

ORIGINAL ARTICLE

광주지역 산업단지 도장·인쇄시설의 휘발성유기화합물 배출 특성 평가

김승호* · 서동주 · 김하람 · 박진환 · 이기원 · 배석진 · 송형명
광주광역시보건환경연구원 환경연구부

Estimation and Analysis of VOCs Emissions from Painting and Printing Facilities in Industrial Complexes of Gwangju

Seung-Ho Kim*, Dong-Ju Seo, Ha-Ram Kim, Jin-Hwan Park, Ki-Won Lee, Seok-Jin Bae,
Hyeong-Myeong Song

Gwangju Metropolitan Health & Environment Research Institute Department of Environmental Engineering, Gwangju 61986, Korea

Abstract

This study analyses the characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emissions from the painting and printing facilities, as well as ambient VOCs at industrial complexes in Gwangju. The major components of VOCs emissions from painting facilities were toluene, acetone, 2-butanone, ethyl acetate, ethyl benzene, *o*-xylene and *m,p*-xylene. The printing facilities mostly emitted ethyl acetate, 2-butanone, acetone and toluene. Aromatics (49.9%) and oxygenated VOCs (43.6%) were dominant in painting facilities, while oxygenated VOCs (92.7%) were the largest group in printing facilities. The total hydrocarbon concentration (THC) in printing facilities was approximately six times higher than in the painting facilities. The painting and printing facilities use many solvents. Their THC concentrations differed considerably depending on the type of prevention facilities. To reduce THC, it is necessary to improve the prevention facilities and operating conditions. The dominant species of ambient VOCs in industrial complexes were investigated with toluene, ethyl acetate, 2-butanone, ethyl benzene, *m,p*-xylene, butyl acetate, *o*-xylene, hexane and acetone. Factor analysis of ambient VOCs showed that the main sources of the VOCs were organic solvents used in painting, coating, and printing, as well as automobile emissions.

Key words : Industrial complex, VOCs, Painting facility, Printing facility, Factor analysis

1. 서론

우리나라는 경제 개발 계획 시행 이후 경제 규모 확대와 산업의 급격한 발달 과정에서 많은 공업단지가 조성

되었으며, 다양한 대기오염물질이 환경으로 배출되고 있다. 이러한 오염물질로서는 질소산화물, 일산화탄소, 미세먼지 등과 함께 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 등이 포함된다(Jang et al., 2011).

Received 2 March, 2020; Revised 6 April, 2020;

Accepted 22 April, 2020

*Corresponding author: Seung-Ho Kim, Gwangju Metropolitan Health & Environment Research Institute Department of Environmental Engineering, Gwangju 61986, Korea
Phone : +82-62-613-7592
E-mail : goodone@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대표적인 대기오염의 원인물질 중 휘발성유기화합물은 기후 변화와 대기 질에 영향을 줄 수 있고 인간의 건강과 생산에 해를 끼칠 수 있는 오존 및 2차 유기에어로졸의 형성에 있어 중요한 역할 때문에 점점 더 주목을 받고 있다(Atkinson, 2000; Kroll et al., 2006; An et al., 2014; Wu et al., 2016). 또한 VOCs는 TAPs (Toxic Air Pollutions)로 분류되며 일부 물질은 발암원성 물질로 알려져 있는 인체에 유해한 물질이다(Choi, 2007). 인체영향으로는 중추신경계, 호흡기계, 간 등에 유해한 영향을 미쳐 피로, 두통, 호흡곤란 등이 나타나게 되며, 장기간 노출되면 암을 유발할 수 있다(EPA, 2001).

휘발성유기화합물은 공기 중으로 쉽게 증발되는 탄화수소류나 유기용제를 말하며 석유화학산업, 의약품, 전자산업, 목재가공산업, 도장산업 등 각종 산업체 뿐 아니라, 세탁업, 인쇄업, 음식점, 자동차정비업, 자동차 내부 등과 같이 우리의 일상생활과 밀접하게 연관된 곳에서 배출되고 있다(Lee et al., 2017; Zhang et al., 2017; Yang et al., 2018).

2016년도 국내 휘발성유기화합물 총배출량은 1,024,029 ton이며 유기용제 사용량이 54.5%, 생산 공정 18.2%, 생물성 연소 8.6%, 폐기물처리 5.8%, 도로 이동오염원이 4.6%, 비도로 이동오염원이 4.0% 정도이며, 광주광역시 경우 VOCs 배출량 16,567 ton이며 유기용제 사용량이 80%, 에너지 저장 및 수송이 5.8%, 도로 이동오염원이 5.4%, 폐기물처리 3.1%, 비도로 이동오염원이 2.1%로 유기용제 사용 부문에서 가장 많은 배출 기여율을 차지하는 것으로 나타났으며, 도장시설 및 기타유기용제사용 시설에서 가장 많이 배출하였다(NIER, 2019).

도장 및 인쇄시설에서 다량의 VOCs가 발생하여 방지시설을 거쳐 최종 배출구 및 생산 공정에서 자연 휘발되어 작업장 및 주변지역에 악취 민원은 물론 주요 대기오염 배출원으로 인식되고 있는 현실이다(Song et al. 2012). 산업단지 내에 표면코팅, 합성 방향제, 접착제, 도장 및 인쇄시설을 포함한 유기용제 사용시설은 대규모 VOCs의 배출원으로 주변 대기 환경 및 인체 보건적 측면뿐만 아니라 날로 심각해져가는 초미세먼지에 대한 저감 정책을 수립하기 위한 측면에서 적절한 배출원 관리가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 광주지역 산업단지 도장시설과 인쇄시설 사업장을 대상으로 업종별 VOCs의 배출 특성

을 조사하고, 적절한 방지기술을 제시하였다. 또한 환경 대기 중 VOCs 농도 분포 및 오염 특성 등을 종합적으로 파악하여 산업단지 대기오염원 관리 및 정책 수립을 위한 기초자료를 마련하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 및 시료채취

본 연구는 광주광역시 하남·평동 산업지역 내 도장시설 14개소(SC1~SC14)와 인쇄시설 6개소(GP1~GP6)로 총 20개 대기배출시설 사업장을 연구대상으로 선정하였다. 대상 지점을 Fig. 1과 같이 나타내었다. 산업 별로 각각 도장시설 6개소와 인쇄시설 3개소사업장이 위치하고 있다.

대상 사업장은 플라스틱 제품 제조업, 자동차 제품 제조업, 인쇄업 등 주요 업종별로 분류되어 있다. 사업장에 따라 대기오염물질을 제거하기 방지시설이 설치되어 있으며 흡착시설, 세정집진시설, 여과집진시설, 축열식 촉매산화(Regenerative Thermal Oxidation, RTO), 축열식 촉매산화(Regenerative Catalytic Oxidation, RCO)로 단독 또한 2개 이상 시설이 결합되어 있다. 사업장의 시료채취 지점은 도장·인쇄 공정의 작업장 지점과 대기오염물질이 방지시설을 거쳐 배출되는 굴뚝 지점 2개를 선정하였고 또한 산업단지 내 대기 중 VOCs 수준을 평가하기 위해서 사업장 주변 54개 대기시료 채취 지점을 선정하였다.

본 연구는 2018년 9월부터 2019년 7월까지 총 6회 시료를 채취하여 분석하였다. 사업장 내 작업장 지점에서의 시료채취는 해당시설의 실제 운영조건과 동일하게 유지되는 일반 환경에서 대표된 2지점을 선정하여 바닥으로부터 1.2 ~ 1.5 m 범위의 높이에서 저유량 펌프(MP-Σ30KN, Sibata, Japan)를 사용하여 100 mL/min으로 5분 ~ 10분간 총 0.5 L ~ 1.0 L의 시료를 채취하였다. 굴뚝 지점에서는 대기오염공정시험기준으로 테들러 백(tedlar bag: vinyl fluoride film) 용기를 사용하는 방식으로 배출가스 10 L 씩 30분 간격 2회 시료를 채취하였다. 대기 중 VOCs는 저유량 펌프(MP-Σ30KN, Sibata, Japan)를 사용하여 100 mL/min으로 90분간 총 9 L의 대기 시료를 채취하였다.

시료채취는 대기 중 VOCs 분석에 보편적으로 이용되고

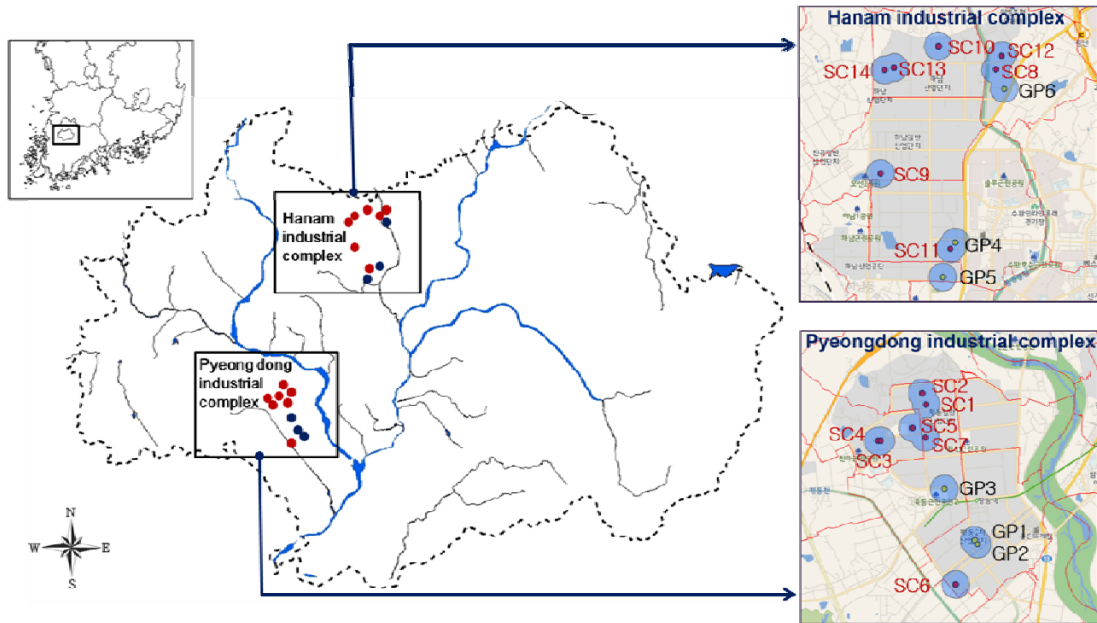


Fig. 1. Sampling sites in the industrial complexes of Gwangju.

있는 흡착관법을 활용하였으며 흡착제 Tenax TA와 Carbpacck B이 충전된 흡착관(C2-AAXX-5032, Markes, UK)을 사용하였다. 시료채취용 흡착관은 tube conditioner (TC-20, Markes, UK)을 이용하여 고순도 질소가스(99.999%)가 100 mL/min로 흐르는 조건하에서 300℃에서 2시간 동안 전처리하여 오염 여부를 확인한 다음 사용하였다. 시료채취가 끝난 시료는 PTFE (poly tetrafluoroethylene) 패럴을 이용하여 막은 다음 운반하여 분석 전까지 냉장 보관(4℃ 이내)하였다.

2.2. 분석방법

사업장에서 배출되는 휘발성유기화합물 중 총탄화수소(total hydrocarbon, THC)를 측정하기 위해서 휴대용 가스분석기(TVA-1000B, Thermo, USA)를 사용하여 30분간 연속 측정하였다. 측정 시 측정오차를 최소화하기 위해 메탄 표준가스를 이용하여 스펠교정을 실시하였다.

VOCs의 정량·정성 분석을 위하여 대기오염공정시험 기준의 환경대기 중 유해 휘발성유기화합물 시험방법-고체흡착관법(ES 01804.2)을 주 시험방법으로 하고 EPA Method TO-17A를 참고하였다(EPA, 1997). 분석은

자동열탈착장치(Ultra-xr, Markes, UK)가 장착된 기체 크로마토그래프/질량분석기(GC 7890B/MSD 5977B, Agilent, USA)를 사용하였다. 흡착관으로 채취한 시료는 자동열탈착장치에서 1차로 10분간 열탈착하였고 (270℃, 40 mL/min), 탈착된 시료는 다시 -25℃의 저온 응축트랩을 통해 응축한 후 320℃까지 급속 가열되는 2차 열탈착 과정을 통해 GC/MSD로 주입하였다. 모세관 칼럼 DB-1 (60 m × 320 μm × 3 μm, Agilent, USA)이며 오븐 승온 조건은 40℃(5 min)에서 5℃/min로 속도로 280℃(5 min)까지 승온하였다. 기기분석용 가스는 헬륨(99.999%)과 질소(99.999%)를 사용하였다.

분석항목은 도장시설과 인쇄시설 공정에서 주로 사용하는 VOCs 60종을 선정하였으며 표준용액은 VOCs mixture standard (M-502-REG-10X, Accustandard, USA)와 indoor air standard (49148U, Supelco, USA)을 사용하였다. Table 1에 측정된 휘발성유기화합물 60종을 나타냈다. 알칸(alkanes)류 11종, 알킨(alkene)류 1종, 방향족탄화수소(aromatics)류 16종, 산화된 VOCs (oxygenated VOCs, OVOCs)류 6종, 할로카본(halocarbons)류 20종으로 분류하였다.

Table 1. Volatile Organic Compound (VOC) species measured in samples

ID	Species	ID	Species	ID	Species
	<i>Alkanes(13)</i>	20	<i>o</i> -xylene		<i>Halocarbons(20)</i>
1	Hexane	21	alpha-pinene	41	Dichloromethane
2	Heptane	22	3-ethyltoluene	42	Chloroform
3	2,2,4-trimethylpentane	23	4-ethyltoluene	43	1,2-dichloroethane
4	2,4-dimethylpentane	24	2-ethyltoluene	44	1,2-dichloropropane
5	Octane	25	1,2,4-trimethylbenzene	45	Bromodichloromethane
6	Nonane	26	beta-pinene	46	Trichloroethylene
7	Decane	27	Mesitylene	47	Dibromochloromethane
8	Undecane	28	1,2,3-trimethylbenzene	48	Tetrachloroethylene
9	Dodecane	29	Limonene	49	1,4-dichlorobenzene
10	Tridecane	30	Durene	50	1,1-dichloroethylene
11	Tetradecane		<i>OVOCs(9)</i>	51	trans 1,2-dichloroethylene
12	Pentadecane	31	Acetone	52	1,1-dichloroethane
13	Hexadecane	32	2-propanol	53	cis 1,2-dichloroethylene
	<i>Alkene(1)</i>	33	1-propanol	54	1,1,1-trichloroethane
14	1,3-butadiene	34	2-butanone	55	Carbon tetrachloride
	<i>Aromatics(16)</i>	35	Ethyl acetate	56	1,1,2-trichloroethane
15	Benzene	36	1-butanol	57	Chlorobenzene
16	Toluene	37	4-methyl-2-pentanone	58	Bromoform
17	Ethylbenzene	38	Butyl acetate	59	1,2-dichlorobenzene
18	<i>m,p</i> -xylene	39	Nonanal	60	1,2,4-trichlorobenzene
19	Styrene	40	Decanal		

2.3. 정도관리

휘발성유기화합물질의 분석결과에 대한 정밀도와 정확도를 확인하기 위해 정도관리를 실시하였다. 정도관리를 위해 방법검출한계, 정밀도 실험을 실시하였다. 휘발성유기화합물질의 머무름 시간에 대해 상대표준편차는 0.5% 이하를 우수한 재현성을 보였다. 방법검출한계는 분석대상물질 각 10 ng의 표준 용액을 7개의 흡착관에 주입한 후 실제 공기시료 9 L를 채취한 것으로 가정하여 방법검출한계 값을 추정한 결과 0.03 ~ 0.07 ppb로 분석되었다. 분석대상물질 정밀도는 10% 이내였으며, 정확도는 92.1 ~ 109.4%로 나타났다. 검정곡선은 표준물질 농도(10~100 ng) 범위에서 작성하였으며, 직선성 평가 결과 결정계수(R^2) 0.98 이상으로 나타났다.

2.4. 통계분석

본 연구에서 분석된 휘발성유기화합물질의 각 성분별 관계를 분석하기 위해 통계프로그램(SPSS, ver.20.0)을 사용하여 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등의 기술통계량으로 산출하였다. 또한 VOCs의 오염원 추정하기 위하여 인자분석을 실시하였다. 인자분석법은 분석의 대상이 되는 변수의 수가 많은 경우 이들 사이의 상호 관련성을 이용하여 변수 속에 내재된 인자라고 부르는 소수의 공통적인 새로운 변수를 찾아내어 이들이 지니고 있는 특성으로 전체 자료가 가지고 있는 특성을 설명하고자 하는 통계적 분석방법이다. 주로 복잡하고 방대한 환경자료에 대한 해석에 사용되며, 오염원의 기여도를 정량적으로 추정할 수는 없으나 오염원 분류표가 없을 때 오염원의 추정에 이용되는 통계기법을 사용하였다(Thurston

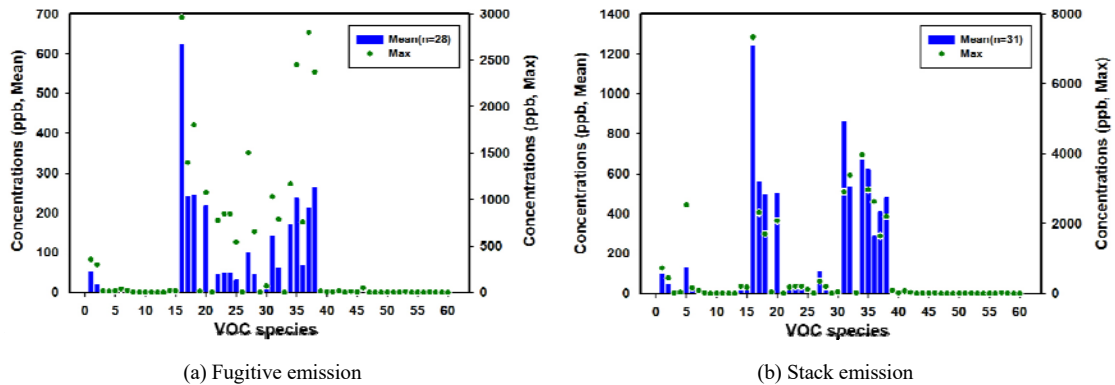


Fig. 2. Concentration profiles of VOCs emissions from the painting facility (The ID number of each species was the same as that of Table 1).

and Spengler, 1985).

3. 결과 및 고찰

3.1. 도장·인쇄시설의 VOCs 배출 특성

3.1.1. 도장시설

도장은 자동차 도장, 기계 도장, 전자 부품 도장 및 가정용 전자 기기와 같은 기타 표면 코팅 작업을 포함하는 합성 산업 분야입니다. 이 분야에서 사용되는 페인트 종류는 제품 생산에 따라서 다른 종류의 페인트가 필요하기 때문에 더욱 다양하다. 일반적으로 방향족 화합물 및 에스테르 등의 유기용제와 안료는 이 분야에서 널리 사용되는 페인트 및 희석제의 주요 성분이다(Zheng et al., 2013).

도장시설의 실제 도장 작업 중에 도장부스 내부와 대기오염 방지시설을 통해 처리된 굴뚝지점에서의 VOCs 성분들의 농도 분포를 비교하고자 Fig. 2에 VOCs 농도 분포를 나타내었다. Fig. 2(a)는 도장 부스 작업장 지점에서 배출되는 VOCs 농도를 나타냈다. VOCs 중 toluene의 평균 농도 621.1±818.4 ppb로서 가장 높은 농도를 보였으며 다음은 butyl acetate (262.8±473.6 ppb), *m,p*-xylene (243.1±376.9 ppb), ethyl benzene (241.7±352.7 ppb), ethyl acetate (235.8±493.7 ppb), *o*-xylene (217.6±283.6 ppb), 4-methyl-2-pentanone (212.6±533.8 ppb) 순으로 전체 검출된 58종의 물질 중 31개 물질이 1.0 ppb 이상이었고 이외 27종의 평균 농도

는 1.0 ppb 수준으로 비교적 낮게 나타났다.

Fig. 2(b)는 VOCs가 방지시설의 후단 굴뚝 지점으로 배출되는 VOCs 농도를 나타냈다. Toluene의 평균 농도는 1,235.2±1,569.2 ppb로서 가장 높았고 다음은 acetone (861.2±802.4 ppb), 2-butanone (670.8±1,116.9 ppb), ethyl acetate (620.9±697.0 ppb), ethyl benzene (558.9±622.7 ppb), 2-propanol (530.6±740.8 ppb), *o*-xylene (500.9±552.2 ppb), *m,p*-xylene (495.9±548.1 ppb), butyl acetate (480.3±530.4 ppb), 4-methyl-2-pentanone (408.1±407.0 ppb) 순으로 전체 검출된 59종의 물질 중 36개 물질이 1.0 ppb 이상이었고 이외 23종의 평균 농도는 1.0 ppb 수준으로 비교적 낮게 나타났다. 도장시설에서 배출된 VOCs 주요 화합물인 toluene, acetone, ethyl acetate, ethyl benzene, *m,p*-xylene 등이 페인트와 희석제의 구성 성분으로 거의 일치하였다(Wang et al., 2014).

굴뚝 지점에 배출된 VOCs 중은 도장 부스 작업장에서 측정된 성분이 대부분이 검출되었으나 각 종의 농도에는 차이를 보였다. 도장부스 내에서 도장 작업시 발생하는 VOCs는 스프레이건으로부터 도료와 함께 분무되어 피도장물에 부착되고 도막에서 서서히 휘발하는 것과 피도장물에 부착되지 않고 그대로 휘발해버리는 것으로 이들은 도장부스의 배기구를 통해서 빠르게 배출되므로 도장부스 내 체류하는 시간이 짧다. 이에 도장 부스에서 VOCs 농도가 굴뚝 지점보다 낮게 나타난 것으로 판단된다.

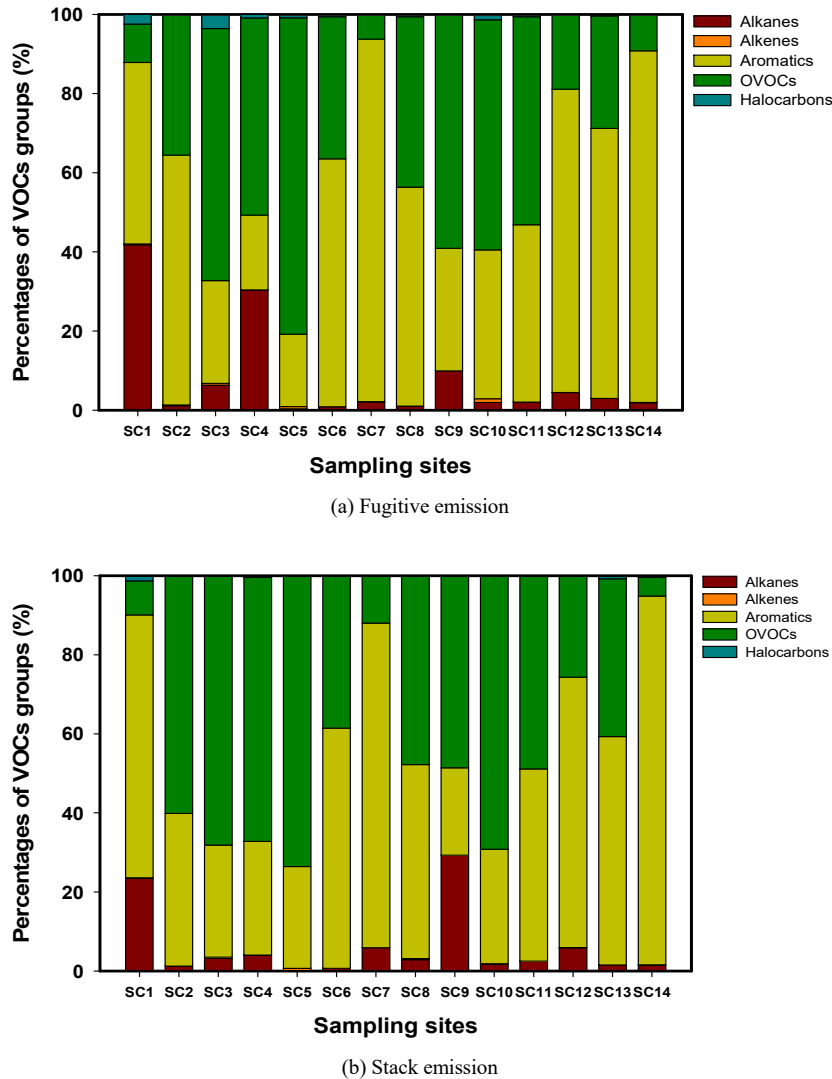


Fig. 3. Composition patterns of VOCs emissions from the painting facility according to the sampling sites.

도장시설별 배출된 VOCs 조성비를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 도장시설 작업장 지점에서 aromatics류가 평균 52.0% (18.3~91.57%)로 분포를 보였으며 OVOCs 39.2% (6.2~79.9%), alkanes 7.7% (0.3~41.8%), halocarbons 0.9% (0.1~3.6%), alkenes 0.2% (0.0~0.9%) 순으로 나타났다. Fig. 3(b)는 도장시설 굴뚝 지점에서 aromatics류가 평균 49.9% (22.1~93.3%)로 분포를 보였으며 OVOCs 43.6% (4.8~73.4%), alkanes 6.0% (0.2~29.3%), halocarbons

0.4% (0.1~1.3%), alkenes 0.1% (0.0~0.4%)로 나타났다. SC7와 SC14 지점은 aromatics 82.1% ~ 93.3%로 다른 지점보다 분포가 높게 나왔는데 이는 대형 특장차 도장 시 다량의 방향족 탄화수소류 계열의 도료와 희석제가 사용된 것으로 판단된다. VOCs 그룹 중 aromatics와 OVOCs은 도장 공정에서 91.2% ~ 93.5%로 가장 큰 분포를 보였다. Shen et al.(2018)의 연구에서도 도장시설에서 VOCs 중 aromatics 성분이 52.6% ~ 94.6% 정도 비중을 보인다는 연구결과와 유사하였다.

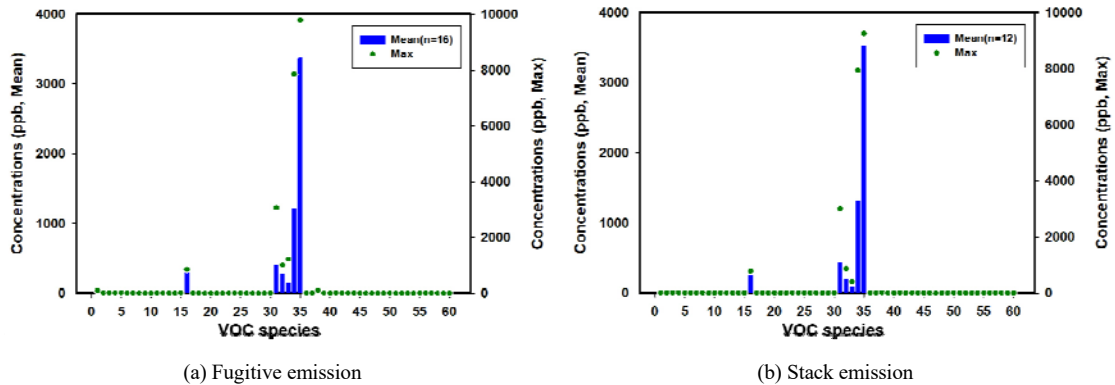


Fig. 4. Concentration profiles of VOCs emissions from the printing facility (The ID number of each species was the same as that of Table 1).

3.1.2. 인쇄시설

그라비아 인쇄(gravure printing) 사업장은 주로 지역에서 수요가 많은 플라스틱 포장 패키지 인쇄 제품을 생산한다. 그라비아 인쇄 공정은 인쇄와 폴리머 코팅의 두 가지 주요 단계가 포함하며 두 단계에서 사용된 잉크 및 용매 거의 동일하며, 대부분의 에스테르가 희석제로 사용된다.

인쇄시설에서의 배출되는 VOCs 농도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 인쇄 공정의 작업장 지점에서 배출되는 VOCs 농도를 나타냈다. VOCs 중 ethyl acetate의 평균 농도 $3,370.7 \pm 3,186.4$ ppb로서 가장 높은 농도를 보였으며 다음은 2-butanone ($1,215.8 \pm 2,470.7$ ppb), acetone ($393.2 \pm 1,035.9$ ppb), toluene (332.8 ± 277.5 ppb), 2-propanol (281.3 ± 401.7 ppb), 1-propanol (154.5 ± 331.7 ppb) 순으로 나타났다. Fig. 4(b)는 굴뚝 지점으로 배출되는 VOCs 농도를 나타냈다. VOCs 중 ethyl acetate의 평균 농도 $3,522.6 \pm 2,331.1$ ppb로서 가장 높은 농도를 보였고 다음은 2-butanone ($1,304.3 \pm 2,404.6$ ppb), acetone (434.5 ± 976.4 ppb), toluene (298.6 ± 290.8 ppb), 2-propanol (189.5 ± 260.7 ppb), 1-propanol (85.9 ± 136.0 ppb) 순으로 나타났다. 위의 상위 6종은 작업장 및 굴뚝 지점에서 총 VOCs의 97% 이상을 차지했다. 이러한 결과는 인쇄 공장에서 제공하는 MSDS (Material safety data sheet)에 보고된 바와 같이 그라비아 인쇄 잉크에 사용되는 원료 및 보조 재료에 존재하는 높은 비율의 유기 용매, 특히 ethyl

acetate 및 2-butanone이 일치한다. 또한 Park et al.(2009)은 그라비아 인쇄시설에서 발생하는 VOCs의 주성분은 대부분 toluene, 2-butanone, ethyl acetate, 2-propanol, acetone 등이 많이 배출되는 것으로 조사되어 본 연구에서 배출되는 VOCs 종과 거의 일치하였다.

인쇄 공정에서 작업장 지점 및 굴뚝 지점의 측정된 VOCs 성분들 중 공통적으로 검출된 성분들이 농도 분포가 큰 차이는 보이지 않았다. 이는 인쇄 공정 중 폴리프로필렌, 폴리에틸렌을 주원료로 제작된 필름에 인쇄용 동판을 거치면서 톨루엔 등의 용제로 희석한 잉크가 전이되어 인쇄되는 동안 용제가 바로 휘발하면서 필름의 건조가 동시에 진행되어 작업장 내에서 VOCs 성분이 빠르게 확산되고 인쇄를 위한 잉크 혼합이 후드나 덕트가 없는 작업장 내에서 이루어져 굴뚝 지점의 측정된 VOCs 농도 분포가 차이가 없는 것으로 보인다.

인쇄시설별 배출된 VOCs 조성을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 인쇄시설 작업장 지점에서 OVOCs류가 평균 89.2% (74.0~97.2%)를 차지하고 있었으며 aromatics 9.7% (2.2~22.2%), alkanes 0.9% (0.1~3.5%), halocarbons 0.1% (0.0~0.3%) 순으로 나타났다. Fig. 5(b)는 인쇄시설 굴뚝 지점에서 OVOCs류가 92.7% (78.8~98.2%)를 차지하고 있었으며 aromatics 6.9% (1.1~20.8%), alkanes 0.3% (0.1~0.6%), halocarbons 0.1% (0.1~0.3%)의 분포 순으로 나타났다. 인쇄 공장에서 VOCs 그룹 중 OVOCs가 89.2% 이상 가장 큰 분포를 보였다. Zheng et al.(2013)은 그라비아 인쇄시설에서

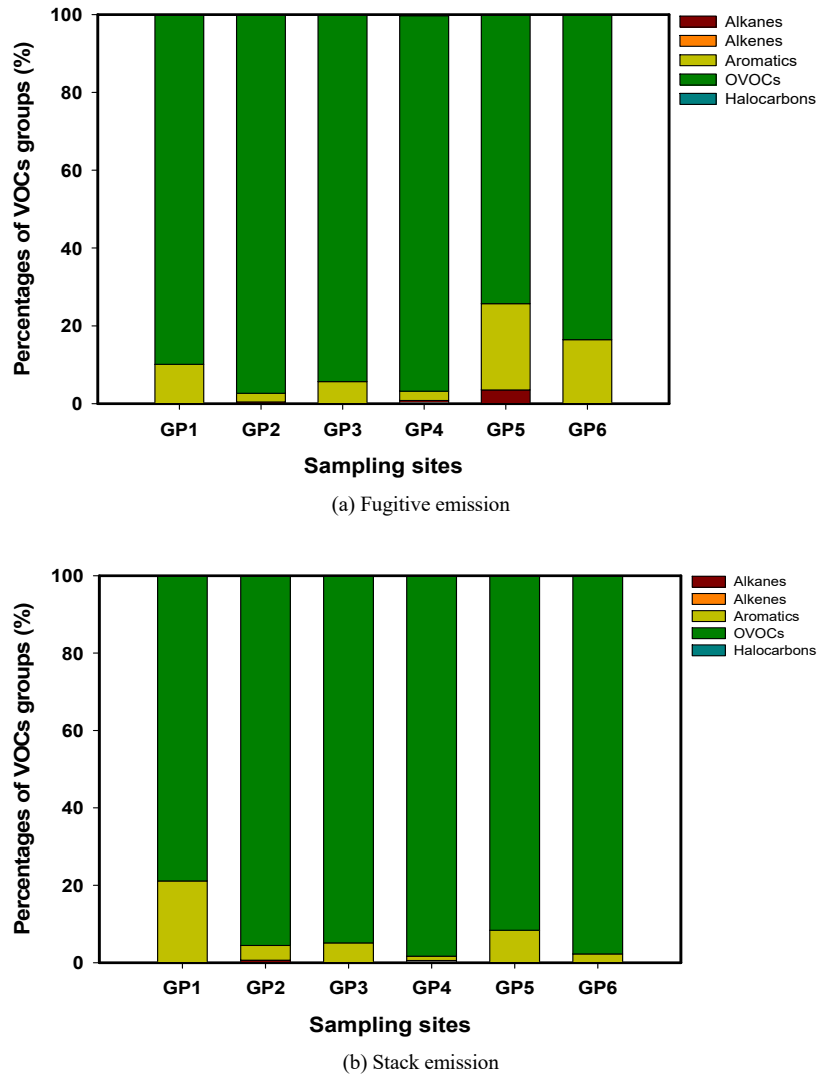


Fig. 5. Composition patterns of VOCs emissions from the printing facility according to the sampling sites.

배출되는 OVOCs가 총 VOCs의 80% 이상을 차지하는 것으로 조사되어 본 연구와 비슷한 수준으로 나타났다.

3.2. 도장·인쇄시설의 THC 배출 특성

휘발성유기화합물 중 THC는 메테인(methane)으로 포함하여 알케인, 알켄 및 방향족탄화수소류의 총량을 표현하는 방식으로 사용하고 있다. 대기환경보전법에서 대기배출허용기준이 설정된 THC 농도 기준으로 관리되는 도장 및 인쇄시설의 대기오염물질을 평가하기 위해서

방지시설 전·후단의 굴뚝 지점에서 THC 농도를 측정하였다.

도장·인쇄시설 굴뚝 지점에서 배출되는 THC 농도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 도장시설에서 배출되는 THC 농도를 나타내었다. 사업장별 THC 평균 농도가 SC7 지점에서 58.7 ppm으로 가장 높으며 그 다음은 SC3 52.4 ppm, SC4 45.8 ppm, SC8 37.0 ppm, SC12 36.9 ppm, SC9 23.7 ppm, SC1 19.6 ppm, SC5 18.1 ppm, SC10 16.1 ppm, SC13 9.5 ppm, SC2 8.3

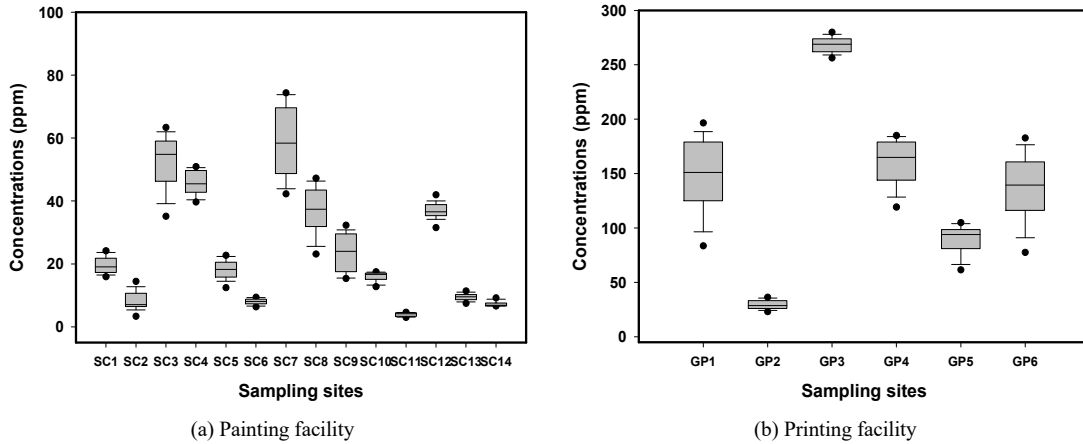


Fig. 6. Comparison of THC emissions concentrations according to the sampling sites.

ppm, SC6 8.0 ppm, SC14 7.1 ppm, SC11 3.9 ppm 순으로 나타났다. THC 평균농도 24.7 ppm (3.9~58.7 ppm) 분포를 보인다. SC7 지점은 대형 특장차 도장 시 다량의 도료와 희석제가 사용됨으로써 다른 지점에 비해 THC 농도가 높았다. 반면에 SC2, SC3, SC10 지점은 플라스틱 제조업종으로 도장 대상이 다른 업종에 비해 상대적으로 적으며 정밀한 도막표면을 요구함으로써 분무하는 도료의 양이 소량 사용되어 THC 농도가 낮은 것으로 보인다.

SC13 지점은 자동차 부품 플라스틱제품을 도장하는 시설로 방지시설이 축열식소각로(RTO)을 운영하고 있어 대부분 방지시설이 활성탄 흡착시설로 운영하고 있는 지점보다 배출된 THC 농도가 낮고 농도 편차가 크지 않음을 알 수 있었다. SC6, SC11, SC14 지점은 수동식 도장으로 작업자가 직접 스프레이건으로 도장하게 되어 측정 당시 작업속도를 평상보다 적게 운전하여서 THC 농도가 낮게 나온 것으로 판단된다. 지점별 측정된 THC 농도는 방지시설의 종류에 따라 차이가 있을 수 있으며 다 품종 소량생산으로 각각의 제품에 따른 용제 사용량이 달라질 수 있어 차이를 보인다. 도장시설 연속공정에서의 THC 대기배출허용기준은 40 ppm으로 SC3, SC4, SC7 지점에서 기준 보다 THC 농도가 높게 검출되었다. 해당 사업장의 경우 VOCs 방지시설이 활성탄 흡착시설로 활성탄 교체 주기가 4개월 ~ 6개월로 파악되어 활성탄 흡착 능력이 낮을 것으로 판단되며, 배출허용기준이

내에 운전하기 위해서는 활성탄 교체 주기를 짧게 유지해야한다.

Fig. 6(b)는 인쇄시설에 대해 THC 농도를 나타내었다. 사업장별 THC 평균 농도가 GP3 지점에서 267.9 ppm으로 가장 높으며 그 다음은 GP5 159.7 ppm, GP1 149.0 ppm, GP6 136.8 ppm, GP5 89.9 ppm, GP2 29.5 ppm 순으로 나타났다. THC 평균 농도 138.8 ppm (29.5~267.9 ppm) 분포를 보인다. 인쇄시설은 그라비아 인쇄로 제품에 따른 인쇄 도수와 잉크가 묻는 필름의 양에 따라 배출된 THC 농도가 달라질 수 있을 것으로 판단된다.

GP3 지점에서 잉크 7도수로 인쇄공정이 운전하고 있어 다른 지점보다 잉크의 사용량이 많아 높은 THC 농도를 나타냈다. GP1와 GP2 지점은 같은 인쇄공정에서 발생된 VOCs가 방지시설이 활성탄 흡착시설과 촉매연소 시설 각각 다르게 유입되어 처리된 THC 농도를 비교한 결과 GP1 지점에서 약 5배 정도 높게 배출되었다. 축열식촉매산화 시설은 인쇄공정에서 발생된 VOCs는 흡착 농축장치로 유입 농축된 후 다시 예열된 공기로 탈착시켜 촉매연소시설로 유입되어 약 250~400℃에서 연소되어 활성탄 흡착시설 보다 처리효율이 높음을 알 수 있다.

인쇄시설의 THC 대기배출허용기준은 110 ppm으로 그라비아 인쇄의 경우 대부분 시설에서 배출허용기준 이상 높게 나왔으며 최대 2.5배 이상 보였다. 그라비아 인쇄시설의 경우 활성탄교체 직후에 가장 낮은 인쇄 도수로

Table 2. Analysis results of THC in air pollution prevention facility at sampling sites

Sampling sites	THC concentration (ppm)		Removal efficiency (%)	Air pollution prevention facility	Sampling sites	THC concentration (ppm)		Removal efficiency (%)	Air pollution prevention facility
	Before prevention facility	After prevention facility				Before prevention facility	After prevention facility		
SC1	22.7	19.6	13.7	Bag filter	SC11	21.7	3.9	81.9	Adsorption tower
SC2	65.4	8.3	87.3	Ozone oxidation	SC12	99.8	37.0	62.9	Adsorption tower
SC3	122.3	52.4	57.1	Adsorption tower	SC13	159.6	9.5	94.1	RTO
SC4	132.8	45.8	65.5	Adsorption tower	SC14	40.5	7.1	82.4	Adsorption tower
SC5	95.4	18.1	81.0	Adsorption tower	GP1	565.5	149.0	73.6	Adsorption tower
SC6	40.9	8.0	80.4	Adsorption tower	GP2	608.7	29.5	95.2	RCO
SC7	135.6	58.7	56.7	Adsorption tower	GP3	567.1	267.9	52.8	Adsorption tower
SC8	119.5	37.0	69.0	Adsorption tower	GP4	603.2	159.7	73.5	Adsorption tower
SC9	104.8	23.7	77.4	Adsorption tower	GP5	258.6	89.9	65.2	Adsorption tower
SC10	69.5	16.1	76.9	Adsorption tower	GP6	330.6	136.8	58.6	Adsorption tower

가동하는 경우를 제외하고는 어떠한 활성탄을 사용하여도 배출허용기준을 달성하기 쉽지 않을 것으로 판단된다.

도장 인쇄시설 지점에서 대기오염방지시설 전·후에서 THC농도를 측정하여 방지시설 처리 효율을 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 각 시설별 연속·비연속식 공정, 송풍기의 용량, 활성탄 교체 시기 등의 운전 조건을 고려하지 않았으며 방지시설 전·후의 THC 농도만으로 효율을 평가하였다. 방지시설 처리 효율은 RCO 95.2%로 가장 높았으며 RTO 94.1%, 오존산화시설 87.3%, 활성탄 흡착시설 69.7%(52.8~82.4%), 여과시설 13.7%로 처리 효율을 보였다. THC 배출농도는 배출시설에 대한 방지시설의 종류에 따라 처리효율 차이를 보였다. 유기용제를 많이 사용하는 도장 및 인쇄 시설의 방지시설에 따른 THC의 배출특성 비교 결과 THC의 저감시키기 위해서는 활성탄 흡착시설에 비해 축열식소각로와 축열식촉매산화 시설을 설치하는 것이 타당한 것으로 보인다

(Janine and Michael, 2004).

휘발성유기화합물질을 체계적 관리를 위해서는 각 사업장의 작업조건 별 작업량 및 작업 특성에 따른 운전조건 변화에 따른 방지시설 처리 효율 등의 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

3.3. 산단지역 대기 중 VOCs 분포

3.3.1. 산단별 VOCs 농도

산단지역 대기 중 VOCs 농도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 하남산단 대기 VOCs 농도를 나타냈다. 검출된 VOCs 중 toluene이 15.5 ppb로서 가장 높았고, ethyl acetate (9.3 ppb), hexane (5.2 ppb), *m,p*-xylene (4.2 ppb), ethyl benzene (3.9 ppb), butyl acetate (3.9 ppb), *o*-xylene (3.8 ppb), 2-butanone (2.8 ppb), 4-methyl-2-pentanone (2.3 ppb) 순이었다. Fig. 7(b)는 평동산단 대기 VOCs 농도를 나타냈다. 검출된

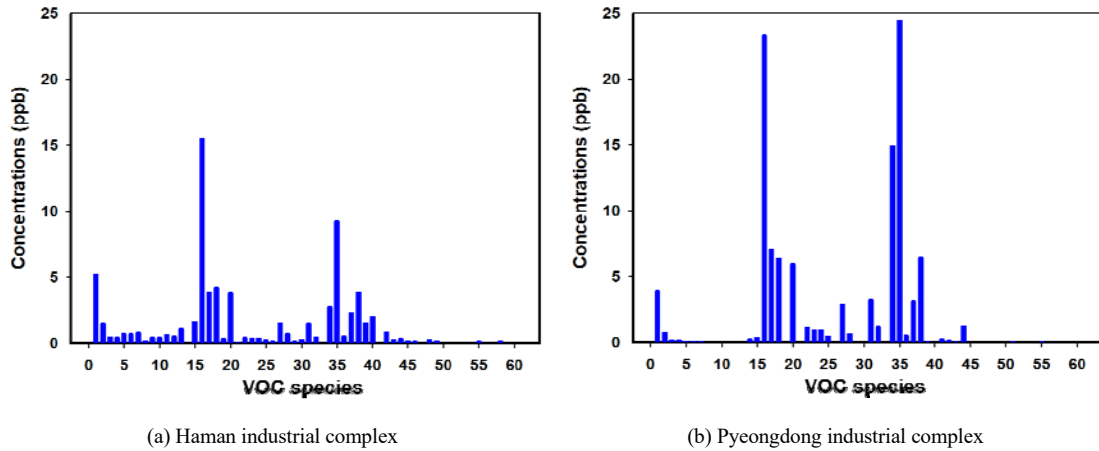


Fig. 7. Concentration profiles of ambient VOCs measured in the industrial complexes.

VOCs 중 ethyl acetate이 24.4 ppb로서 가장 높았고, toluene (23.3 ppb), 2-butanone (14.9 ppb), ethyl benzene (7.1 ppb), *m,p*-xylene (6.4 ppb), butyl acetate (6.4 ppb), *o*-xylene (5.9 ppb), hexane (3.9 ppb), acetone (3.2 ppb), 4-methyl-2-pentanone (3.1 ppb) 순으로 나타났다.

Toluene, ethyl acetate, 2-butanone은 평동산단이 하남산단에 비해 평균농도가 약 1.5배 ~ 2.6배 높았다. 하지만 하남과 평동산단에서 검출된 VOCs 분포가 비슷하여 동일한 배출원에 의해 영향을 받음을 추정할 수 있다. 대기 중에 측정된 VOCs 중 주로 검출된 성분들이 도장 시설에서 주로 사용되는 혼합 유기용제로부터 발생하는 toluene, ethyl acetate, butyl acetate, *m,p*-xylene, ethyl benzene, *o*-xylene, hexane 4-methyl-2-pentanone 등의 성분과 일치하였다.

산단지역 대기 중에 고농도를 나타내는 toluene은 유기용제로 많이 사용될 뿐만 아니라 페인트 등 도료의 원료로 포함되어 도장 인쇄 공정 및 자동차 배기가스 등에서도 배출되므로 대기 중에 상존하는 대표적인 VOCs 중의 하나이다. 대기 중 존재하는 VOCs 중 일반적으로 toluene의 비율이 가장 높으며 이번 조사에서도 측정된 산단지역 대기 중 단일물질로는 toluene의 농도가 높게 나타났다(Liu et al., 2009; Zhang et al., 2011).

3.3.2. 국내 타지역 VOCs 농도 비교

VOCs의 오염원은 지역특성에 따라 다양하여 물질별

서로 다른 농도 분포를 나타낸다. 본 연구 결과를 하남·평동산단의 VOCs 농도 수준을 지역적 특성이 유사한 타 지역 연구 자료와 비교하여 VOCs의 오염 정도를 평가하고자 하였다(Table 3).

자동차 배출가스에 영향을 받는 benzene은 하남 1.67 ppb, 평동 0.42 ppb으로 경기도의 시화 0.40 ppb, 반월 0.51 ppb, 부산의 감전 0.55 ppb, 장림 0.51 ppb, 대구의 이현동 0.20 ppb, 갈산동 0.22 ppb, 노원동 0.19 ppb로 하남산단은 다른 지역보다 상대적으로 높게 나타났으며, 평동산단은 경기도의 시화, 반월과 부산의 감전, 장림과는 비슷한 수준이었다. Styrene은 다른 지역과 비슷한 수준을 보이는 반면 ethyl benzene *m,p*-xylene, *o*-xylene은 상대적으로 다른 지역 보다 높은 수준을 보였다. 유기용제 사용하는 도장·인쇄시설 등에서 많이 배출되는 toluene의 경우 하남이 대구의 갈산동과 노원동 보다 근소한 차이로 낮은 수준을 보였으나 평동산단은 23.33 ppb로 다른 산단 지역보다 높게 나타났다. 하남 및 평동산단 내의 대기 중 BTEXS (benzene, toluene, ethyl benzene, xylene, styrene)의 농도가 높은 나타났으며 이는 유기용제를 사용하는 배출원에서 다른 지역보다 많이 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.3.3. 산단별 VOCs 인자분석

산단지역 대기 중 VOCs 농도 분포 사이의 유사성을 파악하여 어떤 발생원들에 의해 영향을 받는가를 추정하기 위해서 인자분석을 실시하였다. 인자분석은 varimax

Table 3. Measured VOCs concentrations in the study area and other cities

VOCs	(Unit : ppb)								
	Gwangju		Gyeonggido		Busan		Deagu		
	Haman	Pyeongdong	Sihwa	Banwol	Gamjeon	Jangrim	Ehyundong	Galsamdong	Nowondong
	This work		Kim et al.(2018)		Cheong et al.(2011)		Kim et al.(2014)		
Benzene	1.67	0.42	0.40	0.51	0.55	0.51	0.20	0.22	0.19
Toluene	15.50	23.33	9.07	12.15	11.02	11.21	10.70	18.24	17.93
Ethyl benzene	3.89	7.07	2.07	1.07	1.68	2.82	0.76	1.30	2.04
<i>m,p</i> -xylene	4.20	6.37	1.40	0.80	1.30	1.61	1.19	2.00	1.98
<i>o</i> -xylene	3.83	5.97	0.91	0.53	0.68	0.90	0.43	0.62	0.70
Styrene	0.33	0.04	0.18	0.21	0.16	0.15	N.D.*	0.39	0.02
BTEXS	29.42	43.20	14.03	15.27	15.39	17.19	13.28	22.77	22.86

N.D.* : Not detected

직각회전방식을 사용하였으며 고유값 1이상인 요인의 분석에 중점을 두었다.

Table 4는 산단지역의 VOCs에 대한 인자분석 결과를 나타내었다. 하남 지점의 경우 인자 1은 전체 VOCs의 40.2%, 인자 2는 22.3%, 인자 3은 16.0%를 설명해주는 것으로 조사되었다. 인자 1에는 hexane, heptane, nonane, 2,2,4-trimethylpentane, benzene, toluene, styrene, 1,2,3-trimethylbenzene, mesitylene 등으로 자동차 배출가스 및 유기용제 영향이 높게 나타났다(Chang et al., 2013; Lee et al., 2016). 가솔린, 디젤자동차 배출가스 오염원으로 toluene, benzene, hexane, propane, n-butane, n-pentane, ethane, ethyl benzene, 1,2,4-trimethylbenzene, *m,p*-xylene, n-decane, n-undecane 등이 주로 기여하는 것으로 보고되었다(Watson et al., 2001).

인자 2에는 1-butanol, acetone, styrene, undecane, tridecane, tetradecane, pentadecane 등이 주로 디젤 자동차에서 배출되는 휘발성유기화합물 영향을 미치고 있다고 판단된다. 인자 3에서 toluene, ethyl benzene, *m,p*-xylene, *o*-xylene, 4-methyl-2-pentanone, butyl acetate 등이 표면코팅에 사용하는 페인트의 용제가 주요 인자로 나타났다(Cheong and You, 2011).

평동 지점의 경우 인자 1은 전체 VOCs의 43.6%, 인자 2는 22.4%, 인자 3은 9.5%를 설명해주는 것으로 조사되었다. 인자 1에는 hexane, heptane, toluene, ethyl benzene,

m,p-xylene, *o*-xylene, 3-ethyltoluene, mesitylene, 1-butanol, 1,2,3-trimethylbenzene, 4-methyl-2-pentanone, butyl acetate 등으로 주로 산업에서 주로 사용하는 유기용제 및 휘발유 자동차에서 휘발성유기화합물의 영향이 높게 나타났다(Scheff and Wadden, 1993; Cai et al., 2010; Wang et al., 2013).

인자 2에는 dodecane, pentadecane, hexadecane, benzene, styrene, acetone 등으로 디젤 자동차에서 배출되는 영향으로 판단되며 인자 3에는 2-butanone, ethyl acetate 등이 인쇄공정하는 용제 영향이 주요 인자로 나타났다(Tsai et al., 2016).

하남산단과 평동산단 지점에서 거의 모든 휘발성유기화합물질이 주요 인자는 산업단지 내 도장, 코팅, 합성 방향제, 접착제 및 인쇄에 사용되는 유기용제 및 자동차에서 배출되는 aromatic류가 주요 인자로 작용한 것으로 추정된다.

4. 결론

광주지역 산업단지 인쇄시설과 도장시설을 대상으로 배출되는 VOCs 성분과 농도를 조사하였으며 환경 대기 중 미치는 영향을 확인하기 위해 휘발성유기화합물의 농도 분포 및 발생원을 파악하였다.

1) 도장시설에서 배출된 VOCs 중 toluene, acetone, 2-butanone, ethyl acetate, ethyl benzene, *o*-xylene, *m,p*-xylene, butyl acetate 등이 주요 성분이 이었으며

Table 4. The summary results of factor analysis for VOCs

Compounds	Haman industrial complex			Pyeongdong industrial complex		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Hexane	0.763	0.330	-0.046	0.938	0.026	0.104
Heptane	0.597	0.257	-0.045	0.871	0.188	-0.033
2,2,4-trimethylpentane	0.688	0.467	0.094	-0.144	-0.231	-0.487
2,4-dimethylpentane	0.878	-0.295	0.030	0.951	-0.131	0.056
Octane	0.887	0.226	0.135	0.913	0.193	0.237
Nonane	0.821	0.367	0.185	0.781	0.132	0.535
Decane	0.964	0.072	0.157	0.823	0.018	0.447
Undecane	0.473	0.796	0.112	0.119	0.487	0.748
Dodecane	0.737	0.604	0.059	0.134	0.879	-0.054
Tridecane	0.373	0.903	0.088	0.219	0.171	-0.249
Tetradecane	0.176	0.952	0.076	0.228	0.236	-0.297
Pentadecane	0.253	0.921	0.087	0.173	0.821	-0.084
Hexadecane	0.189	0.929	0.082	0.197	0.911	-0.095
1,3-butadiene	-0.284	-0.141	0.548	-0.010	0.587	0.090
Benzene	0.957	0.210	0.121	0.578	0.690	-0.086
Toluene	0.612	0.226	0.651	0.940	-0.056	-0.118
Ethyl benzene	0.116	-0.024	0.891	0.911	-0.121	0.186
<i>m,p</i> -xylene	-0.126	0.358	0.831	0.957	-0.062	-0.078
Styrene	0.824	0.533	0.119	0.121	0.751	0.489
<i>o</i> -xylene	0.005	-0.045	0.980	0.964	-0.092	-0.129
alpha-pinene	0.902	0.383	0.122	0.019	0.771	0.390
3-ethyltoluene	0.640	0.297	0.663	0.982	0.072	-0.098
4-ethyltoluene	0.725	0.379	0.548	0.950	0.251	-0.101
2-ethyltoluene	0.725	0.379	0.548	0.950	0.251	-0.101
1,2,4-trimethylbenzene	0.743	0.467	0.456	0.958	0.212	-0.086
beta-pinene	0.902	-0.258	0.102	-0.015	0.658	0.221
Mesitylene	0.682	0.268	0.660	0.955	0.249	-0.122
1,2,3-trimethylbenzene	0.388	0.223	0.794	0.925	0.319	-0.094
Limonene	0.765	0.617	0.100	-0.160	0.226	0.739
Durene	0.734	0.393	0.438	0.607	0.641	-0.005
Acetone	0.802	0.575	0.131	0.141	0.627	-0.205
2-propanol	0.822	0.409	0.007	0.298	0.708	0.348
1-propanol	-0.055	-0.048	-0.201	0.316	0.769	-0.081
2-butanone	0.472	0.099	0.198	-0.151	-0.052	0.736
Ethyl acetate	0.132	-0.191	-0.020	0.113	-0.167	0.649
1-butanol	0.496	0.618	0.081	0.885	0.340	-0.111
4-methyl-2-pentanone	0.011	-0.115	0.434	0.875	0.370	0.008
Butyl acetate	0.394	0.153	0.449	0.985	0.134	-0.032
Nonanal	0.721	0.670	0.089	-0.064	0.767	0.057
Decanal	0.721	0.653	0.087	-0.146	0.760	-0.050
Eigenvalue	16.1	8.9	6.4	17.4	9.0	3.8
Variance (%)	40.2	22.3	16.0	43.6	22.4	9.5
Cumulative (%)	40.2	62.5	78.5	43.6	66.0	75.5
Identification	Solvents+ Vehicle exhaust	Vehicle exhaust	Surface coating	Solvents+ Vehicle exhaust	Vehicle exhaust	Gravure printing

toluene이 1,235.2 ppb으로 가장 높은 농도를 나타냈다. VOCs 중 aromatics 49.9%와 OVOCs 43.6% 조성비를 보였다.

2) 인쇄시설에서 배출된 VOCs 중 ethyl acetate, 2-butanone, acetone, toluene 등이 주요 성분이 이었으며 ethyl acetate가 3,522.6 ppb으로 가장 높은 농도를 나타냈고 VOCs 중 OVOCs가 92.7% 대부분 차지하였다.

3) 시설별 THC 배출농도는 도장시설 24.7 ppm, 인쇄시설 138.8 ppm 정도였으며 인쇄시설에서 약 6배 높게 나타났습니다. 유기용제를 많이 사용하는 도장 및 인쇄 시설의 THC 농도는 배출시설에 대한 방지시설의 종류에 따라 상당히 큰 차이를 보였으며, THC의 저감시키기 위해서는 RTO, RCO 방식의 방지시설 도입이 필요하며 흡착시설의 경우 활성탄 교체 주기를 짧게 유지하는 등 운영 조건 개선이 필요할 것으로 판단된다.

4) 산업지역 대기 중 VOCs는 toluene, ethyl acetate, 2-butanone, ethyl benzene, *m,p*-xylene, butyl acetate, *o*-xylene, hexane, acetone 등이 주요 성분 이었으며 평동산단에서 toluene 23.3 ppb, ethyl acetate 24.4 ppb으로 다른 성분 보다 농도가 높게 나타났다. 이러한 좋은 도장시설과 인쇄시설의 사업장에서 배출되는 VOCs 성분과 같았다.

5) 하남 및 평동산단 지점의 VOCs의 인자분석 결과, 주요 인자로 도장, 코팅, 합성 방향제, 접착제 및 인쇄에 사용되는 유기용제 및 자동차의 배출가스가 작용한 것으로 보인다.

본 연구는 산업단지에서 유기용제를 사용하는 시설에 대해 VOCs 배출 특성에 대한 연구를 수행하여 대기오염원 관리에 기여하고자 하였다. 향후에 각 사업장의 공정 시설별 VOCs의 배출량 산정 및 환경대기 중에 대기오염도 기여율 평가에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 보여진다.

감사의 글

본 연구는 2019년 환경부 환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축 사업과 광주광역시보건환경연구원 연구역량강화 사업의 지원으로 수행 되었습니다.

REFERENCES

- An, T., Huang, Y., Li, G., He, Z., Chen, J., Zhang, C., 2014, Pollution profiles and health risk assessment of VOCs emitted during e-waste dismantling processes associated with different dismantling methods, *Environ. Int.*, 73(1), 186-194.
- Atkinson, R., 2000, Atmospheric chemistry of VOCs and NOx, *Atmos. Environ.* 34(12-14), 2063-2101.
- Cai, C., Geng, F., Tie, X., Yu, Q., An, J., 2010, Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China., *Atmos. Environ.*, 44(38), 5005-5014.
- Chang, C. C., Wang, J. L., Lung, S. C. C., Liu, S. C., Shiu, C. J., 2009, Source characterization of ozone precursors by complementary approaches of vehicular indicator and principal component analysis, *Atmos. Environ.*, 43(10), 1771-1778.
- Cheong, J. P., You, S. J., 2011, Characteristics and identification of ambient VOCs sources in Busan industrial area, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 33(9), 644-655.
- Choi, S. W., 2007, Characteristic of BTEX concentration ratio of VOC emission sources and ambient air in Daegu, *J. Environ. Sci. Int.*, 16(4), 415-423.
- Jang, Y. C., Lee, S. W., Shin, Y. S., Kim, H. K., Lee, J. H., 2011, Human health risk assessment of benzene from industrial complexes of Chungcheong and Jeonla province, *J. Environ. Impact Assess.*, 20(4), 497-507.
- Janine, L., Michael, D. A., 2004, Catalytic oxidation of chlorinated benzenes over V₂O₅/TiO₂ catalysts, *J. Catal.*, 223(2), 296-308.
- Kim, D. G., Song, I. S., Woo, J. S., Bae, Y. S., Lee, Y. K., Park, I. B., Han, H. S., Kim, Y. J., Kim, J. S., 2018, Concentration distribution of toxic volatile organic hydrocarbons in Gyeonggi-do' atmosphere, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 21(1), 11-23.
- Kim, E. K., Song, H. B., Park, M. S., Lim, J. K., Kwon, J. D., Choi, S. J., Park, S. K., Han, G. H., 2014, The concentrations of ambient VOCs at industrial complex area in Daegu city, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 36(7), 498-505.
- Kim, J. H., Sohn, Y. L., Kim, H. S., Jang, T. H., Yoo, K. S., 2013, A Study on present conditions and improvement alternatives of vapor recovery unit of stage II at gas

- stations, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 21(2), 115-140.
- Kroll, J. H., Ng, N. L., Murphy, S. M., Flagan, R. C., Seinfeld, J. H., 2006, Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation, *Environ. Sci. Technol.*, 40(6), 1869-1877.
- Lee, S. H., Lee, D. H., Park, K. S., Song, H. M., Yang, Y. C., Lee, K. W., Cho, Y. G., Seo, G. Y., 2016, A Study on characteristics of VOCs in Gwangju using statistical analysis, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 19(1), 12-23.
- Lee, Y. Y., Choi, H., Yun, J. H., Ryu, H. W., Cho, J. R., Seong, K. M., Cho, K. S., 2017, Characterization of odor-associated bacterial community in automobile HVAC (heating, ventilation and air conditioning) systems, *J. Odor Indoor Environ.*, 16(1), 34-41.
- Liu, J., Mu, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Wang, X., Liu, Y., Sun, Z., 2009, Atmospheric levels of BTEX compounds during the 2008 Olympic Games in the urban area of Beijing, *Sci. Total Environ.*, 408(1), 109-116.
- National Institute of Environmental Research, 2019, 2016 national air pollutants emission, NIER-GP2018-131, NIER.
- Park, C. G., Yoo, N. J., Chol, B. K., Ko, K. B., 2009, A Treatment of low-leveled high-volume VOCs emitted from printing process using concentration with zeolite adsorptive honey rotor and catalytic combustion system, *J. Environ. Sci. Int.*, 18(3), 283-288.
- Scheff, P. A., Wadden, R. A., 1993, Receptor modeling of volatile organic compounds. 1. Emission inventory and validation, *Environ. Sci. Technol.*, 27(4), 617-625.
- Shen, L., Xiang, P., Liang, S., Chen, W., Wang, M., Lu, S., Wang, Z., 2018, Sources profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, Central China, *Atmosphere*, 9(8), 297-314.
- Song, B. J., Lee, S. M., Cho, G. J., Cho, J. G., You, P. J., Kim, G. G., 2012, VOC/HAPs emission characteristics & adsorption evaluation for paint products in Busan area, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, 34(5), 316-325.
- Thurston, G., Spengler, J., 1985, A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollutions in metropolitan Boston, *Atmos. Environ.*, 19(1), 9-25.
- Tsai, C. J., Mao, I. F., Ting, J. Y., Young, C. H., Lin, J. S., Li, W. L., 2016, Quality of chemical safety information in printing industry, *Ann. Occup. Hyg.*, 60(3), 361-370.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1997, Compendium of methods TO-17, determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes, 2nd Ed., EPA/625/R-96/010b.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2001, Final rule for control of emission of hazardous air pollutants from mobile sources-40 CFR parts 80 and 86, EPA, 66(61), 17230-17273.
- Wang, H. I., Qiao, Y. Z., Chen, C. H., Lu, J., Dai, H. X., Qiao, L. P., Lou, S. R., Huang, C., Li, L., Jing, S. G., Wu, J. P., 2014, Source profiles and chemical reactivity of volatile organic compounds from solvent use in Shanghai, China, *Aerosol Air Qual. Res.*, 14(1), 301-310.
- Wang, M., Shao, M., Lu, S. H., Yang, Y. D., Chen, W. T., 2013, Evidence of coal combustion contribution to ambient VOCs during winter in Beijing, *Chin. Chem. Lett.*, 24(9), 829-832.
- Watson, J. G., Chow, J. C., Fujita, E. M., 2001, Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance, *Atmos. Environ.*, 35(9), 1567-1584.
- Wu, X., Lu, Y., Zhou, S., Chen, L., Xu, B., 2016, Impact of climate change on human infectious diseases: empirical evidence and human adaptation, *Environ. Int.*, 86(1), 14-23.
- Yang, C., Qian, H., Li, X., Cheng, Y., He, H., Zeng, G., Xi, Y., 2018, Simultaneous removal of multicomponent VOCs in biofilters, *Trends Biotechnol.*, 36(7), 673-685.
- Zhang, X., Gao, B., Creamer, A. E., Cao, C., Li, Y., 2017, Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: a review, *J. Hazard. Mater.*, 338(15), 102-123.
- Zhang, Y., Mu, Y., Liang, P., Xu, Z., Liu, J., Zhang, H., Wang, X., Gao, J., Wang, S., Chai, F., Mellouki, A., 2012, Atmospheric BTEX and carbonyls during summer seasons of 2008-2010 in Beijing, *Atmos. Environ.*, 59(1), 186-191.
- Zheng, J., Yu, Y., Mo, Z., Zhang, Z., Wang, X., Yin, S., Peng, K., Yang, Y., Feng, X., Cai, H., 2013, Industrial sector-based Volatile Organic Compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China, *Sci. Total Environ.*, 456-457, 127-136.

-
- Researcher. Seung-Ho Kim
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research
Institute Department of Environmental Engineering
goodone@korea.kr
 - Researcher. Dong-Ju Seo
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research
Institute Department of Environmental Engineering
eastwine83@korea.kr
 - Researcher. Ha-Ram Kim
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research
Institute Department of Environmental Engineering
khr0821@korea.kr
 - Researcher. Jin-Hwan Park
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research
Institute Department of Environmental Engineering
mansaco@korea.kr

-
- Researcher. Ki-Won Lee
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research
Institute Department of Environmental Engineering
yabez2714@korea.kr
 - Research director. Seok-Jin Bae
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research
Institute Department of Environmental Engineering
bsj4833@korea.kr
 - Investigation manager. Hyeong-Myeong Song
Gwangju Metropolitan Health & Environment Research
Institute Department of Environmental Engineering
shm0616@korea.kr