한국산업보건학회지, 제28권 제2호(2018) ISSN 2384-132X(Print) ISSN 2289-0564(Online)
Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2018: 28(2): 200-210
https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2018.28.2.200

Original Article

# 조선소 용접작업 중 오존 및 TVOCs의 노출평가와 사용 호흡보호구의 적합성

한돈희[1*] · 김동환[2]

[1]인제대학교 보건안전공학과, [2]DH환경

# Exposure to Ozone and TVOCs during Shipyard Welding and the Adequacy of RPE

Don-Hee Han[1*] · Dong Hwan Kim[2]

*[1]Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University, Gimhae-si, Korea*
*[2]DH Environment, Gimhae-si, Korea*

**ABSTRACT**

**Objectives:** The purpose of this study is to assess the exposure to ozone and total volatile organic compounds(TVOCs) generated during welding work at a shipyard and recommend respiratory protective equipment(RPE) adequate against these hazards.

**Method**: Ozone was collected for about 30 minutes at two-minutes intervals using a direct reading instrument, specifically an ozone analyzer(Serinus 10, Ecotech, Australia). TVOCs were collected for about 30 minutes at three-minute intervals using a portable GC (Alpha 115, Synspec BV, the Netherlands), and were determined simultaneously by area sampling at the welding plume closest to the welder's breathing zone. The total measurements were 162 for ozone($CO_2$ welding 47, TIG 60, stick 55), and 136 for TVOCs($CO_2$ 65, TIG 50, stick 21). Based on these measurements, a literature survey was conducted to assess the adequacy of RPE.

**Results:** Relative to Korean OEL, measurements above STEL 0.2 ppm were 23.4% for $CO_2$, 63.3% for TIG and 14.5% for stick welding. There were significant differences($p=<0.0001$) among welding types. Compared with ACGIH peak exposure of 0.4 ppm for ozone, which is not applied in Korea, $CO_2$ welding exceeded it by 10.6%, TIG by 40.0% and stick by 7.3%. Although it was not feasible to compare them directly since there are no Korean OEL, TVOCs had very high levels similar to the concentrations before moving into a new apartment and about 10-20 times the indoor air quality recommendations for some individual measurements.

**Conclusions:** As ozone removal RPE has been recommended in welding environments for a long time(Lunau, 1967), this fact was demonstrated based on the results of the on-site work environment measurements(ozone and TVOCs). In conclusion, for all welding at a shipyard, gas/vapor and particulate combination RPE are recommended. If this is not possible, it should at least be present for TIG welding.

**Key words:** ozone, RPE, shipyard, TVOCs, welding

## I. 서 론

호흡보호구(Respiratory Protective Equipment, RPE)는 잘못 사용하면 작업자의 생명을 앗아가거나 심각한 건강장해를 초래하기 때문에 산업위생선진국에서는 호흡보호구의 선정과 사용법을 매우 중요하게 다루고 있다(NIOSH, 1987; HSE, 2013; OSHA, 2016). 이에 비해 우리나라에서는 호흡보호구에 대한 중요도가 낮게 평가되어 호흡보호구에 대한 연구 및 제도적 장치가 부족할 뿐만 아니라 작업장에서 호흡보호구를 관리하는 보건관리자나 안전관리자가 호흡보호구에 대한 정확한 지식도 부족한 상태이다(KOSHA, 2014). 예를 들어, 호흡보호구를 선정할 때 작업장 오염물질의 물리적 성상을 우선적으로 구별하고 입자상 물질이면 방진마스크, 가스상 물질이면 방독마스크 그리고 가스와 입자상 물질이 동시에 발생하면 방진방독

*Corresponding author: Don-Hee Han, Tel: 055-320-3285, E-mail: dhan@inje.ac.kr
Department of Occupational Health and Safety Engineering, Inje University, 197 Inje-ro, Gimhae-si, Gyeongnam-do, Korea
Received: May 11, 2018, Revised: June 2, 2018, Accepted: June 18, 2018

Don-Hee Han https://orcid.org/0000-0002-8984-2655

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.

겸용마스크(이하 겸용마스크라고 칭함)를 착용해야 한다. 그런데 2007년 산업안전보건연구원 보고서에 의하면 호흡보호구 담당자의 33.8%(69명 중 23명, 1명 무응답)는 자신의 작업장에서 발생하는 오염물질이 입자상인지 가스상인지 모르고 있었다(KOSHA, 2007). 이 같은 연구결과는 호흡보호구 선정 단계에서부터 '적합성(adequacy)'에 상당한 문제점을 안고 있음을 보여주는 좋은 예라고 할 수 있다(HSE, 2013).

한편, 조선건조작업에서는 용접작업이 대부분을 차지하고 있으며 대략 다음과 같은 용접작업이 주를 이룬다.

전기저항을 이용하여 두 금속을 접합하는 모든 용접방법을 '아크(arc)용접'이라고 말하며 통상적으로 우리나라에서 아크용접이란 용접봉(stick)을 이용하는 SMAW(Shielded Metal Arc Welding, Stick Welding)를 말한다. 조선소에서는 일부 조그마한 구조물을 접합해야 하는 경우 사용된다(Blunt & Balchin, 2002). 본 논문에서는 구분을 쉽게 하기 위하여 'Stick용접'이라고 한다. $CO_2$용접이란 GMAW(Gas Metal Arc Welding)의 일종으로 스풀(spool)에 감겨진 와이어가 송급모터에 의해 용접토치로 자동적으로 공급되어 연속적으로 용접되는 방법을 말한다(수동 작업도 있음)(Blunt & Balchin, 2002). 조선소와 같이 대형 구조물을 용접해야 하는 경우에는 작업의 효율성을 위해 대부분의 작업에서 이 용접방법을 사용한다. TIG용접(Tungsten Inert Gas Welding, TIG)이란 아르곤 또는 헬륨 등의 불활성 가스 속에서 텅스텐 전극과 모재 사이에 아크를 발생시켜 용접하는 방법이며 주로 스테인레스 스틸이나 알루미늄 용접에 사용된다. 조선소에서는 특별한 부분을 용접해야 하는 경우 사용된다.

이미 알려져 있는 바와 같이 아크용접작업에서는 흄뿐만 아니라 오존, NO, CO 등 가스상 물질도 발생한다(Lunau, 1967; Saito et al., 2000; Spear, 2004; DGUV, 2009; Golbabaei et al., 2012). 오존은 강력한 자외선(UV)에 의해 산소분자의 분해와 결합과정, NO는 공기 중 질소와 산소의 결합과정, CO는 $CO_2$ 용접 시 $CO_2$의 일부가 변하여 발생하는 것이다. 이들 가스물질 외에도 일부 휘발성 유기화합물은 철판의 부식을 막기 위하여 도포한 프라이머(primer) 페인트에서 나온다. 그래서 최근에는 프라이머 페인트에서 발생하는 인체에 유해한 휘발성 유기화합물의 발생을 줄이기 위하여 무기계열의 프라이머 페인트가 개발되어 사용되고 있다. 무기계열 프라이머 페인트라고 해도 적은 양이지만 휘발성 유기화합물이 발생한다(HSL, 2007). 그러나 이 연구보고서는 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheets, MSDS)를 만들기 위해서 실험실에서 수행한 자료이며 용접작업 현장에서 수행한 자료는 아니다. 따라서 아직까지 조선소 용접작업 현장에서 휘발성 유기화합물을 측정한 자료는 찾지 못했기 때문에 노출평가를 파악하기는 어려웠다.

지금까지 대부분의 조선소 용접작업에서는 겸용마스크가 아닌 흄 제거를 위한 방진마스크만을 사용하고 있다. 그 주된 이유는 오존을 비롯한 가스상 물질까지 제거할 수 있는 흡착제가 드물고 겸용 마스크의 경우 크기가 커서 용접면을 동시를 착용하기가 쉽지 않기 때문이다. 그러나 용접작업에서 오존을 비롯한 총 휘발성 유기화합물(Total Volatile Organic Compounds, TVOCs)의 노출이 심하다고 평가된다면 필연적으로 겸용 마스크를 착용해야 한다.

본 연구의 목적은 조선소 용접작업 시 발생하는 오존과 총 휘발성 유기화합물질의 노출정도를 평가하고 그 유해도(hazards)에 적합한 호흡보호구를 추천하기 위함이다.

## Ⅱ. 연구방법

### 1. 작업환경측정

#### (1) 측정장비

1) 오존

오존 측정은 실시간 감시 장비인 외부펌프 타입의 오존분석기(Model Serinus 10, Ecotech, Australia)를 사용하였다. 이 측정장비의 측정범위는 0~20 ppm이며 검출한계(Limit of Detection, LOD)는 <0.5 ppb이다. 정밀도는 0.5 ppb 혹은 판독 값의 0.2% 정도이다. 측정 전 Ultraviolet Photometer Method를 이용하여 오존농도에 대한 5회에 걸쳐 검교정을 실시하였다.

2) 총 휘발성 유기화합물(TVOC)

TVOCs 즉, 비메탄계탄화수소(Total Non Methane Hydrocarbon, TNMHC)는 휴대용 소형 GC(Model Alpha 115, Synspec B.V., Netherlands)를 사용하였다. 이 측정장비는 환경 및 산업 분야에서 대기 중의 탄화수소를 Online으로 측정하기 위해 현장 작업용으로 설계 되었으며, 대기 중 $CH_4$ 및 TNMHC의 합계를 측정할 수 있

다. 기본 분석 시간은 3분(180초)이고, packed column과 FID detector를 통해 0.1~10 ppm의 $CH_4$와 0.05~20 ppm의 TNMHC을 불꽃이온검출기(Flame Ionization Detector, FID)를 이용하여 측정하였다.

현장에 장비를 투입하기 전 바탕시험(blank test)과 재현성 평가를 통하여 성능평가를 수행하였다. 바탕시험은 고순도 공기(Zero Air, 99.999%)를 사용하여 Methane과 TNMHC의 농도 값을 평가하였다. 바탕시험 결과 $CH_4$ 및 TNMHC의 농도가 검출한계 이하로 검출 되었으며 3회에 걸쳐 산출된 농도 값은 $CH_4$ 5.17, 1.60, 1.97 ppb이었으며 TNMHC는 0.87, 0.16, 1.95 ppb이었다. 재현성 평가는 $CH_4$를 이용하여 7회에 걸쳐 측정한 결과 표준편차 0.0121, RSD(%) 0.154의 높은 재현성을 나타냈다.

(2) **시료채취방법**

1) 대상작업장 및 작업환경

대상사업장은 울산의 모 대형 조선소로서 신조선을 건설하고 있었고 상시 종업원 수는 5000명이상이었다. 시료채취기간은 회사의 작업환경측정기간을 이용하여 2018년 2월 28일부터 3월 20일까지 진행하였다.

대부분의 용접은 $CO_2$용접이었으며 호이스트가 움직이는 대형작업장에서 이루어지고 있었고 대형 구조물의 특성상 국소배기장치 가동은 불가능하였다. 환기장치로는 지붕에 있는 자연 Roof Ventilator가 있었으며 환기는 창문이 닫힌 상태에서 일부 출입문만 개방한 자연환기방식을 채택하고 있었다. $CO_2$용접과 비교하여 아크용접과 TIG용접은 물량이 매우 적었으며 옥외작업인 P1을 제외하고 모든 작업은 대형 작업장에서 이루어지고 있었다.

2) 시료채취방식과 샘플 수

Figure 1과 같이 시료채취 탐침(probe)은 용접면에서 약 20~30 cm, 용접지점 연기기둥이 발생하는 지점으로부터 약 20~30 cm 떨어져 위치시켰다. 직독식 측정장비가 크고 무거워 정확하게 호흡영역에 맞추기는 어려웠으나 가능한 한 작업자와 가까운 호흡영역 공기를 채취하였다. 직독식 장비를 이용함으로 지역시료 채취방식을 채택하였으며 측정기기로부터 약 4 m의 테프론관에 탐침을 연결하고 이 탐침을 용접작업자와 용접 연기기둥(plume) 중앙부분에 위치시켰다. Figure 2는 시료를 채취하는 사진이며 아크용접과 $CO_2$용접과 달리 TIG용접은 연기기둥이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

한 작업공정에서 오존과 TNMHC(이하 TVOCs라고 칭함)를 동시에 측정하였다. 오존은 2분 간격, TVOC는 3분 간격으로 30~35분간 측정하였다. 한 공정에서 하루 오전 오후 각 1회씩 2회에 걸쳐 측정하였으며 총 16개 공정(P1~P16)에서 시료를 측정하였다.

3) 공시험과 측정장비의 세척

시료 채취하기 전 매일 대상 조선소와 동떨어진 주택가 대기 중(경남 김해시 소재 모 작업환경측정기관 사무실 앞마당)에서 공시험은 실시하였다. TVOCs 측정장비인 Alpha 115의 경우 흡에 의한 오염을 고려하여 하루 측정작업이 끝나면 carrier가스를 4시간 정도 흘러 보내 컬럼을 세척하였다.

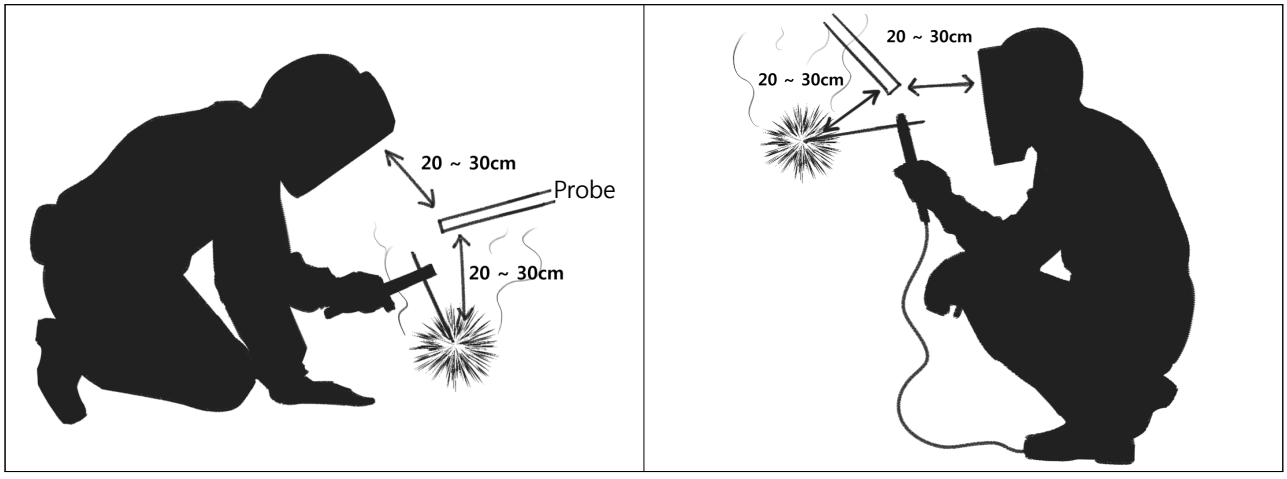
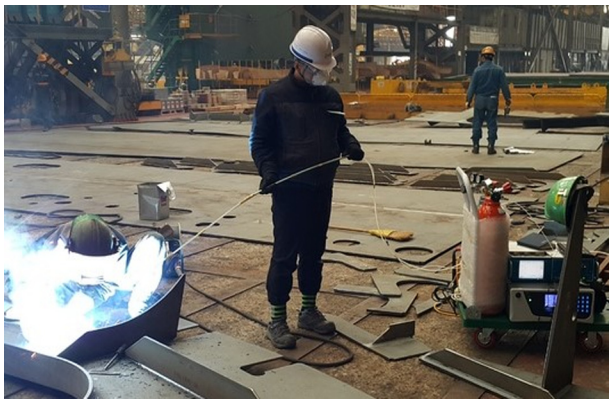



**Figure 1.** Sampling positions of probe during welding



$CO_2$ Welding

TIG Welding

**Figure 2.** Photograph of sampling on the spot

(3) **통계처리**

각 샘플 데이터는 기하평균(Geometric Mean, GM), 기하표준편차(Geometric Standard Deviation, GSD), 최소값(Minimum, Min), 최대값(Maximum, Max)으로 산출 및 표현하였다. 3개 용접 타입별 오존과 TVOC의 차이를 알아보기 위하여 유의성 검정을 실시하였으며 유의성 검정은 원 데이터를 자연대수(Natural Log, LN)로 변환한 후 ANOVA 테스트를 실시하였다. 또 ANOVA 테스트 결과 유의미한 것으로 판정되어 Tukey's Studentized Range HSD(Honest Significant Difference) 테스트를 이용하여 다중비교(Multiple Comparison)를 추가적으로 실시하였다. 통계프로그램은 SAS(Ver. 5.2)를 사용하였다.

## 2. 호흡보호구 적합성

(1) **조선소 호흡보호구 실태조사**

본 연구의 대상사업장을 포함하여 5개 영호남 소재 대기업 조선소의 보건관리자(호흡보호구 담당자)를 대상으로 용접작업에서 사용하는 호흡보호구 종류에 대한 전화 설문조사를 실시하였다. 또 이들 조선소에 호흡보호구를 납품하는 호흡보호구 제조 판매자들을 대상으로 사용 호흡보호구의 종류에 대한 전화설문을 실시하였다.

(2) **호흡보호구 적합성 문헌조사**

용접작업자에게 적합한 호흡보호구의 종류는 외국의 연구자료 및 법령으로 확인하였다(Lunau, 1967; NIOSH, 1987; HSE, 2013; OSHA, 2016).

# Ⅲ. 결과 및 고찰

## 1. 오존 측정결과

총 16개 공정에서 오존을 측정하였으나 샘플 중 하나라도 측정치의 오류가 의심되는 공정의 측정치는 모두 삭제하였으므로 13개 공정의 자료(공정 P6,15,16 제외)만 분석하였다. 2월 28일 오전 7시경 측정기관 소재 주택가 대기 중 공시험 결과 오존의 양은 거의 무시해도 되는 수준인 GM 0.003 ppm이었다.

Table 1은 측정치를 GM, GSD, Min 및 Max로 정리한 것이고 Figure 1은 측정치를 LN으로 변환한 모든 값을 Mean(산술평균), Median(중앙값), SD(산술표준편차)로 나타낸 것이다.

$CO_2$용접의 경우 전체 공정 47개 측정치의 GM은 0.13 ppm, GSD는 3.25로 나타났으며 특히, P3의 경우 GM 0.47 ppm, Max 1.13 ppm으로 매우 높게 나타났다. 전체적으로 측정치의 범위가 매우 광범위하며 측정치를 LN으로 변환한 Figure 3처럼 평균과 중간값이 거의 일치하여 큰 값과 작은 값 중 한 쪽에 크게 치우지지 않지만 전체 분포는 비교적 작은 쪽으로 기울어져 있음을 알 수 있다. 이 값은 용접작업자에 대한 노출평가를 실시한 Choi(2014)의 0.011 ppm보다는 매우 높았는데 이는 Choi(2014)의 연구는 작업자의 호흡영역에서 여과지로 샘플링하여 약 6시간 평균값을 분석한 것인데 반해 본 연구는 직독식으로 용접 연기기둥의 오존을 측정한 것이기 때문에 약 10배의 차이가 난 것으로 판단된다. 측정방법이 직독식이며 측정 위치가 비슷한 Saito et al.(2000)의 연구에서는 $CO_2$용접

**Table 1.** Concentrations of ozone

(Unit: ppm)

| Welding Type | | N | GM | GSD | Min | Max | p-value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Blank* | | 22 | 0.003 | 1.793 | 0.001 | 0.008 | |
| $CO_2$ | P1* | 10 | 0.06 | 2.27 | 0.03 | 0.23 | |
| | P2 | 11 | 0.13 | 2.37 | 0.05 | 0.40 | |
| | P3 | 11 | 0.46 | 2.36 | 0.18 | 1.13 | |
| | P4 | 15 | 0.11 | 3.01 | 0.03 | 0.70 | |
| | All | 47 | 0.13 | 3.25 | 0.03 | 1.13 | |
| TIG | P5 | 11 | 0.37 | 1.82 | 0.10 | 0.93 | |
| | P7 | 11 | 0.44 | 1.76 | 0.12 | 0.88 | |
| | P8 | 11 | 0.30 | 2.11 | 0.10 | 0.66 | p=<0.0001 |
| | P9 | 14 | 0.18 | 3.70 | 0.04 | 0.80 | |
| | P10 | 13 | 0.13 | 3.10 | 0.02 | 0.72 | |
| | All | 60 | 0.24 | 2.85 | 0.02 | 0.93 | |
| Stick | P11 | 11 | 0.05 | 2.27 | 0.02 | 0.47 | |
| | P12 | 16 | 0.03 | 3.28 | 0.01 | 0.32 | |
| | P13 | 16 | 0.05 | 1.48 | 0.03 | 0.10 | |
| | P14 | 12 | 0.12 | 3.84 | 0.01 | 0.71 | |
| | All | 55 | 0.07 | 2.52 | 0.01 | 0.71 | |

*Before measuring, the blank tests were performed in the ambient far from the subject shipyard in the morning. P means process sampled in the study.

과 유사한 'Flux-cored wire 용접'의 경우 0.44±0.18 ppm으로 본 연구의 전체 공정에 비해 약 4배 정도 높게 나타났지만 P3공정과는 매우 유사하였다. 이 같은 차이는 Saito et al.(2000)의 용접방법이 $CO_2$용접과 약간 다르고 작업장이 아닌 통제된 실험실에서 측정하였기 때문이라고 생각된다.

한편, 오존의 노출기준은 시간가중평균치(Time Weighted Average, TWA)로 0.08 ppm이지만 단기간노출기준치(Short Term Exposure Limit, STEL)로는 0.2 ppm이다(KMEL, 2018). 모든 측정치를 STEL 값과 비교하였을 때 47개 측정치 중 23.4%인 11개에서 노출기준을 초과하였다(Figure 3). 더구나 P3의 1.13 ppm과 같이 GM 0.13 ppm의 약 8.7배, STEL 0.2 ppm의 5.7배에 이르는 값이 순간적으로 발생하기 때문에 오존이 비교적 적게 발생하는 $CO_2$용접이라고 하더라도 오존을 막을 수 있는 환기시설이나 오존 제거용 호흡보호구의 착용이 필요하다고 할 수 있다.

TIG용접의 측정치는 모두 60개였고 전체 공정의 GM 0.24 ppm, GSD 2.85로 나타났다. Figure 3을 보면 LN으로 변환한 오존의 중앙값이 산술평균보다 높게 나타났고 전체 분포도를 보더라고 큰 쪽 값으로 많이 기울어져 있음을 알 수 있다. Figure 2와 같이 TIG용접은 스테인레스 스틸이나 알루미늄 등을 용접하는 것으로 공정상 연기기둥이 잘 발생하지 않아 흄 발생은 적은 반면 자외선 발생이 많아 이로 인한 오존의 농도가 높다고 하였다(Lunau, 1967; Spear, 2004). 오존의 발생농도가 가장 높은 것은 AlSi를 사용하는 MIG(Metal Inert Gas)용접인데 이는 전류량이 커서 강력한 자외선을 만들고 이 자외선이 산소를 분해하면서 다량의 오존이 생성되기 때문이다. 비록 TIG용접은 MIG용접보다 전류량은 작지만 스테인레스 스틸을 용접하기 때문에 많은 양의 오존이 발생한다고 하였으며(DGUV, 2009) TIG용접이라고 하더라도 알루미늄을 용접하는 경우에는 오존의 발생량이 적다고 하였다(AGA, 2018). 예상했던 대로 TIG용접에서 오존 발생량은 모든 공정에서 비교적 높게 나타났고 공정 P7의 경우 0.44 ppm으로 Lunau(1967)의 0.47 ppm과 매우 유사한 값이 나타났으나 전류의 양이 다를 수 있고 측정 높이가 달라서 직접 비교는 무리라고 할 수 있다.

노출기준 STEL의 0.2 ppm과 비교했을 때 모든 공정의 63.3%(60개 중 38개)가 기준치를 초과하였고(Figure 3) Max는 P5의 0.93 ppm이었다. 이 같은 측정결과 TIG용접의 경우 반드시 오존을 제거할 수 있는 환기시설 혹은 오존 제거용 호흡보호구의 착용이 필요하다고 할 수 있다.

Stick용접은 55개 전체 측정치의 GM은 0.07 ppm, GSD 2.52이었으며 가장 높은 공정 P14의 경우 GM 0.12 ppm, Max 0.71이었다. 이는 앞의 두 용접방법에 비해 비교적 낮은 값이며 Figure 3과 같이 표준편차를 벗어난 높은 8개 측정치(2개 중복)를 제외하고는 중앙값이 산술평균보다 낮아서 전체적으로 낮은 측정치로 기울어져 있는 분포를 보이고 있다. 이는 TIG용접과는 정반대의 분포를 보이고 있다. 측정방법에 차이가 있어서 정확한 비교는 어렵지만 Choi(2014)의 0.015 ppm, Golbabaei et al.(2011)의 0~0.0371 ppm보다 많은 양이다. 앞선 두 연구는 직독식이 아닌 평균치를 측정한 것이고 특히, 후자는 작업장이 대기에 완전히 개방된 파이프라인 작업이라서 낮게 나온 것으로 판단된다.

노출기준과 비교하였을 때 STEL 0.2 ppm을 벗어난 측정치는 전체 측정치 55개 중 8개로 14.5%이었다. 따라서 비록 Stick용접이 다른 두 용접에 비해 오존의 량이 적게 발생하였으나 갑자기 발생하는 높은 오존 발생량을 감안하면 역시 오존을 제거할 수 있는 호흡

**Table 2.** Multiple comparisons of LN_tranformed ozone concentration between welding types

| Multiple Comparisons(Welding Type) | Difference Between Means | Simultaneous 95% Confidence Limits | |
|---|---|---|---|
| $CO_2$-TIG | -0.6190* | -1.1597 | -0.0782 |
| $CO_2$-Stick | 0.6375* | 0.0902 | 1.1848 |
| TIG-$CO_2$ | 0.6190* | 0.0782 | 1.1597 |
| TIG-Stick | 1.2565* | 0.8022 | 1.7108 |
| Stick-$CO_2$ | -0.6375* | -1.1848 | -0.0902 |
| Stick-TIG | -1.2565* | -1.7108 | -0.8022 |

*Comparisons significant at the 0.05 level

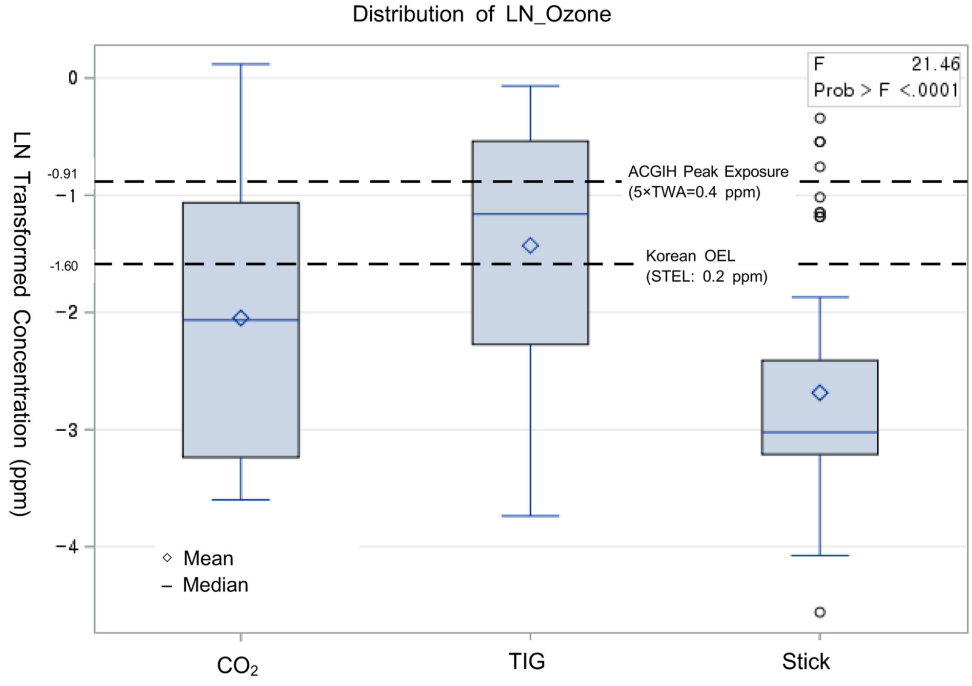



**Figure 3.** Distribution of LN_transformed ozone concentrations

The numbers of determinants that exceeded Korean OEL(STEL 0.2 ppm) were 11 out of 47(23.4%) in $CO_2$, 38 out of 60 (63.3%) in TIG and 8 out of 55(14.5%) in stick welding.

보호구의 착용을 추천한다.

한편, 세 가지 용접방법에 따른 오존 발생량의 차이는 매우 유의하였으며(p=<0.0001), 이는 기존의 연구와 일치하였다(Choi, 2014). 또 Table 2에서 보는 바와 같이 세 가지 용접방법 간 다중비교를 실시한 결과 오존의 발생량은 TIG용접, $CO_2$용접, Stick용접 순으로 유의한 차이가 났다(p<0.05). 오존 발생량이 많은 용접작업일수록 오존을 제거할 수 있는 호흡보호구의 착용이 더 중요하다고 할 수 있다.

## 2. TVOC 측정결과

총 16개 공정에서 TVOC를 측정하였으나 한 공정(P12)에서 샘플의 오염이 의심스러워 그 공정의 값은 제외하고 15개 공정만 분석하였다. 2월 28일 오전 7시경 측정기관 소재 주택가 대기 중 공시험 결과 GM 0.674 ppb로 나타나 측정치와 비교했을 때 무시해도 되는 수준이었다.

TVOCs는 작업환경측정 대상이 아니라 환경부의 '실내공기질관리법'(KME, 2016)에서 다루고 있기 때문에 조선소 내 혹은 조선소 용접작업에서 비교대상이 될 TVOCs에 관한 기존 논문들이 극히 드물었다. 실내공기질 권고치를 작업장의 기준으로 적용하기는 어렵지만 작업장의 TVOCs에 대한 기준이 없으므로 작업자의 건강적인 측면을 고려하여 실내공기질 권고기준과 비교할 수밖에 없었다.

Table 3은 측정치를 통계 분석한 것이고 Figure 4는 LN으로 변환한 전체 측정치를 도시화한 것이다. TVOCs에 대한 실내공기질 권고치는 500 $\mu g/m^3$인데 본 연구에 사용된 측정장비가 ppb로 표시되었기 때문에 질량단위 권고치를 톨루엔의 부피단위 권고치로 변환하였더니 132 ppb이었다(Figure 4).

용접작업장과 대략 500 m이상 떨어진 안전보건교

**Table 3.** Concentrations of TVOCs

(Unit: ppb)

| Welding Type | | N | GM | GSD | Min | Max | p-value |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Blank* | | 5 | 0.674 | 2.093 | 0.34 | 2.08 | |
| Blank† | | 10 | 32 | 1.52 | 10 | 34 | |
| $CO_2$ | P1 | 10 | 407 | 1.33 | 249 | 605 | |
| | P2 | 8 | 451 | 1.57 | 257 | 761 | |
| | P3 | 11 | 74 | 2.93 | 9 | 376 | |
| | P4 | 11 | 113 | 2.63 | 44 | 820 | |
| | P5 | 8 | 74 | 1.74 | 39 | 225 | |
| | P6 | 11 | 66 | 1.40 | 31 | 112 | |
| | P7 | 6 | 78 | 2.01 | 32 | 225 | |
| | All | 65 | 120 | 2.72 | 9 | 820 | |
| TIG | P8 | 10 | 128 | 1.48 | 65 | 304 | p=0.0001 |
| | P9 | 11 | 127 | 1.36 | 65 | 189 | |
| | P10 | 11 | 116 | 2.24 | 46 | 189 | |
| | P11 | 10 | 227 | 1.74 | 74 | 512 | |
| | P13 | 8 | 3892 | 3.72 | 829 | 23676 | |
| | All | 50 | 227 | 3.95 | 46 | 23676 | |
| Stick | P14 | 3 | 2226 | 4.24 | 712 | 11295 | |
| | P15 | 8 | 337 | 1.75 | 118 | 613 | |
| | P16 | 10 | 297 | 3.52 | 10 | 1012 | |
| | All | 21 | 416 | 3.44 | 10 | 11295 | |

* Before measuring the blank tests were measured in the ambient air far from the subject shipyard around 7 a.m. on February 28, 2018.

† These measurements were taken in the ambient air of the safety and health education center, approximately 500 m from the welding workshop.

**Table 4.** Multiple comparisons of LN_transformed TVOCs between welding types

| Multiple comparisons(Welding type) | Difference between means | Simultaneous 95% confidence limits | |
|---|---|---|---|
| $CO_2$-TIG | -0.6380* | -1.1799 | -0.0961 |
| $CO_2$-Stick | -1.2417* | -1.9564 | -0.5271 |
| TIG-$CO_2$ | 0.6380* | 0.0961 | 1.1799 |
| TIG-Stick | -0.6037 | -1.3404 | 0.1330 |
| Stick-$CO_2$ | 1.2417* | 0.5271 | 1.9564 |
| Stick-TIG | 0.6037 | -0.1330 | 1.3404 |

*Comparisons significant at the 0.05 level

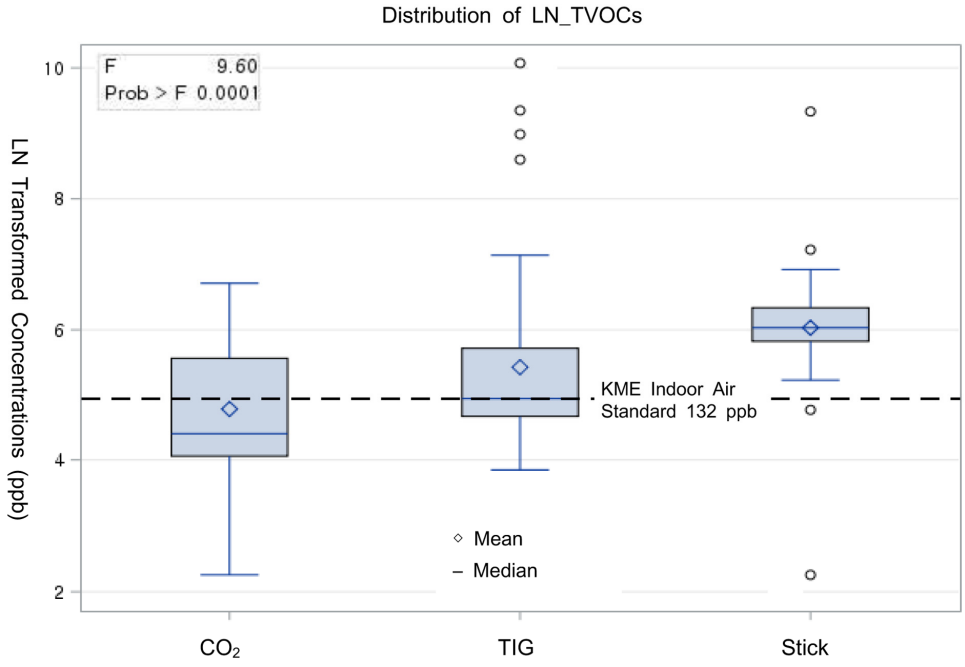



**Figure 4.** Distribution of LN_transformed TVOCs concentrations

Korea Ministry of Environment(KME) indoor air recommended standard, 132 ppb, was converted TVOCs 500 $\mu g/m^3$ to toluene (MW 92.1) ppb unit.

육장 대기 중 농도는 32 ppb이었다. 측정치 65개의 $CO_2$용접 GM은 120 ppb, Max 820 ppb, 측정치 50개의 TIG용접은 GM 227 ppb, Max 23,676 ppb(측정한계치 20 ppm 벗어남) 그리고 측정치 21개의 Stick용접은 GM 416 ppb, Max 11,295 ppb이었으며 TIG와 Stick용접의 경우 매우 광범위한 분포를 보였다(TIG용접 GSD 3.95, Stick용접 GSD 3.44).

세 가지 용접방법별 TVOCs의 발생량은 ANOVA 테스트 결과 통계적으로 매우 유의하였다(p=0.0001). 그러나 용접방법 간 다중비교를 한 결과 $CO_2$용접은 TIG나 Stick용접보다 TVOCs의 발생량이 유의하게 적은 것으로 밝혀졌으나(p<0.05), TIG와 Stick용접 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 4). 이는 Stick용접의 샘플 수가 적어서 그런 결과가 나왔을 것으로 생각된다.

용접방법에 따라 이 같은 차이가 왜 발생하는지는 명확하게 설명하기는 어렵다. 용접 시 발생하는 TVOCs의 발생원은 모재의 부식방지를 위해 철판에 도포한 프라이머 페인트나 오일(Oil)이다. 이들 물질들이 용접과정에서 분해될 수도 있으며 도포물질이 그대로 증발하기도 한다(AGA, 2018). TVOCs의 발생을 줄이기 위해서는 용접 전에 이들 물질을 제거해야 하지만 대부분 제거

하지 않는 것으로 알려져 있다. 최근에는 인체에 유해한 휘발성 유기화합물의 발생을 최소화하기 위하여 주로 무기아연의 프라이머를 사용하기 때문에 과거에 비해 휘발성 유기화합물의 발생은 적어졌다(Kim, 2008). 그럼에도 불구하고 본 연구결과 적지 않은 양의 TVOCs가 발생하였으며 특히, Max는 P6를 제외하면 모든 공정에서 실내공기질 권고치를 벗어났고 TIG와 Stick용접은 약 10~20배 높았다. $CO_2$공정의 P1, P2, TIG용접 P13, Stick용접 P14공정의 Min이 모두 환경권고치를 벗어나서 환기시설이나 적합한 호흡보호구의 착용 등의 조치를 취하지 않으면 작업자들이 항상 유해한 환경에 노출된다고 할 수 있다. 현실적으로 모재에 도포한 프라이머 페인트나 오일 성분을 모른다면 TVOCs의 발생 원인을 정확하게 규명하기란 매우 어렵다고 할 수 있다.

지역시료로 하루 3회 2시간씩 샘플링한 조선소 내에 TVOCs를 측정한 Lee et al.(2015)에 의하면 조선소 도장작업장 내 TVOCs 농도는 3,432 ppb이었으며 조선소 내 대기 중 농도는 시료채취 위치에 따라 농도의 차이가 심하였는데 약 5~200 ppb 수준이었다. 이 같은 차이는 Lee et al.의 연구는 도장작업 희석제인 신나(thinner)로 인해 다량의 TVOCs에 방출되었기 때문이다.

Kim et al.(2006)의 연구에 의하면 우리나라 신축 아파트 건물의 완공 초기 5일 동안 방출되는 TVOCs의 평균 방출량은 3,768 $\mu g/m^3$(톨루엔 환산 시 1,001 ppb)이었으며 특히, 초기 방출량이 12,856 $\mu g/m^3$(톨루엔 환산 시 3,416 ppb)로 매우 높은 수준이었다가 점차 감소하였다. 이 연구의 GM 값을 신축아파트 공기질 권고치와 비교하였을 때 공정 P13, P14는 이들보다 높게 나타나 TVOCs의 농도가 심각하다고 할 수 있다. Kim et al.(2008)의 연구에서는 입주 전 신축아파트의 TVOCs는 거의 대부분의 아파트에서 500 $\mu g/m^3$(톨루엔 환산 시 132 ppb)을 초과하였고 신축아파트가 아닌 일반 실내(어린이 집)의 TVOCs 농도는 약 200 $\mu g/m^3$(톨루엔으로 약 53 ppb)로 상대적으로 낮은 편이었다(Park et al., 2015). 본 연구결과 15개 공정 중 7개 공정(46.7%)에서 실내공기질 권고치를 벗어났다.

이상을 종합하면 일부 용접작업의 경우 신축아파트 입주 전 농도와 비슷하게 TVOCs(GM)가 높았고 개별 측정치에서는 실내공기질 권고치의 약 10~20배까지 검출되어 이 같은 공정에서 용접할 때에는 TVOCs를 제거할 수 있는 호흡보호구가 필요하였다.

## Ⅳ. 적합 호흡보호구 제언

### 1. 조선소 용접작업 착용 호흡보호구 실태조사

대상사업장을 포함한 5개 영호남 소재 대기업 조선소 용접작업에서 사용하는 호흡보호구의 종류를 설문조사한 결과 특급은 없고 모두 1급 혹은 2급 방진마스크였으며 겸용마스크를 사용하는 곳은 한 곳도 없었다. 일부 호흡보호구 제조 외국계기업 담당자에 따르면 오히려 극히 일부 소형 조선소에서 겸용마스크를 착용하는 것으로 밝혀졌다.

### 2. 조선소 용접작업에 적합한 호흡보호구

EN(European Standards, 2005)과 영국(HSE, 2013)에서는 호흡보호구를 선정할 때 적합성을 만족시켜야 한다고 규정하고 있다. 적합성은 두 가지가 있는데 하나는 'Adequacy'로 위해도를 법적 기준이하(우리나라의 노출기준 이하)로 만족시켜주기에 충분해야하며 또 하나는 'Suitability'로 작업환경, 작업강도 및 착용자의 신체 조건을 만족시키기에 적합해야 한다. 이중에서도 적합성에서 가장 기본적인 사항은 'Adequacy'로서 가스/증기 발생 작업장에서는 방독마스크, 입자물질 발생 작업장에서는 방진마스크, 그리고 이들 물질이 동시에 발생하는 작업장에서는 겸용마스크를 착용해야 한다. 방진마스크는 가스/증기를 제거하지 못하며 방독마스크는 입자물질을 제거하지 못하기 때문이다. 그런데 '안전보건공단' 연구에 의하면 겸용마스크를 착용해야 하는 작업장 중 실제 겸용마스크를 착용하는 비율은 겨우 17.1%에 불과하여 호흡보호구 선정 시 가장 기본적인 적합성마저 지켜지지 않는다고 지적하였다(KOSHA, 2007).

용접작업 중 발생하는 오염물질은 용접의 종류에 따라 상당히 다르지만 일반적으로 나오는 유해인자들은 흄, 자외선, 가스 물질(오존, 질소산화물, CO 등)이다(Saito et al., 2000; Spear, 2004; DGUV, 2009; Golbabaei et al., 2012). 가스물질의 발생 때문에 이미 Lunau(1967) 연구에서 오존을 제거할 수 있는 호흡보호구 착용을 권고하였다.

그럼에도 불구하고 용접작업에서 방진마스크만 사용하는 첫 번째 이유는 거의 모든 용접작업자들과 보건관리자들은 흄에 대한 건강장해만 염두에 두고 방진마스크만 사용하면 유해인자들로부터 보호받을 것으로 착각하기 때문이다. 두 번째 이유는 겸용마스크

를 착용할 때 겸용마스크의 크기 때문에 용접면 안으로 겸용마스크가 들어가지 않기 때문이다. 세 번째는 겸용마스크의 비용이 비싸서 사업주가 구매를 꺼리는 경우이다.

이번 작업환경측정결과를 토대로 조선소 용접작업 시 착용해야 하는 호흡보호구는 겸용마스크임이 명확하여졌다. 조선소에서 주로 사용하는 $CO_2$용접의 경우 오존이 전체적으로 비교적 적게 나오기는 하지만 STEL 값으로 노출기준을 초과하는 경우가 23.4%이었고 많이 사용은 하지 않지만 TIG용접의 경우 STEL을 초과하는 경우는 63.3%이었다. 우리나라에서 적용은 하지 않지만 미국 ACGIH에서는 극한값(Peak Exposure)은 어느 경우에도 TLV-TWA를 5배 이상 초과해서는 안 된다고 하였다(ACGIH, 2017). 오존의 노출기준 TWA가 0.08 ppm이므로 극한값으로 0.4 ppm을 적용하다고 가정하면 $CO_2$용접 10.6%, TIG용접 40.0%, Stick용접 7.3%가 극한값을 벗어났다. 비록 이 연구에서 ACGIH의 극한값을 직접 비교는 어렵더라도 예측은 가능하다. 다시 말해, 상당히 많은 공정에서 ACGIH 극한값을 넘어설 것으로 예측된다. 따라서 이러한 극한값을 고려하면 조선소 용접작업 시 모든 용접작업에서 겸용마스크를 착용하는 것이 바람직하지만 비용과 사용의 편의성을 등을 고려한다면 적어도 TIG용접만이라도 겸용마스크 착용을 권한다.

## Ⅴ. 연구의 제한점

이 연구는 오존과 TVOCs의 단시간 노출과 많은 시료를 얻기 위해 직독식을 이용한 지역시료로 채취하였다. 도장작업 시 방출되는 유기화합물 성분과는 달리 프라이머 페인트에서는 어떤 성분의 유기화합물이 배출되는지 잘 모르기 때문에 어쩔 수 없이 유기화합물의 전체 양만 알기위해 TVOCs를 측정한 것이다. 그러나 이러한 점들이 본 연구의 제한점이라고 할 수 있으므로 더 정확한 연구를 위해서는 오존과 휘발성 유기화합물을 그 종류별로 TWA 방식으로 측정한 다음 호흡보호구를 제언하는 것이 더 바람직할 것이다.

## Ⅵ. 결 론

실제 조선소 용접작업현장에서 오존과 TVOCs에 대한 노출평가를 통하여 현재 사용 중인 호흡보호구가 적합한지를 평가하기 본 연구를 수행하였다. 직독식 측정기기를 이용한 지역시료로 측정하였으며 작업환경측정결과 방독마스크 착용이 필요한 수준의 오존와 TVOCs가 검출되었다. 오래전부터 용접작업에서 오존제거용 마스크를 권고하였는데 이번 작업환경측정 연구결과 실제 작업현장에서 이 사실을 확인하였다. TVOCs는 작업환경측정 대상물질이 아니고 노출기준이 없으므로 실내공기질 권고기준에 비교하였는데 근로자의 건강적인 측면을 고려하였을 때 많은 공정에서 방독마스크가 필요한 것으로 예측되었다. 이상을 종합하였을 때 조선소 용접작업에서는 흄과 가스물질을 동시에 제거하기 위하여 겸용마스크가 필요하며 모든 공정에 겸용마스크가 착용이 어렵다면 적어도 오존이 많이 나오는 공정(예, TIG용접)만이라도 반드시 겸용마스크를 착용할 것을 추천한다.

## 감사의 글

본 연구는『GVS』의 재정지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다. 통계처리를 담당해 주신 인제대학교 통계학과 최국렬 교수께 깊은 감사를 드립니다.

## References

American Gas Association(AGA). Fume and gases, The Linde Group. [cited 2018 March 27]. Available from: URL: http://www.linde.com/en/index.html

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2017 Threshold Limit Values(TLV®) for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices(BEI®), ACGIH. p5, 2017

Blunt J, Balchin NC. Health and Safety in Welding and Allied Process, CRC Press. p106-110, 2002

Choi KE. Exposure Assessment of Arc Welders to Welding Fumes and Ozone, Department of Public Administration Graduate School, Korea National Open University. 2014

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung(DGUV). Exposure to Ozone during Welding and Allied Processes, Expert Committee Information Sheet No. 041. 2009

European Standards(EN 529:2005). Respiratory Protective Devices -Recommendations for Selection, Use, Care and Maintenance-Guidance Document, British Standards (BSi). 2005

Golbabaei F, Hassani H, Ghahri A, Arefian S, Khadem M, Hosseini M, Dinari B. Risk assessment of exposure to

gasses released by welding processes in Iranian National Gas Transmission Piplines Industry, Inter J Occup Hyg 2012;4:6-9

Health and Safety Executive(HSE). Respiratory Protective Equipment at Work -A Practical Guide-. 2013

Health & Safety Laboratory(HSL). Analysis of Weld-Through Primers -Arc Welding Tests-, HSL Report/ 2007/15. [cited 2018 March 28]. Available from: URL: www.hsl.gov.uk

Kim HM. A study of composition to improve weld ability of Inorganic Zinc Shop Primer, Department of Industrial Chemistry, Graduate school, Pukyong National University. 2008

Kim KW, Park JC. A field survey of HCHO, VOCs and TVOCs concentration levels in the newly unoccupied apartment units, J Kor Soc Indoor Environ 2008;5(2): 158-169

Kim SD, Kim JH, Park JS, Lee JJ. Characteristics of TVOCs emissions in new apartment buildings, J Kor Soc Indoor Environ 2006;3(2):97-109

Korea Ministry of Environment(KME). Indoor Air Quality Management Law. 2016

Korea Ministry of Employment and Labor(KMEL). Occupational Exposure Limit for Chemical and Physical Hazards, Revised 2018.3.20 (KMEL Notice No. 208-24). 2018

Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA): A Survey of Respirators Usage and Efficient Management System of Respirators for Expose to Chemicals, Occupational Safety & Health Research Institute. p60-37. 2007

Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA): Technical Guidelines for Selecting Respiratory Protection System for Chemical Handling Workers(KOSHA GUIDE H-150-2014), KOSHA. 2014

Lee ME, Park EO, Chung JW: Concentration Distribution of Volatile Organic Compounds in the Ambient Air of an Industrial Shipbuilding Complex- A Case Study-, J Korean Soc Environ Eng 2015;37(6):380-386

Lunau FW: Ozone in arc welding, Ann Occup Hyg 1967; 10:175-188

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Guide to Industrial Respiratory Protection (DHHS/NIOSH Pub. No. 87-116), Government Printing Office. p3-123, 1987

OSHA regulation. CFR(Code of Federal Regulations) - “Respiratory Protection” Title 29, Part 1910.134. 2016

Park MK, Kang JK, Park HJ, Shin JS, Jang KB, et al. Concentration distribution and health risk assessment of HCHO, TVOCs in day care center in the Chungnam area, J Odor Indoor Environ 2015;14(3):208-215

Saito H, Ojima J, Takaya M, Iwasaki T, Hisanaga N, et al. Laboratory measurement of hazardous fumes and gases at a point corresponding to breathing zone od welder during a $CO_2$ arc welding, Industrial Health 2000;38: 69-78

Spear JE. Welding Fume and Gas Exposure, J.E. Spear Consulting, LLC. 2004