

대기오염배출시설에서의 휘발성유기화합물 배출특성에 관한 연구

조완철*, 김시영, 최성우, 정승열, 이주희, 강종민, 차영욱

산업환경팀

A Study on the Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Air Pollution Discharge Facilities

Wan-cheol Cho*, Siyoung Kim, Seong-woo Choi, Seung-yeol Jeong, Joo-hee Lee,
Jong-min Kang, Young-wook Cha

Industrial Environment Team

Abstract

Volatile organic compounds (VOCs) are frequently generated in workplaces that use organic solvents. VOCs are toxic substances and generate secondary pollutants such as organic aerosol and ozone. In this study, the characteristics of VOCs in emission gas were evaluated for 30 workspaces in Busan. Total hydrocarbon(THC) concentration was 4.4 ~ 3046.2 ppm at the front of prevention facility and 1.9 ~ 120.0 ppm after passing through the prevention facility. Hexane and acetone, which have a relatively high detection frequency and concentration, have been found to be the main sources of VOCs. Among the specific air pollutants, ethylbenzene was detected, and odorous substances such as methyl ethyl ketone, isobutyl alcohol, methyl isobutyl ketone, toluene, butyl aceate, and xylene were detected. It is possible to emit VOCs at a lower concentration than when using oil paint, so the carcinogenicity of exhaust gas can be reduced and the effect of contributing to ozone generation can be expected. It judged to be a phenomenon that occurs because the inflow concentration is low, not because the adsorption efficiency of the water-based paint is excellent. By treating VOCs with a direct oxidation facility, air pollutants from oil-based paint can be stably removed. However, it may be difficult to meet appropriate operating conditions when substances with a narrow range of inflammability coexist. In addition, the electrostatic precipitator used for dust removal in the Tenter facility was not effective in removing VOCs.

Key words : THC, VOCs, GC-MS, SIFT-MS, POCP

I. 서론

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 유기화합물 중 증기압이 높아 비점이 낮은 물질로, 상온·상압에서 가스 상태로 존재하는 물질이다. 휘발성유기화합물이 대기 중에 노출되면, Fig. 1과 같이 황산화물, 질소산화물, 입자상 물질 등과 결합하여 Secondary Organic Aerosol(SOA)을 생성하고 일련의 산화·환원반응을 통해 이산화질소의 축적을 유발하여 자외선 공존 하에 오존 생성반응을 유도한다.¹⁾
²⁾ 따라서 휘발성유기화합물은 그 자체로 인체 독성을 띄는 오염물질이고 동시에 미세먼지와 오존과 같은 2차 오염물질을 생성시키는 전구물질로 작용하기 때문에 대기 중에서 적절한 관리가 요구된다. 휘발성유기화합물은 물질의 특성에 따라 2차 오염물질 생성에 기여하는 정도가 상이하어, SOA formation potential, ozone formation potential과 같은 지표를 이용하여 평가되고 있다.^{3), 4)}

국내에서 연간 배출되는 휘발성유기화합물은 약 1,048,000 ton으로, 전체 배출량의 53.8%가 유기용제 사용으로 발생하고 18.0%는 생산공정에서 발생하는 등 대기오염물질 배출 사업장은 휘발성유기화합물 발생에 가장 크게 기여하고 있다.⁵⁾ 부산시의 경우에는 연간 배출되는 휘발성유기화합물은 약 42,945 ton이고 대기오염물질 배출 사업장에서 발생하는 배출량이 81.2%로, 국내 평균보다 웃돌고 있는 현실이다.⁶⁾ 이에 따라 사업장의 휘발성유기화합물 배출량을 저감하기

위해 환경부에서는 「대기환경보전법」제44조의2 및 「대기환경보전법 시행규칙」제61조의2에 따라 2020년 1월 1일부터 도료의 휘발성유기화합물 함유 기준을 강화시키고 있기 때문에 시중에 판매되는 도료가 유성 도료에서 수성 도료로 대체되는 등 휘발성유기화합물의 배출특성이 기존과는 달라지고 있는 현실이다. 또한 대기오염물질 배출 사업장에서 취급하는 유기용제는 사업장의 업종 및 사용 원료에 따라 달라지고 배출방지시설의 구성에 영향을 주기 때문에 사업장에 따라 휘발성유기화합물의 배출특성은 다양하게 나타난다. 현재 다수의 사업장에서는 휘발성유기화합물 처리를 위해 활성탄 흡착시설을 이용하고 있으나 일부 사업장에서는 휘발성유기화합물의 함량이 높은 도료 사용으로 인해 배출허용기준 준수와 활성탄 관리 측면에서 어려움을 겪고 있어 고농도의 휘발성유기화합물을 안정적으로 처리할 수 있는 직접연소(Regenerative Thermal Oxidation, RTO)에 의한 시설을 운영하기도 한다.⁷⁾

본 연구에서는 부산시 관내 대기오염물질 배출 사업장 중 휘발성유기화합물을 배출하는 사업장 중 일부를 선별하여 배출가스를 포집한 후 기체크로마토그래피 질량분석기(Gas Chromatography Mass Spectrometer, GC-MS) 및 선택적 다중이온 질량분석기(Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometer, SIFT-MS)로 분석한 다음 사업장에서 발생하는 휘발성유기화합물의 배출특성을 평가하여 휘발성유기화합물의 관리방안 마련을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

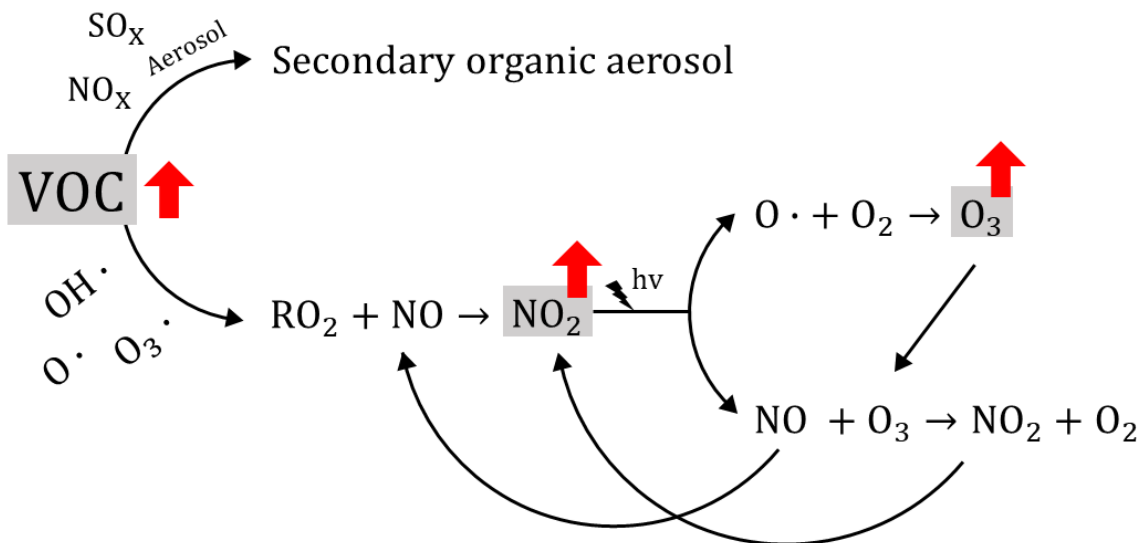


Fig. 1. Secondary pollutant generation mechanism of VOCs.

II. 연구방법

2.1. 연구 대상

부산시 관내 대기오염물질 배출 사업장 중 휘발성유기화합물을 배출하는 사업장으로, 자동차 정비업 7개소, 화학제품 제조업 5개소, 가죽 제조업 2개소, 금속제품 제조업 7개소, 도장처리업 3개소, 고무제품 제조업 2개소, 섬유가공업 3개소로 총 30개소를 선정하였

으며 각 사업장의 시설 및 원료에 관한 사항, 샘플의 개수는 Table 1에 나타났다. 선정된 사업장의 배출시설은 총 32개로 도장시설이 21개, 혼합시설 5개, 다림질시설 3개, 저장시설 2개, 인쇄시설 1개이고 이에 따른 방지시설은 활성탄 흡착에 의한 시설 26개, 전기집진시설 3개, 직접연소에 의한 시설 2개, 세정집진시설 2개로 구성되어 있다. 원료의 성상이 유성인 배출시설

Table 1. Sampling workspaces for VOCs emission.

Workspace		Emission facility	Prevention facility	Type of material	Number of samples	
A	Automobile maintenance	A-1	Painting	Adsorption(AC*)	Oil-based paint	2 (In/Out**)
		A-2	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint	2 (In/Out)
		A-3	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint/ Gloss coating	4 (In/Out)
		A-4	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint	2 (In/Out)
		A-5	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint/ Gloss coating	4 (In/Out)
		A-6	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint	2 (In/Out)
		A-7	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint	1 (Out)
B	Chemical manufacturing	B-1	Mixing	Adsorption(AC)	Oil-based paint	1 (Out)
		B-2-1	Storage	Adsorption(AC)	Water-based paint	1 (Out)
		B-2-2	Mixing	Adsorption(AC)	Oil-based paint	1 (Out)
		B-2-3	Mixing	Adsorption(AC)	Oil-based paint	1 (Out)
		B-3	Storage	Adsorption(AC)	Water-based paint	1 (Out)
C	Leather manufacturing	B-4	Mixing	Adsorption(AC)	Oil-based paint (heat resistance)	1 (Out)
		B-5	Mixing	Adsorption(AC)	Polyurethane	1 (Out)
		C-1	Painting	Wet scrubber	Oil-based paint	2 (In/Out)
D	Metal product manufacturing	C-2	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint	2 (In/Out)
		D-1	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
		D-2	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
		D-3	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
		D-4	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
		D-5	Painting	Adsorption(AC)	Water-based paint	2 (In/Out)
		D-6	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
D-7	Painting	RTO**	Oil-based paint	2 (In/Out)		
E	Paint treatment	E-1	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	1 (Out)
		E-2	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
		E-3	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
F	Rubber product manufacturing	F-1	Painting	Adsorption(AC)	Oil-based paint	2 (In/Out)
		F-2	Painting	RTO	Oil-based paint	2 (In/Out)
G	Printing	G-1	Printing	Adsorption(AC)	Ink	2 (In/Out)
H	Textile processing	H-1	Tenter → wet scrubber	Electric precipitator	Textile oil	2 (In/Out)
		H-2	Tenter → wet scrubber	Electric precipitator	Textile oil	2 (In/Out)
		H-3	Tenter → wet scrubber	Electric precipitator	Textile oil	2 (In/Out)

AC* : Activated carbon

RTO** : Regenerative thermal oxidation

In/Out*** : Inflow/Outflow of prevention facility

은 22개로 유성 도료를 다루는 시설이 17개(열저항성 도료 1개 포함), 폴리우레탄 제조하는 시설이 1개, 잉크 사용시설 1개, 첨유유제 사용시설이 3개이고 원료의 성상이 수성인 배출시설은 10개로 모두 수성 도료를 사용하는 시설이다. 시료 채취 지점은 방지시설 전·후단으로 하였으나 공정 구성의 문제로 방지시설 전

단으로 접근하기 어려운 도장시설(A-7, E-1)과 화학물질 제조시설에서의 밀폐된 혼합·저장시설(B-1, B-2, B-3, B-4, B-5)에서는 전단에서의 시료 채취를 생략하였다. 또한, 다림질시설(H-1, H-2, H-3)에서는 배출시설로 접근이 불가하여 방지시설 전단에서 시료 채취는 생략하였으나, 세정집진시설을 거친 후 전기집진

Table 2. Target compounds for analysis

	Analyte	Chemical formula	Molecular weight(g/mol)	$\log K_{ow}^*$	IARC group** (Carcinogenic)	POCP ^{9)***}	Analysis method
Specific air hazardous substance	Acrylonitrile	C ₃ H ₃ N	53.06	0.25	2B	-	GC-MS
	Dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	84.93	1.25	2B	-	
	Chloroform	CHCl ₃	119.38	1.97	2B	1	
	1,2-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	98.96	1.45	2B	4	
	Benzene	C ₆ H ₆	78.11	2.13	1	3	
	Carbon tetrachloride	CCl ₄	153.82	2.83	2B	-	
	Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃	131.39	2.53	1	23	
	Tetrachloroethylene	C ₂ Cl ₄	165.83	2.53	2A	2	
	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.17	3.15	2B	34	
Styrene	C ₈ H ₈	104.14	2.95	2A	33		
Odor substance	Methyl ethyl ketone	C ₄ H ₈ O	72.11	0.29	-	28	GC-MS
	Isobutyl alcohol	C ₄ H ₁₀ O	74.12	0.8	-	-	
	Methyl isobutyl ketone	C ₆ H ₁₂ O	100.16	1.31	2B	65	
	Toluene	C ₇ H ₈	92.14	2.73	3	36	
	Butyl acetate	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.16	1.78	-	22	
	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.16	3.12	3	91	
	m-Xylene			3.2	3	111	
p-Xylene	3.15			3	88		
Carbonyl sulfide	COS	60.07	-1.33	-	-	SIFT-MS	
Ethylene oxide	C ₂ H ₄ O	44.052	-0.3	1	1		
Isooctane	C ₈ H ₁₈	114.23	4.5	-	-		
1,4-Dioxane	C ₄ H ₈ O ₂	88.11	-0.27	2B	-		
Epichlorohydrin	C ₃ H ₅ ClO	92.53	0.26	2A	-		
Isopropyl benzene	C ₉ H ₁₂	120.2	3.66	2B	24		
n-Butyraldehyde	C ₄ H ₈ O	72.12	0.88	-	63		
Hexane	C ₆ H ₁₄	86.18	3.9	-	36		
Carbon disulfide	CS ₂	60.07	2.16	-	-		
Acetone	C ₃ H ₆ O	58.08	-0.24	-	8		
Vinyl acetate	C ₄ H ₆ O ₂	86.09	0.93	2B	-		
Tetrahydrofuran	C ₄ H ₈ O	72.10	0.46	-	-		
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.16	3.4	-	38		
Methyl chloride	CH ₃ Cl	50.49	0.91	3	1		
Formaldehyde	CH ₂ O	30.03	0.35	1	67		
Trimethylamine	C ₃ H ₉ N	59.1	0.16	-	-		
Urethane	C ₃ H ₇ NO ₂	89.09	-0.15	2A	-		
Acrolein	C ₃ H ₄ O	56.06	-0.01	3	-		

K_{ow}^* : Octanol-water partition coefficient

IARC group** : International Agency for Research on Cancer

- Group 1 : Carcinogenic to humans

- Group 2A : Probably carcinogenic to humans

- Group 2B : possibly carcinogenic to humans

- Group 3 : Not classifiable as to its carcinogenicity in humans

POCP*** : Photochemical ozone creation potential

시설로 유입되는 관로에 측정공이 존재하여 전기집진 시설 전·후단에서 시료 채취 하였다. 한편, 수성 도료가 사용되는 배출시설에서 광택 코팅작업을 이어서 진행되는 경우(A-3, A-5)에는 사용되는 도료에 따라 시료를 분리하여 채취하였다.

2.2. 시료 채취 및 분석

2.2.1. 시료 채취

연구용 시료는 대기오염공정시험기준⁸⁾에 따라 사업장의 정상 가동 중에 진공펌프와 시료 채취 주머니(10 L-bag sampler, Supelco, USA)를 이용하여 약 2 L/min의 유량으로 10 L를 채취하였다. 시료 채취는 방지시설 전·후단에서 동시에 실시하였고 방지시설 후단에서는 배출관로에 설치된 측정공에서 채취하였고 전단에서는 방지시설 유입구에 최대한 밀착하여 채취하였다. 이와 같은 방법으로 채취된 시료는 차광이 가능한 조건에서 실험실로 운반되었다.

2.2.2. 시료 분석

실험실로 운반된 시료는 총탄화수소(Total hydrocarbon, THC)를 측정후에 휘발성유기화합물을 분석하였다. 휘발성유기화합물 중 「대기환경보전법」제2조에 따른 특정대기유해물질에 해당되는 물질 10종과 「악취방지법」제2조에 따른 지정악취물질에 해당되는 물질 8종을 대상으로 GC-MS로 분석하였고 SIFT-MS로 시료를 분석한 다음 발생 빈도가 높은 18종의 물질을 추가로 선정하여 결과로 활용하였다. 분석 물질 중 Styrene은 특정대기유해물질이며 동시에 지정악취물질에도 해당된다. 분석 물질의 화학식, 분자량, 옥탄올-물 분배계수, 발암성, 오존생성기여도에 관한 정보는 Table 2와 같다.

옥탄올-물 분배계수(K_{ow})는 서로 혼합되지 않는 옥탄올과 물 두 용매에서 물질이 분포하고 있는 정도를 나타내는 계수로 다음과 같이 나타낸다.^{10), 11)}

$$K_{ow} = \frac{C_o}{C_w}$$

- K_{ow} : 옥탄올/물 분배계수
- C_o : 옥탄올 층의 물질 농도
- C_w : 물 층의 물질 농도

옥탄올-물 분배계수는 친유성/친수성을 물질을 판단할 때 사용되며, $\log K_{ow}$ 값이 양의 값을 나타내면 친

유성이고 음의 값을 나타내면 친수성이라는 것을 의미한다.

발암성은 IARC (International Agency for Research on Cancer)에서 사용하는 4단계 IARC Group(1, 2A, 2B, 3)으로 나타냈다. IARC Group은 발암성의 정도는 $1 > 2A > 2B > 3$ 과 같고 IARC Group 1은 인체 발암성 물질, IARC Group 2A는 인체 발암성 추정 물질, IARC Group 2B는 인체 발암성 가능 물질, IARC Group 3 인체 발암성 미분류 물질을 의미하고 이 외의 물질은 인체 비발암성 추정 물질로 분류된다.¹²⁾

본 연구에서는 2차 오염물질의 생성 기여도를 평가하기 위해 오존생성기여도를 사용하였고 오존생성기여도의 지표는 유럽에서 휘발성유기화합물의 물질별 오존 생성량을 표준화하기 위해 마련한 POCP(Photochemical ozone creation potential)를 사용하였다.^{13), 14)} POCP는 기준물질 Ethene에 의한 오존발생량을 기준으로 하여 대상 물질에 의한 오존발생량을 나타낸 지표로 다음과 같이 나타낸다.⁹⁾

$$POCP = \frac{\text{대상 VOC에 의한 오존 발생량}}{\text{Ethene에 의한 오존 발생량}} \times 100$$

따라서 POCP의 값이 높을수록 오존생성기여도가 큰 것을 의미한다.

2.2.2.1. THC 분석

THC는 불꽃이온화검출기법(Flame ionization detector method, FID)으로 분석하였다. 분석 장비는 휴대용 측정 장비인 TVA-2020(Thermo, USA)를 사용하였고 제로가스(고순도 공기)와 스펠가스(메탄)로 교정한 다음 시료 분석에 사용되었다.

2.2.2.2. 휘발성유기화합물 분석 (GC-MS)

기체크로마토그래피는 기체상의 시료 혹은 기화된 시료를 운반가스로 분리하여 컬럼에 전개시킨 후 각 성분을 크로마토그래프로 분석하는 방법이고 질량분석기는 컬럼에서 분리된 화합물을 이온화시킨 후 이온의 질량과 전하의 비를 분석하는 장비로, 화합물을 ng 단위까지 고감도로 분석할 수 있는 장비이다. 본 연구에서의 분석 시료는 휘발성유기화합물 샘플러(Mini pump VOCs sampler, TAEWON SIBATA MP-Σ 30KN II)를 통해 0.25 L/min의 유량으로 1L를 흡착관

(Air Toxics, PerkinElmer N9307050)에 흡착시킨 다음 열 탈착(Thermal desorption, TD) 장치를 거쳐서 GC-MS로 분석하였다. 분석에 사용된 열 탈착기 및 GC-MS의 운전 조건은 Table 3과 같다.

2.2.2.3. 휘발성유기화합물 분석 (SIFT-MS)

SIFT-MS는 기체크로마토그래피에서 사용되는 컬럼에 의한 분리 방법과는 달리 대기 중의 산소, 질소, 수분을 microwave plasma로 이온화 시킨 H_3O^+ , NO^+ , O_2^+ 와 분석 물질을 반응시켜 화학적으로 분리하여 분석하는 방법이다. 각 이온을 선택적으로 flow tube에 흘려주면, 가스상의 분석 물질과의 화학적 반응을 통해 새로운 이온이 생성되고 생성된 이온을 quadrupole mass filter로 여과시켜 분석하고자 하는 이온만을 검출기에서 정량하게 된다. 물질별 고유 반응 속도 상수를 이용하여 분석하기 때문에 표준물질 없이도 농도 확인이 가능하고 시료를 농축하지 않아도 ppt까지 분석 가능한 것이 장점이다. 본 연구에 사용

된 SIFT-MS는 Voice 200 ultra(Syft technologies LTd.)이고 분석조건은 Table 4와 같다.

III. 연구결과

3.1. THC 측정 결과

사업장별 THC 측정 결과 및 방지시설 조건은 Table 5에 나타났다. 방지시설로 유입된 THC 농도는 4.4 ~ 3046.2 ppm이고 유출 농도는 1.9 ~ 120.0 ppm으로 처리효율은 6.4 ~ 99.7%였다. THC 측정결과는 유성·수성 도로 사용 여부에 따라 편차는 있지만, 금속제품 제조업, 도장처리업, 고무제품 제조업의 도장시설에서 THC 농도가 상대적으로 높게 나타났으나 가죽제품 제조업의 도장시설에서는 THC 농도가 도로의 성상과 관계없이 상대적으로 낮게 나타났다. 한편, 섬유가공업체의 전기집진시설 전·후단에서는 THC 농도 차가 미미하게 나타났기 때문에 전기집진시설로 휘발성유기화합물 제거 효과를 기대하기는 어려울 것으로 판단된다. 방지시설의 유입 대비 유출 농도가 높게 나온 도장

Table 3. Thermal desorber and GC-MS operating conditions for analysis

Thermal desorber				GC/MS	
Model : PerkinElmer Turbomatrix650				Model : PerkinElmer Clarus 690 / SQ8T	
Time		Temperature		Column	Elite 5MS(60 m x 0.32 mm x 1.0 μm)
Purge	1 min	Valve	250 °C	Split ratio	5:1
	(flow rate : 40 mL/min)				
Trap	Temp. hold : 6 min	Tube	320 °C	oven temp.	38 °C (5 min) $\xrightarrow{10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$ 150 °C (0min) $\xrightarrow{15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}}$ 250 °C (0min)
	Desorb. flow : 6.1 min				
	Desorb. : 6 min				
Cycle	35 min	Trap	40 °C/sec	Ionization	El(Electron ionization)
Column flow	1.2 mL/min	Transfer	200 °C	Mass range	45 - 300
Outlet split	50 mL/min			Temperature	250 °C

Table 4. SIFT-MS operating conditions for analysis

Parameter		Value
Temperature	Sample plate	120 °C
	Flow tube	120 °C
	Hex heater	120 °C
Pressure	Wet source	850 mTorr
	Dry source	3.50 Torr
	Flow tube	110 mTorr
	Upstream	$2.5e^{-0.4}$ Torr
	Downstream	50 mTorr

시설은 4개 시설(A-3, D-3, D-6, F-1)로, 시설 유입구가 넓고 도장작업이 간헐적이기 때문에 채취 지점에 의한 농도 편차에 의해 발생한 현상으로 판단된다.

유성 도료를 사용하는 시설에서 흡착시설로 처리한 경우에 유입되는 THC 농도는 19.5 ~ 3,046.2 ppm이

고 유출농도는 10.9 ~ 120.0 ppm로 흡착 처리효율은 20.2 ~ 98.4%로 나타났고 수성 도료를 사용하는 시설에서 흡착시설로 처리한 경우에 유입되는 THC 농도는 6.4 ~ 43.6 ppm 유출 농도는 4.4 ~ 20.0 ppm으로 흡착 처리효율이 6.7 ~ 64.1%로 나타났다. 또한 자동차

Table 5. THC concentration and prevention facility conditions by workspace

Workspace ^{0W}	THC-In* (ppm)	THC-Out** (ppm)	Prevention facility	Facility flow (m ³ /min)	AC***	
					period of use (month)	replacement cycle (month)
Automobile maintenance						
A-1 ⁰	180.4	120.0	Adsorption(AC)	400	2	6
A-2 ^W	43.6	20.0	Adsorption(AC)	400	3	6
A-3 ^W	22.5	8.1	Adsorption(AC)	380	3	6
A-3(coating) ⁰	47.4	73.4				
A-4 ^W	15.8	14.8	Adsorption(AC)	400	8	12
A-5 ^W	6.4	5.3	Adsorption(AC)	280	11	12
A-5(coating) ⁰	101.1	80.8				
A-6 ^W	12.5	9.8	Adsorption(AC)	400	12	12
A-7 ^W	-	20.4	Adsorption(AC)	380	11	12
Chemical manufacturing						
B-1 ⁰	-	40.4	Adsorption(AC)	160	1	12
B-2-1 ^W	-	6.1	Adsorption(AC)	30	1	3
B-2-2 ⁰	-	98.8	Adsorption(AC)	100	1	3
B-2-3 ⁰	-	120.0	Adsorption(AC)	200	1	3
B-3 ^W	-	16.8	Adsorption(AC)	180	5	6
B-4 ⁰	-	71.3	Adsorption(AC)	180	1	12
B-5 ⁰	-	61.1	Adsorption(AC)	350	2	3
Leather manufacturing						
C-1 ⁰	19.5	10.9	Wet scrubber	400	-	-
C-2 ^W	7.8	6.1	Adsorption(AC)	184	12	12
Metal product manufacturing						
D-1 ⁰	3046.2	58.5	Adsorption(AC)	30	11	12
D-2 ⁰	102.8	37.5	Adsorption(AC)	160	11	12
D-3 ⁰	23.6	31.6	Adsorption(AC)	650	11	12
D-4 ⁰	670	56.2	Adsorption(AC)	400	10	12
D-5 ^W	10.7	4.4	Adsorption(AC)	1800	1	12
D-6 ⁰	62.5	66.7	Adsorption(AC)	300	2	12
D-7 ⁰	600.8	27.6	RTO****	550	-	-
Paint treatment						
E-1 ⁰	-	52.3	Adsorption(AC)	750	9	12
E-2 ⁰	771	159	Adsorption(AC)	450	2	8
E-3 ⁰	2721	43.8	Adsorption(AC)	230	10	12
Rubber product manufacturing						
F-1 ⁰	75.9	81.2	Adsorption(AC)	100	5	6
F-2 ⁰	551.0	1.9	RTO	1045	-	-
Printing						
G-1 ⁰	1072.2	27.6	Adsorption(AC)	150	4	12
Textile processing						
H-1 ⁰	4.4	4.1	Electric precipitator	320	-	-
H-2 ⁰	5.8	4.9	Electric precipitator	350	-	-
H-3 ⁰	20.0	21.2	Electric precipitator	300	-	-

THC-In* : Inflow THC of prevention facility
 THC-Out** : Outflow THC of prevention facility
 AC*** : Activated carbon
 0 : Oil-based material
 W : Water-based material

정비업체 중 A-5는 동일한 시설에서 수성 도료와 광택 코팅제를 모두 사용한 시설로 THC 유입 농도는 각각 6.4 ppm, 101.1 ppm 유출 농도는 5.3 ppm, 80.8 ppm으로 처리효율이 16.9%, 20.2%로 나타났다. 활성탄 교체 시기 등이 다르고 시설별로 조건이 달라 직접적인 비교는 어렵지만 수성 도료를 사용하는 시설에서 활성탄 흡착으로 처리하는 것이 유성 도료를 사용하는 시설에서 만큼 효율적이지 않은 것으로 판단된다. 한편, 직접연소에 의한 시설로 유성 도료를 처리한 D-7, F-2의 경우 유입 THC 농도는 각각 600.8 ppm, 551.0 ppm 유출 농도는 27.6 ppm, 1.9 ppm으로 처리효율은 95.4%, 99.7%로, 고농도의 유입 농도에도 안정적인 처리가 가능한 것으로 판단된다.

3.2. 휘발성유기화합물 측정 결과

3.2.1. 특정대기유해물질, 지정악취물질 분석 결과 (GC-MS)

휘발성유기화합물 중 특정대기유해물질, 지정악취물질의 GC-MS 분석 결과는 Table 6과 같다. 특정대기유해물질 10종 중 0.01 ppm 이상 검출된 물질은 Dichloromethane, Ethylbenzene, Styrene이고 지정악취물질은 모두 검출되었다. 자동차 정비업체에서 도료에 의해 배출될 수 있는 주요 특정대기유해물질은 Ethylbenzene이고 광택 코팅작업 도중에 Styrene이 배출되는 것으로 나타났으며, 지정악취물질은 사업장에 따라 편차가 있지만 모두 검출되었고 유성도료 및 광택코팅제로 작업을 하는 경우 Toluene, Butyl acetate, Xylene의 배출농도가 수성도료를 작업할 때 보다 높게 나타나는 것으로 확인된다. 가죽 제조업체에서는 특정대기유해물질인 Ethylbenzene, 지정악취물질 중 Toluene, Xylene류가 배출되나 다른 사업장에 비해 THC 농도가 낮게 배출되는 것과 같이 비교적 낮은 농도로 배출되었다. 금속제품 제조업, 도장처리업, 고무제품 제조업에서 배출되는 휘발성유기화합물 중 특정대기유해물질, 지정악취물질은 자동차 정비업체와 유사하였으나 사업장에서 사용하는 도료의 특성에 따라 일부 물질의 유입 부하량이 높은 것으로 확인되었다. 사업장 D-1은 방지시설 유입 THC 농도가 3046.2 ppm으로 가장 높은 시설로 휘발성유기화합물 중 Ethylbenzene이 94.51 ppm, Methyl isobutyl ketone이 471.39 ppm, Xylene류가 67.47 ppm으로 높게 나타났고 D-4 사업장은 THC 유입 농도가 670 ppm으로 Ethylbenzene이 26.01 ppm, Xylene류가

36.68 ppm, D-7 사업장은 THC 농도가 600.8 ppm으로 Toluene이 26.07 ppm, E-3 사업장은 THC 유입 농도가 2721 ppm으로 Methyl ethyl ketone이 203.12 ppm, Methyl isobutyl ketone이 159.09 ppm, Toluene이 163.88 ppm으로 나타나는 등 유입 부하가 높은 사업장에서 배출되는 특정대기유해물질, 지정악취물질의 차이는 없었으나 특정 성분의 함량이 상대적으로 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 도료 제조업체를 포함한 화학제품 제조업체에서는 도장작업에서 검출된 물질 외 추가로 배출되는 물질은 없었고 잉크를 사용하는 인쇄업체 G-1에서는 특정대기유해물질의 배출은 없었으나 지정악취물질 중 Methyl isobutyl ketone이 주요 원료로 사용되어 관리에 주의가 필요한 것으로 판단된다. 섬유가공업체의 다림질 시설의 경우 휘발성유기오염물 중 특정대기유해물질, 지정악취물질이 일부 검출될 것으로 예상하였으나, 다림질시설에서 세정집진시설 통과 후, 전기집진시설 전·후단에서는 0.01 ppm이상 검출되지 않는 것으로 확인되었다.

사업장 A-6, E-2에서는 THC 농도가 감소했음에도 배출구에서 Dichloromethane 농도가 증가한 경우로, 방지시설 유입가스에서 Dichloromethane이 검출되었기 때문에 부산물로 생성된 것이기 보다는 Dichloromethane이 경쟁 흡착 조건에서 흡착 효율이 떨어지기 때문에 발생하는 용출 현상일 것으로 판단되며^{15), 16)}, 이에 따라 다양한 종류의 휘발성유기화합물이 공존하는 조건에서의 경쟁흡착·용출 특성에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 유성 도료작업에 의해 발생하는 휘발성유기화합물을 활성탄 흡착으로 처리하는 경우 Ethylbenzene의 농도가 3.08 ppm, Toluene이 8.23 ppm, Butylacetate가 5.67 ppm으로 배출되는 등 사업장의 조건에 따라 특정대기유해물질과 지정악취물질이 상대적 고농도로 배출되었으나 수성 도료작업을 하는 사업장에서는 시설 조건과 관계없이 특정대기유해물질과 지정악취물질 배출농도를 대부분 1.0 ppm 이하로 배출하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 휘발성유기화합물 함유 기준 강화로 인한 수성 도료 사용 증가 현상은 특정대기유해물질, 지정악취물질 저감 측면에서 효과가 있는 정책으로 판단된다. 직접연소에 의한 시설로 유성 도료를 처리한 D-7, F-2 사업장의 Toluene 배출 농도는 각각 4.36 ppm, 1.45 ppm으로 다른 물질에 비해 비교적 높게 배출되었는데 이는 톨루엔의 연소범위가 1.4 ~ 6.7%

차 정비업체의 주요 배출물질은 Acetone이고 유성 도료를 사용하는 경우 Epichlorohydrin, Hexane이 배출되고 광택 코팅작업 중에는 Epichlorohydrin, Isopropyl benzene, Carbon disulfide가 배출되는 것으로 확인되었다. 가죽제조업체에서는 유성 도료를 사용하는 C-1 사업장에서 Hexane과 Acetone이 배출되는 것으로 나타났다. 금속제품 제조업, 도장처리업, 고무제품 제조업체의 일부 배출시설에서 다른 시설과는 다르게 Carbonyl oxide, Ethylene oxide, n-Butyraldehyde, Tetrahydrofuran, Methyl chloride, Formaldehyde, Trimethyl amine, Acrolein 등의 물질이 검출되기도 하였으나 대부분 0.1 ppm 수준, 1.0 ppm미만으로 배출되었다. 한편, 화학제품 제조업체 중 B-2-3의 유성 도료를 제조하는

혼합시설에서 이례적으로 Cyclohexane이 12.33 ppm으로 배출되기도 하였고 Polyurethane을 제조하는 B-5의 혼합시설에서는 Urethane이 0.82 ppm로 배출되었다. 잉크를 사용하는 인쇄업체 G-1에서는 Hexane, Carbon disulfide, Ethylene oxide가 주요 배출원이나 방지시설을 거쳐 0.50 ppm 미만으로 배출되는 것으로 나타났다. 섬유가공업체의 다림질시설에서 세정집진시설을 거친 전기집진시설 전·후단에서는 특별하게 높은 농도로 배출되는 물질은 없으나, THC 농도가 방지시설 유입 20.0 ppm 유출 21.2 ppm로 비교적 높은 사업장 H-3에서는 Ethylene oxide, Hexane, Carbon disulfide, Acetone, Tetrahydrofuran, Formaldehyde, Acrolein 등이 0.10 ~ 0.32 ppm 수준으로 배출되는 것을 확인하였다. 따라서 다림질시설

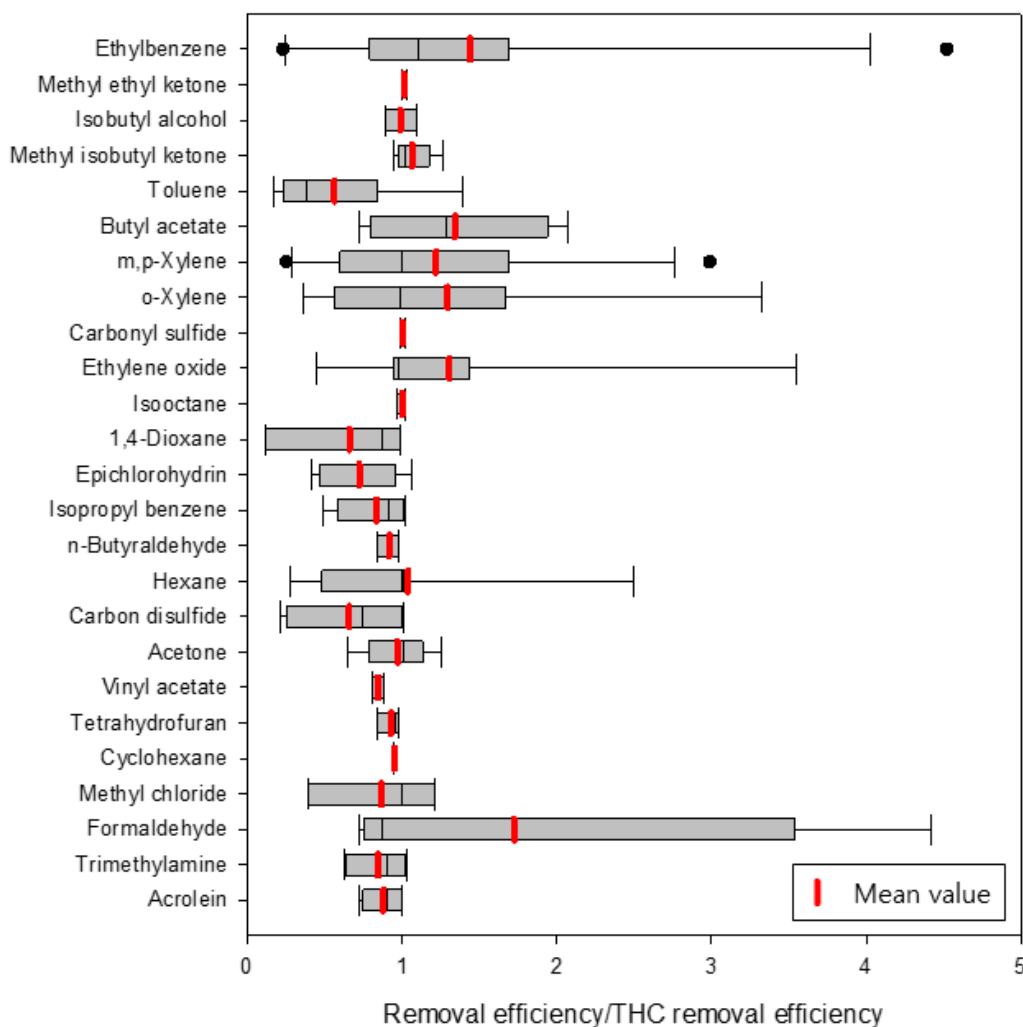


Fig. 2. Removal efficiency/THC removal efficiency in adsorption facility for each VOC.

의 작업조건, 시설 노후화, 세정집진시설 속 세정액의 오염에 의해 휘발성유기화합물이 발생될 수 있는 것으로 판단된다.

3.3. 휘발성유기화합물의 흡착 효율 평가

다수의 사업장에서 방지시설로 활성탄 흡착시설을 사용하고 있기 때문에 휘발성유기화합물의 흡착 효율 평가가 필요하다고 판단하였으나 사업장별로 검출되는 휘발성유기화합물의 농도 범위가 다양하고 오염물질의 활성탄 제거 정도는 흡착제의 상태·양 유입농도 등 시설의 운전 조건에 따라 달라지기 때문에 휘발성유기화합물의 종류에 따른 흡착제거 효율을 단순히 제거 효율로만 평가하기에는 객관성에 문제가 있다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 각 휘발성유기화합물의 흡착 효율을 보다 객관적으로 평가하기 위해 물질별로 THC 제거 효율 대비 해당 물질의 제거 효율의 비를 구하여 각 물질을 휘발성유기화합물의 평균적인 제거효율과의 비교를 통해 평가하였다(Fig. 2).

또한 저농도로 검출된 오염물질로 흡착 효율을 평가하는 것이 객관적이지 못한다고 판단하여 Table 6, Table 7의 휘발성유기화합물 농도를 기준으로 방지시설 전단 대비 후단의 농도가 낮았던 시설에서 0.10 ppm 이상 검출된 물질만을 대상으로 흡착 효율을 평가하였다. 여러 종류의 오염물질이 공존하는 조건에서 THC 제거 효율 대비 휘발성유기화합물의 제거 효율의 평균값을 비교하면 Formaldehyde가 1.72로 가장 높았고 Toluene이 0.56으로 가장 낮게 나타났다. 일반적으로 친유성이 큰 물질일수록 흡착효율이 높은 것으로 알려져 있으나⁹⁾ Formaldehyde와 Toluene의 $\log K_{ow}$ 값은 각각 2.73, 0.35로 Toluene이 보다 친유성 물질임에도 처리효율이 낮은 것으로 나타났다. 특정대기유해물질인 Ethylbenzene은 1.44로 THC 처리효율 대비 처리효율이 우수한 것으로 나타났고 지정악취물질 중 Methyl ethyl ketone, Isobutyl alcohol, Methyl isobutyl ketone, Butyl acetate, Xylene류는 0.99 ~ 1.34으로 THC보다는 처리효율이 높은 것으로 나타났지만 Toluene만은 THC보다 처리효율에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 가장 높은 빈도로 검출된 Hexane, Acetone은 각각 1.04, 0.97로 THC와 유사한 정도로 제거되는 것으로 나타났다. 한편, 수성 도료를 사용하는 시설에서는 Toluene의 처리효율 비가 0.17 ~ 0.38, Xylene류의 값이 0.25 ~ 0.36으로 전체 평균값에 미치지 못하였는데, 이는 수

성 용매와 공존하는 휘발성유기화합물의 경우 유성 용매와 공존하는 경우 대비 흡착효율이 떨어지기 때문에 나타나는 현상일 수 있으나 수성 용매 조건에서는 휘발성유기화합물의 유입 부하가 낮은 점도 원인이 될 수 있다고 판단하였다.

3.4. 배출가스의 발암성 및 오존생성기여도 평가

사업장 배출가스 내 휘발성유기화합물에 의한 오염도 평가를 위해 배출가스의 발암성과 오존생성기여도를 평가하였다. 발암성 지표로 IARC group, 오존생성기여도는 POCP를 이용하였고 사업장별 오염도는 배출가스의 농도와 시설 유량을 고려한 IARC group substance emission과 POCP-weighted 값으로 평가하였다(Table 8). 휘발성유기화합물 분석 결과를 기준으로 평가한 IARC group 1(발암성 물질)의 배출량은 0.003 ~ 0.163 L/min, IARC group 2A(인체 발암성 추정 물질) 배출량은 0.001 ~ 0.492 L/min, IARC group 2B(인체 발암성 가능 물질) 배출량은 0.001 ~ 2.883 L/min, IARC group 3(인체 발암성 미분류 물질)은 0.003 ~ 3.056 L/min이고 POCP-weighted는 1.78 ~ 1515.77로 나타났다. IARC group에 분류된 물질의 배출량은 전체적으로 수성 도료를 사용하는 시설에서 낮게 나타났으나 자동차 정비업체 A-7에서는 Ethylene oxide, Formaldehyde의 농도가 상대적으로 높아 IARC group 1의 배출량이 0.163 L/min으로 가장 높게 나타났다. 이는 도료 종류의 문제보다는 시설관리 측면에서 발생한 현상으로 판단되며, 동일 시설 대비 휘발성유기화합물이 높게 나타난 섬유가공업체 H-3에서도 IARC group 1의 배출량이 0.131 L/min으로 상대적으로 높게 나타나는 등 사업장에서 대기오염 방지시설 관리 소홀에 따라 발암성 물질이 발생할 수 있기 때문에 시설관리에 주의가 필요할 것으로 판단된다. IARC group 2A의 배출량이 상대적으로 많은 시설에서는 Styrene, Epichlorohydrin의 배출량이 많았고 IARC group 2B의 경우 Ethylbenzene, Methyl isobutyl ketone, IARC group 3의 경우 Toluene, Xylene이 주요 배출원으로 나타났다. 배출가스의 POCP-weighted 값은 주로 Ethylbenzene, Toluene, Butyl acetate, Xylene류, Hexane의 영향으로 발생하였고 자동차 정비업체, 화학제품 제조업체, 도장처리업체, 금속제품 제조업체의 배출시설에서 상대적으로 높았으며 휘발성유기화합물 배출량이 적었던 인쇄업체와 섬유가공업체에서는

POCP-weighted 값이 각각 42.19, 3.08 ~ 29.06으로 상대적으로 낮게 나타났다. 마찬가지로 수성 원료를 사용하는 경우 POCP-weighted 값은 1.78 ~ 153.00으로 유성 원료를 사용하는데 비해 상대적으로 오존생성

물질을 적게 배출하는 것으로 나타났다. 방지시설로 직접연소에 의한 시설을 사용하는 사업장 D-7, E-3의 POCP-weighted 값은 각각 657.15, 234.86으로 배출 가스의 THC 농도가 낮음에도 불구하고

Table 8. IARC group substance and POCP-weighted of emission gas by workplace

Workplace ^{O/W}	IARC group 1 substance emission* (L/min)	IARC group 2A substance emission (L/min)	IARC group 2B substance emission (L/min)	IARC group 3 substance emission (L/min)	POCP-weighted**
Automobile maintenance					
A-1 ^O	0.096	0.492	0.418	3.056	1242.55
A-2 ^W	0.055	0.032	0.339	0.069	72.44
A-3 ^W	0.030	0.017	0.084	0.012	27.18
A-3(coating) ^O	0.031	0.213	0.879	2.783	1515.77
A-4 ^W	0.064	0.017	0.021	0.406	76.09
A-5 ^W	0.025	0.008	0.009	0.143	21.83
A-5(coating) ^O	0.055	0.121	0.468	2.451	1258.81
A-6 ^W	0.026	0.025	0.188	0.366	125.82
A-7 ^W	0.163	0.070	0.055	0.321	153.00
Chemical manufacturing					
B-1 ^O	0.033	0.023	0.474	0.611	274.87
B-2-1 ^W	0.003	0.001	0.045	0.055	21.49
B-2-2 ^O	0.056	0.050	0.286	0.372	208.88
B-2-3 ^O	0.088	0.100	0.641	0.599	764.02
B-3 ^W	0.012	0.044	0.082	0.167	51.28
B-4 ^O	0.014	0.012	0.387	0.533	283.89
B-5 ^O	0.085	0.302	0.084	0.288	53.00
Leather manufacturing					
C-1 ^O	0.026	0.004	0.004	0.027	159.8
C-2 ^W	0.008	0.003	0.001	0.005	1.78
Metal product manufacturing					
D-1 ^O	0.005	0.001	0.232	0.043	90.52
D-2 ^O	0.004	0.047	0.080	0.252	113.41
D-3 ^O	0.084	0.343	0.009	0.003	95.06
D-4 ^O	0.073	0.041	1.256	1.572	917.85
D-5 ^W	0.035	0.011	0.006	0.044	9.56
D-6 ^O	0.038	0.118	0.407	1.467	667.91
D-7 ^O	0.063	0.070	0.522	2.792	657.15
Paint treatment					
E-1 ^O	0.078	0.035	0.090	0.892	338.23
E-2 ^O	0.071	0.139	1.566	2.823	1080.98
E-3 ^O	0.032	0.080	2.883	1.926	1225.29
Rubber product manufacturing					
F-1 ^O	0.006	0.010	0.102	0.331	117.32
F-2 ^O	0.048	0.022	0.015	1.531	234.86
Printing					
G-1 ^O	0.046	0.004	0.150	0.005	42.19
Textile processing					
H-1 ^O	0.015	0.001	0.004	0.005	3.08
H-2 ^O	0.052	0.002	0.006	0.004	7.62
H-3 ^O	0.131	0.004	0.041	0.049	29.06

IARC group substance emission*(L/min)

$$= \sum[\text{concentration(ppm)} \times \text{Facility flow(m}^3\text{/min)}] / 1000$$

POCP-weighted** = $\sum[\text{emission} \times \text{POCP value}] / 1000$

-emission = concentration(ppm) × M.W./22.4m³ × Facility flow(m³/min)

^O : Oil-based material

^W : Water-based material

POCP-weighted값이 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 연소효율이 떨어져 배출가스에 포함되어 있는 Toluene의 영향으로 판단된다.

Table 6, 7의 휘발성유기화합물 유입·배출농도를 비교했을 때, IARC group 1에 해당되는 주요 오염물질은 Ethylene oxide, Formaldehyde이고 IARC group 2A의 경우 Styrene, Epichlorohydrin, IARC group 2B의 경우 Ethylbenzene, Methyl isobutyl ketone으로, 해당 물질들은 사업장 안전 관리와 대기질 개선의 측면에서 적절한 관리가 요구되는 발암성 물질로 판단된다. 특히 특정대기유해물질인 Ethylbenzene과 지정악취물질인 Methyl isobutyl ketone은 발암성 물질 중 검출 빈도와 농도가 높게 나타났기에 특별한 관리가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 물질별 POCP 값과 검출 농도를 고려해보면 사업장에서 발생하는 Ethylbenzene, Styrene, Methyl isobutyl ketone, Toluene, Butyl acetate, Xylene, Isopropyl benzene, n-Butyraldehyde, Hexane, Cyclohexane, Formaldehyde가 대기 중에서 오존을 생성할 수 있는 주요 오염물질이고 특히 특정대기유해물질인 Ethylbenzene, Styrene, 지정악취물질인 Methyl ethyl ketone, Methyl isobutyl ketone, Toluene, Butyl acetate, Xylene이 검출 빈도와 농도가 높기 때문에 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 대기오염물질 배출 사업장에서 휘발성 유기화합물의 배출 특성을 파악하기 위해 부산지역 사업장 30개소(자동차 정비업체 7개소, 화학물질 제조업체 5개소, 가죽 제조업체 2개소, 금속제품 제조업체 7개소, 도장처리업체 3개소, 고무제품 제조업체 2개소, 인쇄업체 1개소, 섬유가공업체 3개소) 내 32개 배출시설을 대상으로 방지시설 전·후단의 시료를 채취하여 THC를 측정하고 다음 GC-MS와 SIFT-MS를 이용하여 휘발성유기화합물을 분석하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 조사된 사업장 방지시설의 THC는 4.4 ~ 3046.2 ppm, 유출 THC는 1.9 ~ 120.0 ppm의 농도로 배출되었고 검출되는 휘발성유기화합물 중 Hexane과 Acetone이 검출 빈도와 농도가 높기 때문에 두 물질이 휘발성유기화합물 주요 배출원인 것으로 판

단된다.

2. 자동차 정비업체, 화학제품 제조업체, 금속제품 제조업체, 도장처리업체, 고무제품 제조업체 에서 유성 도료를 사용하는 경우 특정대기유해물질 중 Ethylbenzene, Dichloromethane, Styrene과 지정악취물질 8종(Methyl ethyl ketone, Isobutyl alcohol, Methyl isobutyl ketone, Toluene, Butyl acetate, m,p,o-Xylene)이 검출될 수 있기 때문에 적절한 시설 관리가 요구되며 자동차 정비업체의 경우 수성 도료로 전환되고 있음에도 광택 코팅 작업 시 특정대기유해물질과 지정악취물질이 고농도로 배출될 수 있기 때문에 적절한 관리가 필요하다고 판단된다.
3. 자동차 정비업체, 화학제품 제조업체, 가죽 제조업체 금속제품 제조업체, 도장처리업체, 고무 제품 제조업체 등에서 수성 도료를 사용하는 경우 휘발성 유기화합물의 유입 부하와 배출량이 줄어들어 배출가스의 인체 발암성, 오존생성기여도의 저감 효과를 기대할 수 있기 때문에 사업장에서 수성도료를 사용하는 것을 적극 권장하되, 활성탄 흡착으로 수성 도료에 의한 오염물질을 처리하는 측면에서는 처리효율을 극대화 할 수 있는 방안과 대안에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
4. 사업장에서 발생하는 주요 발암성 물질은 Ethylene oxide, Formaldehyde, Styrene, Epichlorohydrin, Ethylbenzene, Methyl isobutyl ketone이고 오존생성에 기여하는 주요 물질은 Ethylbenzene, Styrene, Methyl isobutyl ketone, Toluene, Butyl acetate, Xylene, Isopropyl benzene, n-Butyraldehyde, Hexane, Cyclohexane, Formaldehyde이며, 일부 물질은 시설 관리가 소홀할 경우 발생량이 급등할 가능성이 있기 때문에 배출 사업장에서의 적절한 관리와 대기환경관리 측면에서 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.
5. 대기오염 방지시설 중 흡착에 의한 시설의 경우에는 여러 종류의 휘발성유기화합물이 공존하는 경쟁 흡착 조건에서의 휘발성유기화합물 흡착 특성에 관

한 연구가 필요할 것으로 판단되며 직접연소에 의한 시설로 처리하는 경우에는 오염원의 종류에 따라 연소 효율이 떨어지는 휘발성유기화합물이 포함될 수 있기 때문에 시설 조건에 맞는 적절한 연소 조건을 도출해야 될 것으로 판단된다.

6. 섬유가공업체의 다림질시설 배출가스를 세정집진 시설로 처리하는 경우 시설의 운전 조건 및 관리 상태에 따라 인체 발암성이 높은 휘발성유기화합물이 검출될 수 있는 것을 확인하였고 세정집진시설 후단을 전기집진시설로 처리하는 경우 휘발성유기화합물의 농도 변화가 적은 점을 통해 전기집진시설이 입자상 물질 포집 효과 외 휘발성유기화합물 제거 효과를 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

참고문헌

1. S. J. Kim, S. J. Lee, H. Y. Lee, J. M. Son, H. B. Lim, H. W. Kim, H. J. Shin, J. Y. Lee and S. D. Choi, Characteristics of volatile organic compounds in the metropolitan city of Seoul, South Korea: Diurnal variation, source identification, secondary formation of organic aerosol, and health risk, *Science of The Total Environment*, 833(3), 156344(2022).
2. R. J. Mayorga, Z. Zhao, H. Zhang, Formation of secondary organic aerosol from nitrate radical oxidation of phenolic VOCs: Implications for nitration mechanisms and brown carbon formation, *Atmospheric Environment*, 244(1), 117910(2021).
3. Y. Xiong, J. Zhou, Z. Xing and K. Du, Optimization of a volatile organic compound control strategy in an oil industry center in Canada by evaluating ozone and secondary organic aerosol formation potential, *Environmental Research*, 191, 110217(2020).
4. H. Yang, S. K. Gupta, N. B. Dhital, L. Wang and S. P. Elumalai, Comparative investigation of coal- and oil-fired boilers based on emission factors, ozone and secondary organic aerosol formation potentials of VOCs, *Journal of Environmental Sciences*, 92, pp245-255(2020).
5. 2021 White paper of environment, *Ministry of Environment, Republic of Korea*, p297(2022).
6. 환경부 국가미세먼지정보센터, 배출량 통계, <https://www.air.go.kr/>
7. J. S. Kim, S. C. Choi, S. H. Jeong, C. S. Mock and D. B. Kim, Characteristics of Flue Gas Using Direct Combustion of VOC and Ammonia, *The Korean Society of Clean Technology*, 28(2), pp.131-137(2022).
8. 대기오염공정시험기준 배출가스 중 휘발성유기화합물(VOCs) 시료채취방법, 국립환경과학원, ES 01113.b
9. H. R. Cheng, H. Guo, S. M. Saunders, S. H. M. Lam, F. Jiang, X. M. Wang and I. J. Simpson, Assessing photochemical ozone formation in the Pearl River Delta with a photochemical trajectory model, *Atmospheric Environment*, 44, pp.4199-4208(2010).
10. T. Kim and H. Park, Computational prediction of octanol-water partition coefficient based on the extended solvent-contact model, *Journal of Molecular Graphics and Modeling*, 60, pp.108-117
11. H. R. Chang, B. J. Lee, K. Kim and Y. H. Kim, Computational prediction of octanol-water partition coefficient based on the extended solvent-contact model, *Environmental Health and Toxicology*, 20(4), pp.351-358(2005).
12. <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>
13. S. H. M. Lam, S. M. Saunders, H. R. Cheng and H. Guo, Examination of regional ozone formation: POCPs for Western Australia and comparisons to other continents, 74, pp.194-200(2015).
14. R. G. Derwent, M. E. Jenkin, N. R. Passant and M. J. Pilling, Photochemical ozone creation potentials (POCPs) for different emission sources of organic compounds under European conditions estimated with a Master Chemical Mechanism, *Atmospheric Environment*, 41(12), pp.2570-2579(2007).

15. I. I. Laskar, Z. Hashisho and J. H. Phillips, J. E. Anderson, M. Nichols, Competitive adsorption equilibrium modeling of volatile organic compound (VOC) and water vapor onto activated carbon, *Separation and Purification Technology*, 212, pp.632-640(2019).
16. M. A. Khan, S. W. Kim, R. A. K. Rao, R. A. I. Abou-Shanab, A. Bhatnagar, H. Song and B. H. Jeon, Adsorption studies of Dichloromethane on some commercially available GACs: Effect of kinetics, thermodynamics and competitive ions, *Journal of Hazardous Materials*, 178, pp.963-972(2010).
17. M. Zang, C. Zhao, Y. Wang and S. Chen, A review of recent advances in catalytic combustion of VOCs on perovskite-type catalyst, *Journal of Saudi Chemical Society*, 23(6), PP.645-654(2019).
18. Q. Wang, K. L. Yeung and M. A. Banares, Ceria and its related materials for VOC catalytic combustion: A review, *Catalysis Today*, 356(1), pp.141-154(2020).
19. H. Li, Y. Cao, D. Zhang and B. Pan, pH-dependent KOW provides new insights in understanding the adsorption mechanism of ionizable organic chemicals on carbonaceous materials, *Science of The Total Environment*, 618(15), pp.269-275(2018).