Original Article

수용체 모델(PMF)를 이용한 서울시 대기 중 VOCs의 배출원에 따른 위해성평가

권승미^{1,2} , 최유리² , 박명규² , 이호준² , 김광래² , 유승성² , 조석주² , 신진호² , 신용승² , 이철민^{1*}

¹서경대학교 환경화학공학과, ²서울특별시보건환경연구원

Health Risk Assessment with Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Seoul by Positive Matrix Factorization

Seung-Mi Kwon^{1,2}, Yu-Ri Choi², Myoung-Kyu Park², Ho-Joon Lee², Gwang-Rae Kim², Seung-Sung Yoo², Seog-Ju Cho², Jin-Ho Shin², Yong-Seung Shin², and Cheolmin Lee^{1*}

¹Department of Environmental Chemical Engineering, Seogyong University, ²Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment

ABSTRACT

Background: With volatile organic compounds (VOCs) containing aromatic and halogenated hydrocarbons such as benzene, toluene, and xylene that can adversely affect the respiratory and cardiovascular systems when a certain concentration is reached, it is important to accurately evaluate the source and the corresponding health risk effects.

Objectives: The purpose of this study is to provide scientific evidence for the city of Seoul's VOC reduction measures by confirming the risk of each VOC emission source.

Methods: In 2020, 56 VOCs were measured and analyzed at one-hour intervals using an online flame ionization detector system (GC-FID) at two measuring stations in Seoul (Gangseo: GS, Bukhansan: BHS). The dominant emission source was identified using the Positive Matrix Factorization (PMF) model, and health risk assessment was performed on the main components of VOCs related to the emission source.

Results: Gasoline vapor and vehicle combustion gas are the main sources of emissions in GS, a residential area in the city center, and the main sources are solvent usage and aged VOCs in BHS, a greenbelt area. The risk index ranged from 0.01 to 0.02, which is lower than the standard of 1 for both GS and BHS, and was an acceptable level of 5.71×10^{-7} to 2.58×10^{-6} for carcinogenic risk.

Conclusions: In order to reduce the level of carcinogenic risk to an acceptable safe level, it is necessary to improve and reduce the emission sources of vehicle combustion and solvent usage, and eco-car policies are judged to contribute to the reduction of combustion gas as well as providing a response to climate change.

Key words: Health risk assessment, positive matrix factorization, source apportionment, volatile organic compounds

Received August 11, 2021

Revised October 6, 2021

Accepted October 7, 2021

Highlights:

- The annual concentration of TVOCs was found to be higher in Gangseo, an urban residential area, than in Bukhansan, a green area.
- As a result of the health risk assessment, both non-carcinogens and carcinogens were found to be at acceptable levels.

*Corresponding author:

Department of Environmental Chemical Engineering, Seogyong University, 124 Seogyong-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02713, Republic of Korea
Tel: +82-2-940-2924
Fax: +82-2-940-7616
E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

I. 서 론

휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 공 기억학적 직경이 2.5 μm 미만인 초미세먼지(PM_{2.5})의 주요 원인 인 2차 유기에어로졸(Secondary organic aerosols, SOA)과 대류 권 오존(O₃)의 주요 전구체이다.^{1,2)} 또한 VOCs는 특정 농도 이 상에서 호흡기 및 심혈관계 등에 악영향을 미치며, 일부 VOCs 의 경우 대표적 발암물질로 알려져있어 환경·보건 관점에서 매

우 중요한 유해오염물질로 다루어져 왔다.³⁾ 이런 VOCs는 대기 중 어디에나 존재하며 자연적 과정(예: 초목 배출, 화산 분출 및 산불)과 화석 연료 연소, 산업 과정 및 용매 사용과 같은 인위 적 활동 과정에서 VOCs가 배출될 수 있고 배출된 VOCs의 노 출은 일상생활에서 섭취, 피부흡수보다는 주로 흡입을 통해 이 루어진다.⁴⁾

이에 대기 중 VOCs의 관리방안 수립을 위한 배출원 규명 및 배출원별 상응하는 건강위험 영향 평가를 통한 배출원 관리방

안 수립과 더불어 도시 지역의 오존생성의 원인물질인 VOCs의 농도를 파악하여 오존 오염 현상을 규명하고 오존 예보 등을 위한 기초자료로 활용하기 위한 VOCs의 지속적 모니터링은 환경·보건 관점에서 매우 중요하다 할 수 있으며, 이를 인식한 환경부는 이전 광화학측정망으로 부분적으로 운영하던 것을 2006년부터 대기오염 측정망 설치·운영 지침에 광화학 대기 오염물질 측정망의 설치 운영을 정해 대기 중 VOCs의 농도를 지속적으로 측정 평가해 오고 있다.⁵⁾

또한 국가 대기오염물질 배출량 자료와 VOCs 배출원 기여도 분석결과는 큰 차이가 있어 국가 대기오염물질 배출량 자료에 대한 보완 필요성으로 제시되었으나, 배출계수 개선, 산정물질 추가 등 지속적인 보완으로 현재의 국가 대기오염물질 배출량이 되었다.⁶⁻⁸⁾ 그러나 페인트, 잉크, 세탁소 용매 및 가정용품 등 휘발성이 큰 유기용제의 사용량에 따른 VOCs 배출량 산정보다 낮은 배출원 기여도 결과가 나오기도 하였으며,⁹⁾ 최근 서울을 포함한 도시의 고농도 미세먼지 발생으로 주된 배출원 기여도 분석이 미세먼지 성분을 중심으로 이루어지고 있어 초미세먼지의 주요 전구물질인 VOCs의 배출원 기여도 확인이 더욱 필요하다.^{10,11)}

이에 본 연구는 대기 중 VOCs의 관리방안 수립을 위한 방안 마련의 일환으로 광화학 대기 오염물질 측정망의 운영을 통해 획득된 최근 2020년 VOCs 모니터링 자료를 활용하여 발생원 규명 및 발생원별 기여도를 평가하고, 주요 VOCs 그룹의 광화학 오존 생성 잠재력(Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)에 대한 질량 기여도 추정 및 배출원별 VOCs 노출량 평

가 및 건강위해도 평가를 수행하여 제시함으로써 광화학 대기 오염물질 측정망의 운영을 통해 획득된 VOCs 자료의 환경·보건학적 기반을 기초한 활용 가능성을 제안하고 나아가 대기 VOCs 저감 조치에 대한 과학적 증거를 제공하고자 수행되었다.

II. 재료 및 방법

1. 측정위치

본 연구에서는 2020년 1월부터 12월까지 1년간 서울 도심의 광화학 대기 오염물질 측정망 중 2개의 측정소(강서: GS, 북한산: BHS) (Fig. 1)에서 온라인 불꽃 이온화 검출기시스템(GC-FID)을 통해 1시간 간격으로 연속 측정된 56종의 VOCs의 자료를 활용하였다. 강서구립 푸른들청소년도서관 건물에 위치한 강서측정소(37°55'58"N, 126°8'36"E)는 동쪽으로 강서로(6차선), 남쪽으로 화곡로(6차선)와 서쪽으로 수명산과 남부순환로(8차선) 그리고 아파트 및 사무공간이 분포하고 있는 주거지역이다. 또한 녹지지역인 북한산측정소(37°6'88"E, 127°0'01"E)는 배경농도 현황을 확인하기 위하여 대상으로 선택하였다.

2. 정도관리

US EPA의 기술지침서(TAD)의 광화학 오염물질 측정망 표준운영절차서의 기본지침에 의거한 대기오염공정시험기준 환경대기 중 오존전구물질-자동측정법(ES 01805.1)을 참고하여 Table 1과 같이 실시하였다.^{12,13)}

검출한계는 분자량이 가벼운 탄화수소류($C_2 \sim C_5$)의 PLOT

Fig. 1. VOCs measurement locations in Seoul

*GS: Gangseo, †BHS: Bukhansan

Table 1. Measurement methods and cut-off ranges of valid observation

Item	Standard	Method (EPA TAD*)
System blank analysis	Sum of total peak<10 ppbv VOCs	Use humidified N ₂ gas
Multiple point cal. linearity	R ² ≥0.995	1, 5, 10 ppbv as propane, benzene, RT<±0.5 min
MDL (method detection limit) test	>2 ppbv as benzene	1 ppbv 7 times measurements in a row
Precision test	Within±20% RPD	5 ppbv 2 times measurements

*TAD: technical assistance documents for sampling and analysis of ozone precursors (EPA-454/B-19-004 April 2019).

컬럼과 분자량이 무거운 탄화수소류(C₅~C₁₂)의 BP-1컬럼별로 propane과 benzene을 기준으로 하여 1 nmol/molC 이며 이는 표준상태(0°C, 1 atm)로 환산한 양으로 농도는 대상물질의 탄소수로 나누어서 계산하였다. 99%의 신뢰수준에서 분석물질의 최저농도가 “0”과 다르다고 보고할 수 있는 수준으로 정의되어지는 방법검출한계(Method Detection Limits, MDL)의 추정방법은 대략 검출한계에 다다를 것으로 예상되는 분석물질의 농도를 최소한 7회 반복 측정한 후 이 농도 값을 바탕으로 하여 얻은 표준편차(standard deviation)를 이용하여 아래와 같은 식으로 계산하였다.

$$MDL=t_{(n-1, 0.99)} \times SD \quad (1)$$

여기서, t는 99% 신뢰수준에서의 student-t 값, t (n-1)는 자유도 n-1, n은 반복분석횟수, SD는 표준편차를 의미한다.

방법검출한계 추정을 위해 사용된 0.25 nmol/mol 농도는 자동희석장치를 사용하여 희석하기에는 너무 낮은 농도이기 때문에 자동희석장치로 제조 가능한 1 nmol/mol의 표준혼합기체를 만들어 총 시료채취량 600 mL의 1/4에 해당하는 150 mL를 채취하여 분석한 다음, 이 농도를 0.25 nmol/mol로 간주하여 계산하였고 0.25 nmol/mol의 propane과 benzene을 각각 7회 연속 분석하여 구한 방법검출한계는 각각 2 nmol/molC 이하였다.

3. 배출원 분석

일반대기 중 수용지역에서 VOCs를 분석한 후, 대기질에 영향을 미치는 발생원을 일차적으로 확인하고 통계적 방법을 활용하여 발생원별 기여도(contribution)를 정량적으로 추정하는 방법인 수용모델 중 PMF (Positive Matrix Factorization, PMF5.0, USEPA, 2014)는 오염원 분류표의 부재 시에도 각 오염원의 기여도를 파악할 수 있어 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있으며 우리나라 실정에도 잘 맞는 모델이다.¹⁴⁾ 2020년 1월부터 12월까지 1년 동안 56개 항목에 대하여 검출한계인 0.001 ppbv 이상의 값을 가지는 측정자료의 개수가 전체 자료수의 30% 이상인 36개(종) 항목을 선별하였다. 또한, 오차 추정(error estimate)을 위해 측정농도가 검출한계 이하의 값은 최

솟값의 1/2로 대체하여 잡음치(noisy data)의 영향을 줄이기 위해 불확도(uncertainty) 값을 증가시키고자 이전 연구에서 활용한 식을 이용하여 불확도를 $\sqrt{(\text{concentration} \times \text{error fraction})^2 + (0.5 \times MDL)^2}$ 의 식으로 오차율(error fraction)은 10%로 설정하고 검출한계 이하의 값의 경우 잡음치를 줄이기 위해 대체한 최솟값의 1/2를 이용하여 동일하게 가중 최소자승하여 계산하였다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 결측치인 경우에는 모델링 과정에서 각 분석화학종의 분석 오차 평가에 입각하여 그와 상응하는 값을 추정하여 사용하는 경우도 있으나 본 연구에서는 특정 시간의 시료 전체를 제외하였다. 요인수는 너무 많으면 실제 존재하지 않는 배출원의 출현 가능성이 커지며, 요인수가 너무 작으면 여러 배출원이 중복되어 나타날 가능성이 있기에 요인수를 결정하기 위하여 선별된 항목들을 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)로 도출한 요인수를 시작으로 시행착오(trial and error) 방법에 의해 반복 수행하였으며, 최적의 조건으로 각 대상기간별로 최종 도출된 변수를 PMF에 적용하여 서울 VOCs의 배출원을 식별하였다. 또한 2020년 1년 자료의 분석과 계절별로 따로 배출원분석을 수행하여 최종 변수를 각각 도출하였다.

PCA는 자료의 분산(variance)을 최대한 보존하면서 서로 직교하는 새 기저(축)를 찾아, 고차원 공간의 표본들을 선형 연관성이 없는 저차원 공간으로 변환하는 기법으로 SPSS의 주성분분석으로 요인을 추출하여 한 결과와 하였다.

PMF 모델은 측정된 물질들의 농도와 배출원 정보 사이의 Chemical Mass Balance (CMB)를 요인의 수 p, 각 배출원의 오염물질 정보 f, 개별 샘플에 개별 요인이 기여하는 질량의 양 g (특정 배출원에 대한 배출량, 즉 측정 기간에 대한 오염원의 강도(strength))를 사용하여 계산하는 것으로 계산식은 식 (1)과 같다.

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (1)$$

여기서, i는 시료의 수, j는 VOCs 종류, x는 i개의 시료에서 측정된 j개의 VOCs 종류로 나타낸 데이터 행렬, e는 잔차행렬을 의미한다.

모델의 최적화를 위한 Objective Function Q는 PMF의 중요

한 매개변수로써 모델 내 반복 알고리즘을 통해 최소화되며 계산식은 식 (2)와 같다.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (2)$$

여기서, u 는 불확도이며 Q 는 2가지 버전(true, robust)으로 모델 내에서 표시된다. Q (true)는 모든 포인트를 포함하여 계산된 값이고 Q (robust)는 불확도로 수정된 잔차가 '4' 이상인 샘플들을 제외한 후 계산된 값으로 불확도가 커지면 두 파라미터가 비슷한 값을 가지게 된다. 이를 위하여 수렴된 Q (true, robust)들 중에서 최솟값의 Q 를 선택하여 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{Robust}}$ 값이 1에 가장 가까운 값을 선택하였다.

4. 광화학오존생성잠재력 계산

VOCs 개별 화합물들은 광화학스모그를 유발시키는 정도가 다르며 광화학반응성 정도는 일반적으로 에틸렌을 기준물질(POCP=100)로 하여 오존생성능력(Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)으로서 표현된다. 이는 VOCs 화학종 단위 무게당 4~6일 동안 생성한 오존량을 말하며,¹⁸⁾ VOCs 배출 감소를 위해 더 강력한 오존생산 VOCs를 감소시키면 전체 모든 VOCs 감소에 비해 오존 제어를 위해 더 효율적이며 이러한 사실은 기존 연구 결과에서도 강조되었다.^{19,20)}

$$POCP = \sum_{i=1}^n POCP_i \times C_{avg.i} \quad (3)$$

여기서, i 는 VOCs 화학종을 의미하며, 농도의 단위는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

를 사용하여 ethylene의 값을 100으로 정하여 환산한 값을 이용하였다. 본 연구에서는 기존 연구에서 구한 POCP 환산 값을 이용하여 계산하였다.²¹⁾

5. 건강 위해성평가

건강 위해성평가를 위해 IARC (International Agency for Research on Cancer)에서 그룹 1, 2A 또는 2B로 분류된 주요 독성화합물과 비교의 용이성을 위해 이전 문헌에 자주 보고된 독성화합물을 중심으로 정확성과 대표성을 보장하기 위해 70% 이상의 검출빈도를 나타낸 독성화합물을 중심으로 미국 EPA IRIS (Integrated Risk Information System)와 CAL (California EPA)의 독성데이터와 추정된 노출농도를 기반으로 건강 위해성평가를 실시하였다(Table 2).

VOCs에의 노출은 일상생활에서 섭취, 피부흡수보다는 주로 흡입을 통해 이루어지므로 해당 VOCs 종의 흡입 발암성 및 비발암성 위해도를 계산하였고 PMF 모델에서 도출된 특정 배출원에 의한 건강 위해도는 배출원 프로파일에서 모든 표적 독성화합물의 발암성 및 비발암성 위해도를 합산하여 평가하였다.⁴⁾

비발암물질의 위해도결정을 위해 위험지수(Hazard Index, HI)를 사용하였으며 식 (4)를 이용하였다.

$$HI = \sum \frac{ADD}{RfD} \quad (4)$$

ADD는 일일평균노출량(average daily dose), RfD는 독성참고치(reference dose)이다. 식 (4)에서 사용한 ADD의 계산식은 식 (5)와 같다.

Table 2. Summary of the measurements of the study chemicals

Hazardous air pollutants	CAS no.	Molecular weight (g/mole)	IARC WOE*	n	Ambient VOCs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Non-Cancer	Cancer
					Mean $\pm$ SD		RfC [†] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IUR [‡] ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹
					Gangseo	Bukhansan		
n-Hexane	110-54-3	86	-	7,686	1.91 $\pm$ 2.21	1.25 $\pm$ 1.05	700	
Benzene	71-43-2	78	1	7,686	1.07 $\pm$ 0.70	1.11 $\pm$ 0.62	30	7.80E-06
Cyclohexane	110-82-7	84	-	7,686	0.634 $\pm$ 1.39	-	6,000	
Toluene	108-88-3	92	3	7,686	14.58 $\pm$ 14.36	3.89 $\pm$ 4.42	5,000	
Ethylbenzene	100-41-4	106	2B	7,686	2.91 $\pm$ 3.03	0.76 $\pm$ 0.84	1,000	2.50E-06
Xylene [§]	1330-20-7	106	3	7,686	2.83 $\pm$ 2.30	1.03 $\pm$ 1.09	100	
Styrene	100-42-5	104	2B	7,686	0.32 $\pm$ 0.29	0.05 $\pm$ 0.31	1,000	

*IARC WOE: weight of evidence for carcinogenicity in humans defined by the International Agency for Research on Cancer (1-carcinogenic; 2A-probably carcinogenic; 2B-possibly carcinogenic; 3-not classifiable).

[†]RfC (Reference concentration) data was referenced from the IRIS (Integrated risk information system).

[‡]IUR (Inhalation unit risk) data was referenced from the IRIS (Integrated risk information system) and CAL (California EPA).

[§]Xylene=m,p-Xylene+o-Xylene.

$$ADD = \frac{C \times IR \times ED \times EF \times ET}{BW \times AT} \quad (5)$$

여기서, C는 노출농도(exposure concentration), IR은 흡입률(intake rate), ED는 노출기간(exposure duration, year), EF는 노출빈도(exposure frequency, days/year), ET는 노출시간(exposure time, hours/day), BW는 몸무게(body weight, kg), AT는 평균시간(average time, day)이다.

발암물질의 위해도결정을 위한 평균일일노출량 및 초과발암 위해도는 각각 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 산출하였다.

$$LADD = \frac{C \times IR \times ED \times EF \times ET}{BW \times LT} \quad (6)$$

$$ECR = CPF \times LADD \quad (7)$$

여기서 LADD는 평균일일노출량(lifetime average daily dose), LT는 평균수명(life time, day), CPF는 발암잠재력(cancer potency factor)이다.

대기 중 VOCs에 대한 건강 위해성평가를 위해 서울 강서(GS)와 북한산(BHS)에서 검출된 VOCs의 농도를 이용하여 발암 위해도와 비발암 위해도를 산출하였으며 위해도 결정은 화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정에 따라 비발암독성에 대한 위해도 판단은 위해지수가 1 이상인 경우 위해가 있다고 판단하였고 발암성에 대한 위해도 판단은 초과발암

위해도가 10^{-4} 이상인 경우에 위해가 있다고 판단하였으며 안전허용수준(10^{-6})과 비교하여 안전허용수준을 초과하고 10^{-4} 미만인 경우에는 잠재적 평생 노출이 사람의 암 발병 가능성이 100,000분의 1 (1×10^{-5}) 이하인 경우 허용 가능한 것으로 간주하였다.²²⁻²⁴⁾ 또한, 위해도가 한 가지 이상으로 각 위해도 영향이 서로 독립적으로 작용한다는 가정하에 위해도 산출은 가산성(可算性)을 가정하여 위해도의 합으로 나타내었다.

III. 결 과

1. 대기 중 VOCs 특성

2020년 서울의 강서와 북한산 측정소의 총휘발성유기화합

Fig. 3. Monthly variations in mean TVOC concentrations at Gangseo and Bukhansan in 2020

Fig. 2. Diurnal variations in mean TVOC concentrations at Gangseo and Bukhansan in 2020

물(Total Volatile Organic Compounds, TVOCs) 농도는 강서가 $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 북한산이 $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며 시간대별 평균값의 변화는 농도가 높은 강서(GS)에서는 대기의 활발한 혼합작용과 광화학 반응의 영향으로 낮시간 동안에 농도가 감소하는 경향을 보였으나 북한산(BHS)에서는 강서보다 일간 변화가 작아 일정한 농도가 유지되는 경향을 보였다(Fig. 2). 또한 월별 경향을 살펴보면 강서(GS)는 남풍계열의 빈도가 높았으며, 화학 반응이 활발한 여름 기간에 농도가 낮은 동고하저의 경향을 나타내었고 북한산(BHS)에서는 주 풍향이 북동풍이었고 평균 풍속이 0.4 m/s 로 강서(GS)의 평균풍속(1.1 m/s)보다 2배 이상 낮았으며 연중 1월이 제일 높은 농도를 나타냈다(Fig. 3).

대기 중 농도가 가장 높은 주요 VOCs의 계절별 농도변화는 Table 3와 같이 강서(GS)에서는 대부분의 경우 alkane 계열은 여름철에 낮은 농도분포를 보였고 aromatic 계열에서는 봄철에 낮은 농도분포를 보였으며 isoprene의 경우에 이와 다르게 여름철에 최고 농도를 보였다. 이는 북한산의 경우에도 isoprene이 여름철에 최고농도를 보이고 다른 VOCs 경우 겨울에 높은 농도를 보였다.

2. 광화학오존생성잠재력

2020년 VOCs 화합물별 오존생성기여율과 대기 중 농도 비율을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈으며 오존생성기여율 순위는 대기 중 농도 순위와는 다른 경향을 보였고 각 화합물의 오존생성기여도는 강서(GS)에서는 toluene>n-butane>m,p-xylene>ethylene 순이었고 북한산(BHS)에서는 isoprene>n-heptane>n-pentane>n-butane 순으로 도십에 위치한 강서에서는 toluene이 제일 높은 오존생성기여율은 나타냈고 녹지지역

인 북한산의 경우는 동식물계 천연에 존재하는 isoprene이 제일 높은 오존생성기여율을 나타내었다.

Fig. 4. Ozone generation contribution rate (a) and Concentration ratio (b) by compound of VOCs at Gangseo in 2020

Table 3. Measurements of VOCs in 2020 by sampling station and season ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

VOCs	Gangseo					Bukhansan				
	2020	Spring	Summer	Autumn	Winter	2020	Spring	Summer	Autumn	Winter
Ethane	45.30	45.97	24.50	43.49	80.55	5.66	5.75	3.06	5.44	10.07
Ethylene	202.29	172.54	150.06	205.56	329.81	2.02	1.73	1.50	2.06	3.30
Propane	170.32	191.89	123.02	154.12	236.33	12.17	13.71	8.79	11.01	16.88
Propylene	110.64	140.08	87.41	77.07	151.15	0.95	1.20	0.78	0.66	1.29
Isobutane	170.42	181.56	135.14	160.16	224.85	6.09	6.48	4.83	5.72	8.03
n-Butane	614.09	750.01	447.29	543.63	770.18	2.85	2.41	2.65	3.42	3.02
Isopentane	96.86	81.80	90.19	116.30	102.67	19.81	24.19	14.43	17.54	24.85
Isoprene	29.46	10.53	60.61	24.64	16.94	0.26	0.09	0.53	0.22	0.15
Hexane	76.58	51.56	81.42	102.36	70.35	1.91	1.29	2.04	2.56	1.76
Benzene	10.70	10.95	6.58	10.00	18.00	1.07	1.10	0.66	1.00	1.80
Toluene	641.46	444.65	649.63	843.69	641.51	14.58	10.11	14.76	19.18	14.58
Ethylbenzene	133.94	99.69	121.70	194.25	118.20	2.91	2.17	2.65	4.22	2.57
m/p-Xylene	326.90	262.80	344.84	405.32	283.35	4.14	3.33	4.37	5.13	3.59
o-Xylene	117.80	91.87	138.90	138.70	94.09	1.51	1.19	1.78	1.78	1.21

3. 배출원 분석

배출원 프로파일은 강서(GS)에서는 아스팔트, 차량배기가스I, 유기용제사용II, 가솔린 증기, 차량배기가스II, LNG 연소, 유기용제I 등이 주요 배출원으로 나타났고, 이중 가솔린 증기가 연평균 31%로 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 조사되었다. 북한산(BHS)의 경우에는 LNG 연소, Biogenic, 유기용제사용II, 차량배기가스I, 노후된 VOC, 유기용제사용I 등이 주요 배출원으로 나타났으며, 노후된 VOC와 유기용제사용II이 연평균 각각 32%, 29%로 높은 비중을 차지하는 것으로 조사되었다(Fig. 6).

계절별 배출원 프로파일을 조사한 결과 강서(GS)의 경우 사

계절 내내 가솔린 증기가 27~34%로 배출원 중 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 조사되었으며, 봄 34%, 여름 30%, 가을 29%, 겨울 27%으로 겨울에 가장 낮은 경향을 보였고 다른 계절에는 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 7). 북한산(BHS)의 경우 봄에는 노후된 VOC (38%), 여름에는 차량배기가스I (29%), 가을과 겨울에는 유기용제사용I이 각각 35%, 24%로 계절에 따라 주요 배출원이 다르게 나타났다(Fig. 8).

이들 PMF를 이용하여 계절별 및 사이트 별로 VOCs 배출원 분석에 대한 적합성을 평가하기 위해 측정된 TVOCs 농도와 모델 평가의 다중회귀 분석을 통해 계산된 농도 값을 비교하여 Table 4와 같이 두 값 사이에 모두 0.86 (R^2) 이상의 높은 상관 계수 값을 나타내었다.

4. 대기 중 VOCs에 대한 건강 위해성평가

VOCs 농도 분포 조사 결과 검출된 유해오염물질들에 대하여 배출원별 건강 위해성평가를 수행하였다. 발암성물질로 구분된 benzene과 ethylbenzene의 경우 초과발암위해도(ECR)를 산출하였고 비발암물질은 hexane, benzene, toluene, ethylbenzene, styrene과 xylene을 대상으로 산출된 위험지수의 합(HI)을 산출하였다.

비발암 위해도는 위험지수가 1 미만으로 강서가 1.6×10^{-2} , 북한산이 1.2×10^{-2} 로 안전한 수준이었으며 benzene과 ethylbenzene의 발암위해도는 강서에서 각각 2.58×10^{-6} , 2.13×10^{-6} 이었고, 북한산에서는 2.55×10^{-6} , 5.71×10^{-7} 로 나타났다(Table. 5, Fig. 9, 10).

IV. 고 찰

서울의 주거지역인 강서와 녹지지역인 북한산 광화학 대기 오염물질 측정소의 연속 측정된 56종의 VOCs 자료를 활용하여 대기 중 풍향, 풍속, 오존생성기여 물질 및 VOCs의 특성이 상이함에 따른 배출원의 차이와 그에 따른 주요 유해성을 평가하

Fig. 5. Ozone generation contribution rate (a) and Concentration ratio (b) by compound of VOCs at Bukhansan in 2020

Fig. 6. The annual (a) and seasonal distributions of VOC's main source apportionments at Gangseo (b) and Bukhansan (c) (%)

*GS: Gangseo, †BHS: Bukhansan

Fig. 7. The seasonal factor profiles : concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of species and % of species sum in 2020 at Gangseo

고자 하였다.

1. 배출원 분석

다변량 수용체 모델을 활용하여 대기측정자료들의 배출원을

확인하는데 미국 EPA의 SPECIATE 5.1을 참고한 결과 차량배기가스I (vehicle exhaust I)은 기존 연구에서와 같이 단쇄 알칸($\text{C}_2\sim\text{C}_5$)인 ethylene, propylene, isobutane, n-butane이 주요 배출성분인 가솔린, LPG, NG 차량의 연소가스에서 배출되는

Table 4. Key regression measures: Slope, intercept, and R-squared of TVOC from annual, site-by-site, and seasonal univariate statistical analysis in 2020 in Gangseo and Bukhansan

Site	Period		Slope	Intercept	R-Squared
Gangseo	Annual	2020	0.89	8.77	0.91
	Seasonal	Spring	0.82	14.33	0.86
		Summer	0.90	5.28	0.91
		Autumn	0.96	2.46	0.97
		Winter	0.97	2.89	0.98
Bukhansan	Annual	2020	0.96	0.60	0.96
	Seasonal	Spring	0.95	0.97	0.95
		Summer	0.99	0.19	0.98
		Autumn	0.98	0.12	0.97
		Winter	1.01	-0.48	0.98

Table 5. The risk assessment result for source apportionments in Gangseo and Bukhansan

Site	Source apportionment	Hazard index	Excess cancer risk	
			Benzene	Ethylbenzene
Gangseo	Total	0.0161	2.58E-06	2.13E-06
	LNG combustion	0.0004	-	4.30E-09
	Vehicle exhaust I	0.0064	1.44E-06	1.63E-07
	Vehicle exhaust II	0.0005	-	-
	Gasoline vapor	0.0007	1.13E-07	9.07E-08
	Solvent usage I	0.0019	6.91E-08	1.10E-06
	Solvent usage II	0.0021	5.97E-08	7.67E-07
	Asphalt	0.0040	8.99E-07	-
Bukhansan	Total	0.0122	2.55E-06	5.71E-07
	LNG combustion	0.0021	4.79E-07	1.45E-09
	Vehicle exhaust I	0.0013	3.02E-07	3.95E-09
	Aged VOC	0.0066	1.50E-06	2.15E-08
	Solvent usage I	0.0012	1.36E-07	3.17E-07
	Solvent usage II	0.0004	2.81E-08	1.97E-07
	Biogenic	0.0005	9.75E-08	3.08E-08

차량배기가스 배출원의 alkane 계열이 52%를 나타낸 것으로 보아 비교적 잘 일치함을 보였다.²⁶⁾ 강서에서는 연간 배출원에서 차량배기가스가 차지하는 비율이 25%였고 북한산의 경우 차량배기가스로 인한 배출이 7%로 강서가 북한산보다 더 높은 차량배기가스 배출원의 비율을 나타냈다.

speciate-4693을 참조한 가솔린 증기(gasoline vapor)는 기존 연구에 의하면 alkane 계열에서 높은 비중을 차지하면 가솔린 증기에 의한 배출로, 지표물질인 isopentane, n-pentane, butane과 같은 alkane 계열이 95%를 나타내 80% 이상을 나타낸 기존 연구결과와도 비교적 잘 일치함을 확인하였으며,^{27,28)} 이는 북한산에서 나타나지 않은 강서의 주요배출원(31%)으로 사계절

내내(27~34%) 주요배출원으로 나타났다. 가솔린 증기로부터의 VOCs 배출은 2004년 수도권에서는 휘발성분의 증발이 용이한 여름철에 증가하는 경향이었으나,⁹⁾ 본 연구에서는 겨울철에만 낮은 경향을 보이고 다른 계절에는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 2010년 서울시 휘발성유기화합물 주요배출원을 분석한 보고서에서도 비슷한 경향을 나타내 지역적 차이에 기인한 것으로 보인다.

상업연소 및 난방에 사용되는 천연가스 연소(LNG combustion)에 의한 배출은 speciate-2441과 0003을 참조하여 지표물질인 pentane과 그 이성질체, hexane 이성질체들과 toluene이 67%를 나타내 천연가스 연소 배출원으로 확인하였으며 강서

Fig. 9. Carcinogenic and non-carcinogenic risks of hazardous VOC species at Gangseo in 2020

*GS: Gangseo

와 북한산 모두 각각 9%와 6%를 나타냈다.

아스팔트(asphalt)로 인한 배출원은 n-nonane, n-undecanem n-decane을 포함하여 $C_8 \sim C_{11}$ alkane을 방출한다는 기존연구와 같이 아스팔트 콘크리트 등 도로포장 공정 등에서 배출되는 것으로 알려진 배출원으로 speciate-26을 참조하여 확인하였으며,²⁹⁾ 강서에서 연간 11%를 나타낸 반면 북한산에서는 주요배출원으로 나타나지 않았다. 이는 6월 이후 여름철 진행된 강서구에서의 화곡동 방화동 도로굴착공사와 상수도 시설물 설치 및 보수공사 등에 기인한 것으로 보인다.

상업 및 가정용품 등에서 배출되는 유기용제사용 I (solvent usage I), 도장시설 등에서 배출되는 유기용제사용 II (solvent usage II)는 benzene을 제외한 toluene, xylene, ethylbenzene 등 aromatic 계열은 페인트, 잉크, 세정제 등 유기용제의 주요한 지표물질 및 구성물질로 알려져 있다.³⁰⁾ 유기용제사용 I은

Fig. 10. Carcinogenic and non-carcinogenic risks of hazardous VOC species at Bukhansan in 2020

*BHS: Bukhansan

speciate-2439을, 도장시설 등에서 배출되는 유기용매로 인한 배출은 유기용매사용II로 speciate-2413, 2433을 참조하였다. toluene, ethylbenzene, xylene 등 aromatic 계열이 67% 이상으로 나타났으며 BTEX의 높은 비율을 보인 유기용제사용으로 분류되어 이전 연구와 일치함을 보였다.³¹⁾ 국가대기오염물질배출량을 살펴보면 서울의 경우 VOCs의 70% 이상이 유기용제사용에 의한 배출로 나타났으나 유기용제사용이 차지하는 비율은 강서에서는 24%로 차량 연소 가스(25%) 및 가솔린 증기(31%)가 차지하는 비율보다 낮았으며 북한산 TVOCs 농도는 강서의 1/3 수준이었으나 유기용제사용 비율(47%)이 차량 연소에 의한 비율(7%)보다 높았다.⁸⁾ 유기용매사용으로부터의 VOCs 배출은 2004년 수도권에서는 휘발성분의 증발이 용이한 여름철에 증가하는 경향이었으나,³⁰⁾ 본 연구에서는 가솔린 증기 배출원과 마찬가지로 겨울철에만 낮은 경향을 보이고 다

른 계절에는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 2010년 서울시 휘발성유기화합물 주요배출원을 분석한 보고서에서도 비슷한 경향을 나타내 지역적 차이에 기인한 것으로 보인다.⁹⁾

Benzene 배출의 주요 원인으로 확인된 바이오매스(bio-mass) 연소는 북한산에서의 주요 배출원으로 숯불구이 등의 연소에 의한 것으로 speciate-5561, 5564를 참조하였고, 강서에서는 주요 배출원으로 나타나지 않았으나, 북한산에서는 봄철에만 11%로 나타났다.^{32,33)}

노후된 VOCs (Aged VOCs)는 노후된 공기질량의 일반적인 지표인 toluene/benzene비가 낮은 기존연구 결과와 같이 기본적으로 수명이 긴 ethane (60일), benzene (9.4일)과 같은 VOCs로 형성된 프로필로 toluene/benzene비가 낮았으며(<0.6),³⁴⁾ 반응성이 높은 화합물이 상대적으로 덜 풍부한 노후된 VOCs의 경향이 강서에서는 봄(8%)과 겨울(12%)에만 주요 배출원 프로필에 나타난 반면 북한산에서는 봄(38%), 여름(21%), 가을(30%), 겨울(31%) 사계절 내내 높은 비율을 차지하였다. 이전 석모도 연구에서도 VOCs가 지역적 배출이 우세한 분포특성보다 어느 정도의 광화학적 과정이 진행된 공기 기단의 특성을 보여 장거리 이동의 영향이 크다는 분석과 같이 이는 북한산의 평균풍속(0.4 m/s)이 강서(1.1 m/s)보다 2.7배 이상 낮은 공기 소포가 상대적으로 광화학적으로 노화되어 배출원이 북한산 외부에 있을 가능성이 있음을 시사한다.³⁵⁾

Biogenic VOCs의 경우 식물체의 신진대사과정에서 배출되는 것으로 알려진 isoprene을 중심으로 배출원 분석한 결과 강서에서는 연간 배출원 분석에서 나타나지 않았으나 여름철에만 8% 나타난 반면 북한산에서는 연간 배출원 분석에서 8%를 차지하였고, 계절별로는 여름(15%), 가을(9%)의 배출원으로 biogenic VOCs가 나타나는 차이를 보였다.²⁶⁾

시내 주거지역인 강서가 북한산보다 차량배기가스, 가솔린 증기 유기용제사용 등 인위적 VOCs 배출원 다양하였고 북한산은 biomass 연소 및 biogenic과 같은 자연발생원의 영향이 높음을 확인하였다. 오존과 2차 생성 미세먼지의 주요 전구물질인 VOCs 중 자연발생원 VOCs인 경우 isoprene만을 이용하고 기타 α -pinene 등의 자연발생원 VOCs 항목들이 연속 측정에 포함되지 않은 제한점은 있으나 US EPA의 기술지침서의 광화학 오염물질 측정망 표준운영절차서를 기준으로 한 대기오염공정시험기준에 의거 QA/QC 프로그램 절차에 따른 데이터를 활용하였으며 측정된 TVOCs 농도와 모델 결과의 다중회귀 분석을 통해 얻은 농도 값을 비교하여 높은 상관계수를 확인하여 산출된 인자들이 VOCs 측정농도 값의 변화를 잘 설명하고 있다.

이와 같은 신뢰성 있는 데이터를 단기 이벤트적인 데이터만이 아닌 최근 2020년 연간 데이터를 활용하여 계절별 서로 다른 배출원의 영향을 도출하여 특정 배출원의 지표 성분일지라도 세부 기간별로 서로 다른 배출원의 영향을 받을 수 있다라

는 기존 연구를 뒷받침하였다.²⁶⁾

2. 대기 중 VOCs에 대한 건강 위해성평가

VOCs 농도 분포 조사 결과 검출된 유해오염물질들에 대하여 배출원별 건강 위해성평가를 수행한 결과, 비발암 위해도는 강서와 북한산 모두 위험지수가 1 미만으로 안전한 수준이었으며, benzene과 ethylbenzene의 발암 위해도는 강서에서 각각 2.58×10^{-6} , 2.13×10^{-6} , 북한산에서는 2.55×10^{-6} , 5.71×10^{-7} 로 1.00×10^{-6} 를 초과하거나 유사한 수준인 것으로 조사되었다.

다른 국가의 대도시와 비교했을 때 benzene의 발암 위해도가 텐진 시(2.18×10^{-5})보다 낮았으며 베이징 시(2.3×10^{-6})와는 비슷한 수준이었고 캐나다 켈거리($<1 \times 10^{-6}$)보다는 높은 수준이었다.³⁶⁻³⁸⁾ 이는 안전허용수준인 1×10^{-6} 이상이었으나 허용 가능한 수준인 1×10^{-5} 미만으로 서울의 모든 암(평생동안 100,000명 중 471.1명)의 조기 발생률과 전국의 모든 암(평생동안 100,000명 중 475.3명)의 조기 발암률과 비교할 때 허용 가능한 수준이라는 것이 합리적인 것으로 판단된다.³⁹⁾ 안전허용수준 미만으로 관리하기 위해서는 10^{-6} 이상 배출원은 도심 주거지역인 강서에서는 benzene의 경우 차량 연소와 ethylbenzene의 경우 용매 사용 분야의 저감 노력이 필요하리라 본다. 북한산에서는 benzene의 경우 노후된 VOCs 배출이 주요 원인 이므로 북한산 외부의 배출원에 기인할 가능성이 있기에 기후 변화 대응을 위한 친환경 자동차 정책이 연소가스로 인한 위해도 저감에도 이바지할 것으로 판단된다.

또한 위해성평가를 위해 사용된 VOCs 농도는 실제 사람의 호흡으로 인한 개인노출 농도가 아니기에 지역주민의 노출을 반영하는데 제한점이 있으나 배출원별 위해성평가로 차량연소와 용매사용 배출원의 저감과 더불어 기후변화 대응을 위한 친환경 자동차 정책이 위해도 저감에도 이바지함을 제시한 것은 환경보건학적으로 의미가 있다.

V. 결 론

일상생활에서 주로 흡입을 통해 노출되는 VOCs는 효율적인 관리방안 마련을 위하여 발생원 규명과 더불어 발생원별 건강 위해도 및 기여도 평가가 필요하다. 이에 본 연구에서는 VOCs 자료의 환경보건학적 기반을 기초로 한 활용 가능성을 제안하고 나아가 대기 VOCs 저감 조치에 대한 과학적 증거를 제공하고자 수행되었다. 이를 위하여 2020년 1월부터 12월까지 1년간 광화학대기오염물질측정망(강서: GS, 북한산: BHS)의 자료를 활용하여 서울의 VOCs의 현황과 PMF를 이용하여 배출원을 식별하였고 이와 더불어 기여도 및 건강 위해성평가를 실시하였다. 본 연구의 수행을 통해 획득된 결과를 요약하면 다음과 같다.

2020년 연간 TVOCs 농도는 도심 주거지역인 강서가 녹지지역인 북한산보다 3.3배 높은 농도를 보였으며 POCP 농도의 경우에도 북한산보다 강서에서 2~7배 높은 것으로 조사되었다. VOCs 중 오존생성기여율에 기여한 주된 VOCs는 강서는 toluene과 n-butane이었고 북한산에서는 n-eptane과 isoprene인 것으로 조사되었으며, isoprene의 경우 북한산에서 측정된 다른 VOCs에 비해 월등히 높은 것으로 조사되었다.

도심 주거지역인 강서의 경우 주변 교통량이 많은 지역으로 석유 연료 증발, 차량배기가스, 상업 및 연료 LNG와 아스팔트에서 배출되는 VOCs가 높게 나타났고, 녹지지역인 북한산의 경우 biogenic VOCs와 같은 자연 발생원의 영향이 강서보다 높게 나타났다. 또한 북한산은 강서(1.1 m/s)보다 2.7배 이상 낮은 풍속(0.4 m/s)으로 순환되지 않고 정체되고 노후된 VOCs가 사계절 내내 주요 배출원을 차지하여 배출원이 북한산 외부에 있을 가능성이 있음을 시사하였다. 건강 위해성평가 결과 강서와 북한산 모두 위험지수가 기준인 1보다 낮은 0.01~0.02로 비발암 독성에 안전한 것으로 나타났으며 발암성에 대한 위해도는 $5.71 \times 10^{-7} \sim 2.58 \times 10^{-6}$ 로 허용 가능한 수준으로 안전성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 환경부 주관 '화학물질 안전관리 전문 인력 양성사업'의 화학물질 특성화대학원 지원 사업을 통한 성과물임을 밝힙니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Kulmala M, Vehkamäki H, Petäjä T, Dal Maso M, Lauri A, Kerminen VM, et al. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *J Aerosol Sci.* 2004; 35(2): 143-176.
- Seinfeld JH, Pandis SN. Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2012. p.26.
- Hajizadeh Y, Teiri H, Nazmara S, Parseh I. Environmental and biological monitoring of exposures to VOCs in a petrochemical complex in Iran. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2018; 25(7): 6656-6667.
- Shuai J, Kim S, Ryu H, Park J, Lee CK, Kim GB, et al. Health risk assessment of volatile organic compounds exposure near Daegu dyeing industrial complex in South Korea. *BMC Public Health.* 2018; 18(1): 528.
- Ministry of Environment. Guidelines for Installation and Operation of Air Pollution Monitoring Networks. Sejong: Ministry of Environment; 2006.
- Han JS, Hong YD, Shin SA, Lee SU, Lee SJ. Receptor model(CMB) and source apportionments of VOCs in Seoul metropolitan area. *J Environ Impact Assess.* 2005; 14(4): 227-235.
- Kim YP. Validation of the emission inventory of volatile organic compounds in Seoul. *Part Aerosol Res.* 2009; 5(3): 139-148.
- National Air Pollutants Emission. Pollutant emissions in 2017. National Air Emission Inventory and Research Center. 2020.
- Choi YJ. Identification and Apportionment of VOC Emission Sources in Seoul. Seoul: Seoul Development Institute; 2012.
- Kang MK. Source apportionment of organic carbons in PM2.5 using the positive matrix factorization model: characterization of secondary organic aerosols at Seoul, Korea using SOA tracers [dissertation]. [Seoul]: Ewha Womans University; 2021
- Heo J, Kim C, Min Y, Kim H, Sung Y, Kim J, et al. Source apportionment of PM10 at Pyeongtaek area using positive matrix factorization (PMF) model. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2018; 36(6): 849-864.
- U.S. Environmental Protection Agency. Technical assistance document for sampling and analysis of ozone precursors for the photochemical assessment monitoring stations program- revision 2. Research Triangle Park: U.S. Environmental Protection Agency; 2019.
- National Institute of Environmental Research. National Academy of Environmental Sciences Notice No. 2020-30, Air Pollution Process Test Criteria for Ozone Precursors in Environmental Atmosphere-Automatic Measurement Method (ES 01805.1). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2020.
- Choi W, Cho Y, Jang H, Kim C, Kim T. Analysis of VOCs characterization in Gumi industrial complex by positive matrix factorization. *Korean J Odor Res Eng.* 2010; 9(2): 89-99.
- Chueinta W, Hopke PK, Paatero P. Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization. *Atmos Environ.* 2000; 34(20): 3319-3329.
- Paatero P, Hopke PK. Discarding or downweighting high-noise variables in factor analytic models. *Anal Chim Acta.* 2003; 490(1-2): 277-289.
- Kim S, Kim K, Hyun S, Kim J, Kim M, Kim B, et al. Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} in Jeju city in 2017. *J Korean Soc Environ Anal.* 2018; 21(2): 61-70.
- Derwent RG, Jenkin ME, Saunders SM. Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under European conditions. *Atmos Environ.* 1996; 30(2): 181-199.
- Leggett S. Forecast distributions of species and their atmospheric reactivities for the U.K. VOC emission inventory. *Atmos Environ.* 1996; 30(2): 215-226.
- Derwent RG, Jenkin ME, Saunders SM, Pilling MJ. Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in northwest Europe calculated with a master chemical mechanism. *Atmos Environ.* 1998; 32(14-15): 2429-2441.
- Derwent RG, Jenkin ME, Passant NR, Pilling MJ. Reactivity-based

- strategies for photochemical ozone control in Europe. *Environ Sci Policy*. 2007; 10(5): 445-453.
22. National Institute of Environmental Research. Regulations on methods of care for evaluation of chemicals No. 2021-13. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2021.
 23. Health Canada. Federal Contaminated Site Risk Assessment in Canada Part I: Guidance on Human Health Preliminary Quantitative Risk Assessment (PQRA). Ottawa: Health Canada; 2004.
 24. Kindzierski W, Jin J, Gamal El-Din M. Plain Language Explanation of Human Health Risk Assessment. Edmonton: Oil Sands Research and Information Network, University of Alberta, School of Energy and the Environment; 2011. p.37.
 25. Watson JG, Chow JC, Fujita EM. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance. *Atmos Environ*. 2001; 35(9): 1567-1584.
 26. Han J, Moon K, Kim R, Shin S, Hong Y, Jung I. Preliminary source apportionment of ambient VOCs measured in Seoul metropolitan area by positive matrix factorization. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2006; 22(1): 85-97.
 27. Park J, Park B, Kim S, Yang Y, Lee K, Bae S, et al. Estimation of contribution by pollutant source of VOCs in industrial complexes of Gwangju using receptor model (PMF). *J Environ Sci Int*. 2021; 30(3): 219-234.
 28. Mukund R, Kelly TJ, Spicer CW. Source attribution of ambient air toxic and other VOCs in Columbus, Ohio. *Atmos Environ*. 1996; 30(20): 3457-3470.
 29. Brown SG, Frankel A, Hafner HR. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization. *Atmos Environ*. 2007; 41(2): 227-237.
 30. Shin H, Kim J, Kim Y. Quality assurance and quality control method for volatile organic compounds measured in the photochemical assessment monitoring station. *Part Aerosol Res*. 2011; 7(1): 31-44.
 31. Ling ZH, Guo H, Cheng HR, Yu YF. Sources of ambient volatile organic compounds and their contributions to photochemical ozone formation at a site in the Pearl River Delta, southern China. *Environ Pollut*. 2011; 159(10): 2310-2319.
 32. Andersen AN, Cook GD, Corbett LK, Douglas MM, Eager RW, Russell-Smith J, et al. Fire frequency and biodiversity conservation in Australian tropical savannas: implications from the Kapalga fire experiment. *Austral Ecol*. 2005; 30(2): 155-167.
 33. Milic A, Mallet MD, Cravigan LT, Alroe J, Ristovski ZD, Selleck P, et al. Biomass burning and biogenic aerosols in northern Australia during the SAFIRED campaign. *Atmos Chem Phys*. 2017; 17(6): 3945-3961.
 34. Pekey B, Yilmaz H. The use of passive sampling to monitor spatial trends of volatile organic compounds (VOCs) at an industrial city of Turkey. *Microchem J*. 2011; 97(2): 213-219.
 35. Choi E, Heo JB, Yi SM. Apportioning and locating nonmethane hydrocarbon sources to a background site in Korea. *Environ Sci Technol*. 2010; 44(15): 5849-5854.
 36. Zhou J, You Y, Bai Z, Hu Y, Zhang J, Zhang N. Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China. *Sci Total Environ*. 2011; 409(3): 452-459.
 37. Liu Y, Kong L, Liu X, Zhang Y, Li C, Zhang Y, et al. Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China. *Atmos Pollut Res*. 2021; 12(3): 33-46.
 38. Bari MA, Kindzierski WB. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: sources and screening health risk assessment. *Sci Total Environ*. 2018; 631-632: 627-640.
 39. Korea Central Cancer Registry. Annual Report of Cancer Statistics in Korea in 2018. Goyang: National Cancer Center; 2021.

〈저자정보〉

권승미(팀장), 최유리(연구원), 박명규(연구원),
이호준(연구원), 김광래(팀장), 유승성(팀장),
조석주(센터장), 신진호(부장), 신용승(원장), 이철민(교수)