

ORIGINAL ARTICLE

광주지역 산업단지 대기 중 휘발성유기화합물 분포 특성 및 배출원 추정

김민진 · 박옥현 · 양윤철 · 박진환 · 유지용 · 정희윤 · 서광엽 · 김종민*

광주광역시보건환경연구원

Distribution Characteristics and Source Estimation of Volatile Organic Compounds in the Ambient Air of Industrial Complex in Gwangju

Min-Jin Kim, Ok-Hyun Park, Yoon-Cheol Yang, Jin-Hwan Park, Ji-Yong Yu, Hee-Yun Jung, Gwang-Yeob Seo, Jong-Min Kim*

Health & Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju 61954, Korea

Abstract

In this study, we investigated the characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) emission from painting and printing facilities in the Pyeongdong industrial complex in Gwangju. In addition, the objective was to understand the distribution characteristics of VOCs in the ambient air in industrial complexes affected by painting and printing facilities. The painting facility mainly emitted toluene, acetone, butyl acetate, 4-methyl-2-pentanone, ethyl acetate, 1-butanol, methyl ethyl ketone, m,p-xylene, o-xylene, 4-ethyltoluene, ethylbenzene, 3-ethyltoluene, and 1,2,4-trimethylbenzene. The main emission components in printing facilities were methyl ketone, ethyl acetate, acetone, 2-propanol, toluene, heptane, and butyl acetate. Ethyl acetate, toluene, 2-butanone, acetone, butyl acetate, 2-propanol, xylenes, and 4-methyl-2-pentanone were detected in the ambient air of the Pyeongdong industrial complex, consistent with the VOCs emitted by painting and printing facilities. The average concentration of seasonal TVOCs followed an order of winter > fall > spring > summer, whereas the concentrations of daytime and nighttime TVOCs were generally higher at night than those during the day, and the wind speed was greater during the day than it was at night. Based on a factor analysis of VOCs in the ambient air of Pyeongdong industrial complex, it is considered that organic solvents used in coating, printing, and electronics manufacturing facilities, as well as diesel vehicle emissions played a major role.

Key words : Volatile organic compounds, Factor analysis, Source estimation, Industrial complex

1. 서론

대표적인 대기오염물질인 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 증기압이 높아 대기 중에 쉽게 증발되는 탄화수소 물질로 눈, 코, 인후 자극을 유발할 뿐만 아니라 간, 신장, 중추손상과 같은 신경계 문제를 일으키며, 일부 VOCs는 인체에 유

해한 발암성 물질로도 알려져 있다(Ojala et al., 2011, Kim et al., 2020). 또한, VOCs는 오존과 2차 유기 에어로졸의 형성에 중요한 역할을 하여 도시의 스모그현상 등 기후변화와 대기질에 영향을 미친다고 보고되어 있다(Shen et al., 2018). 이와 같이 VOCs는 인간의 건강 문제와 질소산화물과의 광화학 반응을 통한 오존 생성의 두 가지 이유로 환경 문제의 중점이 되어왔다

Received 28 February, 2023; Revised 10 May, 2023;

Accepted 26 May, 2023

*Corresponding author : Jong-Min Kim, Health & Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju 61954, Korea
Phone : +82-62-613-7590
E-mail : nepume@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.

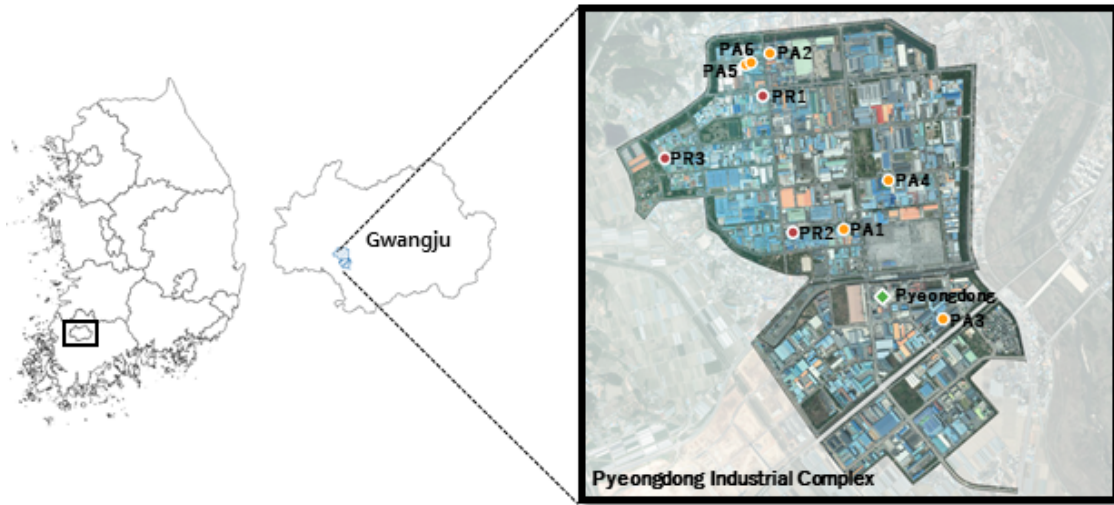


Fig. 1. Location of sampling in Pyeongdong industrial complex. (PR: Printing facilities, PA: Painting facilities)

(Kim, 2011).

VOCs의 발생원은 자연적 배출원과 인위적 배출원으로 나눌 수 있다. 자연적 배출원은 산림과 식물에서 발생하며, 특히 잎에서 배출되는 것으로 알려져 있다. 자연적으로 배출되는 대표적인 물질은 이소프렌, 테르펜, 알코올, 카보닐화합물, 에스테르 등이다(Ojala et al., 2011; Seo et al., 2011). 인위적 배출원은 페인트, 목재 제품 생산 산업, 자동차 도장, 인쇄업, 석유화학산업, 주유소, 저유소 등 각종 유기용제 사용 및 자동차 등 이동오염원의 배출이 대표적이며, VOCs를 감축하기 위한 노력은 인위적 배출원을 대상으로 한다(Baek et al., 2003; Yang et al., 2018).

환경부에 따르면, 2019년 국내 VOCs의 배출량은 1,020,216 ton이며, 유기용제 사용량 53.4%, 생산공정 배출량 18.3%, 생물성 연소 8.2%, 비도로 이동오염원 6.3%, 폐기물처리 5.8%, 도로 이동오염원 3.6%의 순으로 나타났다. 광주광역시의 VOCs 배출량은 16,791 ton이며, 그 중 유기용제 사용이 82.9%, 에너지 수송 및 저장 4.6%, 도로 이동오염원 4.4%, 폐기물처리 2.6%로 나타났다. 광주광역시에서 가장 높은 배출량을 차지한 유기용제 사용은 페인트, 잉크, 세탁소 등 휘발성이 큰 유기용제 사용에 따른 VOCs 배출량을 산정한 것으로 도장시설, 세정시설, 세탁시설, 기타 유기용제 사용시설로 나누어 산정한다. 유기용제 사용 부문에서는 도장시설과 기타유기용제 사용 시설에서

VOCs를 주로 배출하는 것으로 보고되었다(NAIR, 2022).

다량의 VOCs가 발생하는 도장 및 인쇄시설에서는 작업장 및 최종 배출구에서 VOCs가 자연 휘발되어 주변지역에서 악취 발생원 및 주요 대기오염물질 배출원으로 인식되고 있으며(Song et al., 2011), 산업단지 내에 위치한 유기용제 사용시설은 대규모 VOCs 배출원으로 작용하여 주변 대기환경에 영향을 미친다. 환경대기 중의 VOCs는 대체로 매우 낮은 수준으로 존재하여 건강에 직접적인 영향을 미치지 않으나, 장기적인 노출로 인한 만성 피해를 유발할 수 있다고 알려져 있다(Han et al., 2006; Seo et al., 2011). 따라서 인체 보건학적 측면 및 초미세먼지 저감 정책을 수립 등의 측면에서 환경대기 중의 VOCs에 대한 적절한 관리가 필요하다(Kim et al., 2020).

국내에서는 VOCs와 관련하여 오존 생성 기여도 평가 연구(Kim et al., 2001; Chae et al., 2019; Lee et al., 2021), 수용모델을 이용한 발생원 추정 연구(Cheong and You, 2011; Park et al., 2021), 유기용제 사용시설의 배출 특성 연구(Song et al., 2012; Kim et al., 2020; Chun et al., 2021; Lee et al., 2021) 등 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 산업단지 등을 대상으로 VOCs에 대한 모니터링, 실태조사 또한 활발하게 이루어지고 있다(Kim et al., 2018; Kim et al., 2019; Baek et al., 2020; Kim et al., 2020; Shin

Table 1. Meteorological data during sampling period

Sampling period	Temperature(°C)	Wind speed(m/s)	Wind direction	Humidity(%)
Dec. 8~9, 2021	6.2±4.9	1.2±0.4	NE	72.5±21.0
Jan. 20~21, 2022	-2.1±3.4	0.9±0.9	WSW	63.1±17.8
Feb. 17~18, 2022	-4.0±2.5	1.6±1.5	WSW	61.7±14.1
Mar. 28~29, 2022	8.7±4.2	1.0±0.9	WSW	56.4±20.1
Apr. 21~22, 2022	14.6±3.5	1.0±0.8	ESE	62.5±20.2
May. 16~17, 2022	17.3±4.7	1.2±0.9	WSW	46.6±18.2
Jun. 9~10, 2022	21.7±3.5	1.3±0.9	ESE	69.3±15.9
Jul. 19~20, 2022	26.4±2.5	1.7±1.6	WSW	77.8±13.7
Aug. 19~20, 2022	27.8±2.7	1.1±0.5	ESE	73.0±15.7
Sep. 7~8, 2022	22.4±4.2	1.2±0.9	WSW	72.1±18.8
Oct. 24~25, 2022	9.4±4.0	2.3±2.5	WSW	54.0±16.7
Nov. 7~8, 2022	10.3±5.1	0.8±0.6	WSW	63.6±22.1

Table 2. Species of VOCs analyzed from samples

ID	Species	ID	Species	ID	Species	ID	Species
	<i>Alkanes</i>	13	Hexadecane	25	beta-Pinene	37	Butyl acetate
1	Hexane		<i>Aromatics</i>	26	4-Ethyltoluene	38	Nonanal
2	2,4-Dimethylpentane	14	Benzene	27	1,2,4-Trimethylbenzene	39	Decanal
3	2,2,4-Trimethylpentane	15	Toluene	28	Limonene		<i>Halocarbons</i>
4	Heptane	16	Ethylbenzene	29	1,2,4,5-Tetramethylbenzene	40	Dichloromethane
5	Octane	17	m, p-Xylene		<i>OVOCs</i>	41	Chloroform
6	Nonane	18	Styrene	30	Acetone	42	1,2-Dichloroethane
7	Decane	19	o-Xylene	31	2-Propanol	43	1,2-Dichloropropane
8	Undecane	20	alpha-Pinene	32	1-Propanol	44	Bromodichloromethane
9	Dodecane	21	3-Ethyltoluene	33	Methyl ethyl ketone	45	Trichloroethylene
10	Tridecane	22	1,2,3-Trimethylbenzene	34	Ethyl acetate	46	Dibromochloromethane
11	Tetradecane	23	2-Ethyltoluene	35	1-Butanol	47	Tetrachloroethylene
12	Pentadecane	24	Mesitylene	36	4-Methyl-2-pentanone	48	1,4-Dichlorobenzene

et al., 2020; Choi et al., 2021; Jeong et al., 2022; Yu et al., 2022).

본 연구에서는 광주광역시 평동산업단지(이하 “평동산단”이라 함.) VOCs 주요 배출원인 도장시설과 인쇄시설을 대상으로 VOCs 배출 특성을 조사하고, 도장·인쇄 시설의 영향을 받는 평동산단 내 환경대기 중의 VOCs 분포 특성을 파악하여, 향후 평동산단의 대기오염물질 관리 방안 마련 등 정책수립의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 및 시료채취

본 연구는 평동산단을 대상으로 실시하였다. 광주광역시에서 대기질 측정을 위하여 운영하는 평동 대기오염자동측정소를 대기 중 시료를 채취하기 위한 지점으로 활용하였으며, 평동산단 내에 위치한 대기배출시설 사업장 중 도장시설과 인쇄시설을 연구대상으로 선정하였고, 시료채취 지점은 Fig. 1에 나타냈다.

Table 3. QA/QC data for VOCs

Species	Calibrationcurve(R ²)	MDL(ppb)	Retention time(%)	Precision(%)	Accuracy(%)
Hexane	0.997	0.07	0.03	6.91	94.15
2,4-Dimethylpentane	0.997	0.05	0.03	5.73	97.89
2,2,4-Trimethylpentane	0.997	0.05	0.03	5.76	92.91
Heptane	0.997	0.06	0.02	5.74	93.74
Octane	0.997	0.07	0.02	4.89	91.83
Nonane	0.997	0.06	0.02	2.14	92.60
Decane	0.997	0.05	0.02	0.85	91.56
Undecane	0.997	0.05	0.01	0.83	94.61
Dodecane	0.997	0.05	0.01	1.63	95.02
Tridecane	0.997	0.05	0.01	1.50	93.24
Tetradecane	0.997	0.05	0.01	1.91	91.74
Pentadecane	0.997	0.05	0.01	2.54	92.10
Hexadecane	0.997	0.12	0.01	5.82	95.45
Benzene	0.997	0.08	0.01	5.10	93.94
Toluene	0.997	0.07	0.03	4.20	90.51
Ethylbenzene	0.997	0.06	0.01	3.29	90.81
m, p-Xylene	0.997	0.07	0.02	2.65	96.08
Styrene	0.997	0.07	0.01	2.09	99.36
o-Xylene	0.997	0.07	0.02	1.96	94.85
alpha-Pinene	0.988	0.15	0.02	8.26	90.89
3-Ethyltoluene	0.997	0.09	0.02	7.67	97.23
1,2,3-Trimethylbenzene	0.998	0.12	0.02	9.29	91.34
2-Ethyltoluene	0.997	0.06	0.02	1.13	94.14
Mesitylene	0.997	0.06	0.02	0.89	94.97
beta-Pinene	0.986	0.17	0.02	4.53	90.99
4-Ethyltoluene	0.997	0.05	0.02	0.58	90.14
1,2,4-Trimethylbenzene	0.997	0.06	0.02	1.08	94.95
Limonene	0.997	0.06	0.02	2.60	92.74
1,2,4,5-Tetramethylbenzene	0.997	0.06	0.02	1.21	98.92
Acetone	0.988	1.46	0.03	5.11	95.23
2-Propanol	0.997	0.54	0.03	7.73	91.47
1-Propanol	0.997	0.23	0.03	2.53	98.71
Methyl ethyl ketone	0.993	0.07	0.03	5.99	91.62
Ethyl acetate	0.997	0.11	0.03	3.08	98.75
1-Butanol	0.997	0.09	0.03	7.76	95.67
4-Methyl-2-pentanone	0.997	0.03	0.03	4.72	96.78
Butyl acetate	0.997	0.05	0.02	4.57	93.28
Nonanal	0.997	0.17	0.01	5.06	93.80
Decanal	0.996	0.20	0.01	7.84	94.77
Dichloromethane	0.993	0.08	0.01	0.75	91.64
Chloroform	0.997	0.09	0.01	5.03	96.71
1,2-Dichloroethane	0.997	0.02	0.01	2.45	91.65
1,2-Dichloropropane	0.997	0.04	0.03	4.93	93.43
Bromodichloromethane	0.997	0.02	0.03	2.50	92.91
Trichloroethylene	0.997	0.04	0.01	4.15	93.91
Dibromochloromethane	0.997	0.02	0.02	1.82	97.27
Tetrachloroethylene	0.997	0.05	0.01	2.83	99.11
1,4-Dichlorobenzene	0.997	0.06	0.01	0.62	91.55

평동산단은 자동차부품, 전자부품, 플라스틱제품, 금형 등의 제조업, 도장 및 기타 피막처리업과 인쇄업이 주된 업종이며, 자재 등의 운송을 위한 대형차량의 통행량이 많은 곳이다. 평동산단에 위치한 VOCs 배출 관련 업종은 도장시설, 인쇄시설로 나눌 수 있다. 본 연구에서 선정한 6종의 도장시설은 자동차 부품을 생산하는 시설로 도료, 신너 등을 원료로 사용하는 시설이며, 3종의 인쇄시설은 Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate, Acetone을 주요 원료로 사용하여 포장지를 생산하는 그라비아 인쇄시설이다.

대기 중 시료채취는 평동 대기오염자동측정소 옥상에서 2021년 12월부터 2022년 11월까지 매일 1회씩 총 12회 실시하였다. 온도, 풍속 등 기상자료는 시료채취 지점의 측정소 자료를 활용하였으며, Table 1에 나타내었다. 시료는 고체흡착관 자동 시료채취기(MTS-32, Markes, UK)를 사용하여 Tenax TA와 Carboxen 1000을 충전된 고체흡착관(C2-AAAX-5032, Markes, UK)에 채취하였고, 100 mL/min의 유속으로 1시간 동안 총 6 L의 시료를 채취하여 1시간 단위로 24시간 동안 시료채취를 실시하였다.

대기배출시설 사업장의 시료채취는 작업장에서 발생하는 대기오염물질이 방지시설을 거쳐 배출되는 굴뚝에서 각 시설별로 1회씩 이루어졌다. 도장시설 6개소(PA1~6)와 인쇄시설 3개소(PR1~3)를 대상으로 하였으며, 시료는 저유량 펌프(MP-Σ30KN, Sibata, Japan)를 이용하여 채취하였다. 100 mL/min의 유속으로 5~10 분간 채취하여, 총 0.5~1.0 L의 시료를 채취하였다.

2.2. 분석항목 및 분석방법

시료는 자동열탈착장치(ULTRA-xr, Markes, UK)가 장착된 기체크로마토그래프/질량분석기(GC 8890/MSD 5977B, Agilent, USA)를 사용하여 분석하였다. 시료 채취가 완료된 흡착관을 280℃에서 8분간 1차 열탈착하였고, 탈착된 시료는 -20℃의 저온 응축트랩에서 응축된 후 300℃까지 급속 가열되는 2차 열탈착 과정을 거쳐 GC/MSD로 주입하였다. GC/MSD의 분석에는 모세관 컬럼 DB-1(60 m × 320 μm × 3 μm, Agilent, USA)을 사용하였으며, 오븐 승온 조건은 40℃에서 5분간 유지 후 5℃/min의 속도로 250℃까지 승온 후 5분간 유지하였다.

분석항목은 VOCs 물질 48종을 선정하였으며, 표준용액은 Indoor air standard(49148U, Supelco,

USA)를 사용하였다. 분석대상인 48종의 VOCs를 알칸(Alkanes)류 13종, 방향족탄화수소(Aromatics)류 16종, 산화된 VOCs(Oxygenated VOCs, OVOCs)류 10종, 할로카본(Halocarbons)류 9종의 4가지 계열로 분류하여 Table 2에 나타냈다.

2.3. 정도관리

VOCs 48종의 분석결과에 대한 정도관리를 실시하였다. 정도관리는 대기오염공정시험기준(ES 01804.2)에 따라 각 물질의 방법검출한계, 정밀도, 정확도, 검정곡선의 결정계수를 시료 분석과 동일한 조건에서 조사하여 Table 3에 나타내었다. 각 물질의 머무름 시간에 대한 상대표준편차는 0.1% 이하로 나타나 우수한 재현성을 보여주었다. 20 ng의 표준용액을 7개의 흡착관에 주입하여 방법검출한계를 계산한 결과, 각 항목의 방법검출한계는 0.02~1.46 ppb로 나타났다. 각 항목의 정밀도는 10% 이내로 나타났으며, 정확도는 75~125% 범위 내로 공정시험기준에서 제시한 기준 이내의 신뢰할 수 있는 결과를 보여주었다. 검정곡선의 결정계수는 전 항목이 0.98 이상으로 나타났다.

2.4. 통계분석

통계분석은 통계프로그램(SPSS, Ver 20.0)을 사용하여 실시하였다. 분석된 휘발성유기화합물의 각 성분별 관계를 분석하기 위하여 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등 기술통계량을 산출하였으며, 평동산단 대기 중 VOCs 농도 분포 사이의 유사성을 파악하기 위하여 요인분석을 실시하였다. 요인분석은 주성분분석법으로 varimax 직각회전방식을 사용하여 고유값 기준 1 이상으로 요인의 수를 추출하여, 평동산단 내 VOCs의 오염원을 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 평동산단 내 도장·인쇄시설의 VOC 배출 농도 특성

평동산단에 위치한 도장시설 및 인쇄시설을 대상으로 VOC 48종의 배출 농도를 조사하였다. Fig. 2(A)에는 각 시설별 배출된 VOCs 조성비를 나타내었다. 도장시설의 배출 조성비는 OVOCs류 66.5% (51.1~77.9%), Aromatics류 33.2% (22.0~48.7%), Alkanes류 0.1% (0~0.4%), Halohydrocarbons류 0.1% (0.0~1.1%) 순으

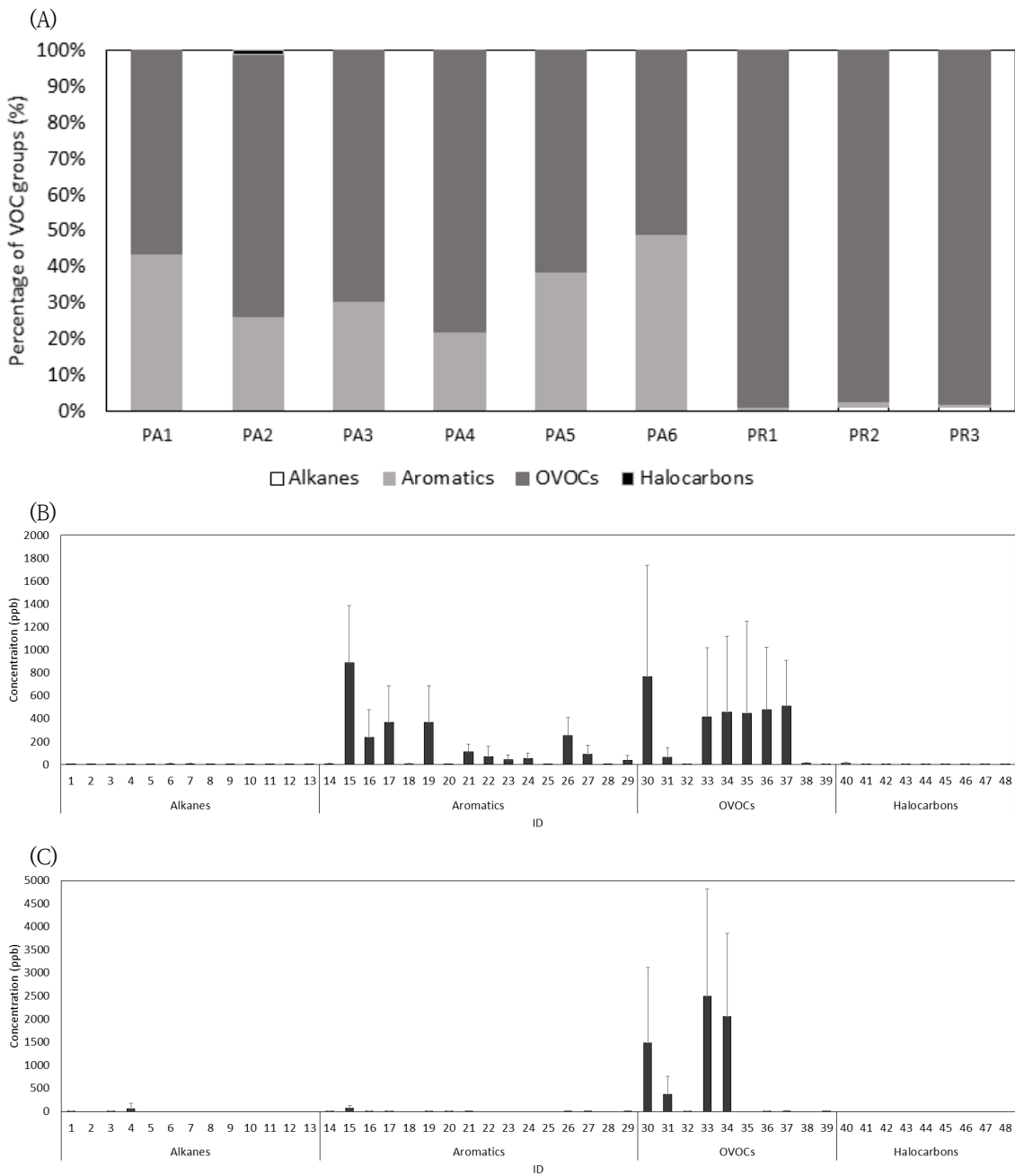


Fig. 2. Composition ratio of VOCs emitted from painting and printing facilities(A), and Concentration of VOCs emitted from painting facility(B), printing facility(C). (The ID numbers of each species are shown in Table 2)

로 나타나 선행 연구와 유사한 결과를 나타내었다(Kim et al., 2020). 인쇄시설의 배출 조성비는 OVOCs류 98.4% (97.5~98.8%), Aromatics류 0.8% (0.6~1.6%),

Alkanes류 0.8% (0.1~1.1%), Halohydrocarbons류 0.0%의 순으로 나타났다. 3개 시설 모두 OVOCs류가 주로 배출되어, 기존 연구와 유사한 결과를 나타냈다

Table 4. Frequency of VOCs in the ambient air of Pyeongdong industrial complex

Rank	Species	Frequency(%)	Rank	Species	Frequency(%)
1	Toluene	100.00	25	beta-Pinene	13.89
2	Acetone	96.88	26	Decane	12.15
3	Ethylbenzene	96.88	27	1-Butanol	11.46
4	Methyl ethyl ketone	92.36	28	2,2,4-Trimethylpentane	10.76
5	Ethyl acetate	91.32	29	Nonanal	10.42
6	m, p-Xylene	88.19	30	1,2,4,5-Tetramethylbenzene	8.33
7	Butyl acetate	85.07	31	Dodecane	5.56
8	Benzene	75.69	32	Nonane	4.86
9	o-Xylene	72.57	33	Tetradecane	4.86
10	4-Ethyltoluene	70.49	34	2,4-Dimethylpentane	4.51
11	4-Methyl-2-pentanone	62.85	35	1,2-Dichloropropane	4.17
12	3-Ethyltoluene	53.13	36	Octane	3.13
13	2-Propanol	48.61	37	Tridecane	2.78
14	1,2,4-Trimethylbenzene	36.46	38	Limonene	1.39
15	alpha-Pinene	32.99	39	Decanal	1.04
16	Heptane	32.64	40	Chloroform	0.69
17	2-Ethyltoluene	30.21	41	1-Propanol	N.D.
18	Mesitylene	27.78	42	1,2-Dichloroethane	N.D.
19	1,2,3-Trimethylbenzene	25.00	43	Bromodichloromethane	N.D.
20	Hexane	23.61	44	Trichloroethylene	N.D.
21	Hexadecane	19.10	45	Dibromochloromethane	N.D.
22	Styrene	18.06	46	Tetrachloroethylene	N.D.
23	Undecane	18.06	47	1,4-Dichlorobenzene	N.D.
24	Dichloromethane	17.01	48	Pentadecane	N.D.

N.D.: Not detected

(Kim et al., 2020).

Fig. 2(B)에는 도장시설 6개소의 평균 VOC 배출 농도를 나타냈다. 도장시설에서는 Toluene (1031.27 ± 502.97 ppb)이 가장 높게 나타났으며, Acetone (893.69 ± 967.29 ppb), Butyl acetate (587.42 ± 401.02 ppb), 4-Methyl-2-pentanone (550.53 ± 549.32 ppb), Ethyl acetate (528.31 ± 662.29 ppb), 1-Butanol (516.62 ± 801.28 ppb), Methyl ethyl ketone (477.75 ± 602.96 ppb), m,p-Xylene (425.74 ± 320.25 ppb), o-Xylene (425.53 ± 322.23 ppb), 4-Ethyltoluene (289.39 ± 159.98 ppb), Ethylbenzene (273.32 ± 244.79 ppb), 3-Ethyltoluene (124.22 ± 68.03 ppb), 1,2,4-Trimethylbenzene (101.58 ± 76.71 ppb) 순

으로 12종의 물질이 100 ppb 이상의 농도를 나타내었다. 기준에 보고된 바에 따르면, 자동차 도장시설에서 주로 사용되는 VOCs는 크게 소수성과 친수성 그룹으로 나누어진다. 소수성 그룹에는 Toluene, Xylenes, Ethylbenzene, 1,2,4-Trimethylbenzene, Heptane 등이 포함되며, 친수성 그룹에는 Acetone, Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate, Butyl acetate, Methanol, Propanols, Butanols 등이 포함된다 (Kim, 2011). 2014년 이전의 연구에서는 Toluene, Ethylbenzene, Xylenes 등이 주된 성분으로 검출되었던 것과 달리 최근에는 1,2,3-Trimethylbenzene, 1,2,4-Trimethylbenzene, p-Diethylbenzene 등의 방출량이 증가하는 추세라고 보고된 바 있으며 (Shen et al., 2018), 또 다른 연구에서는 자동차 도장시설에

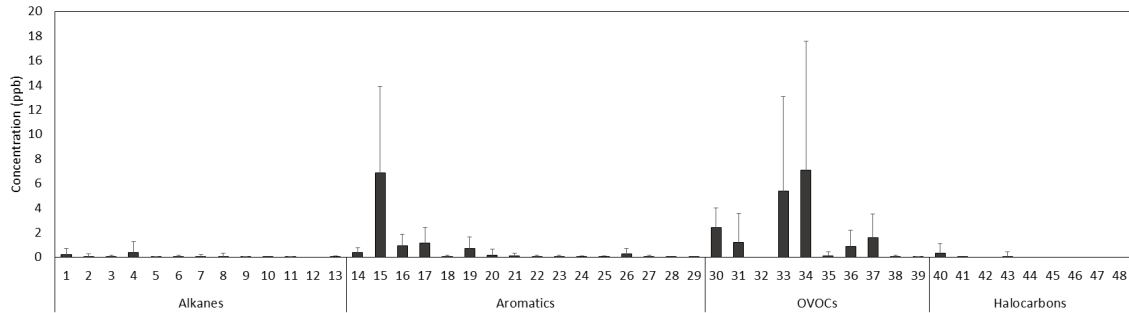


Fig. 3. Concentration of VOCs in the ambient air of Pyeongdong industrial complex(n=288). (The ID numbers of each species are shown in Table 2)

서 Butyl acetate, Toluene, Ethylbenzene, Xylenes, m-Ethyltoluene, 1,2,3-Trimethylbenzene 등이 주로 검출된다고 보고되어(Chun et al., 2021; Lee et al., 2021), 본 연구와 유사한 결과를 나타냈다.

Fig. 2(C)에는 인쇄시설 3개소의 평균 VOC 배출 농도를 나타내었으며, Methyl ethyl ketone (2500.38 ± 2315.70 ppb), Ethyl acetate (2060.53 ± 1798.22 ppb), Acetone (1486.78 ± 1630.38 ppb), 2-Propanol (372.30 ± 384.96 ppb), Toluene (73.62 ± 56.84 ppb), Heptane (64.98 ± 112.54 ppb), Butyl acetate (10.65 ± 6.26 ppb) 순으로 검출되었다. 3개의 인쇄시설에서 사용하는 원료인 Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate, Acetone이 현저히 높은 농도를 나타냈으며, 다른 선행연구에서도 그라비아 인쇄 시설에서 Ethyl acetate, Methyl ethyl ketone, Toluene, 2-Butoxyehanol, Methanol, Heptane, 2-Propanol 등이 주로 발생한다고 보고되어 (Kim and Kim, 2009; Zheng et al., 2013), 본 연구와 유사한 결과를 보여주었다.

3.2. 평동산단 대기 중 VOCs의 농도 분포

3.2.1. VOCs 출현 빈도 및 농도 분포

평동산단 환경 대기를 대상으로 총 48종의 VOCs를 분석하였다. 2021년 12월부터 2022년 11월까지 1년간 매달 시간 단위로 시료를 채취하여 288개의 시료를 분석하였으며, Table 4에는 평동산단의 환경 대기 중에서 VOCs의 검출 빈도를 나타냈다. Toluene은 100%의 검출 빈도를 나타냈으며, Acetone, Ethylbenzene, 2-Butanone, Ethyl acetate가 전체 시료의 90% 이상

에서 검출되었다. 총 48종의 물질 중 40종이 검출되었으며, 검출 빈도가 50% 이상인 VOCs는 12종이었다.

평동산단 대기 중 VOCs의 농도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 평동산단의 대기 중에는 OVOCs류 60.5%, Aromatics류 35.4%로 전체 VOCs의 대부분을 차지하였으며, Alkanes류 2.9%, Halocarbons류 1.2%로 상대적으로 거의 검출되지 않았다. Table 5에는 환경 대기 전체 시료 중 각 물질의 평균 농도, 표준편차, 최소값, 최대값을 나타내었다. 각 성분의 농도는 Ethyl acetate (7.08 ± 10.5 ppb), Toluene (6.86 ± 7.07 ppb), 2-Butanone (5.40 ± 7.67 ppb), Acetone (2.42 ± 1.57 ppb), Butyl acetate (1.58 ± 1.93 ppb), 2-Propanol (1.22 ± 2.34 ppb), m,p-Xylene (1.13 ± 1.27 ppb)의 순으로 나타났다. 검출된 40종 물질 중 7종 물질이 1 ppb 이상의 농도를 나타내었으며, 28종 물질이 0.05 ppb 이하의 비교적 낮은 농도로 검출되었다.

3.2.2. 계절별 VOCs 농도 분포

VOCs의 계절에 따른 변동을 파악하기 위하여 Fig. 4에 평동산단의 대기 중 VOCs의 농도를 계절로 구분하여 나타내었다. Fig. 4(A)에는 검출된 48종의 VOCs를 합한 농도인 TVOCs와 Table 1에서 분류한 바와 같이 Alkanes류, Aromatics류, OVOCs류, Halohydrocarbos류의 농도를 각각 나타내었다. 각 계절별 TVOCs의 평균 농도는 겨울(43.79 ± 41.43 ppb), 가을(42.39 ± 31.45 ppb), 봄(23.87 ± 24.16 ppb), 여름(13.87 ± 10.60 ppb) 순으로 나타났다. 같은 계절 내에서도 매월 다소간의 차이는 있으나 전반적

Table 5. Concentration of VOCs in the ambient air of Pyeongdong industrial complex(n=288)

(Unit : ppb)

Rank	Species	Average	S.D.	Min.	Max.	Rank	Species	Average	S.D.	Min.	Max.
1	Ethyl acetate	7.08	10.50	N.D.	95.20	21	1,2-Dichloropropane	0.05	0.39	N.D.	5.96
2	Toluene	6.86	7.07	0.22	42.01	22	2-Ethyltoluene	0.05	0.11	N.D.	0.78
3	Methyl ethyl ketone	5.40	7.67	N.D.	81.67	23	Decane	0.05	0.19	N.D.	1.93
4	Acetone	2.42	1.57	N.D.	11.28	24	1,2,3-Trimethylbenzene	0.05	0.12	N.D.	0.96
5	Butyl acetate	1.58	1.93	N.D.	11.69	25	Styrene	0.04	0.11	N.D.	0.79
6	2-Propanol	1.22	2.34	N.D.	17.54	26	2,4-Dimethylpentane	0.04	0.22	N.D.	1.88
7	m, p-Xylene	1.13	1.27	N.D.	7.97	27	Nonanal	0.04	0.13	N.D.	0.81
8	Ethylbenzene	0.96	0.94	N.D.	6.14	28	2,2,4-Trimethylpentane	0.04	0.16	N.D.	1.86
9	4-Methyl-2-pentanone	0.91	1.31	N.D.	9.45	29	Mesitylene	0.03	0.07	N.D.	0.47
10	o-Xylene	0.74	0.93	N.D.	6.05	30	Hexadecane	0.03	0.10	N.D.	0.70
11	Benzene	0.41	0.35	N.D.	1.48	31	beta-Pinene	0.03	0.07	N.D.	0.50
12	Heptane	0.40	0.88	N.D.	7.06	32	Nonane	0.02	0.13	N.D.	1.38
13	Dichloromethane	0.31	0.77	N.D.	4.25	33	Octane	0.01	0.06	N.D.	0.38
14	4-Ethyltoluene	0.30	0.40	N.D.	2.98	34	Tetradecane	0.01	0.06	N.D.	0.85
15	Hexane	0.21	0.53	N.D.	4.99	35	Dodecane	0.01	0.03	N.D.	0.19
16	alpha-Pinene	0.16	0.52	N.D.	7.36	36	1,2,4,5-Tetramethylbenzene	0.01	0.02	N.D.	0.13
17	3-Ethyltoluene	0.13	0.19	N.D.	1.24	37	Decanal	0.00	0.03	N.D.	0.41
18	1-Butanol	0.10	0.34	N.D.	3.04	38	Tridecane	0.00	0.01	N.D.	0.11
19	Undecane	0.09	0.23	N.D.	1.58	39	Limonene	0.00	0.02	N.D.	0.25
20	1,2,4-Trimethylbenzene	0.06	0.10	N.D.	0.82	40	Chloroform	0.00	0.02	N.D.	0.33

N.D.: Not detected

으로 TVOCs의 농도는 가을, 겨울이 봄, 여름에 비하여 상대적으로 높은 농도를 나타내었으며 Alkanes류와 Halohydrocarbons류는 계절에 상관없이 평동산단 내에서 매우 낮은 농도를 나타내었다.

선행연구에는 VOCs의 농도분포는 일반적인 대기오염물질이 동고하저 혹은 하고동저의 뚜렷한 계절유형을 나타내는 것과 달리 뚜렷한 계절별 특성을 나타내지 않으며, VOCs는 다양한 배출원에서의 배출강도 및 대기 중에서의 광화학 반응, 기상인자 등 매우 복잡한 요인에 따라 농도가 결정되어 다른 오염물질에 비해 그 거동양상을 명확히 파악하기 어려운 오염물질이라고 보고된 바 있다(Kim et al., 2002).

Fig. 4(B)에는 검출빈도 상위 6종의 VOCs의 계절별 농도 변화를 나타내었다. Toluene, Ethyl acetate, Methyl ethyl ketone은 TVOCs 결과와 유사하게 동고하저의 경향성을 보여주었다. Ethylbenzene, m,p-Xylene은 농도가 낮아 큰 차이는 보이지 않지만

여름철에 상대적으로 농도가 낮았으며, Acetone은 계절의 변화에 따른 차이가 나타나지 않아 선행연구와 마찬가지로(Kim et al., 2002) 각 VOC마다 계절에 따른 경향이 다른 것을 확인할 수 있었다.

3.2.3. 주·야간 VOCs 농도 분포

주간과 야간의 VOCs 농도 변동을 파악하기 위하여 분석 결과를 주간(09:00 ~ 18:00)과 야간(22:00 ~ 06:00)으로 나누어 해당 시간대에 채취된 시료의 평균 TVOCs 평균농도와 풍속을 Fig. 5에 나타내었다. 주간과 야간의 TVOCs 농도는 시료 채취 기간에 따라 약간의 차이는 있었으나 전반적으로 야간이 주간보다 높은 농도를 나타내었으며, 풍속은 야간보다 주간에 더 높은 결과를 보여주었다.

선행 연구에서는 포항과 구미 산단지역에서 벤젠을 제외한 VOCs가 이른 새벽과 야간 시간대에 낮은 농도를 보였으며(Baek et al., 2005), 시흥·안산 산단에서

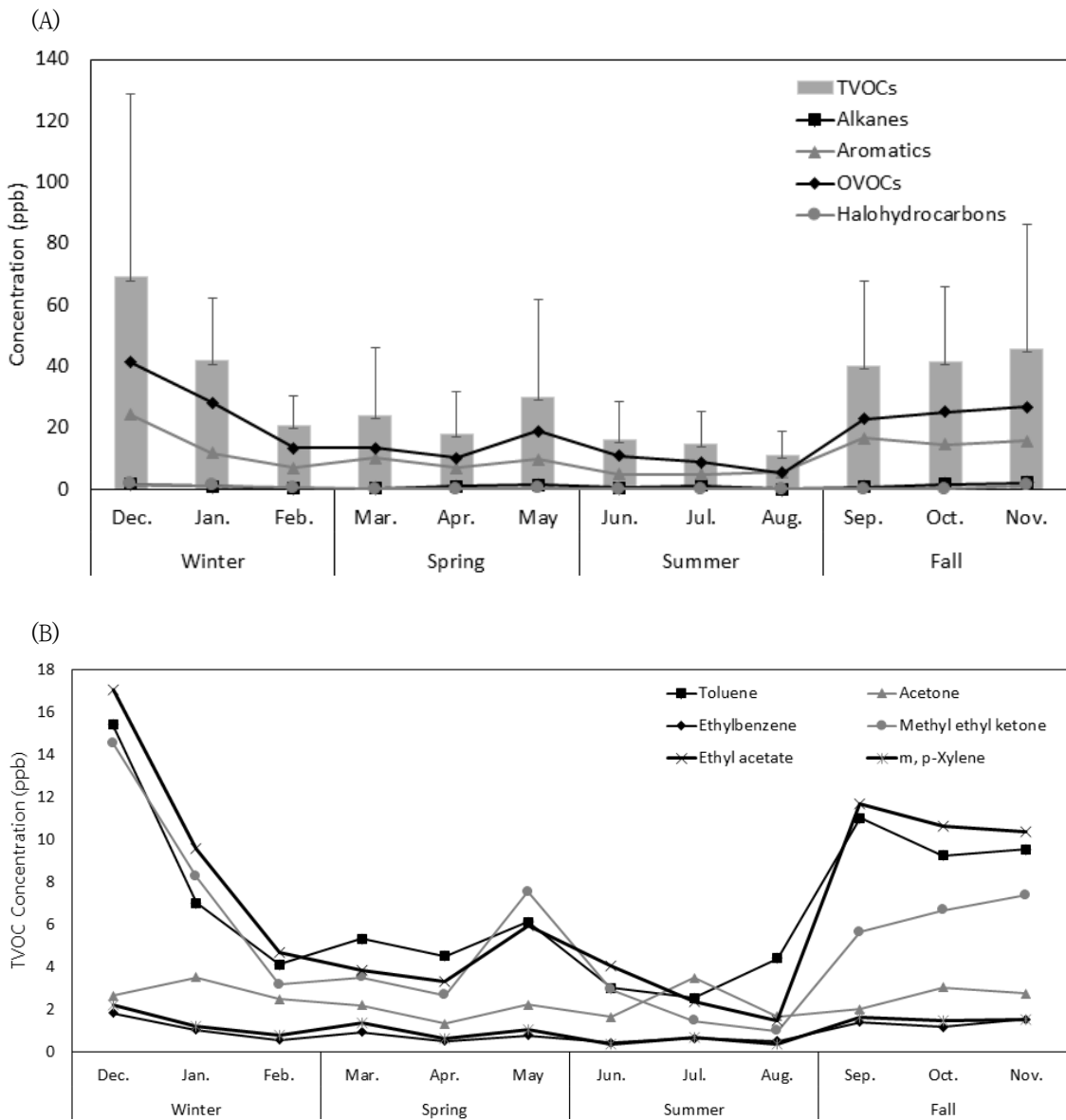


Fig. 4. Seasonal concentration comparison of TVOCs(A), each VOC species(B) in the ambient air of Pyeongdong industrial complex.

일부 기간을 제외하고는 오전과 야간의 농도비가 1.3~1.5배 수준으로 나타나는 경향을 보였다고 보고되었다(Kim et al., 2020).

반면에 대구시 대기 중 BTEX농도를 연구한 선행 연구에서는 주거지역과 상업지역의 BTEX 농도는 주간

에 더 높았으나, 산단지역은 야간이 더 높은 것으로 보고하였으며(Choi et al., 2009), 경기도 대기 중 VOCs를 연구한 선행연구에서도 야간의 TVOCs 농도가 주간보다 높게 나타난 것으로 보고되어(Kim et al., 2018) 본 연구와 유사한 결과를 나타내었다.

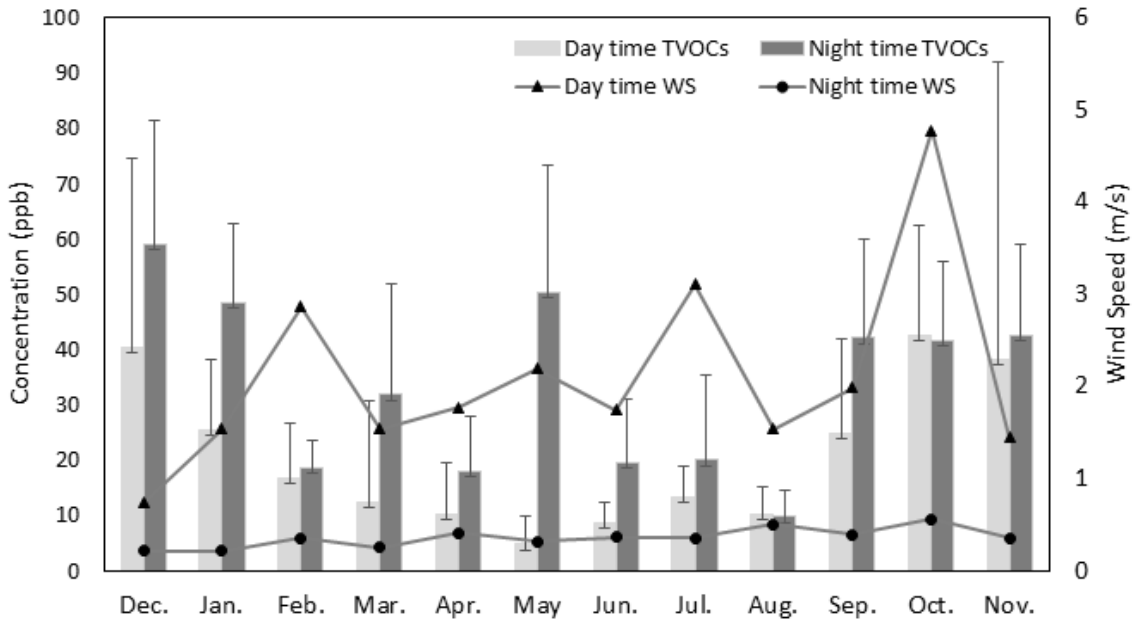


Fig. 5. Comparison of TVOC concentration and wind speed during day and night in the ambient air of Pyeongdong industrial complex.

이는 일사량이 강하고 대류현상이 활발히 일어나는 주간에는 상대적으로 농도가 감소하였다가 지표면의 기온역전에 따라 풍속이 감소하며 확산이 적어진 영향을 받은 것으로 판단된다. 주·야간의 농도변동을 설명하기 위하여 TVOCs와 풍속 사이의 상관분석을 수행한 결과, TVOCs와 풍속의 상관계수는 $-0.225(p<0.01)$ 로 유의한 수준의 음의 상관관계를 나타내어, 풍속이 증가하면 VOCs가 감소한다는 사실을 알 수 있었다.

3.3. 평동산단 대기 중 VOCs 요인분석

평동산단 대기 중 VOCs 농도 분포 사이의 유사성을 파악하기 위하여 요인분석을 실시하였다. 요인분석은 평동산단 대기 중에서 평균 농도가 상위 20종인 VOCs를 대상으로 수행하였다.

평동산단 대기 중 VOCs의 요인분석 결과를 Table 6에 나타내었다. 분석 결과 4가지 요인이 전체 분석 자료의 73.5%를 설명해주었으며, 요인1은 36.1%, 요인2는 14.7%, 요인3은 14.6%, 요인4는 8.1%를 설명해주는 것으로 나타났다.

평동산단 대기 중의 VOCs 특성을 36.1% 설명해주

는 요인1은 Ethylbenzene, m,p-Xylene, o-Xylene, 3-Ethyltoluene, 4-Ethyltoluene, 1,2,4-Trimethylbenzene, 1-Butanol, 4-Methyl-2-pentanone, Butyl acetate으로 본 연구의 도장시설에서 배출되는 물질과 일치하였으며, 도장시설의 오염원으로 보고된 Toluene, Ethylbenzene, Xylenes, 1,2,4-Trimethylbenzene, 1,2,3-Trimethylbenzene (Shen et al., 2018)과도 일치하여, 표면코팅에 사용되는 유기용제가 주요 인자인 것으로 추정된다.

요인2는 Toluene, Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate 등으로 나타났다. 본 연구에서 대상으로 한 그라비아 인쇄시설에서는 Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate, Acetone을 원료로 하며, 방직시설을 거친 후 Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate, Acetone, Toluene 등을 배출하여 요인2와 같은 성분을 보여주었다. 이는 그라비아 인쇄 시설의 오염원인 Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate와 일치하여(Shen et al., 2018) 인쇄 공정에서 사용하는 유기용제가 주요인자로 작용한 것으로 보인다.

요인3은 Acetone, 2-Propanol, Hexane 등으로 전자제품 제조시설의 오염원인 Acetone, 2-Propanol

Table 6. Factor Analysis of VOCs in the ambient air of Pyeongdong industrial complex

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Hexane	.271	-.027	.659	.073
Heptane	.003	.147	.042	.807
Undecane	.157	.033	.254	.764
Benzene	.285	.368	.504	.270
Toluene	.630	.650	.170	.161
Ethylbenzene	.797	.302	.290	.188
m,p-Xylene	.901	.286	.184	.127
o-Xylene	.910	.276	.181	.118
alpha-Pinene	.217	.608	.271	.045
3-Ethyltoluene	.888	.288	.223	.085
4-Ethyltoluene	.913	.250	.175	.083
1,2,4-Trimethylbenzene	.872	.180	.255	.064
Acetone	.345	.091	.577	.330
2-Propanol	.139	.225	.783	.156
Methyl ethyl ketone	.446	.717	.248	.109
Ethyl acetate	.280	.822	.024	.077
1-Butanol	.694	.082	.201	-.122
4-Methyl-2-pentanone	.559	.443	.054	.109
Butyl acetate	.855	.290	.020	.144
Dichloromethane	.021	.168	.847	-.032
Eigenvalue	7.221	2.941	2.921	1.624
Variance(%)	36.106	14.706	14.603	8.122
Cumulative(%)	36.106	50.812	65.416	73.538

과 일치하였다(Shen et al., 2018). 평동산단에는 전자 제품 제조업종이 많이 분포하고 있어 이러한 시설들로부터 배출되는 물질들이 주요인자로 작용한 것으로 추정된다. 요인 4는 Heptane, Undecane으로 나타났다. 평동산단은 대형차량의 통행이 많은 곳으로 디젤자동차 배출가스 오염원인 Heptane, Nonane, Decane, Undecane, Dodecane과 일치하여 자동차 배출가스가 주요인자로 작용한 것으로 판단된다(Liu et al., 2008).

4. 결론

본 연구는 평동산단의 도장·인쇄시설에서 배출되는 VOCs 성분 및 농도를 조사하고, 대기 중의 영향을 확인하기 위하여 대기 중 VOCs의 농도 분포 및 발생원을

파악하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 도장시설에서는 Aromatics류, OVOCs류가 주로 배출되었으며, Toluene, Acetone, Butyl acetate, 4-Methyl-2-pentanone, Ethyl acetate, 1-Butanol, Methyl ethyl ketone, m,p-Xylene, o-Xylene, 4-Ethyltoluene, Ethylbenzene, 3-Ethyltoluene, 1,2,4-trimethylbenzene 등이 주요 배출성분으로 나타났다.
- 2) 인쇄시설에서는 OVOCs류가 주로 배출되었으며, 주요 배출 성분은 Methyl ethyl ketone, Ethyl acetate, Acetone, 2-Propanol, Toluene, Heptane, Butyl acetate 등으로 나타났다.
- 3) 평동산단 대기 중에는 Ethyl acetate, Toluene, 2-Butanone, Acetone, Butyl acetate, 2-Propanol, Xylenes, 4-Methyl-2-pentanone

- 등이 검출되어 도장시설, 인쇄시설에서 배출하는 VOCs와 같은 성분이 존재하는 것으로 나타났다.
- 4) 계절별 TVOCs의 평균 농도는 겨울, 가을, 봄, 여름의 순으로 나타났으며, Alkanes류와 Halohydrocarbons류는 계절에 상관없이 평동산단 내에서 매우 낮은 농도를 나타내었다. 주간과 야간의 TVOCs 농도는 전반적으로 야간이 주간보다 높은 농도를 나타내었으며, 풍속은 야간보다 주간에 더 높은 결과를 보여주었다.
 - 5) 평동산단 대기 중 VOCs의 요인분석 결과, 4가지 요인이 전체의 73.5%를 설명해주었다. 요인1과 요인3의 주요인자는 자동차 도장시설, 전자제품 제조시설 등의 시설에서 표면코팅에 사용하는 유기용제로 평동산단에 존재하는 다양한 제조업종 및 도장시설에서 사용하는 물질의 영향을 받은 것으로 판단된다. 요인2는 인쇄공정에서 사용하는 물질들이 주요인자로 평동산단에 위치한 인쇄시설에서 사용하는 유기용제가 주요인자로 작용한 것으로 보인다. 요인4의 주요인자는 디젤자동차 배출가스로 추정되며, 대형 차량의 통행이 많은 평동산단의 특성상 이러한 자동차 배출가스가 주요인자로 작용한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2022년 환경부 “환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업”과 광주광역시보건환경연구원 “연구지원 및 역량강화” 사업의 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

Baek, S. O., Kim, M. H., Seo, Y. K., 2003, Evaluation of fugitive emission characteristics of airborne Volatile Organic Compounds from different source categories, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 19(4), 363-376.

Baek, S. O., Kim, S. H., Kim, M. H., 2005, Characterization of atmospheric concentrations of Volatile Organic Compounds in industrial areas of Pohang and Gumi cities, *J. Environ. Toxicol.*, 20(2), 167-178.

Baek, S. O., Seo, Y. K., Kim, J. H., 2020, Occurrence and distributions of Volatile Organic Compounds in the ambient air of large petro-chemical industrial

complexes: Focusing on Daesan area, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 36(1), 32-47.

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, *J. Odor Indoor Environ.*, 18(2), 156-166.

Cheong, J. P., You, S. J., 2011, Characteristics and identification of ambient VOCs sources in Busan industrial area, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 33(9), 644-655.

Choi, S. W., Park, S. W., Lee, C. S., Kim, H. J., Bae, S., Inyang, H. I., 2009, Patterns of VOCs and BTEX concentration in the ambient air around industrial sources in Daegu, Korea, *J. Environ. Sci. Heal. A.*, 44, 99-107.

Choi, S. W., Park, S. W., Cha, Y. W., Yoo, E. C., 2021, The characteristics of air pollutants distribution around industrial complexes using real-time mobile atmospheric measurement system, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 43(6), 476-489.

Chun, H. J., Song, J. H., Park, J. H., Choi, W. S., Lee, K. Y., Song, M. Y., 2021, Characteristics of the VOCs emitted from automotive painting workshop and control facilities, *J. Odor Indoor Environ.*, 20(1), 39-50.

Han, J. S., Lee, M. D., Lim, Y. J., Lee, S. U., Kim, Y. M., Gong, B. J., An, J. Y., Hong, Y. D., 2006, Study on the distributions of VOCs, Aldehydes, PAHs concentration in Seoul metropolitan area, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 22(5), 574-589.

Jeong, J. H., Kim, I. S., Oh, E. H., Lee, J. R., Kim, H. S., 2022, A Study on the distribution of air pollutants in petrochemical industrial complex on summer, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 44(5), 161-174.

Kim, K. R., Lee, J. Y., Lee, C. M., Park, M. K., Kwon, S. M., Sin, J. H., Eo, S. M., Shin, Y. S., Cho, M. S., Kim, J. W., Kim, J. H., Lee, Y. K., 2020, Characteristics of VOCs and carbonyl compounds concentration in indoor air of small scale printing facilities, *J. Odor Indoor Environ.*, 19(3), 278-289.

Kim, M. H., Park, D. G., Baek, S. O., 2002, Characteristics of atmospheric concentration of Volatile Organic Compounds at a heavy-traffic site in a large urban area, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 18(2), 113-126.

Kim, Y. M., Kim, H. W., 2009, The assessment of health risk and subjective symptoms of printing workers

- exposed to mixed organic solvents, *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, 19(3), 270-279.
- Kim, B. R., 2011, VOC Emissions from Automotive Painting and Their Control: A Review, *Environ. Eng. Res.*, 16(1), 1-9.
- 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's atmosphere, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 21(1), 11-23.
- Kim, D. G., Woo, J. S., Han, H. S., Kim, Y. J., Kim, W. S., Hong, S. M., Kim, J. S., Yoon, M. H., 2020, Distribution characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) in an industrial complex and in affected areas in Siheung and Ansan, *J. Environ. Health Sci.*, 46(3), 255-266.
- Kim, J. B., Park, D. S., Park, S. C., Michael, V., Lee, Y. G., Lee, S. S., Park, J. S., Kim, J. H., 2019, Concentration characteristics of particulate matter and Volatile Organic Compounds in petrochemical industrial complex using real-time monitoring devices, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 35(6), 683-700.
- Kim, S. H., Seo, D. J., Kim, H. R., Park, J. H., Lee, K. W., Bae, S. J., Song, H. M., 2020, Estimation and analysis of VOCs emissions from painting and printing facilities in industrial complexes of Gwangju, *J. Env. Sci. Intern.*, 29(5), 479-494.
- Kim, S. Y., Han, J. S., Kim, H. K., 2001, A Study on the source profile of Volatile Organic Compounds from major emission sources, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 17(3), 233-240.
- 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, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 37(1), 102-112.
- Lee, Y. Y., Lee, S. W., Hwang, S. C., Kang, S. K., Lee, I. S., Jeon, J. M., Hong, S. O., Cho, K. S., 2021, Emission characteristics of particulate matter and Volatile Organic Compounds (VOCs) from a motor vehicle painting booth and ozone production contribution evaluation, *J. Odor Indoor Environ.*, 20(1), 28-38.
- Liu, Y., Shao, M., Fu, L., Lu, S., Zeng, L., Tang, D., 2008, Source profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) measured in China: Part I, *Atmos. Environ.*, 42, 6247-6260.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR), 2022, National Air Pollutants Emission 2019.
- Ojala, S., Pitkääaho, S., Laitinen, T., Koivikko, N. N., Brahmi, R., Gaálová, Matejova, L., Kucherov, A., Päiväranta, S., Hirschmann, C., Nevanperä, T., Riihimäki, M., Pirilä, M., Keiski, R. L., 2011, Catalysis in VOC abatement, *Top Catal.*, 54, 1224-1256.
- Park, J. H., Park, B. H., Kim, S. H., Yang, Y. C., Lee, K. W., Bae, S. J., Song, H. M., 2021, Estimation of contribution by pollutant source of VOCs in industrial complexes of Gwangju using receptor model (PMF), *J. Env. Sci. Intern.*, 30(3), 219-234.
- Seo, Y. K., Chung, S. H., Baek, S. O., 2011, Current status and prospective of hazardous VOC in ambient air, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 27(6), 734-745.
- 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.
- Shin, H. J., Kim, J. S., Kong, H. C., 2020, A Study on the odor and Volatile Organic Compound characteristics of chemical blocks in Sihwa industrial complex using a selected ion flow tube mass spectrometers, *J. Odor Indoor Environ.*, 19(2), 177-185.
- 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. Korean Soc. Environ. Eng.*, 34(5), 316-325.
- 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.
- Yu, B. G., Tak, K. H., Lee, D. W., 2022, Characteristics of concentration distribution of volatile organic compounds in Ulsan using SIFT-MS, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 44(11), 406-417.
- 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. Min-Jin Kim
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
kmj1227@korea.kr
 - Researcher. Ok-Hyun Park
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
ok6854@korea.kr
 - Researcher. Yoon-Cheol Yang
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
ycyang83@korea.kr
 - Researcher. Jin-Hwan Park
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
mansaco@korea.kr

-
- Researcher. Ji-Yong Yu
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
dbwldyd123@korea.kr
 - Researcher. Hee-Yun Jung
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
yuni1000@korea.kr
 - Head. Gwang-Yeob Seo
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
sky521@korea.kr
 - Chief. Jong-Min Kim
Department of Environmental Research, Health &
Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju
61954 Korea
nepume@korea.kr