



## 접착제 취급 작업장 내 공기정화 설비를 이용한 휘발성 유기화합물 저감 평가

우재민<sup>1</sup> , 김동준<sup>1</sup> , 신지훈<sup>1\*</sup> , 민기홍<sup>1</sup> , 이채관<sup>2</sup> , 양원호<sup>1</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 보건안전학과, <sup>2</sup>인제대학교 의과대학 환경·산업의학연구소

## Assessment of Volatile Organic Compound Reduction Using an Air Purification Facility in an Adhesive Handling Process

Jaemin Woo<sup>1</sup>, Dongjun Kim<sup>1</sup>, Jihun Shin<sup>1\*</sup>, Gihong Min<sup>1</sup>, Chaekwan Lee<sup>2</sup>, and Wonho Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, <sup>2</sup>Institute of Environmental and Occupational Medicine, Medical School, Inje University

### ABSTRACT

**Background:** Exposure to volatile organic compounds (VOCs) can have acute and chronic health effects on human beings in general and in working environments. In particular, VOCs are often emitted in large quantities in industrial settings. In such circumstances, there is a need to improve the indoor air quality at workplaces.

**Objectives:** The purposes of this study were to verify the effectiveness of air cleaning devices in workplaces and provide alternative solutions for improving working environments.

**Methods:** Personal exposure and area level of VOCs for workers were evaluated in a car-part adhesive process before and after installing an air cleaning device with a TiO<sub>2</sub>-coated filter. Passive samplers and direct reading instruments were used to collect and analyze the VOCs, and the removal efficiency and improvement of air quality were evaluated. We also calculated the exposure index (EI) to assess the risk level in the workplace.

**Results:** The removal efficiency for VOCs through the installation of the air cleaning device was approximately 26.9~69.0% as determined by the concentration levels before and after installation. The measured substances did not exceed the exposure limits for the work environment and the EI was less than 1. However, carcinogenic substances such as benzene, formaldehyde, carbon tetrachloride, and trichloroethylene were detected.

**Conclusions:** The application of an air cleaning device can be a solution for controlling the indoor air quality in a workplace, particularly in cases where ventilation systems cannot be installed due to process limitations.

**Key words:** Adhesive process, VOCs, TiO<sub>2</sub>, air purification system, risk assessment

Received April 17, 2023

Revised April 23, 2023

Accepted April 24, 2023

### Highlights:

- Workers in working environments involving an adhesive unit process may be exposed to VOCs and may experience health effects.
- In a case of the installation of an air cleaning device with a filter coated TiO<sub>2</sub> air purifier, the removal efficiency for VOCs was about 26.9~69.0%.
- Although the exposure index (EI) did not exceed the limit, hazardous agents that are not indicated in the MSDS but may cause cancer have been detected.

### \*Corresponding author:

Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan 38430, Republic of Korea

Tel: +82-53-850-3739

Fax: +82-53-850-3736

E-mail: shinjs1130@naver.com

## I. 서 론

휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 표준대기압(101.3 kPa)에서 끓는점이 250°C인 화합물로 대

기 중 가스상으로 존재한다.<sup>1)</sup> 또한, 대기 중 광화학반응으로 인해 오존과 2차 오염물질을 형성하는 과정에 중요한 역할을 한다.<sup>2)</sup> VOCs의 노출은 잠재적인 건강영향을 야기하며 급성 및 만성 호흡기 질환, 간과 신장 및 중추신경계 손상, 눈 및 인후



자극이 포함되며 피로, 두통, 현기증, 메스꺼움, 기면, 알레르기 피부 반응 및 결막 자극 우울증과 같은 신경 증상을 일으킬 수 있다.<sup>3-5)</sup> 또한, 인체에 장기간 노출 시 암을 유발 할 수 있다.<sup>6)</sup> VOCs와 같은 대기오염물질의 인체 노출은 실외보다 실내에서 더 높을 수 있으며 소비재 및 상업용 제품, 페인트 관련 제품, 접착제, 가구나 의류, 건축 자재, 연소 자재 및 가전제품 등 다양한 배출원이 존재한다.<sup>7)</sup>

산업현장은 VOCs 발생이 많은 곳 중 하나로 근로자들이 노출에 취약한 환경이다.<sup>8)</sup> 따라서 이에 대한 공학적 대책을 수립하여 관리하고 있지만, VOCs는 대개 배출량이 많고, 농도 수준으로 존재하기 때문에 기존의 제거 기술로 처리하기에는 경제적으로 비효율적이다.<sup>9)</sup> 이에 따라 VOCs를 제거하기 위한 새로운 공기정화 기술이 요구되고 있으며, 최근까지 공기정화 설비를 실내 환경에 적용하기 위해 많은 연구가 수행되었다.<sup>10)</sup> 실제 산업장에서는 근로자의 유해물질 노출을 제어하기 위해 주로 발생원 제어와 국소환기를 중심으로 평가가 수행되어 왔다.<sup>11)</sup> 하지만 공기정화 설비를 설치하여 작업환경을 개선한 사례는 상대적으로 부족한 실정이다. 따라서 체계적이고 정확한 측정을 통해 작업장 내 공기질 개선에 대한 평가가 필요하다. 한편, 광촉매를 이용하여 유해물질 제어에 활용하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 광촉매는 빛 에너지를 흡수하여 활성화된 후 광화학반응을 촉진시키는 물질이다. 그 중, 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)은 높은 산화 및 환원 활성을 가지며 광촉매능이 우수하다. TiO<sub>2</sub> 광촉매 작용이 일어난 후 반응이 끝나면 다시 비활성화 상태로 돌아가는 특성을 가지고 있어 반영구적으로 사용가능하며 경제적인 측면에서 유리하므로 산업적인 응용이 가능하다. 또한, 물리화학적으로 매우 안정하고 인체에 무해한 물질로 알려져 있어 다양한 분야에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>12,13)</sup>

본 조사의 자동차 부품 접착공정은 부품 접착 시 사용되는 접착제 취급으로 인해 톨루엔(toluene), 벤젠(benzene), 스티렌(styrene), 크실렌(xylene) 등 빈번하게 검출되는 개별 VOCs가 발생하며, 카르보닐 및 알데히드류와 같은 물질이 발생한다.<sup>14)</sup> 이러한 유해물질의 발생은 근로자들에게 직접적으로 노출될 가능성이 있다.<sup>15)</sup> 작업환경 개선을 위해 국소배기장치의 설치 및 가동은 유해요인을 직접 제거하는 중요한 작업환경 개선책이다.<sup>16)</sup> 국소배기장치는 작업환경에서 근로자의 직업병을 예방하고, 작업효율을 증대시킬 뿐만 아니라 근로자의 건강을 유지 및 증진시킬 수 있다.<sup>17)</sup> 하지만 본 대상 사업장은 생산 제품의 품질을 유지하기 위한 온도 유지가 필수적이며, 환기장치를 가동할 수 없는 상황이다. 또한, 환기는 정화되지 않은 외부 오염 공기가 유입될 가능성이 있어 해당 공정의 특성을 고려한 작업환경 개선방안이 마련되어야 한다.

본 연구의 목적은 자동차 부품 접착공정에 종사하는 근로자에 대한 VOCs 노출을 측정 및 평가하고, TiO<sub>2</sub>가 코팅된 필터

를 적용한 공기정화 설비의 설치에 따른 제거효율을 통해 실효성 검증 및 작업환경에 대한 개선방안을 마련하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 예비조사

자동차 부품 접착공정 유해물질 노출을 측정하기 전 예비조사(walk-through survey)를 실시하였다. 예비조사 항목으로는 본 측정 계획 수립에 필요한 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheet, MSDS), 작업공정도 등 관련된 서류 검토 및 확보, 작업공정 현장 관찰, 사업주와 안전관리자 면담, 연도별 유해물질 사용량, 측정할 시료 수, 측정시간, 대상 근로자 선정, 환기 시설, 배출되는 유해물질에 따른 측정 장비 등을 선정하였다.

### 2. 연구대상 및 측정 대상물질 선정

본 연구는 2022년 2월 15일, 2022년 2월 20일, 2회에 걸쳐 경상북도 칠곡에 위치한 자동차 부품 접착공정의 작업자에 대한 개인노출량과 공정 내부 지역노출량 수준을 평가하였다. 해당 작업장의 공정은 크게 조립, 접착으로 이루어져 있으며 접착 로봇이 자동화를 통해 혼합된 접착제를 자동차 부품에 도포 후 작업자가 조립 및 검사하는 과정으로 진행되었다. 작업장 크기는 약 436 m<sup>3</sup>였으며, 공정의 형태는 크게 접착 로봇 공정, 접착제 혼합소, 조립 작업대, 검사대로 이루어져 있었다.

해당 공정의 특성상 접착제 취급 시 발생할 수 있는 VOCs를 고려하여 문헌 조사를 통해 도출된 물질을 선정하였다.<sup>18,19)</sup> VOCs 물질 중 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 스티렌(styrene), 크실렌(xylene) 5종과 알데히드류(aldehyde) 중 폼알데하이드(formaldehyde), 아세트알데하이드(acetaldehyde) 2종을 포함한 총 7종의 물질을 선정하였다. 또한, 각 선정 물질에 대한 물리·화학적 특성 및 노출기준을 조사하였다.



Fig. 1. The measurement location of the passive sampler

### 3. 노출 평가

#### 3.1. 시료채취 및 분석

접착공정 작업자들에 대한 개인노출 시료 채취는 비교적 작업에 방해가 되지 않는 수동식 시료채취기(passive sampler)를 선정하였다. VOCs에 대한 측정은 시료채취기(passive sampler)인 OVM-3500 (3M Science, USA)과 알데히드류(aldehyde)는 UME<sub>x</sub>-100 (SKC, USA)을 사용하여 6시간 동안 개인 시료를 채취하였다. 개인노출 시료는 단위작업장소별 근로자 수는 20인 이하로 공정 내 유사노출그룹(similar exposure group, SEG)의 대표 근로자 4명(W-1, W-2, W-3, W-4)을 선별하였고, 호흡 영역 근처(breathing zone)에 설치하여 점심시간을 제외하고 작업이 이루어지는 약 6시간 동안 측정하였다(Fig. 1).

지역시료는 개인노출 시료 채취와 동일한 시료채취기(passive sampler)를 사용했다. 점심시간을 포함하여 약 7시간 동안 연속 측정하였다. 측정 위치는 발생원에 근접한 접착 로봇 공정 3곳(A-1, A-2, A-3), 접착제 혼합소 2곳(B-1, B-2), 중앙 조립 작업대 1곳(C-1), 검사대 1곳(D-1), 작업장 실외 1곳(E-1)을 선정하였다(Fig. 2). 작업장 내 농도 변화 추이를 실시간(real-time)으로 확인하기 위해 실시간 측정기(Sensor-based Air Monitoring Station, SAMI)를 통해 총휘발성 유기화합물(Total Volatile Organic Compounds, TVOCs)을 측정하였으며, 환기 상태를 평가하기 위해 AIRMON-1 (Sentry, Korea)을 이용하여 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 측정하였다. SAMI로 측정된 TVOCs의 농도는 공기 중에 존재하는 VOCs를 종합적으로 평가하는 대체 지표로 사용하였다. SAMI의 입자 포집 방식은 입자의 광학적

크기와 개수에 따라 입자가 산란하는 빛의 양을 측정하여 실시간으로 입자를 포획하는 광산란법(Light scattering method)을 이용하고 습도를 보정해 주는 제어장치가 있는 특징이 있다. AIRMON-1은 가스 분자가 특정 파장의 적외선을 흡수하는 특성을 이용하여 가스의 적외선 흡수도를 측정하여 농도로 환산하는 방식인 비분산적외선법(Non-dispersive infrared absorption)을 이용하였다. 각 측정기는 작업장 중앙에 설치하여 약 6시간 측정되었으며, 실시간 측정된 농도 데이터는 1분 단위로 수집되었다.

VOCs 물질 중 선정된 측정 대상물질 5종에 대한 분석은 한국산업안전보건공단 KOSHA GUIDE의 작업환경측정·분석 기술지침 따라 분석 및 정도관리를 진행하였다.<sup>20)</sup> 모든 채취 시료는 냉장 상태로 운반되었으며, 분석 전까지 냉장 보관하였다. VOCs 분석의 경우 전처리하는 확산모니터 캡을 분리하여 이황화탄소(CS<sub>2</sub>) 1 mL를 넣고 30분간 방치하여 탈착 후 기체크로마토그래피 질량분석기(GC-MS, Perkin-Elmer, Clarus 680/SQ8T, USA)를 이용하여 정량하였다. 측정 선정 물질인 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 크실렌(xylene), 스티렌(styrene)의 검출한계(Limit of Detection, LOD)는 각 0.000198 µg/mL, 0.000281 µg/mL, 0.000195 µg/mL, 0.000151 µg/mL, 0.000311 µg/mL였다. 알데히드류(aldehyde) 2종에 대한 분석은 아세토니트릴(acetonitrile) 3 mL를 넣어 30분간 방치하여 탈착 후 고성능액체크로마토그래피(HPLC, Perkin-Elmer, Flexar-20, USA)를 이용하여 정량하였다. 폼알데하이드(formaldehyde)와 아세트알데하이드(acetaldehyde)의 LOD는 각 0.007 µg/mL, 0.006 µg/mL였다. 검량선은

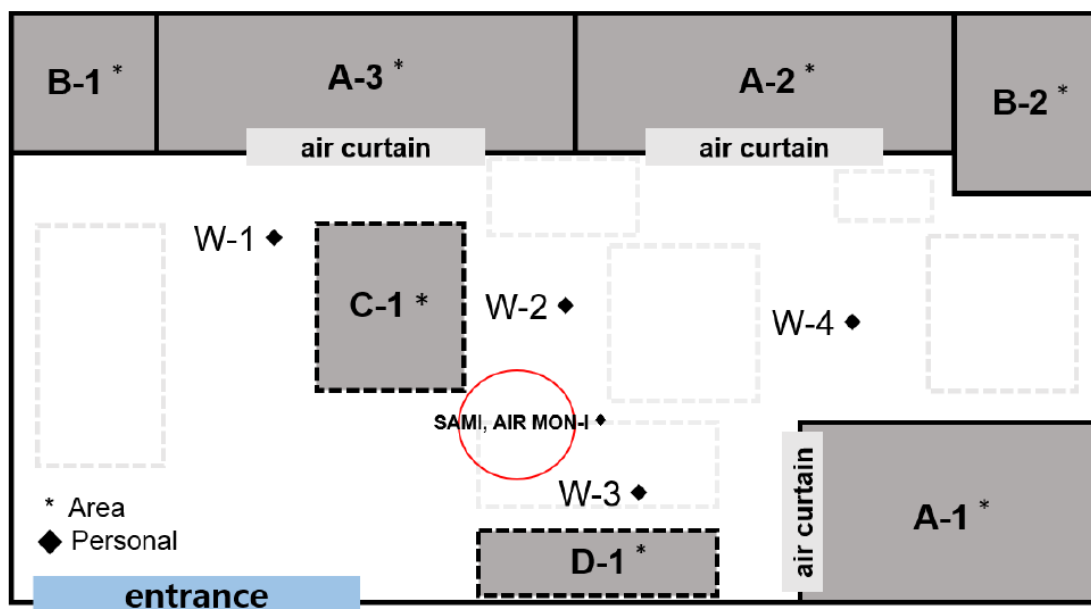


Fig. 2. Measurement locations of personal exposure samples and area samples

규정에 따라 상관계수(R<sup>2</sup>) 0.999 이상에서 얻은 분석 결과에서의 면적을 통해 농도를 산출하였다.

3.2. 노출지수

해당 작업장의 노출 위험성을 평가하기 위해 노출지수 (Exposure Index, EI)를 산출하여 위험성 평가를 실시하였다.<sup>21)</sup> 검출된 물질들은 대부분 복합적으로 작용하여 상가 작용에 따른 EI를 고려하였고, 1을 초과할 경우 작업장이 위험한 것으로 판단하였다(식 (1)).

$$EI = \frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} \dots + \frac{C_n}{T_n} \quad (1)$$

여기서, C는 화학물질 각각의 측정치 (µg/m<sup>3</sup>), T는 화학물질 각각의 노출기준이다.

4. TiO<sub>2</sub> 필터 공기정화 설비 효율성 검증


각 선정 물질에 대한 공기질 개선 정도를 평가하기 위해 TiO<sub>2</sub> 코팅 필터가 장착된 공기정화 설비를 사용하여 설치 전·후의

제거효율(removal efficiency)을 산출하였다. 공기정화 설비는 J사(Korea)의 JSVK280 모델을 사용하였고 공정 내 유해물질 발생원 근처에 총 7대를 설치하였으며 모델의 사양은 Table 1과 같다. 공기정화 설비에 사용된 필터는 열가소성 섬유의 용융 방사 원리를 응용하여 제작된 멜트 블로운(Melt Blown, MB) 필터를 선정하였고, VOCs 제거를 위해 N사(Korea)의 Weltouch® 자기구동형 무광촉매를 코팅하여 사용하였다. 사용된 자기구동형 무광촉매의 VOCs에 대한 제거 기전은 빛의 에너지(자외선, 가시광선 등)를 통해 전자(e<sup>-</sup>)와 정공(h<sup>+</sup>)이 무광촉매가 코팅된 표면에 생성되고 VOCs와의 화학적 상호작용을 통해 산화(reduction) 및 환원(oxidation) 반응이 발생하여 무해한 물(H<sub>2</sub>O)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)로 변환된다. 또한, 무광촉매는 2.8 eV 이상의 band gap 에너지를 갖는 가시광 영역에서도 광활성이 나타나 상대적으로 빛의 에너지가 적은 공정 내부에 적용하였다(Fig. 3).<sup>22)</sup>

공기정화 설비의 설치 전·후 공기정화 효율을 평가하기 위해서 아래 식 (2)를 이용하여 평가하였다. 여기서, C<sub>b</sub>는 공기정화 설비 설치 전 농도 (mg/m<sup>3</sup>), C<sub>a</sub>는 공기정화 설비 설치 후 농도 (mg/m<sup>3</sup>)이다.

$$Removal\ efficiency\ (\%) = \frac{C_b - C_a}{C_b} \times 100 \quad (2)$$

Table 1. Air purifier specifications with TiO<sub>2</sub> coated filter

	Air purifier model	JSVK280
	(country)	(South Korea)
	Airflow rate	17 m <sup>3</sup> /min
	Orifice size	1,513.5 mm <sup>2</sup>
	Filter	Melt-blown filter+TiO <sub>2</sub>
	Size	480 (W)×650 (L)×1,045 (H)
	Weight	52 kg

5. 실내 환기량 평가

작업장 내 환기 정도 평가하기 위해 AIRMON-1을 통해 측정된 CO<sub>2</sub> 농도를 이용하여 시간당 공기 교환 횟수(Air Change per Hour, ACH)를 산출하여 환기량을 평가하였다(식 (3)). 여기서, C<sub>1</sub>은 처음 측정된 CO<sub>2</sub> 농도(ppm), C<sub>0</sub>는 외부 공기 중 CO<sub>2</sub> 농도(ppm), C<sub>2</sub>는 일정시간이 경과한 후 측정된 CO<sub>2</sub> 농도(ppm)이다.

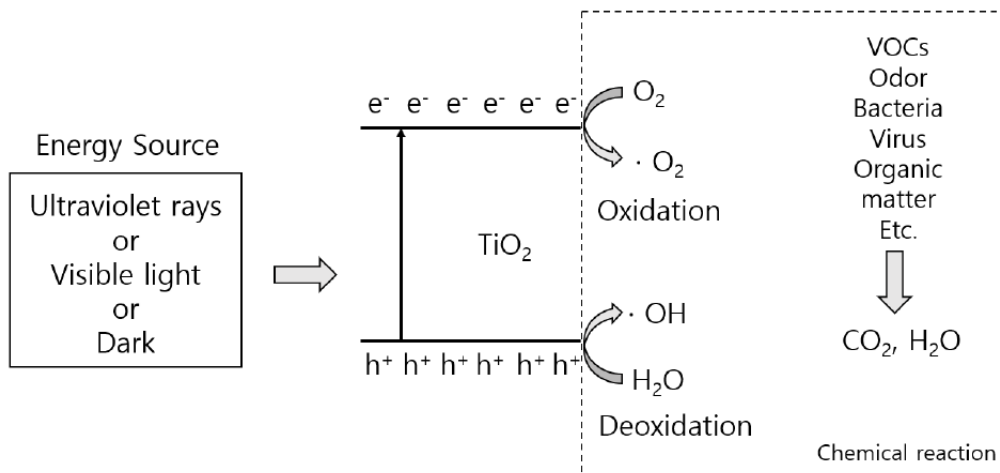


Fig. 3. Principle of self-propelled photocatalyst without light



$$ACH = \frac{\ln(C_1 - C_0) - \ln(C_2 - C_0)}{\text{hour}} \quad (3)$$

## 6. 근로자 설문조사

설문지를 통해 TiO<sub>2</sub> 코팅 필터 공기정화 설비 설치 전·후의 작업장 공기질 개선 정도를 작업자가 느끼는 인식성 공기질을 통해 평가하고자 하였다. 이를 위해 설치 전과 설치 후에 각각 18명과 13명의 작업자를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 설문지의 항목은 작업장 유해물질 노출을 평가하기 위해 하루 평균 작업시간, 업무 경력, 작업 형태, 흡연, 음주, 운동습관, 의사의 질병 진단력 등으로 구성하였다. 또한, 작업자의 주관적인 평가를 통해 실내외염이 가장 심한 시간대와 작업장의 악취의 형태 및 강도 등 공정의 공기질 인식에 대한 항목으로 구성하였다. 설문조사는 공기정화 설비 설치 전과 후 각 1회씩 실시하였다.

## III. 결 과

### 1. 예비조사

예비조사 결과 작업장 내 근로자들은 심한 악취를 호소하고 있었으며 근로자들은 작업 시에 보호구를 착용하지 않고 작업을 수행하는 것이 관찰되었다. 접착공정의 특성상 품질관리를 위해 일정한 온도(28°C)를 유지하고 있었으며, 이로 인해 기계 환기는 환기구를 통해 이루어지고 있었고, 출입구의 개폐로 인한 자연환기만 이루어지고 있었다. 또한, 접착 로봇 공정과의 분리를 위해 에어커튼(air curtain)이 설치되어 있었지만 가동되지 않았다.

AIRMON-1을 통해 측정된 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 이용하여 환기량을 산출하였다. 공기정화 설비 설치 전·후 작업자가 점심 식사를 위해 모두 빠져나간 직후 CO<sub>2</sub> 농도는 각각 534 ppm, 560 ppm이었고 1시간 동안 CO<sub>2</sub>가 발생하지 않는 상태에서 다시 CO<sub>2</sub> 농도를 측정 한 결과 507 ppm으로 동일하였다. 또한, SAMI를 이용하여 외부공기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 1시간 평균을 산출한 결과 416 ppm으로 동일하였다. 이를 통해 환기량을 산출한 결과 각 0.26 hr<sup>-1</sup>, 0.46 hr<sup>-1</sup>이었다(Table 2).

**Table 2.** Evaluating ventilation rate for a workspace

Parameter	Value	
	Before	After
Initial CO <sub>2</sub> (ppm)	534	560
Elapsed time CO <sub>2</sub> (ppm)	507	507
Outdoor CO <sub>2</sub> (ppm)	416	416
Volume (m <sup>3</sup> )	456	456
Air change per hour (hr <sup>-1</sup> )	0.26	0.46

## 2. 제거효율 평가 및 노출량 비교

### 2.1. 실시간 측정기를 이용한 제거효율 평가

SAMI를 통해 작업장 내 중앙 작업대에서 측정된 TVOCs 농도를 분석하여 Table 3과 같았다. TiO<sub>2</sub> 필터 공기정화 설비 설치 전의 평균 농도는 427.6±105.5 ppb이었고, 설치 후 농도는 255.3±88.2 ppb로 설치 전과 비교하여 약 172.3 ppb 낮았다. TVOCs는 작업환경 대한 노출기준을 제시하고 있지 않아 대안으로 실내 환경의 질량 단위 권고치 500 µg/m<sup>3</sup>를 ppb로 변환하여 기준을 설정하였다. 또한, 센서를 기반(Sensor-based)으로 측정의 경우 대부분 광이온화(PID) 방식을 이용하며, 이소부틸렌(isobutylene)을 기준으로 TVOCs 농도를 산출하기 때문에 이를 고려하여 부피 단위 권고치로 환산한 기준(241.8 ppb)을 설정하였다.<sup>2,3)</sup> 설치 후, 기준농도를 초과하는 비율이 감소하였으며 TVOCs에 대한 제거효율은 40.3%였다. 폼알데하이드(formaldehyde)의 경우, 설치 전의 평균 농도는 8.6±7.4 ppb로 나타났으며, 설치 후 농도는 모두 검출되지 않았다. 작업환경 노출기준에 따라 폼알데하이드(formaldehyde)에 대한 농도 기준과 비교하였을 때 설치 전·후 모두 기준농도를 초과하지 않았다. 설치 후의 농도는 검출되지 않아 제거효율은 평가할 수 없었다.

### 2.2. 공기정화 설비 설치 전·후 VOCs 농도 및 제거효율

OVM-3500을 사용하여 휘발성 유기화합물 5종의 물질에 대해 TiO<sub>2</sub> 필터 공기정화 설비 설치 전·후의 작업자 개인노출 및 지역시료 농도를 비교하였다(Table 4). 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 크실렌(xylene), 벤젠(benzene), 스티렌(styrene)의 설치 전의 개인노출 농도는 각 43.3±11.4 µg/m<sup>3</sup>, 17.4±6.4 µg/m<sup>3</sup>, 7.1±0.4 µg/m<sup>3</sup>, 2.9±0.9 µg/m<sup>3</sup>, 0.7±0.4 µg/m<sup>3</sup>였다. 설치 후의 농도와 비교하여 크실렌(xylene)은 설치 전보다 농도가 약 0.5 µg/m<sup>3</sup> 증가하였고, 나머지 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 벤젠(benzene), 스티렌(styrene)은 약 22.0 µg/m<sup>3</sup>, 8.1 µg/m<sup>3</sup>, 2.0 µg/m<sup>3</sup>, 0.4 µg/m<sup>3</sup> 감소하였다.

지역시료 농도는 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 크

**Table 3.** Comparison of TVOC and formaldehyde concentrations before and after installation of an air purifier using a SAMI

Substance	N	Mean±SD	Removal efficiency (%)
TVOCs (ppb)	Before (339)	427.6±105.5	40.3
	After (336)	255.3±88.2	
Formaldehyde (ppb)	Before (341)	8.6±7.4	NA**
	After (341)	ND*	

\*Not detected.

\*\*Not available.

**Table 4.** Comparison of VOC concentrations in personal and area samples before and after installation of an air purifier

Sampling type	Subject	VOCs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )									
		Benzene		Toluene		Ethylbenzene		Xylene		Styrene	
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
Personal	W-1	3.9	0.7	48.6	21.6	23.3	9.3	7.6	7.6	0.9	0.2
	W-2	3.1	1.2	56.6	18.2	22.7	7.9	7.0	7.5	0.2	0.3
	W-3	2.7	1.1	36.5	27.7	12.3	11.7	7.2	7.8	0.7	0.4
	W-4	1.8	0.6	31.4	17.9	11.4	8.3	6.7	7.5	1.1	0.3
Mean		2.9	0.9	43.3	21.3	17.4	9.3	7.1	7.6	0.7	0.3
SD		0.9	0.3	11.4	4.6	6.4	1.7	0.4	0.1	0.4	0.1
Removal efficiency (%)		69.0		50.8		46.6		NA		57.1	
Area	A-1	1.7	0.8	32.2	18.3	11.3	8.3	8.0	8.6	1.0	0.4
	A-2	1.6	0.7	30.5	17.8	13.3	7.7	4.9	6.7	0.9	0.1
	A-3	1.5	0.7	25.8	14.3	10.2	6.9	4.2	5.8	0.5	0.2
	B-1	1.2	0.7	22.9	16.8	8.8	7.9	4.7	7.3	0.4	0.1
	B-2	1.1	1.0	17.9	14.1	8.1	6.9	3.4	6.4	0.4	0.3
	C-1	0.9	1.1	26.5	18.4	10.5	8.4	4.5	7.3	0.5	0.3
	D-1	1.4	1.1	27.1	17.4	10.6	7.2	5.2	6.7	0.6	0.2
	Mean		1.3	0.9	26.1	16.7	10.4	7.6	5.0	7.0	0.6
SD		0.3	0.2	4.8	1.8	1.7	0.6	1.4	0.9	0.2	0.1
Removal efficiency (%)		30.8		36.0		26.9		NA		66.7	

**Table 5.** Comparison of aldehyde concentrations in personal and area samples before and after installation of an air purifier

Sampling type	Subject	Aldehyde ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			
		Formaldehyde		Acetaldehyde	
		Before	After	Before	After
Personal	W-1	15.0	17.7	315.3	62.4
	W-2	13.0	14.0	64.6	60.1
	W-3	15.4	16.1	56.5	78.0
	W-4	19.0	17.3	73.5	61.2
Mean		15.6	16.3	127.5	65.4
SD		2.5	1.7	125.4	8.4
Removal efficiency (%)		NA		48.7	
Area	A-1	20.8	16.0	76.2	100.7
	A-2	15.7	23.0	77.6	117.8
	A-3	19.2	16.7	74.5	98.5
	B-1	14.7	18.1	56.8	117.4
	B-2	14.8	19.5	67.7	105.9
	C-1	15.5	21.6	55.4	93.9
	D-1	16.4	14.3	90.0	86.0
	Mean		16.3	17.7	91.6
SD		2.4	2.8	74.9	21.5
Removal efficiency (%)		NA		2.5	

실렌(xylene), 벤젠(benzene), 스티렌(styrene)의 설치 전 각  $26.1 \pm 4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $10.4 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $5.0 \pm 1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.3 \pm 0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $5.0 \pm 1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 설치 후의 농도는 크실렌(xylene)이 설치 전보다 농도가 약  $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였고, 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 벤젠(benzene), 스티렌(styrene)은 약  $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 톨루엔의 농도가 다른 물질보다 크게 감소하였다. 설치 후 VOCs의 개인 시료 및 지역시료에 대한 제거효율은 26.9~69.0%였다. 크실렌(xylene)에 대한 제거효율은 설치 후의 농도가 증가하여 평가할 수 없었다.

2.3. 공기정화 설비 설치 전·후 aldehyde 농도 및 제거효율

UMEx-100을 사용하여  $\text{TiO}_2$  필터 공기정화 설비 설치 전·후를 개인노출 및 지역시료 농도를 비교하여 Table 5에 나타내었다. 설치 전 폼알데하이드(formaldehyde) 및 아세트알데하이드(acetaldehyde)에 대한 개인노출은 각  $15.6 \pm 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $127.5 \pm 125.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 설치 후와 비교하였을 때 폼알데하이드(formaldehyde)의 경우 약  $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으며, 아세트알데하이드(acetaldehyde)의 경우  $62.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였다.

지역시료 농도는 결과 설치 전 폼알데하이드(formaldehyde) 및 아세트알데하이드(acetaldehyde)에 대한 농도는 각  $16.3 \pm 2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $91.6 \pm 74.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 설치 후의 농도와 비교하여 폼알데하이드(formaldehyde)는  $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으며, 아세트알데하이드(acetaldehyde)의 경우  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감

소하였다. 설치 후 개인노출 및 지역시료 모두 폼알데하이드(formaldehyde)에 대한 제거효율은 설치후의 농도가 증가하여 평가할 수 없었으며 아세트알데하이드(acetaldehyde)에 대한 제거효율은 각 48.7%, 2.5%였다.

2.4. 추가 검출된 VOCs에 대한 개인노출 및 지역시료 농도 비교

문헌 조사를 통해 선정된 VOCs 물질 5종 이외의 비표적 스크리닝 분석을 통해 추가 검출된 물질에 대해 개인노출 및 지역시료의 농도를 Table 6에 나타내었다.  $\text{TiO}_2$  필터 공기정화 설비 설치 전·후 개인노출 농도는 1,2-디클로로에틸렌(1,2-dichloroethylene)이 각각  $372.1 \pm 276.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $243.2 \pm 213.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene)은 각  $0.2 \pm 0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.1 \pm 0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다. 지역시료 농도에서도 개인노출 농도와 동일하였으며, 모든 물질은 노출 기준 미만으로 나타났다.

2.5. 검출된 대상물질의 노출기준 비교

분석을 통해 검출된 물질의 노출 농도를 고용노동부 노출기준과 비교하였고, EI를 산출하여 작업장에 대한 위험성 평가를 진행하였다(Table 7). 검출된 물질 모두 노출 기준을 넘지 않았다. 또한, EI를 산출하였을 때 개인노출 및 지역시료의 공기정화 설비 설치 전·후 모두 1 미만의 값이 나타났다.

Table 6. Comparison of concentrations of personal and area samples for additionally detected VOCs

Sampling type	Subject	VOCs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )											
		Trichloroethylene		1,2-Dichloroethylene		Carbon tetrachloride		1,2-Dichloropropane		Tetrachloroethylene		Bromodichloromethane	
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
Personal	W-1	0.5	0.2	0.0	485.8	0.2	0.1	85.1	42.1	2.2	0.6	27.0	12.0
	W-2	0.4	0.1	328.5	0.0	0.2	0.1	76.4	28.9	1.4	0.5	22.3	23.1
	W-3	0.3	0.1	616.8	339.5	0.3	0.1	77.3	24.8	1.0	0.4	48.0	12.4
	W-4	0.3	0.2	543.2	147.5	0.2	0.0	78.7	41.2	0.6	0.4	46.6	19.7
Mean		0.4	0.2	372.1	243.2	0.2	0.1	79.4	34.3	1.3	0.5	36.0	16.8
SD		0.1	0.1	276.6	213.3	0.1	0.1	3.9	8.7	0.7	0.1	13.2	5.5
Area	A-1	0.1	0.1	472.8	182.7	0.2	0.1	36.2	20.9	1.1	0.4	55.1	30.0
	A-2	0.4	0.1	406.4	157.4	0.2	0.1	134.4	19.9	0.5	0.8	20.6	13.1
	A-3	0.1	0.1	507.4	33.3	0.1	0.1	48.1	25.2	0.8	0.4	27.8	11.7
	B-1	0.1	0.1	550.1	13.4	0.2	0.1	36.5	19.8	0.5	0.4	13.5	35.5
	B-2	0.2	0.1	552.5	0.0	0.2	0.1	53.3	16.2	0.9	0.4	10.7	16.9
	C-1	0.2	0.2	245.3	0.0	0.2	0.1	37.8	25.2	0.9	0.6	17.1	14.8
	D-1	0.1	0.1	252.5	0.0	0.1	0.1	34.4	16.7	0.7	0.4	22.8	17.2
	Mean		0.2	0.1	426.7	55.3	0.2	0.1	54.4	20.5	0.8	0.5	23.9
SD		0.1	0.0	121.5	73.7	0.0	0.0	33.3	3.3	0.2	0.1	13.8	8.4

**Table 7.** Comparison of the concentration of the detected substance and the threshold limit values

Substance	Personal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Area ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Threshold limit values			
	Before	After	Before	After	TWA		STEL	
					ppm	$\text{mg}/\text{m}^3$	ppm	$\text{mg}/\text{m}^3$
Benzene	2.9	0.9	1.3	0.9	0.5	1.6	2.5	8.1
Toluene	43.3	21.3	26.1	16.7	50	191.2	150	573.5
Ethylbenzene	17.4	9.3	10.4	7.6	100	440.5	150	660.8
Xylene	7.1	7.6	5.0	7.0	20	86.4	40	172.9
Styrene	0.7	0.3	0.6	0.2	100	440.5	125	550.7
Formaldehyde	15.6	16.3	16.3	17.7	0.3	0.4	1	1.5
Acetaldehyde	127.5	65.4	91.6	89.3	50	91.4	150	274.2
Trichloroethylene	0.4	0.2	0.2	0.1	10	54.5	25	136.3
1,2-Dichloroethylene	372.1	243.2	426.7	55.3	10	41.1	-	-
Carbon tetrachloride	0.2	0.1	0.2	0.1	5	30	-	-
1,2-Dichloropropane	79.4	34.3	54.4	20.5	10	46.9	100	468.8
Tetrachloroethylene	1.3	0.5	0.8	0.5	5	34.4	-	-
Bromodichloromethane	36.0	16.8	23.9	19.9	-	-	-	-
EI	0.053	0.049	0.054	0.048	-	-	-	-

### 3. 공기정화 설비 설치 전·후 인식성 공기질 설문조사

작업장에 있는 작업자를 대상으로 설문조사를 실시하여 TiO<sub>2</sub> 필터 공기정화 설비 설치 전·후 공기질에 대한 인식을 조사했다. 설문조사 결과 작업 중 느끼는 악취의 강도는 TiO<sub>2</sub> 필터 공기정화 설비를 설치했을 때 냄새를 느끼지 못한 근무자는 9% 증가하고, 강한 냄새는 27% 감소하였다. 악취의 지속시간은 설치 후 악취의 지속시간은 30분 미만인 17% 증가하고, 120분 이상 느낀 사람은 21% 감소하여 악취의 지속시간이 개선되었다고 평가하였다. 작업자들이 느끼는 악취 빈도는 설치 후 4회 이상에서 46% 감소하여 작업 중 악취에 대한 부분은 개선된 것으로 분석되었다.

## IV. 고 찰

본 연구는 자동차 부품 접착공정에서 TiO<sub>2</sub> 공기정화 설비 설치 전·후의 VOCs 제거효율을 통해 실효성을 검증하고, 작업자에 대한 개인노출과 작업장 내 지역 노출에 대해 평가하였다. 해당 공정의 작업자는 접착제에서 발생할 수 있는 다양한 VOCs 물질에 직접적으로 노출되고 있었으며, 이를 제어할 수 있는 환기장치 설비가 미흡한 작업환경에서 근무하고 있었다. 이를 위해 본 연구에서는 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하여 작업자 4명을 대상으로 개인노출과 공정 내부 지역노출에 대해 평가하였으며, 공기정화 설비 설치 전·후의 농도 분포변화를 비교하여 작업장 내 공기질 개선 정도를 확인하였다.

작업환경을 개선하기 위한 대책은 크게 공학적 대책과 행정

적 대책, 개인보호구 착용으로 구분할 수 있다.<sup>24)</sup> 대개 공학적 대책을 통해 작업환경 개선을 실시하고 있지만, 이는 비용적인 측면에서 중, 소규모의 작업장은 부담이 될 수 있다.<sup>25)</sup> 행정적 대책은 시행이 어려우며 지속성이 떨어지고, 개인보호구는 공학적 대책이 마련되지 않은 상태 및 긴급 상황 시 최후의 수단으로 사용된다.<sup>26)</sup> 공학적 대책은 대체(substitution), 격리(isolation), 환기(ventilation)로 구분할 수 있다.<sup>27)</sup> 하지만, 자동차 부품을 접착하는 해당 공정의 특성상 접착제를 대체할 물질은 없었으며, 근로자를 발생원으로부터 격리하기 어려운 상황이었다. 가장 좋은 개선방법은 국소배기를 설치하는 것이지만 공정의 특성상 생산품의 품질 유지를 위해 일정한 온도 유지와 고비용으로 설치하기 어려운 상황이었다. 이러한 작업장의 상황을 고려하여 최선의 대책으로 공기정화 설비 및 순환 근무를 제안하였다.

최근 TiO<sub>2</sub> 광촉매를 활용을 통해 유해물질을 저감하여 공기질을 개선하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>28)</sup> 따라서 광촉매 기술을 공기 정화 설비에 도입하면 VOCs를 제어하는데 용이할 수 있다. 이러한 광촉매 기술은 실내 및 실외 오염물질의 처리, 산업 배기가스 처리, 산업 분야 등의 다양한 분야에서 적용되고 있으며 특히 VOCs에 대한 높은 제거효율을 보이는 것으로 평가받고 있다.<sup>29)</sup> Lee 등<sup>30)</sup>의 연구에 따르면 활성탄-TiO<sub>2</sub> 광촉매 복합시스템을 제안하였으며 도장 공정 내 VOCs에 대한 제거효율을 평가한 결과 약 63.0~100%의 제거효율을 보였다. 또한, You 등<sup>31)</sup>의 연구는 TiO<sub>2</sub> 표면에 일부 미량의 백금 담지 촉매를 활용하여 VOCs에 대한 제거효율을 평가하였을 때 대략 8.9~96.6%의 제거효율이 있는 것으로 판



단하였다. Lee 등<sup>30)</sup>과 You 등<sup>31)</sup>의 VOCs에 대한 제거효율 평가한 연구와 비슷하게 본 연구에서도 TiO<sub>2</sub>를 적용한 공기정화 설비를 설치한 후 개인노출 및 지역시료 노출에서 제거효율이 대략 26.9~69.0%로 비슷한 결과가 나타났다. 하지만, 폼알데하이드(formaldehyde)와 크실렌(xylene)의 경우 설치 후의 농도가 높아 제거효율을 평가할 수 없었는데 이는 해당 물질과 무광촉매간의 화학적 상호작용이 공정 내 영향 요인(온도, 습도, 공기 흐름 등)에 의해 제대로 이루어지지 않을 수 있다. 또한, 실내 환기량 평가에서 설치 후의 ACH가 약 1.77배 증가하였는데, 이는 VOCs의 농도 감소에 영향을 줬을 가능성이 있을 수 있다. 따라서 공정 내 특성을 고려한 추가적인 측정이 필요할 것으로 판단된다.<sup>32)</sup> 공기정화 설비만으로도 작업장 내에서 발생하는 유해물질의 농도를 감소시킬 수는 있지만, 작업장 내의 유해물질은 고농도로 존재하여 이를 완전히 제어하기에는 어려움이 있다. 따라서 광촉매 기술을 공기 정화 설비에 도입하면 VOCs를 제어하는데 효과적일 수 있으며 이는 작업환경 공기질 개선을 위한 방법론이 될 수 있다.

개인노출 시료 및 지역시료에 대한 분석을 통해 검출된 물질의 노출 농도를 산출하여 고용노동부 노출기준과 비교하였다. 측정 대상물질 중 노출기준을 초과한 물질은 없는 것으로 나타났다. EI는 1 미만의 값으로 나타났다. 하지만, 측정 대상물질 중 발암을 유발하는 물질이 포함되어 있어 위험성이 있는 것으로 판단된다. 발암물질은 역치가 존재하지 않기 때문에 미량이라도 노출될 경우 암을 유발할 수 있다.<sup>33)</sup> 측정 유해인자 중 벤젠(benzene)과 폼알데하이드(formaldehyde)는 국제 암 연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 인간에게 암을 유발하는 확실한 물질로 분류하였다.<sup>34)</sup> 벤젠(benzene)의 경우 급성 골수성 백혈병(Acute Myeloid Leukaemia, AML)과 같은 혈액암을, 폼알데하이드(formaldehyde)는 피부 및 호흡기를 통해 노출될 경우 암을 유발할 수 있다.<sup>35)</sup> 에틸벤젠(ethylbenzene), 아세트알데하이드(acetaldehyde), 에틸벤젠(ethylbenzene)은 인간에게 발암성이 의심되는 물질로 분류되어 있으며, 스티렌(styrene)은 동물 실험에서 발암성이 확인되었다.<sup>36-38)</sup> 톨루엔(toluene), 크실렌(xylene)은 비발암물질로 분류되어 있지만 호흡기, 피부, 눈, 점막 등에 자극을 일으킬 수 있고 긴장, 어지러움, 두통, 구토 등의 신경계 증상을 유발할 수 있다.<sup>39,40)</sup> 추가 검출된 물질 중 트리클로로에틸렌(trichloroethylene)은 대표적으로 신장암을 유발하며, 1,2-디클로로프로판(1,2-dichloropropane)은 담관암을 유발하는 1급 발암물질이다.<sup>41,42)</sup> 사염화탄소(carbon tetrachloride)는 간염유증을 유발하는 대표적인 간 독성 물질이며 테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene)은 백혈병과 간암, 신경계를 손상할 수 있는 물질로서 일부 인체자료에서 발암가능성이 확인되었다.<sup>43,44)</sup> 따라서 VOCs로 인해 발생하는 건강영향을 예방하기 위해서는 사업주는 노출을 최소화하기 위해 지속적인 화학물질의 대체

또는 개발하여 노출되는 유해요인, 화학물질들을 감소해야 한다. 이를 위한 작업환경을 개선의 체계적인 방안과 지속적인 관심이 요구된다. 추가 검출된 물질을 통해 작업환경에서 발생될 수 있는 모든 물질에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

본 연구는 약 공기정화 설비 설치 전·후인 2회에 걸쳐 자동차 부품 접착공정의 개인노출 및 지역노출을 평가한 연구로서 대표성이 낮을 수 있다. 또한, 설치 전·후의 접착제 사용량, 기상 변수, 환기량 등 유해 물질의 농도 변화를 야기하는 실내 조건을 고려하지 못한 연구의 한계가 있다. 따라서 추가적인 연구를 통해 공기정화 설비의 실효성을 평가하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## V. 결 론

본 연구는 자동차 부품 접착공정 근로자들의 VOCs 개인노출을 측정 및 분석하고, TiO<sub>2</sub> 필터 공기정화 설비 설치에 따른 제거효율을 평가를 통해 실효성을 검증하였다. 공기정화 설비 설치 전·후 농도를 통해 VOCs에 대한 제거효율은 약 26.9~69.0%로 이는 자동차 접착공정에서 발생 하는 유해인자 제어에 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 벤젠(benzene), 폼알데하이드(formaldehyde), 사염화탄소(carbon tetrachloride), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene)과 같이 발암을 유발하는 물질이 검출되어 해당 작업장의 위험성이 확인되었기 때문에, 공정의 특성상 환기 설비를 마련할 수 없는 경우 공기정화 설비를 이용하여 노출을 최소화하여야 한다. 하지만, TiO<sub>2</sub> 필터 공기정화 설비의 활용성에 대한 구체적인 평가를 위해서는 추가적인 연구와 검증이 필요하며 이를 통해 작업장 내 유해인자 제어에 관한 연구가 확대되고 지속되어야 한다고 판단된다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경성 질환 예방관리 핵심 기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 2021003320008).

## Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## References

1. World Health Organization (WHO). Indoor air quality: organic pollutants. Report on a WHO meeting, Berlin, West, 23-27 August 1987. Copenhagen: WHO; 1989.

2. Finlayson-Pitts BJ, Pitts JN Jr. Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles. *Science*. 1997; 276(5315): 1045-1052.
3. Otto DA, Hudnell HK, House DE, Mølhave L, Counts W. Exposure of humans to a volatile organic mixture. I. Behavioral assessment. *Arch Environ Health*. 1992; 47(1): 23-30.
4. U.S. Environmental Protection Agency. Volatile organic compounds' impact on indoor air quality. Available: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality> [accessed 22 April 2023].
5. Shuai J, Kim S, Ryu H, Park J, Lee CK, Kim GB, et al. Health risk assessment of volatile organic compounds exposure near Daegu dyeing industrial complex in South Korea. *BMC Public Health*. 2018; 18(1): 528.
6. Axelsson G, Barregard L, Holmberg E, Sallsten G. Cancer incidence in a petrochemical industry area in Sweden. *Sci Total Environ*. 2010; 408(20): 4482-4487.
7. Guo H, Lee SC, Chan LY, Li WM. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments. *Environ Res*. 2004; 94(1): 57-66.
8. Kim PH, Jin MH, Lee BH, Jeong HM, Chung HS. A trend of VOC (volatile organic compound) control and patent analysis on the VOC control technical. Paper presented at: the 2007 SAREK Winter Conference; 2007 Nov 30; Seoul, Korea. Seoul: The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2007. p. 132-135.
9. Yu D, Ha JW. Characteristics of photocatalytic degradation of isopropyl alcohol on TiO<sub>2</sub>-coated aluminium plate. *Theor Appl Chem Eng*. 2005; 11(1): 1039-1042.
10. Zhang Y, Mo J, Li Y, Sundell J, Wargocki P, Zhang J, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmos Environ (1994)*. 2011; 45(26): 4329-4343.
11. Lee KY, Kim KW. A study on numerical analysis and performance improvement of ventilation systems in coating room. *JKAIS*. 2013; 14(5): 2086-2091.
12. Kim TY, Cho YT, Kim JY. Air purification of smoking booth using photocatalytic process and air filter. *Appl Chem Eng*. 2016; 27(4): 433-438.
13. Slimen H, Ochiai T, Nakata K, Murakami T, Houas A, Morito Y, et al. Photocatalytic decomposition of cigarette smoke using a TiO<sub>2</sub>-impregnated titanium mesh filter. *Ind Eng Chem Res*. 2012; 51(1): 587-590.
14. Guo H, Murray F, Wilkinson S. Evaluation of total volatile organic compound emissions from adhesives based on chamber tests. *J Air Waste Manag Assoc*. 2000; 50(2): 199-206.
15. Zhao Z, Pei Y, Zhao P, Wu C, Qu C, Li W, et al. Characterizing key volatile pollutants emitted from adhesives by chemical compositions, odor contributions and health risks. *Molecules*. 2022; 27(3): 1125.
16. Gupta R, Howard A, Zahiri S. Investigating the relationship between indoor environment and workplace productivity in naturally and mechanically ventilated office environments. *Build Serv Eng Res Technol*. 2020; 41(3): 280-304.
17. Woo WG, Kim JS, Park JT, Kim SN. A survey on the actual state of local exhaust ventilation system in small business I -awareness research on management system of local exhaust ventilation-. *J Korea Soc Environ Adm*. 2009; 15(2): 55-65.
18. Alghamdi MA, Khoder M, Abdelmaksoud AS, Harrison RM, Hussein T, Lihavainen H, et al. Seasonal and diurnal variations of BTEX and their potential for ozone formation in the urban background atmosphere of the coastal city Jeddah, Saudi Arabia. *Air Qual Atmos Health*. 2014; 7(4): 467-480.
19. Choo ST, Nam CM. Removal technologies of odor and volatile organic compounds from industrial processes. *J Korean Soc Ind Appl*. 2004; 7(3): 289-297.
20. Korea Occupational Safety & Health Agency. Work environment measurement and analysis technical guideline. Available: <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceA.do> [accessed 12 April 2023].
21. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2017 TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices. Cincinnati (OH): ACGIH; 2017.
22. Choi SY. A development of polyester-based non-woven fabric filter for air purifier treated with self-actuated photocatalyst. *Elastomers Compos*. 2016; 51(3): 226-232.
23. mPower Electronics. PID correction factors. Available: <https://www.mpowerinc.com/wp-content/uploads/2020/11/TA-Note-2-PID-Correction-Factors-v.1.31.pdf> [accessed 22 April 2023].
24. Yang WH, Kim HY, Son BS, Park JA. Organic solvent exposure of thinner-using occupation and its treatment by means of TiO<sub>2</sub> photocatalyst. *Korean J Sanit*. 2002; 17(2): 26-33.
25. Yoo SJ, Kang JW, Yang JH. A study on evaluation of ventilation efficiency from ventilation system and volume in the small printing facilities using CFD. *J Archit Inst Korea Plan Des*. 2013; 29(6): 263-270.
26. Gil G. Characteristics of personal protective equipment (PPE) in industry accidents. *J Ergon Soc Korea*. 2017; 36(6): 753-764.
27. Choi J. Occupational health management for heavy metals. *Korean Assoc Occup Health Nurs*. 2002; 9(2): 26-31.
28. Lee GD, Woo IS, Hwang MH, Lee IB, Kim KJ, Park HY. A study of air freshening by UV lamp and TiO<sub>2</sub> catalyst. Paper presented at: the 2011 Safety Management and Science Spring Conference; 2011 Apr 23; Cheonan, Korea. Incheon: Korea Safety Management & Science, 2011. p. 205-227.
29. Nam KB, Park IC, Hong SC. Production conditions of the photocatalyst for removing indoor pollutants. *Clean Technol*. 2016; 22(2): 106-113.
30. Lee C, Cha SW, Lee TW. Activated carbon-photocatalytic hybrid system for the treatment of the VOC in the exhaust gas from painting process. *J Energy Eng*. 2005; 14(2): 133-139.
31. You JW, Vikrant K, Lim DH, Verma S, Kukkar D, Anwer H, et al. Photocatalytic potential of a titanium dioxide-supported platinum catalyst against VOCs with complicated composition under varying humidity conditions. *J Clean Prod*. 2022; 371: 133487.
32. Lin Z, Shen W, Corriou JP, Chen X, Xi H. Assessment of multiple environmental factors on the adsorptive and photocatalytic re-

- removal of gaseous formaldehyde by a nano-TiO<sub>2</sub> colloid: experimental and simulation studies. *J Colloid Interface Sci.* 2022; 608(Pt 2): 1769-1781.
33. Sohn J, Lee C. The risk assessment of hazard chemicals in environment. *J Korean Soc Environ Eng.* 2007; 29(5): 477-488.
34. International Agency for Research on Cancer (IARC). List of classifications: Agents classified by the IARC monographs. Available: <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications> [accessed 12 April 2023].
35. Rushton L, Brown TP, Cherrie J, Fortunato L, Van Tongeren M, Hutchings SJ. How much does benzene contribute to the overall burden of cancer due to occupation? *Chem Biol Interact.* 2010; 184(1-2): 290-292.
36. Lachenmeier DW, Sohnius EM. The role of acetaldehyde outside ethanol metabolism in the carcinogenicity of alcoholic beverages: evidence from a large chemical survey. *Food Chem Toxicol.* 2008; 46(8): 2903-2911.
37. Henderson L, Brusick D, Ratpan F, Veenstra G. A review of the genotoxicity of ethylbenzene. *Mutat Res.* 2007; 635(2-3): 81-89.
38. U.S. Environmental Protection Agency. Styrene. Available: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/styrene\\_update\\_2a.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/styrene_update_2a.pdf) [accessed 22 April 2023].
39. Win-Shwe TT, Fujimaki H. Neurotoxicity of toluene. *Toxicol Lett.* 2010; 198(2): 93-99.
40. Rajan ST, Malathi N. Health hazards of xylene: a literature review. *J Clin Diagn Res.* 2014; 8(2): 271-274.
41. Park TW, Hwang SH, Lee KM. Comparison of meta-analysis results with and without adjustment for healthy worker effect on the association between occupational exposure to trichloroethylene and cancer risk. *J Environ Health Sci.* 2014; 40(5): 385-396.
42. Kumagai S, Sobue T, Makiuchi T, Kubo S, Uehara S, Hayashi T, et al. Relationship between cumulative exposure to 1,2-dichloropropane and incidence risk of cholangiocarcinoma among offset printing workers. *Occup Environ Med.* 2016; 73(8): 545-552.
43. Weber LW, Boll M, Stampfl A. Hepatotoxicity and mechanism of action of haloalkanes: carbon tetrachloride as a toxicological model. *Crit Rev Toxicol.* 2003; 33(2): 105-136.
44. Valdiviezo A, Brown GE, Michell AR, Trinconi CM, Bodke VV, Khetani SR, et al. Reanalysis of trichloroethylene and tetrachloroethylene metabolism to glutathione conjugates using human, rat, and mouse liver in vitro models to improve precision in risk characterization. *Environ Health Perspect.* 2022; 130(11): 117009.

#### 〈저자정보〉

우재민(연구원), 김동준(연구원), 신지훈(연구원),  
민기홍(연구원), 이채관(교수), 양원호(교수)