon Jeong, Jung Keun Park, and Se Min Oh, Young Hahn Moon

Department of Industrial Hygiene, Industrial Health Research Institute

The purpose of this study was to investigate factors affecting the composition and concentrations of fumes generated from various types of welding processes. The results are as follows.

1. Iron(Fe), zinc(Zn) and manganese(Mn) were predominant in welding fumes. The Fe content in total fumes was 25.5% in coated electrode and 28.2% in CO₂ arc welding, and the Zn content was 4.5% and 9.1%, respectively, and the Mn was 3.6% and 7.8%, respectively.

2. It was found that the important factors determining composition and concentration of fumes were type of industries, type of welding processes, type and composition of electrodes, composition of base metals, confinement of workplaces or condition of ventilation, work intensity, coated metals such as lead and Zn in paint.

3. The Mn content in airborne fumes was highly correlated with that of electrode($r=0.77$, $P<0.01$) and was about 4 times higher than that in electrodes or base metals. The results indicate that Mn is well evaporated into air during welding. The higher vapor pressure of Mn may explain this phenomenon.

4. The airborne total fume concentrations were significantly different among types of industries ($p<0.001$). The airborne total fume concentration was higher in order of steel-structure manufacturing($GM=15.1 \text{ mg/m}^3$), shipbuilding($GM=13.2 \text{ mg/m}^3$), automobile-component manufacturing ($GM=7.8 \text{ mg/m}^3$) and automobile assembling industry($GM=3.0 \text{ mg/m}^3$).

5. The airborne total fume concentration was 6 times higher in CO₂ welding than in coated elec-

trode welding, and approximately 3 times higher in confined area than in open area, in steel-structure manufacturing industry

6. The concentration of welding fume outside welding helmet was about 2 times higher than that inside it. It is recommended that air sampling be done inside helmet to evaluate worker's exposure accurately, for it has an outstanding effect on reducing worker exposure to fumes and other contaminants.

Key Words : Composition and concentration of welding fumes, Type of electrodes and welding processes, Mn, Confined area, Welding helmet

I. 서 론

용접공정에서 발생하는 유해인자는 매우 다양하며 크게 흠(fume) 및 가스(gas)와 같은 유해물질과 자외선, 소음, 진동, 고온 등과 같은 물리적 인자로 분류할 수 있다. 용접작업의 경우 유해물질의 종류는 매우 다양하나 이들의 주요 발생원은 모재 금속(base metal), 용접봉(electrode), 전극피복 등의 용접 재료로 알려져 있다(ACGIH, 1984; NIOSH, 1988).

용접 근로자에게서 발생할 수 있는 건강장해로는 금속열(metal fume fever), 용접공폐증(siderosis), 폐부종, 폐기종, 만성기관지염, 폐암, 중금속 중독, 일산화탄소, 오존, 포스젠(phosgene) 가스 등에 의한 유해가스 중독, 유해광선 등의 물리적인 자에 의한 건강장해 등 매우 다양하다(ACGIH, 1984; NIOSH, 1988).

용접 작업시 모재와 용접봉이 가열되어 금속 증기가 공기 중으로 방출되는데, 이때 방출된 금속 증기는 공기 중에서 응축됨으로써 흠으로 형성된다. 흠 발생속도, 발생량 및 조성에 영향을 미치는 주요 요인으로는 용접방법, 용접조건(전류 등), 모재 및 용접봉 조성, 용접봉 직경, 용접속도, 도장 또는 도금에 의한 모재표면의 피복상태 등을 들 수 있다(ACGIH, 1984; Voitkevich, 1995).

이와 같이 용접중에 발생하는 유해물질의 종류와 농도는 매우 다양한 요인에 의해 결정된다. 그러나 이러한 요인에 대해 산업위생학적인 측면에서의 연구결과는 매우 드물다. 또한 국내의 경우 조선업 등 일부 업종에서의 용접 근로자의 유해물질 노출 실태를 조사한 자료를 제외하고는 용접근로자의 유해인

자 노출 특성에 관한 연구자료도 매우 제한되어 있다.

따라서 본 연구의 목적은 1) 용접공정에서 발생하는 용접흠의 조성을 살펴보고, 2) 용접 흠 조성 및 농도에 영향을 미치는 요인을 파악함으로써 근로자의 정확한 노출실태 평가에 필요한 정보를 제공하는 것은 물론, 3) 각종 유해인자에 노출되는 용접 근로자의 바람직한 평가방법을 제안하는 데 있다.

II. 연구대상 및 방법

1. 대상

1) 측정대상 사업장 및 유해물질

본 연구를 위해 용접이 주요공정인 금속제품 제조업 및 금속제품조립 업체 6개소를 연구대상으로 선정하였다. 대상 사업장을 업종별로 분류해 보면 크게 네 가지 업종으로 분류되며, 이를 분류해 보면 자동차부품 제조업, 자동차 조립업, 교량 등에 사용되는 철 구조물 제조업, 조선업종으로 나누어진다. 대상사업장 수는 자동차 조립업체 1개소, 자동차부품 제조업체 1개소, 철 구조물제조업 3개소, 조선업종 1개소였다.

본 연구의 대상물질로 용접 흠과 유해금속을 선정하였다. 용접흠 중에는 다양한 종류의 금속이 존재하는데, 일반적으로 철(Fe), 망간(Mn), 납(Pb), 아연(Zn), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 구리(Cu) 및 카드뮴(Cd) 등으로 알려져 있다(ACGIH, 1984). 본 조사대상 사업장에서 사용하고 있는 모재 및 용접봉 등 용접재료의 성분을 예비 조사한 결과 이들이 발생 가능한 주요 금속인 것으로 판단되어 이들을 연구대상으로 잡았다. 용접 흠에 존재하는 이들 금속의 조성 및 공기중 농도를 결정하는 요인을 파악하고

자 대상 사업장에서 사용중인 용접 형태, 용접봉 및 모재금속의 조성, 작업공간의 특성 및 용접조건(전류 등) 등을 조사하였다.

2) 용접형태

본 조사 대상 업체에서는 주로 연강을 모재로 하는 CO₂ 아크용접(gas metal arc welding, CO₂ welding) 작업이 가장 많았고 다음으로 피복 아크용접(shielded metal arc welding, coated electrode arc welding) 작업이 많았다. 일부 업체에서는 서브머지 아크용접(submerged arc welding), 산소-아세틸렌 용접(oxy-acetylene gas welding) 작업을 하였으나 산소-아세틸렌 용접은 매우 간헐적으로 이루어지고 있어 연구대상에서 제외하였다.

3) 취급 용접봉 및 모재

조사대상업체에서 조사 당일 사용하고 있었던 용접봉 종류와 그 조성은 표 1과 같으며 여기에 제시된 용접봉은 대상 업체에서 주로 사용하고 있는 것들이다. 제시된 값은 용접봉 자체에 존재하는 함량이 아니고 용착금속에 존재하는 함량을 말한다. 용착금속은 용접중에 고열에 의해 용접봉이 녹아 굳어진 금속을 말한다. 표 1에 제시된 각 성분의 함량은 모재에 몇 겹으로 용접을 하므로써 형성된 용착금속 중의 성분 함량이다. 용접초기에는 모재의 성분이 포함될 수 있지만 여러 겹으로 용접을 계속하기 때문에 상층의 용착금속은 용접봉의 성분과 유사하다고 볼 수 있다. 이 값들은 이들 제조회사에서 제공하는 사양에 제시되어 있는 값으로 실제 양과 어느 정도 오차는 있을 수 있지만, KS 규격 또는 미국용접학회(American Welding Society, AWS) 규격에 적합하도록 제조하여야 하므로 어느정도 신뢰도가 있다고 볼 수 있다.

표 1에서 보듯이 사용되고 있는 피복 아크 용접봉은 CR-13, S-8018W, S-7016H 등으로 이들 용접봉의 용착금속은 표에는 제시되어 있지 않지만 Fe가 주성분이며 Mn이 0.38 - 0.98% 정도 존재함을 알 수 있다. 이외에 일부 용접봉은 Ni, Cr 및 Cu가 각각 0.45%, 0.50% 및 0.39%씩 함유되어 있었다.

한편, CO₂ 아크 용접에서는 철선(와이어) 형태의 용접봉이 사용되며 대상 사업장에서는 SF-71, KC-

28, SF-70W, Supercored 71 등을 사용하고 있었다. CO₂ 아크 용접봉의 용착금속 중에 함유된 Mn의 함량은 1.06 - 1.85%로 피복 아크용접봉의 Mn 함량보다 높았다. 한 용접봉(SF-70W)에는 Ni, Cr 및 Cu가 존재하였으며 용착금속중 이들 금속의 함량은 각각 0.35%, 0.5% 및 0.4%였다.

조사대상 업체에서는 주로 사용되고 있는 모재의 종류와 화학적 조성은 표 2와 같다. 주로 사용되는 모재는 연강(mild steel)으로 일부 모재를 제외하고는 대부분 Mn이 0.06 - 2% 정도 함유되어 있었다. Zn으로 도금된 연강을 사용하고 있는 업체도 있었으며 자동차조립업체의 경우 자동차 철판을 용접하는 일부 부서에서는 Zn이 도금된 스테인레스강(stainless steel)을 사용하고 있었다. 일부 업체의 경우 현장에서 취급하고 있는 모재의 종류는 매우 다양하기 때문에 이들의 조성과 도금 및 도장된 물질을 모두 파악하는 것은 한계가 있었으므로 일부 모재 금속은 조사대상에서 누락되었을 수도 있다.

2. 방법

1) 시료채취

공기중 용접흄 시료는 미국산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 공정시험법인 Method 0500(NIOSH, 1994)을 이용하여 채취하였으나, 다만 개별 금속을 동시에 측정하기 위해서 polyvinyl chloride(PVC) 여과지 대신에 mixed-cellulose ester membrane filter(직경: 37 mm, 공극: 0.8 μ m, Millipore Corp.)을 사용하였다.

노동부 작업환경측정실시규정(노동부, 1995)에 따라 유해물질 시료의 채취는 근로자의 호흡위치(근로자의 호흡기를 중심으로 반경 30 cm 반구)에서 이루어졌으며 헬멧(welding helmet)을 착용한 경우 헬멧 바깥쪽에서 이루어졌다. 한편, AWS에서는 용접 근로자의 경우 헬멧 안 근로자의 입으로부터 5 cm 위치에서 시료를 채취하도록 권고하고 있다(AWS, 1976). 따라서 헬멧 안팎의 농도를 비교하기 위해서 일부 근로자에 대해서는 헬멧 안팎에서 동시에 시료를 채취하였다.

2) 분석

공기 시료가 포집된 여과지를 데시케이터에 일정

시간 동안 방치시킨 후 천평(Sartorius 200D, German)으로 여과지 중량을 재어 총흡 농도를 산출하였으며 무게를 재어 여과지는 금속을 분석하는데 이용하였다.

용접흡중 Mn 등의 금속을 분석하기 위하여 NIOSH Method 7300(NIOSH, 1994)을 이용하였다. 흡 시료가 채취된 여과지에 질산을 1 mL를 첨가한 후 초음파 회화기 (CEM, U.S.A.)를 사용하여 회화시켰다. 회화가 끝난 시료는 증류수로 20 mL 또는 25 mL로 희석하여 분석하였다. 용액 중의 금속은 유도결합플라즈마광도계(IRIS, Thermo Jerrell Ash Co., U.S.A.) 또는 원자흡광광도계(Varian 300 Plus, Australia)를 사용하여 정량하였다.

3) 자료 분석 및 노출기준에 대한 평가

자료의 분석은 SigmaStat(Windows ver 3.0, Jandel Scientific Corp.)을 이용하였으며 각 유해 물질의 공기중 농도값들의 대표값과 산포도는 각각 기하평균(geometric mean, GM) 및 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)로 나타내었다. 업종 및 용접종류 등의 변수에 따른 용접흡 농도 차이를 검정하기 위해 자료를 대수값으로 변환한 후, t-검정 또는 분산분석(ANOVA)을 이용하였고, 용접 헬멧 안팎의 농도 차이는 쌍체 t-검정(paired t-test)를 이용하여 유의성을 검정하였다.

근로자의 용접흡 노출수준은 노동부 허용기준(노동부, 1991) 및 ACGIH의 Threshold Limit Values (TLVs, ACGIH, 1996)인 5 mg/m³을 적용하였다. Mn 노출 수준은 노동부 허용기준(1 mg/m³) 및 ACGIH TLV(0.2 mg/m³)을 각각 적용하여 평가하였고 각 기준을 초과하는 비율을 비교하였다. ACGIH에서는 1979년에 Mn의 허용기준을 1 mg/m³로 채택하였으나 중추신경계 및 생식계 장애를 예방하기 위해 1992년에 허용기준으로 0.2 mg/m³를 제안하였고 1995년에 이 개정안을 채택하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 용접흡 구성에 영향을 미치는 요인

1) 용접봉(용접형태) 및 모재의 조성

용접흡중 금속조성을 용접방법 및 용접봉 종류별

로 나타낸 결과는 표 3 및 그림 1과 같다. 각 성분별로 제시된 값은 산화물 등의 화합물이 아닌 금속 원소 자체의 함량을 나타낸 것이다. 대체적으로 작업환경 공기중에서 채취한 용접흡에는 Fe > Zn > Mn > Pb > Cu > Cr > Ni 순으로 많이 함유되어 있었다. 다만 Zn의 함량은 모재의 Zn 도금 여부에 크게 좌우되므로 대상 업체별로 Zn의 발생량은 큰 차이가 있었다. 광영순과 백남원(1997)이 모재를 연강으로 한 CO₂ 아크 용접에서의 공기중 금속 조성을 보고한 바 있는데, 이들의 연구결과는 본 연구결과와 거의 일치하였다.

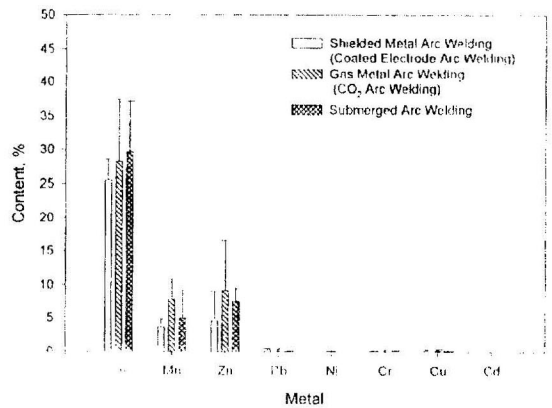


Fig. 1. Metal composition by type of welding processes.

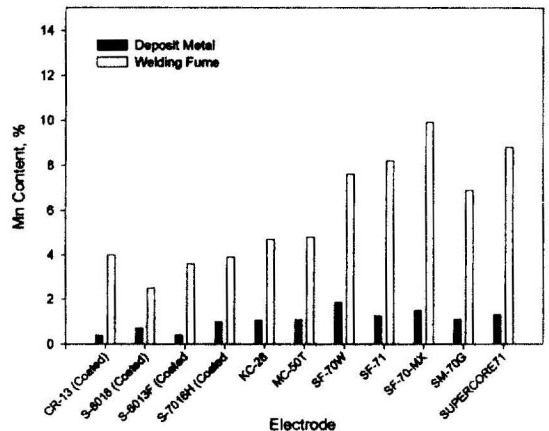


Fig. 2. Mn content in deposit metal and airborne welding fumes by type of electrodes.

그림 1에서 보듯이 용접을 피복 아크용접, CO₂ 아크 용접 및 서브머지 아크용접으로 나누어 각 용접시 발생하는 용접흙의 금속조성을 비교하여 본 결과 용접 종류에 따라 각 금속의 함량은 유의한 차이가 있었다($p < 0.01$).

피복아크 용접과정에서 발생한 흙중에는 Fe 25.5%, Zn 4.5% 및 Mn 3.6%로 나타나, 이 세 가지 금속이 주로 존재하는 것으로 확인되었다. CO₂ 아크용접 과정에서 발생한 흙중의 Fe, Zn 및 Mn의 함량은 각각 28.2%, 9.1% 및 7.8%이었다. 이를 제외한 다른 금속의 함량은 피복 아크용접의 경우와 유사하였다. Fe 함량은 두 용접형태간에 차이가 없었으나($p > 0.1$), Mn 및 Zn의 함량은 두 용접 형태간에 차이가 있었다. 용접흙중 Mn의 함량은 CO₂ 아크 용접에서 높게 나타났고($p < 0.001$) Zn의 경우 피복 아크용접에서 높게 나타났다($p < 0.05$). 서브머지 아크용접의 경우 흙중의 Fe, Zn 및 Mn의 함량은 각각 29.7%, 7.5% 및 4.9%로 나타났다. Ni, Cr 및 Cu의 함량은 피복 아크용접에서의 이 금속들의 함량과 유사하였으나 Pb의 함량은 피

복 아크 용접에서보다 적었다.

Zn으로 도금한 강판이나 다량의 Zn을 함유한 프라이머를 도포한 강판을 용접하는 경우 발생하는 흙 중에는 다량의 Zn이 함유될 수 있다. 용접봉의 용착 금속 조성에는 Zn이 제시되어 있지 않는 것으로 보아 Zn은 용접봉 제조시 거의 첨가되지 않는 금속임을 알 수 있다. 또한 모재에도 Zn이 제시되어 있지 않으므로 용접봉 및 모재에는 원래부터 Zn은 존재하지 않거나 존재하더라도 그 함량은 매우 적으리라 추정된다. 그러나 용접흙의 Zn 함량이 비교적 높게 나타난 이유는 Zn이 도금되었거나 Zn이 함유된 페인트가 칠해진 강판을 사용하였기 때문이다.

Pb은 피복 아크 용접, CO₂ 아크용접 및 서브머지 용접의 경우 평균 값이 각각 0.19%, 0.21% 및 0.19%로 존재하는 것으로 나타났다. Pb은 용접봉이나 모재에 함유되어 있지 않으나 자동차 제조업에서 채취한 시료에서는 용접 형태에 따라 0.54 - 0.64% 정도 존재하는 것으로 나타났는데, 이는 Pb이 함유된 페인트가 도포된 모재로부터 유래한 것으로 생각된다.

Table 1. Chemical Composition of Deposit Metal by Type of Electrodes

Electrode	Chemical Composition ^a , %								Factory Using Electrodes ^b
	Mn	C	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	
Coated Electrode									
CR-13	0.38	0.08	0.28	0.017	0.011	-	-	-	A
S-8018W	0.71	0.07	0.52	0.015	0.013	0.45	0.50	0.39	C
S-7016H	0.98	0.08	0.48	0.011	0.009	-	-	-	D & E
S-6013LF	0.42	0.08	0.28	0.012	0.010	-	-	-	E
Electrode for CO ₂ Welding									
SF-71	1.25	0.05	0.50	0.014	0.010	-	-	-	B & E
KC-28	1.06	0.08	0.50	0.014	0.010	-	-	-	A
MC-50T	1.08	0.09	0.50	0.015	0.012	-	-	-	A
SF-70MX	1.50	0.05	0.55	0.015	0.010	-	-	-	C & D
SF-70G	1.07	0.09	0.52	0.015	0.009	-	-	-	B
SF-70W	1.85	0.04	0.45	0.017	0.011	0.35	0.50	0.40	C
Supercored71	1.30	0.05	0.55	0.015	0.010	-	-	-	F
Electrode for Submerged Arc Welding									
S-777MX	1.13-1.23	0.06-0.08	0.32-0.48	0.013-0.018	0.009-0.011	-	-	-	E

^a The values reported by manufacturers

^b A: Automobile Assembling; B: Automobile Component Manufacturing; C, D & E: Steel-Structure Manufacturing; F: Shipbuilding

Cr과 Cu가 함유된 피복 용접봉을 사용하는 철구조물 제조 사업장의 시료중 이들 금속의 함량은 각각 0.28% 및 0.44%로 다른 시료보다 높게 나타났다. 조사 대상 사업장에서는 모재금속은 대부분 연강을 취급하고 있었기 때문에 Cr이 거의 검출되지 않았지만, 만일 스테인레스강을 용접하는 경우 공기중으로 Cr이 더 많은 양이 발생되리라 예측된다.

이와 같은 결과로 보아 용접봉 종류 또는 조성, 모재의 조성, 모재의 도장상태, 모재의 도금 상태 및 용접방법은 용접흡의 조성에 영향을 미치는 주요 요인임을 알 수 있다.

2) 용착금속 및 흡의 Mn 함량 비교

그림 2에서 보듯이 조사대상 업체에서 사용하고 있는 용접봉 및 모재의 Mn 함량은 0.38 - 2%였고, 공기중에 발생된 용접흡의 Mn 함량은 피복아크 용접봉의 경우 2.5 - 4.0%, CO₂ 아크용접의 경우 4.7 - 9.9%였다. 이와 같은 결과로 보아 용접봉 용착금속의 금속조성과 용접흡의 금속조성은 차이가 있음을 알 수 있다.

이와 같이 모재나 용접봉에 함유된 Mn의 함량보다 용접흡중의 Mn의 함량이 높게 나타난 이유는 Mn의 증기압이 비교적 높아 흡으로 발생되는 비율이 높기 때문이다(Voitkevich, 1995). 금속의 증기압은 Ni (1810 ℃에서 1 mmHg) < Fe(1787 ℃에서 1 mmHg) < Cu(1628 ℃에서 1 mmHg) < Cr(1616 ℃에서 1 mmHg) < Mn(1292 ℃에서 1 mmHg) < Pb(970 ℃에서 1 mmHg) < Zn(487 ℃에서 1 mmHg) 순으로 증가한다. 이와 같이 망간의 증기압은 비교적 높아 용접봉이나 모재에 함유된 Mn은 공기중으로 잘 방출되는 것으로 판단된다. Fe의 경우 증기압이 비교적 낮아 용접 재료의 함량에 비해 용접흡중의 함량은 낮으리라 예상된다. 본 연구 결과 Zn은 모재나 용접봉 조성에는 없지만 용접흡에는 두 번째로 많은 비율로 존재하는 것으로 나타났다. Zn은 도금 또는 도장된 모재로부터 유래된 것으로 보인다. Zn의 증기압은 앞에서 제시한 금속중에서 가장 높아 공기중으로 흡으로 발생되기 매우 쉽기 때문에 공기중으로 많은 양이 방출될 수 있다.

Table 2. Chemical Composition of Base Metals by Type

Type	Composition ^a , Weight %								Factory ^b
	Mn	C	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	
Type 1 SS41	-	-	-	<0.050	<0.050	-	-	-	A, B
Type 4 SAPH45	-	-	-	<0.040	<0.040	-	-	-	A, B
Type 2A SM50A	<1.50	0.20-0.22	<0.55	<0.040	0.040	-	-	-	B
SSP1/SPHC	<0.06	<0.15	-	<0.05	<0.05	-	-	-	A
Type 1 EFSC									
SWS 400A, B&C	A: >2.5 × C B&C : 0.60 -1.40	0.18-0.25	A:None ; B&C : <0.35	<0.035	<0.035	-	-	-	D, E
SWS490A,B,C,Y.A &YB	<1.60	0.18-0.22	<0.55	<0.035	<0.035	-	-	-	D
SWS520B & C	<1.60	<0.20	<0.55	<0.035	<0.035	-	-	-	D
SWS570	<1.60	<0.18	<0.55	<0.035	<0.035	-	-	-	D
SS400	2	4	3	3	3	-	-	-	E
SMA50BW	2	4	3	3	3	2	2	2	E

^a The values reported by manufacturers

^b A : Automobile Assembling

B : Automobile Component Manufacturing

C, D & E : Steel Structure Manufacturing

F : Shipbuilding

용접봉의 Mn 함량과 흙중 Mn 함량의 관계는 그림 3과 같고, 두 변수간에는 밀접한 관계가 있었다 ($r=0.77$). 따라서 용접봉의 Mn 함량에 따라 흙중의 Mn 함량도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 흙중 Mn 함량은 용접봉의 그것보다 약 4 배 정도 더 높은 비율로 존재하는 것으로 나타났다. 공기중 유해물질은 용접봉 뿐만 아니라 모재의 영향을 받으나, 모재 금속의 온도는 용접봉 접촉표면의 온도보다 낮아 용접봉보다는 공기중 흙의 발생량과 조성에 미치는 영향이 작다(Voitkevich, 1995). 따라서 용접흙에 존재하는 Mn의 함량을 결정하는 주요 요인은 용접봉의 조성, 즉 용접봉내 Mn 함량과 Mn의 높은 증기압임을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 보아 흙의 성분은 모재와 용접봉에 함유된 성분에 의해 대부분 결정되지만 그 구성 비율은 원래의 재료에 함유된 성분비와는 다르다는 것을 알 수 있다.

2 공기중 총흙 및 금속 농도에 영향을 미치는 요인

앞 절에서 언급한 용접흙의 조성에 영향을 미치는 요인은 공기중의 농도에도 영향을 미치리라 생각된다. 본 절에는 용접 공정중 발생된 공기중 흙의 조성과 농도에 영향을 미치는 요인을 살펴보았다.

1) 업종

조사대상 사업장은 자동차 조립업, 자동차부품 제조업, 철 구조물 제조업 및 조선업으로 구분하여 업종별로 공기중 총흙 및 금속 농도를 비교한 결과는 표 4, 그림 4, 그림 5와 같다.

자동차 조립업 및 자동차부품 제조업의 총흙 농도는 각각 3.0 mg/m^3 및 7.8 mg/m^3 로 자동차 부품 제조업이 약간 높은 경향을 보이나 통계적으로 유의한 차이는 없었다($p>0.05$). 이 두 업종은 자동차 부품을 제작하는 업종으로서 작업 특성이 서로 유사하였다. 그리고 두 사업장 모두 옥내에서 용접이 이루어

Table 3. Metal Composition in Welding Fumes Generated into Air by Electrode

Electrode	N	Content in Fume, %							
		Fe	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cu	Cd
Coated Electrode									
CR-13	5	25.7 ^a (3.3) ^b	4.0(1.4)	2.0(3.6)	0.64(0.08)	<0.01	0.10(0.03)	0.02(0.02)	<0.01
LC-300	6	24.7(3.6)	3.6(1.2)	7.2(4.5)	0.15(0.11)	<0.01	0.04(0.10)	0.21(0.25)	<0.01
S-8018	2	23.6(1.9)	2.5(0.6)	1.3(0.69)	0.05(0.03)	0.03(0.03)	0.28(0.07)	0.44(0.06)	<0.01
S6013-LF	1	26.1	3.6	3.7	0.06	<0.01	<0.01	0.10	<0.01
S7016H	2	27.9(2.3)	3.9(0.2)	8.4(5.31)	<0.01	0.04	<0.01(0.09)	0.07(0.10)	0.12
Subtotal		25.5(3.1)	3.6(1.21)	4.5(4.5)	0.26(0.27)	0.01	0.09(0.10)	0.16(0.20)	<0.01
Electrode for CO2 Welding or Gas Metal Arc Welding									
KC-28	15	23.4(7.1)	4.7(1.5)	5.6(3.0)	0.54(0.23)	<0.01	0.25(0.49)	0.38(0.21)	<0.01
MC50T	17	25.9(9.0)	4.8(2.1)	1.41(2.7)	0.64(0.22)	<0.010	13(0.07)	0.33(0.19)	<0.01
SF-70W	5	33.0(1.9)	7.6(3.1)	0.42(0.28)	0.03(0.02)	0.04(0.01)	0.36(0.10)	0.76(0.06)	<0.01
SF-71	18	29.3(6.8)	8.2(1.8)	5.62(4.4)	0.03(0.03)	<0.01	0.04(0.02)	0.11(0.11)	<0.01
SF70-MX	19	33.2(5.4)	9.9(3.1)	10.9(5.3)	0.03(0.02)	<0.01	0.03(0.03)	0.07(0.07)	<0.01
SM-70G	8	50.5(1.4)	6.9(0.6)	0.08(0.05)	0.12(0.23)	<0.01	0.11(0.11)	0.46(0.20)	<0.01
SuperCore71	47	23.9(5.5)	8.8(2.8)	15.8(5.5)	0.11(0.19)	0.09(0.18)	0.11(0.24)	0.09(0.08)	<0.01
Subtotal		28.2(9.2)	7.8(3.0)	9.1(7.4)	0.21(0.29)	0.04(0.12)	0.12(0.24)	0.21(0.22)	<0.01
Electrode for Submerged Arc Welding									
UC-36/ S-777Mx	2	29.7(7.4)	4.9(4.35)	7.5(2.0)	0.09(0.05)	<0.01	0.09(0.13)	0.15(0.01)	<0.01

^a Arithmetic mean

^b Standard deviation

지고 있었고 일부 공정에서는 국소배기시설이 가동되고 있었다. 그러나 자동차부품 제조업체의 망간 농도는 자동차 조립업체보다 더 높게 나타났다 ($p<0.05$). 자동차부품 제조업체의 Mn 농도가 높은 이유는 이 업체에서는 CO₂ 아크용접만 이루어지고 있어 이 용접에 사용되는 용접봉의 망간 함량이 더 높아 공기중으로 Mn이 많이 방출되었기 때문인 것으로 추정된다.

연구대상 업체를 자동차 제조업(자동차 조립업 및 자동차 부품 제조업), 철 구조물 제조업 및 조선업 등 세 업종으로 분류하여 업종간 총합 농도를 살펴본 결과, 철 구조물 제조업 15.1 mg/m³, 조선업 13.2 mg/m³ 및 자동차 제조업 3.4 mg/m³로 업종간에 유의한 차이가 있었다($p<0.001$). Turkey 검정에 의해 집단간 다중비교를 실시한 결과 자동차 제조업은 다른 두 업종보다 유의하게 낮았으나($p<0.05$), 철 구조물 제조업과 조선업간에는 공기중 총합 농도 차이는 없었다($p>0.05$). 공기중 Mn의 평균농도는 조선업 1.1 mg/m³, 철 구조물 제조업 0.99 mg/m³, 및 자동차 제조업 0.12 mg/m³로 세 업종간 유의한 차이가 있었으나($p<0.001$), 조선업 및 철 구조물 제조업 간에는 유의한 차이가 없었다($p>0.05$).

자동차 관련업종에서는 국소배기설비가 가동되고 있었고 작업량도 철 구조물 제조업 또는 조선업보다 적었다. 또한 이 업종에서는 옥내이지만 개방된 공

간에서 용접작업을 하고 있었으나 철 구조물 및 조선업종이 경우 작업 특성상 교량 박스, 선체블록, 및 탱크 안에 들어가 용접하는 경우가 많다. 이러한 밀폐 공간에서는 유해물질의 축적되어 고농도의 유해물질에 노출 될 수 있다. 이와 같은 결과로 보아 작업공간의 밀폐여부 및 환기 상태는 근로자의 흡노출 농도를 결정하는 요인으로 생각된다.

한편, CO₂ 아크용접 작업공정에서 발생된 공기중 용접흡 농도는 업종간에 더욱 큰 차이가 있었다. 철 구조물 제조업, 조선업 및 자동차 제조업의 공기중 총합 농도는 각각 25.2 mg/m³, 13.2 mg/m³, 3.5 mg/m³이고 Mn 농도는 2.1 mg/m³, 1.1 mg/m³ 및 0.13 mg/m³로 업종간에 현저한 차이를 보였다($p<0.001$). 특히 전체 시료를 비교했을 때 철 구조물 제조업과 조선업간에는 유의한 차이가 없었으나($p>0.05$), CO₂ 아크용접 시료의 경우 두 업종간에 유의한 차이가 있었다($p<0.05$). 철 구조물 제조업에서는 피복 아크용접, 서브머지 아크 용접작업을 하고 있는 반면, 조선업에서는 대부분 CO₂ 아크용접작업을 하고 있었다. 한편, 철 구조물 제조업체 3개 업체의 전체 총합 시료농도는 최고 및 최소 농도를 보인 업체(E 및 C) 간에는 유의한 차이가 있었으나($p<0.05$), CO₂ 아크용접 시료의 농도는 업체간에 차이가 없었다($p>0.05$). E 업체의 경우 용접 형태는 대부분 CO₂ 아크용접이었으나 C 업체에서는 피복아크 용접 작업도 많았다. 이와 같은 결과로 보아 용접형태는

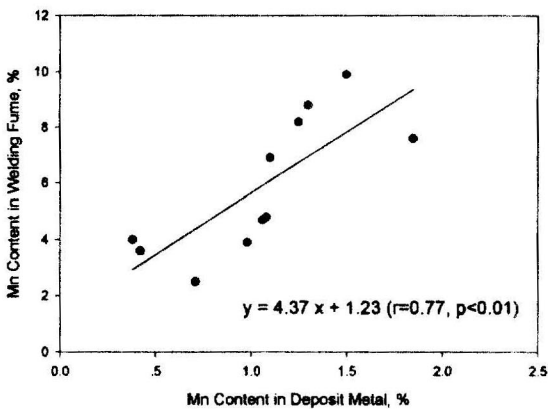


Fig. 3. Relationship between Mn content in welding fume and Mn content in deposit metal or electrode.

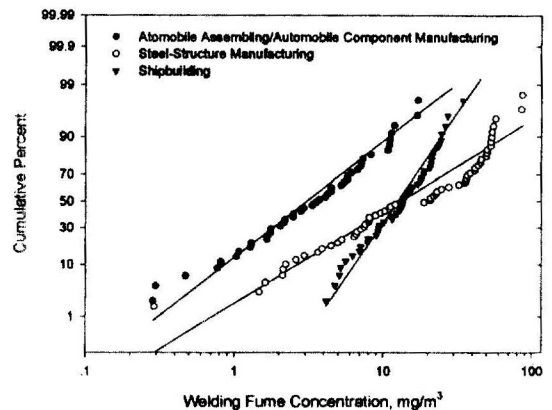


Fig. 4. Distribution of airborne total fume concentration by type of industries.

공기중 총흡 및 금속 농도를 결정하는 주요한 요인으로 작용하는 것으로 추정된다.

철 구조물 제조업, 자동차 조립업 및 자동차부품 제조업에서는 Mn 농도가 Zn농도보다 높게 나타났

으나, 조선업에서는 이와는 반대로 Zn의 농도가 더 높게 나타났다. 조선업에서는 선체 철판의 녹방지를 위해 아연이 다량 함유된 프라이머를 도포한다. 이와 같이 아연을 도포한 철판을 용접할 때 공기중으

Table 4. Airborne Total Fume and Metal Concentrations by Type of Industries and Welding Processes

Industrial Type/Company	Welding Type	N	Concentration in Air, mg/m ³							
			Fume	Mn	Fe	Zn	Pb	Cr	Cu	Ni
Automobile Assembling/A	Coated ^a	5	2.8 ^b (5.2) ^c	0.08 (8.3)	0.48 (10.6)	0.019 (6.8)	0.015 (6.7)	0.003 (4.1)	0.002 (2.6)	0.009 (1.9)
	CO ₂ ^b	35	3.1 (2.7)	0.10 (4.4)	0.48 (5.7)	0.033 (6.5)	0.013 (4.5)	0.006 (2.7)	0.009 (3.4)	0.008 (1.3)
	Total	40	3.0 (2.9)	0.10 (4.7)	0.48 (6.0)	0.031 (6.4)	0.013 (4.6)	0.005 (2.8)	0.008 (3.6)	0.008 (1.3)
Automobile Component Manufacturing/B	CO ₂	5	7.8 (1.4)	0.58 (1.6)	3.7 (1.5)	0.004 (1.8)	0.002 (2.0)	0.005 (1.4)	0.024 (2.3)	0.007 (1.1)
Steel-Structure Manufacturing	Coated	9	2.9 (2.8)	0.11 (1.8)	0.87 (1.8)	0.17 (2.8)	0.003 (1.8)	0.010 (1.45)	0.007 (3.2)	0.007 (2.2)
	C CO ₂	15	23.6 (2.4)	2.2 (2.6)	7.4 (3.1)	0.61 (7.3)	0.007 (2.6)	0.025 (3.4)	0.044 (5.1)	0.007 (2.4)
	Submerged ^d	1	2.6	0.21	0.91	0.23	0.001	0.006	0.004	0.006
	Coated	4	6.6 (1.5)	0.22 (1.4)	1.8 (1.6)	0.13 (7.6)	0.003 (2.5)	0.008 (1.6)	0.006 (1.6)	0.008 (1.3)
	D CO ₂	9	24.9 (3.1)	2.0 (3.6)	8.7 (3.0)	2.5 (3.4)	0.006 (2.5)	0.010 (1.4)	0.012 (2.9)	0.007 (2.4)
	CO ₂	19	26.8 (1.7)	2.1 (2.4)	7.5 (2.40)	0.90 (7.2)	0.004 (3.8)	0.010 (1.6)	0.023 (2.5)	0.014 (1.2)
	E Submerged	1	2.1	0.04	0.52	0.13	0.003	0.004	0.009	0.013
	Coated	14	4.2 (2.8)	0.14 (1.8)	1.1 (1.9)	0.16 (3.6)	0.003 (2.2)	0.010 (1.5)	0.007 (2.7)	0.008 (2.1)
	Sub - CO ₂ total	42 (2.4)	25.2 (2.7)	2.1 (2.7)	7.7 (6.6)	0.97 (3.1)	0.005 (2.5)	0.014 (3.7)	0.025 (2.1)	0.009
	Submerged	2	2.4 (1.2)	0.09 (3.3)	0.69 (1.5)	0.17 (1.5)	0.002 (2.0)	0.005 (1.3)	0.004 (1.1)	0.009 (1.7)
Total		58	0.99 (3.4)	4.5 (4.6)	0.60 (3.5)	0.005 (6.6)	0.012 (2.9)	0.017 (2.3)	0.009 (3.9)	0.009 (2.1)
Shipbuilding/F	CO ₂	44	13.2 (1.8)	1.1 (2.0)	3.3 (2.0)	2.0 (1.8)	0.005 (2.1)	0.006 (1.9)	0.009 (1.9)	0.004 (3.2)

^a Coated Electrode Welding or Shielded Metal Arc Welding; ^b Geometric Mean; ^c Geometric Standard Deviation; ^d CO₂ Welding or Gas Metal Arc Welding; ^e Submerged Arc Welding

로 아연이 발생된다. 이와 같이 모재의 도장 또는 도금 상태는 공기중 유해물질 농도를 결정하는 주요한 요인이다.

곽영순 및 백남원(1997)은 조선소의 밀폐된 작업장소의 Mn 농도는 1.2 mg/m³, 개방된 작업장에서는 0.3 mg/m³로 보고하였고, 변상훈 등은(1995)은 모 조선소 소조립공정에서 CO₂ 아크용접 공정에서의 공기중 Mn 농도는 1.64 mg/m³로 보고하였다. 본 조사 결과는 다른 연구자들이 보고한 밀폐된 작업장소에서의 결과와 거의 일치하고 있다.

대체적으로 철 구조물 및 조선업체에서는 밀폐된 블록내에서의 용접작업이 이루어지고 있었으며, 환기설비의 설치가 곤란하여 효과적인 오염물질의 제거가 어려운 상태였으며, 또한 근로자의 작업량이 비교적 많았기 때문에 공기중 유해물질의 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 위에서 언급한 작업공간의 특성, 환기상태, 작업량 외에 용접형태, 용접봉 종류, 모재의 표면처리 상태 (도장 및 도금) 등도 특정 금속의 업종간 차이를 유발하는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

2) 용접종류

철 구조물을 제조하는 세 업체에서 측정한 용접

종류별 흠 및 중금속 농도는 표 4 및 그림 6과 같다. 총흠 등의 공기중 유해물질 농도는 피복 아크용접 및 서브머지 아크용접보다 CO₂ 아크 용접에서 훨씬 높았다. 즉, CO₂ 아크 용접은 피복 아크용접에 비해 공기중 총흠 농도 평균 6 배, Mn 농도는 평균 15 배, Zn 농도는 평균 7 배 정도 높게 나타났다. Mn의 농도차이가 큰 이유는 피복 아크용접봉보다 CO₂ 용접봉에 Mn이 더 많이 함유되어 있고 Mn의 증기압이 다른 금속에 비해 높기 때문이라고 추정된다. 전체시료를 대상으로 했을 때 CO₂ 아크용접과 피복 아크용접간의 차이는 통계적으로 유의한 차이가 있었다(p<0.001). 그러나 업종간의 총흠 농도의 차이가 있기 때문에 업종 및 용접형태 두 변수를 선정하여 이원 분산분석을 실시한 결과, 공기중 총흠 농도는 용접형태간에 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(p<0.001). 이와 같은 결과는 용접 공정에서 공기중 흠 농도는 일반적으로 용접종류 또는 방법에 따라 크게 좌우되는 것을 말해준다. 따라서 어떤 사업장의 공기중 흠 노출 농도는 사용하는 용접 형태에 의해 큰 영향을 받을 것이다. 그러나 Zn 및 Pb 등과 같은 특정 금속의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 용접봉, 모재, 도금 및 도장 상태 등의 요인이 복합적으로 작용하므로 모든 유해물질이

Table 5. Comparison of Airborne Total Fume and Mn Concentrations between Confined Space and Open Space in CO₂ Welding Process

Industrial Type/ Company	Total Fume ^A			Mn ^A		
	Confined (C _{Fe})	Open (O _{Fe})	Ratio (C _{Fe} /O _{Fe})	Confined (C _{Mn})	Open (O _{Mn})	Ratio (C _{Mn} /O _{Mn})
Steel-Structure Manufacturing						
C ^B	31.8 ^C	10.5	3.0	2.9	0.98	3.0
E ^D	40.8	11.5	3.5	3.3	0.85	3.9
Total^E	36.2	11.1	3.3	3.1	0.90	3.4
Shipbuilding						
F ^F	14.8	9.5	1.6	1.3	0.75	1.7

^A The mean values between confined and open space are significantly different(p<0.05).

^B Confined Space : N=11; Open Space : N=4

^C Geometric Mean Deviation

^D Confined Space : N=12; Open Space : N=6

^E Confined Space : N=23; Open Space : N=10

^F Confined Space : N=15; Open Space : N=7

업종간에 일정한 비율로 차이가 있는 것은 아니다.

일반적으로 피복 아크용접이 다른 용접공정에서 보다 흠 발생량이 많은 것으로 알려져 있으나 (ACGIH, 1984; Voitkevich, 1995), 본 연구에서는 CO₂ 아크용접에서 흠 농도가 더 높게 나타났다. 현장에서는 용접강도(작업량 및 작업시간 등), 작업공간의 특성 등 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 다른 요인을 제어할 수 있는 실험실 조건에서의 결과와는 차이가 있는 것으로 판단된다. 본 연구대상 업체에서는 실제로 피복 아크용접은 본 용접을 시작하기전 모재를 부분적으로 결합시키는 경우, 즉 가접(spot welding)의 경우, 용접부위의 마무리를 위한 경우 또는 모재표면에 표식을 위한 경우 주로 피복 아크용접을 사용하므로 용접시간이 비교적 짧았다. 또한 이 용접 작업은 주로 개방된 공간에서 이루어지고 있었기 때문에 근로자의 노출 농도가 CO₂ 아크 용접 공정에서보다 낮게 나타난 것으로 생각된다.

3) 작업공간 특성(밀폐 또는 환기상태)

용접 작업장소의 밀폐여부 즉 환기 조건이 공기중 흠 및 망간 농도에 영향을 미치는 정도를 살펴본 결과는 표 5와 같다. 앞에서 철 구조물 제조업 및 조선업 근로자의 흠 노출 농도가 높은 이유로는 밀폐된 공간에서 작업하는 경우가 많기 때문이라고 언급한 바 있다. 근로자가 블록 등의 구조물 안과 밖

에서 용접하는 경우 밀폐공간 작업자로, 블록 외부에서 계속 용접하는 경우 개방된 공간 작업자로 분류하였다. 전체 시료를 대상으로 업종 및 밀폐공간에서의 용접여부를 변수로 하여 이원 분산분석으로 밀폐공간여부에 따른 차이를 검정한 결과, 밀폐공간에서 작업하는 경우 공기중 총흠 농도가 유의하게 높았다($p < 0.001$).

철 구조물 제조업종에서는 밀폐된 공간의 총흠 및 망간의 농도는 개방된 공간보다 각각 3.3 배 및 3.4 배 정도 높았다. 동일한 용접 형태(CO₂ 아크용접)과 모재를 사용하는 5 업체에서 종사하고 있는 근로자를 대상으로 주요 작업장소가 블록 외부 및 내부인 근로자의 총흠 노출 농도는 각각 40.8 mg/m³ 및 11.5 mg/m³ 로 3.5 배의 차이가 있었고, 망간 노출 농도는 각각 3.3 mg/m³ 및 0.85 mg/m³로 3.9 배의 차이가 있었다.

조선업체에서는 밀폐공간 작업 근로자의 총흠 및 망간의 평균 농도는 각각 14.8 mg/m³ 및 1.3 mg/m³이었으나 개방된 공간에서의 경우 각각 9.5 mg/m³ 및 0.75 mg/m³로 나타나, 밀폐공간 작업자의 총흠 및 Mn 노출농도는 각각 1.6 배 및 1.7배 높았다($p < 0.05$). 철 구조물 제조업 근로자의 경우 블록내에서 용접을 위해 체류하는 시간이 길었다. 그러나 조선업종 근로자는 밀폐공간에서 계속 용접하기보다는 개방된 공간에서도 작업을 하는 경우가 많아 농도비가 작게 나타난 것으로 보인다. 곽영순과 백남

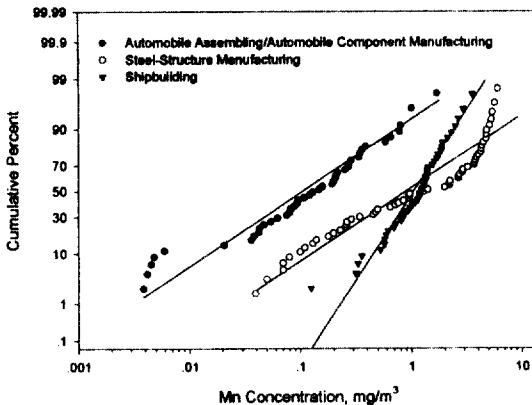


Fig. 5. Distribution of airborne Mn concentrations by type of industries.

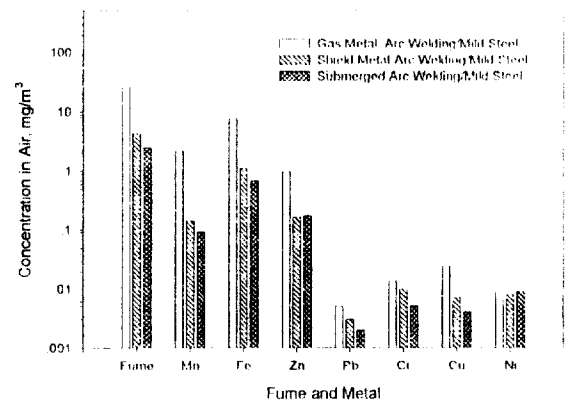


Fig. 6. Average airborne fume and metal concentrations by type of welding processes in steel-structure manufacturing industry.

원(1997)은 모 조선업체에서 측정한 밀폐작업장의 총흙 및 Mn 농도는 개방작업에 비해 1.8 배 및 2.5 배 높았다고 보고한 바 있다.

4) 용접전류

용접전류는 흙 발생량에 영향을 미치는 요인으로 알려져 있다(ACGIH, 1984; Voitkevich, 1995). 본 연구에서는 직경 1.2 mm 용접 와이어를 사용하는 조선업체의 CO₂ 용접 공정에서 전류(150 - 350 A)와 공기중 총흙 농도간의 상관계수 $r = 0.26$ 으로 나타났다($p > 0.25$). 또한 작업공간의 영향을 배제하기 위해 밀폐된 공간에서 측정한 시료만을 대상으로 구한 상관계수 $r = 0.26$ ($p > 0.35$)로 나타나 전류(200 - 350 A)와 공기중 흙 농도간에는 상관성이 없었다. 이와 같은 결과는 현장에는 매우 다양한 요인이 공기중 흙 농도에 복합적으로 영향을 미치기 때문에 전류의 효과가 상쇄되는 것으로 추정된다. 한편, 흙 발생량에 영향을 미치는 다른 요인으로는 용접봉의 두께를 들 수 있으나, Voitkevich(1995)는 흙발생량은 용접봉 두께에 크게 좌우되지 않는다고 하였다. 즉, 이 연구자는 100 - 250 A의 전류 범위에서 용접 와이어의 두께를 0.8 mm에서 1.6 mm로 변경했을 때 흙 발생속도는 약간 변화하였으나, 전류를 250 - 350 A로 증가시켰을 때 흙 발생량이 50% 이상 증가하였다고 보고하였다.

5) 시료채취위치 : 용접헬멧 안팎의 흙 농도 비교

헬멧 안팎에서 동시에 시료를 채취하여 두 위치에서 측정한 농도를 비교한 그 결과는 표 6과 같다. 총흙의 경우 헬멧밖의 농도는 헬멧안보다 1.1 - 3.8 배(평균 2.0 배), Mn의 경우 1.2 - 4.7 배(평균 2.0 배) 높게 나타났다. Goller 및 Paik(1985)은 헬멧밖의 총흙 농도가 안쪽보다 1.41 - 2.78 배 높았다고 보고하였으며 본 결과와 거의 유사하였다. Johnson(1959)은 헬멧 밖의 총흙 농도가 안쪽보다 1.03 - 7.55 배(평균 3.5 배) 높다고 보고하였다. 본 연구결과 용접헬멧 안팎의 총흙 및 Mn의 농도는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났기 때문에 시료채취위치는 근로자의 노출 농도에 큰 영향을 미치는 요인임을 알 수 있다.

작업환경측정실시규정(노동부, 1995)에는 근로자의 유해물질 노출 수준을 평가하기 위해 근로자의 호흡위치(호흡기를 중심으로 반경 30 cm인 반구)에서 시료를 채취해야 한다고 명시되어 있다. 이 규정에는 용접 작업자의 경우 시료채취 위치에 대한 특별한 언급이 없으므로 헬멧 밖이라도 호흡기를 중심으로 반경 30 cm 이내에서 시료를 채취한다면 별 문제가 없는 것으로 판단된다. 그러나 용접 작업의 경우 용접헬멧은 오염물질을 어느정도 차단하는 효과가 있기 때문에 호흡위치내라고 하더라도 헬멧 안팎의 농도는 차이가 있다. 따라서 근로자의 실제 노출량은 헬멧안의 농도에 좌우되기 때문에 헬멧안의

Table 6. Ratio of Airborne Total Fume and Mn Concentrations Inside to Outside Welding Helmet

Sample No.	Total Fume Concentration*			Mn Concentration*		
	Outside	Inside	Ratio	Outside	Inside	Ratio
	C _{Out}	C _{In}	C _{Out} /C _{In}	C _{Out}	C _{In}	C _{Out} /C _{In}
1	29.8	7.9	3.8	5.8	1.22	4.7
2	33.1	12.7	2.6	2.8	1.23	2.2
3	15.0	6.0	2.5	0.33	0.20	1.7
4	7.3	4.0	1.8	0.41	0.34	1.2
5	10.8	6.1	1.8	0.86	0.44	2.0
6	5.8	3.4	1.7	0.34	0.24	1.4
7	24.2	15.8	1.5	2.2	1.4	1.5
8	39.7	29.8	1.4	4.2	3.1	1.4
9	35.8	33.7	1.1	1.8	0.79	2.3
Total			2.0			2.0

* The values between outside and inside helmet are significantly different($p < 0.01$).

농도를 평가하는 것이 근로자의 노출량을 평가하는데 있어 보다 정확한 방법이라 할 수 있다. AWS에서는 헬멧안에서 시료를 채취하되 근로자의 입에서 5 cm 이내에서 시료를 채취하도록 권고하고 있다(AWS, 1976).

3. 근로자 노출 평가

용접작업에는 매우 다양한 유해인자가 발생되므로 근로자의 노출 평가는 세심한 주의를 요한다. 근로자의 정확한 노출 평가를 위해서는 조사대상 사업장에서 사용되고 있는 모든 용접재료(용접봉, 모재금속 등)에 대한 특성에 대한 조사가 선행되어야 한다. 여기에서 얻은 자료에 근거하여 가능한 각 유해인자의 노출에 대한 평가를 실시하여야 한다.

이와 함께, 근로자가 다양한 유해인자에 복합적으로 노출될 때 인체에 대한 영향이 비슷한, 즉 상가효과가 있는 물질에 동시에 노출되는 경우 혼합물질 노출평가방법에 따라 평가하는 것이 바람직하다. 그러나 이러한 경우 상가효과가 있는 물질을 파악한다는 것은 용접과 같이 발생하는 물질이 매우 다양하고 많은 요인에 따라 발생 유해인자의 종류가 달라질 뿐만 아니라, 발생유해 인자에 대한 측정 자료를 구하였어도 각 물질의 독성을 파악하는 것은 매우 어렵고 확정된 독성 자료가 부족한 경우 더 어렵다.

그러나 현재까지 알려진 바에 따르면 금속흄을 비롯한 입자상 물질중에서 유사한 독성을 보유하고 있는 물질을 분류하면 다음과 같다. 먼저, 폐암을 일으킬 수 있는 것으로 확정되거나 의심되는 물질은 Cr(VI), Be, As, Ni(불용성), Cd 등이 있다(ACGIH, 1997; NIOSH, 1988). ACGIH에서는 Cr(VI), 불용성 Ni, Be 및 As를 인체발암물질(Confirmed Human Carcinogen)인 "A1"으로, Cd를 인체발암성 의심물질(Suspected Human Carcinogen)인 A2로 분류하고 있다(ACGIH, 1997). 본 연구대상 시료에서는 카드뮴은 거의 검출되지 않았으나 Ni, Cu, Cr은 미량 검출되었다. 본 연구에서는 연강을 소재로 하는 용접작업이기 때문에 Cr(VI)은 거의 존재하지 않았을 것으로 추정된다. 그러나 스테인레스강을 소재로 하는 용접에서는 Cr(VI)이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다. Be 및 As의 경우 모재 및 용접봉의 조성에는 이 금속들이 제시되어 있지 않았다.

신경계 질환 유발 가능성이 있는 물질로는 Pb 및 Mn을 들 수 있다(ACGIH, 1984; NIOSH, 1988). Mn은 용접작업에서 발생하는 주요 유해인자이며, Pb가 함유된 도료가 도장된 철판을 용접하는 경우 이 금속은 용접공정에서 주요 유해물질이 될 수 있다. 금속열(metal fume fever)을 유발할 수 있는 물질로는 Zn, Cu, Mn 등이 있다. 본 연구결과 용접흄중에는 Zn과 Mn은 비교적 높은 함량으로 존재하나 Cu의 경우 특정 용접봉에 함유되어 있고 함량도 비교적 낮은 것으로 나타났다.

한편, Mn에 대한 허용기준은 노동부(1991)와 ACGIH(1996)에서는 서로 다르게 설정하고 있다. 노동부의 노출기준은 1991년에 제정하였는데 당시의 ACGIH TLV인 1 mg/m³를 그대로 채택한 것이다. 그러나 이후 ACGIH에서는 신경계 및 생식장해를 예방하기 위해 TLV를 0.2 mg/m³로 낮추었으나 우리나라의 경우 과거의 기준을 그대로 채택하고 있다. 이러한 경우, 단순히 법적인 기준을 준수하는지 여부를 판정할 때에는 문제가 없겠지만 근로자의 건강을 보호하기 위한 목적이라면 개정된 노출기준을 적용하여 근로자의 노출수준을 평가하고 작업환경을 관리하는 것이 바람직하다.

몇가지 유해물질 농도에 대해 근로자의 노출을 평가해 본 결과, 노동부 및 ACGIH에서 규정하고 있는 총흄 노출기준을 초과하는 시료수는 전체 148개 중 73.0%에 해당하는 108개인 반면, 노동부 Mn에 대한 노출기준을 적용한 결과 이 기준을 초과한 시료수는 58 (39.2%)로 두 평가결과간에는 큰 차이가 있었다. 그러나 Mn에 대한 ACGIH의 TLV를 적용하여 평가한 경우 이를 초과하는 시료수는 104개 (70.3%)로 두 평가 결과가 거의 비슷하였다. 총흄 노출기준 또는 ACGIH의 Mn 노출기준을 초과하는 시료수는 노동부의 Mn 노출기준을 초과하는 시료수의 2 배에 가까웠다. 그러므로 노동부의 약간 허용기준보다는 총흄 노출기준을 적용하는 것이 보다 엄격함을 알 수 있다.

본 연구결과 총흄 노출기준에 대하여 평가하는 것도 매우 엄격하므로 단순히 노출기준 초과여부만 결정한다면 총흄에 의한 평가라도 충분하지만 용접흄중에 특수한 독성물질이 존재할 가능성이 있다면 이 성분에 대한 평가를 실시하는 것이 바람직하다. 이러한 조사결과와 근로자의 직업병 예방과 추후 직업

병이 발생된 경우 이의 원인을 밝히는 중요한 근거가 될 것이다. 결론적으로 용접 작업중 근로자의 노출 평가는 가능한 유해 성분 각각에 대한 평가는 물론, 상가효과가 있는 물질의 경우 혼합물질 평가 방법에 따른 평가를 실시하는 것이 바람직하다.

IV. 결 론

용접 공정에서 공기중으로 발생되는 공기중 용접 흄 구성과 농도에 영향을 미치는 요인을 파악하여 근로자의 정확한 노출평가 방안을 제시하기 위해 자동차 조립업, 자동차부품제조업, 철 구조물 제조업 및 조선업 등 6개 사업장을 대상으로 본 연구를 실시하였으며 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용접흄에 주로 존재하는 금속성분은 Fe, Zn 및 Mn으로 확인되었다. 피복 아크용접시 공기중으로 발생된 흄에 함유된 Fe, Zn 및 Mn의 함량은 각각 25.5%, 4.5% 및 3.6%이었고, CO₂ 용접 작업 공정의 경우 공기중 흄중에 존재하는 이들 세 금속의 함량은 28.2%, 9.1% 및 7.8%로 나타났다. Mn 및 Zn의 함량은 용접방법에 따라 차이가 있었으며 CO₂ 용접에서 높았다($p<0.05$). 용접방법에 따라 조성이 다른 것은 사용하는 용접봉이 다르기 때문이며, 모재의 금속조성이나 도금 및 도장상태 등도 이러한 차이를 유발한 요인으로 생각된다.

2. 공기중 흄에 존재하는 Mn의 양은 용접봉에 존재하는 Mn의 함량과 밀접한 관계가 있었다($r=0.77$, $p<0.01$). 또한 용접봉과 모재의 Mn 함량은 2% 미만이나 공기중 흄의 Mn 함량은 2.5 - 9.9%로 더 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 Mn의 증기압이 비교적 높기 때문에 용접작업시 다른 금속에 비해 공기중으로 더 많이 방출되기 때문인 것으로 판단된다.

3. 용접봉이나 모재 조성에는 Pb나 Zn이 포함되어 있지 않았는데 일부 시료는 Pb의 노출기준 0.05 mg/m³을 초과하였고 Zn 농도도 비교적 높게 나타났다. 용접흄에 존재하는 Pb나 Zn은 모재에 도장된 페인트 또는 도금된 금속으로부터 유래한 것으로 추정된다. 따라서 모재 금속의 도장 및 도금상태는 공기중 흄의 조성 및 농도에 영향을 미칠 수 있는 것을 알 수 있다.

4. 공기중 총흄 및 Mn 농도는 업종간에 유의한

차이가 있었으며($p<0.05$), 자동차 조립업(총흄: 3.0 mg/m³; Mn: 0.10 mg/m³), 자동차부품 제조업(총흄: 7.8 mg/m³; Mn: 0.58 mg/m³), 조선업(총흄: 13.2 mg/m³; Mn: 1.1 mg/m³), 철 구조물 제조업(총흄: 15.1 mg/m³; Mn: 0.99 mg/m³) 순으로 높게 나타났다. 철 구조물 제조업 및 조선업의 경우 작업량도 많으며 거의 밀폐된 장소에서의 용접이 이루어지고 있었을 뿐만 아니라 적절한 환기가 이루어지고 있지 않았다. 따라서 작업량, 작업공간의 밀폐여부 또는 환기상태는 근로자의 용접흄 등 유해물질의 노출 농도를 결정하는 주요한 요인임을 알 수 있다.

5. 용접종류에 따라 공기중 총흄 등을 비롯한 유해물질 농도는 유의한 차이가 있었다($p<0.001$). 철 구조물 제조업종의 경우, CO₂ 아크용접은 피복 아크 용접에 비해 공기중 총흄 농도는 평균 6 배, Mn 농도는 평균 15 배, Zn 농도는 평균 7 배 정도 높게 나타났다. Mn의 농도 차이가 큰 이유는 CO₂ 아크 용접에서 사용되는 용접봉의 Mn 함량이 피복 아크용접봉보다 더 높기 때문인 것으로 판단된다.

6. 밀폐공간에서 용접하는 근로자는 개방된 공간에서 용접하는 근로자보다 높은 농도의 흄에 노출되는 것으로 나타났다. 밀폐공간에서 작업하는 근로자의 총흄 노출 농도는 개방된 작업장소에서 용접하는 근로자에 비해 철 구조물 제조업에서는 3.3 배, 조선업에서는 1.6 배 정도 높았다.

7. 근로자의 시료채취 위치에 따라 공기중 총흄 및 망간 농도는 유의한 차이가 있었다. 헬멧 밖의 공기중 총 흄 농도는 헬멧 안보다 1.1 - 3.8 배(평균 2 배), Mn은 1.2 - 4.8 배(평균 2 배) 높게 나타나 시료채취 위치에 따라 유해물질 농도는 유의한 차이가 있었다.

8. 노동부에서 고시한 총흄 허용기준(5 mg/m³) 및 Mn 허용기준(1 mg/m³)을 각각 적용하여 근로자의 노출수준을 평가한 경우, 총흄 기준을 초과한 시료수가 Mn의 경우보다 거의 2배 정도 많았다. Mn에 대한 ACGIH의 TLV(0.2 mg/m³)를 적용한 결과 흄에 의한 평가결과와 거의 비슷하였다. 현재 망간에 대한 노동부의 노출기준은 개정전 ACGIH TLV를 그대로 채택한 것으로 근로자의 건강보호를 위해서 이를 개정하는 것이 필요하다.

9. 헬멧은 유해물질을 차단하는 효과가 있기 때문에 근로자의 실제 노출량을 평가를 위한 시료는 헬

멧 안쪽에서 채취하는 것이 바람직하다. 또한 용접 근로자는 다양한 유해요인에 노출될 수 있으므로 노출 가능한 유해 성분 각각에 대한 평가는 물론, 상호효과가 있는 물질의 경우 혼합물질 평가 방법에 따른 평가를 실시하는 것이 바람직하다. 각 유해물질의 대한 평가자료는 근로자의 직업병 예방을 위한 대책 수립은 물론, 추후 직업병의 원인을 규명하는 중요한 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- 곽영순 및 백남원: 모조전조의 밀폐된 작업장에서의 공기중 용접흄 및 중금속 농도에 관한 조사연구. 한국산업위생학회지 7(1): 107-126. 1997.
- 노동부: 작업환경측정실시규정. 노동부고시 제95-25호, 노동부, 1995.
- 노동부: 유해물질 허용농도. 노동부고시 제91-21호, 노동부, 1991.
- 변상훈, 박승현 등: 일부 업종의 용접흄 분석 및 폭로농도에 관한 연구. 한국산업위생학회지 5(1):172-182. 1995.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH): 1997 Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, and Biological Exposure Indices. Cincinnati, OH, ACGIH, 1997.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH): Welding Health and Safety Resource Manual. ACGIH, Akron, OH, 1984.
- American Welding Society(AWS): Methods for Sampling Airborne Particulates Generated by Welding and Allied Process, ANSI/AWS F1. 1-78. Miami, FL: AWS. p. 8, 1976.
- Goller, J.W. and N.W. Paik: A Comparison of Iron Oxide Fume Inside and Outside of Welding Helmet. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 46(2):89-93, 1985.
- Johnson, W.S.: An Investigation into True Exposure of Arc Welders by means of Simultaneous Sampling Procedures. Ind. Hyg. J. 20:194-196, 1959.
- 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): Manual of Analytical Methods, 4th ed., DHHS(NIOSH) Publication No 94-113. Cincinnati, OH, NIOSH, 1994.
- Voitkevich V. : Welding Fumes - Formation, Properties and Biological Effects. Abington Publishing, Abington Hall, Cambridge CB1 6AL, 1995.