

부산시 공업지역 환경 대기 중 VOCs 특성 및 발생원 규명

Characteristics and Identification of Ambient VOCs Sources in Busan Industrial Area

정장표 · 유숙진*[†]
Jang-Pyo Cheong · Sook-Jin You*[†]

경성대학교 환경공학과 · *부산광역시 보건환경연구원
Department of Environmental and Civil Engineering Graduate School Kyungpook University,
*Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment

(2011년 9월 16일 접수, 2011년 9월 28일 채택)

Abstract : VOCs (Volatile Organic Compounds) have adverse effects on human health and have caused serious global air pollution problems such as ozone depletion and climate changes. The total of 56 target VOCs were selected to be monitored in this study for 4 years (2006~2009). The VOCs were measured every hour. The concentration of BTEX was higher than the other target compounds. Generally, the levels of VOCs measured in this study were higher than those measured by the other studies because Gamjeon and Jangrim monitoring sites are located in industrial areas. The seasonal variations showed that the VOCs were the highest in winter. The temporal variations showed that the VOCs were high during commuting time on weekday. PMF model was used to resolve source types and source contributions of VOCs in this study. Identified sources and quantified contributions resolved by PMF were vehicle exhaust (15.22%), thinning solvent (29.83%), surface coating (17.13%), industries (13.95%), LPG vehicle (15.22%), combustion boiler (7.11%) and biogenic source (6.61%). Thinning solvent and Surface coating were the most contributed sources possibly due to manufactures and automobile garages in Gamjeon and solvent and paint manufactures in Sasang-Gu.

Key Words : Volatile Organic Compounds (VOCs), BTEX, PMF Model

요약 : 부산광역시에서 운영하고 있는 VOCs 자동측정망에서 실시간 분석되고 있는 데이터를 이용 감전동과 장림동에 대한 환경대기 중의 VOCs 특징 및 발생원을 규명하고자 하였다. 사상구 감전동과 사하구 장림동은 국가 공단 내에 위치하고 있어, 인근 지역에 소재하고 있는 공장의 영향을 많이 받은 것으로 조사되었다. 감전동 지역에 영향을 줄 수 있는 배출원 및 그 배출원의 기여도를 추정하기 위하여 PMF 모델을 수행한 결과 분류된 배출원과 그 기여도는 유기용제(29.83%), 표면 코팅(17.13%), 차량 배기가스(15.22%), 압축기의 윤활유와 세탁시설(13.95%), LPG 차량(15.22%), 난방연소(7.11%) 및 자연적 배출원(6.61%)로 나타났다. 특히 유기용제와 표면코팅이 가장 큰 기여도를 나타내었는데 이는 감전동에 위치한 많은 제조공장과 자동차 정비시설의 영향과 사상구에 위치한 유기용제 및 페인트 제조공장의 영향에 기인한 것으로 판단되어 진다.

주제어 : VOCs(휘발성유기화합물), 배출원, PMF모델

1. 서론

20세기 후반부터 시작된 급속한 경제성장으로 국민복지가 향상되고 생활공간이 확대되는 등 삶의 질은 더욱 향상되고 있다. 그렇지만 인간 활동에 의해 발생된 인위적 화학물질은 다양한 형태로 대기 중으로 배출되고 있으며, 여러 가지의 화학반응을 일으켜 환경오염의 유발 및 악화를 초래하고 있다. 특히 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds; 이하 VOCs)은 차량증가 및 난방연료 사용 등 여러 요인에 의해 증가 추세에 있기 때문에 광화학 반응성을 고려한 오존 전구물질(Precursor)로서의 역할에 대한 연구가 주요한 관심의 대상이 되고 있으며 인체 위해도에 크게 기여하고 있어서 각 물질에 대한 발암, 비발암 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 또한 VOCs는 배출형태 및 부가적인 대기 중에서의 반응형태에 따라 지구 온난화 및 성층권의 오존층 파괴 등 지구환경에도 악영향을 초래하고 있다. 이와

같이 VOCs가 환경에 미치는 악영향이 대단히 크기 때문에 구미 등의 선진국에서는 일찍부터 강력한 조치를 바탕으로 엄격히 규제해 오고 있다. 특히 VOCs에 대한 규제 강화와 국제적인 규제기준의 통일화, 지도 지침의 내실화 등에 대해 유럽공동체를 중심으로 VOCs 감축을 대기질 관리의 주요 정책수단으로 이용하는 국가가 증가하는 추세에 있다.¹⁾ 한편 우리나라에서도 오존 농도가 매년 증가하는 추세에 있고, 수도권 및 대도시 지역에서는 단기 환경 기준치를 초과하는 사례가 빈번하게 발생함에 따라 해당 지역을 대기규제지역 또는 특별대책지역 등으로 설정하고, 대기오염물질의 저감방안 수립을 의무화 하고 있다. 이로 인해 오존 전구물질인 VOCs 규제에 관한 관심이 집중되고 있는 실정이며, 대기규제지역 등지에서는 이미 VOCs 규제관리 정책을 수립하고 시행중에 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2010년 2월 동 학회지 제32권 제2호에 게재한 「휘발성유기화합물과 질소산화물의 오존생성 기여도 평가에 관한 연구」에 이

[†] Corresponding author E-mail: yjsby@korea.kr Tel: 051-757-6937 Fax: 051-888-6817

어 부산보건환경 연구원에서 자체적으로 감전동과 장림동에
 서 운영중인 VOCs 자동측정망의 데이터를 활용 대상지역의
 각종 VOCs의 출현 및 분포 현황을 파악하고 이들 물질의 대
 기 중 농도를 측정하여 오염 특성을 파악, 발생원을 추적함
 으로서 지역 주민의 건강을 보호하기 위한 근본적 대책 수립
 의 기초 자료를 마련하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 측정방법 및 정도관리

조사지점은 사상구 감전동(감전 동사무소 3층 옥상)과 장림
 동(장림1동 사무소 3층 옥상)에 설치되어 있는 악취 및 VOCs
 측정망이다. 용도지역은 도로가 인접해 있으며 공업지역으
 로 주변에 여러 업종들의 산업체가 산재해 있는 지역이다.
 측정방법은 일반대기중의 휘발성유기화합물 56종을 매시
 간 측정하여 온라인 측정망을 통해 데이터를 수신 자료를 관
 리하였다. 측정기기는 Donam Instrument사의 온라인 열 탈
 착 장치에 연결된 동사의 GC를 이용하였으며 측정장비의 분
 석조건은 Table 1과 같다. VOCs 자동측정망은 매시간별로

56종의 오염물질을 측정하는 측정소로써, 측정자료에 대한
 신뢰도 제고 및 유지를 위하여 정도관리 업무를 수행하고
 있다. 일반적으로 국가 광화학 측정망에서는 56종의 VOCs
 를 대표하여 propane과 benzene으로 보정하는 등의 정도관
 리를 수행하고 있는 반면에, 부산광역시의 VOCs자동측정
 망에서는 56종의 오염물질 각각에 대한 보정, 검출한계, 재
 현성 평가 등의 정도관리를 수행해 오고 있는 등, 상대적으
 로 측정자료에 대한 신뢰도 향상을 위한 정도관리를 수행
 하고 있다.

부산광역시 악취자동측정망의 정도관리 결과를 Table 2에
 나타내었다. Table 2에 따르면 부산광역시 악취자동측정망의
 정도관리 결과는 현재 측정망의 정도관리 기준에 적합한 것
 으로 나타났으며, 감전동 및 장림동의 재현성 평가결과는 각
 각 15% 이내 및 14% 이내로 나타나 25% 이내를 만족해야
 한다는 기준을 충족시키고 있는 것으로 나타났다. 본 연구에
 서 VOCs자동측정망이 정상 가동된 2006년부터 2009년까지
 의 4년간의 데이터를 사용하여 계절별 항목별 특성을 도출
 하였으며 VOCs는 대단히 반응성이 큰 물질로서 강한 자외
 선과 OH 반응기가 존재하면 2차 오염물질로 전환하는 반응
 이 활발히 일어나, 물질보전을 가정하는 PMF 모델의 결과와

Table 1. The analytical conditions of automatic thermal desorber (ATD)/GC for VOCs

GC Conditions		FID Conditions		TD Conditions	
Dual Column	BP1(50 m×0.32 mm×5 μm) PLOT(50 m×0.32 mm×5 μm)	Detector temp.	250℃	Sampling flow (Adsorption)	50 mL/min
Column flow	2.0 mL/min	Flow rate	Air = 300 mL/min	Sampling temp (Adsorption)	-20℃
Initial temp.	45℃	(mL/min)	H ₂ = 30.0 mL/min	Desorption temp.	300℃
Final temp.	200℃	Carrier gas	He (18.8 psi)	Desorption time	15 min
Initial time	15 min	Sampling time : 20 min		Desorption flow	20 mL/min
Final time	5 min	(Volume : 1 L)		Split Ratio	10:1
Ramp rate	4℃/min	Analysis time : 57.8 min		Adsorbent	Tenax-TA 60/80 m

Table 2. QA/QC result for VOCs in VOCs monitoring station

Compound	Process	Criterion	Results
The temperature of monitoring station	Temperature was taken monitoring station	10~25℃	25℃
Maintenance condition of measuring instrument	Manual	Manual	Regularity
Maintenance condition of sample tube	Manual	Manual	Regularity
Blank test of system	Background check of system by high purity's helium which is added moisture	The sum of total peak ≤ 2 ppb	The sum of total peak = 0
Linearity of instrument	(5, 10, 20 ppb) Multiple Calibration	R ² ≥ 0.995	Propane : 0.998 Benzene : 0.997
Separation capacity of instrument	The middle of measuring line	Separation capacity	56
Accuracy Precision	Residence time of each compound by standard divided concentration and Accuracy and Precision identification of Propane and Benzene	RT ≤ ±0.5	RT ≤ ±0.03
		%Recovery: 80-120%	Propane : 113.3% Benzene : 89.5%
		Precision (RSD%) ≤ 25%	Precision (RSD%) ≤ 15%
MDL	Expected MDL to measure seventh (1 ppb and below)	MDL = 3.14 × SD SD: standard deviation MDL ≤ 2 ppbc	Propane : 1.218 ppb Benzene : 0.060 ppb

* Research Institute of Public Health and Environment

차이가 존재할 수 있게 된다. 따라서 낮은 혼합고와 적은 일사량을 가지며, OH 반응기의 농도가 낮아 2차 오염물질로 변하는 반응이 활발히 일어나지 않는 겨울철(2007년) 데이터를 이용 감전동지역에 대한 VOCs 배출원을 규명하고자 하였다.

2.2. 측정 지점의 특성

본 연구에서 사용되는 자료를 측정하고 있는 VOCs 자동 측정망과 환경부에서 관리중에 있는 광화학측정망의 위치를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에 의하면 감전동 약취자동측정망의 경우 사상공업지역 내에 위치하고 있고, 중·소규모 공장과 주거지역이 혼재한 감전동 주민자치센터 옥상에 설치되어 있으며 서북서 방향으로 남해고속도로와 인접해 있기 때문에 자동차의 영향을 클 것으로 예상되어지는 지점이며, 장림동의 경우는 북서방향에 장림공단, 서쪽방향으로 피혁단

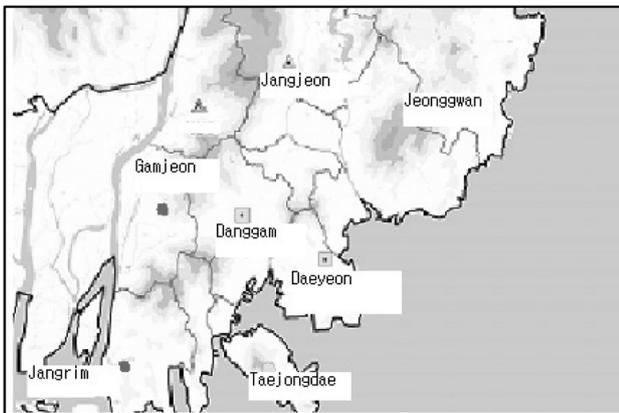


Fig. 1. The site of VOCs Automatic measurement.

지가 위치해 있고, 동쪽과 남동방향에는 아파트 등 대규모 주거지역이 있으며 북동쪽의 산지로 인해 북쪽방향 배출원의 영향이 적고, 서쪽, 서북쪽 및 동쪽의 배출원의 영향이 클 것으로 판단되는 지리 지형적인 특징을 갖고 있다. 부산광역시 대기환경개선실천계획 추진상황분석평가 보고서³⁾에 의하면, 부산광역시에 소재하고 있는 VOC 배출업소는 Table 3과 같다.

Table 3에 의하면, VOCs 자동측정망이 있는 사상구와 사하구의 VOC 배출 업소 수는 구청관할 업소(국가공단지역 제외지역의 배출업소들)가 각각 142개소 및 100개소로 나타났으며, 부산광역시에서 관할하는 업소 수(국가공단의 배출업소들)까지 포함되면 부산광역시 전체 VOC 배출업소의 약 40% 정도를 차지하고 있는 것으로 나타나는 등 VOCs 자동측정망이 설치된 지역인근의 VOCs 배출업소가 많이 산재하고 있음을 알 수 있다. Table 3에 정리된 부산광역시 소재 VOCs 배출업소를 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3을 살펴보면, 사상구와 사하구에 VOC 배출업소가 가장 많이 소재하고 있음을 알 수 있다. 또한 각 배출업소별 배출되는 VOCs 배출량을 산정하여 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에 의하면 VOCs 배출량이 연간 1000톤을 넘는 곳은 VOCs 자동측정망이 있는 사상구와 사하구 그리고 대형 선박도장업소들이 있는 영도구로 조사되었다.²⁾

이상의 결과로 보면, VOCs 자동측정망이 있는 사상구 감전동과 사하구 장림동은 국가공단 내에 위치하고 있어, 인근 지역에 소재하고 있는 공장의 영향을 많이 받을 것으로 예상되며, 특히 사상구 및 사하구에는 표면 코팅 및 세정작업이 빈번하게 이루어지는 기타제조업과 대규모 도장 작업이

Table 3. VOCs sources of Busan

Section	Refinery	Oil reservoir	Gas station	Laundry	S.P.	V.L.	A.M.	The others	W.S	Garage	Total
The district city			18		1			149	1	41	210
Junggu			4								4
Seogu			8							1	9
Yeongdo		2	9			16		4		8	39
Donggu			6							5	11
Busanjin				1						22	23
Dongnae			22							8	30
Namgu	1	2	32			1		8		20	64
Bukgu			28	1						6	35
Haeundae			27					1		20	48
Saha		2	29			9		19	1	40	100
Geumjeong			32					3		32	67
Gangseo			27				1				28
Yeonje			17							23	40
Suyeong			15							10	25
Sasang			46		2			37		57	142
Gijang			51					13		12	76
Total	1	6	371	2	3	26	1	234	2	305	951

S.P.- Solvent and paint manufactures, V.S.- Vessel and large size structure, A.M.- Automobile manufactures, W.S.- Waste storage facilities

* Research Institute of Public Health and Environment, 2004

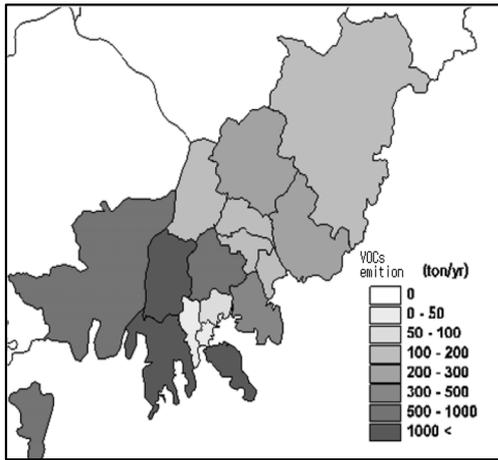


Fig. 2. The regional VOCs emission of Busan.

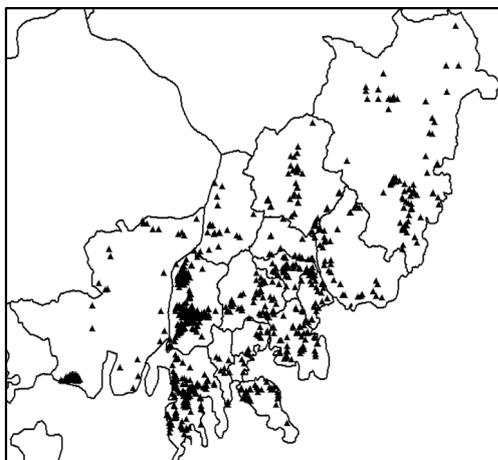


Fig. 3. Current Distribution Companies Busan VOC emissions.

이루어지는 선박 및 대형 철골구조물 제조업이 위치하고 있다. 따라서 VOCs 자동측정망에 영향을 미치는 영향배출원은 자동차 배기관 배출 및 주유소 등에서의 증발배출 이외에도 유기용매를 사용하는 세정공정과 제품에 표면을 코팅하거나 도장하는 공정의 영향을 많이 받을 것으로 예상된다. 특히 VOCs는 반응성이 크고 배출원들에서 배출된 오염물질들이 혼합되어 나타날 수 있기 때문에, 영향 배출원별 구분이 중요하며, 영향 배출원의 구분을 위해서는 현재 VOCs 자동측정망이 위치한 지역에 적합한 오염원 구성물질 성분비 자료의 개발이 필요하다. 국내 VOCs 배출원은 대기환경관리 정책을 수립하는데 기초 자료로 활용하기 위하여 개발된 CAPSS (Clean Air Policy Support System)의 분류방법에 따라 분류하고 있다. CAPSS의 분류에 따르면 VOCs를 배출하는 인

위적 배출원을 에너지산업연소, 비산업연소, 제조업연소, 생산공정, 에너지 수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 폐기물 처리로 구성되어 있다.

2007년도 우리나라의 VOCs 배출원별 배출량 기여도는 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에 따르면 우리나라의 배출원별 기여도는 유기용제 사용부문이 61.0%로 가장 높았고 그 뒤로 생산공정 16.1%, 도로이동오염원 10.9% 순으로 나타났다.⁴⁾

2007년도 우리나라의 VOCs 배출원별 배출량 기여도를 참고로 할 때 측정망이 위치한 사상구와 사하구 역시 유기용제 사용과 관련이 있는 주유소, 자동차 정비소등의 업체가 다수를 차지하는 것과 연관이 있다고 볼 수 있다.

3. 측정결과 및 고찰

3.1. VOCs 측정 결과

Table 4와 Table 5에 2008년 감전동과 장림동측정소에서 측정된 1년간 VOCs 자료 8400건에 대하여 VOCs 개별물질에 대한 검출빈도와 평균농도 측면에서의 순위를 나타내었다. 감전동 측정소는 평균농도 측면에서는 toluene이 11.02 ppb로서 가장 높았으며, 다음으로 propane (8.76 ppb), ethane (2.58 ppb), n-butane (2.47 ppb) 순으로 나타났다. 최근 환경부에서 2010년 1월 1일부터 국가대기환경기준물질로 benzene을 추가로 지정하였으며, benzene의 규제 농도를 5 µg/m³ (1.43 ppb)으로 설정하였다. Benzene은 국제암연구센터(IARC), 세계보건기구(WHO) 등에서 규정한 인간에게 확실한 발암성 물질로 분류되어 있으며, 발암성 이외에 중추신경쇠약, 피부 자극 뿐만 아니라, 대기 중의 오존(O₃) 형성을 증진시키는 등 환경과 인체의 두 가지 측면에서 관심이 되는 물질이다. 감전동지역에서 측정된 benzene의 평균농도는 0.55 ppb로 국가대기환경기준 보다 낮은 수준으로 나타났다. 전체 56개

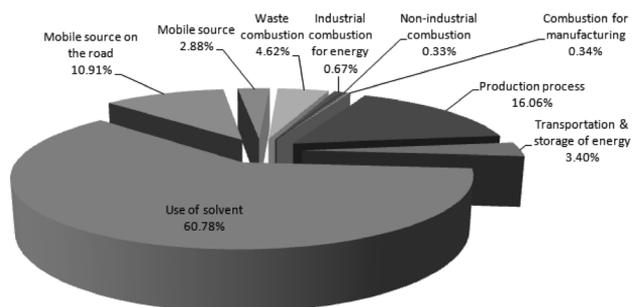


Fig. 4. The contribution ratio by VOCs emission source at 2007.

Table 4. Detection frequency and concentration of VOCs (Gamjeon)

Rank	VOCs	Frequency	Rank	VOCs	Concentration
1	Toluene	99.3	1	Toluene	11,022
2	n-Decane	99.2	2	Propane	8,763
3	n-Dodecane	99.2	3	Ethane	2,575
4	n-Undecane	98.3	4	n-Butane	2,473
5	n-Pentane	97.7	5	Acetylene	1,902

6	n-Nonane	97.6	6	Ethylbenzene	1.682
7	Ethylbenzene	96.5	7	Ethylene	1.409
8	Propane	96.4	8	isobutane	1.321
9	n-Butane	93.2	9	m/p-Xylene	1.296
10	m/p-Xylene	93.0	10	n-Pentane	0.887
11	Benzene	90.3	11	Methylcyclopentane	0.759
12	Ethane	86.9	12	n-Hexane	0.685
13	n-Hexane	86.3	13	o-Xylene	0.684
14	o-Xylene	84.7	14	Benzene	0.549
15	Acetylene	82.7	15	n-Decane	0.508
16	1,2,4-Trimethylbenzene	76.0	16	Isopentane	0.491
17	Ethylene	74.8	17	1,2,4-Trimethylbenzene	0.474
18	Methylcyclopentane	71.5	18	Propylene	0.380
19	o-Ethyltoluene	68.7	19	2-Methylpentane	0.359
20	2-Methylpentane	61.0	20	n-Nonane	0.347
21	n-Octane	53.6	21	n-Dodecane	0.340
22	Isopentane	49.8	22	n-Undecane	0.327
23	isobutane	42.0	23	Cyclopentane	0.263
24	n-Heptane	38.8	24	n-Heptane	0.195
25	3-Methylhexane	38.5	25	n-Octane	0.168
26	Cyclopentane	37.3	26	Styrene	0.158
27	Cyclohexane	37.2	27	Cyclohexane	0.149
28	1,3,5-Trimethylbenzene	36.0	28	3-Methylpentane	0.139
29	3-Methylpentane	34.6	29	3-Methylhexane	0.133
30	Isoprene	33.8	30	p-Ethyltoluene	0.113
31	trans-2-Butene	32.5	31	o-Ethyltoluene	0.110
32	cis-2-Butene	31.7	32	2,3-Dimethylbutane	0.107
33	Styrene	30.7	33	trans-2-Butene	0.105
34	2,3-Dimethylbutane	30.5	34	Isoprene	0.104
35	n-Propylbenzene	27.9	35	2-Methylhexane	0.103
36	p-Ethyltoluene	27.8	36	cis-2-Butene	0.095
37	1-Butene	27.1	37	1-Butene	0.091
38	1-Hexene	26.6	38	m-Ethyltoluene	0.091
39	trans-2-Pentene	21.4	39	1,3,5-Trimethylbenzene	0.078
40	1-Pentene	21.0	40	2,4-Dimethylpentane	0.071
41	p-Diethylbenzene	20.4	41	Methylcyclohexane	0.069
42	1,2,3-Trimethylbenzene	17.3	42	2,2,4-Trimethylpentane	0.061
43	m-Ethyltoluene	16.7	43	n-Propylbenzene	0.060
44	Methylcyclohexane	16.4	44	trans-2-Pentene	0.054
45	2-Methylhexane	15.7	45	p-Diethylbenzene	0.053
46	Propylene	14.1	46	1-Hexene	0.049
47	2,4-Dimethylpentane	14.0	47	1,2,3-Trimethylbenzene	0.046
48	2,2,4-Trimethylpentane	12.6	48	1-Pentene	0.041
49	m-Diethylbenzene	9.9	49	2,3-Dimethylpentane	0.036
50	2,3-Dimethylpentane	9.5	50	cis-2-Pentene	0.019
51	2-Methylheptane	8.6	51	2-Methylheptane	0.018
52	cis-2-Pentene	8.5	52	m-Diethylbenzene	0.015
53	2,2-Dimethylbutane	7.9	53	3-Methylheptane	0.013
54	3-Methylheptane	7.2	54	2,2-Dimethylbutane	0.013
55	Isopropylbenzene	6.8	55	Isopropylbenzene	0.008
56	2,3,4-Trimethylpentane	5.1	56	2,3,4-Trimethylpentane	0.003

Table 5. Detection frequency and concentration of VOCs (Jangrim)

Rank	VOCs	Frequency	Rank	VOCs	Concentration
1	Toluene	97.7	1	Toluene	11,212
2	m/p-Xylene	96.5	2	Propane	8,690
3	Ethylbenzene	95.4	3	Ethylbenzene	2,816
4	Propane	94.3	4	n-Butane	2,408
5	n-Nonane	93.3	5	Ethane	2,397
6	o-Xylene	93.0	6	Acetylene	2,209
7	n-Butane	90.0	7	m/p-Xylene	1,613
8	n-Decane	89.6	8	isobutane	1,392
9	n-Pentane	86.8	9	Ethylen	1,288
10	Benzene	81.8	10	n-Pentane	0,963
11	1,2,4-Trimethylbenzene	80.9	11	o-Xylene	0,896
12	Isopentane	74.9	12	Isopentane	0,880
13	n-Undecane	74.2	13	n-Hexane	0,676
14	Methylcyclopentane	67.4	14	Benzene	0,505
15	n-Hexane	66.3	15	Methylcyclopentane	0,469
16	Cyclopentane	65.1	16	1,2,4-Trimethylbenzene	0,389
17	Acetylene	64.7	17	Cyclopentane	0,341
18	n-Octane	64.0	18	n-Decane	0,324
19	o-Ethyltoluene	61.4	19	2-Methylpentane	0,315
20	isobutane	58.5	20	n-Nonane	0,286
21	Ethane	57.2	21	n-Octane	0,270
22	1-Butene	50.3	22	n-Heptane	0,247
23	trans-2-Pentene	49.7	23	2,3-Dimethylbutane	0,222
24	n-Heptane	49.0	24	m-Ethyltoluene	0,220
25	Ethylen	47.5	25	1-Hexene	0,199
26	2,3-Dimethylbutane	47.1	26	Isoprene	0,198
27	m-Ethyltoluene	45.7	27	Propylene	0,190
28	n-Propylbenzene	43.6	28	3-Methylpentane	0,186
29	2-Methylpentane	43.0	29	n-Undecane	0,164
30	trans-2-Butene	42.3	30	1-Butene	0,155
31	Cyclohexane	41.6	31	Styrene	0,148
32	1-Pentene	39.6	32	Cyclohexane	0,139
33	n-Dodecane	38.3	33	o-Ethyltoluene	0,137
34	3-Methylpentane	37.3	34	n-Dodecane	0,134
35	Isoprene	36.7	35	trans-2-Butene	0,126
36	1,3,5-Trimethylbenzene	36.5	36	trans-2-Pentene	0,115
37	cis-2-Butene	35.1	37	3-Methylhexane	0,103
38	1,2,3-Trimethylbenzene	31.8	38	2-Methylhexane	0,102
39	3-Methylhexane	31.5	39	Methylcyclohexane	0,102
40	Styrene	31.0	40	n-Propylbenzene	0,100
41	2,2-Dimethylbutane	28.9	41	1,3,5-Trimethylbenzene	0,095
42	cis-2-Pentene	27.2	42	cis-2-Butene	0,090
43	1-Hexene	22.0	43	2,2,4-Trimethylpentane	0,088
44	2-Methylhexane	21.4	44	1-Pentene	0,084
45	p-Ethyltoluene	20.8	45	1,2,3-Trimethylbenzene	0,077
46	Methylcyclohexane	20.7	46	p-Ethyltoluene	0,067
47	2,2,4-Trimethylpentane	17.7	47	3-Methylheptane	0,056
48	m-Diethylbenzene	15.6	48	cis-2-Pentene	0,055
49	3-Methylheptane	15.1	49	2-Methylheptane	0,048

50	2,4-Dimethylpentane	13,8	50	2,4-Dimethylpentane	0,045
51	2-Methylheptane	13,4	51	m-Diethylbenzene	0,043
52	Isopropylbenzene	12,0	52	2,2-Dimethylbutane	0,043
53	p-Diethylbenzene	9,2	53	2,3-Dimethylpentane	0,034
54	2,3-Dimethylpentane	8,8	54	p-Diethylbenzene	0,026
55	Propylene	8,7	55	Isopropylbenzene	0,023
56	2,3,4-Trimethylpentane	1,8	56	2,3,4-Trimethylpentane	0,004

의 물질 중 36개의 물질의 평균농도가 0.1 ppb 이상으로 나타났으며, 20개의 물질의 평균농도가 0.1 ppb 이하로 비교적 낮은 VOC 농도 분포를 보이고 있다. VOC 중 WHO에서 발암성 물질로 분류한 benzene의 경우 검출빈도가 90.3%로 높은 검출율을 보였다. 장림동 측정소는 평균농도 측면에서는 toluene이 11.21 ppb로서 가장 높았으며, 다음으로 propane (8.69 ppb), ethylbenzene (2.82 ppb) 순으로 나타났다. 장림동 지역에서 측정된 benzene의 평균농도는 0.51 ppb로 국가대기 환경기준보다 낮은 수준으로 나타났다. 전체 56개의 물질 중 41개의 물질의 평균농도가 0.1 ppb 이상으로 나타났으며, 16개의 물질의 평균농도가 0.1 ppb 이하로 비교적 낮은 VOC 농도 분포를 보이고 있다. VOC 중 WHO에서 발암성 물질로 분류한 benzene의 경우 검출빈도가 81.8%로 높은 검출율을 보였다. 지역구분 없이 감전·장림지역 전체를

하나의 표본으로 볼 때 toluene의 경우 전체 시료에서 99% 이상의 검출빈도를 보여 감전, 장림지역 대기 중 상존하는 물질인 것으로 나타났다. 특히, toluene은 유기용제로 많이 사용될 뿐만 아니라, 페인트 등 도료와 자동차 배기가스 등에서도 배출되므로 대기 중에 상존하는 대표적인 VOC 중의 하나이다. 다음으로 m/p-xylene, ethylbenzene, benzene이 90% 이상의 시료에서 검출되었으며, n-hexane이 80%의 검출빈도를 나타내었다. 전체 56종의 물질 중 22종의 물질이 50% 이상의 검출빈도를 보였으며, 10% 이하의 검출빈도를 나타낸 물질이 9종이었다.

3.1.1. 월별 계절별 변화 추이

Fig. 5는 VOCs 중 주요대기오염물질에 대한 최근 4년간의 월별 평균농도 변화 추이를 나타낸 그림이다. 장림동에서

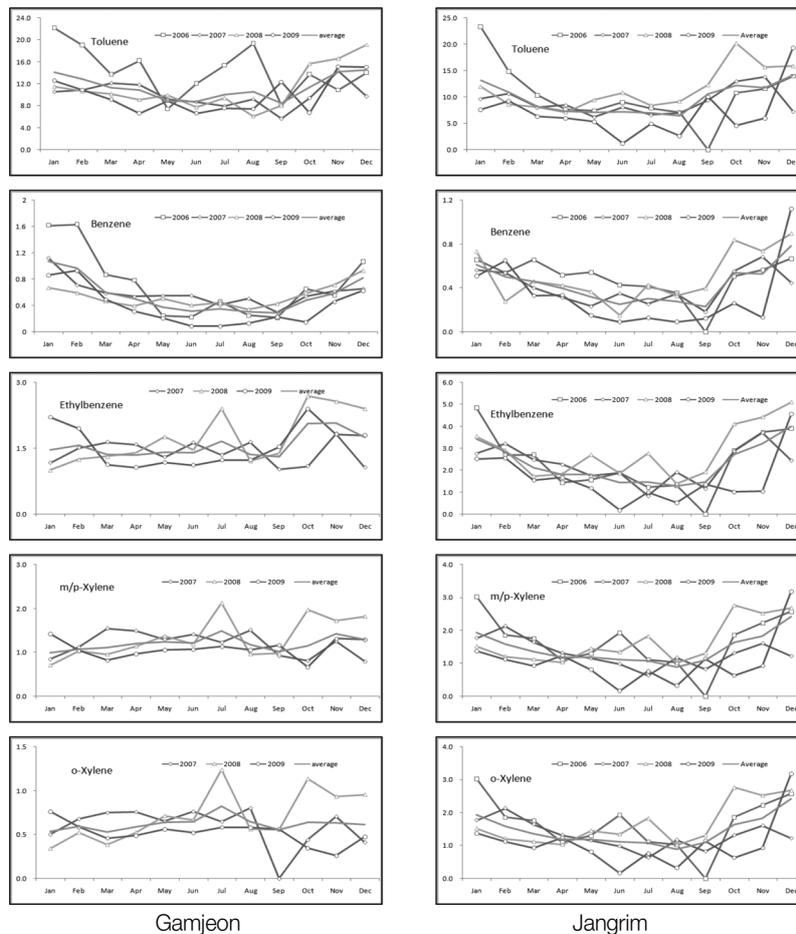


Fig. 5. The monthly variation in each year of VOCs (for 4 years).

는 5개 항목 모두 겨울철이 여름철보다 다소 높은 월평균 농도를 나타내고 있으나 감전동에서는 toluene과 benzene을 제외한 물질들은 계절적 변화를 거의 나타내지 않는 것으로 조사되었다. 4년간의 월별 변화 양상을 보면 각 물질마다 거의 비슷한 변동 패턴을 그리고 있으며 특히 장림동에서는 물질들의 월별 패턴이 유사한 것으로 조사되어 동일한 배출원에서 기인된 BTEX물질들임을 유추할 수 있다. 감전동에서는 toluene과 benzene의 3년간의 변화 패턴이 비슷하게 나왔으며 ethylbenzene과 xylene의 변동 패턴이 같은 모습을 나타내어 배출원이 동일하지 않은 것으로 유추되어진다. 이는 감전동에 산재해 있는 업체들이 장림동 보다 다양한 양상을 띠는 것에 그 원인을 찾을 수 있을 것이다. 계절적 농도의 원인은 주로 혼합고의 변화와 온도, VOCs 배출량의 증가에 의한 것으로 추정된다. 일반적인 대기오염물질의 계절적인 농도특성은 동고하저 혹은 하고동저와 같은 뚜렷한 계절유형을 나타내는데 비해 VOCs의 농도분포는 그다지 뚜렷한 계절 유형을 나타 내지는 않으며, 항목에 따라 계절변동 양상이 서로 다르게 나타난다.⁵⁾ 따라서 VOCs의 경우 다양한 배출원에서의 서로 다른 배출강도 및 대기 중에서의 광화학 반응성, 국지기상요인 등 매우 복잡한 요인에 따라 농도가 결정되고 있어 다른 오염물질에 비해 그 거동양상을 명확히 파악하기가 매우 어려운 오염물질이다.

3.1.2. 요일별, 시간대별 농도 변화

VOCs 등의 1차 대기오염물질의 일변화는 배출량 및 대기혼합고, 풍속, 풍향 등의 변화에 의해 좌우된다. VOCs 일변화를 파악하기 위해서 2개 측정소에서 측정된 측정치를 각

요일별 시간대별로 평균을 구하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 POCP (Photochemical Ozone Creation Potential) 평가에서 기여도가 가장 높은 Toluene의 요일별 일변화를 나타내었다. 시간대별 VOCs 농도 특성은 출근시간인 6시 이후 증가를 하여 8시에서 10시 사이에 최고농도를 보인 후 점심시간으로 인하여 조업이 일시 정지되는 12시에는 최저 농도를 나타내었다. 배출시설이 재가동되는 13시 이후 다시 농도가 상승하기 시작하여 퇴근시간인 18~20시에 고 농도를 나타내었다. 일요일은 Toluene의 농도가 현저하게 낮게 측정되었으며 시간대별 변화가 나타나지 않았다.

3.1.3. 국내 타지역 VOCs 농도와와의 비교

VOCs의 오염원은 매우 다양하며 지역특성에 따라 물질별로 다른 농도 분포를 나타낸다. 감전동과 장림동의 VOCs 농도 수준을 국가 광화학 측정망이 상시 가동 중인 타 지역 자료와 비교하여 그 오염의 정도를 평가하고자 하였다.

국가 광화학 측정망의 측정조건 및 분석방법, 정도관리는 부산의 VOCs 자동측정망과 같은 시스템으로 운영되므로 자료의 조건은 동일한 것으로 간주 하였다. Table 6에 풍하 방향으로 오존 전구물질의 배출량이 최대인 지역에 위치한 2형 측정소인 인천 구월동과 부천 심곡동의 중흥동측정소, 부산의 당감동 측정소의 데이터를 비교하였다.⁶⁾ 여수시, 순천시, 광양시를 포함한 광양·여천 권역은 휘발성유기화합물질을 배출하는 산업단지가 위치하여 있고 고농도 오존발생이 빈번하여 오존주의보의 발령이 잦은 지역이다. 중흥동측정소는 남쪽에 광양제철의 연관단지 및 광양만이 위치해 있어 VOCs의 영향을 많이 받는 곳으로 추측되어진다. 그 외 지역은 주거단지로서 감전동과 장림동과 비교 시 낮은 농도

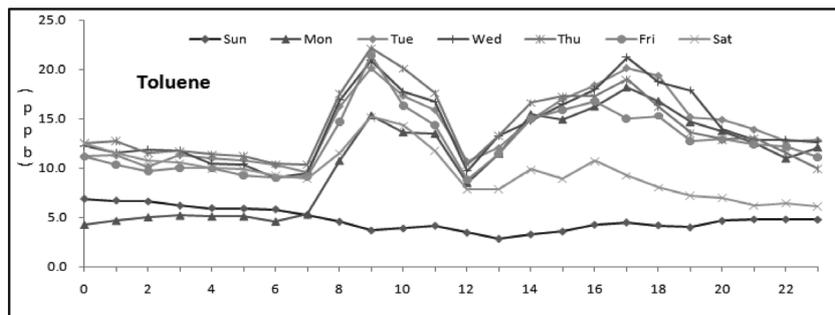


Fig. 6. Day of the week and hourly variation of VOCs (for 4 years) (Gamjeon).

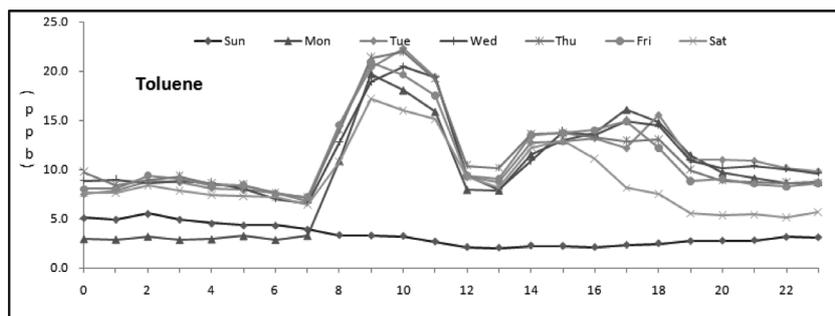


Fig. 7. Day of the week and hourly variation of VOCs (for 4 years) (Janglim).

Table 6. VOCs of PAMS (photochemical assessment monitoring stations) (unit: ppb)

VOCs	Busan (2008)		PAMS ⁶⁾			
	Gamjeon	Jangrim	Danggam (Busan)	Guwol (Inchun)	Simgog (Buchun)	Jungheung (Yeosu)
Toluene	11.0	11.2	5.7	6.1	7.3	28.1
Propane	8.8	8.7	5.4	5.7	5.8	4.7
n-Butane	2.5	2.4	2.5	3.1	3.7	2.1
Acetylene	1.9	2.2	0.9	0.7	3.3	0.8
Ethylbenzene	1.7	2.8	0.7	0.8	0.9	0.5
m/p-Xylene	1.3	1.6	0.9	1.0	1.1	0.6
o-Xylene	0.7	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3
Benzene	0.5	0.5	0.4	0.6	0.5	1.5
1,2,4-Trimethylbenzene	0.5	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1
1,3,5-Trimethylbenzene	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0

를 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 국내의 VOCs 측정 결과를 요약하면, 전반적으로 산단지역이 농도가 높게 나타났고 벤젠은 산단지역의 영향을 받는 여수시 중흥동을 제외하고는 1.5ppb 이하의 농도를 보였으며 톨루엔은 측정된 VOCs 전체 농도에 대한 기여율이 40~80%의 범위에 있어 방향족 탄화수소중에서 배출강도가 높음을 알 수 있었다.

3.2. PMF 모델의 적용

본 연구에서는 부산광역시 소재 감전동에 위치한 악취 및 VOCs 자동측정망의 겨울철 VOCs 측정자료를 활용하여 PMF 모델에 적용함으로써 수용점에 영향을 미칠 수 있는 배출원을 파악하고 기여도를 정량화 하고자 하였다. 분석물질은 감전동 VOCs 자동측정망에서 상시 측정하고 있는 56종중 검출한계 이하값과 결측치를 제외한 자료의 유효율이 30% 이상인 물질 41종과 석유류 배출원의 중요한 추적물질인 isopentane를 최종적으로 분석물질로 선택하였다. 자료의 도표화와 통계적인 방법을 사용하여, 자료의 전반적인 흐름에서 벗어나 있는 측정값을 이상치로 확인하고 PMF 모델에 적용시킴으로서 이상치를 판단하였다. PMF 모델에 적용하기 위해 Polissar⁷⁾이 제안한 측정농도와 오차추정 방법에 따라 농도 파일과 불확실도 파일을 구성하였으며 신호잡음비(S/N)를 이용하여 분석물질들의 불확실도를 보정하였다. 2007년 12월과 2008년 1~2월까지 VOCs의 1시간 농도 자료를 이용하여 요인분석을 수행하고, PMF 모델 결과를 다중회귀분석을 통해 실제 단위를 가지는 오염원 분류표와 기여도를 도출하였으며, 객관성이 있는 오염원 확인을 위해 참고문헌과 EPA SPECIATE 4.2 프로그램을 이용하여 연구대상지역의 오염원을 분류하였다.⁸⁾ 이상의 연구내용과 방법을 통하여 부산광역시 연구대상 지역의 겨울철 VOCs 농도에 영향을 미치는 배출원의 종류와 기여정도를 분석·규명하였으며, 더 나아가 자동측정망 자료를 활용하여 PMF 모델을 수행할 경우 기본적인 자료를 제시함으로써, 향후 효과적인 VOCs 관리 대책 수립에 있어서 유용한 기초 자료가 될 수 있도록 하였다. PMF 모델을 적용함에 있어 모델의 제한과 한계점을 충분히 고려하고, 장점을 최대한 이끌어내어 연구목적에 부합

되는 결과를 도출하기 위해서는 합당한 수행체계가 필요하다. 먼저 모델 수행이전에 모델 입력 자료의 자료질 평가가 선행되어야 하고, 다음으로 모델의 수행에 있어서 최적요인을 찾기 위한 노력이 수반되어야 한다. 최종적으로 모델 수행결과로 도출되는 각 요인들에 대한 정성적, 정량적 확인절차와 도출된 요인들에 대한 해석과 검증까지 이루어져야 모델링 결과의 신뢰도가 높아지게 된다. 본 연구에서는 부산광역시 소재 감전동에 위치한 악취 및 VOCs 자동측정망의 2008년 겨울철 VOCs 측정자료를 활용하여 PMF⁹⁻¹³⁾ 모델에 적용함으로써 수용점에 영향을 미칠 수 있는 배출원을 파악하고 기여도를 정량화 하고자 하였다.

3.3. PMF 모델을 이용한 배출원 규명

객관성이 있는 오염원 확인을 위하여 각종 문헌과 EPA SPECIATE 4.2 프로그램을 이용하여 연구대상지역의 오염원을 분류한 결과 첫 번째 오염원은 경유, 휘발유차량 배기가스(EPA profile 2491, 2505)로 확인되었다. Toluene, propane, n-butane, n-pentane, ethane, ethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, xylene 등이 주로 기여를 하였으며 n-decane과 n-undecane 등의 존재는 경유와 휘발유차량이 같이 존재하는 것을 의미한다. 이는 감전동 지역이 서북서 방향으로 남해고속도로와 인접해 있고 남쪽으로는 동서고가도로와 인접해 있기 때문에 차량의 통행이 많았던 것으로 예상된다. 두 번째 오염원은 LPG 차량(EPA profile 1001, 2444, 2445)으로 확인이 되었다. LPG에는 일반적으로 ethane과 propane 등이 주로 기여를 하며, LPG Vehicle의 연료에는 propane의 함량이 높아 propane의 기여도가 높은 것으로 추정된다.¹²⁾ 이는 CNG버스와 LPG차량에서 영향을 받은 것으로 생각되어진다. 세 번째 오염원은 유기용제(EPA profile 1016)로 확인되었다. 이 오염원은 EPA profile과 toluene, ethylbenzene, m/p-xylene, n-nonane, n-decane, n-undecane, n-heptane 등 많은 부분이 일치하였다. 일반적으로 도장용 페인트에서 주로 배출되는 유기용제의 경우 Toluene의 비율이 80% 이상으로 높으며, n-nonane과 1,2,4-trimethylbenzene 등의 고분자 물질이 많이 배출되는 것으로 미루어 보아 유기용제로 추정되어진다. 네 번째 오염원은 ethane, n-butane,

n-pentane, n-hexene, isopentane, benzene 등이 주로 기여하는 것으로 조사되어 난방 연소로 분류하였다(EPA profile 1, 2, 3, 4). 감전동 측정망 인근지역은 산업시설이 밀집된 사상공업단지와 주택지역이 위치하고 있어 난방을 위한 LNG와 Oil 등의 소비에 의한 계절적인 영향이 있을 것으로 판단되어 진다. 다섯 번째 오염원은 enamel과 primer에 기인한 표면코팅(EPA profile 1018, 1019)으로 확인되었다. Enamel은 일명 oil paint라고 하며, 철재 및 목재 등에 칠하는 페인트로서 추적물질로 toluene, n-heptane, cyclohexane, ethylbenzene, xylene, trimethylbenzene 등이 사용되었다. Primer는 본 도장이 아닌 임시로 칠판이 녹스는 것을 방지하기 위해 바르는 초벌제로서 추적물

질은 toluene, 2,4-dimethylpentane, ethylbenzene, n-heptane, xylene, nonane 등이 사용되었다. 여섯 번째 오염원은 isoprene 이 크게 기여하는 것으로 나타나 자연적 배출원으로 오염원을 분류하였다. 일곱 번째 오염원은 압축기의 윤활유와 세탁(EPA profile 1064, 1193)으로 확인되었다. 윤활유의 추적물질로서 ethane, propane, benzene, n-pentane 등이 사용되었으며, toluene은 적은 기여도 물질의 추적자로 사용하였다. 또한 세탁시설의 추적물질로서 n-decane, n-undecane, n-nonane, trimethylbenzene, ethylbenzene 등이 사용되었다.

본 연구에서는 감전동 악취측정망의 1 hr 농도데이터를 이용하여 Table 7과 같이 각 오염원의 정량적 기여도를 추정하

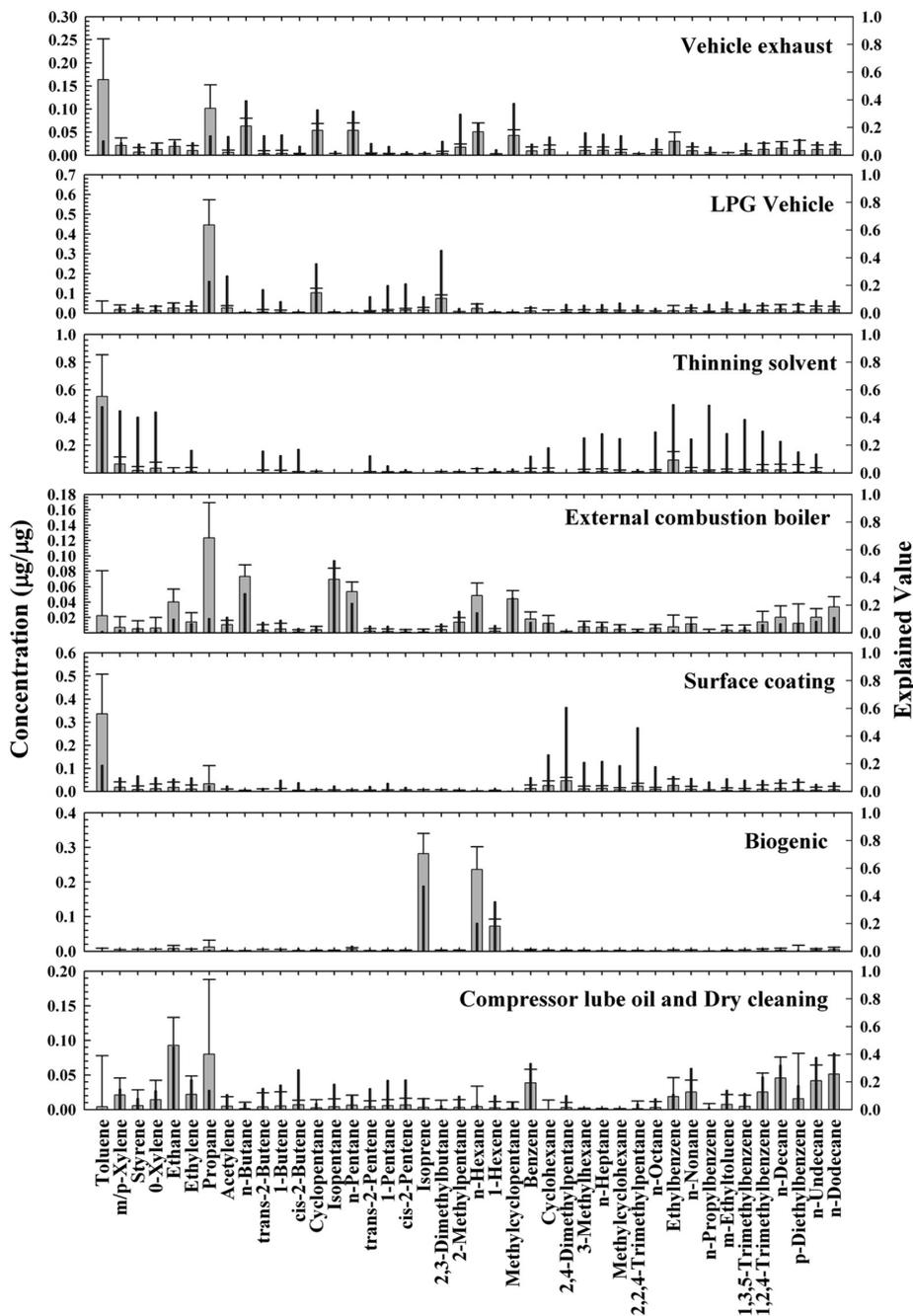


Fig. 8. Chemical compositions of factors (source profiles) for VOCs using the PMF model.

Table 7. Source contribution of VOCs

	Source contribution	
	%	µg/m ³
LPG Vehicle	10.15	17.27
Thinning solvent	29.83	50.76
External combustion boiler	7.11	12.10
Surface Coating	17.13	29.15
Biogenic	6.61	11.24
Industrial	13.95	23.74
Vehicle exhaust	15.22	25.90
Total	100.00	170.16

Table 8. Comparison for source contribution of previous studies and this study

contribution(%)	This study	Na ¹⁶⁾	Bong ¹⁷⁾	Han ¹⁵⁾	Emission inventory		
	Gamjeon	Seoul	seoul	Seoul	Incheon	Seoul	Gyeonggi
Vehicle exhaust	15.22	51.3	48	28.5	11.84	29.68	14.43
LPG	10.15	4.5	2.3	3.85	1.45	4.59	0.83
Petroleum vapor	-	7.2	15.2	2.69	2.76	4.14	-
Asphalt	-	-	-	-	-	-	3.72
Solvent	29.83	35.6	-	-	4.37	10.6	5.21
Coating	17.13	-	17.3	21.8	31.9	35.7	37.3
Lube oil/Dry cleaning	13.95	-	-	-	-	-	-
Dry cleaning	-	-	-	-	2.02	5.52	2.42
Energy consumption	7.11	1.4	15.1	17	26.95	1.04	3.59
Open burning	-	-	-	-	-	-	-
Biogenic	6.61	-	-	0.43	3.28	0.78	17.76

^a Clean air policy support system (CAPSS), 2003

^b Na (2000); ambient data were averaged for all day of summer season of Seoul.

^c Bong (2003); ambient samples were collected at 09:00-11:00 in the middle of summer in Seoul.

^d Han (2005); ambient data were averaged for all day from June 2002 to March 2003 at 7 sites of PAMS in Seoul metropolitan area.

였다. 유기용제와 표면코팅이 각각 29.83% (50.76 µg/m³)와 17.13% (29.15 µg/m³)로 가장 큰 기여도를 나타내었다. 이는 감전동은 많은 제조업 공장과 자동차 정비시설이 위치하고 있으며 특히 유기용제 및 페인트 제조공장이 위치하고 있어 산업공정에 따른 많은 유기용제 사용과 코팅공정이 영향을 미친 것으로 생각되어 진다. 또한 Table 7과 같이 선행연구 결과와 배출원 목록표(Emission inventory)를 보면 유기용제 및 코팅에 의한 VOCs의 기여도가 높은 것으로 분석되어져 있는데, 이러한 결과는 본 연구의 결과와 잘 일치한다.¹³⁾ 차량 배기가스는 15.22% (25.90 µg/m³)의 기여도를 나타내었다. 감전동 지역은 동서고가도로가 관통하고 있어 많은 화물차 및 승용차의 출입이 빈번한 곳이다. 또한 북서쪽으로 남해고속도로와 인접해 있어 북서풍의 영향을 받을 경우 많은 영향을 미칠 수 있다고 판단되어 진다. 압축유탄유와 세탁 오염원은 13.95% (23.74 µg/m³)의 기여도를 나타내었으며 압축유탄유와 세탁시설의 드라이 크리닝의 영향을 받는 것으로 판단되어 진다. 다음으로는 LPG 차량 10.15% (17.27 µg/m³), 난방 연소 7.11% (12.10 µg/m³), 자연적 배출원 6.61% (11.24 µg/m³) 순으로 나타났다. LPG 차량은 현재 부산시에서 모든 시내버스를 CNG 버스로 교체할 계획에 있고, LPG 차량

또한 계속 증가 추세에 있어 총 VOCs에서 LPG 차량의 기여도는 증가할 것으로 판단된다. 자연적 배출원은 가장 낮은 기여도를 나타내었다. 이는 일반적으로 여름에 비해 겨울에는 낮은 기여도를 가지는 biogenic의 특성이 나타난 것으로 판단되어 진다.

4. 결론

1) 시간대별 VOCs 농도 특성은 출근시간인 6시 이후 증가를 하여 8시에서 10시 사이에 최고농도를 보인 후 강한 일사량과 활발한 대류현상으로 인하여 12시에는 최저 농도를 나타내었다. 배출시설이 재가동되는 13시 이후 다시 농도가 상승하기 시작하여 퇴근시간인 18~20시에 고농도를 나타내었다.

2) VOCs 자동측정망이 있는 사상구 감전동과 사하구 장림동은 국가 공단 내에 위치하고 있어, 인근 지역에 소재하고 있는 공장의 영향을 많이 받은 것으로 조사되었다. 특히 사상구 및 사하구에는 표면 코팅 및 세정작업이 빈번하게 이루어지는 기타제조업과 대규모 도장 작업이 이루어지는

선박 및 대형 철골구조물 제조업이 위치하고 있음에 따라 용매 사용량이 타 지역과 비교해 월등히 높아 toluene을 비롯한 BTEX의 농도가 높은 것으로 조사되었다. 이는 시간대별, VOCs 농도 변동 그래프에서 작업시간대, 출퇴근 시간에 높은 농도를 나타내는 것에서 유추 할 수 있으며, 요일별 변동에서도 주말의 농도가 확연히 낮아지는 것으로도 유추할 수 있다.

3) 감전동 지역에 영향을 줄 수 있는 배출원 및 그 배출원의 기여도를 추정하기 위하여 PMF 모델을 수행한 결과 최적의 배출원 수를 7개로 분류할 수 있었다. 분류된 배출원과 그 기여도는 유기용제(29.83%), 표면 코팅(17.13%), 차량 배기가스(15.22%), 압축기의 윤활유와 세탁시설(13.95%), LPG 차량(15.22%), 난방연소(7.11%) 및 자연적 배출원(6.61%)로 나타났다. 특히 유기용제와 표면코팅이 가장 큰 기여도를 나타내었는데 이는 감전동에 위치한 많은 제조공장과 자동차 정비시설의 영향, 그리고 유기용제 및 페인트 제조공장의 영향에 기인한 것으로 판단되어 진다.

사 사

이 연구는 2008학년도 경성대학교 연구년 지원에 의하여 수행되었음.

KSEE

참고문헌

1. 대도시 오존오염의 근원적인 저감대책 수립 추진방안 마련 최종보고서, 환경부(2001).
2. 정장표, “부산지역의 휘발성유기화합물 측정자료를 이용한 발생원 추정 및 자료 평가 기법 개발 연구,” 부산지역환경 기술개발센터, 25~27(2007).
3. 부산광역시 대기환경개선실천계획 추진상황분석평가 보고서(2005).
4. 대기오염물질 배출량 연보(2007), 국립환경과학원(2009).
5. 백성욱, 김성렬, 김배갑, “도시 대기 중 휘발성 유기화합물의 농도변동 및 영향인자,” 대한환경공학회지, **24**(8), 1391~1404(2002).
6. 대기환경연보(부록), 국립환경과학원(2009).
7. A. V. Polissar, P. K. Hopke, W. C. Malm. and J. F. Sisle, “Spatial and seasonal variations of atmospheric aerosol concentration in Alaska,” *J. Aerosol Sci.*, **26**, S589~S590(1995).
8. EPA, EPA PMF 1.1 User's Guide, EPA(2005).
9. Pentti, Paatero, Philip, K. Hopke, Xin-Hua, Song, Ziad, Ramadan, “Understanding and controlling rotations in factor analytic models, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,” **60**, 253~264(2002).
10. Pentti, Paatero, Philip K. Hopke, “Discarding or downweighting high-noise variables in factor analytic models,” *Analytica Chimica*, **490**, 277~289(2003).
11. Pentti Paatero, “User's Guide for Positive Matrix Factorization programs PMF2 and PMF3,” *Part1: tutorial*(2007).
12. Pentti Paatero, “User's Guide for Positive Matrix Factorization programs PMF2 and PMF3,” *Part2: reference*(2007).
13. Pentti Paatero, “Unto Tapper, Positive Matrix Factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values,” *Environmetrics*, **5**, 111~126(1994).
14. 한진석, 홍유덕, 신선아, 이상욱, 이석조, “수용모델(CMB)을 이용한 수도권 VOCs의 배출원별 기여율 추정,” 환경영향평가, **14**(4), 227~235(2005).
15. 한지석, 문광주, 김록호, 신선아, 홍유덕, 정일록, “PMF를 이용한 수도권지역 VOCs의 배출원 추정,” 한국대기환경학회지, **22**(1), 85~97(2006).
16. 나광삼, Characteristic of atmospheric volatile organic compound in Seoul, measurement and chemical mass balance receptor modeling(2000).
17. 봉춘근, 윤중섭, 황인조, 김창년, 김동술, “서울지역에서의 VOCs 오염원 기여도 추정에 관한 연구,” 한국대기환경학회지, **19**(4), 387~396(2003).