

논문

생활밀착형 사업장에서 배출되는 오존전구물질을 포함한 VOCs의 목록화 및 오존생성 기여도 평가

Inventory of VOCs Including Ozone Precursors Emitted from Residential Workplaces and Evaluation of Contribution to Ozone Formation

채정석, 채종성, 김민영, 전준민, 이태정¹⁾, 조영민^{1)*}
(*)그린환경종합센터, ¹⁾경희대학교 환경학 및 환경공학과

Jeong-Seok Chae, Jong-Seong Chae, Min-Young Kim, Jun-Min Jeon,
Tae-Jung Lee¹⁾, Young-Min Jo^{1)*}

Department of R&D Planning and Research, Green Environmental Complex Center,
Suncheon, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Science & Environmental Engineering, Kyung Hee University,
Yogin, Republic of Korea

접수일 2022년 1월 25일
수정일 2022년 2월 15일
채택일 2022년 2월 16일

Received 25 January 2022
Revised 15 February 2022
Accepted 16 February 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-201-2485
E-mail : ymjo@khu.ac.kr

Abstract In this study, volatile organic compounds (VOCs) containing ozone precursors frequently found in workplaces such as car repair (painting) shop, beauty salon, and barbecue restaurants near residential areas were characterized in terms of their contribution to ozone and secondary organic aerosol (SOA) formation. The car repair (painting) shops A, B, and C released the relatively high concentration of butyl acetate (range of 1.45 ppm to 3.48 ppm). In the case of the car repair (painting) shop D, the concentration of n-undecane was highest with 0.03 ppm. Hexane and benzene were found the most at 0.46 ppm in the beauty salon and the barbecue restaurants, respectively. Among the ozone forming substances indicating high values of photochemical ozone creation potential (POCP), average 19.3% of m,p-xylene was found at car repair (painting) shops, 33.6% of hexane in the beauty salons, and 34.2% of pentane in barbecue restaurants. Toluene and benzene showed high contribution to secondary organic aerosol potential (SOAP). Toluene recorded 23.6% and 43.6% of SOAP contribution in car repair (painting) shops and beauty salons, respectively. Benzene recorded a relatively high SOAP contribution with 65.7% in the barbecue restaurants.

Key words: VOCs, Ozone precursor, POCP, SOAP, Residential workplace

1. 서론

최근 미세먼지에 의한 국민들의 건강 우려에 대한 걱정이 증가함에 따라, 정부와 관련 연구기관들은 미세먼지 농도 저감을 위하여 환경기준의 강화에 관한 다양한 연구를 수행하고 있다. 휘발성유기화합물 (volatile organic compounds, VOCs)은 질소산화물, 황산화물, 암모니아와 함께 광화학 반응 및 물리·화학

적 반응을 거쳐 오존, 2차 유기에어로졸 (Second Organic Aerosol) 및 PAN (peroxyacetyl nitrate) 등 2차 오염 물질을 생성하는 전구물질이다 (Park *et al.*, 2018; Boudries *et al.*, 1994). 이와 같은 2차 오염물질은 초미세먼지인 PM_{2.5}를 형성하는데 중요한 역할을 한다 (Yuan *et al.*, 2013; Gentner *et al.*, 2012). 또한, 오존은 0.1 ppm 이상의 농도에서 인체 건강에 악영향을 주며 (Derwent *et al.*, 2007; Schwehr, 2004), 장기간 노출 시

각종 암을 유발할 수 있다(EPA, 2007). 2차 오염물질은 1차 오염물질에 비해 생성 및 소멸과정이 복잡하기 때문에 1차 오염물질의 배출 단계에서 관리를 하는 것이 중요하다(Menachem and Ralph, 2008; Shon, 2006).

2022년 국내 대기환경보전법에서는 총 37종의 VOCs를 규제 대상물질로 고시하고 있으며, 이들의 배출시설을 지정하고 규제하고 있다(MOE, 2021). VOCs의 주요 배출원은 석유정제 및 석유화학제품 제조시설, 저유소, 주유소, 발전시설, 각종 운송수단 및 유기용제를 사용하는 페인트, 폐기물 처리시설 등과 같은 인위적 배출원과 자연적 배출원이 있다(Yujing *et al.*, 2002). 이러한 인위적 배출원 중에서 대도시에서 특히 문제가 되는 것은 인쇄, 세탁, 미용, 음식 및 자동차 수리 도장업과 같은 생활밀착형 업종이다. 대부분의 업체가 소규모이고 방지시설을 설치하기 어려운 영세업체이기 때문에 배출 물질을 관리하기 어렵다(Kim and Yoo, 2017; NIER, 2016).

환경부 대기정책시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 2017년 배출량 통계에 따르면 전국의 VOCs 총 배출량은 1,047.6천 ton이며 이 중 유기용제가 53.8%, 생산 공정에서 18.0%, 생물성 연소에서 8.3%로 유기용제 사용에 의한 배출량이 가장 많은 것으로 조사되었다(NIER, 2020). 유기용제 배출업종 중에서 생활밀착형 업종은 자동차수리업, 세탁업(Lee *et al.*, 2019; Kim and Yoo, 2017), 인쇄업(Chae *et al.*, 2019; Ahn *et al.*, 2018) 3종으로 10.4%이다. 서울의 경우 총 배출량은 66.9천 ton이며 이 중 유기용제가 82.4%, 도로이동오염원이 11.2%로 전국 통계보다 유기용제 비율이 훨씬 높다. 또한 생활밀착형 업종의 배출량은 21.8%로 도시의 경우 생활밀착형 업종에서 배출되는 VOCs 배출량이 전국 통계보다 훨씬 많아 문제가 되고 있다. 도시의 경우 위에서 언급한 생활밀착형 업종 이외에 기타 유기용제 분류의 가정 및 상업용에서 47.2%, 생물성 연소의 고기 및 생선구이에서 0.05%가 배출되고 있다. 본 연구에서는 도심지역의 생활밀착형 배출업종인 자동차 수리 도장업체, 미용업체, 고기

구이 식당 3개 업종을 대상으로 오존전구물질을 포함한 VOCs의 성분에 대한 목록화 연구를 수행하였다. 또한 3개 업종 현장에서 배출되는 물질을 분석하여 오존생성 기여도 및 2차 에어로졸 형성 잠재력을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 생활밀착형 VOCs 배출시설

본 연구에서 선정한 VOCs를 배출하는 생활밀착형 업종은 3개 업종으로 CAPSS에서 분류한 자동차 수리업과, 분류는 되지 않았으나 기타 유기용제 배출원에서의 미용업체 그리고 생물성 연소의 고기구이 식당이다. 자동차 수리업에서 발생하는 VOCs는 대부분 도장시설에서 발생하기 때문에 도장시설을 갖춘 업체를 선정하였다. 본 연구의 대상 도장시설은 활성탄을 이용한 방지시설을 설치하고 운영하고 있다. 업체마다 방지시설의 활성탄 유지관리 상태가 다르기 때문에 활성탄 교체를 하지 않은 2개 업체와 최근에 방지시설을 설치한 2개 업체 총 4개 업체를 연구 대상으로 선정하였다. 자동차 수리 도장업의 시료를 채취하는 위치는 방지시설 후단이다. 2개 업체는 수도권 소도시에 위치하며 한 곳은 공단지역에 위치하고 한 곳은 교외에 위치하고 있다. 2개 업체는 대도시 상업 지구에 위치하고 있다.

미용업체의 경우 대부분 방지시설을 설치하지 않기 때문에 배출되는 성분이 환기에 따라 미용실 외부로 그대로 방출된다. 미용업체는 대도시 주거지역에 위치하고 있으며 4개의 좌석이 있는 크기이다. 시료를 채취하는 장소는 미용실 중앙이며 펌(perm)이나 염색을 하는 손님이 3명 있을 때 시료를 채취하였다. 음식업종에서 고기구이 식당을 선택한 이유는 고기를 굽는 과정 및 사용되는 가스 연료에서 VOCs 성분이 배출되기 때문이다. 음식업체는 대도시 상가지역에 위치하고 있으며 가스 연료를 사용한다. 음식업의 경우 대부분의 업체가 방지시설을 설치하지 않으나 후드를

이용한 환기시설은 설치하기 때문에 환기시설에서 시료를 채취하였다.

2.2 시료채취 및 분석방법

생활밀착형 업종의 시료는 고농도로 예상되어 1차적으로 tedlar bag에 시료를 채취한 후 포집된 시료를 Tenax-TA (Supelco, USA)가 충전된 흡착튜브에 교정이 완료된 mini-pump (SIBATA MP-Σ30, Japan)를 사용하여 흡착시켰다. 이때 흡착관의 파과부피를 고려하여 채취 유량과 부피를 조절하여 진행하였다. 시료채취를 완료한 흡착튜브는 4°C 이하에서 냉장 보관 후 GC/MSD (Agilent HP-6890, USA)로 분석하였다. VOCs의 정량·정성에 사용한 표준혼합물질은 오존전구물질 50종 (AccuStandard, Inc., USA)과 TO-14 표준물질 42종 (Supelco, USA), CHEM 표준물질 10종 (CHEM service, Inc., USA), 단일물질 Isopropyl alcohol 1종 (Sigma Aldrich, USA)이며 중복되는 항목을 제외하면 총 88종 분석하였다.

분석조건은 표 1에 나타내었다. GC/MSD의 분석조건은 열 탈착 장치로부터 2차 열 탈착되어 시료가 주입이 되는 순간부터 5분 동안 solvent delay를 시켜 초기 저분자 물질의 분석을 최소화하였으며, 50°C에서 10분간 유지를 하고, 5°C/min의 온도 증가속도로 220°C까지 온도를 서서히 올려주었다. 220°C에서 10분 동안 유지를 한 후, post run 5분을 설정하여 측정

대상물질이 아닌 고분자의 유입으로 인한 기기의 오염을 줄여주었다. 분석 자료의 품질보증 (Quality assurance, QA)에 대한 평가는 선행 연구 (Lee *et al.*, 2021; Chae *et al.*, 2019)에 나타난 바와 같으며, 그 결과는 검정곡선의 결정계수 (R^2)는 0.99 이상, 분석에 대한 재현성을 나타내는 상대표준편차 (relative standard deviation, RSD)는 7회 반복 분석한 결과, 0.52%~4.32% 수준이었다.

2.3 오존생성 기여도 평가

VOCs는 화학종별로 광화학 반응속도와 반응생성물이 다르기 때문에 오존생성 기여도 또한 다르다. 일반적으로 오존생성 기여도는 MIR (Maximum Incremental Reactivity), POCP (Photochemical ozone creation potential), RIR (Relative Incremental Reactivity) 등을 이용하여 평가한다. MIR은 화학종 단위 무게당 1시간 동안 생성할 수 있는 최대 오존량이다 (Carter *et al.*, 1995). POCP는 MIR의 짧은 모사 시간과 같은 문제를 해결하기 위하여 유럽에서 개발된 화학종 단위 무게당 4~6일 동안 생성할 수 있는 오존량이다 (Derwent *et al.*, 1996). RIR은 우리나라 수도권에서 VOCs 화학종 단위 무게당 5시간 동안 생성한 오존량 (Lee *et al.*, 2007a)으로, 5시간은 수도권에서 평균 공기정어리 이동시간으로 산출되며 이때 NO_x 자료가 요구된다. 평가 방법에 따라 체류시간이 다르기 때문에 동일 화

Table 1. GC/MSD analysis and thermal desorption condition.

ATD (Markers)		GC/MSD (HP-6890/5973)	
Parameter	Conditions	Parameter	Conditions
Flow path temperature	120°C	Initial temp.	50°C (10 min)
Prepurge time	1.0 min	Oven ramp rate	5°C/min
Desorb temp.	300°C	Final temp.	220°C (10 min)
Desorb time	10 min	Post run	250°C (5 min)
Trap flow	50 mL/min	Column flow	1.2 mL/min
Trap purge time	1 min	Detector type	Quadrupole
Trap purge flow	30 mL/min	Q-pole temp.	150°C
Trap low temperature	-20°C	MS Source temp.	230°C
Trap high temperature	300°C	Mass range	35~350 amu
Trap desorb time	4 min	Electron energy	70 eV
Split flow	15 mL/min		

학종에 대한 MIR과 POCP 값이 다르게 나타나는 경우가 많다. 본 연구에서는 POCP를 사용하여 생활밀착형 업종에서 오존전구물질을 분석하여 각각의 화학종별 오존생성 기여도를 산출하였다. 식 (1), (2)를 이용하여 본 연구에서 분석한 VOCs 성분의 오존생성 기여율을 구하였다.

$$POCP_{weight\ emission} = \sum E_i \times POCP_i \quad (1)$$

$$POCP\ contribution_i (\%) = (POCP_i / \sum POCP) \times 100 \quad (2)$$

여기서, E_i = Concentration of VOC species i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),

$POCP_i$ = POCP values for VOC_i

2.4 2차 유기에어로졸 형성 기여도 평가

2차 유기에어로졸 (SOA, Secondary Organic Aerosol)은 VOCs가 대기 중에서 다양한 화학반응을 통하여 생성하는 입상 물질이다 (Lim *et al.*, 2016; Yuan *et al.*, 2013). 복잡한 반응으로 인하여 현재까지도 계속 연구되고 있다. 2차 유기에어로졸은 $PM_{2.5}$ 발생 질량의 27%, 2차 무기에어로졸은 $PM_{2.5}$ 발생 질량의 31% 정도를 차지하고 있다 (Huang *et al.*, 2014). 2차 유기에어로졸 형성 잠재력 (SOAP, Secondary Organic Aerosol Potential)은 POCP와 마찬가지로 SOA 형성에

대한 VOCs의 기여도를 추정하는 데 이용된다. 본 연구에서 사용한 VOCs의 POCP (Derwent *et al.*, 2007) (ethylene = 100), SOAP (Derwent *et al.*, 2010) (toluene = 100)를 표 2에 나타내었다. 본 연구에서 이용한 SOAP 기여도 산출 계산식은 식 (3)과 (4)이다.

$$SOAP_{weight\ emission} = \sum E_i \times SOAP_i \quad (3)$$

$$SOAP\ contribution_i (\%) = (SOAP_i / \sum SOAP) \times 100 \quad (4)$$

여기서, E_i = Concentration of VOC species i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),

$SOAP_i$ = SOAP values for VOC_i

3. 결과 및 고찰

3.1 VOCs 배출 목록화

생활밀착형 VOCs 배출사업장에 해당하는 3개 업종인 자동차 수리 도장업체, 미용업체, 고기구이 식당에서 대기 시료를 채취하여 분석하였다. 분석 후 검출된 성분 수를 오존전구물질과 기타 VOCs로 구분하여 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 자동차 수리 도장업체는 활성탄을 이용한 방지시설을 설치한 업체 4곳 (A, B, C, D)이며, 다섯 번째와 여섯 번째는 각각 헤어 미

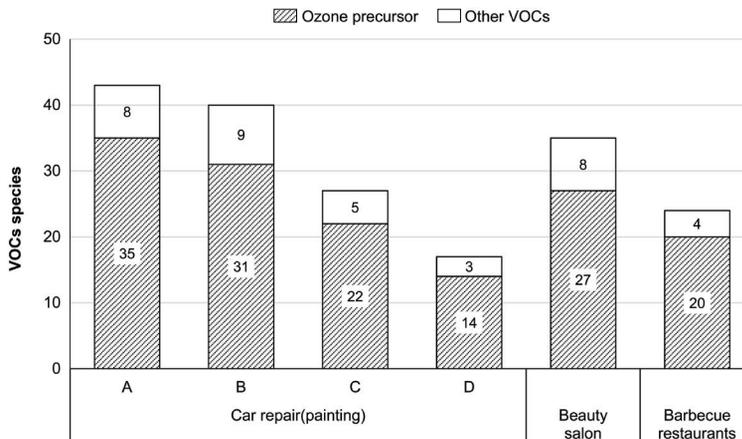


Fig. 1. Number of detected VOCs according to residential workplace type.

Table 2. Compilation of the POCP and SOAP for VOCs.

Compound	MDL	M.F	POCP	SOAP	Compound	MDL	M.F	POCP	SOAP
Isobutane	0.10	C4H10	28	0	Decane	0.03	C10H22	36	7
1-Butene	0.09	C4H8	104	1.2	1,2,4-Trimethylbenzene	0.05	C9H12	110	20.6
Butane	0.07	C4H10	31	0.3	m-Diethylbenzene	0.03	C10H14	65	-
trans-2-Butene	0.08	C4H8	116	4	p-Diethylbenzene	0.08	C10H14	65	-
cis-2-Butene	0.09	C4H8	113	3.6	n-Undecane	0.08	C11H24	36	16.2
Isopentane	0.04	C5H12	348	0.2	n-Dodecane	0.08	C12H26	33	34.5
1-Pentene	0.12	C5H10	95	0	Freon 12	0.05	CCl2F2	-	-
Pentane	0.04	C5H12	40	0.3	Methyl chloride	0.04	CH3Cl	1	-
Isoprene	0.11	C5H8	114	1.9	Freon 114	0.06	C2Cl2F4	-	-
trans-2-Pentene	0.08	C5H10	111	3.1	Vinyl chloride	0.04	C2H3Cl	-	-
cis-2-Pentene	0.06	C5H10	109	3.1	1,3-Butadiene	0.09	C4H6	89	1.8
2,2-Dimethylbutane	0.05	C6H14	22	-	Methyl bromide	0.10	CH3Br	-	-
Cyclopentane	0.10	C5H10	50	-	Ethylchloride	0.10	C2H5Cl	11	-
2-Methylpentane	0.13	C6H14	41	0	Freon 11	0.10	CCl3F	-	-
3-Methylpentane	0.13	C6H14	43	0.2	Acrylonitrile	0.08	C3H3N	-	-
Hexene	0.12	C6H12	8	0	1,1-Dichloroethene	0.07	C2H2Cl2	-	-
Hexane	0.09	C6H14	40	0.1	Dichloromethane	0.10	CH2Cl2	-	-
Methylcyclopentane	0.11	C6H12	49	-	3-Chloropropylene	0.11	C3H5Cl	-	-
2,4-Dimethylpentane	0.07	C7H16	55	-	Freon 113	0.11	C2Cl3F3	-	-
Benzene	0.07	C6H6	10	92.9	1,1-Dichloroethane	0.05	C2H4Cl2	-	-
Cyclohexane	0.11	C6H12	28	0	cis-1,2-Dichloroethylene	0.05	C2H2Cl2	-	-
2-Methylhexane	0.14	C7H16	32	0	Chloroform	0.03	CHCl3	0	-
2,3-Dimethylpentane	0.08	C7H16	50	0.4	1,2-Dichloroethane	0.10	C2H4Cl2	-	-
3-Methylhexane	0.03	C7H16	42	0	Methyl chloroform	0.12	C2H3Cl3	-	-
2,2,4-Trimethylpentane	0.06	C8H18	60	-	Carbontetrachloride	0.09	CCl4	-	-
Heptane	0.05	C7H16	35	0.1	1,2-Dichloropropane	0.12	C3H6Cl2	-	-
Methylcyclohexane	0.05	C7H14	65	-	Trichloroethylene	0.09	C2HCl3	29	-
2,3,4-Trimethylpentane	0.03	C8H18	60	-	cis 1,3-Dichloropropene	0.08	C3H4Cl2	-	-
Toluene	0.08	C7H8	44	100	trans 1,3-Dichloropropene	0.13	C3H4Cl2	-	-
2-Methylheptane	0.06	C8H18	34	-	1,1,2-Trichloroethane	0.14	C2H3Cl3	-	-
3-Methylheptane	0.07	C8H18	37	-	1,2-Dibromoethane	0.13	C2H4Br2	-	-
Octane	0.03	C8H18	34	0.8	Tetrachloroethylene	0.04	C2Cl4	1	-
Ethylbenzene	0.04	C8H10	46	111.6	Chlorobenzene	0.14	C6H5Cl	-	-
m,p-Xylene	0.03	C8H10	79	75.8	1,1,2,2-Tetrachloroethane	0.19	C2H2Cl4	-	-
Styrene	0.04	C8H8	5	212.3	m-Dichlorobenzene	0.15	C6H4Cl2	-	-
o-Xylene	0.07	C8H10	78	95.5	p-Dichlorobenzene	0.11	C6H4Cl2	-	-
Nonane	0.03	C9H20	34	1.9	o-Dichlorobenzene	0.10	C6H4Cl2	-	-
Isopropylbenzene	0.02	C9H12	32	95.5	1,2,4-Trichlorobenzene	0.16	C6H3Cl3	-	-
n-Propylbenzene	0.01	C9H12	38	109.7	Hexachloro 1,3-butadiene	0.19	C4Cl6	-	-
m-Ethyltoluene	0.02	C9H12	78	100.6	Methyl ethyl ketone	0.09	C4H8O	32	0.6
p-Ethyltoluene	0.02	C9H12	63	69.7	Isobutyl alcohol	0.13	C4H10O	-	-
1,3,5-Trimethylbenzene	0.03	C9H12	107	13.5	Methyl isobutyl ketone	0.06	C6H12O	52	-
o-Ethyltoluene	0.01	C9H12	73	94.8	Butyl Acetate	0.05	C6H12O2	26	0
1,2,3-Trimethylbenzene	0.06	C9H12	105	43.9	Isopropyl alcohol	0.01	C3H8O	-	-

MDL (ppb): Method Detection Limit, MF: Molecular formula, POCP: Photochemical Ozone Creation Potential, SOAP: Secondary Organic Aerosol Potential

용업체와 고기구가 식당이다. 검출된 VOC 성분 수는 업종별로, 그리고 동일업종에도 검출된 성분 수의 차이를 보였다. 자동차 수리 도장업체의 경우 배출되는

성분은 4개 업체에서 17~43개이고 이 중 오존전구물질이 14~35개이다. 미용업체의 배출 성분은 35개이고 이 중 오존전구물질은 27개이다. 고기구가 식당은 배

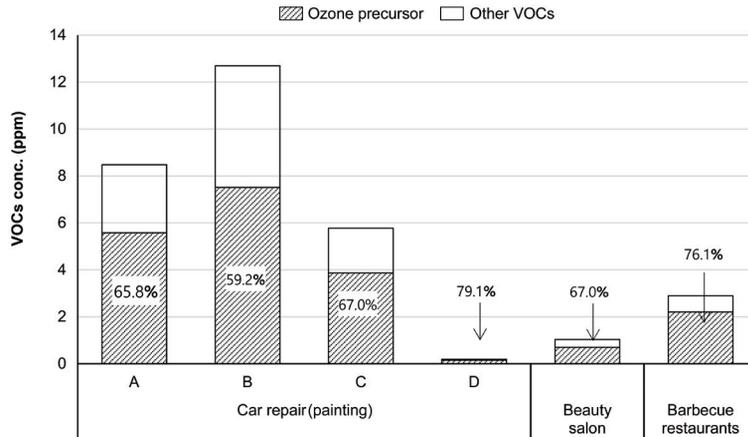


Fig. 2. Concentration summary of VOCs according to residential workplace type.

출 성분은 24개이고 이 중 오존전구물질은 20개로 분석되었다. 3개 업종, 6개 업체에서 검출된 전체 VOC 성분 수는 평균적으로 오존전구물질이 약 81%, 기타 VOCs는 약 19%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

그림 2는 생활밀착형 업종에서 분석된 성분의 평균 농도를 합계하여 나타낸 그림이다. 각각의 성분을 단순히 합계하였으며 이를 통해 업종에 따라 오존전구물질과 기타 성분의 상대적 배출량을 알아보기 위한 그림이다. 가장 VOCs 배출 농도가 높은 업체와 가장 낮은 업체가 자동차 수리 도장업종에서 나타났다. 가장 높은 업체는 B업체(12.70 ppm)이고, 가장 낮은 업체는 D업체(0.19 ppm)로 2개 업체 간의 농도수준이 수십 배 이상 차이를 보였다. 본 연구의 자동차 수리 도장업체는 활성탄을 이용한 방지시설과 부직포 필터를 조합한 간단한 방지시설 형태로 운영 중인 곳들이다.

자동차 도장 공정은 일반적으로 프라이머/서페이스 → 상도 base → 상도 top → 열처리 건조 공정으로 이루어져 있다. 각 공정에서 사용하는 페인트의 종류, 공정 단계 및 도장 시간과 방지시설의 유지관리 상태가 업체마다 다르며, 4개 도장업체 중에서 A, B, C의 3개 업체는 유성 도료를, D업체는 상도 base 작업에 수성 도료를 사용하였다. 또한 C, D업체는 최근에 방지

시설을 설치한 업체이다. 방지시설의 운영 상태에 따라 차이가 발생하고 있고, 특히 수성에 비해 유성 도료를 사용한 업체에서 VOC 농도가 매우 높음을 알 수 있다. 도장업체의 주요 방지시설에 해당하는 활성탄 흡착법은 VOCs 제거에 좋은 방법이지만 활성탄 교체 등 적절한 유지 관리가 매우 중요한 것으로 보고 되어 (Cho *et al.*, 2016; Noh *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2007b), 방지시설 설치 후 세심한 운영이 필요할 것으로 판단된다.

미용업체의 VOC 평균농도 합계는 1.04 ppm, 고기구이 식당은 2.90 ppm으로, 미용업체에서 비교적 낮게 나타났다. 미용업체는 염색 및 펌(perms)에 대한 제품군은 매우 다양하나 자동차 도장업체와 고기구이 업체에 비해서는 실제 배출되는 VOC 농도는 낮게 나타났다. 농도가 낮은 이유는 인체에 사용하는 제품으로 위해성이 비교적 높은 aromatic 계열의 성분이 거의 검출되지 않았기 때문으로 판단된다. 그러나 시료 채취 위치가 자동차 수리 도장업체와 고기구이 식당은 배출구이고, 미용업체는 실내임으로 측정위치 차이, 선정 업체의 대표성 등을 고려했을 시 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 3개 업종, 6개 업체에서 검출된 전체 VOC 합계농도에 대한 오존전구물질의 농도비율은 수성도료를 사용한 자동차 수리 도장

업체 D에서 79.1%, 고기구이 식당에서 76.1% 순으로 높았다. 가장 배출구 농도가 높은 도장업체 B는 59.2%로 오히려 낮게 나타났다.

생활밀착형 업종에서 배출되는 성분을 목록화하기 위해서 분석된 성분의 평균농도와 표준편차를 계산하여 표 3에 제시하였다. 자동차 수리 도장업체 A, B, C업체의 경우 평균농도가 가장 높은 성분은 butyl acetate로 각각 2.45 ppm, 3.48 ppm, 1.45 ppm이다. 오존전구물질 중에서 가장 배출 비율이 높은 성분은 aromatic 계열인 m,p-xylene로 각각 1.41 ppm, 1.68 ppm, 1.31 ppm이다. 자동차 수리 도장업체 D는 다른 업체와 다르게 배출 비율이 가장 높은 성분이 alkene 계열인 n-undecane으로 0.03 ppm이다. 유성 도료를 사용한 A, B, C업체와 수성 도료를 사용한 D업체의 성분과 평균농도가 매우 다름을 알 수 있다.

미용업체에서 가장 많이 배출되는 성분은 오존전구물질인 alkane 계열인 hexane으로 0.26 ppm이고, 고기구이 식당에서 가장 많이 배출되는 성분은 오존전구물질인 alkane 계열인 pentane과 aromatic 계열인 benzene으로 각각 0.46 ppm이다. 고기의 종류 및 굽는 시간에 따라 VOCs의 농도가 매우 다르지만 배출 경향

을 파악하는 데 좋은 기초 자료로 사료된다. 자동차 수리 도장용 도료와 미용업체에서 사용하는 유기용제 제품의 방출량에 대한 선행 연구(Lee et al., 2021) 결과와 비교해 보면 오존전구물질의 경우 유성 도료를 사용하는 A, B, C업체는 주로 aromatic 계열이 분석되어 방출실험과 성분이 유사하다. 그러나 선행 연구의 경우 오존전구물질만 분석하여 본 연구와 같이 CHEM 표준물질 10종과 TO-14의 42종은 분석하지 않아서 절대적인 성분 비교는 한계가 있다. 자동차 수리 도장 업체와 다르게 미용업체는 선행 연구인 방출 실험 결과와 차이가 있다. 선행 연구의 경우 오존전구물질 중에서 aromatic 계열이 70~80%이나 본 연구에서는 aromatic 계열이 12% 정도이다. 방출실험과 배출 성분 차이가 나는 이유는 미용업체는 염색과 펴에 사용하는 유기용제뿐만 아니라 샴푸 및 린스와 같은 다양한 제품군들이 사용되기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 오존생성 기여율 평가

생활밀착형 3개 업종에서 분석된 VOCs의 오존생성 기여율을 POCP 계수를 사용하여 평가하였다. 자동차 수리 도장업체는 4곳 중 B업체 1곳을 선정하였

Table 3. VOCs concentrations measured in residential workplaces (ppmv).

Species	Concentration (mean ± SD)					
	Car repair (painting)				Beauty salons (n=4)	Barbecue restaurant (n=4)
	A (n=3)	B (n=4)	C (n=2)	D (n=1)		
Isobutane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.33 ± 0.12
1-Butene	<0.01	<0.01	N.D	N.D	N.D	0.06 ± 0.02
Butane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.11 ± 0.05
Isopentane	0.01 ± 0.02	<0.01	N.D	0.01	0.08 ± 0.02	N.D
Pentane	<0.01	<0.01	N.D	N.D	0.10 ± 0.02	0.46 ± 0.61
Isoprene	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02 ± 0.00	0.03 ± 0.03
Cyclopentane	<0.01	N.D	N.D	N.D	0.09 ± 0.09	N.D
2-Methylpentane	N.D	N.D	N.D	N.D	<0.01	N.D
3-Methylpentane	<0.01	N.D	N.D	N.D	0.01 ± 0.00	N.D
Hexene	N.D	N.D	N.D	N.D	<0.01	0.22 ± 0.09
Hexane	0.02 ± 0.01	<0.01	N.D	N.D	0.26 ± 0.23	0.15 ± 0.15
Methylcyclopentane	0.01 ± 0.01	N.D	N.D	N.D	<0.01	N.D
2,4-Dimethylpentane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Benzene	<0.01	<0.01	<0.01	N.D	0.01 ± 0.01	0.46 ± 0.16

Table 3. Continued.

Species	Concentration (mean \pm SD)					
	Car repair (painting)				Beauty salons (n=4)	Barbecue restaurant (n=4)
	A (n=3)	B (n=4)	C (n=2)	D (n=1)		
Cyclohexane	0.01 \pm 0.01	< 0.01	0.02 \pm 0.02	N.D	< 0.01	N.D
2-Methylhexane	0.00 \pm 0.01	< 0.01	N.D	N.D	0.01 \pm 0.00	N.D
2,3-Dimethylpentane	< 0.01	< 0.01	N.D	N.D	N.D	N.D
3-Methylhexane	0.01 \pm 0.00	0.00 \pm 0.01	N.D	N.D	0.01 \pm 0.00	N.D
2,2,4-Trimethylpentane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Heptane	0.02 \pm 0.01	0.01 \pm 0.01	N.D	N.D	0.01 \pm 0.00	0.07 \pm 0.04
Methylcyclohexane	0.01 \pm 0.00	0.03 \pm 0.03	N.D	N.D	< 0.01	N.D
2,3,4-Trimethylpentane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Toluene	0.41 \pm 0.20	1.66 \pm 1.28	0.80 \pm 0.38	N.D	0.04 \pm 0.00	0.07 \pm 0.03
2-Methylheptane	< 0.01	0.01 \pm 0.01	< 0.01	N.D	N.D	N.D
3-Methylheptane	N.D	0.01 \pm 0.01	N.D	N.D	N.D	N.D
Octane	< 0.01	0.07 \pm 0.04	0.01 \pm 0.00	N.D	< 0.01	0.08 \pm 0.06
Ethylbenzene	0.48 \pm 0.27	0.72 \pm 0.42	0.36 \pm 0.10	N.D	0.01 \pm 0.00	0.02 \pm 0.01
m,p-Xylene	1.41 \pm 0.67	1.68 \pm 0.65	1.31 \pm 0.25	N.D	< 0.01	0.01 \pm 0.01
Styrene	0.03 \pm 0.02	0.02 \pm 0.02	0.01 \pm 0.00	< 0.01	0.01 \pm 0.00	0.05 \pm 0.04
o-Xylene	0.78 \pm 0.47	1.17 \pm 0.53	0.61 \pm 0.13	N.D	< 0.01	0.01 \pm 0.00
Nonane	0.02 \pm 0.02	0.02 \pm 0.00	0.04 \pm 0.01	N.D	0.01 \pm 0.00	< 0.01
Isopropylbenzene	0.04 \pm 0.03	0.06 \pm 0.03	0.02 \pm 0.00	0.01	N.D	< 0.01
n-Propylbenzene	0.14 \pm 0.10	0.11 \pm 0.06	0.04 \pm 0.01	0.01	N.D	N.D
m-Ethyltoluene	0.50 \pm 0.34	0.44 \pm 0.19	0.13 \pm 0.03	0.01	0.01 \pm 0.00	N.D
p-Ethyltoluene	0.17 \pm 0.11	0.18 \pm 0.08	0.06 \pm 0.01	< 0.01	N.D	< 0.01
1,3,5-Trimethylbenzene	0.20 \pm 0.12	0.19 \pm 0.08	0.08 \pm 0.01	< 0.01	N.D	N.D
o-Ethyltoluene	0.24 \pm 0.16	0.22 \pm 0.09	0.06 \pm 0.01	0.01	N.D	N.D
1,2,3-Trimethylbenzene	0.56 \pm 0.33	0.53 \pm 0.21	0.18 \pm 0.03	0.01	< 0.01	N.D
Decane	0.01 \pm 0.02	N.D	0.02 \pm 0.00	0.02	0.01 \pm 0.00	0.04 \pm 0.03
1,2,4-Trimethylbenzene	0.33 \pm 0.20	0.26 \pm 0.11	0.07 \pm 0.01	0.01	N.D	0.03 \pm 0.05
m-Diethylbenzene	0.03 \pm 0.01	0.03 \pm 0.01	0.02 \pm 0.00	0.01	N.D	N.D
p-Diethylbenzene	0.07 \pm 0.03	0.06 \pm 0.02	0.03 \pm 0.00	N.D	N.D	N.D
n-Undecane	0.02 \pm 0.01	< 0.01	0.01 \pm 0.00	0.03	0.01 \pm 0.00	N.D
n-Dodecane	0.02 \pm 0.01	N.D	N.D	0.01	0.01 \pm 0.00	N.D
1,3-Butadiene*	N.D	< 0.01	N.D	N.D	N.D	0.06 \pm 0.04
Acrylonitrile*	< 0.01	< 0.01	N.D	N.D	N.D	N.D
Dichloromethane*	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	< 0.01	N.D	0.12 \pm 0.08	N.D
Chloroform*	0.01 \pm 0.00	< 0.01	< 0.01	0.01	0.03 \pm 0.02	0.10 \pm 0.09
1,2-Dichloroethane*	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02 \pm 0.00	N.D
1,2-Dichloropropane*	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02 \pm 0.00	N.D
Trichloroethylene*	N.D	N.D	N.D	N.D	0.02 \pm 0.00	N.D
m-Dichlorobenzene*	N.D	N.D	N.D	0.01	N.D	N.D
Methyl ethyl ketone*	< 0.01	0.66 \pm 0.54	N.D	N.D	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.01
Isobutyl alcohol*	0.01 \pm 0.01	0.00 \pm 0.00	N.D	N.D	N.D	N.D
Methyl isobutyl ketone*	0.38 \pm 0.33	0.96 \pm 0.91	0.43 \pm 0.20	0.02	N.D	N.D
Butyl Acetate*	2.45 \pm 0.84	3.48 \pm 1.74	1.45 \pm 0.38	N.D	< 0.01	N.D
Isopropyl alcohol*	0.05 \pm 0.00	0.06 \pm 0.02	0.03 \pm 0.01	N.D	0.09 \pm 0.04	0.52 \pm 0.22
Sum of VOCs	8.48 \pm 4.39	12.70 \pm 7.11	5.77 \pm 1.61	0.19	1.04 \pm 0.51	2.90 \pm 1.86
Sum of ozone precursor	5.58 \pm 3.20	7.51 \pm 3.89	3.87 \pm 1.01	0.15	0.69 \pm 0.38	2.20 \pm 1.50

N.D: not detected, < 0.01: detected below 10 ppb, *: not ozone precursor

다. B업체는 방지사설의 유지관리가 잘 되지 않고 유성 도료를 사용하여 배출 농도가 가장 높은 업체에 해당한다. 3개 업체에 대한 오존생성 기여율을 평가하여 기여율이 높은 순서대로 20위까지 표 4에 제시하였다. 자동차 수리 도장업체의 오존생성 기여도가 가장 큰 성분은 aromatic 계열인 m,p-xylene으로 19.3%, 두 번째는 butyl acetate가 14.3%, 세 번째는 o-xylene으로 13.2%이다. 미용업체는 Alkane 계열인 hexane이 33.6%로 기여도가 가장 크고, cyclopentane이 11.8%, pentane이 11.0%이다. 고기구이 식당은 Alkane 계열인 pentane이 34.2%이 기여도가 가장 크고, hexane이 12.1%, isobutane이 9.4%이다. 자동차 수리 도장업체는 대부분이 aromatic 계열의 성분이고 미용업체는 5순위에 toluene이, 고기구이 식당은 6순위에 benzene이 위치하여 aromatic 계열의 오존생성 기여율이 낮게 나타났다. 1% 이상의 기여율을 가지는 성분은 미용업체가 16종으로 가장 많고 고기구이 식당 15종, 자동차 수리 도장업체 13종이다. 방출실험의 선행 연구 결과

와 비교해 보면 자동차 수리 도장업체의 오존생성 기여도가 높은 성분은 aromatic 계열로 비슷하나(Lee et al., 2021; Wang et al., 2013), 미용업체의 경우 alkane 계열의 기여도가 높다.

3.3 2차 유기에어로졸 형성 잠재력 평가

생활밀착형 3개 업종에서 분석된 VOCs의 2차 에어로졸 형성 잠재력 기여도를 SOAP 값을 사용하여 평가하였다. 업종에 따라 2차 유기에어로졸 생성 기여도가 매우 다른을 그림 3에서 알 수 있다. 자동차 수리 도장 B업체의 SOAP가 가장 큰 성분은 aromatic 계열인 toluene으로 23.6%이며, aromatic 계열이 100%이다. 미용업체는 aromatic 계열인 toluene이 43.6%로 가장 큰 성분이며 aromatic 계열이 90.3%이다. 고기구이 식당은 aromatic 계열인 benzene이 65.7%로 가장 큰 성분이며 aromatic 계열이 98.3%로 자동차 수리 도장 업체 B와 같이 aromatic 계열이 2차 유기에어로졸 형성에 대부분을 기여하였다. 표 4의 POCP 기여도와 비

Table 4. POCP weighted emissions contribution of VOCs emitted from residential workplaces.

Car repair (painting) B		Beauty salons		Barbecue restaurant	
Compounds	%	Compounds	%	Compounds	%
m,p-Xylene	19.3	Hexane	33.6	Pentane	34.2
Butyl Acetate	14.3	Cyclopentane	11.8	Hexene	12.1
o-Xylene	13.2	Pentane	11.0	Isobutane	9.4
Toluene	9.2	Isopentane	6.4	1-Butene	6.2
1,2,3-Trimethylbenzene	9.1	Toluene	5.8	1,3-Butadiene	5.9
Methyl isobutyl ketone	6.8	Isoprene	4.9	Benzene	5.1
m-Ethyltoluene	5.6	Trichloroethylene	3.3	Hexane	4.4
Ethylbenzene	4.8	Methyl ethyl ketone	2.8	Butane	3.3
1,2,4-Trimethylbenzene	4.7	Decane	2.7	Toluene	3.2
1,3,5-Trimethylbenzene	3.4	n-Undecane	2.3	Octane	3.1
o-Ethyltoluene	2.6	m-Ethyltoluene	2.0	Isoprene	3.1
Methyl ethyl ketone	2.0	n-Dodecane	1.6	Heptane	2.7
p-Ethyltoluene	1.9	m,p-Xylene	1.4	1,2,4-Trimethylbenzene	1.8
p-Diethylbenzene	0.7	3-Methylhexane	1.2	Decane	1.6
n-Propylbenzene	0.7	2-Methylhexane	1.1	m,p-Xylene	1.1
Octane	0.3	Ethylbenzene	1.0	Ethylbenzene	0.9
Isopropylbenzene	0.3	Nonane	0.9	o-Xylene	0.8
m-Diethylbenzene	0.3	o-Xylene	0.9	Methyl ethyl ketone	0.3
Methylcyclohexane	0.3	3-Methylpentane	0.9	Styrene	0.3
Nonane	0.1	Heptane	0.9	Nonane	0.3

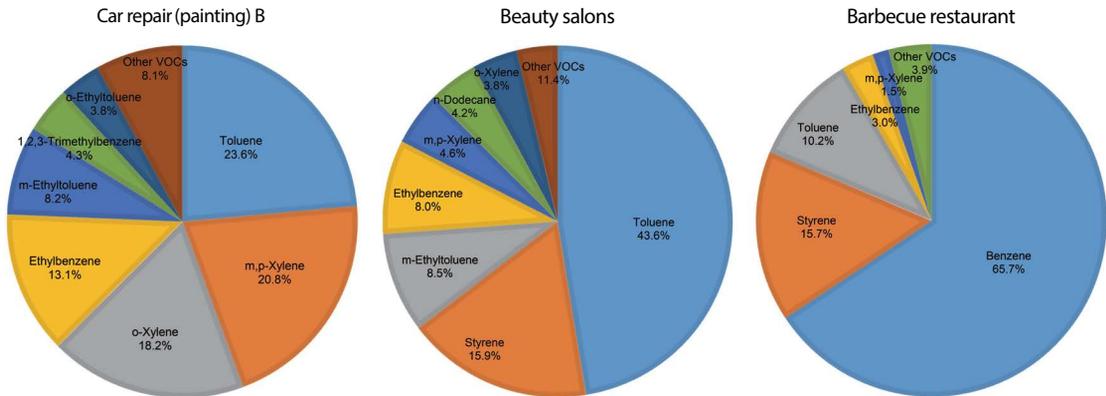


Fig. 3. SOAP weighted emissions contribution of VOCs emitted from residential workplaces.

교해 보면 자동차 수리 도장업체는 순위는 약간의 변동이 있으나 aromatic 계열의 기여도가 높게 평가되고 있고, 미용업체와 고기구이 식당은 POCP는 alkane이나 alkene과 같은 지방족의 기여도가 높은 반면 SOAP는 대부분 aromatic 계열의 기여도가 높음을 알 수 있다(Wu and Xie, 2018; Wu *et al.*, 2017). 이는 aromatic 계열의 성분들의 SOAP 계수값이 크기 때문이다.

오존생성 기여율 평가와 2차 유기에어로졸 형성 잠재력 평가를 통해서 같은 비율로 화학종이 배출되어도 POCP와 SOAP가 높은 화학종이 오존과 2차 유기에어로졸을 더 많이 생성하는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 분석결과를 활용하여 우선적으로 관리할 배출원과 업종들을 평가할 지표가 되며, 대기오염 영향평가 모델 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 또한 각 업종에서 배출되는 성분 중에 기여도가 큰 성분들을 확인하고 저감 대책을 세우는 데 기초자료로 활용될 수 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 생활밀착형 사업장 중에서 자동차 수리 도장업체, 미용업체, 고기구이 식당에서 배출되는 주요 VOCs 성분을 목록화하였다. 또한, POCP,

SOAP를 이용하여 오존생성 기여율 및 2차 에어로졸 형성 잠재력을 평가하였다. 이와 같은 연구 결과들의 분석을 통해 아래와 같이 결론을 정리하였다.

1. 생활밀착형 업종의 시료를 분석한 결과, 자동차 수리 도장업체의 경우 A, B업체는 오존전구물질 31~36종을 포함하여 총 40~43개의 성분이 검출되었다. C업체는 오존전구물질 22종을 포함하여 총 27개의 성분이, D업체는 오존전구물질 14종을 포함하여 총 17개의 성분이 검출되었다. 미용업체는 총 35개 성분이, 고기구이 식당은 총 24개 성분이 검출되었다. 검출된 VOCs의 평균농도는 자동차 수리 도장업체 B가 12.70 ppm으로 가장 높았으며, D업체가 0.19 ppm으로 가장 낮았다.
2. 자동차 수리 도장업체 A, B, C는 butyl acetate의 평균 농도가 가장 높으며, 각각 2.45 ppm, 3.48 ppm, 1.45 ppm이며 D업체는 n-undecane이 0.03 ppm이다. 미용업체는 hexane이 0.26 ppm, 고기구이 식당은 pentane과 benzene이 각각 0.46 ppm이다.
3. POCP를 이용한 오존생성 기여율 산출 결과, 가장 기여도가 높은 성분은 자동차 수리 도장업체 B는 aromatic 계열인 m,p-xylene으로 19.3%, 미용업체는 Alkane 계열인 hexane이 33.6%, 고기구이 식당은 Alkane 계열인 pentane이 34.2%이다.

4. SOAP를 이용한 2차 에어로졸 형성 잠재력을 평가한 결과, 자동차 수리 도장업체 B는 aromatic 계열인 toluene이 23.6%, 미용업체 toluene이 43.6%, 고기구이 식당도 aromatic 계열인 benzene이 65.7%로 가장 높게 나타났다.

생활밀착형 업체들은 대부분 주거지역과 근접해 있기 때문에 거주자들에게 영향을 미치기 쉽다. 업체에서 배출되는 VOCs는 거주민들의 건강을 위협하고 나아가 오존 생성에 기여하여 더욱 큰 거주민들의 건강상 악영향을 줄 수 있다. 특히, 이들을 흡입함으로써 폐질환과 관련한 피해를 야기시킬 수 있다. 따라서 생활밀착형 업체들의 VOCs 관리를 위한 적극적인 연구가 요구되며, 본 연구에서 생산한 연구기초자료를 활용하여, 생활밀착형 업체들의 방지시설 설치 의무화를 위한 정책기초 자료를 마련하는 데 일조할 수 있다. 나아가 대기 중 VOCs 농도를 저감시키기 위한 대기환경정책 자료로 활용할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2017M1A2A2086819).

References

- Ahn, H.Y., Lee, Y.K., Song, J.H. (2018) Volatile organic compounds emitted from printing processes and their removal by absorption, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 17(4), 396-403, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2018.17.4.396>
- Boudries, H., Toupance, G., Dutot, A.L. (1994) Seasonal variation of atmospheric nonmethane hydrocarbons on the western coast of Brittany, France, *Atmospheric Environment*, 28(6), 1095-1112. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)90287-9](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)90287-9)
- Carter, W.P.L., Pierec, J.A., Luo, D., Malkina, I.L. (1995) Environmental chamber study of maximum incremental reactivities of volatile organic compounds, *Atmospheric Environment*, 29(18), 2499-2511. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00149-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00149-5)
- Chae, J.S., Jeon, J.M., Lee, T.J., Jo, Y.M. (2019) Emission Listing of Volatile Organic Compounds (VOCs) Containing Ozone Precursors from Emission Sources in Printing Industries, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 18(2), 156-166, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2019.18.2.156>
- Cho, J.H., Lee, S.H., Rhee, Y.W. (2016) Activated Carbon Adsorption Characteristics of Multi-component Volatile Organic compounds in a Fixed Bed Adsorption Bed, *Korean Chemical Engineering Research*, 54(2), 239-247, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9713/kcer.2016.54.2.239>
- Derwent, R.G., Jenkin, M.E., Saunders, S.M. (1996) Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under european conditions, *Atmospheric Environment*, 30(2), 181-199. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00303-G](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00303-G)
- Derwent, R.G., Simmonds, P.G., Manning, A.J., Spain, T.G. (2007) Reactivity-based strategies for photochemical ozone control in Europe, *Environmental Science & Policy*, 10(5), 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.01.005>
- Derwent, R.G., Jenkin, M.E., Utembe, S.R., Shallcross, D.E., Murrells, T.P., Passant, N.R. (2010) Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds, *Science of the Total Environment*, 408, 3374-3381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.013>
- Environmental Protection Agency (EPA) (2007) 40CER Parts 80 and 86, Control of Emission of Hazardous Air Pollutants from Mobile Sources; Final Rule.
- Gentner, D.R., Isaacman, G., Worton, D.R., Chan, A.W.H., Dallmann, T.R., Davis, L., Liu, S., Day, D.A., Russell, L.M., Wilson, K.R., Weber, R., Guha, A., Harley, R.A., Goldstein, A.H. (2012) Elucidating Secondary Organic Aerosol from Diesel and Gasoline Vehicles through Detailed Characterization of Organic Carbon Emissions, *Proceeding of National Academy Sciences of the United States of America*, 109, 18318-18323. <https://doi.org/10.1073/pnas.1212272109>
- Huang, R.J., Zhang, Y., Bozzetti, C., Ho, K.F., Cao, J.J., Han, Y., Daelenbach, K.R., Slowik, J.G., Platt, S.M., Canonaco, F., Zotter, P., Wolf, R., Pieber, S.M., Emily, A., Crippa, B.M., Ciarelli, G., Piazzalunga, A., Schwikowski, M., Abbaszade, G., Kreis, S., Zimmermann, R., An, Z., Szidat, S., Baltensperger, U., Haddad, I.E., Prévôt, A.H. (2014)

- High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China, *Nature*, 514, 218-222. <https://doi.org/10.1038/nature13774>
- Kim, J.H., Yoo, K.S. (2017) Study on the enhancement of VOCs management at laundry facilities in Korea, *Environmental Policy*, 25(3), 139-171, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.3.139>
- Lee, H.J., Song, M.G., Kim, D.K. (2019) Estimation of Emissions and Emission Factor of Volatile Organic Compounds from Small-scale Dry Cleaning Operations Using Organic Solvents, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 413-422, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.413>
- Lee, J.H., Han, J.S., Yun, H.K., Cho, S.Y. (2007a) Evaluation of incremental reactivity and ozone production contribution of VOCs using the PAMS data in seoul metropolitan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(3), 286-296, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2007.23.3.286>
- Lee, S.H., Lim, J.W., Rhim, Y.J., Kim, S.D., Woo, K.J., Son, M.S., Park, H.J., Seo, M.C., Ryu, S.K. (2007b) Design Standard of Activated Carbon Vessel for the Intermittent Emission Sources of Volatile Organic Compounds, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(2), 250-260, (in Korean with English abstract).
- Lee, T.J., Lee, S.M., Chae, J.S., Jeon, J.M., Kim, D.S., Jo, Y.M. (2021) Inventory of Ozone Precursor VOCs from Organic Solvents Used in Residential Workplaces and Assessment of Ozone Formation Contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 102-112, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.102>
- Lim, Y.B., Lee, S.B., Kim, H.J., Kim, J.Y., Bae, G.N. (2016) Review of Recent Smog Chamber Studies for Secondary Organic Aerosol, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 131-157, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.2.131>
- Menachem, L., Ralph, J. (2008) Airborne study of ozone formation over Dallas, Texas, *Atmospheric Environment*, 42(29), 6951-6958. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.057>
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Clean Air Conservation ACT.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Improvement study on estimation method of emission factor for small-scale VOCs emission facilities.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) 2017 National Air Pollutants Emission.
- Noh, S.Y., Kim, K.H., Choi, J.H., Han, S.D., Kil, I.S., Kim, D.H., Rhee, Y.W. (2008) Adsorption characteristics of VOCs in activated carbon beds, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(4), 455-469, (in Korean with English abstract).
- Park, J.H., Kang, S.Y., Song, I.H., Lee, D.W., Cho, S.Y. (2018) Characteristics of long-term behavior of VOC species in Korea-PAMS data analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 56-75, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.056>
- Schwehr, B. (2004) Definitions of VOC and ROG. California air resources board, planning and technical support division, Emission Inventory Branch.
- Shon, Z.H. (2006) Photochemical Analysis of ozone episodes in the metropolitan area of Seoul during the summer 2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(3), 361-371, (in Korean with English abstract).
- Wang, H.L., Chen, C.H., Wang, Q., Huang, C., Su, L.Y., Huang, H.Y., Lou, S.R., Zhou, M., Li, L., Qiao, L.P., Wang, Y.H. (2013) Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Source Analysis through a Two-Year Continuous Measurement in the Urban Area of Shanghai, China, *Atmospheric Environment*, 80, 488-498. https://apollo.eas.gatech.edu/yhw/publications/Wang_H_et_al_2013.pdf
- Wu, R., Xie, S. (2018) Spatial distribution of secondary organic aerosol formation potential in China derived from speciated anthropogenic volatile organic compound emissions, *Environmental Science & Technology*, 52(15), 8146-8156. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01269>
- Wu, W., Zhao, B., Wang, S., Hao, J. (2017) Ozone and secondary organic aerosol formation potential from anthropogenic volatile organic compounds emissions in China, *Journal of Environmental Sciences*, 53, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.03.025>
- Yuan, B., Hu, W., Shao, M., Wang, M., Chen, W., Lu, S., Zeng, L., Hu, M. (2013) VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 8815-8832. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8815-2013>
- Yujing, M., Hai, W., Zhang, X., Jiang, G. (2002) Impact of anthropogenic sources on carbonyl sulfide in Beijing city, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 107(D24), 4769-4776. <https://doi.org/10.1029/2002JD002245>

Authors Information

채정석 ((주)그린환경종합센터 기획연구부 부장)
(chaejs21@gecc.co.kr)

채종성 ((주)그린환경종합센터 기획연구부 차장)
(chaejs0124@gecc.co.kr)

김민영 ((주)그린환경종합센터 기획연구부 차장)
(mykim@gecc.co.kr)

전준민 ((주)그린환경종합센터 센터장) (jmjeon4959@gecc.co.kr)

이태정 (경희대학교 환경학 및 환경공학과 학술연구교수)
(envi@khu.ac.kr)

조영민 (경희대학교 환경학 및 환경공학과 교수)
(ymjo@khu.ac.kr)