

논문

파주출판단지의 VOCs 농도 공간분포에 관한 연구

A Study on Distribution of Volatile Organic Compounds Concentration over Paju National Publishing Complex

이다솜, 김대환, 이동희¹⁾, 송민영²⁾, 김종범³⁾, 최우석⁴⁾, 홍천상⁵⁾, 김관철*

차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정 연구실, ¹⁾연세대학교 대기과학과,

²⁾서울기술연구원 기후환경 연구실, ³⁾충남연구원 서해안기후환경연구소,

⁴⁾세종대학교 데이터사이언스학과, ⁵⁾한국외국어대학교 연구산학협력단

Dasom Lee, Daehwan Kim, Donghee Lee¹⁾, Min Young Song²⁾, Jong Bum Kim³⁾,
Woosuk Choi⁴⁾, Chun Sang Hong⁵⁾, Kwanchul Kim*

Advanced PM Monitoring Laboratory, Advanced Institute of Convergence Technology,
Suwon, Republic of Korea

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

²⁾Division of Climate & Environmental Research, Seoul Institute of Technology, Seoul, Republic of Korea

³⁾Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

⁴⁾Department of Data Science, Sejong University, Seoul, Republic of Korea

⁵⁾Research Affaris/R&DB Foundation, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Republic of Korea

접수일 2022년 6월 10일

수정일 2022년 7월 12일

채택일 2022년 7월 17일

Received 10 June 2022

Revised 12 July 2022

Accepted 17 July 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-888-9411

E-mail : fehouse@snu.ac.kr

Abstract Paju National Publishing Complex emitted many Volatile Organic Compounds (VOCs). As a precursor of ozone and secondary organic aerosol, VOCs effected on climate change, air quality degradation, and human health. In this study, we used a real-time monitoring device of proton transfer reaction-time of flight-mass spectrometer (PTR-ToF-MS) on board a mobile laboratory to measure the concentration on the Paju National Publishing Complex from September 9 to September 11, 2021. Mobile measurement found that dominant species of VOCs in the Paju National Publishing Complex are investigated with toluene ($22.51 \pm 2.14\%$), methanol ($19.04 \pm 0.96\%$), and acetone ($16.39 \pm 0.61\%$). Temporal and spatial distributions of VOCs on Sep. 9 (M6), Sep. 10 (M8), and Sep. 11 (M15) cases showed mostly high concentrations. Moreover, heatmap analysis suggested a high pollution area near the printing industry. Based on the characteristics of VOCs distribution, it is conceivable that small-scale industry emission control could lead to regional air quality improvement.

Key words: Volatile organic compounds (VOCs), Printing industry, PTR-ToF-MS, Real-time monitoring, Mobile laboratory

1. 서론

국내 대기질은 국민적 관심과 우려의 증가에 따라 대기질 개선 정책을 시행하고 있음에도 불구하고 고농도 미세먼지 발생에 따른 경보제 발령횟수가 증가하는 경향을 보이고 있으며 (MOE, 2021), 2020년은 코로나의 영향으로 급감한 것으로 나타났다. 특히 2012년 이후 미세먼지 농도는 정체 또는 증가 경향을

보이고 있고, 이러한 원인으로는 국외유입뿐만 아니라 대기 정체 상태에 국내 배출 농도가 가중되어 대기질 악화 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다 (Crawford *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2017b).

대기질 악화를 유발하는 대기오염의 원인 물질인 휘발성유기화합물 (Volatile Organic Compounds, VOCs)은 오존 및 2차 에어로졸 전구물질로 공기 중으로 쉽게 휘발이 되는 특성을 갖고 있는 탄화수소 화

합물이고 기후변화, 대기질 악화, 인체 건강 위해성을 갖고 있는 것으로 알려져 있다(Soni *et al.*, 2018; Godish *et al.*, 2017; Seinfeld and Pandis, 2016). 특히, 국내에서 발생하는 대기 중 VOCs 배출은 석유화학산업, 의약품, 목재가공산업, 도장산업 등의 대규모 사업장이나, 세탁업, 인쇄업, 음식업, 자동차정비업 등과 같이 생활권 주변 소규모 배출원에서 배출되고 있다(Chae *et al.*, 2022; Chun *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2019). 대기환경보전법에서는 VOCs 배출시설에 대한 관리를 실시하고는 있으나(MOE, 2020), 인쇄시설 등과 같은 소규모 대기오염물질 배출시설에 대한 관리방안이 미비하고 배출량 산정방법도 보완이 필요한 실정이다.

대기오염물질 배출량 산정시스템인 대기정책지원 시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)에 따르면 우리나라 전체 VOCs 배출량은 최근 10년간 꾸준히 증가하는 추세를 보였으며, 2018년에는 1,035,636톤으로 전년 대비 -1.14%로 감소하였지만 2007년(851,162톤) 대비 21.67%(184,474톤) 증가한 것으로 나타났다. 전체 VOCs 배출량 중에서 가장 많은 기여율(52.59%)을 차지하는 유기용제 사용은 도장시설, 세정시설, 세탁시설, 기타 유기용제 사용으로 구분되며, 배출량은 전년 대비 -2.89%(16,295톤) 감소한 것으로 나타났다. 기타 유기용제 사용에 의한 VOCs 배출의 대부분을 차지하고 있는 인쇄업은 2007년(7,482톤)에서 2018년(27,614톤)으로 약 3.7배 증가하였다(NAIR, 2021). 인쇄업은 마스터인쇄, 스크린인쇄, 옵셋인쇄, 그라비아인쇄로 구분해 배출량을 산정하고 있지만 인쇄조건(인쇄방법, 잉크 및 사용 용제) 등을 고려하지 않아 정확한 현황 파악 및 관리 대책 마련에 한계가 있다(NIER, 2016).

국내에서 운영 중인 인쇄 사업장은 영세한 소규모 사업장이 대부분이며 잉크, 유기용제 등을 사용하고 있지만 환기 및 저감 장치가 잘 마련되어 있지 않고 방독마스크, 유형별 보호장갑 등 유독물질을 차단할 수 있는 기본적인 보호장비가 지급되지 않는 곳이 대부분이다. 또한, 작업 환경 관리가 제대로 이뤄지지 않

아 작업자들이 유해물질에 직접적으로 장시간 노출될 가능성이 높다. 선행 연구에 따르면 유기용제 사용으로 배출되는 일부 VOCs는 발암성 등 유해성을 가지고 있어 작업장에서 근로자의 건강에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Baan *et al.*, 2009). 대규모 사업장의 경우 대기환경보전법 및 시행령 등에 근거하여 대기오염물질을 배출허용기준 이하로 낮춰서 배출하고 있지만, 소규모 사업장에 해당하는 인쇄 사업장의 경우 작업 중 사용되는 유기용제로부터 발생한 VOCs가 환기구나 창문을 통해 작업 환경 주변의 주거지역으로 배출 및 확산되고 있다(Seoul Metropolitan Government, 2021; Hwang *et al.*, 2019).

전국에서 가장 많은 대기오염물질을 배출하는 경기도는 대기오염물질 배출량이 2014년 512,288톤 대비 2018년 692,117톤으로 35.10% 증가하였다. 물질별로는 VOCs가 27.59%로 가장 높은 비율로 나타났으며, 경기도 VOCs 배출량은 190,940톤으로 전체 VOCs 배출량의 18.44%를 차지하는 것으로 나타났다. 경기도의 경우 VOCs 배출원 중 유기용제 사용에 의한 VOCs 배출량이 69.80%로 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났고(NAIR, 2021), 인쇄소, 도장시설, 세탁, 출판 등의 소형 사업장과 대기배출시설로 등록된 다수의 산업단지(1~5종 사업장)의 영향을 복합적으로 받고 있기에, 소규모 사업장 관리를 위한 연구기반 마련의 필요성이 제안되고 있다(Kim *et al.*, 2017a). 따라서 전국 인쇄업 VOCs 배출량의 53.96%를 차지하는 경기도 인쇄업에 대한 연구가 필요하며(NAIR, 2021), 특히 파주에는 인쇄소 밀집지역이 존재하고 있어 해당 지역에서 배출되는 VOCs에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 인쇄 밀집지역의 VOCs 배출 특성 및 도심지역 파악을 위해 파주출판단지에서 이동측정을 통해 VOCs 측정 및 분석을 수행하였다. 이를 위해 파주출판단지에서 발생하는 VOCs를 측정하고자 2021년 9월 9일부터 11일까지 이동식 측정 차량을 활용하여 VOCs 농도 시공간 분포 및 특성을 분석하였다. 또한, 소규모 사업장이 밀집된 지역에서 배출된

VOCs 농도 분포 및 특성을 파악하여 대기오염물질 배출 관리 및 정책 수립을 위한 기초자료를 마련하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상 및 이동측정

본 연구는 경기도 내 인쇄 밀집지역의 VOCs 분석을 위해 파주시에 위치한 파주출판문화정보 국가산업

단지(이하 파주출판단지)를 연구 대상으로 선정하였고, 그림 1에 나타냈다(LH, 2013). 파주출판단지는 국내 유일의 출판문화산업단지로 2019년 기준 전국 인쇄 업체 17,622개소 중 파주시에 576개소가 밀집되어 운영 중이다(KOSIS, 2019). 업종별 구성으로는 출판업, 상업인쇄 시설 및 인쇄 관련 서비스업, 출판 유통 관련 업종으로 구성되어 있으며, 이 중 출판업 및 영상 관련 산업부지와 상업인쇄 및 인쇄 관련 서비스업, 영상 관련 산업부지가 약 208,263.4 m² (53.9%)와 약 103,665.8 m² (26.8%)로 가장 많은 면적을 차지하고 있는 것으로 나타났다(MOTIE, 2020).

본 연구는 파주출판단지의 시공간 VOCs 분포를 파악하기 위해 이동측정이 가능한 차량에 양자전이비행시간질량분석기(Proton Transfer Reaction-Time of Flight Mass Spectrometer, PTR-ToF-MS) 장비를 탑재하여 2021년 9월 9일부터 2021년 9월 11일까지 총 3일간 이동측정하여 분석하였다. 이동측정에 적합한 장비인 PTR-ToF-MS는 시료의 전처리 없이 대기 시료를 직접 유입시켜 VOCs 실시간 측정이 가능하기에 해당 장비를 탑재하여 측정을 진행하였다. 2021년 9월 9일 08:45~17:46까지 총 7번 측정하였고, 9월 10

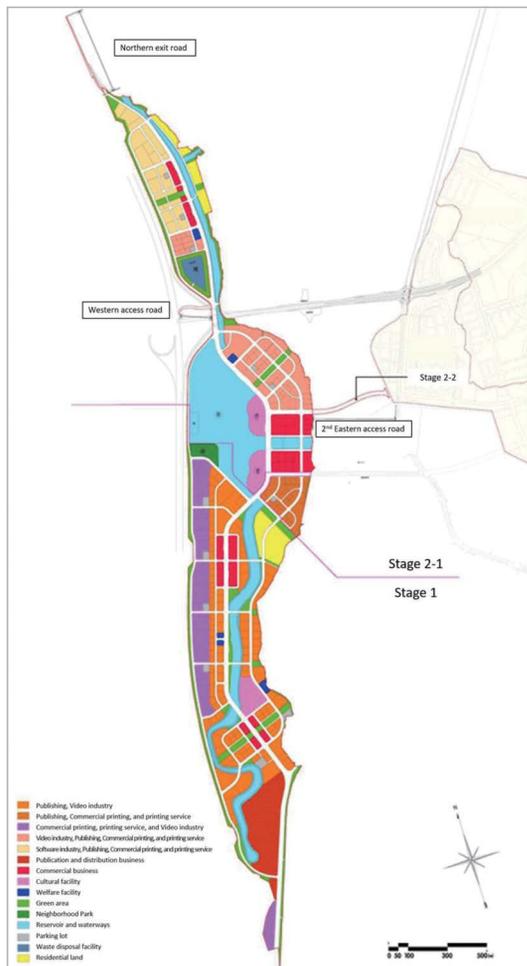


Fig. 1. Land use planning for Paju National Publishing Complex.

Table 1. Schedule for mobile laboratory and measured data.

Date	Time	NO.	Data count
September 9, 2021 (Thursday)	08:45~09:18	M1	1,952
	10:02~10:41	M2	2,340
	11:32~12:07	M3	2,098
	12:59~13:29	M4	1,793
	14:28~14:56	M5	1,684
	15:53~16:22	M6	1,786
	17:26~17:46	M7	1,586
September 10, 2021 (Friday)	08:07~08:34	M8	1,668
	09:30~10:02	M9	1,905
	10:54~11:21	M10	1,644
	12:24~12:51	M11	1,601
	14:02~14:30	M12	1,718
September 11, 2021 (Saturday)	08:19~08:51	M14	1,910
	09:26~09:55	M15	1,734
Total			27,529

Table 2. VOCs target compounds of PTR-ToF-MS.

NO.	Abbreviation	Substance	Formula	Mass	Characteristic
1	HCHO	Formaldehyde	CH ₂ O	31.02	OVOCs*, photochemical
2	MOH	Methanol	CH ₄ O	33.03	OVOCs
3	AN	Acetonitrile	C ₂ H ₃ N	42.03	Automobile
4	AA	Acetaldehyde	C ₂ H ₄ O	45.03	OVOCs, Automobile
5	ACT	Acetone	C ₃ H ₆ O	59.05	OVOCs
6	IPA	Isopropyl alcohol	C ₃ H ₈ O	61.03	-
7	ISP	Isoprene	C ₅ H ₈	69.07	BVOCs**
8	MVK	Methyl Vinyl Ketone	C ₄ H ₆ O	71.05	Petrochemical, OVOCs
9	MEK	Methyl Ethyl Ketone	C ₄ H ₈ O	73.06	Petrochemical, OVOCs
10	BZ	Benzene	C ₆ H ₆	79.05	Carcinogenic
11	TOL	Toluene	C ₇ H ₈	93.07	Carcinogenic, Solvents
12	STR	Styrene	C ₈ H ₈	105.07	Carcinogenic, Plastics
13	XYL	Xylene	C ₈ H ₁₀	107.09	Carcinogenic, Solvents
14	TMB	Trimethylbenzene	C ₉ H ₁₂	121.10	Carcinogenic
15	TVOCs	Total Volatile Organic Compounds			Sum of the individual VOCs

*OVOCs: Oxygenated volatile organic compounds; including alcohols, aldehydes, ester, ether, ketone, carboxylic acid, multifunctional species, oxygenated aromatics

**BVOCs: Biogenic Volatile Organic Compounds, Natural emission of VOCs from forest and green areas

2021; Kim *et al.*, 2020a; Kim *et al.*, 2020b; SIT, 2020; Chae *et al.*, 2019; Hwang *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2001), 각 개별물질에 대한 정보를 표 2에 정리하였다. 대상 개별물질에 대해서는 측정 전 표준시료를 사용하여 교정작업을 수행하였고, 교정곡선을 작성하여 검량선의 결정계수 ($R^2 > 0.99$)를 통해 장비의 정상가동 여부를 확인하였다. 각 개별물질은 이동측정 동안 초 단위로 측정이 되었기에 측정일자별 구간에 따른 분석을 위해 측정값을 평균하여 분석에 사용하였고, 각 VOCs 개별물질 측정값의 합을 Total Volatile Organic Compounds (TVOCs)로 계산하여 파주출판단지 내 분포 특성을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파주출판단지 도로변 측정 결과

파주출판단지 이동측정에 앞서 도로변 지점측정을 통해 VOCs 개별물질 평균농도 비율 분포를 확인하였다(그림 3). 측정 결과에 따르면 각 VOCs 개별물질

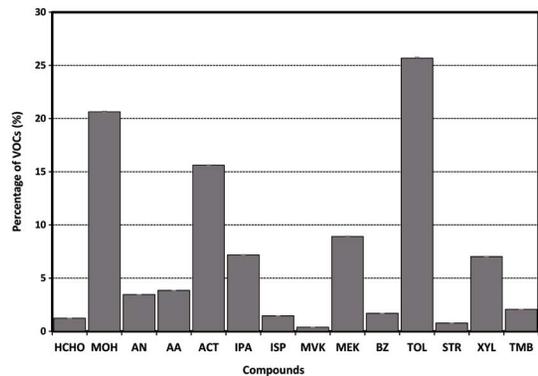


Fig. 3. Mean concentration of each VOCs concentration (unit: ppb) measured in stationary site.

농도 비율 (mean \pm S.D.)은 toluene ($25.68 \pm 40.34\%$), methanol ($20.64 \pm 19.30\%$), acetone ($15.62 \pm 15.13\%$), methyl ethyl ketone ($8.91 \pm 17.13\%$), isopropyl alcohol ($7.91 \pm 13.03\%$) 순으로 높게 나타났다. 특히, 가장 높은 농도를 보인 toluene의 경우 평균농도 비율보다 높은 표준편차 비율(40.34%)을 보이고 있었고, 측정 기간 동안 평균농도 비율이 최소 7.55%에서 최대 33.30%로 편차가 큰 것으로 나타났다. Toluene의 높

은 평균농도와 표준편차는 측정 위치에 따라 발생원에서 배출된 VOCs에 의해 편차가 커졌음을 의미한다. 하지만, 이러한 특성이 파주출판단지에서 배출되는 모든 VOCs 성분에 영향을 미치는지 확신할 수 없기에 이동측정을 통해 인쇄시설에서 배출되는 주요 VOCs 물질에 대한 분포 특성을 파악하고자 하였다.

3.2 파주출판단지 VOCs 분포 특성 파악

파주출판단지 VOCs 변화를 살펴보기 위해 이동측정을 수행하였고, 이동측정 결과를 대상으로 측정일자 구간별 TVOCs 평균농도를 확인하였다. 측정일자별로 살펴보았을 때 9월 9일 오전 중에는 TVOCs가 높았지만 급격하게는 증가하지 않다가 M6인 오후 시간(15:53~16:22)에 TVOCs 평균농도가 82.87 ppb로 가장 높게 나타났고, M7(17:26~17:46)에서 39.36 ppb로 다시 급격히 감소하였다. 9월 10일은 오전 시간대에 TVOCs 평균농도가 높게 나타났고 M8(08:07~08:34)에 81.70 ppb로 가장 높게 나타났으며 오후 시간대로 갈수록 농도가 점차 낮아졌다. 9월 11일은 토요일로 인쇄 작업이 거의 없을 것으로 예상했지만 M14(08:19~09:55)에 비해 M15(09:26~09:55)에 TVOCs 평균농도가 약 10% 높게 나타났다. TVOCs 1일 평균 최대치와 최소치 비교에서는 9월 9일 12.90배, 9월 10일 10.85배, 9월 11일 6.19배 차이가 나는 것을 확인하였다. 파주출판단지는 출판단지 서쪽에 위치한 77번 국도를 제외하면 큰 도로가 없으며, 습지나 산림, 논밭과 같은 녹지에 둘러싸여 있어 주변에서 이동되는 오염물질의 영향을 적게 받는 지역이다. 따라서 인쇄 작업에 따라 VOCs 배출이 나타나고 있으며, 작업량이나 작업 시간이 일정하게 이루어지지 않는 것을 알 수 있었다.

파주출판단지 이동측정 각 구간별 VOCs 개별물질 구성비를 비교하여 그림 4에 나타내었다. VOCs 개별물질별 농도 비율은 각 측정별 약간의 차이가 나타났고, 개별물질의 비율(mean \pm S.D.)은 toluene (22.51 \pm 8.29%), methanol (19.01 \pm 3.73%), acetone (16.39 \pm 2.38%), methyl ethyl ketone (9.24 \pm 3.40%) 순으로 나

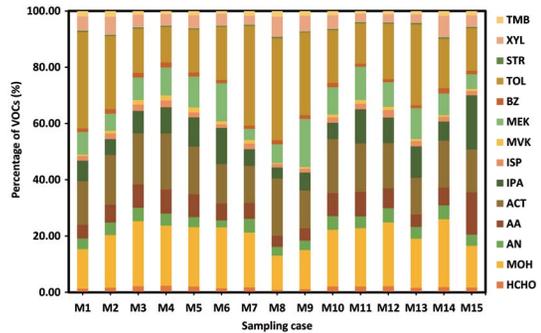


Fig. 4. Percentage of each VOCs by measurement classification over Paju National Publishing complex using a mobile laboratory.

타났다. TVOCs가 고농도로 나타났던 측정의 구성 비율을 살펴보면 M6에서는 methanol, toluene, methyl ethyl ketone 순으로 비율이 높게 나타났고, M8에서는 toluene, acetone, methanol, methyl ethyl ketone 순으로 비율이 높게 나타났으며, M15에서는 isopropyl alcohol, acetone, toluene, acetaldehyde 순으로 비율이 높게 나타났다. 인쇄공정에서 발생하는 VOCs는 인쇄 종류와 사용되는 잉크에 따라 달라지는데, 선행 연구에서도 인쇄시설에서 배출되는 VOCs가 대부분 toluene 등으로 조사되어 (Kim *et al.*, 2020b; Park *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2001) 본 연구에서 측정한 파주출판단지의 VOCs 개별물질과 거의 유사한 것으로 나타났다. Toluene의 경우 실외배출허용기준이 마련되어 있지 않지만 측정에 따른 최대농도가 실내공기질 관리법 시행규칙에 따른 신축 공동주택의 실내 공기질 권고 기준 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (226 ppb)보다 2.59배 높게 나타났다. 앞서 평균농도가 높았던 toluene, methanol, acetone, isopropyl alcohol 등의 개별물질은 농도가 높아짐에 따라 TVOCs 농도도 높게 나타났는데, 이는 인쇄 공정 중 사용되는 유기용제 및 도료가 특정 VOCs 성분 농도를 높여 TVOCs도 함께 높아짐을 알 수 있었다. 또한, 인쇄 시 사용되는 잉크에 따른 오존생성 기여도는 aromatic 계열인 trimethylbenzene과 alkane 계열인 nonane 등이 높게 나타나 (Lee *et al.*, 2021) 오존생성 기여도가 높게 평가되는 업종이나 도료제품에

대한 적절한 규제가 필요할 것이다.

파주출판단지 내에서 운영 중인 인쇄 사업장은 대부분 소규모 사업장으로 전문인력 부족으로 인쇄 중 발생하는 VOCs 배출 관리가 효율적으로 이루어지지 않고 있다. 이로 인해, 이동측정 시 인쇄시설 주변에서 VOCs 농도가 급상승하는 경우가 나타나는 등 주변 대기 환경에 영향을 끼친 것으로 판단되어, 측정 일자별 TVOCs가 가장 고농도로 나타난 M6, M8, M15의 이동측정 경로를 따라 TVOCs 공간분포에 따른 우심지역을 알아보고자 하였다.

3.3 파주출판단지 VOCs 공간분포에 따른 우심지역 파악

파주출판단지는 서쪽에 위치한 고속도로를 제외하고는 주변이 습지와 녹지지역으로 분포되어 있어 외부로부터 유입되는 VOCs 영향이 적고, 내부에는 인쇄시설이 조밀하게 붙어있고 차량 통행량이 적어 VOCs는 대부분 사업장에 직접 배출되는 형태이기에 파주출판단지 내 VOCs 우심지역을 파악할 필요가 있다. 측정 기간 동안 기상조건을 확인하기 위해 파주출판단지 인근에서 측정된 기상청 자동기상관측망 자료를 활용하였다(KMA, 2021). 그림 5는 파주출판단지의 인쇄 사업장 중심으로 측정 경로 1과 2를 따라 TVOCs 농도를 분석하여 공간분포로 나타내었다. 9월 9일 M6 (15:53~16:22)에서는 전체 측정 경로의 약 89%에서 60 ppb 이상의 고농도로 나타났으며, 특히 파주출판단지를 중심으로 서쪽에 위치한 경로 1에서 농도가 상대적으로 더 높게 나타났다(그림 5a). 이러한 고농도 VOCs는 강한 서풍(2.5 m/s)을 따라 인접주거지역으로 확산되어 오존 1시간 평균치 대기환경기준인 0.1 ppm에 근접한 0.09 ppm으로 나타난 것을 확인할 수 있었다. 9월 10일 M8 (08:07~08:34)에서는 전체 측정 경로의 약 98%에서 60 ppb 이상의 고농도로 나타났으며(그림 5b), 풍향은 동북동풍, 풍속은 1.1 m/s로 약하게 나타나 상대적으로 확산이 덜 발생한 것으로 보인다. 9월 11일 M15 (09:26~09:55)에서는 M8과 유사하게 고농도 분포가 나타났으며, 출판단지

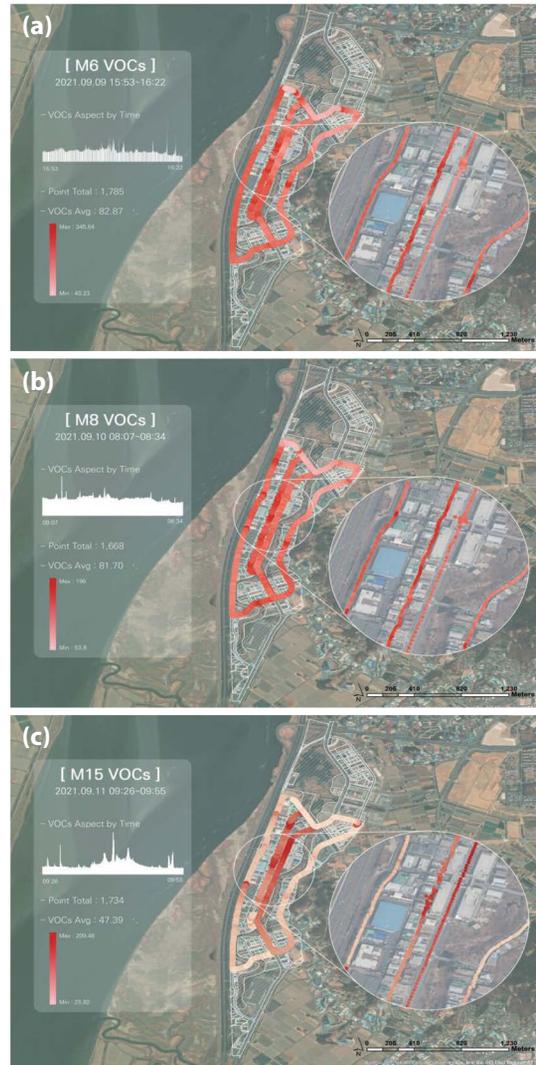


Fig. 5. Spatial distribution of high TVOCs concentration on each measurement day. (a) September 9 M6, (b) Sep. 10 M8, and (c) Sep. 11 M15.

중심 부근인 경로 1 우측 및 경로 2 좌측에서 고농도가 지속적으로 나타나는 특징을 보였다(그림 5c). 이러한 분포 특성은 파주출판단지 내 인쇄 사업장이 밀집되어 있고 일반도로의 도로 폭이 좁은 지역에서 약한 풍속(0.2 m/s)에 의해 확산이 원활하게 일어나지 않아 사업장 중심으로 대기 중 TVOCs 평균농도 (70.65 ± 20.16 ppb)가 높게 나타나지만, 파주출판단지

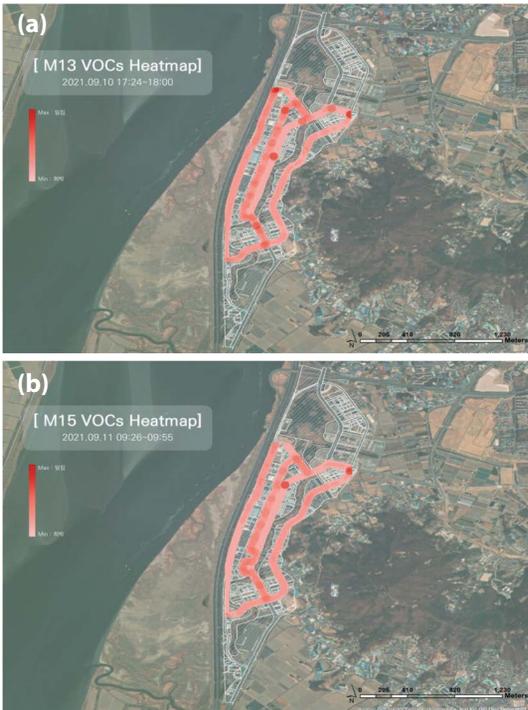


Fig. 6. Analysis of heatmap for a high pollution area. (a) September 10 M13, and (b) Sep. 11 M15.

동쪽에 위치한 인접주거지역의 오존 1시간 평균농도는 0.038 ppm으로 상대적으로 낮게 나타난 것으로 확인되었다(Air Korea, 2021). 이는 그림 6 히트맵 분석에서도 확인이 가능하며, 인쇄시설 밀집지역과 VOCs 농도 히트맵이 뚜렷하게 나타나는 M13과 M15를 선택하여 나타내었다. 빨간색으로 표현된 위치는 배출된 VOCs의 밀집도가 높은 지역을 나타내고 있으며, 이는 인쇄시설의 위치와 일치한다. 히트맵 분석 결과에서는 측정일자가 달랐음에도 파주출판단지 중심 부근 좁은 도로에 동일한 VOCs 우심지역을 형성하고 있음을 확인하였다(그림 6). 이에 따라 VOCs 우심지역으로부터 풍속과 풍향 등의 기상조건에 의한 확산 정도에 따라 인접주거지역에도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 연구의 측정 지역은 주변이 녹지로 둘러싸여 있고 인쇄 사업장 외에 다른 오염물질 배출시설이 없어

이동오염원의 영향이 적고 측정 경로 내에서는 차량 통행이 거의 없어 측정 거리 약 7 km를 30 km/h 이하 속도로 운행하며 약 28.4분 동안 측정할 수 있었다. 그렇기에 인쇄 사업장과 인접주거지역은 인쇄공정에서 사용되는 잉크와 용제로 인한 VOCs 등의 영향을 주로 받았을 것이다. 따라서, 파주출판단지의 대기 중 VOCs 주된 발생 원인은 인쇄 및 출판 관련 사업장에 의한 배출이며, 인쇄 작업에 따라 출판단지 중심으로 VOCs 농도가 증가해 고농도 상태가 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 인쇄 밀집지역의 대기오염배출 특성 및 우심지역을 파악하고자 파주인쇄단지에서 대기오염 물질 이동측정 및 분석을 진행하였으며, 인쇄 사업장에서 배출되는 VOCs 성분, 농도, 분포 특성을 파악하였다.

- 1) 파주출판단지 내 인쇄 사업장에서 배출된 VOCs 개별물질은 toluene, methanol, acetone, isopropyl alcohol 등이 주요 성분으로 나타났다.
- 2) 측정일자별로는 9월 9일 M6 (15:53~16:22)에 TVOCs 평균농도가 82.86 ppb로 가장 높은 농도로 나타났으며, 9월 10일은 M8 (08:07~08:34)에 TVOCs 평균농도가 81.70 ppb로 가장 높은 농도로 나타났다. 9월 11일은 앞선 두 날짜에 비해 상대적으로 TVOCs 평균농도가 낮게 나타났지만 M15 (09:26~09:55)에 47.39 ppb로 가장 높은 농도로 나타났다.
- 3) 분포 형태로는 9월 9일 M6 (15:53~16:22)에서는 이동측정 약 89% 이상이 고농도 VOCs로 분포하는 것을 확인할 수 있었고, 9월 10일 M8 (08:07~08:34)엔 이동측정 약 98% 이상에서 고농도 VOCs가 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 9월 11일 M15 (09:26~09:55)엔 파주출판단지 중심으로 부근인 경

로 1 우측과 경로 2 좌측에서 고농도 VOCs가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

- 4) 히트맵 분석을 통해 배출된 VOCs 밀집도가 높은 지역과 인쇄시설의 위치가 일치하는 것을 확인하였고, 파주출판단지 중심 부근 좁은 도로를 따라서 도심지역을 형성한다는 것을 파악하였다.

본 연구는 인쇄 밀집지역에서 배출되는 VOCs 특성에 대한 연구를 수행하여 소규모 사업장의 VOCs 배출 관리에 기여하고자 하였다. 파주출판단지와 같이 많은 인쇄소가 밀집해 있는 경우 개별 사업장에서 발생한 VOCs 등 대기오염물질이 외부로 배출되어 주변 대기질에 영향을 미치게 되고, 인근지역으로 확산되어 주민들의 건강에 악영향을 미칠 수 있다. 추후 연구를 통해 인쇄 밀집지역에서 배출되는 VOCs가 주변 지역의 오존 농도 및 인근 주거지역에 미치는 영향에 대한 연구를 진행할 예정이다. 소규모 사업장의 경우 적절한 규제 방안이 마련되어 있지 않아 관리가 미흡하기에 사업장별 안전교육 실시, 적절한 저감 시설 적용 및 제도 마련 등이 필요할 것으로 보여진다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부와 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력프로젝트(과제번호 22NSPS-C151375-05)와 차세대융합기술연구원(과제번호 AICT-2022-0002) 지원으로 수행되었습니다. 측정에 협조해주신 (주)에이피엠엔지니어링 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

Air Korea (2021) Real-Time Air Quality. URL: <https://www.airkorea.or.kr> (accessed on July 4, 2022).
 Baan, R., Grosse, Y., Straif, K., Secretan, B., el Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Freeman, C., Gali-

chet, L., Coglianò, V. (2009) A review of human carcinogens - Part F: chemical agents and related occupations, *The Lancet Oncology*, 10(12), 1143-1144. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(09\)70358-4](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(09)70358-4)
 Chae, J.-S., Chae, J.-S., Kim, M.-Y., Jeon, J.-M., Lee, T.-J., Jo, Y.-M. (2022) Inventory of VOCs Including Ozone Precursors Emitted from Residential Workplaces and Evaluation of Contribution to Ozone Formation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 175-187, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.175>
 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>
 Chun, H., Song, J., Park, J., Choi, W., Lee, K., Song, M.Y. (2021) Characteristics of the VOCs emitted from automotive painting workshop and control facilities, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 20(1), 39-50, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2021.20.1.39>
 Crawford, J.H., Ahn, J.Y., Al-Saadi, J., Chang, L., Emmons, L.K., Kim, J., Lee, G., Park, J.H., Park, R.J., Woo, J.H., Song, C.K., Hong, J.H., Hong, Y.D., Lefer, B.L., Lee, M., Lee, T., Kim, S., Min, K.E., Yum, S.S., Shin, H.J., Kim, Y.-W., Choi, J.-S., Park, J.-S., Szykman, J.J., Long, R.W., Jordan, C.E., Simpson, I.J., Fried, A., Dibb, J.E., Cho, S., Kim, Y.P. (2021) The Korea-United States air quality (KORUS-AQ) field study, *Elementa*, 9(1), 00163. <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00163>
 Godish, T., Davis, W.T., Fu, J.S. (2017) *Air quality*, 5th Edition. CRC/Lewis Publishers.
 Hwang, C.-W., Song, I.-S., Kim, S.-K., Oh, C.-H., Kim, T.-H., Jeong, B.-H., Park, E.-H., Kim, J.-S., Choi, K.-C. (2019) A Study on the Emission Characteristics and Impact of Aldehydes from the Printing Industry, *Journal of Environmental Health Sciences*, 45(5), 474-486, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/JEHS.2019.45.5.474>
 Jordan, A., Haidacher, S., Hanel, G., Hartungen, E., Märk, L., Seehauser, H., Schottkowsky, R., Sulzer, P., Märk, T.D. (2009) A high resolution and high sensitivity proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometer (PTR-TOF-MS), *International Journal of Mass Spectrometry*, 286(2-3), 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2009.07.005>
 Kim, D.Y., Choi, M., Yoon, B. (2017a) Establishment of Investiga-

- tion System on Air Pollutants Emission Facilities in Gyeonggi-Do, Gyeonggi Research Institute, (in Korean with English abstract).
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, R., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M., Song, C.-K., Stein, A. (2017b) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, *Nature Scientific Reports*, 7(1), 4710. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, H.-N., Bong, C.-K., Kim, Y.-G., Jeon, J.-M. (2013) The Study on the Emission Characteristics of HAPs and PM from the Motor Vehicle Paint Facility, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(6), 713-721, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2013.29.6.713>
- Kim, K.-R., Lee, J.-Y., Lee, C., Kwon, S.-M., Cho, S.-J., Sin, J.-H., Eo, S.-M., Shin, Y.-S., Cho, M., Kim, J., Kim, J., Lee, Y.-K. (2020a) Volatile content and VOCs emitted from inks used in the printing industry, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 19 (2), 166-176, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2020.19.2.166>
- Kim, S.-H., Seo, D.-J., Kim, H.-R., Park, J.-H., Lee, K.-W., Bae, S.-J., Song, H.-M. (2020b) Estimation and Analysis of VOCs Emissions from Painting and Printing Facilities in Industrial Complexes of Gwangju, *Journal of Environmental Science International*, 29(5), 479-494, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/jesi.2020.29.5.479>
- Kim, S.-Y., Han, J.S., Kim, H.K. (2001) A Study on the Source Profile of Volatile Organic Compounds from Major Emission Sources, *Journal of Korean Society Form Atmospheric Environment*, 17, 233-240, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/https://doi.org/10.5322/JES.2003.12.4.487>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2021) KMA weather data service, Open MET data portal. URL: <https://data.kma.go.kr> (accessed on July 4. 2022).
- KOrean Statistical Information Service (KOSIS) (2019) Korean statistical information service. Statistics Korea. <https://kosis.kr/eng/>
- Lee, D., Wang, S.Y. (Simon), Zhao, L., Kim, H.C., Kim, K., Yoon, J.H. (2020) Long-term increase in atmospheric stagnant conditions over northeast Asia and the role of greenhouse gases-driven warming, *Atmospheric Environment*, 241, 117772. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117772>
- Lee, H., Song, M., Kim, D. (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, 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>
- LH (Korea Land & Housing Corporation) (2013) Paju National Publishing Complex Project Completion. <https://www.lh.or.kr/eng/contents/cont.do>
- Ministry of Environment (MOE) (2020) Clean Air Conservation Act. URL: <https://elaw.klri.re.kr> (accessed on July 5. 2022).
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Annual Report of Air Quality in Korea 2020. URL: <https://me.go.kr> (accessed on June 29. 2022).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) (2020) National Industrial Complex Management Basic Plan (Paju National Publishing Complex). URL: <https://law.go.kr> (accessed on June 10. 2020).
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2021) 2018 National Air Pollutant Emissions. URL: <https://www.air.go.kr> (accessed on May 30. 2022).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Improvement study on estimation method of emission factor for small-scale VOCs emission facilities report. <https://doi.org/10.23000/TRKO201700008071>
- Park, C.G., Yoo, N.J., Chol, B.K., Ko, K.B. (2009) A Treatment of Low-level High-volume VOCs Emitted from Printing Process Using Concentrator with Zeolite Adsorptive Honey Rotor and Catalytic Combustion System, *Journal of Environmental Science International*, 18(3), 283-288, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2009.18.3.283>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Hoboken.
- Seoul Metropolitan Government (2021) Investigation of emission inventory via collecting specific big data on PM_{2.5} report.
- Seoul Institute of Technology (SIT) (2020) Management Plan of Volatile Organic Compounds emitted from Small-scale Painting Facility, (in Korean with English abstract).

Song, M.Y., Chun, H. (2021) Species and characteristics of volatile organic compounds emitted from an auto-repair painting workshop, *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96163-4>

Soni, V., Singh, P., Shree, V., Goel, V. (2018) Effects of VOCs on Human Health, in *Air Pollution and Control*. Edited by N. Sharma, A.K. Agarwal, P. Eastwood, T. Gupta, & A.P. Singh, Springer Singapore, pp. 119-142. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7185-0_8

김대환 (차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정 연구실 연구원) (dhbit@snu.ac.kr)

이동희 (연세대학교 대기과학과 박사과정) (awzsseed@yonsei.ac.kr)

송민영 (서울기술연구원 기후환경연구실 수석연구원) (mysong@sit.re.kr)

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원) (kjb0810@cni.re.kr)

최우석 (세종대학교 데이터사이언스학과 조교수) (wschoi@sejong.ac.kr)

홍천상 (한국외국어대학교 연구산학협력단 산학협력연구교수) (hcs103@gmail.com)

김관철 (차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정 연구실 선임연구원) (fehouse@snu.ac.kr)

Authors Information

이다솜 (차세대융합기술연구원 미세먼지 신기술 측정 연구실 선임연구원) (leedasom@snu.ac.kr)