

## 통계분석을 이용한 광주지역 휘발성유기화합물의 특성 연구

이세행<sup>†</sup> · 이대행 · 박강수 · 송형명 · 양윤철 · 이기원 · 조영관 · 서광엽

광주광역시 보건환경연구원 환경연구부

### A Study on Characteristics of VOCs in Gwangju Using Statistical Analysis

Se-Haeng Lee<sup>†</sup>, Dae-haeng Lee, Kang-soo Park, Hyeong-myeong Song, Yoon-cheol Yang, Ki-won Lee, Young-gwan Cho, and Gwang-yeob Seo

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

Received December 31, 2015/Revised January 12, 2016/Accepted January 19, 2016

This study was conducted to investigate the concentration distribution of VOCs (volatile organic compounds) and the contribution of nitric oxides and VOCs to ozone creation in Gwangju. Fifty-two types of VOCs were continuously measured by the hour at sampling sites in Seoseok-dong and Geonguk-dong from May to September 2015. Paraffins took up 52.1% of the entire VOCs, followed by aromatics and olefins. The monthly concentration of VOCs was highest in June and lowest in August. As for the hourly concentrations of ozone and nitric oxides, ozone concentrations started to increase from 7 am and got to the highest point during the daytime, whereas nitric oxides showed the opposite trend from ozone by reaching the lowest level during the daytime. The photochemical ozone creation potentials (POCPs) of toluene, isopentane, m,p-xylene, isobutane and 1-butene were 16.0%, 14.2%, 12.7%, 8.3% and 7.5% respectively. These five components together accounted for 58.7% of the total POCPs, which means they are the main contributor to ozone creation. The correlation analysis showed that PM-10 and PM-2.5 ( $r=0.810, p<0.01$ ), O<sub>3</sub> and radiation ( $r=0.448, p<0.01$ ), and O<sub>3</sub> and humidity ( $r=-0.563, p<0.01$ ) were significant. The results of factor analysis showed that the VOCs were mainly affected by the emission of vehicles and the evaporation of diesel fuel.

**Key words:** Volatile organic compounds (VOCs), Photochemical ozone creation potentials (POCPs), Correlation analysis, Factor analysis

## 1. 서 론

최근 대도시의 오존주의보 발령현황을 살펴보면 2011년 19일 55회, 2012년 29일 66회, 2013년 39일 160회, 2014년 29일 129회로 오존 발령일수와 횟수가 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 이처럼 매년 대도시의 오존 오염도가 증가하고 환경기준을 초과하는 사례가 증가함에 따라 오존 생성에 기여하는 오존 전구물질에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>2)</sup> 특히 오존 전구물질 중 휘발성유기화합물(VOCs)은 발암성과 독성 등 그 자체의 유해성뿐만

아니라 도시 대기에서 광화학반응을 통해 오존 및 광화학산화물을 생성하는 등 도시 대기오염에서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 세계 각국에서는 휘발성유기화합물의 감소에 많은 관심을 기울이고 있다.<sup>3,4)</sup>

휘발성유기화합물질의 발생원은 석유화학산업, 도로산업, 피혁산업 등 대규모 산업단지 사업장들뿐만 아니라 주거지역의 세탁소, 도로에서의 자동차 배출가스, 주유소 등 그 발생원이 매우 다양하며 지속적으로 배출되는 것으로 알려져 있다.<sup>5,6)</sup> 2012년도 우리나라 휘발성유기화합물의 발생원을 살펴보면 전체 휘발성유기화

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

합물 배출량 백 만톤 중 유기용제 사용량이 56%, 생산 공정이 16%, 도로이동오염원이 7%, 에너지 저장 및 수송 3%, 비도로 이동오염원이 2% 정도로 유기용제 사용과 도로비도로 이동오염원이 64%인 반면, 광주광역시 경우에는 유기용제 사용량이 78%, 도로 이동오염원이 8%, 에너지 저장 및 수송이 5%, 비도로이동오염원이 3%로 유기용제 사용과 도로비도로 이동오염원이 88%를 차지하고 있다.<sup>7)</sup> 이처럼 휘발성유기화합물 배출량 조사나 연구를 통해 도시 대기 중 휘발성유기화합물의 주요 발생원이 유기용제 사용과 자동차 배출가스임이 알려져 있다.<sup>8-10)</sup>

우리나라에서는 각종 연료 규제와 주거지역에 대한 청정연료 보급을 확대하고 자동차 배기가스의 오염 저감을 위해 가솔린 자동차에 삼원촉매장치의 부착을 의무화하였다. 특히 2009년부터는 발암성 물질인 벤젠의 가솔린 연료 중 함량을 부피기준 0.7% 이내로 규제하고, 2010년부터는 대기환경기준에 벤젠을 추가하여 연평균  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 목표치를 설정하여 관리하고 있다. 그러나 최근 자동차의 급증과 유류 및 유기용제의 사용 확대로 도시지역에서의 휘발성유기화합물과 질소산화물의 농도는 여전히 증가하고 있으며 향후 그 양상은 더욱 심화될 것으로 예상된다.<sup>11)</sup>

휘발성유기화합물은 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발되고, 대기 중에서 질소산화물과 공존 시 태양광의 작용을 받아 광화학반응을 일으켜 오존 및 PAN 등 광화학 산화성 물질을 생성시켜 광화학스모그를 유발하는 물질로, 다른 대기오염물질과 달리 원인물질도

다양하고 물질별 대책을 수립하기도 어렵다. 또한 배출원도 실질적으로 관리하기 어려운 이동오염원이나 비점오염원이 다수를 차지하여 대책 마련이 더욱 어려운 실정이다.<sup>12)</sup> 따라서 도시 대기 중 오존과 같은 광화학 산화제에 의한 대기오염을 줄이기 위해서는 오존 전구 물질인 휘발성유기화합물에 대한 지속적인 감시가 필요하며, 대기로 배출된 휘발성유기화합물은 화학 및 광 화학적인 반응과 국지적인 기상상태에도 큰 영향을 받음으로 대기 중 휘발성유기화합물의 농도 변동을 설명하기 위해서는 먼저 이들 영향인자들에 대한 관련성 평가가 필요하다.<sup>13,14)</sup>

본 연구에서는 오존 농도가 높은 시기인 5월에서 9월까지 광주광역시보건환경연구원에서 운영중인 대기오염 자동측정소 서석동과 건국동 측정소에서 오존생성 전구 물질인 휘발성유기화합물 52종과 질소산화물, 기상자료 등을 분석하여 광주지역의 대기오염도 현황과 분포 특성을 파악하고, POCP(Photochemical Ozone Creation Potential)를 이용한 오존생성 기여도 산출 및 통계프로그램을 이용한 다른 대기오염물질과의 상관성 및 휘발성유기화합물의 주요 원인물질을 파악하여 향후 지표면 오존농도 저감방안 수립을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료채취 지점 및 방법

본 연구에서는 광주광역시 서석동 동구보건소 옥상과

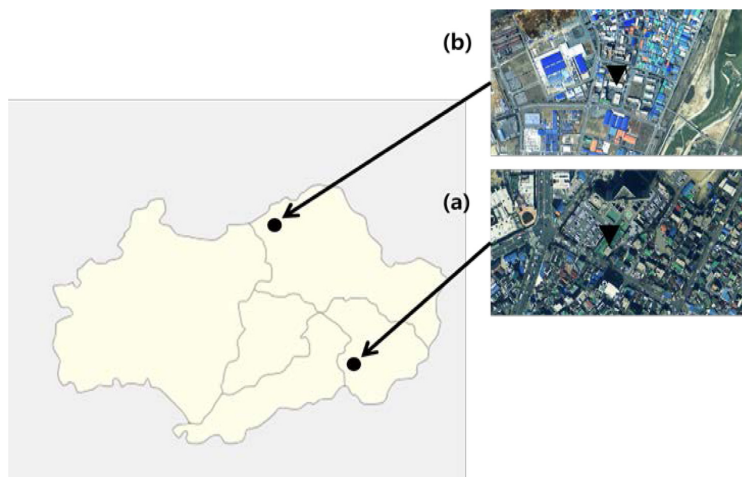


Fig. 1. The locations of the sampling sites in Seoseok (a) and Geonguk (b).

건국동 테크노파크 옥상에서 휘발성유기화합물을 채취하였으며, 이 두 지점은 대기오염물질과 기상을 상시 측정하는 대기오염자동측정소로 Fig. 1과 같다. 서석동 지점은 광주의 동쪽에 있으며, 자동차 통행량이 많고 상가 건물이 밀집되어 있는 상업지역으로 동쪽 250 m 지점에는 9차선 도로가, 서쪽 100 m 지점에는 국립아시아문화전당이 있다. 건국동 지점은 광주의 북쪽에 있으며, 연구시설과 첨단시설을 갖춘 공장이 밀집되어 있는 공업 지역으로 동쪽 1 km 지점에는 광주 담양간 빛고을대로 6차선 도로가 놓여 있다.

휘발성유기화합물 시료채취는 오존 농도가 높은 시기인 2015년 5월부터 9월까지 맑은 날 채취하였으며, 한 지점당 12회 총 24회 576개 시료를 분석하였다. 시료 채취에는 24시간 연속 채취가 가능한 자동시료채취장치인 STS-25(PerkinElmer, UK)와 MTS-32(Markes, UK)를 사용해 당일 10시부터 익일 10시까지 24시간 동안 1시간 간격으로 대기 시료를 채취하였으며, 채취 유량은 90~100 mL/min씩 5~6 L를 채취하였다. 또한 시료 흡인에 사용된 펌프는 시료채취 전후 유량을 확인해 보정하였다.

시료채취는 흡착제 Carbo-pack B와 Carboxen 1000이 충전된 Air Toxics 흡착관(4.6 cm × 9.0 cm, Perkin-Elmer, UK)을 사용하였으며, 흡착관은 사용 전 Tube Conditioner TC-20(Markes, UK)을 이용하여 고순도 질소가스(99.999%)가 100 mL/min로 흐르는 조건하에서 300°C에서 2~3시간 동안 전처리 하여 오염 여부를 확인한 다음 사용하였다. 또한 시료채취 및 보관 시 부가적으로 발생할 수 있는 오염의 개연성을 보정하기 위하

여 현장용 바탕시료 및 실험실용 바탕시료를 실제 시료 채취용과 동일한 흡착관으로 준비하여 분석하였으며, 측정이 끝난 시료는 반드시 PTFE 패킷을 이용하여 막은 다음 운반하여 분석 전까지 냉장 보관(4°C 이내)하였다.

## 2.2. 시료 분석방법

휘발성유기화합물 분석은 자동열탈착장치(Turbomatrix 650, Perkin-Elmer, UK)가 장착된 기체크로마토그래프/질량분석기(GC/MS, Clarus 680/Clarus SQ 8T, Perkin-Elmer, UK)를 사용하여 분석하였으며, 시료 분석에 사용된 자동열탈착장치와 GC/MS의 운전조건은 Table 1과 같다. 분석항목은 미국 EPA에서 지정한 오존 전구물질 VOCs 57종 중에서 자동열탈착장치가 연결된 GC/MS로 분석이 가능한 52종(C<sub>4</sub>~C<sub>12</sub>)을 선정하여 시간대별로 분석하였다.<sup>15)</sup> 휘발성유기화합물의 표준물질은 기체상 혼합가스(52종, 100 ppb, Supelco)를 사용하였으며, 기기 분석용 가스는 헬륨(99.999%)과 질소(99.999%)를 사용하였다. 표준가스 주입은 Standard Gas Dilution System(APK 6100, KR)을 이용해 흡착관에 주입하였으며, 그 외 일반 대기오염물질(O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>)과 기상자료(기온, 습도 등)는 대기오염자동측정소 자료를 이용하였다.

## 2.3. 휘발성유기화합물 분석방법의 정도관리

휘발성유기화합물질의 분석결과에 대한 정밀·정확도를 확인하기 위해 시료채취시 사용된 흡착관의 파과 용량을 평가하고, 정밀도, 방법검출한계 실험을 실시하였다. 채취시간에 대한 상대표준편차는 휘발성유기화합물 모두 0.2% 이하로 나타나 매우 우수한 재현성을 보

**Table 1.** Operating conditions for automatic thermal desorption (ATD) and GC/MS analysis

	Parameters	Conditions
ATD	Desorption temperature	290°C
	Desorption time	8 min
	Cold trap	Air Toxics (Carbo-pack B/Carboxen 1000)
	Cold trap low temperature	-30°C
	Cold trap high temperature	305°C
	Cold trap hold time	3 min
	Transfer line temperature	250°C
	In split	5:1
GC/MS	Column	DB-1 (60 m × 0.32 mm × 3.0 μm)
	Carrier gas and flow	He(99.999%), 1.5 mL/min
	GC temperature program	40°C (5 min) → 5°C/min → 250°C (5 min)
	Detector type	EI (Quadrupole)
	MS source temperature	250°C
	Electron energy	70 eV
	Mass range	35~350 amu

었고, 감응계수에 대한 상대표준편차는 10% 이하로 나타나 양호한 재현성을 보였다. 방법검출한계의 추정을 위해 분석대상물질 각 1 µg의 표준 혼합가스를 7개의 흡착관에 주입한 후 실제 공기시료 6 L (100 mL/min × 60 min)를 채취한 것으로 가정하여 방법검출한계 값을 추정된 결과 0.020~0.060 ppb로 분석되었다.

검정곡선은 표준시료 함침 장치를 이용하여 기체상 표준물질(3 µg, 6 µg, 9 µg, 12 µg, 15 µg)을 흡착관에 함침 받아 실제 시료 분석시와 동일한 조건으로 분석하였다. 시료분석시 매번 검정곡선을 작성하였으며, 직선성 평가 결과 결정계수( $R^2$ )가 0.98 이상으로 나타났다.

시료채취과정 중에 생길 수 있는 시료의 손실율을 알아보기 위해 휘발성유기화합물 중 BTEX의 파과용량을 산출하였다. Standard Gas Dilution System(APK 6100, KR)에 2개의 흡착관을 직렬로 연결한 후 BTEX 표준물질 600µg을 주입한 후 상단과 하단의 흡착관을 분석하여 각 흡착관에서 검출된 분석 대상물질의 양을 비교 평가한 결과, 전반부에서는 BTEX 물질이 검출되었으나 뒷부분에서는 검출되지 않았다. 따라서 본 연구에서 채취한 현장시료는 파과에 의한 시료손실이 없었던 것으로 추정된다.

## 2.4. 통계분석

본 연구에서는 대기 중 휘발성유기화합물질의 측정지점별, 월별, 시간대별 농도를 산출하여 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등을 기술통계량을 산출하였으며, 총휘발성유기화합물(TVOC)는 52종( $C_4 \sim C_{12}$ ) 휘발성유기화합물질의 각 농도 합으로 TVOC를 산출하여 분석하였다. 또한 휘발성유기화합물질과 일반 대기오염물질, 기상인자들과의 관계를 분석하기 위해 통계프로그램인 SPSS 20.0을 이용해 상관분석과 회귀분석을 실시하였으며, 휘발성유기화합물의 오염원을 추정하기 위해 인자분석을 실시하였다.

다변량 자료분석은 조사한 변수가 여러 개인 경우 한 변수와 다른 여러 변수간의 관계를 파악할 때 사용하는 분석방법으로 인자분석법이 다변량 자료분석 방법 중에서 가장 대표적인 분석방법이라고 할 수 있다. 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, 오염

원의 기여도를 정량적으로 추정할 수는 없으나 오염원 분류표(source profile)가 없을 경우 오염원의 추정에 이용되는 통계기법으로서 국내외에 보편적으로 사용되고 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 휘발성유기화합물과 오존, 질소산화물의 변동 특성

#### 3.1.1. 휘발성유기화합물(VOCs)의 월별 농도 분포

Table 2은 VOCs와 오존, 질소산화물의 월 평균 농도를 나타낸 것으로 측정기간 중 VOCs의 월별 농도는 6월이 가장 높고 8월이 가장 낮게 나타났으며, 이 중 Paraffin류가 전체 VOCs의 52.1%, Aromatic류가 40.5%, Olefin류가 7.4%으로 나타났다. 8월에는 잦은 강우로 인해 대기가 깨끗하고 휴가 기간으로 인해 자동차 운행 감소와 공장 가동율이 낮아 VOCs 농도가 낮게 나타난 것으로 추정된다. 정 등<sup>16)</sup>과 유 등<sup>17)</sup>의 연구결과와 같이 Paraffin류와 Aromatic류가 높게 나타났으며, 오존 생성율이 크다고 알려진 Olefin류는 매우 낮게 나타났다.

측정지점별로 VOCs의 농도를 살펴보면 서석동측정소는 Paraffin류가 48.6%, Aromatic류가 43.2%, Olefin류가 8.2% 순으로, 건국동측정소도 Paraffin류가 56.0%, Aromatic류가 37.5%, Olefin류가 6.5% 순으로 나타났다. 두 지점 모두 휘발유 자동차 배출가스와 연관이 있는 Paraffin류가 높게 나타났으며, 건국동측정소는 공업지역임에도 불구하고 주로 연구시설이나 첨단 시설을 갖춘 공장이 입주해 교통량이 많은 지역인 서석동측정소와 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

VOCs의 구성비를 월별로 살펴보면 Paraffin류는 6월에 농도가 가장 높았으며, Aromatic류는 8월에, Olefin류는 7월에 농도가 가장 높았다. 8월에는 휴가 기간으로 인해 도심지 자동차 운행의 감소로 인해 Paraffin류가 낮게 측정되어 전체 VOCs 중 Aromatic류가 차지하는 비중이 올라간 것으로 판단된다. 오존과 질소산화물의 월별 변동에서는 서석동측정소와 건국동측정소 모두 오존 농도가 높은 시기인 5월과 6월에 농도가 높고 8월이 낮게 나타났으며, 질소산화물은 두 지점 모두 5월이 가장 높은 것으로 나타났다.

#### 3.1.2. 시간대별 농도 분포

Fig. 2은 서석동측정소와 건국동측정소에서 VOCs의

**Table 2.** The monthly variation of VOCs, O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> in the ambient air

Site	Month	VOCs (Unit: ppb)						O <sub>3</sub>		NO <sub>x</sub>	
		Paraffin		Aromatic		Olefin		(Unit: ppm)		(Unit: ppm)	
		Mean ±S.D	Range	Mean ±S.D	Range	Mean ±S.D	Range	Mean ±S.D	Range	Mean ±S.D	Range
Seoseok (N=288)	May	2.07 ±2.10	0.00~ 14.54	2.13 ±2.52	0.00~ 19.20	0.20 ±0.31	0.00~ 2.00	0.040 ±0.018	0.008~ 0.085	0.030 ±0.016	0.008~ 0.084
	Jun	4.42 ±5.56	0.32~ 30.84	2.78 ±3.03	0.08~ 19.46	0.65 ±0.71	0.03~ 3.32	0.048 ±0.014	0.015~ 0.077	0.021 ±0.010	0.009~ 0.057
	Jul	1.67 ±1.09	0.21~ 5.45	1.80 ±1.21	0.34~ 7.81	0.39 ±0.32	0.02~ 1.47	0.036 ±0.015	0.013~ 0.068	0.018 ±0.007	0.008~ 0.038
	Aug	1.94 ±1.96	0.12~ 8.07	1.83 ±1.72	0.39~ 8.19	0.35 ±0.27	0.04~ 1.28	0.025 ±0.015	0.002~ 0.064	0.021 ±0.009	0.009~ 0.042
	Sep	1.89 ±1.96	0.11~ 10.13	1.57 ±1.19	0.14~ 5.46	0.36 ±0.25	0.02~ 1.09	0.031 ±0.018	0.003~ 0.072	0.020 ±0.010	0.006~ 0.053
	Total	2.49 ±3.30	0.00~ 30.84	2.06 ±2.18	0.00~ 19.46	0.39 ±0.45	0.00~ 3.32	0.037 ±0.018	0.002~ 0.085	0.022 ±0.012	0.006~ 0.084
	Konkuk (N=288)	May	3.16 ±3.84	0.13~ 16.37	1.39 ±1.96	0.02~ 11.86	0.14 ±0.27	0.01~ 1.73	0.047 ±0.019	0.018~ 0.083	0.033 ±0.006
Jun		2.33 ±2.48	0.13~ 12.18	0.91 ±0.68	0.02~ 3.86	0.22 ±0.15	0.00~ 0.55	0.049 ±0.014	0.016~ 0.082	0.018 ±0.004	0.011~ 0.028
Jul		2.48 ±1.90	0.00~ 8.14	1.77 ±1.30	0.00~ 5.88	0.42 ±0.56	0.00~ 3.06	0.042 ±0.012	0.025~ 0.065	0.017 ±0.007	0.007~ 0.032
Aug		1.07 ±0.91	0.19~ 3.42	1.11 ±0.76	0.31~ 2.92	0.20 ±0.17	0.07~ 0.68	0.034 ±0.024	0.010~ 0.077	0.017 ±0.004	0.009~ 0.027
Sep		1.78 ±1.68	0.11~ 7.74	1.78 ±1.46	0.16~ 7.47	0.21 ±0.14	0.01~ 0.63	0.037 ±0.019	0.013~ 0.076	0.010 ±0.008	0.000~ 0.030
Total		2.37 ±2.73	0.00~ 16.37	1.35 ±1.42	0.00~ 11.86	0.22 ±0.29	0.00~ 3.06	0.044 ±0.018	0.010~ 0.083	0.021 ±0.010	0.003~ 0.048
Total	May	2.62 ±3.13	0.0~ 16.37	1.76 ±2.28	0.00~ 19.20	0.17 ±0.29	0.00~ 2.00	0.044 ±0.019	0.008~ 0.085	0.032 ±0.012	0.008~ 0.084
	Jun	3.38 ±4.42	0.13~ 30.84	1.85 ±2.38	0.02~ 19.46	0.44 ±0.56	0.00~ 3.32	0.048 ±0.014	0.015~ 0.082	0.019 ±0.008	0.009~ 0.057
	Jul	2.02 ±1.54	0.00~ 8.14	1.79 ±1.24	0.00~ 7.81	0.40 ±0.44	0.00~ 3.06	0.039 ±0.014	0.013~ 0.068	0.018 ±0.007	0.007~ 0.038
	Aug	1.65 ±1.73	0.12~ 8.07	1.59 ±1.50	0.31~ 8.19	0.30 ±0.25	0.04~ 1.28	0.028 ±0.019	0.002~ 0.077	0.019 ±0.008	0.009~ 0.042
	Sep	1.85 ±1.85	0.11~ 10.13	1.66 ±1.30	0.14~ 7.47	0.30 ±0.23	0.01~ 1.09	0.032 ±0.019	0.003~ 0.076	0.017 ±0.010	0.003~ 0.053
	Total	2.44 ±3.06	0.00~ 30.84	1.74 ±1.91	0.00~ 19.46	0.32 ±0.40	0.00~ 3.32	0.040 ±0.018	0.002~ 0.085	0.022 ±0.011	0.003~ 0.084

시간대별 농도변화를 나타낸 것으로 서석동측정소는 주간시간대에 높게 나타나며 건국동은 저녁시간대에 높게 나타났다. 서석동측정소는 상업지역으로 주변에 관공서나 상가건물이 밀집되어 있으며, 낮에도 자동차 통행량이 많아 주로 사람이 활동하는 낮 시간대에 높게 나타나는 것으로 판단되며, 건국동측정소는 공업지역이나 주로 연구시설과 첨단시설의 공장이 입주해 서석동측정소보다는 VOCs 농도가 낮으며, 낮 시간대에는 자동차 통

행량도 많지 않으나 저녁 시간대에는 공장에서 퇴근하는 차량으로 인해 약간 올라가는 것으로 판단된다.

Fig. 3는 질소산화물과 오존의 농도를 시간대별로 나타낸 것으로 오존농도는 오전 7시부터 증가하기 시작하여 낮 시간대에 최고치를 나타냈고 질소산화물은 오존과는 상반되는 경향으로 낮 시간대에 낮은 농도를 나타내었다. 이는 오전에 질소산화물과 휘발성유기화합물이 대기 중에 공존하여 낮 시간으로 가면서 햇빛을 받아 광

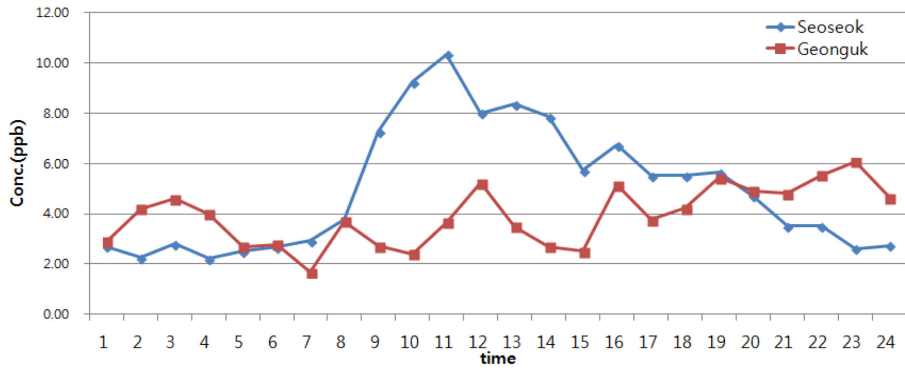
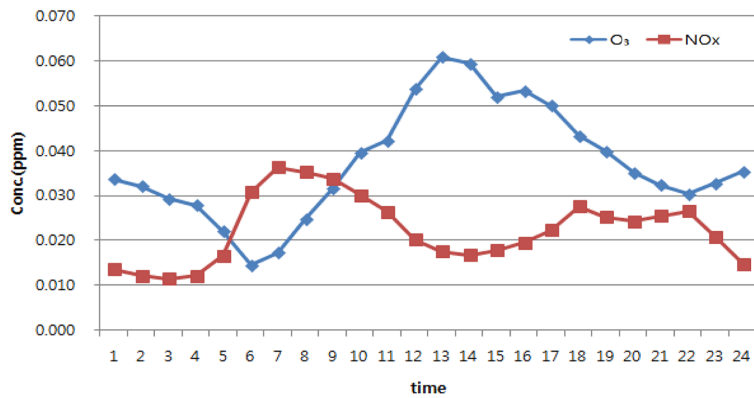
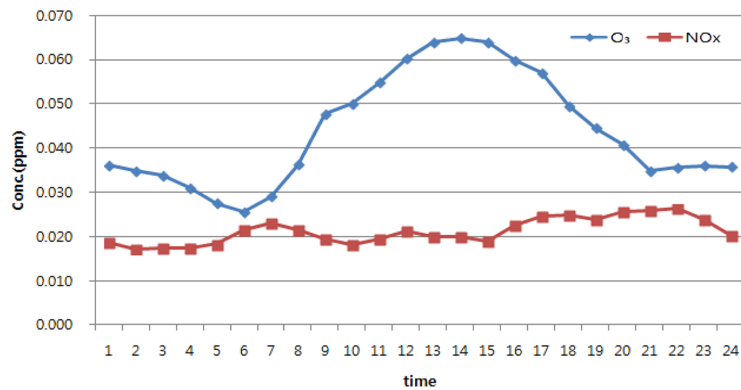


Fig. 2. The diurnal variation of VOC concentrations.



(a) Seoseok



(b) Geonguk

Fig. 3. The diurnal variation of O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations.

화학 반응으로 질소산화물의 양은 감소하고 오존은 이들의 화학반응에 의해 낮 시간대에 최고치를 나타낸 것이다.

### 3.2. POCP를 이용한 오존생성 기여도 평가

다수의 화학종으로 이루어진 VOCs는 화학종별로 반응성 및 배출원이 상이하고 광화학스모그를 유발시키는

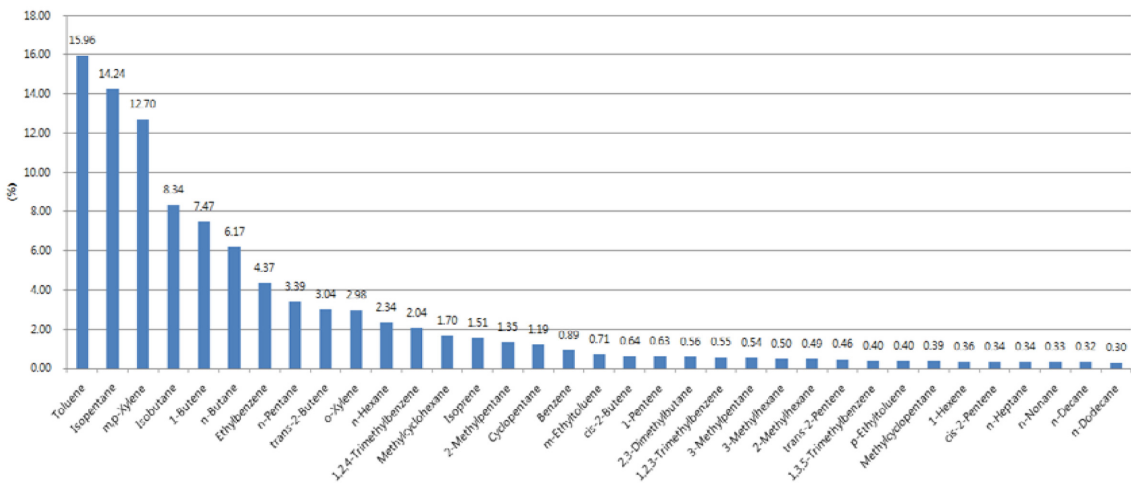
**Table 3.** POCPs of target VOCs as ozone precursors listed<sup>18)</sup>

No.	VOCs	POCP	No.	VOCs	POCP	No.	VOCs	POCP
1	Isobutane	30	19	Methylcyclopentane	50	37	Styrene	60
2	1-Butene	95	20	2,4-Dimethylpentane	55	38	o-Xylene	65
3	n-Butane	40	21	Benzene	20	39	n-Nonane	45
4	trans-2-Butene	100	22	Cyclohexane	25	40	Isopropylbenzene	55
5	c is-2-Butene	100	23	2-Methylhexane	50	41	n-Propylbenzene	50
6	Isopentane	30	24	3-Methylhexane	50	42	m-Ethyltoluene	80
7	1-Pentane	70	25	2,3-Dimethylpentane	50	43	p-Ethyltoluene	75
8	n-Pentane	40	26	2,2,4-Trimethylpentane	60	44	1,3,5-Trimethylbenzene	115
9	Isoprene	100	27	n-Heptane	55	45	o-Ethyltoluene	65
10	trans-2-Pentene	95	28	Methylcyclohexane	50	46	1,2,4-Trimethylbenzene	120
11	c is-2-Pentene	95	29	2,3,4-Trimehtylpentane	60	47	n-Decane	45
12	2,2-Dimethylbutane	25	30	Toluene	55	48	1,2,3-Trimethylbenzene	115
13	Cyclopentane	50	31	2-Methylheptane	45	49	m-Diethylbenzene	65
14	2,3-Dimethylbutane	40	32	3-Methylheptane	40	50	p-Diethylbenzene	65
15	2-Methylpentane	50	33	n-Octane	50	51	n-Undecane	40
16	3-Methylpentane	45	34	Ethylbenzene	60	52	n-Dodecane	45
17	1-Hexene	50	35	m-Xylene	95			
18	n-Hexane	40	36	p-Xylene	95			

정도가 다르다. 따라서 대기 중 광화학반응성 정도는 일반적으로 에틸렌을 기준물질(POCP = 100)로 하여 오존생성능력(POCP: photochemical ozone creation potential)으로서 표현된다. 각 VOCs의 POCP를 Table 3에 나타냈으며, 이 중 1,2,4-Trimethylbenze이 120으로 가장 높은 POCP 값을 나타낸다. 일반적으로 올레핀 탄화수소류와 방향족 탄화수소류가 높은 POCP 값을 나타낸다. 따라서 대기 중에 배출된 VOCs의 오존생성 기여도를 산출하여 기여도가 높은 물질의 배출을 저감하면

효율적으로 오존생성을 억제할 수 있다.

Fig. 4은 POCP를 고려한 오존생성 기여도를 평가한 것으로, 그 결과 Toluene이 16.0 %로 가장 높았으며 다음으로는 Isopentane, m,p-Xylene, Isobutane, 1-Butene이 각각 14.2%, 12.7%, 8.3%, 7.5%로 나타났다. 톨루엔의 POCP 지수는 55로 비교적 낮으나 대기 중 일평균 농도가 다른 물질보다 고농도이기 때문에 기여도는 가장 높게 평가되었다. 상위 5가지 물질의 기여도가 전체의 58.7%로 다른 물질의 기여도보다 비교적 높



**Fig. 4.** Target VOCs' distribution by their POCPs.

은 것으로 나타났다. POCP가 120으로 오존생성율이 가장 큰 1,2,4-trimethylbenzene의 기여도가 2.0%로 높게 나타났다. 따라서 오존 생성을 줄이기 위해서는 상위 5종의 VOCs 물질에 대한 발생원 관리가 이루어져야 할 것으로 보인다.

### 3.3. VOCs의 통계분석

#### 3.3.1. VOCs와 일반대기오염물질과의 상관성

광주지역 휘발성유기화합물과 일반 대기오염물질, 기상과의 상관성을 분석하기 위해 통계프로그램 SPSS로 Pearson correlation analysis을 실시하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 분석결과, PM-10과 PM-2.5 사이에서 가장 높은 상관관계( $r=0.810$ )를 보였으며, 유의수준 0.01에서 유의한 것으로 분석되었으나, VOCs는 다른 대기오염물질이나 기상과는 특별한 상관관계가 나타나지 않았다.

미세먼지와 일산화탄소, 질소산화물과 아황산가스는 약간의 상관성이 있는 것으로 조사되었으며, 오존은 온도와 일사량과 양의 상관관계, 습도와는 음의 상관관계가 있는 것으로 조사되었다. 이는 허<sup>19)</sup>와 허<sup>20)</sup>의 연구

결과에서와 같이 연료사용과 관련이 있는 대기오염물질 간에는 서로 상관성이 있으며, 오존은 일사량이 증가할수록 습도가 낮을수록 오존 농도가 증가하는 것을 의미한다.

#### 3.3.2. VOCs 인자분석

인자분석의 목적은 특정변수 간의 상호관계를 통해서 잠재적인 구조를 탐색하는데 있는 것이며 인자부하량 행렬이나 인자구조 행렬의 추정치 등으로부터 인자의 해석이 실시된다. 변수들이 여러 인자에 대하여 비슷한 인자 부하량을 나타낼 경우에 변수들이 어느 인자에 속하는지를 분류하기가 어렵다. 따라서 변수들의 인자부하량이 어느 한 인자에 높게 나타나도록 하기 위해서 인자축을 회전시킨다. 회전방식은 몇 가지가 있는데 크게 직각회전(orthogonal rotation)과 사각회전(oblique rotation)으로 나뉘어진다. 직각회전방식에는 Varimax, Quartimax, Equimax 등이 있는데 이중에서 Varimax 방식이 가장 널리 이용된다. 본 연구에서는 Varimax 직각회전방식을 사용하였으며, 서석동측정소와 건국동측정소의 분석결과를 Table 5에 나타냈다.

**Table 4.** Results of correlation analysis of VOCs and air pollutants

	Temp. (°C) <sup>a</sup>	PM-10	PM-2.5	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	Hum.	Ra.
PM-10 (µg/m <sup>3</sup> )	0.001								
PM-2.5 (µg/m <sup>3</sup> )	0.077	0.810**							
O <sub>3</sub> (ppm)	0.468**	0.329**	0.294**						
NO <sub>x</sub> (ppm)	-0.083	0.141**	0.078	-0.038					
CO (ppm)	-0.038	0.407**	0.523**	0.275**	0.168**				
SO <sub>2</sub> (ppm)	0.044	-0.034	-0.012	0.041	0.526**	0.022			
Hum. (%) <sup>b</sup>	-0.324**	0.005	0.302**	-0.563**	-0.152**	0.050	-0.048		
Ra. (W/m <sup>2</sup> ) <sup>c</sup>	0.466**	0.053	-0.093*	0.448**	0.059	-0.032	-0.015	-0.633**	
VOCs (ppb)	0.080	0.126**	0.060	0.211**	0.059	0.077	-0.009	-0.208**	0.231**

<sup>a</sup>Temp.: Temperature, <sup>b</sup>Hum.: Humidity, <sup>c</sup>Ra: Radiation.

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$

**Table 5.** The summary results of factor analysis for VOCs

Item	Seoseok			Geonguk		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Isobutane	0.515	-0.083	-0.075	0.379	-0.349	0.350
1-Butene	0.447	0.433	-0.071	0.418	0.191	0.381
n-Butane	0.709	0.327	-0.117	0.209	0.396	0.332
trans-2-Butene	0.015	-0.037	-0.026	0.500	0.480	-0.329
cis-2-Butene	0.299	0.384	-0.086	0.335	0.673	-0.163
Isopentane	0.797	0.323	-0.108	0.100	-0.121	0.206
1-Pentene	0.587	0.449	0.007	0.040	0.339	0.211
n-Pentane	0.749	0.347	-0.090	0.547	-0.440	0.155
Isoprene	0.487	0.314	-0.110	0.101	0.267	0.214

**Table 5.** The summary results of factor analysis for VOCs (continued)

Item	Seoseok			Geonguk		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3
trans-2-Pentene	0.676	0.438	-0.039	0.384	0.379	-0.397
cis-2-Pentene	0.616	0.445	-0.009	0.111	0.515	0.041
2,2-Dimethylbutane	0.673	0.406	0.088	0.148	0.414	0.358
Cyclopentane	0.692	0.281	-0.112	0.394	-0.095	0.593
2,3-Dimethylbutane	0.720	0.355	-0.085	0.176	0.178	0.555
2-Methylpentane	0.718	0.393	-0.048	0.489	0.236	0.481
3-Methylpentane	0.570	0.265	0.030	0.500	0.158	0.509
1-Hexene	0.509	0.391	0.145	0.403	0.678	0.000
n-Hexane	0.375	0.010	-0.029	0.253	0.018	0.462
Methylcyclopentane	0.351	0.097	0.040	0.548	0.510	0.086
2,4-Dimethylpentane	0.225	0.005	0.291	0.140	0.176	-0.096
Benzene	0.745	0.294	-0.119	0.660	0.159	0.399
Cyclohexane	0.534	0.178	0.030	0.683	0.397	0.046
2-Methylhexane	0.785	0.148	0.028	0.650	0.208	0.224
2,3-Dimethylpentane	0.535	0.355	0.152	0.149	0.514	0.174
3-Methylhexane	0.868	0.279	-0.002	0.702	0.500	0.100
2,2,4-Trimethylpentane	0.855	0.217	0.089	0.362	0.151	0.111
n-Heptane	0.891	0.238	-0.013	0.674	0.526	-0.118
Methylcyclohexane	0.519	0.192	-0.017	0.701	0.067	0.183
2,3,4-Trimethylpentane	0.737	0.245	-0.053	0.205	0.012	0.064
Toluene	0.810	-0.060	-0.122	0.744	-0.334	0.306
2-Methylheptane	0.781	0.181	0.050	0.493	0.529	-0.211
3-Methylheptane	0.570	0.105	0.124	0.481	0.427	-0.258
n-Octane	0.372	-0.061	0.862	0.318	0.232	-0.377
Ethylbenzene	0.733	-0.257	0.387	0.797	-0.293	-0.008
m, p-Xylene	0.726	-0.408	0.189	0.792	-0.326	-0.117
Styrene	0.229	-0.161	0.875	0.317	0.171	-0.398
o-Xylene	0.751	-0.375	-0.072	0.837	-0.366	-0.088
n-Nonane	0.839	-0.243	-0.074	0.785	0.196	-0.127
Isopropylbenzene	0.633	-0.201	0.154	0.712	0.145	-0.342
n-Propylbenzene	0.753	-0.501	-0.011	0.806	-0.253	-0.222
m-Ethyltoluene	0.702	-0.626	-0.166	0.824	-0.477	-0.076
p-Ethyltoluene	0.717	-0.577	-0.170	0.790	-0.491	-0.068
o-Ethyltoluene	0.629	-0.655	-0.187	0.762	-0.447	-0.096
1,3,5-Trimethylbenzene	0.768	-0.558	0.025	0.787	-0.433	-0.089
1,2,4-Trimethylbenzene	0.572	-0.622	-0.218	0.785	-0.501	-0.050
n-Decane	0.700	-0.254	-0.057	0.579	0.053	-0.159
1,2,3-Trimethylbenzene	0.646	-0.651	-0.227	0.793	-0.477	-0.072
m-Diethylbenzene	0.541	-0.450	0.399	0.386	-0.372	0.106
p-Diethylbenzene	0.709	-0.492	-0.060	0.757	-0.383	-0.136
n-Undecane	0.701	-0.077	-0.048	0.667	0.436	-0.145
n-Dodecane	0.319	0.069	-0.133	0.563	0.514	-0.271
Eigenvalue	21.6	6.4	2.4	16.6	7.2	3.6
Variance (%)	41.5	12.3	4.6	31.9	13.8	6.8

서석동측정소와 건국동측정소의 VOCs를 인자분석 실시한 결과, 고유값 1이상인 요인이 10개로 전체 VOCs의 80% 이상을 설명해주고 있었다. 하지만 이 인자들

중 3개가 전체 VOCs의 50% 이상을 차지하고 나머지는 차지하는 비율이 낮아서 제외하고 주요 인자 3개를 중심으로 다시 분석하였다.

서석동측정소의 경우 인자 1은 전체 VOCs의 41.5%, 인자 2는 12.3%, 인자 3은 4.6%를 설명해주는 것으로 조사되었으며, 인자 1에는 3-Methylhexane, 2,2,4-Trimethylpentane, n-Heptane, Toluene, n-Nonane 등이, 인자 2에는 1-Butene, 1-Pentane, trans-2-Pentene 등이, 인자 3에는 n-Octane, Styrene 등이 포함되어 있었다. 인자 1은 자동차 배출가스 및 주류, 세척시설 등에서 배출하는 Paraffin류, Aromatic류, Olefin류 모두 포함되어 있으며, 인자 2에는 주로 휘발유 자동차에서 배출되는 휘발성유기화합물이, 인자 3은 디젤 자동차에서 배출하는 휘발성유기화합물이 주요 인자로 나타났다.

건국동측정소의 경우 인자 1은 전체 VOCs의 31.9%, 인자 2는 13.8%, 인자 3은 6.8%를 설명해주는 것으로 조사되었으며, 인자 1에는 m,p,o-Xylene, n-Propylbenzene, m,p,o-Ethyltoluene 등이, 인자 2에는 cis-2-Pentene, 1-Hexene, n-Heptane 등이, 인자 3에는 Cyclopentane, 2,3-Dimethylbutane, 3-Methylpentane 등이 포함되어 있었다. 인자 1은 주로 Aromatic류로 디젤 자동차에서 배출하는 휘발성유기화합물이, 인자 2는 Paraffin류로 휘발유 자동차에서 배출되는 휘발성유기화합물이, 인자 3은 Olefin류가 주요 인자로 나타났다.

서석동측정소는 상업지역으로 주변에 관공서 등 상가 건물이 밀집되어 있으며, 특히 차량 통행이 많은 지점으로 거의 모든 휘발성유기화합물질이 주요 인자로 작용하는 것으로 나타났으며, 건국동측정소는 공업지역이나 주로 연구시설이나 첨단 시설을 갖춘 공장이 위치해 있어 특정 시설에서 배출되는 휘발성유기화합물질보다 디젤이나 휘발유 자동차에서 배출되는 Paraffin류와 Aromatic류가 주요 인자로 작용한 것으로 추정된다.

### 3.3.3. 인자분석을 이용한 회귀분석

인자분석에서 산출한 각 인자들이 휘발성유기화합물질의 농도에 어느 정도 영향을 미치는지 알아보기 위해 회귀분석을 실시하였으며, 서석동측정소와 건국동측정소

의 휘발성유기화합물에 대한 회귀방정식 및 결정계수를 Table 6에 나타냈다.

서석동측정소 VOCs의 경우 인자 1은 4.193 ppb씩, 인자 2는 2.777 ppb씩, 인자 3은 0.656 ppb씩 농도가 높아지는 것으로 나타났다. 결정계수( $R^2$ )는 0.877로 추정된 회귀식에 의해 전체 VOCs 농도의 87.7%를 설명할 수 있으며, 유의수준 0.01 이하로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

건국동측정소의 인자 1은 2.654 ppb씩, 인자 3은 1.485 ppb씩 농도가 높아지는 것으로 나타났으며, 인자 2는 측정값의 공선성이 존재해 회귀분석에서 제외되었다. 결정계수( $R^2$ )는 0.669로 추정된 회귀식에 의해 전체 VOCs 농도의 69.9%를 설명할 수 있으며, 유의수준 0.01 이하로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구는 오존 농도가 높은 시기인 5월에서 9월까지 광주지역 상업지역인 서석동과 공업지역인 건국동 대기 오염자동측정소에서 오존생성 전구물질인 VOCs 52종과 오존, 질소산화물을 분석하여 광주시의 대기오염도 현황과 분포 특성, VOC의 주요 원인물질을 파악하여 향후 지표면 오존농도 저감방안 수립하기 위한 기초자료를 제공하기 위해 이루어졌다.

VOCs의 월 평균 농도를 조사한 결과 6월이 가장 높고 8월이 가장 낮게 나타났으며, 이 중 Paraffin류가 전체 VOCs의 52.1%, Aromatic류가 40.5%, Olefin류가 7.4%로 나타났다. 8월에는 잦은 강우로 인해 대기가 깨끗하고 휴가기간으로 인해 자동차 운행 감소와 공장 가동율이 낮아 VOCs 농도가 낮게 나타난 것으로 추정된다.

서석동측정소와 건국동측정소에서 VOCs의 시간대별 농도변화에서는 서석동측정소는 주간시간대에 높게 나타나고 건국동은 저녁시간대에 높게 나타났다. 서석동측정

**Table 6.** Results of regression analysis between VOCs and factors

	Parameter	Coefficients	$R^2$	$p$ -value
Seoseok	Constant	4.948	0.877	0.000
	Factor 1	4.193		
	Factor 2	2.777		
	Factor 3	0.656		
Geonguk	Constant	3.951	0.669	0.000
	Factor 1	2.654		
	Factor 3	1.485		

소는 상업지역으로 주변에 관공서나 상가건물이 밀집되어 있고 낮에도 자동차 통행량이 많아 낮 시간대에 높게 나타나고, 건국동측정소는 낮 시간대에는 자동차 통행량도 많지 않으나 저녁 시간대 공장에서 퇴근하는 차량으로 인해 약간 올라가는 것으로 판단된다.

POCP를 고려한 오존생성 기여도를 평가한 결과 Toluene이 16.0% 가장 높았으며 다음으로 Isopentane, m, p-Xylene, Isobutane, 1-Butene이 각각 14.2%, 12.7%, 8.3%, 7.5%로 나타났다. 상위 5가지 물질의 기여도가 전체의 58.7%로 다른 물질의 기여도보다 비교적 높은 것으로 나타나 오존 생성을 줄이기 위해서는 상위 5종의 VOCs 물질에 대한 발생원 관리가 이루어져야 할 것으로 보인다.

휘발성유기화합물과 일반 대기오염물질, 기상과의 상관성을 분석한 결과, PM-10과 PM-2.5 사이에서 가장 높은 상관관계( $r=0.810$ )를 보였으며, VOCs는 다른 대기오염물질이나 기상과는 특별한 상관관계가 나타나지 않았다. 오존은 온도와 일사량과 양의 상관관계, 습도와는 음의 상관관계가 있는 것으로 나타나 오존은 일사량이 증가할수록 습도가 낮을수록 오존 농도가 증가한다는 것을 알 수 있었다.

서석동측정소와 건국동측정소의 VOCs를 인자분석 실시한 결과, 서석동의 경우 인자 1은 전체 VOCs의 41.5%, 인자 2는 12.3%, 인자 3은 4.6%를 설명해주고 건국동의 경우 인자 1은 전체 VOCs의 31.9%, 인자 2는 13.8%, 인자 3은 6.8%를 설명해주는 것으로 조사되었다. 서석동은 거의 모든 휘발성유기화합물질이 주요 인자로 작용하고, 건국동은 디젤이나 휘발유 자동차에서 배출되는 Paraffin류와 Aromatic류가 주요인자로 작용한 것으로 추정된다.

따라서 본 연구에서 광주지역의 대기 중 휘발성유기화합물질 농도는 높지 않지만 휘발성유기화합물 자체만으로도 독성을 가지고 있으며, 오존 생성뿐만 아니라 거의 모든 대기오염에 관여하고 있으므로 지속적으로 모니터링하고 오염물질을 줄일 수 있도록 노력하여야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 2015년 환경부 환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업과 광주광역시 보건환경연구원 연구역량강화 사업의 지원으로 수행하였습니다.

## 참고문헌

1. 국립환경과학원, “대기환경연보 2014”, 2015.
2. Michael, E.J. and G.D. Hayman, “Photochemical ozone creation potential for oxygenated volatile organic compounds: sensitivity to variations in kinetic and mechanistic parameters”, *Atmospheric Environment*, 1999, 33, 1275-1293.
3. Finlayson-Pitts, B.J. and J.N. Pitts, “Chemistry of the upper and lower atmosphere”, *Academic Press U.S.A.* 2000, 969.
4. Reis, S., D. Simpson, R. Friedrich, J.E. Jonson, S. Unger, and A. Obrmeier, “Road traffic emission-predictions of future contributions to regional ozone levels in Europe”, *Atmospheric Environment*, 2000, 34, 4701-4710.
5. 김학민, 김선태, “Passive Sampler-GC/FID에 의한 VOC 분석시 기기검출한계 평가와 시료채취시간 산정에 관한 연구”, *대한환경공학회지*, 2001, 23(5), 839-848.
6. 한국대기보전학회 측정분과위원회, “대기환경과 휘발성유기화합물질”, *한국대기보전학회지*, 1998, 134-158.
7. 환경부 환경통계포털, <http://stat.me.go.kr>, 2015년 12월.
8. Mohamed, M.F., D. Kang, and V.P. Aneja, “Volatile organic compounds in some urban locations in United States”, *Chemosphere*, 2002, 47, 863-882.
9. Pfeffer, H.U., “Ambient air concentrations of pollutants at traffic-related sites in urban areas of North Rhine-Westphalia, Germany”, *Science of the Total Environment*, 1994, 146(147), 263-273.
10. Vega, E., V. Mugica, R. Carmona, and E. Valencia, “Hydrocarbon source apportionment in Mexico City using the chemical mass balance receptor model”, *Atmospheric Environment*, 2000, 34, 4121-4129.
11. 이제승, 최유리, 김현수, 어수미, 김민영, “서울시 도로변, 터널 및 주거지역 대기 중 유해 휘발성유기화합물의 특성”, *한국대기환경학회지*, 2011, 27(5), 558-568.
12. 백성욱, 김미현, 서영교, “발생원 유형에 따른 공기 중 휘발성유기화합물의 비산배출 특성 평가”, *한국대기환경학회지*, 2003, 19(4), 363-376.
13. 박지혜, 서영교, 백성욱, “대도시 및 주변 교외지역의 대기 중 휘발성유기화합물 농도 비교에 관한 연구”, *한국대기환경학회지*, 2006, 22(6), 767-778.
14. 김선태, 최일환, 이규성, “폐혁산업장의 휘발성유기화합물(VOCs) 배출 특성에 관한 연구”, *한국대기환경학회지*, 2007, 23(3), 332-343.
15. EPA, “Technical assistance document of sampling and analysis of ozone precursors”, 1998.
16. 정장표, 유숙진, “휘발성유기화합물과 질소산화물의 오존생성 기여도 평가에 관한 연구”, *대한환경공학회지*,

- 2010, 32(2), 209-218.
17. 유재연, 김득수, 채수천, 남두천, 최양석, “서해연안 도시 지역의 대기질 특성 연구: 군산시 산업단지와 전주시 도로변에서 VOCs 농도분포 특성 연구”, *한국대기환경학회지*, **2010**, 26(6), 633-648.
  18. 백성옥, “오존 및 오존 Precursor의 측정”, 민관 공동 오존오염대책 workshop, **2000**, 49.
  19. 허국영, “KZ필터를 이용한 서울 지역 지표면 오존 농도의 장기적 분석”, 서울대학교 환경대학원 도시계획학 석사학위논문, **2001**, 31-35.
  20. 허미숙, “여름철 대기 중 고농도 오존발생시 VOCs 거동 특성”, 서울시립대학교 도시과학대학원 환경공학 석사학위논문, **2007**, 31-32.