

대형조선소 천장크레인 운전원의 용접흄 노출 실태

이경민* · 김부욱 · 곽현석 · 하현철¹

근로복지공단 직업성폐질환연구소, ¹(주)벤틱

Exposure status of welding fumes for operators of overhead traveling crane in a shipyard

Kyeongmin Lee* · Boobook Kim · Hyunseok Kwak · Hyunchul Ha¹

Occupational Lung Diseases Institute, Korea Workers' Compensation and Welfare Service

¹Ventech Corp

ABSTRACT

Objectives: Operators of overhead traveling crane in a ship assembly factory perform work to transmit large vessel blocks to an appropriate working process. Hazardous matters such as metal dusts, carbon monoxide, carbon dioxide, ozone, loud noise and fine particles are generated by variable working activities in the factory. The operators could be exposed to the hazardous matters during the work. In particular, welding fumes comprised of ultra fine particles and heavy metals is extremely hazardous for humans when exposing a pulmonary through respiratory pathway. Occupational lung diseases related to welding fumes are increasingly on an upward tendency. Therefore, the objective of this study is to assess properly unknown occupational exposure to the welding fumes among the operators.

Methods: This study intended to clearly determine an equivalence check whether or not chemical constituents and composition of the dusts, which existed in the driver's cab, matched up with generally known welding fumes. Furthermore, computational fluid dynamics program(CFD) was used to identify a ventilation assessment in respect of a contamination distribution of welding fumes in the air. The operators were investigated to assess personal exposure levels of welding fumes and respirable particulate.

Results: The dust in an operation room were the same constituents and composition as welding fumes. Welding fumes, which caused by the welding in a floor of the factory, arose with an ascending air current up to a roof and then stayed for a long time. They were considered to be exposed to the welding fumes in the operation room. The personal exposure levels of welding fumes and respirable particulate were 0.159(n=8, range=0.073-0.410) mg/m³ and 0.138(n=8, range=0.087-0.178) mg/m³, respectively. They were lower than a threshold limit value level(5 mg/m³) of welding fumes.

Conclusions: These findings indicate that an occupational exposure to welding fumes can exist among the operators. Consequently, we need to be keeping the operators under a constant assessment in the operator process of overhead traveling crane.

Key words: computational fluid dynamics, crane operator, shipyard, welding fumes

I 서 론

우리나라 조선업종은 1960년대 경제개발계획 이 후 비약적으로 발전함에 따라 현재 53개소의 중대형 조선소가 운영되고 있으며 조선업에 종사하는 근로

자 수는 약 18만 명에 이르렀고, 이중 생산직종의 근로자는 약 90%이상 차지한다(KOSHIPA, 2014). 생산 직종 근로자는 작업공정에서 수많은 화학물질을 사용함에 따라 직무 수행 과정에서 다양한 유해물질에 노출되고 있는 실정이다.

*Corresponding author: Kyeongmin Lee, Tel: 032-540-4970, E-mail: kj8286@gmail.com
Occupational Lung Disease Institute, 2F Incheon Labor & Welfare Complex, 478, Munemi-ro, Bupyeong-gu, Incheon
Received: April 14, 2015, Revised: June 15, 2015, Accepted: September 3, 2015

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.

조선업에서 선박 건조 과정은 크게 설계, 선각, 의장, 도장 공정으로 구분되어 있고 선각 공정은 다시, 철판을 절단하거나 성형하는 가공 공정과 가공된 철판들을 용접으로 붙이는 조립 공정으로 나누어진다. 조립 공정에서는 천장크레인으로 선박의 한 부분인 대형 철재구조물들을 적절한 작업 장소에 운반시킨 다음 용접으로 철재를 붙여서 조립하는 업무를 수행하기 때문에 용접, 취부, 사상 및 운반 작업이 주로 이루어진다. 이중 용접 작업은 용접흡, 유해가스 등의 유해물질을 발생시키는데(Plog & Quinlan, 2002; Berlinger et al., 2011), 조립 공정 특성상 용접 작업 비율이 높아 공장 내부 공기에는 용접 작업에서 발생된 유해물질에 오염될 수 있다. 이에 용접원 뿐만 아니라 용접 작업 주변에서 작업하는 사상 및 운반 작업자들도 오염된 공기에 노출될 수 있다.

용접 작업에서 발생하는 용접흡은 고온의 금속 증기가 공기 중으로 방출된 후 산화 및 냉각 과정을 거쳐 생성되는 미세입자로, 발생 즉시 정전기에 의해 1, 2차로 응집되어 사슬 형태로 뭉쳐짐에 따라 포도송이 형태로 이루어져 있다(Burgess, 1995; Jenkins & Eager, 2005). 용접흡은 호흡성 크기로 폐까지 쉽게 도달할 수 있을 뿐만 아니라 금속물질로 이루어져 있어 인체에 유해한 것으로 알려져 있는데(IARC, 1990a; Persoons et al., 2014), 호흡기로 노출 시 폐섬유증(Interstitial pulmonary fibrosis), 만성 폐쇄성 폐질환(Chronic obstructive pulmonary disease), 직업적 천식(Occupational asthma)과 같은 호흡기질환 관련 연구 사례들이 보고되고 있다(Buerke et al., 2002; Munoz et al., 2009; Koh et al., 2015). 더구나 국제암 연구소에서 발암 가능물질(Group 2B)로 분류함에 따라 다량의 용접흡에 노출되는 용접원들의 폐암 관련 연구도 지속적으로 수행되고 있다(IARC, 1990b; Lauritsen & Hansen, 1996; Hansen et al., 1996; Moulin, 1997; Steenland, 2002).

한편 조립 공장에는 용접원 외에 취부, 사상 및 천장크레인 운전을 수행하는 작업자들이 존재하는데, 천장크레인 운전실 안에서만 업무를 수행하는 천장크레인 운전원은 공기 기류 및 환기 상태에 따라 천장에 정체되는 용접흡에 지속적으로 노출될 수 있다(Paik, 2004). 그러나 본 연구 대상 사업장에서는 매년 실시하는 작업환경측정평가에서 천장크레인 운전

원의 용접흡을 측정 대상물질에서 대부분 제외해왔다. 이는 천장크레인 운전실에 존재하는 분진의 종류를 육안으로 확인하기 어렵고 현재 제시되어 있는 용접흡 평가법이 총분진과 동일한 중량분석으로만 평가하게 되어 있어 총분진인지 용접흡인지를 판단하기가 어렵기 때문이다. 실제 국내의 조선업종에서 용접흡 노출을 평가한 연구 사례들에서도 주로 용접원을 대상으로만 평가하였고(Peters et al., 1973; Simonato et al., 1991; Castner & Null, 1998; Shin et al., 1998), 용접흡에 간접적으로 노출되는 천장크레인 운전원을 대상으로 노출평가한 사례는 거의 없다. 이에 따라 본 연구에서는 천장크레인 운전실 내부에서 용접흡 존재 여부를 확인한 후 조립 공장에서 근무하는 천장크레인 운전원을 대상으로 일일 평균 용접흡 노출수준을 평가하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구에서는 국내 대형 조선업종 사업장 1개소를 선정하고 2014년 6월에 조립 공장 하부로부터 22 m 높이에 있는 천장크레인에서 근무하는 천장크레인 운전원 8인을 대상으로 일과시간 동안 용접흡 개인노출수준을 평가하였고, 측정결과의 재현성을 위해 동일한 방법으로 2일간 반복 측정하였다. 또한 천장크레인 운전실에서 분진을 채취하여 입자의 크기, 형태 및 화학성분을 평가하였고, 전산유체역학을 이용하여 공장 실내 공기의 흐름 및 용접흡 분포를 확인하였다.

2. 연구방법

1) 입자의 형태, 크기 및 화학성분 분석

천장크레인 운전실에서 Grid(LC400-Cu, EMS Inc., USA)가 장착된 Mini particle sampler(MPS, INERIS, France)를 이용하여 분진을 1 L/min으로 약 30초 동안 채취하였다. 이 분진의 입자 크기, 형태 및 화학성분은 분진을 포집한 Grid를 투과전자현미경 에너지분산분석장치(TEM-EDS, H-7650, Hitachi, Japan)에 삽입한 후 입자를 관찰하고, 이 입자 표면에 에너지를 쬐어 발생한 X선을 검출기에서 분석하였다.

천장크레인 운전실에 존재하는 용접흡이 공장 하부에서 발생된 것인지를 확인하기 위해 이 분석 결

과를 측정 당시 용접원이 사용한 용접봉의 물질안전보건자료(Material safety data sheet, MSDS)상에서 확인된 화학성분과 비교해보았다.

2) 환기 평가

본 연구대상 조립공장의 환기 장치는 루프모니터(Roof monitor)로서 자연환기방식으로 이루어져 있는데, 이 루프모니터에 의한 환기는 베르누이법칙에 의하여 무동력으로 공장 내의 더운 공기를 외부로 배출하는 방식이다. 용접으로 인해 발생된 더운 공기는 공장 천장까지 올라온 후 루프모니터를 거쳐 외부로 천천히 배출된다. 이에 따라 본 연구에서는 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)으로 더운 공기에 섞인 오염물질의 흐름 및 정체 여부를 예측해 보았다. 이 평가 방법에서는 실내 공기의 흐름 및 오염물질 분포에 영향을 줄 수 있는 다양한 환경요인들을 조사한 후 컴퓨터 프로그램으로 공장의 삼차원 입체 도면이라 볼 수 있는 모델링을 구축하였다. 이 모델링에서는 대략 150만개 이상의 격자를 형성시켜 용접흙 분포에 대한 연산을 수행하는데, 계산결과의 정확도를 위해 500회 이상 반복 계산하여 최종 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 작업장 내부 열 유동 및 기류특성을 해석하기 위해 상용수치해석 프로그램(AIRPAK ver 3.0, Fluent Inc., UAS)을 사용하였다. AIRPAK에서 질량, 운동량, 에너지 수송은 Navier-Stokes 방정식의 해를 이용하여 구하고, 난류 유동은 별도의 난류방정식으로 계산한다. 이산화 방법으로는 유한체적법(Finite volume method)을 사용하였고, 유동장 해석을 위해서는 SIMPLE(Semi implicit method for pressure-linked equations) 알고리즘을 사용하였다. 난류방정식은 기존연구를 통해 작업장 내부 기류예측에 있어 정확도가 입증된 표준 k-e 모델을 사용하였다. 또한 수렴도 향상을 위해 하양 이완법(Under-

relaxation)을 사용하였고, 에너지를 제외한 공장 내 중속 변수에 대하여 잉여치 값은 10^{-3} , 에너지는 10^{-6} 이하로 도달되면 수렴된 것으로 간주하였으며 사용된 격자 개수는 180만개를 사용하였다.

수치해석을 위한 제어체적은 가로(267 m) × 세로(276 m) × 높이(50 m)를 설정하였다. 이 제어체적의 크기는 일반적으로 유체의 유동이 심한 영역으로부터 충분한 거리를 두어야 하는데 가령, 유체의 유동이 심한 영역의 면적을 A라 한다면 자유경계면까지는 $D=5A^{1/2}$ 만큼 거리가 떨어져야하나 제한된 격자수 내에서 대공간 시뮬레이션 수행으로 인해 이를 적용하는데 어려움이 있어, 유체 유동이 심한 격벽에서부터 약 20 m까지 최소한으로 거리를 이격시켜 자유경계면을 설정하였다.

본 연구에서는 대상 조립공장의 양쪽 주 출입구를 통해 들어올 수 있는 북동 및 남서풍 방향과 풍속 변화(2.5 m/s or 0.5 m/s)에 따른 오염물질 확산 정도를 컴퓨터 시뮬레이션으로 예측하였다. 각각의 경계조건은 Table 1의 조건과 같으며 용접원 1인당 용접흙 발생량은 선행연구를 참고하여 0.7 g/min로 적용하였다(Choi et al., 1999). 용접흙은 입자와 가스상의 복합물질로 시뮬레이션을 구현하는데 어려움이 있기 때문에 선행연구에서 용접흙의 움직임과 가장 유사한 결과를 나타낸 추적자 가스(SF6)를 이용하여 용접흙 농도를 간접적으로 예측하였다(Piao et al., 2009). 게다가 경계조건 변화에 따른 6Bay 내부 오염물질 농도 변화를 평가하기 위하여 천장크레인이 위치한 높이 22 m에서 길이 방향으로 균등 분할하였고, Variation plot 1~3을 구분하여 정량분석을 통한 오염물질 농도를 비교 분석 하였다(Figure 1).

3) 용접흙 개인노출수준 평가

용접흙은 총분진(Total suspended particulate, TSP)

Table 1. Boundary conditions for CFD

CFD simulation	Conditions of the wind			Pollution source(Welder)
	Temperature	Velocity	Direction	
Case 1	24°C	2.5 m/s	Northeast	· Total welder: 198 people · The generation amount of welding fumes per a welder: 0.7 g/min
Case 2	24°C	0.5 m/s	Northeast	
Case 3	24°C	2.5 m/s	Southwest	
Case 4	24°C	0.5 m/s	Southwest	

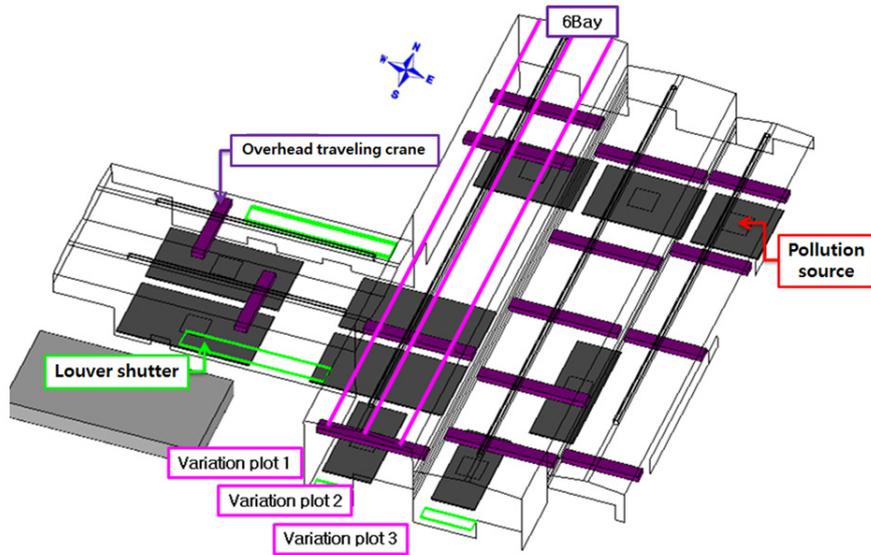


Figure 1. Model building and control volume

과 호흡성분진(Respiratory dust, RD)으로 구분하여 NIOSH Method #0500(NIOSH, 1994)으로 측정 및 분석하였고, 채취 시간은 교대 근무 시간인 오전 10시부터 오후 5시까지 일과시간 동안 채취하였다. 폴리염화비닐 여과지(Polyvinyl Chloride, SKC Inc., 37 mm, 5.0 μm , USA)는 플라스틱 카세트(Plastic Cassette, SKC Inc., 37 mm, 3-piece, USA)에 장착하기 전, 초전자저울(XP26, Mettler-Toledo International Inc., Switzerland)로 무게를 측정하였다. 측정 후 이 여과지는 건조기에서 72시간 동안 보관하여 수분을 제거한 다음 다시 무게를 측정하고, 공기 채취량을 고려하여 총 분진 농도(mg/m^3)를 구했다. 호흡성분진은 50% cut-point가 4 μm 인 분진을 포집하는 4.2 LPM 싸이클론(GK2.69 Cyclone, BGI Inc., USA)을 플라스틱 카세트에 장착한 후 총분진과 동일한 방법으로 농도를 구했다. 또한 운전실 내 미세분진 농도 변화를 관찰하기 위해 미세분진 측정기기(GRIMM Dust Monitor ver 1108, Germany)로 실시간 측정하였다.

III. 연구결과

1. 천장크레인 내 응집흡 존재 여부

천장크레인 운전실 내부에서 채취된 분진은 투과전자현미경으로 입자 형태를 관찰하고 에너지분산분

석장치로 성분을 조사하였다. 채취된 분진은 대부분 200 nm 이하로 초미세 입자였고, 이들은 포도송이 형태를 나타냈다(Figure 2, 3). 이 분진의 화학성분은 대략 철(Fe, 31%), 망간(Mn, 13%), 아연(Zn, 13%), 규소(Si, 6%), 칼륨(K, 3%), 마그네슘(Mg, 2%), 티타

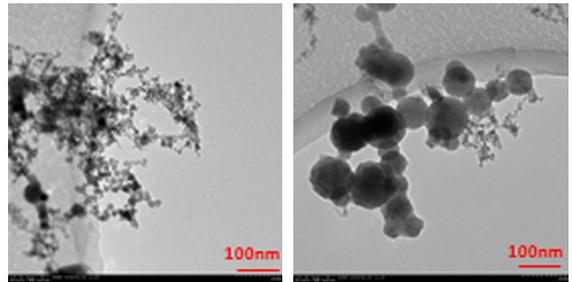


Figure 2. Welding fume shapes of approximately 100 nanometers

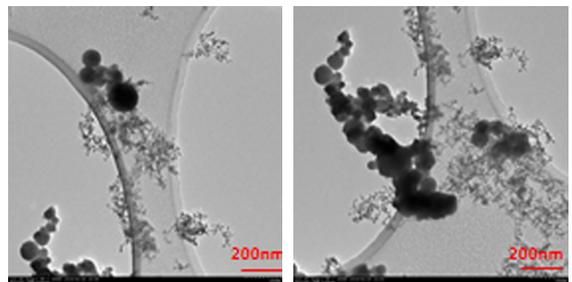


Figure 3. Welding fume shapes of approximately 200 nanometers

Table 2. Constituents of the main welding wires on a material safety data sheet

Welding wire	Fe	Mg	Mn	Ni	Al&Al ₂ O ₃	Si&SiO ₂	TiO ₂
Dual Shield 7100	Rem*	0.5-1.5	1.5-3.5	-	<1	1-3	5-9
Dual Shield II81-K2	Rem*	<1	1.5-2.5	1-2	<0.5	1-2	5-7

Unit: %
* Remainer

높(Ti, 1%)으로 이루어져있었는데, 이 화학성분들 중 대부분은 측정 당시 공장 안에서 주로 사용된 용접봉의 MSDS상에 있는 화학성분에서 확인할 수 있었다(Table 2). 따라서 천장크레인 운전실에서 채취된 분진은 일반적으로 알려져 있는 용접흄의 형태 및 화학성분과 동일하였고, 이들은 공장 하부에서 사용된 용접봉으로부터 발생된 것으로 확인되었다.

2. 전산유체역학 결과

공장 하부에서 발생하는 용접흄은 전체 환기 설비에 따라 공장 상부에 있는 배기구로 이동하여 외부로 배출되는데, 일부는 상부에서 뿌옇게 정체되어 있었다. 본 연구에서는 공장 상부에서 용접흄이 정체되는 현상을 규명하기 위해 전산유체역학 프로그램으로 공장 안 오염물질 분포 모의실험(Simulation)을 실시하여 용접흄 분포를 추측해보았다. 이 모의실험 결과, 북동 및 남서 방향의 주 출입구를 통해 들어오는 외기 방향이 남서풍이고 외기 풍속이 점점 낮아질수록 정체되는 현상은 심화되었다(Figure 4-7). 게다가 천장크레인이 위치한 높이에서 실시간 분진측정기로 분진 농도를 측정한 결과, 남서풍의 풍속이 2.5 ㎍에서 0.5 ㎍로 떨어졌을 때 분진 농도는 약 70% 더 증가하는 현상이 나타났다.

1) Case 1 시뮬레이션 예측 결과

2.5 ㎍의 북동풍에 대한 시뮬레이션 예측 결과, 공장 하부에서는 일부 오염물질 정체 현상이 나타났으나 천장크레인이 위치한 상부에서는 대부분 배출되었다(Figure 4).

2) Case 2 시뮬레이션 예측 결과

0.5 ㎍의 북동풍에 대한 시뮬레이션 예측 결과, 공장 하부에서 정체된 오염물질은 외기 풍속 감소로 인해 농도가 급격히 증가하였고, 이 오염물질은 천장크레인이 위치한 공장 상부의 일부 지역으로도 확산되었다(Figure 5).

3) Case 3 시뮬레이션 예측 결과

2.5 ㎍의 남서풍에 대한 시뮬레이션 예측 결과, 오염물질은 공장 하부에서 상당히 정체되었고, 이 정체된 오염물질은 공장 상부의 일부 지역으로 확산되는 경향을 나타냈다(Figure 6).

4) Case 4 시뮬레이션 예측 결과

0.5 ㎍의 남서풍에 대한 시뮬레이션 예측 결과, 공장 하부에서 정체된 오염물질은 외기 풍속 감소로 인해 농도가 급격히 증가하였고, 이 정체된 오염물질

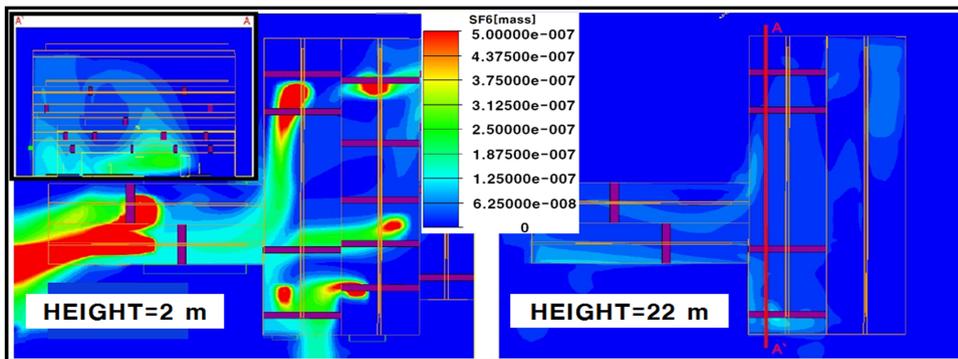


Figure 4. CFD simulation case 1(2.5 ㎍ northeast wind)

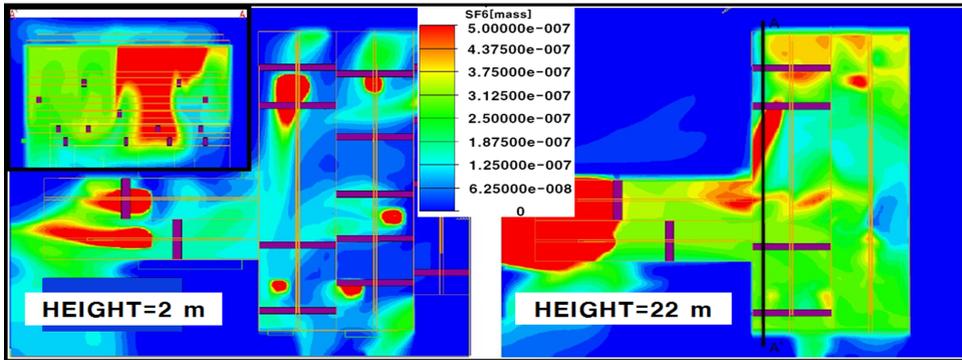


Figure 5. CFD simulation case 2(0.5 m/s northeast wind)

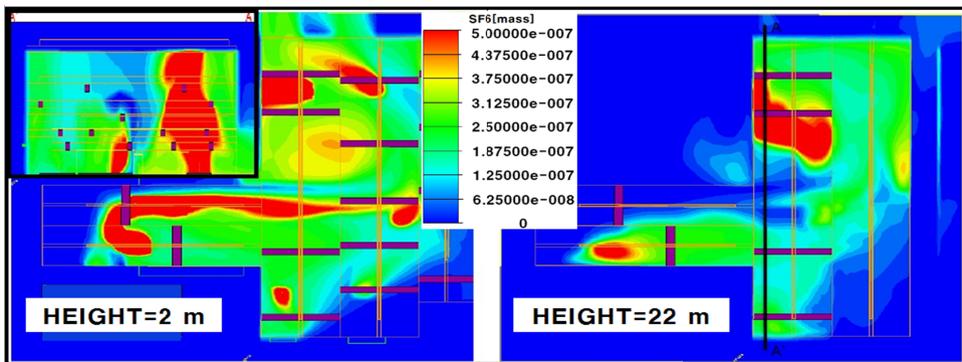


Figure 6. CFD simulation case 3(2.5 m/s southwest wind)

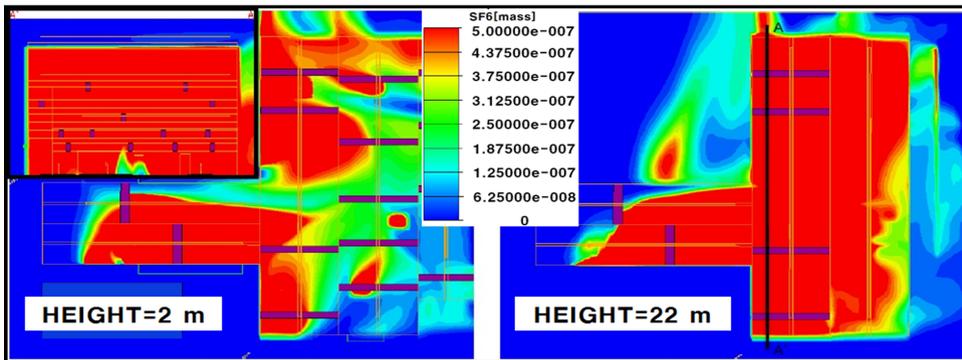


Figure 7. CFD simulation case 4(0.5 m/s southwest wind)

은 공장 상·하부의 전 영역으로 확산 후 정체되는 경향을 나타냈다. 따라서 Case 4는 본 연구의 시뮬레이션 예측 조건 중에서 가장 취약한 환기 결과를 나타냈다(Figure 7).

3. 용접흡 개인노출수준 평가

본 연구대상 사업장 2010년도~2013년도 작업환경

측정 자료에서 운전원의 용접흡 평균 농도는 0.852 (n=9, Range=0.072-2.068) mg/m³으로 고용노동부 노출 기준에 비해 약 17% 수준이었고, 본 연구결과의 운전원(n=8, 0.159 mg/m³)에 비해 약 5배 높았다(Table 3). 또한 2004년도~2009년도에 사업장에서 자체적으로 실시한 호흡성분진 평균 농도는 0.577(n=40, Range=0.015-2.487) mg/m³으로 본 연구결과의 호흡성분진

Table 3. The results of working environment measurement among the operators of an overhead traveling crane

Type of dust	Investigation period*	n	AM(SD)	GM(GSD)	Range(min-max)
Welding fume†	2010-2013	9	0.852(0.554)	0.650(2.554)	0.072-2.068
Respiratory dusts‡	2004-2009	40	0.577(0.448)	0.446(2.262)	0.015-2.487

AM: Arithmetic mean, SD: Standard deviation, GM: Geometric mean, GSD: Geometric standard deviation

Unit: mg/m³

Sampling time: Time weighed average(TWA)

* unit: year

† Total suspended particulate

‡ below 4 μm

Table 4. The levels of welding fumes and respiratory dusts by a personal sampling

Type of working	Type of dust	n	AM(SD)	GM(GSD)	Range(min-max)
Operators	Welding fume†	8	0.159(0.106)	0.138(1.668)	0.073-0.410
	Respiratory dust‡	8	0.138(0.038)	0.133(1.338)	0.087-0.178
Welder*	Welding fume†	4	3.525(2.610)	2.663(2.546)	0.828-6.518
	Respiratory dust‡	4	2.147(1.565)	1.591(2.711)	0.419-3.921

AM: Arithmetic mean, SD: Standard deviation, GM: Geometric mean, GSD: Geometric standard deviation

Unit: mg/m³

Sampling time: 9:00~17:00

* CO₂ Welding

† Total suspended particulate

‡ below 4 μm

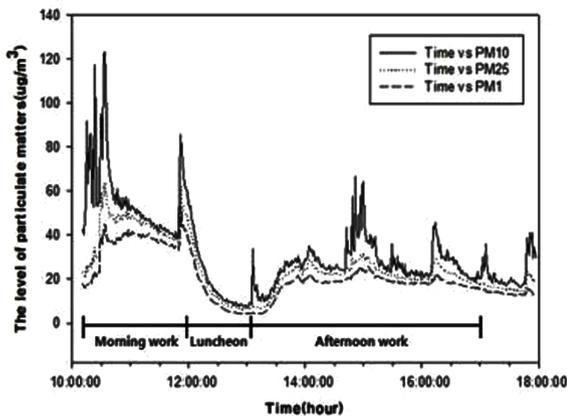


Figure 8. The levels of PM10, PM2.5, PM1 by time

(n=8, 0.138 mg/m³)에 비해 약 4배 높았다(Table 3, 4).

천장크레인 운전원의 용접흄 노출수준을 평가한 결과, 용접흄 평균 농도는 0.159(n=8, Range=0.073-0.410) mg/m³으로 그 당시 용접원(n=4, 3.525 mg/m³)에 비해 약 5% 수준이었고, 고용노동부 노출기준(5 mg/m³)에 비해 약 3% 수준이었다. 운전원의 호흡성분진은 0.138(n=8, Range=0.087-0.178) mg/m³으로 용접원(n=4, 2.147 mg/m³)에 비해 약 6% 수준이었다(Table 4).

천장크레인 운전실에서 실시간 미세분진 측정기기로 시간대별 미세분진 농도 경향을 관찰한 결과 운전실의 미세분진 농도는 오전에 일정한 농도 수준을 유지하다가 점심시간 시작 후 급격히 떨어지는 경향을 확인하였다(Figure 8). 게다가 분진 크기별 농도 비율이 0.8(PM_{2.5}/PM₁₀), 0.7(PM₁/PM₁₀) 및 0.8(PM₁/PM_{2.5})으로 대부분 미세 입자로 이루어진 것을 알 수 있었는데, 이 결과는 개인노출수준 평가에서의 분진 크기별 농도 비율인 0.8(PM₄/TSP)과 유사하게 나타났다.

IV. 고 찰

우리나라 산업안전보건법에서 근로자가 노출될 수 있는 유해물질은 작업환경평가를 통해서 관리하도록 되어있으나 일부 조선소에서는 천장크레인 운전원의 용접흄 노출 여부 자체를 자각하지 못하여 작업환경 평가에서 누락되는 경우가 발생되고 있다. 이에 본 연구에서는 천장크레인 운전원의 용접흄 노출여부를 확인하기 위해 천장크레인 운전실에 존재하는 분진을 분석하고 노출경로 및 개인노출수준을 평가하였다.

Jenkins & Eager(2005)는 투과전자현미경을 이용하

여 용접흡의 형태 및 크기를 관찰하였는데, 용접흡의 크기는 수십 나노미터 이하였고 응집된 형태를 나타냈다. 또한 에너지분산분석장치를 이용하여 화학성분을 확인하였는데, 관찰된 입자들은 대부분 용접흡에서 흔히 발견되는 금속들이었다. 본 연구의 천장크레인 운전실에서 채취된 분진의 크기 및 형상은 선행연구에서 확인된 용접흡과 일치하였을 뿐만 아니라 이 분진의 화학성분은 측정 당시에 공장 하부에서 사용된 용접봉들의 화학성분과 거의 일치하였다. 따라서 이러한 결과들을 종합적으로 판단해 본다면 천장크레인 운전실에 존재하는 분진은 공장 하부에서의 용접 작업으로부터 발생된 용접흡인 것을 알 수 있었다.

Paik(2004)은 전산유체역학 방법을 이용하여 조선소 선각공장 안 환기상태 및 용접흡 분포를 조사하였다. 이 선행연구에서 용접흡은 공장 천장으로 상승하고 배기구를 통해 외부로 배출되는데, 일부 용접흡은 천장에 지속적으로 정체된다고 하였다. 또한 대형 조선소 용접작업장의 공기 환경 개선 연구에서 용접흡은 외기 방향, 풍속 및 환기팬을 고려한 환기 개선 시스템을 적용하여도 공장 내부에서 정체되었다(Moon et al., 2005). 본 연구의 전산유체역학 결과에서 용접흡 분포 역시 외기 풍속과 방향에 따라 차이가 있었는데 특히, 0.5 m/s의 남서풍이 불 때 용접흡은 공장 내부 전체로 확산된 후 급격히 정체되는 현상이 나타났다(Figure 7). 조선소 조립공장의 환기방식은 일반적으로 루프모니터를 이용한 자연환기 방식이다. 용접작업으로 발생된 더운 공기는 외부에서 들어오는 찬 공기와 섞이면서 공기의 밀도 차이에 의해 대류현상이 나타나는데, 이때 용접흡은 대류현상으로 발생된 상승기류에 섞여 천장까지 올라가 정체층을 형성한다. 천장크레인 운전원은 공장 천장에 위치해있는 천장크레인에서 업무를 수행함에 따라 정체된 용접흡에 노출되는 것으로 판단된다.

Kang et al.(2007)은 우리나라 대형조선소에서 근무하는 용접원을 대상으로 용접흡과 호흡성분진의 평균 농도를 비교하였다. 용접흡은 4.11 mg/m³, 호흡성분진은 3.53 mg/m³으로 용접흡에서 호흡성분진 비율은 85%를 초과하였다. 그리고 용접흡을 크기별로 구분하여 농도를 평가한 연구에서 용접흡 크기 분포는 대부분 1 μm 이하로서, 나노 크기를 가진 분진 비

율이 높게 나타났다(Lehnert et al., 2012; Cena et al., 2014). 본 연구 결과에서는 천장크레인 운전원의 용접흡(0.159 mg/m³)에서 호흡성분진(0.138 mg/m³) 농도 비율 역시 85%를 초과하였고, 실시간 미세분진 측정기의 분진 크기별 농도에서 PM₁₀ 중 PM_{2.5}의 비율은 80%, PM₁₀ 중 PM₁의 비율은 70%, PM_{2.5} 중 PM₁의 비율은 80%으로(Figure 8), 이 선행연구 결과들과 거의 일치하였다. 따라서 천장크레인 운전실 내부에 존재하는 용접흡은 폐포까지 도달할 수 있는 호흡성 크기로 형성된 것을 확인할 수 있었다.

용접흡은 용접작업 형태에 따라 발생량 차이가 있는데, CO₂용접(CO₂ Gas Arc Welding)은 Argon(Argon Arc Welding) 및 Spot(Spot Welding)용접에 비해 용접흡 발생량이 더 많았다(Lee & Paik, 1994, Kwag & Paik, 1997). 본 연구에서 천장크레인 운전원의 용접흡 노출수준(n=8, 0.159 mg/m³)은 용접원(n=4, 3.525 mg/m³)의 5% 수준으로 상당한 차이를 보였는데(Table 4), 이러한 차이는 용접 방식 중 상대적으로 용접흡에 가장 많이 노출되는 CO₂용접을 수행한 용접원들과 비교하였기 때문인 것으로 보인다. 따라서 천장크레인 운전원의 용접흡 노출수준은 CO₂용접이 아닌 다른 용접 방식과 비교한다면, 천장크레인 운전원과 용접원과의 노출수준 차이는 줄어들 것으로 보인다.

Schoonover et al.(2011)은 미국 시카고 외곽 지역에 위치한 전기기관차 엔진 크랭크실 제조공장에서 용접원과 용접흡에 간접적으로 노출될 수 있는 기타 직종 작업자 38명을 대상으로 용접흡 개인노출수준을 평가하고 서로 비교하였는데, 용접 작업장과 기타 직종의 작업장이 벽으로 구분되어 있었음에도 불구하고 기타 직종 작업자들의 간접적으로 노출된 용접흡 농도는 가스 텅스텐 아크 용접(Gas Tungsten arc welding, GTAW)을 수행하는 작업자들과 유사하게 나타났다. 작업환경이 달라 본 연구와 직접적으로 비교하기는 어렵지만 천장크레인 운전원 역시 용접흡에 간접적으로 노출되는데, 과거 2010년부터 2013년도까지의 작업환경측정결과에서 천장크레인 운전원의 용접흡 노출수준은 평균 0.852 mg/m³이었고, 2004년도부터 2009년도까지 측정된 호흡성분진 노출수준은 0.577 mg/m³으로 본 연구의 용접흡(0.159 mg/m³) 및 호흡성분진(0.138 mg/m³) 노출수준에 비해 각각 4-5배 높게 나타났으며, 최대 농도수준은 각각 2.068 mg/m³,

2.487 mg/m³으로 용접원의 평균 노출수준과 유사하였다(Table 3, 4). 게다가 천장크레인 운전실의 시간별 미세분진 농도는 용접 작업량에 따라 차이를 나타냈다(Figure 8). 따라서 천장크레인 운전원이 간접적으로 노출되는 용접흙 농도는 공장 하부에서 수행된 용접 작업량에 따라 차이를 나타내고, 특히 작업량이 많을 때에는 고용노동부 노출기준의 약 50%에 근접한 용접흙 농도에 노출될 수 있었을 것으로 판단된다.

용접흙은 인체 노출 시 호흡기 관련 질환을 발생시킬 수 있는 것으로 알려져 있어(Antonini, 2003; Antonini et al., 2004), 용접흙에 간접 노출되는 근로자들 역시 용접흙 노출에 대한 관리 방안이 필요하다. 현재 우리나라 고용노동부에서는 용접흙을 중량분석으로만 평가하도록 되어있는데, 이 평가 방법은 간접 노출 근로자로부터 측정된 분진이 어떠한 크기, 형태 및 화학성분으로 이루어져 있는지 판단하기가 어렵다. 분진 특성을 판단하지 못하면 분진 종류 및 크기에 따라 노출기준이 다르기 때문에 부적절한 작업환경평가가 이루어질 수 있다. 실제 우리나라 고용노동부 노출기준과 동일한 기준을 적용하였던 미국정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 총분진 형태로 측정된 용접흙 노출기준(5 mg/m³)을 철회하였고(ACGIH, 2011), 독일 노동사회부(Federal Ministry of Labor and Social Affairs, BMAS) 등 대부분 유럽 소속 기관들에서는 용접흙 노출기준을 흡입성(10 mg/m³)과 호흡성(3 mg/m³)으로 구분하여 적용하고 있다(GESTIS, 2012). 따라서 간접노출 근로자의 용접흙 노출평가에서 중량분석뿐만 아니라 입자크기 및 화학성분 평가를 동시에 수행하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 천장크레인 운전실에서 측정된 용접흙의 크기, 형태 및 화학성분을 조사하였고 용접흙에 간접적으로 노출되는 천장크레인 운전원의 노출수준을 평가함으로써, 천장크레인 운전원의 용접흙 노출위험을 인지할 수 있었다. 천장크레인 운전원 작업환경은 각 공장별로 차이가 있을 수 있어 본 연구 결과가 우리나라 천장크레인 운전원의 노출수준을 대변하기에는 한계가 있다. 이에 따라 향후에는 천장 높이, 작업방법 등 다양한 환경요인들을 고려한 후 최대한 많은 시료수를 확보하여 천장크레인 운전원의 용접흙 노출평가를 수행할 필요가 있을 것이다.

V. 결 론

천장크레인 운전실 내부에 부유하는 분진은 미세 입자로 이루어진 금속물질이었고, 발생 즉시 응집되어 포도송이 형태를 나타냈다. 이러한 특성은 일반적으로 알려진 용접흙의 특성과 동일함에 따라 천장크레인 운전실에서 채취된 분진은 용접흙으로 확인되었다.

공장 하부에서 용접작업으로 발생하는 용접흙은 대류현상으로 인해 상승 기류에 섞여 천장까지 올라가 분진 층을 형성함에 따라 천장크레인 운전실에서 2교대로 상주하는 천장크레인 운전원은 천장에 정체되어 있는 용접흙에 지속적으로 노출되었다.

본 연구대상 사업장에서 실시한 과거 작업환경측정결과에서 천장크레인 운전원의 용접흙 및 호흡성 분진 노출수준은 0.852 mg/m³, 0.577 mg/m³이었고, 최대 농도는 각각 2.068 mg/m³, 2.487 mg/m³으로 본 연구에서 측정한 용접원의 용접흙 노출수준과 유사하게 나타났다. 반면 본 연구결과에서 천장크레인 운전원의 용접흙과 호흡성분진 개인노출수준은 각각 0.159 mg/m³, 0.138 mg/m³으로 고용노동부 노출기준(5 mg/m³)에 비해 약 3% 수준으로 낮게 나타났다.

본 연구에서 천장크레인 운전원의 용접흙 노출 실태를 평가함으로써 이들의 용접흙 노출여부를 판단할 수 있었고, 용접흙 노출수준도 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 향후 수행될 천장크레인 운전원의 용접흙 노출평가에서 활용 가능한 기초자료를 제시할 수 있었다.

References

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). ACGIH monograph TLVs and BEIs, threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: 2011.
- Antonini JM. Health effects of welding. Crit Rev Toxicol 2003;33(1):61-103
- Antonini JM, Taylor MD, Zimmer AT, Roberts JR. Pulmonary responses to welding fumes: role of metal constituents. J Toxicol Environ Health 2004;67(3): 233-249
- Berlinger B, Benker N, Weinbruch S, L'Vov B, Ebert M et

- al. Physicochemical characterisation of different welding aerosols. *Anal Bioanal Chem* 2011;399: 1773-1780
- Buerke U, Schneider J, Rosler J and Weitowitz HJ. Interstitial pulmonary fibrosis after severe exposure to welding fumes. *Am J Ind Med* 2002;41(4):259-268
- Burgess WA. Recognition of health hazards in industry, 2nd edition, New York: John Wiley & Sons Inc.; 1995. p. 168-169
- Castner HR and Null CL. Chromium, nickel and manganese in shipyard welding fumes. *Welding Research Supplement* 1998:223s-231s
- Cena LG, Keane MJ, Chisholm WP, Stone S, Harper M. A novel method for assessing respiratory deposition of welding fume nanoparticles. *J Occup Environ Hyg* 2014;11(12):771-780
- Choi CK, Kim TH, Ha HC, Won JI. Performance assessment of fume extraction welding gun. *J Korea Soc Occup Environ Hyg* 1999;9(2):90-99
- Gefahrstoffdatenbanken(GESTIS) (Databases on hazardous substances). International limit values for chemical agents: occupational exposure limits(OELs) 2012. Available from: http://www.dguv.de/ifa/en/gestis/limit_values/index.jsp
- Hansen KS, Lauritsen JM, Skytthe A. Cancer incidence among mild steel and stainless steel welders and other metal workers. *Am J Ind Med* 1996;30(4):373-382
- International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, volume 49; 1990a. p. 462-463
- International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, volume 49; 1990b. p. 507
- Jenkins NT, Eagar TW. Chemical analysis of welding fume particles. *The Welding Journal* 2005; 87s-93s
- Kang YS, Shin JK, Lee SK, Yoon CS, Lim MH et al. An evaluation on airborne particulate and its components in the welding workplace for the ship construction industry. *J Korea Soc Occup Environ Hyg* 2007; 17(3):245-253
- Koh DH, Kim JI, Kim KH, Yoo SW. Welding fume exposure and chronic obstructive pulmonary disease in welders. *Occup Med* 2015;65(1):72-77
- Kwang YS and Paik NW. A study on airborne concentration of welding fumes and metals in confined spaces of a shipyard. *J Korea Soc Occup Environ Hyg* 1997;7(1): 113-132
- Lauritsen JM, Hansen KS. Lung cancer mortality in stainless steel and mild steel welders: a nested case-referent study. *Am J Ind Med* 1996;30(4):383-391
- Lee KS, Paik NW. Airborne concentrations of welding fume and metal components by type of welding. *J Korea Soc Occup Environ Hyg* 1994;4(1):71-80
- Korea Offshore and Shipbuilding Association(KOSHIBA). Shipbuilding yearbook. 2014.
- Lehnert M, Pesch B, Lotz A, Pelzer J, Kendzia B et al. Exposure to inhalable, respirable, and ultrafine particles in welding fume. *Ann Occup Hyg* 2012; 56(5):557-567
- Moon JH, Cho DH, Kang SY, Choi CH, Im YC et al. Improvement of indoor air environment in a large welding factory by displacement ventilation. *Proceeding of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea(SAREK)*; 2005. p. 69-74
- Moulin JJ. A meta-analysis of epidemiologic studies of lung cancer in welders. *Scand J Work Environ Health* 1997;23(2):104-113
- Munoz X, Cruz MJ, Freixa A, Guardino X, Morell F. Occupational asthma caused by metal arc welding of iron. *respiration* 2009;78(4):455-459
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH manual of analytical methods 0500. 4th ed. Cincinnati: NIOSH.; 1994.
- Paik EG. The study on improvement of industrial ventilation efficiency: forced on welding process of shipbuilding. *Occupational Safety and Health Research Institute* 2004. p. 43-61. Available from: <http://oshri.kosha.or.kr/bridge?menuId=901>
- Persoons R, Arnoux D, Monssu T, Culie O, Roche G et al. Determinants of occupational exposure to metals by gas metal arc welding and risk management measures: a biomonitoring study. *Toxicology Letters* 2014; 231(2):135-141
- Peters JM, Murphy RLH, Ferris BG, Burgess WA, Ranadive MV et al. Pulmonary Function in Shipyard Welders. *Arch Environ Health* 1973;26(1):28-31
- Piao CX, Kim TH, Seo JY, He RB, Lim JH et al. A study on indirect prediction of welding fume concentration using computational fluid dynamics. *J Korea Soc Occup Environ Hyg* 2009;19(4):328-335
- Plog BA, Quinlan PJ. Fundamentals of industrial hygiene, 5th edition: National Safety Council; 2002. p. 171-173
- Schoonover T, Conroy L, Lacey S, Plavka J. Personal exposure to metal fume, NO₂, and O₃ among production welders and non-welders. *Ind Heal* 2011;49(1):63-72
- Shin YC, Yi GY, Lee NR, Oh SM, Kang SK et al. Welder's exposure to airborne hexavalent chromium and nickel during arc welding in a shipyard. *J Korea Soc Occup*

Environ Hyg 1998;8(2):209-223

Simonato L, Fletcher AC, Andersen A, Anderson K, Becker N et al. A historical prospective study of european stainless steel, mild steel, and shipyard welders. Br J

Ind Med 1991;48:145-154

Steenland K. Ten-year update on mortality among mild-steel welders. Scand J Work Environ Health 2002;28(3):163-167