

건설현장 용접직종별 용접흠 및 금속류 노출 실태

박현희* · 박해동 · 장재길

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

Welding Fume and Metals Exposure Assessment among Construction Welders

Hyunhee Park* · Hae Dong Park · Jae-kil Jang

Occupational Safety and Health Research Institute, Korea Occupational Safety and Health Agency

ABSTRACT

Objectives: The objective of this study was to evaluate the assessment of exposure to welding fume and heavy metals among construction welders.

Methods: Activity-specific personal air samplings(n=206) were carried out at construction sites of three apartment, two office buildings, and two plant buildings using PVC(poly vinyl chloride) filters with personal air samplers. The concentration of fumes and heavy metals were evaluated for five different types of construction welding jobs: general building pipefitter, chemical plant pipefitter, boiler maker, ironworker, metal finishing welder.

Results: The concentration of welding fumes was highest among general building pipefitters(4.753 mg/m³) followed by ironworkers(3.765 mg/m³), boilermakers(1.384 mg/m³), metal finishing welders(0.783 mg/m³), chemical pipefitters(0.710 mg/m³). Among the different types of welding methods, the concentration of welding fumes was highest with the CO₂ welding method(2.08 mg/m³) followed by SMAW(shield metal arc welding, 1.54 mg/m³) and TIG(tungsten inert gas, 0.70 mg/m³). Among the different types of workplace, the concentration of welding fumes was highest in underground workplaces(1.97 mg/m³) followed by outdoor(0.93 mg/m³) and indoor(wall opening as 0.87 mg/m³). Specifically comparing the workplaces of general building welders, the concentration of welding fumes was highest in underground workplaces(7.75 mg/m³) followed by indoor(wall opening as 2.15 mg/m³).

Conclusions: It was found that construction welders experience a risk of expose to welding hazards at a level exceeding the exposure limits. In particular, for high-risk welding jobs such as general building pipefitters and ironworkers, underground welding work and CO₂ welding operations require special occupational health management regarding the use of air supply and exhaust equipment and special safety and health education and fume mask are necessary. In addition, there is a need to establish construction work monitoring systems, health planning and management practices.

Key words: construction welding, ironworker, pipefitter, welding fume, welding metals

I. 서 론

건설업은 그동안 안전관리자 선임의무만 있었고 보건관리자 선임의무는 없었으나, 2015년 1월 1일부터 공사금액 800억 원(토목공사 1,000억 원)이상인 건설현장의 경우 보건관리자 선임을 의무화 하도록

산업안전보건법이 시행되었다. 건설업 근로자들이 제조업 못지않은 다양한 물리적, 화학적 유해인자에 노출되고 있는 것은 잘 알려져 있으나(Kwon, 2005; Lee et al., 2011; Jang et al., 2012), 작업환경이 지속적으로 변경되어 보건관리가 어렵다는 인식이 있었고, 그동안 추락사고 등과 같은 사고성 재해예방에

*Corresponding author: Hyunhee Park, Tel: 052-7030-907, E-mail: phh2000@kosha.net
Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, 400, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, Republic of Korea, 44429
Received: February 19, 2016, Revised: June 14, 2016, Accepted: June 23, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

치중하다보니 보건관리에 다소 소홀한 측면이 있었다. 건설업의 보건관리를 체계적으로 수행하기 위해서는 유해인자의 노출농도 수준에 따른 작업환경관리방안이 마련되어야 하나, 건설현장의 경우 작업환경 노출평가 자료가 매우 부족하다.

건설현장의 다양한 직종 중 용접공은 공사현장은 이동하더라도 용접작업을 반복하여 수행하게 되므로 용접흠 등 유해인자에 지속적으로 노출되는 특성이 있다. 특히, 용접흠에 노출되는 근로자들이 망간중독으로 인한 파킨슨 증후군과 크롬에 의한 비중격천공에 이환되는 사례가 발생하면서 용접공의 중금속 노출에 대한 지속적인 관심이 필요하다고 보고하였다(Kim et al., 1997; Jeon, 2001).

건축물은 종류, 특성에 따라 사용하는 강재의 종류가 매우 다양한 것으로 알려져 있다. 대형건축물은 지진, 붕괴에 대비한 고강도강을 주로 사용하고, 초고층건축물은 화재에 대비한 내화강이나 초고장력강을 사용하는데, 내화강에는 크롬의 함량이 높고, 고장력강에는 구리-니켈의 함량이 높은 특징이 있다. 녹 발생 방지를 위한 내후성강이나 해양구조강 등에는 구리, 인, 크롬, 니켈 등이 첨가되고 티타늄 산화물이 첨가되기도 하다(Han & Lee, 1995). 사용하는 강재의 특성에 따라 용접작업 시 노출되는 용접흠 및 중금속의 종류와 농도는 달라진다. 또한, 용접흠과 각종 중금속 발생량은 모재금속의 종류, 용접방법, 작업장의 환기상태, 작업장의 크기, 전류의 세기 등에 따라 발생량이 변화할 수 있으며, 주로 모재금속이 연강일 때에는 철, 망간, 규소, 구리 등이 많이 발생하고, 스테인리스 강철일 때에는 철, 크롬, 니켈 등이 많이 발생한다고 알려져 있다(Kang et al., 2007).

그동안 용접흠 관련 연구 문헌은 철강업(Lee et al., 2000), 조선업(Kim & Song, 1991; Kwag & Paik, 1997; Shin et al., 1998; Kang et al., 2007), 중장비 제조업체(Jeong et al., 2002), 자동차 관련업(Choi et al., 1999) 및 용접실습실(Hwang et al., 2001) 등을 대상으로 평가한 사례는 있었으나, 건설업에서 평가한 사례는 없었다. 건설근로자공제회 자료에 따르면, 건설현장에 용접원으로 추정되는 인원은 약 18,318명으로 추정되고 있으나 실제 건설현장에서 용접작업을 수행하는 인원은 더욱 많을 것으로 추정된다(KOSHA, 2011).

이번 연구는 건설업의 다양한 용접작업 직종별 용접흠 및 용접흠내의 금속류 노출농도 수준을 다양한 문헌자료 및 현장평가 등을 통하여 조사하여 건설업 보건관리를 위한 기초자료로 활용하고 과거 노출 농도를 추정하여 직업병 발생의 연관관계 규명 등에 활용하고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

1) 연구대상

아파트 신축현장 3개소, 오피스 신축현장 2개소, 대형건축물 신축현장 1개소, 화학플랜트 1개소, 소각플랜트 1개소로 총 8개 건설현장을 대상으로 2015년 3월에서 6월 사이에 평가를 실시하였다. 각 건설현장에서 평가된 용접직종을 일반건축물 배관용접공, 화학플랜트 배관용접공, 보일러 제작용접공, 철골용접공, 금속마감용접공 및 기타 용접공으로 분류하였으며, 각 직종별 용접흠 및 용접흠 내에 함유된 금속류(망간, 크롬, 구리, 산화철, 알루미늄, 니켈, 납, 산화아연)의 노출농도를 살펴보았다. 직종별 용접모재, 용접기법 및 시료수 등은 Table 1과 같다.

Table 1. Target Monitoring Workplace

Job	n	Building Type	Welding Material	Welding Method	Work place
Pipefitter_General Building	21	Apartment Office	Zinc galvanized pipe	SMAW	Indoor
Pipefitter_Chemical Plant	84	Chemical Plant	Stainless Steel Carbon Steel Alloy	TIG	Outdoor
Boilermaker	33	Incinerator Plant	Carbon Steel	CO2	Outdoor
Ironworker	9	Steel Structure	Carbon Steel	CO2	Outdoor
Metal finishing welder	35	Hospital	Carbon Steel	SMAW	In/Outdoor
Not classified	24	-	-	SMAW/TIG	In/Outdoor

2) 측정·분석방법

(1) 시료채취방법

중량 분석된 PVC 여과지(Poly Vinyl Chloride, 직경 37 mm, 공극 5 μ m, SKC Inc., USA)를 37 mm 3단 카세트에 장착하고, 개인시료 채취펌프(MSA Escort Elf Pump, USA)를 사용하여 분당 2 l의 용량으로 시료를 채취하였다. 작업시작 전 작업자에게 시료채취기를 장착하고, 일 작업시간(일 6시간 이상)동안 시료를 채취하였다. 개인시료채취기는 평가 전 유량보정기(bubble generator, 20 cc - 6 LPM, Gillian Corp, USA)를 사용하여 유량을 보정하였다. 측정위치는 작업환경 개선을 목적으로 용접면 밖 호흡영역에서 실시하였으며 발생하는 유해인자의 총량을 평가하였다.

(2) 용접흡 중량분석

용접흡 분진 농도를 분석하기 위하여 시료채취 전 PVC 여과지를 데시케이팅에서 1일 이상 두어 건조 시키고, 중량분석실에서 2시간 이상 안정화한 후, 해독도 10^{-7} g 인 전자저울(XP2U, Mettler toledo, Switzerland)을 이용하여 3회 중량을 측정후 평균값을 시료채취 전 무게로 하였다. 채취된 시료 및 현장 공시료는 데시케이팅에서 1일 이상 두어 건조 시키고, 중량분석실에서 2시간 이상 안정화한 후, 3회 중량을 측정하고 평균값에 현장 공시료의 무게변화를 보정하여 시료채취 후 무게로 하였다.

(3) 중금속 분석방법

중금속 분석은 미국국립산업안전보건연구원(National Institute of Occupational Safety and Health, NIOSH) 분석방법 #7304에 준용하여, 시료(PVC 여과지)를 30 ml 마이크로웨이브 용기(Microwave vessel)에 넣고 진한 질산 1 ml를 넣은 후 마개를 하였다. 마이크로웨이브(MARS Xpress, CEM Corp., USA)에 용기를 넣고, 140 °C에서 15분간 처리를 하여 중금속을 추출하였다. 용기의 액을 20 ml 용량 플라스크에 옮기고, 용기를 탈이온수(deionized water, 18.2 M Ω)로 3회 세척하여 용량 플라스크에 넣은 후 탈이온수로 최종눈금에 맞추어 분석용 시료로 사용하였다. 중금속 분석은 자동시료주입기(ASX-520 autosampler, CETAC, USA)로 시료를 주입하였고, 유도결합플라즈마(iCAP6000 series, Thermo Scientific, UK)를 이용하여 분석하였다. 시료의 분석은

미국산업위생협회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)의 정도관리프로그램(proficiency analytical testing programs)에서 적합상태(proficiency)를 유지하고 있는 기관에서 실시하였다.

3) 자료분석

측정결과는 자료의 정규성 검정을 실시하여 분포 특성을 살펴보았으며, 대부분 대수정규분포하는 특성을 보였으나, 일부 불검출이 많은 분석물질에서는 정규분포 또는 대수정규분포를 따르지 않는 평가그룹이 존재하여 평균값을 산술평균(arithmetic mean, AM)과 기하평균(geometric mean, GM) 등으로 모두 제시하였다. 평균비교는 분산분석(ANOVA) 및 T-검정(T-test)을 실시하였다. 자료 분석을 위한 통계처리는 PASW version 18.0을 이용하였으며, 미국산업위생협회에서 개발한 IHDataStastics 프로그램을 사용하여 베이시안(bayesian) 통계기법을 활용한 직종별 노출평가 결과에 대한 노출기준 초과 확률을 산출하였다.

III. 연구결과

1) 용접작업 직종별 용접흡 및 금속류 농도수준

아파트 등 8개 건설현장에서 채취한 206개 시료 중 직종 구분이 가능한 182개 시료에 대해 일반건축물 및 화학플랜트 배관용접공(pipefitter), 보일러 제작 용접공(boilermakers), 철골용접공(ironworkers), 금속마감 용접공(metal finishing welders) 등 5개 직종으로 구분하여 각 직종별 용접흡 및 용접흡내의 금속류(망간, 크롬, 구리, 산화철, 알루미늄, 니켈, 납, 산화아연)의 노출농도를 살펴보았다. 직종별 유해인자 노출농도 수준 및 노출기준 초과확률은 Table 2와 같다.

일반건축물의 배관용접작업공(n=21)은 건축물의 급수, 소방배관인 아연도금관을 피복아크용접하는 작업으로 지하 주차장, 기계실 등 지하공간에서 많이 이루어지고 있었다. 노출평가결과(기하평균), 용접흡 농도가 4.7529 mg/m³, 망간 0.0700 mg/m³, 크롬 0.0031 mg/m³, 구리 0.0016 mg/m³, 산화철 0.4397 mg/m³, 알루미늄 0.0208 mg/m³, 니켈 0.00003 mg/m³, 납 0.0067 mg/m³, 산화아연 1.2154 mg/m³ 수준이었다. 용접흡, 산화아연 및 납 평가시료 중 각 57%(n=12), 5%(n=1),

Table 2. Welding fume and metals concentrations by construction welding jobs

Hazards (OEL)		Job				
		Pipefitter General Building	Pipefitter Chemical Plant	Boilermaker	Ironwork	Metal Finishing (Metal Interior)
Welding Fume (5 mg/m ³)	Detected n/n	21/21	84/84	33/33	9/9	35/35
	AM [*] ±SD [†]	7.972±10.884	1.392±2.250	1.997±1.832	4.341±2.196	0.971±0.577
	GM [‡] (GSD [§])	4.753(3.149)	0.710(2.891)	1.384(2.366)	3.765(1.821)	0.783(2.072)
	Range	0.155~53.107	0.096~11.757	0.351~6.221	1.504~7.183	0.152~2.321
	95%ile	31.3631	4.0696	5.7088	10.0946	2.5948
	Exc Frac(%) ^{**}	48.23%	3.296%	6.796%	31.8%	0.545%
Manganese (Fume) (1 mg/m ³)	Detected n/n	21/21	83/84	33/33	9/9	33/35
	AM±SD	0.1236±0.1146	0.0104±0.0478	0.1144±0.1564	0.5069±0.1961	0.0096±0.0105
	GM(GSD)	0.0700(4.5570)	0.0028(4.0821)	0.0402(5.1021)	0.4705(1.5244)	0.0037(6.9082)
	Range	0.0004~0.5271	N.D. [¶] ~0.4390	0.0021~0.5977	0.2512~0.7480	N.D.~0.0411
	95%ile	0.8485	0.0278	0.5862	0.9413	0.0883
	Exc Frac(%)	3.977%	0.0013%	2.426%	3.685%	0.185%
Chrome(Metal) (0.5 mg/m ³)	Detected n/n	21/21	66/84	25/33	9/9	35/35
	AM±SD	0.0040±0.0030	0.0045±0.0175	0.0099±0.0380	0.0063±0.0023	0.0057±0.0289
	GM(GSD)	0.0031(2.2800)	0.0005(8.2704)	0.0005(10.0088)	0.0060(1.3904)	0.0008(3.0679)
	Range	0.0004~0.0138	N.D.~0.1136	N.D.~0.1973	0.0042~0.0115	0.0002~0.1718
	95%ile	0.0119	0.0131	0.0220	0.0104	0.0048
	Exc Frac(%)	-	0.0379%	0.1349%	-	-
Copper(Fume) (0.1 mg/m ³)	Detected n/n	20/21	83/84	26/33	9/9	30/35
	AM±SD	0.0026±0.0027	0.0027±0.0048	0.0012±0.0011	0.0036±0.0018	0.0003±0.0003
	GM(GSD)	0.0016(3.9223)	0.0011(3.4801)	0.0005(6.2375)	0.0032(1.6229)	0.0002(3.9852)
	Range	N.D.~0.0134	N.D.~0.0292	N.D.~0.0043	0.0016~0.0068	N.D.~0.0010
	95%ile	0.0152	0.0089	0.0100	0.0071	0.0016
	Exc Frac(%)	0.1252%	0.0169%	0.1837%	-	0.0001%
Iron Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	Detected n/n	21/21	84/84	33/33	9/9	33/35
	AM±SD	0.7908±0.7566	0.2444±0.5233	0.2972±0.2778	1.4542±0.6258	0.1243±0.1302
	GM(GSD)	0.4397(4.9248)	0.0795(4.5870)	0.1938(2.6980)	1.3208(1.6224)	0.0453(10.3023)
	Range	0.0015~3.444	0.0009~3.6397	0.0283~1.2049	0.6365~2.1930	N.D.~0.4919
	95%ile	6.0560	0.9741	0.9918	2.9277	2.0987
	Exc Frac(%)	6.365%	0.3275%	0.0528%	0.297%	2.183%
Aluminium (Welding fume) (5 mg/m ³)	Detected n/n	21/21	84/84	33/33	9/9	35/35
	AM±SD	0.0276±0.0199	0.0111±0.0203	0.0093±0.0076	0.0283±0.0098	0.0114±0.0066
	GM(GSD)	0.0208(2.3833)	0.0056(3.1170)	0.0069(2.1754)	0.0267(1.4384)	0.0088(2.4033)
	Range	0.0023~0.0879	0.0004~0.1147	0.0019~0.0288	0.0153~0.0417	0.0004~0.0237
	95%ile	0.0868	0.0367	0.0249	0.0486	0.0373
	Exc Frac(%)	-	-	-	-	-
Nickel (Insoluble) (0.5 mg/m ³)	Detected n/n	3/21	55/84	5/33	1/9	- /35
	AM±SD	0.0002±0.0005	0.0023±0.0105	0.0023±0.0094	0.0001±0.0002	N.D.
	GM(GSD)	0.00003(4.5655)	0.0002(7.6310)	0.00004(7.7389)	0.00003(3.4874)	N.D.
	Range	N.D.~0.0019	N.D.~0.0721	N.D.~0.0478	N.D.~0.0008	N.D.
	95%ile	0.0004	0.0049	0.0011	0.0002	N.D.
	Exc Frac(%)	-	0.0044%	-	-	-
Lead (0.05 mg/m ³)	Detected n/n	21/21	84/84	88/33	9/9	35/35
	AM±SD	0.0156±0.0288	0.0004±0.0010	0.0004±0.0008	0.0148±0.0284	0.0009±0.0028
	GM(GSD)	0.0067(4.4730)	0.0001(3.0225)	0.0002(3.4970)	0.0044(4.3365)	0.0002(4.3773)
	Range	0.0001~0.1371	0.0001~0.0057	0.0001~0.0047	0.0011~0.0865	0.0001~0.0161
	95%ile	0.0791	0.0007	0.0012	0.0492	0.0018
	Exc Frac(%)	9.036%	-	0.0002%	4.885%	0.0046%
Zinc Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	Detected n/n	21/21	84/84	33/33	9/9	34/35
	AM±SD	2.0110±1.8792	0.1374±0.2840	0.0384±0.0377	0.0106±0.0042	0.0653±0.1428
	GM(GSD)	1.2154(3.7956)	0.0570(3.3401)	0.0215(3.3844)	0.0098(1.5220)	0.0129(11.3334)
	Range	0.0137~8.6213	0.0038~1.7877	0.0019~0.0288	0.0047~0.0161	N.D.~0.7392
	95%ile	10.9055	0.4143	0.1598	0.0196	0.7020
	Exc Frac(%)	14.449%	0.01035%	0.0003%	-	0.707%

* AM: Arithmetic Mean, † SD: Standard Deviation, ‡ GM: Geometric Mean, § GSD: Geometric Standard Deviation,

** 95%ile: 95% value (GM*(GSD)^{1.645}), †† Exc Frac(%): Probability of Exceeding the OEL, ‡‡ ND: Not Detected; Conversion to 2/LOD.

5%(n=1)의 시료가 노출기준을 초과하였다. 평가결과를 바탕으로 베이시안 통계기법을 통한 노출기준 초과확률을 산출한 결과, 용접흙, 산화아연, 납, 산화철이 노출기준을 초과할 가능성이 각 48.23%, 14.49%, 9.03%, 6.36%로 나타났다.

화학플랜트 배관용접공(n=84)은 스테인리스 스틸, 합금, 카본스틸 등 다양한 용접모재를 TIG(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)용접하는 작업으로 전 작업은 실외에서 수행되고 있었고, 용접흙 및 금속류의 노출농도는 타 직종과 비교하면 낮은 수준이었다. 용접흙 농도가 0.7098 mg/m³, 망간 0.0028 mg/m³, 크롬 0.0005 mg/m³, 구리 0.0011 mg/m³, 산화철 0.0795 mg/m³, 알루미늄 0.0056 mg/m³, 니켈 0.0002 mg/m³, 납 0.0001 mg/m³, 산화아연 0.0570 mg/m³이었다. 용접흙 평가시료의 약 8%(n=7)가 노출기준을 초과하였고, 금속류에서는 노출기준을 초과하는 시료는 없었으며 노출기준 초과확률도 낮았다.

소각플랜트 보일러 용접공(n=33)은 카본스틸을 피복아크용접하는 작업으로 대부분 실외에서 작업을 수행하고 있었다. 용접흙 농도가 1.3842 mg/m³, 망간 0.0402 mg/m³, 크롬 0.0005 mg/m³, 구리 0.0005 mg/m³, 산화철 0.1938 mg/m³, 알루미늄 0.0069mg/m³, 니켈 0.00004 mg/m³, 납 0.0002 mg/m³, 산화아연, 0.0215 mg/m³ 수준이었다. 용접흙 평가시료의 약 15%(n=5)가 노출기준을 초과하였고, 용접흙내의 금속류에서는 노출기준을 초과하는 시료는 없었다. 노출기준 초과확률을 산출한 결과, 용접흙과 망간이 노출기준을 초과할 확률은 각 6.79%, 2.42% 이었다.

철골용접공(n=9)은 카본스틸을 CO₂용접하는 작업을 수행하며 실외에서 작업이 이루어졌다. 노출평가 결과, 기하평균으로 용접흙 3.7654 mg/m³, 망간 0.4705 mg/m³, 산화철 1.3208 mg/m³, 크롬 0.0060 mg/m³, 구리 0.0032 mg/m³, 알루미늄 0.0267 mg/m³, 납 0.0044 mg/m³, 니켈 0.00003 mg/m³을 나타내어 이번 건설현장 용접작업 평가 직종 중 통계적으로 유의하게 가장 높은 농도를 나타낸 직종이었다. 철골용접공은 용접흙 시료의 40% 이상(n=4)이 노출기준을 초과하였고, 납도 한 개 시료에서 노출기준을 초과하였다. 노출기준 초과확률을 산출한 결과, 용접흙, 망간, 납, 산화철이 노출기준을 초과할 가능성이 각 31.81%, 3.685%, 4.885%, 0.297%로 나타났다.

금속마감 용접공(n=35)은 카본스틸, 아연도금판 등을 피복아크용접하는 작업으로 주로 실내에서 작업을 수행하나 일평균 용접시간이 2~3시간으로 짧고 불규칙적인 특성이 있었다. 대부분의 유해인자는 노출기준의 10%미만 농도수준이었다.

2) 용접기법에 따른 용접흙 및 금속류 농도수준

건축공사 용접작업을 피복아크용접, TIG용접, CO₂용접으로 나누어 살펴보았다(Table 3). 용접기법에 따른 모든 유해인자의 평균 농도수준은 통계적으로 유의하게 서로 다른 것을 알 수 있었다(p<0.05).

용접흙(노출기준 5 mg/m³)은 CO₂용접이 기하평균 2.0784 mg/m³으로 가장 높았고 다음으로 피복아크용접이 1.5400 mg/m³, TIG용접이 0.7044 mg/m³ 순이었다. TIG용접을 기준값으로 보면 피복아크용접이 2.2배, CO₂용접이 약 3배 높은 수준이었고 TIG용접이 통계적으로 유의하게 농도수준이 낮음을 알 수 있었다. 망간(노출기준 1 mg/m³)도 CO₂용접이 기하평균 0.1004 mg/m³으로 가장 높았고 다음으로 피복아크용접이 0.0111 mg/m³, TIG용접이 0.0031 mg/m³ 순이었다. 특히, 망간 농도의 경우, 농도수준은 낮지만 CO₂용접이 TIG용접보다 30배 이상 높아서 용접기법간 가장 큰 농도 차이를 나타내는 유해인자였으며, CO₂용접이 통계적으로 유의하게 농도수준이 높음을 알 수 있었다.

크롬(노출기준 0.5 mg/m³)은 CO₂용접과 피복아크용접이 각 0.0013 mg/m³이었고 TIG용접이 0.0003 mg/m³으로 통계적으로 유의하게 낮았다. 구리(노출기준 0.1 mg/m³)는 CO₂용접이 0.0009 mg/m³, TIG용접이 0.0008 mg/m³, 피복아크용접이 0.0004 mg/m³수준이었다. 산화철은(노출기준 5 mg/m³)은 CO₂용접이 기하평균 0.3980 mg/m³으로 가장 높았고 다음으로 피복아크용접이 0.1062 mg/m³, TIG용접이 0.0680 mg/m³ 순이었다. CO₂용접이 통계적으로 유의하게 농도수준이 높았다. 알루미늄(노출기준 5 mg/m³)은 피복아크용접이 기하평균 0.0122 mg/m³, CO₂용접이 0.0111 mg/m³, TIG용접이 0.0056 mg/m³이었다.

니켈(노출기준 0.5 mg/m³)은 TIG용접이 0.0001 mg/m³로 가장 높았고, CO₂용접이 0.00004 mg/m³, 피복아크용접이 0.00002 mg/m³이었다. 농도 수준은 극히 낮았지만, 다른 유해인자와는 달리 TIG용접에서 가장

Table 3. Welding fume and metals concentrations by welding methods

Hazards (OEL)		Welding Methods			Concentration Rates(as GM) A: B: C
		TIG Welding ^A	Shield ARC ^B	CO2 Welding ^C	
Welding Fume (5 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 2.2: 3.0 (p<0.05)
	AM±SD	1.3296±2.0536	3.5967±7.4146	2.8184±2.1300	
	GM(GSD)	0.7044(2.8860)	1.5400(3.5179)	2.0784(2.2699)	
	Range	0.0287~11.7569	0.1524~53.1074	0.3974~7.1834	
	95%ile	4.0270	12.1940	8.0050	
Manganese (Fume) (1 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 3.6: 32.4 (p<0.05)
	AM±SD	0.0131±0.0485	0.0523±0.0892	0.2301±0.2347	
	GM(GSD)	0.0031(4.5153)	0.0111(9.8210)	0.1004(4.8466)	
	Range	N.D.~0.4390	N.D.~0.5271	0.0021~0.7480	
	95%ile	0.0369	0.0095	1.3467	
Chrome(Metal) (0.5 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 4.3: 4.3 (p<0.05)
	AM±SD	0.0036±0.0151	0.0051±0.0228	0.0106±0.0362	
	GM(GSD)	0.0003(8.8204)	0.0013(3.3934)	0.0013(7.8310)	
	Range	N.D.~0.1136	0.0002~0.1718	N.D.~0.1973	
	95%ile	0.0116	0.0095	0.0387	
Copper(Fume) (0.1 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 0.5: 1.1 (p<0.05)
	AM±SD	0.0023±0.0043	0.0011±0.0020	0.0019±0.0016	
	GM(GSD)	0.0008(5.1277)	0.0004(5.8615)	0.0009(5.6402)	
	Range	N.D.~0.0292	N.D.~0.0134	N.D.~0.0068	
	95%ile	0.0121	0.0070	0.0157	
Iron Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 1.6: 5.9 (p<0.05)
	AM±SD	0.2136±0.4677	0.3742±0.5698	0.6278±0.6175	
	GM(GSD)	0.0680(5.1801)	0.1062(10.4822)	0.3980(2.7097)	
	Range	N.D.~3.6397	N.D.~3.4444	0.0534~2.1930	
	95%ile	1.0180	5.0658	2.0515	
Aluminium (Welding fume) (5 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 2.2: 2.0 (p<0.05)
	AM±SD	0.0108±0.0184	0.0175±0.0153	0.0151±0.0113	
	GM(GSD)	0.0056(3.0746)	0.0122(2.6168)	0.0111(2.2769)	
	Range	0.0004~0.1147	0.0004~0.0879	0.0025~0.0417	
	95%ile	0.0358	0.0592	0.0431	
Nickel (Insoluble) (0.5 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 0.2: 0.4 (p<0.05)
	AM±SD	0.0018±0.0091	0.0001±0.0003	0.0022±0.0090	
	GM(GSD)	0.0001(7.9174)	0.00002(2.6153)	0.00004(7.5985)	
	Range	N.D.~0.0721	N.D.~0.0019	N.D.~0.0478	
	95%ile	0.0035	0.0001	0.0011	
Lead (0.05 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 6.0: 4.0 (p<0.05)
	AM±SD	0.0003±0.0009	0.0064±0.0189	0.0041±0.0150	
	GM(GSD)	0.0001(2.8045)	0.0006(10.5313)	0.0004(6.8764)	
	Range	0.0001~0.0057	0.0001~0.01371	0.0001~0.0865	
	95%ile	0.0006	0.0308	0.0098	
Zinc Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	n	114	56	36	1: 2.1: 0.7 (p<0.05)
	AM±SD	0.1173±0.2592	0.7949±1.4833	0.0367±0.0363	
	GM(GSD)	0.0342(6.4715)	0.0711(20.8126)	0.0228(2.7557)	
	Range	N.D.~1.7877	N.D.~8.6213	0.0029~0.1500	
	95%ile	0.7387	10.4806	0.1210	

높은 농도를 나타내었다. 납(노출기준 0.05 mg/m³)은 피복아크용접이 0.0006 mg/m³으로 가장 높았고 CO₂ 용접이 0.0004 mg/m³, TIG용접이 0.0001 mg/m³이었다. 산화아연(노출기준 5 mg/m³)은 피복아크용접이 0.0711 mg/m³으로 통계적으로 유의하게 가장 높았고,

TIG용접이 0.03142 mg/m³, CO₂용접이 0.0228 mg/m³이었다.

3) 작업공간특성에 따른 용접흡 및 금속류 농도수준
작업공간 특성에 따른 농도차이를 비교하기 위해

동일한 용접작업을 상이한 작업공간에서 수행하는 일반건축물 배관용접작업을 대상으로 평가하였다. 평가는 지하공간과 지상층(실내)에서 소방 및 급수배관인 아연도금관을 피복아크용접을 하는 작업을 대상으로 하였다(Table 4). 평가결과 지하 작업장에서 용접흠이 7.7471 mg/m³, 지상 실내작업자에서는 2.1487

mg/m³로 지하공간에서 약 3.605배 농도가 높음을 알 수 있었다(p<0.05). 특히, 망간, 산화철과 납의 농도는 지하 작업장이 각 0.1311 mg/m³, 0.8214 mg/m³, 0.0129 mg/m³이며 지상 실내작업장이 각 0.0253 mg/m³, 0.1593 mg/m³, 0.0023 mg/m³으로 지하 작업장에서 5배 이상 높은 농도로 평가되었다. 또한, 산화아연도 지하

Table 4. Welding fume and metals concentrations by welding workplace

Hazards (OEL)		General Building Pipe Welding Workplace			
		Indoor Place ^B	Underground Parking Lot ^A	A/B(as GM)	T-test Results
Welding Fume (5 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	3.3913±2.3245	10.7914±13.1023		
	GM(GSD)	2.1487(3.6535)	7.7471(2.0777)	3.605	p<0.05 (p=0.009)
	Range	0.1547~6.2530	2.6566~53.1074		
	95%ile	18.1058	25.7969		
Manganese (Fume) (1 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	0.0609±0.0536	0.1622±0.1264		
	GM(GSD)	0.0253(7.2249)	0.1311(1.9328)	5.182	p<0.05 (p=0.011)
	Range	0.0004~0.1523	0.0477~0.5271		
	95%ile	0.6537	0.3875		
Chrome(Metal) (0.5 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	0.0036±0.0043	0.0042±0.0021		
	GM(GSD)	0.0021(3.2164)	0.0039(1.5207)	1.857	p>0.05 (p=0.093)
	Range	0.0004~0.0138	0.0020~0.0098		
	95%ile	0.0029	0.0077		
Copper(Fume) (0.1 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	0.0016±0.0010	0.0032±0.0033		
	GM(GSD)	0.0009(6.8754)	0.0024(2.0519)	2.667	p>0.05 (p=0.098)
	Range	N.D.~0.0031	0.0008~0.0134		
	95%ile	0.0204	0.0077		
Iron Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	0.3979±0.3384	1.0326±0.8491		
	GM(GSD)	0.1593(8.5083)	0.8214(1.9589)	5.156	p<0.05 (p=0.018)
	Range	0.0015~0.8662	0.2938~3.4444		
	95%ile	5.3933	2.4827		
Aluminium (Welding fume) (5 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	0.0264±0.0279	0.0284±0.0143		
	GM(GSD)	0.0150(3.5010)	0.0254(1.6084)	1.693	p>0.05 (p=0.182)
	Range	0.0023~0.0879	0.0138~0.0570		
	95%ile	0.1178	0.0556		
Nickel (Insoluble) (0.5 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	N.D.	0.0003±0.0006		
	GM(GSD)	N.D.	0.00004(6.4182)	-	p>0.05 (p=0.161)
	Range	N.D.	N.D.~0.0019		
	95%ile	-	0.0010		
Lead (0.05 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	0.0044±0.0033	0.0224±0.0352		
	GM(GSD)	0.0023(5.1536)	0.0129(2.6798)	5.608	p<0.05 (p=0.007)
	Range	0.0001~0.0091	0.0024~0.1371		
	95%ile	0.0348	0.0652		
Zinc Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	n	8	13		
	AM±SD	0.9523±0.7743	2.6624±2.0806		
	GM(GSD)	0.4991(5.2193)	2.1019(2.0558)	4.211	p<0.05 (p=0.012)
	Range	0.0137~2.0881	0.5690~8.6213		
	95%ile	7.5620	6.8779		

작업장 농도가 2.1019 mg/m³, 지상 실내 작업장이 0.4991 mg/m³로 지하 작업장에서 4배 이상 높았다. 크롬, 알루미늄, 니켈은 지하 작업장에서 약 2배 정도 높은 농도를 나타내었으나, 그 차이가 통계적으로 유의하지는 않았다.

다만, 지상층 실내작업장의 경우 장소에 따른 농도

변이가 매우 커서 일부 유해인자에서 95% 상위값이 지하 작업공간보다 큰 경우가 발생하였다.

4) 화학플랜트 용접모재특성에 따른 용접흄 및 금속류 농도수준

화학플랜트 건설현장에서 시행되는 용접작업은 모

Table 5. Welding fume and metals concentrations by welding base material

Hazards (OEL)		Chemical plant _ Welding base material				ANOVA Test Results
		Stainless Steel	Alloy	Carbon Steel	Stainless Steel + Carbon Steel	
Welding Fume (5 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p>0.05 (p=0.071)
	AM±SD	1.8351±2.6225	2.0294±3.0831	1.2262±1.9162	0.4227±0.1719	
	GM(GSD)	0.9612(3.1162)	0.9588(3.4687)	0.6659(2.7303)	0.3809(1.6863)	
	Range	0.0958~9.0996	0.1141~11.7569	0.0967~8.0159	0.1272~0.6945	
Manganese (Fume) (1 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p>0.05 (p=0.160)
	AM±SD	0.0085±0.0094	0.0299±0.1023	0.0047±0.0067	0.0024±0.0022	
	GM(GSD)	0.0045(3.5190)	0.0035(6.4359)	0.0025(3.4100)	0.0014(3.3077)	
	Range	0.0003~0.0305	0.0002~0.4390	N.D.~0.0312	0.0001~0.0080	
Chrome(Metal) (0.5 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p<0.05 (p=0.048)
	AM±SD	0.0159±0.0383	0.0017±0.0024	0.0026±0.0079	0.0006±0.0004	
	GM(GSD)	0.0012(11.5036)	0.0006(6.3903)	0.0002(8.6701)	0.0004(3.4165)	
	Range	N.D.~0.1136	N.D.~0.0099	N.D.~0.0358	N.D.~0.0014	
Copper(Fume) (0.1 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p<0.05 (p=0.046)
	AM±SD	0.0021±0.0017	0.0051±0.0073	0.0023±0.0047	0.0009±0.0006	
	GM(GSD)	0.0013(3.6319)	0.0022(4.0966)	0.0009(3.2552)	0.0007(2.2024)	
	Range	N.D.~0.0052	0.0003~0.0292	0.0001~0.0218	0.0002~0.0024	
Iron Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p<0.05 (p=0.010)
	AM±SD	0.1779±0.1973	0.4906±0.8537	0.2178±0.4617	0.0449±0.0495	
	GM(GSD)	0.0963(3.9958)	0.1589(5.6305)	0.0767(3.8842)	0.0249(3.7951)	
	Range	0.0021~0.6675	0.0052~3.6397	0.0060~2.5267	0.0009~0.1807	
Aluminium (Welding fume) (5 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p>0.05 (p=0.302)
	AM±SD	0.0209±0.0354	0.0094±0.0111	0.0100±0.0182	0.0051±0.0030	
	GM(GSD)	0.0086(3.9100)	0.0062(2.3785)	0.0052(3.2990)	0.0039(2.5436)	
	Range	0.0004~0.1147	0.0017~0.0466	0.0004~0.119	0.0004~0.0114	
Nickel (Insoluble) (0.5 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p<0.05 (p=0.013)
	AM±SD	0.0096±0.0238	0.0008±0.0011	0.0009±0.0025	0.0003±0.0003	
	GM(GSD)	0.0007(8.7238)	0.0002(7.8405)	0.0001(7.0431)	0.0002(3.4793)	
	Range	N.D.~0.0721	N.D.~0.0040	N.D.~0.0108	N.D.~0.0009	
Lead (0.05 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p>0.05 (p=0.795)
	AM±SD	0.0003±0.0009	0.0003±0.0006	0.0003±0.0007	0.0009±0.0021	
	GM(GSD)	0.0001(2.9286)	0.0001(2.6639)	0.0001(2.6785)	0.0001(5.3431)	
	Range	0.0001~0.0037	0.0001~0.0028	0.0001~0.0032	0.0001~0.0057	
Zinc Oxide (Fume) (5 mg/m ³)	n	15	18	39	12	p>0.05 (p=0.240)
	AM±SD	0.1910±0.3305	0.0906±0.1535	0.1691±0.3448	0.0380±0.0200	
	GM(GSD)	0.0815(3.6396)	0.0491(2.7072)	0.0627(3.9267)	0.0333(1.7214)	
	Range	0.0087~1.2953	0.0123~0.6770	0.0038~1.7877	0.0159~0.0773	
	95%ile	0.6823	0.2529	0.5953	0.0813	

두 TIG용접(Tungsten Inert Gas Welding)이었으며, 모재에 따라서 노출그룹을 나누어 볼 수 있었다. 주요 모재는 스테인리스 스틸(Stainless Steel), 합금(Alloy), 카본스틸(Carbon Steel), 카본스틸과 스테인리스 스틸을 동시에 다루는 혼합금속의 네 개의 그룹으로 구분할 수 있으며, 각 그룹의 기하평균, 기하표준편차 등은 Table 5와 같다.

용접흡(기하평균)은 스테인리스 스틸에서 0.9612 mg/m³으로 가장 높았고, 다음으로 합금 0.9588 mg/m³, 카본스틸 0.6659 mg/m³, 혼합금속 0.3809 mg/m³ 순이었으나 통계적으로 유의하게 다르지는 않았다($p>0.05$). 금속류에 대한 용접모재별 분석결과, 크롬, 구리, 산화철, 니켈 농도는 용접모재의 종류에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었으나, 망간, 알루미늄, 납, 산화아연의 농도에 있어서는 용접모재별 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

스테인리스 스틸을 용접모재로 하는 용접작업에서 크롬, 니켈의 농도가 가장 높았고, 합금을 모재로 하는 용접에서 구리와 산화철 농도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 화학플랜트 건설현장의 경우 모든 작업이 옥외에서 이루어지고 용접흡 발생량이 상대적으로 적은 TIG용접기법을 적용하고 있어 향후 노출평가 결과 노출기준을 초과할 확률은 높지 않을 것으로 분석되었다.

IV. 고 찰

건설현장 용접직종에 따른 유해인자별 농도수준을 살펴보면, 용접흡, 납, 산화아연의 농도는 일반건축물 배관용접공에서 가장 높았고, 망간, 산화철, 크롬, 구리, 알루미늄은 철골용접공에서 가장 높은 농도수준을 나타내었다.

Choi et al.(1999)의 연구에서 업종에 따른 용접흡 농도수준을 비교하였는데, 자동차 산업은 0.92 mg/m³, 금속관련산업은 4.10 mg/m³, 조선업은 5.59 mg/m³ 이라고 보고하여 건설현장 일반건축물 배관공과 철골용접공은 조선업, 금속관련 산업에서 발생하는 용접흡 농도와 유사한 수준이었고, 화학플랜트 배관용접공, 금속마감 용접공은 자동차 산업 용접작업과 유사한 수준의 용접흡에 노출되고 있음을 알 수 있었다. 건설현장 용접작업은 일반적으로 옥외작업이라

농도가 낮을 거라는 추측과 달리 제조업 용접공정에서 노출되는 수준의 농도에 노출되고 있음을 알 수 있었다.

특히, 일반건축물 배관용접작업을 지하공간과 지상층으로 나누어 농도수준을 살펴보면, 지하공간($n=13$)에서 용접흡 농도가 7.7471 mg/m³로 지상층($n=8$)의 2.1487 mg/m³보다 3.6배 더 높았고, 망간(흡), 산화철(흡), 납의 농도는 지하공간이 지상층보다 약 5배 이상 더 높은 것을 알 수 있었다. 일반건축물의 배관용접은 주로 기상의 영향을 받지 않는 지하공간에서 지상층에서 사용할 배관의 초벌용접까지 포괄적으로 시행하고 있었는데, 지하공간의 경우 환기가 이루어지기 어려운 공간이므로 가능한 지상층에서 작업을 하도록 유도할 필요가 있으며, 지하공간에서 용접을 시행할 경우에는 이동식 국소배기장치의 사용이 필수적이다.

국내 문헌 중 건설현장 용접흡 노출평가 결과를 참고할 수 있는 자료는 Shin(2004)와 Kim et al.(2013)이 실시한 두 편의 연구 자료가 있었는데, 해당 연구 자료에서 제공하는 자료를 통해 금속류의 평균농도를 살펴보면, Shin(2004)의 아파트 지하 배관(아연도금관) 용접작업에 대한 노출평가결과에서 산화아연(기하평균)이 3.08 mg/m³으로 이번 연구의 지하층 산화아연 농도수준인 2.10 mg/m³보다 다소 높았고, 기타 금속류 농도수준은 이번 연구와 유사한 수준이었다. Kim et al.(2013)에서는 아파트 지하 배관 용접작업에서 산화철이 6.94 mg/m³, 망간 1.04 mg/m³, 산화아연 0.96 mg/m³으로 이번 연구의 일반건축물 배관용접공의 노출평가 결과와 비교하여 높은 농도수준을 나타내었다. 해당 연구에서는 용접모재에 대한 정보가 없었으나 산화철 농도가 높은 것으로 미루어 아연도금관이 아닌 카본스틸에 대한 용접평가 결과로 추정되어 이번 연구결과와는 상이하였던 것으로 분석된다.

국외연구에서는 Flynn & Susi(2012)의 연구에서 보일러제작공의 평균농도가 용접흡 12.36 mg/m³, 망간 0.29 mg/m³로 여러 직종 중 노출농도가 가장 높았고, 다음으로 철골공이 용접흡 7.070 mg/m³, 망간 0.126 mg/m³, 파이프배관공이 용접흡 2.890 mg/m³, 망간 0.077 mg/m³ 수준이었다고 하였으나, 이번 연구에서는 보일러 제작공의 노출농도가 낮았는데, 공정률이 낮은 상태로 평가되어 본격적인 보일러 내부

용접작업 등이 시행되지 못하고 모든 작업이 실외에서 이루어져 작업공간 특성에 따른 차이라고 평가된다. 따라서, 향후 보일러 내부에서 이루어지는 용접작업에 대한 평가가 요구된다.

직중 이외에도 평가결과에 영향을 줄 수 있는 환경변수로는 용접기법, 용접모재의 종류, 작업을 수행하는 공간의 특성(환기특성 등) 등이 있다. 용접기법에 따라서는 용접흡의 경우 CO₂용접(2.0784 mg/m³)과 피복아크용접(1.54 mg/m³)은 통계적으로 유의하게 다르지 않았으나, TIG용접(0.7044 mg/m³)은 통계적으로 유의하게 낮은 농도수준을 나타내었다. 망간의 농도는 CO₂용접이 TIG용접보다 약 32배 더 높아 큰 차이를 나타내었고, 산화철도 CO₂용접이 TIG용접과 비교하여 약 6배정도 더 높은 농도를 나타내었다. 다만, 농도수준은 매우 낮으나 니켈 농도는 TIG용접기법이 다른 용접기법과 비교하여 높은 수준을 나타내었다. 일반적으로 CO₂용접과 피복아크용접은 용접모재로 카본스틸을 많이 사용하고, TIG용접은 스테인리스 스틸, 합금 등을 주로 사용하는 것이 용접기법별로 발생하는 금속류의 농도차이를 발생하는 것으로 분석된다. CO₂용접은 전류밀도가 커서 용입이 깊고 용접속도가 빠른 특성이 있어 흡 발생량이 다른 용접기법과 비교하여 많은 편으로 분류할 수 있다 (Lee, 2009). 또한, 피복아크용접은 피복제(flux)를 도포한 용접봉과 피용접물 사이에 전기아크를 발생시켜 그 아크열에 의해 용접을 행하는 방법으로서 각종 용접법 중 가장 널리 사용되며, 용접흡 발생량이 많고, 용접불티가 많이 튀는 특징이 있다. 반면, TIG용접은 용접봉을 별도로 사용하지 않고 텅스텐 전극과 모재 혹은 용탕(weld pool)사이에 발생하는 아크열을 이용해서 용접을 진행하는 방법으로 용접흡 발생량이 적은편이다. 다만, CO₂용접과 TIG용접은 대부분 실외작업으로 이루어진 반면, 피복아크용접은 실내·외 작업공간 모두에서 평가되어 작업공간이 상이한 점은 평가결과 해석에 제한점이 될 수 있다.

용접종류별 용접흡 농도(기하평균)를 비교한 연구자료에서(Choi et al., 1999), CO₂용접 시 3.84 mg/m³, TIG용접 2.23 mg/m³, 피복아크용접 2.09 mg/m³, 서머지드아크용접 1.36 mg/m³, 스팟용접 0.15 mg/m³으로 용접종류별 흡의 농도에 차이가 있었다고 하여 이번 연구결과와 유사하였다. Lee et al.(1999)의 연구에서

도 연강을 CO₂용접을 할 때가 피복아크용접을 할 때보다 총 흡 평균농도가 4.7배 정도 높게 나타났으며 스테인리스강을 용접할 때도 3.1배 정도 높게 나타났다고 하였다. Yoon(2009)의 연구에서도 CO₂아크용접의 경우 피복아크 및 서머지드 아크용접보다 공기 중 흡 농도는 평균 6배, 망간농도 15배, 아연농도 평균 7배정도 높게 나타났다고 하였다. 다양한 용접작업 중 CO₂용접과 피복아크용접의 경우 용접흡 농도의 저감을 위한 작업환경관리 노력이 더욱 요구된다.

작업공간 특성에 따른 용접작업 노출평가 결과를 살펴보기 위해 동일한 용접작업을 서로 다른 공간에서 수행한 일반건축물 배관용접작업을 지하공간과 지상층으로 나누어 평가하였는데, 지하공간에서 용접흡 농도가 지상층보다 3.6배 더 높았고, 망간, 산화철, 납의 농도는 지하공간이 지상층보다 약 5배 이상 높았다. Kwag & Paik(1997)의 연구에서도 작업공간에 대한 농도수준을 비교하였는데, 밀폐작업장의 공기 중 용접흡은 개방된 작업장보다 3.2배 높았다고 하여 이번 연구결과와 유사하였다. 건설현장 용접작업 시 배관용접공과 같은 지하 및 실내작업장의 경우 이동식 국소배기장치를 사용한 용접흡 저감이 매우 필요하였다.

Meeker et al.(2007)의 연구에서는 건설현장 용접작업에서 국소배기장치의 사용유무에 따른 용접흡과 망간의 농도를 비교하였는데, 실험환경에서는 국소배기장치를 사용함에 따라 망간농도는 75%(13 µg/m³ vs 51 µg/m³; p<0.05)감소하였고, 용접흡 농도는 60%(0.74 mg/m³ vs 1.83 mg/m³; p<0.05) 감소하였다고 하였다. 실제 작업현장에서는 국소배기장치를 사용함에 따라 망간농도는 53%(46 µg/m³ vs 97 µg/m³; p<0.05) 감소하였고, 용접흡 농도는 10%(4.5 mg/m³ vs 5.0 mg/m³; p<0.05) 감소하였다고 하였다. 건설현장 용접작업에서 이동식 국소배기장치를 사용하는 경우 망간농도를 저감하는데 매우 효율적이며 실외보다는 실내 작업에서 높은 효과를 나타낸다고 하였다. Lee et al.(2000)의 연구에서 용접면 형태에 따른 흡 차단효과는 머리부착형이 67.6%, 손잡이형이 58.5%였으나 에어공급식 용접면은 흡 차단율이 99.2%로 매우 높았다고 하였다. 실외 작업 등과 같이 이동식 국소배기장치의 설치가 곤란한 철골용접 작업 등의 경우에는 급기팬을 사용하여 용접흡이 작

업자의 호흡영역에 머무르지 않도록 하는 등의 관리가 필요하다. 또한, 용접면과 마스크를 동시에 착용하면 흡 차단효과가 용접면 또는 마스크 중 한 가지를 착용할 때보다 흡 차단효과가 훨씬 커지는 것으로 보고하였다. Jeong(2002)의 연구에서는 용접면에서 아르카까지의 거리에 따른 용접흡 및 금속류의 노출농도수준을 비교하였는데 거리가 가까울수록, 특히 40 cm이하에서 노출농도수준이 높아진다고 하였고, 용접전류는 351 암페어 이상에서 매우 높아진다고 하였다.

용접모재별로 금속류의 농도를 살펴보면, 스테인리스 스틸을 용접모재로 하는 용접작업에서 크롬, 니켈의 농도가 가장 높았고, 합금을 모재로 하는 용접에서 구리와 산화철 농도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 다만, 실외작업이며 TIG용접기법을 적용하다보니 노출농도는 노출기준의 10%미만으로 매우 낮았는데 TIG용접기법을 사용하는 경우에는 텅스텐을 전극으로 사용하여 별도의 용접봉을 소모하지 않는 작업이므로 스테인리스 스틸을 피복아크용접하는 작업과 비교하면 크롬, 니켈의 발생농도는 상대적으로 낮을 것으로 추정된다. 다만, 크롬 및 니켈은 유해성이 크다고 의심되는 물질인 만큼 다양한 작업조건에 따른 지속적인 모니터링이 필요하다.

또한, Kim & Kim(2012)의 연구에서는 용접작업 중 발생하는 흡의 나노입자비율이 58%로써 유럽연합에서 정의하는 나노물질(50% 이상 나노입자)에 해당한다고 하여 용접작업에 대한 유해성을 강조하였는데, 용접작업에 대한 노출평가를 실시할 때 입자의 입경별 분포에 대한 추후 연구가 필요하다.

V. 결 론

1. 건설현장 일반건축물 배관용접공, 화학플랜트 배관용접공, 철골용접공, 소각플랜트 보일러 제작용접공, 금속마감용접공을 대상으로 용접흡 및 금속류에 대한 노출농도(기하평균) 수준을 살펴보면 다음과 같았다.

- 용접흡의 농도는 일반건축물 배관공(4.753 mg/m³) > 철골용접공(3.765 mg/m³) > 보일러제작용접공(1.384 mg/m³) > 금속마감용접공(0.783 mg/m³) > 화학플랜트 배관용접공(0.710 mg/m³) 순으로

높았다.

- 망간의 경우는 철골용접공(0.4705 mg/m³) > 일반건축물 배관용접공(0.0700 mg/m³) > 보일러제작용접공(0.0402 mg/m³) > 금속마감용접공(0.0037 mg/m³) > 화학플랜트배관용접공(0.0028 mg/m³) 순으로 높았다.
- 산화철은 철골용접공(1.3208 mg/m³) > 일반건축물 배관용접공(0.4397 mg/m³) > 보일러제작용접공(0.1938 mg/m³) > 화학플랜트 배관용접공(0.0795 mg/m³) > 금속마감용접공(0.0453 mg/m³) 순으로 높았다.
- 납과 산화아연은 일반건축물 배관용접공에서 각 0.0067 mg/m³ 및 1.2154 mg/m³로 가장 높았다.
- 크롬, 구리, 알루미늄은 철골용접공에서 가장 높은 농도수준을 나타내었으나 기하평균값이 노출기준의 1/10 이하 수준으로 낮았다.

2. 베이시안 통계기법을 활용한 유해인자별 노출기준 초과 확률을 산출하면, 일반건축물 배관용접공에서 용접흡이 48.23%, 망간 3.977%, 산화철 6.365%, 납 9.036%, 산화아연은 14.499%였고, 철골용접공의 경우, 용접흡 31.8%, 망간 3.685%, 납 4.885%, 산화철 0.297% 이었다. 화학플랜트 배관공, 보일러용접공, 금속마감용접의 경우, 유해인자가 노출기준을 초과할 확률은 낮았다.

3. 용접기법에 따른 용접흡 농도는 CO₂용접(2.0784 mg/m³) > 피복아크용접(1.5400 mg/m³) > TIG용접(0.7044 mg/m³) 순으로 높았고, 금속류 노출농도에서도 니켈과 구리를 제외하고 CO₂용접 > 피복아크용접 > TIG용접 순으로 높았다.

4. 동일한 직종의 일반건축물 배관용접작업에서 지하공간(7.7471 mg/m³)과 지상층 실내공간(2.1487 mg/m³)의 용접흡 농도차이는 약 3.6배로 더욱 커서 작업장 환기조건이 용접흡 농도에 중요한 환경변수임을 알 수 있었다.

5. 용접작업 위험도가 높은 일반건축물의 배관용접과 철골용접작업, 지하공간에서의 용접작업, CO₂ 용접작업 등을 수행할 시에는 환기장치 사용과 호흡용 보호구 착용 등 철저한 작업환경관리와 작업시 아르카까지 일정거리 유지, 적정 용접전류 선택 등 용접흡 발생을 최소화할 수 있는 근로자 안전보건교육이 필요함을 알 수 있었다.

References

- Choi HC, Kim KY, An SH, Park WH, Kim SJ et al. Airborne Concentration of Welding Fume and Metals of Workers Exposed to Welding Fume. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1999;9(1)
- Flynn MR, Susi P. Local exhaust ventilation for the control of welding fumes in the construction industry--a literature review. *Ann Occup Hyg* 2012;56(7):764-76
- Han JG, Lee JB. Recent Construction Steel and Weldability. *Korea society of steel construction* 1995;7(3)
- Hwang SH, Son BS, Jang BK, Lee JW, Park JA. Status of Welding Fume Concentration and Local Ventilation System at Welding Laboratory in Technical High School. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2001;11(1)
- Jang JK, Kim KB, Park HH. Development of applicable health management manual for construction business(II) - civil engineering project -. Research report of Occupational Safety and Health Research Institute, 2012
- Jeon CK. A study on Spatial Distribution of Welding Fume and Worker's Exposure in Shipyard. Master's thesis of Seoul National University, 2001
- Jeong JY, Lee KN, Kim JM. Welding Fume, Metal Exposures and Metal Contents of Gas Metal Arc Welding in the Heavy Construction Machinery Ship. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2002;12(1)
- Kang YS, Shin JK, Lee SK, Yoon CS, Lim MH et al. An Evaluation on Airborne Particulate and It's Components in the Welding Workplace for the Ship Construction Industry. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2007;17(3)
- Kim KJ, Song KC. A Study on the Concentration of Welding in a Shipbuilding Factory. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1991;1(1)
- Kim BW, Kim HW. Characterization of Nanoparticles from Welding and Grinding Processes: Evaluation of Number Concentration and Size Distribution *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2012;22(3)
- Kim SW, Park JY, Park JG, Park JH. Development on Statistical Analysis Tool for Working Environment Measurement. Research report of Occupational Safety and Health Research Institute, 2013
- Kim YH, Kim JW, Lim HS, Shin YC, Kim KS. Positron emission tomography (PET) Results taken in manganese poisoning suspected welder. 19th fall conference book of Korean society of occupational and environmental medicine, 1997
- KOSHA. Task-Force Team Report of Comprehensive Safety and Health Management Plans for Welders. 2011 p. 6
- Kwag YS, Paik NW. A Study on Airborne Concentration of Welding Fumes and Metals in Confined Spaces of a Shipyard. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1997;7(1)
- Kwon YJ. Research on Chemical Hazards and Risk Assessment and Management in Construction industry. Research report of Labour Ministry, 2005
- Lee YS, Yoon CG, Park JA, Lee JA, Lee SK, Chae JH, Kim ES. Evaluation of Chromium and Manganese Exposure in Welders. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2000;10(1)
- Lee IS, Park HH, Seo HK. Development of applicable health management manual for construction business(II) - general building -. Research report of Occupational Safety and Health Research Institute, 2011
- Lee CG. Welding Engineering 2009, Cheongmoongak p 95~103
- Meeker JD, Susi P, Flynn MR. Manganese and welding fume exposure and control in construction. *J Occup Environ Hyg*. 2007;4(12):943-51.
- Shin YC, Lee KY, Lee NR, Oh SM, Kang SK, Moon YH, Lee GR. Welder's Exposure to Airborne Hexavalent Chromium and Nickel during Arc Welding in a Shipyard *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1998;8(2)
- Shin JS. Study on the Characteristics in the Human body of Welding Fume of Pipe Welding Workers at Construction Sites. Master's thesis of Seoul National University of Industry, 2004
- Yoon YM. A Study on the Environment-Friendly Pipe Welding Material for Reducing Environmental Pollution. Master's thesis of Seoul National University of Industry, 2009