

완주지역의 VOCs 배출특성에 따른 공단지역과 일반지역의 기여도 분석

VOCs Emission Characteristics and Mass Contribution Analysis at Wanju Industrial Area

김 득 수^{1)*} · 양 고 수 · 박 비 오

¹⁾군산대학교 토목환경공학부 환경공학전공,

전북대학교 화공환경공학부 환경공학전공

(2008년 6월 10일 접수, 2008년 9월 30일 채택)

Deug-Soo Kim^{1)*}, Gosoo Yang and Bio Park

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Kunsan National University,*

Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

(Received 10 June 2008, accepted 30 September 2008)

Abstract

Concentrations of volatile organic compounds (VOCs) measured from the local industrial sources in Wanju industrial complex during June 2007~January 2008. The samples were collected from the primary sources (6 emission points) in 4 major factories in Wanju industrial complex as well as two general sources in Wanju County to elucidate the abundances of speciated VOCs and their spacial and temporal distributions depending on source bases. Industrial sources are as follows; fabricated metal manufacture, motor vehicle manufacture, rubber and plastic manufacture, and chemical manufacture factories. Two general source samples were collected from gasoline gas station and dry cleaning shop in urban area. In order to understand the near source influence at receptor, samples from the two receptor sites (one is at center of the industrial complex and the other site is at distance residential area downwind from the center) were collected with sample canister, and analyzed by using GC/MSD. The concentrations from different sources were compared and discussed. The mass contributions of the speciated VOCs to total VOCs measured from industrial sources and ambient air at two receptors were presented and discussed.

Key words : VOCs mass contribution, Volatile organic compounds, Source emission, Source apportionment, Industrial complex

1. 서 론

인체 유해물질 및 오존 전구물질로 관심이 집중되고 있는 휘발성유기화합물 (VOCs: volatile organic

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)63-469-4764, E-mail : dskim@kunsan.ac.kr

compounds)은 공업단지에 위치한 사업장 배출시설과 차량배출을 포함한 도시지역에 산재한 일반배출원들로부터의 발생량이 점차로 증가하는 추세에 있다(김선태 등, 2007; 한진석 등, 2006; 전준민 등, 2005, 2003; 백성욱 등, 2002; Na and Kim, 2001; Doskey *et al.*, 1999; 김영성, 1999). 수도권대기질 개선을 목적으로 오존농도 저감과 관련하여 대기 중 VOCs 농도를 효과적으로 제어할 수 있는 방안 마련에 관심이 고조됨에 따라 수도권을 중심으로 VOCs 오염원들의 특성을 파악하고, 수송모델에 의한 기여도를 추정하는 연구가 수행되어 오고 있으나(봉춘근 등, 2003) 사용모델의 적용 제한성과 함께 VOCs의 광화학적 특성, 배출원 정보 부족 등으로 아직도 많은 불확실성이 존재하고 있다(한진석 등, 2006). 특히 도시와 더불어 배출시설들이 밀집되어 있는 공업단지가 인접해 있는 경우, 사업장 원료 사용과 제품생산 공정, 부산물 및 폐수처리, 소각 공정 등으로부터 여러 형태의 VOCs 물질이 다양한 수준으로 배출되고 있어 공단 특성과 계절요인 등이 VOCs 배출 특성에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다. 주거지와 인접한 도심인근에 위치한 전주공단의 경우 인근 주거지역 대기환경농도와 비교연구에서 공단 풍하 측 수용지점에서의 환경 농도의 계절적 변동과 함께 사업장 배출이 일정부분 환경대기 중 농도에 기여하고 있는 것으로 보고되었다(김득수 등, 2007).

다양한 배출원을 갖는 VOCs의 효율적 관리를 위해서는 발생원, 발생량 등의 배출정보와 특성을 이해하는 것 또한 매우 중요하다. 이번 연구에서는 완주공단 내 사업장 중 주요업종인 자동차 및 트레일러 제조업, 금속가공제품 제조업, 화합물 및 화학제품 제조업, 고무제품 및 플라스틱제품 제조업의 배출원과 도심에 산재한 일반 VOCs 배출원 중 일부 주요 배출원(세탁소, 주유소)의 배출구에서 VOCs의 정성, 정량 조사를 수행하였다. 한편 주 풍향 측 선상에 수용지점으로서 공단 내 중심지역과 풍하 측 인근 주거지역의 대기환경 조사(24시간 연속)를 계절별로 수행하여 계절변화에 따른 대기환경 중 VOCs 성분별 농도변화를 조사하고, 측정된 배출원별 VOCs 성분과 배출량과의 영향을 분석하였다. 측정된 공단지역과 인근 주거지역의 대기환경 측정결과를 사업장과 일반 배출원의 배출총량에 대한 질량비로 산출된 연평균 기여도와 비교 분석되었다.

2. 연구 방법

2.1 공단 내 사업장 및 일반 배출원 VOCs 측정

완주 공업단지는 약 3,359천 m² 규모로 79개의 입주업체가 있으며, 주요업종으로는 자동차 및 트레일러 제조업 34개 업체, 금속가공제품 제조업 8개 업체, 화합물 및 화학제품 제조업 8개 업체, 1차 금속제조업 7개 업체, 기타 기계 및 장비제조업 6개 업체, 고무제품 및 플라스틱 제품 제조업 5개 업체, 그 외 기타 제조업 11개 업체로 구성되어 있어 유사한 규모의 타 공단에 비하여 업종의 수가 적다. 완주공단 내에 위치한 업체들의 업종 분류는 표준산업 분류코드(통계청 고시 제2007-53호)에 의해 반월공단의 유사연구(임문순 등, 2006)에 따라 분류하였다. 대상 배출원은 측정 단지 내의 주요 업종인 자동차 및 트레일러 제조업(C30), 금속가공제품 제조업(C25), 화합물 및 화학제품 제조업(C20), 고무제품 및 플라스틱제품 제조업(C22)의 4개 업종을 대상으로 하였다. 각 업종별 대표업체 선정은 업종별로 유사 생산업체를 분류하여 가장 많은 유사 생산업체 중 가능한 규모가 큰 업체를 대상으로 하였다. 완주공단의 특징은 현대자동차의 협력업체가 대부분으로 동일업종의 업체들이 유사한 원료 및 생산품을 사용하고 공정도 유사하여 대표업체의 선정에는 큰 어려움이 없었다. 그러나 대부분이 중소기업형태 사업장으로 실측자료 공개에 따른 부담으로 측정의 협조가 어려웠으나, 일부 환경친화기업 사업장들의 협조가 있어 대표성 있는 업체를 선정할 수 있었다.

선정된 사업장 내 주요 배출원으로 예상되는 1~2 곳을 선정하여 계절특성(warm season: 여름, cold season: 겨울)별로 배출구로부터 직접 시료를 채취(총 4개 업소에서 6지점 시료측정)하였다. 계절특성별 시료 채취 과정 중 일부 업체의 시료 채취 거부가 있어, warm season과 cold season의 측정 위치 또는 측정 지점수가 업종별로 동일하게 수행되지 못하였다. 인근 주거지역의 경우 주요 배출원인 주유소, 세탁소 중 대표 업체 각 1곳씩을 임의로 선정하여 계절 특성별로 시료채취 후 VOCs의 성분별 농도를 측정하였다.

시료채취를 위해서는 시료 손실을 최소화하기 위해 내부 벽면을 실리카로 코팅 처리한 6리터 부피의

Table 1. Sampling sites information for source emission.

Season	Manufacturing	Site I.D.	Source	Number of Sampling	Products	Remark
Warm season	Rubber and plastic manufacture (1)	Vi-1a	Manufacturing	1	Plastic film	Located in the south from the industrial center
	Fabricated metal manufacture (2)	Vi-2a	Manufacturing	1	Other treatment and coating of metals	Located in the east from the industrial center
		Vi-2b	Stack	1		
	Motor vehicles manufacture (2)	Vi-3a	Manufacturing 1	1	Parts and accessories for motor engines	Located in the west from the industrial center
		Vi-3b	Manufacturing 2	1		
	Chemical manufacture (1)	Vi-4a	Stack	1	Chemical manufacture	Located in the west from the industrial center
	Gas station (1)	Vg-1	Near gasoline pump	1	-	Located in the south from the industrial center
Dry cleaning (1)	Vg-2	Cleaning	1	-	Located in the north from the industrial center	
Cold season	Rubber and plastic manufacture (2)	Vi-1a	Manufacturing	1	Plastic film	Located in the south from the industrial center
		Vi-1b	Stack	1		
	Fabricated metal manufacture (1)	Vi-2a	Stack	1	Other treatment and coating of metals	Located in the east from the industrial center
	Motor vehicles manufacture (1)	Vi-3a	Manufacturing	1	Parts and accessories for motor engines	Located in the west from the industrial center
	Chemical manufacture (2)	Vi-4a	Stack	1	Chemical manufacture	Located in the west from the industrial center
		Vi-4b	Stack	1		
	Gas station (1)	Vg-1	Near gasoline pump	1	-	Located in the south from the industrial center
Dry cleaning (1)	Vg-2	Cleaning	1	-	Located in the north from the industrial center	

Note: Vi and Vg denote industrial and residential source point, respectively. () indicates number of sampling point.

Table 2. Receptor sites information for ambient VOCs sampling.

Sampling area	Site	Location	Number of sampling days	Sampling point	Remark
Industrial park	Vr-1	Center of industrial complex	12 days (3 for June; 3 for August 3 for November; 3 for January)	Roof at the top of office building	-
Residential area	Vr-2	Downwind residential area	12 days (3 for June; 3 for August 3 for November; 3 for January)	Roof at the top of APT administrative offices	Located in the north from the industrial center (downwind)

Note: Vr denotes receptor site for ambient VOC sampling.

canister를 사용하였다. 공단과 주거지 주요 배출원에서의 시료채취는 순간채취방법으로 2007년 6월~2008년 1월 사이로 계절적 변화를 고려하여 2~3일 동안 수행하였으며, 배출원 측정에 따른 시료채취 정보를 표 1에 제시하였다.

2.2 공단 배출원 VOCs의 영향평가를 위한 수용지점

공단배출에 의한 영향을 비교평가하기 위해 공단

중심 지역 한 곳과 주 풍하 측에 위치한 외부 한 곳을 수용지점으로 하여 대기환경 중 VOCs 농도를 측정하였다. 시료는 canister를 이용하여 24시간 동안 일정유량으로 흡입하는 연속채취 방법을 사용하였다. 공단 내부 수용지점은 공단 중앙에 위치한 자동차제품제조업의 사무실 옥상에서 수행하였으며, 공단 외부 수용지점의 측정지점은 최근 10년간의 풍향분석 결과에 따라 공단 경계지점으로부터 약 1km 정도 주 풍하 측에 위치한 아파트 관리사무소 옥상에서

수행하였다. 측정지점과 그 세부사항들에 대한 정보는 표 2에 나타내었다.

2.3 시료채취 방법

시료채취 방법은 미국 환경청 TO-14 method (U.S. EPA, 2004, 1997)를 따라 6리터 내부용적의 stainless steel canister를 사용하여 채취하였다. 흡인유량을 일정하게 조절할 수 있도록 하는 유량조절 장치가 canister에 장착되어 있으며, 60 psi까지 시료를 가압 채취할 수 있다. 시료가스를 채취 사용한 후에는 초고순도의 질소기체를 canister에 주입 및 배기과정을 6회 이상 반복하여 세척하였고 세척 시 3차 중류수를 첨가하여 canister 내부의 극성 불순물이 세척될 수 있도록 하였다. 세정된 canister는 분석 시스템에 연결하고 바탕시험을 통하여 세정의 정도를 확인하였다.

실제 현장시료 채취 시에는 대기공정시험법에 의거하여 주위 건물 등이 밀집되었을 경우, 건물 밖으로부터 최소한 1.5 m 이상 떨어진 곳을 선택하였으며, 시료채취 높이는 1.5~2.0 m 범위에서 부근의 평균오염도를 나타낼 수 있는 장소를 선정하여 수행하였다. 공단 내의 사업장 중 고무 및 플라스틱제품 제조업체는 플라스틱 필름 제조공정과 공정 후 배출구에서 시료를 채취하였으며, 금속가공제품 제조업은 금속가공 공정과 공정 후 배출구에서, 자동차제품제조업은 도장 공정 중에, 화학제품제조업은 제조 공정과 공정 후 배출구에서 시료 채취를 시행하였다. 일반지역의 시료채취 경우, 주유소는 주유 중에, 세탁소는 세탁 공정 중에 시료 채취를 시행하였다.

공단 내의 사업장과 일반지역 배출원의 시료채취는 canister의 유량조절장치를 이용하여 일정유량으로 약 10분간 시료를 흡입하였으며, 공단 VOCs 배출에 의한 영향과 기여도 평가를 위한 2곳의 수용지점 대기환경에서의 시료 채취는 24시간 동안 시료를 일정량으로 흡입할 수 있도록 하여 계절별로 연속 3일간 실시하였다.

2.4 분석 방법 및 VOCs의 정도관리

시료분석을 위해서는 canister에 포집된 시료를 pre-concentrator에 의해 일정량을 흡착시킨 후 농축된 대기 중의 샘플을 탈착시켜, cryo-focusing module을 통해 가스크로마토그래피 (Agilent GC 6890N)로

Table 3. Information of sample canister and GC/MSD operating condition for target VOCs analysis.

Canister	- SILONITE (Fused silica, 6 L)
Pre-concentrator	- Tenex & Glass bead Trap (Cryo: -150, Desorb: 20°C)
	- Tenex Trap (Cryo: -10°C, Desorb: 180°C)
	- Focuser (Cryo: -160°C, Desorb: 80°C)
GC/MSD	- Column: HP-1 capillary column (60 m × 0.32 mm × 5 μm)
	- Column temp.: 50°C (5 min) → 80°C (5 min) → 220°C (20 min)
	- Ramp rate: 5°C/min to 220°C
	- Column flow: 1.8 mL/min

주입하여 질량분석기 (Agilent MSD 5973N)를 사용하여 분석하였다. 분석 시 사용한 검출기는 FID (flame ionization detector)이었으며, 시료 분석을 위해 사용된 pre-concentrator와 GC/MSD의 분석 조건을 표 3에 나타내었다.

분석된 VOCs 성분들의 정량분석 결과의 정도관리를 위해서 오존 생성과 연관된 광화학평가 측정망의 집중측정에 포함되는 성분들로 구성된 Supelco사의 40개 성분물질이 혼합되어 있는 TO-14 표준기체를 사용하였다. 각 주요물질의 검량선 작성을 위해서는 표준물질 농도 1 ppm의 표준시료를 dynamic diluter (Entech, 4600A)를 사용하여 1 ppb, 10 ppb, 100 ppb 농도로 각각 희석하여 성분별 직선성을 확인하였다. 주요 VOCs 물질인 BTEX (benzene, toluene, ethyl benzene, xylene)의 경우 농도와 피크면적 사이의 상관성(r^2)은 각각 1, 0.999, 0.998, 0.994로 매우 높게 나타났으며, 그 외의 성분들에서도 0.990 이상의 상관성을 보였다. 그 외에도 분석결과의 정밀성을 위해 반복하여 분석하였으며, 대부분의 경우에서 RSD (relative standard deviation)값이 5% 미만으로 비교적 양호하게 나타나 물질분석결과의 신뢰성을 기대할 수 있었다.

3. 결과 및 논의

3.1 공단 내의 사업장 배출원 조사 결과

표 4는 완주 공단 내 주요 사업장에서 수행된 비교적 따뜻한 계절 중인 8, 9월 (warm season, 편의상 여름철로 사용)과 추운 계절 중인 1월 (cold season,

Table 4. VOCs measured in ppb at source sampling sites in Wanju industrial park during warm and cold season.

Species	(unit in ppb)											
	Rubber and plastic			Fabricated metal			Motor vehicles			Chemical		
	Vi-1a		Vi-1b	Vi-2a		Vi-2b	Vi-3a		Vi-3b	Vi-4a		Vi-4b
Season	Warm	Cold	Cold	Warm	Warm	Cold	Warm	Cold	Warm	Warm	Cold	Cold
chloromethane	0.54	15.3	19.2	0.42	9.60	1.11	0.40	0.69	0.75	tr.	0.90	1.00
freon-11	tr.	0.22	1.27	n.d.	n.d.	tr.	n.d.	tr.	n.d.	n.d.	tr.	n.d.
methylene chloride	n.d.	n.d.	7.74	64.1	107	15.0	0.84	2.12	1.62	n.d.	n.d.	tr.
chloroform	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.79	1.05	n.d.	tr.	n.d.	n.d.	n.d.
1,2-dichloroethane	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	44.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1,1,1-trichloroethane	4.84	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.84	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
benzene	1.04	0.88	1.76	1.06	0.96	8.12	1.44	1.68	2.37	80.0	1.74	tr.
trichloroethylene	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	31.8
toluene	1.83	3.11	6.76	89.0	146	1153	14.3	10.6	9.58	988	34.5	49.0
ethylbenzene	n.d.	1.8	2.42	57.2	54.4	538	16.2	2.13	11.0	217	19.1	19.8
p-xylene	1.76	2.10	2.91	339	220	401	10.4	2.07	6.35	174	17.4	17.2
styrene	n.d.	tr.	4.23	tr.	1.07	6.46	0.70	n.d.	1.22	70.9	16.1	1,179
o-xylene	n.d.	2.05	2.86	180	133	550	6.41	2.01	4.01	96.4	19.4	n.d.
1,3,5-trimethylbenzene	n.d.	1.88	2.15	14.0	12.2	n.d.	2.63	1.92	1.64	n.d.	n.d.	n.d.
1,2,4-trimethylbenzene	n.d.	2.66	3.80	41.9	33.1	n.d.	5.06	2.44	1.06	239	25.3	2.04
n-butane	2.27	6.63	3.31	n.d.	n.d.	tr.	tr.	tr.	tr.	n.d.	n.d.	n.d.
n-hexane	n.d.	5.27	1.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	12.3	41.9	59.5	787	718	2,732	59.5	25.3	39.6	1,865	134	1,295.84

*n.d.: not detected, tr.: traceable

편의상 겨울철로 사용)의 사업장 배출원 조사 결과 성분물질별 농도(ppb)를 나타낸 것으로 검출된 성분만을 대상으로 제시하였다. 사업장의 배출원에서의 시료 채취 특성상 작업조건과 대상 공정의 차이 등으로 측정시기와 측정지점에 따라 검출성분과 농도에 차이가 나타날 수 있으나, 사업장의 경우 대표되는 공정에서 채취된 시료 분석결과에 따른 제한으로 그 변화요인을 고려할 수 없는 한계가 있었다. 분석 항목은 총 39종의 VOCs 물질이 분석되었으나 이 중에서 21종의 물질은 검출한계 이하 수준(traceable) 또는 불검출(not detected)로 판독되었으며, 동종의 사업장에서는 일반적으로 동일한 성분들이 검출되기는 하였으나 그 양에는 다소 차이가 있었다.

표 4의 결과를 살펴보면 플라스틱 제조업의 주요 배출원에서 측정된 주요 VOCs는 두 측정계절에서 chloromethane, benzene, toluene, p-xylene, n-butane이 모두 일정량 검출되었으며, 그 외에 freon-11, 1,1,1-trichloroethane, ethylbenzene, o-xylene, 1,3,5-trimethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, n-hexane 성분들은 각기 한 계절에서만 검출되었다. 특히, 겨울철 배출시료 중 VOC 총량이 여름철 시료 중 총량에 비해

3배 가까이 높게 나타나 계절적으로 차이를 보였다. 플라스틱제품 제조시설은 범퍼, tupperware, 필름, 절연용구성품, 식기, 포장용기 및 주방용품 등 플라스틱 재료를 성형, 압출 후 재단과 조립을 거쳐 다양한 제품을 생산하는 시설들이 포함된다. 플라스틱 제조공정을 살펴보면 주로 monomer원료를 중합(polymerization)하여 PVC 또는 pellet타입의 paste수지 등을 만들어 제품을 제조하는 공정의 재료로 사용하며, 플라스틱제조업의 연간 주요 대기오염물질 배출량 통계(환경부, 2007)에 의하면 주요 배출물질로는 톨루엔, 메틸에틸케톤, 메틸알코올 등이 주를 이루고 있다.

금속가공제품 제조업에서의 휘발성 유기화합물의 배출 가능 공정은 주로 저장, 이송 운반, 혼합, 반송, 탈지세정, 분리정제, 기계가공, 포장검사, 용제회수, 기타공정이다. 금속가공제품 제조업의 경우에는 첨가제의 사용이 많은 열처리 공정이나, 제품의 도장 공정에서 VOCs의 발생이 많을 것으로 예상된다. 금속제품제조업의 경우는 대표되는 공정과 배출원에서 각각 시료를 채취하여 분석하였다. 배출총량은 배출원에서 측정된 시료의 VOC총량(3,450 ppb)이 공정

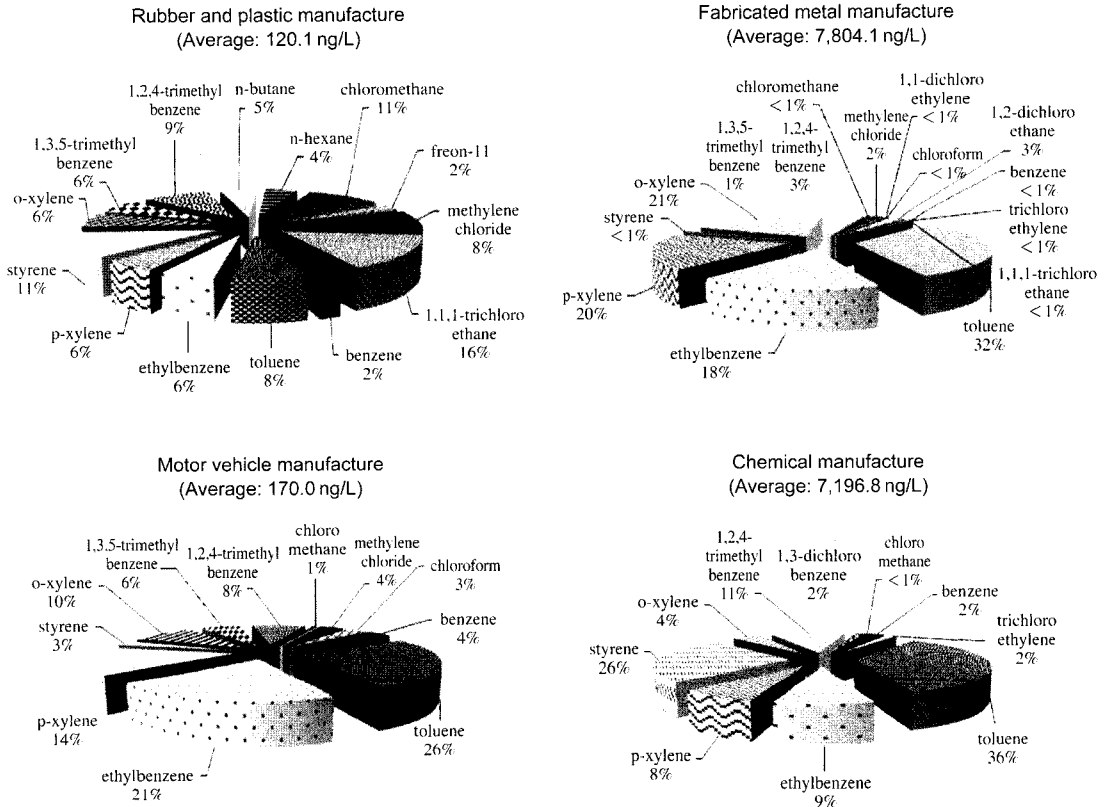


Fig. 1. Average mass contributions of species to total VOCs from industrial source samples.

상에서 측정된 결과(846 ppb)에 비해 매우 높게 나타났다. 결과적으로 배출구에서의 농도가 상대적으로 높은 것을 보여주었다. 금속가공제품 제조업과 유사한 제조업인 조립금속제품의 기존 VOCs 연구결과(임문순 등, 2006)에서는 평균 총 VOC가 4,353 ppb로 본 연구 결과에 비하여 높은 수준을 보여 주었으나, 주요 검출 물질이 toluene과 ethylbenzene으로 유사한 검출 항목 및 농도 범위(warm season)를 보여 주었다. 배출원과 공정에서의 계절에 따른 변화는 배출원에서는 59.5(겨울)~787 ppb(여름) 수준으로 나타났으며, 공정에서 채취된 시료분석 농도 결과는 718(여름)~2,732 ppb(겨울) 수준으로 나타나 비교적 변동이 심한 것으로 나타나 대표적인 배출자료 확보를 위해서는 대상 사업장에서의 지속적인 모니터링의 중요성이 강조되어야 할 것이다. 검출된 주요 VOCs의 질량기여율에 의하면 평균적으로 톨루엔, o-xylene, p-xylene, 에틸벤젠이 VOC 총질량의 32%, 21%, 20%,

18% 순으로 나타나 전체의 90% 이상을 차지하였다(그림 1). 이들 주요 성분들의 농도는 대부분이 고농도 수준으로 나타났으며, 특히 겨울철 배출원에서 톨루엔이 약 1.15 ppm 수준으로 검출되어 주요 배출원의 공정 관리 또는 개선이 요구된다.

자동차제품 제조업에서의 배출은 수세과정과 도금을 위한 산세척 및 피막과정, 도장 등의 공정에서 주로 발생된다. 시료채취는 이들 공정 중 도장 공정에서 이루어 졌으며, 자동차제품의 주요 VOCs 배출물질 질량기여율로는 평균적으로 톨루엔(26%), 에틸벤젠(21%), p-xylene(14%), o-xylene(10%)의 순으로 나타났다. 그 외의 물질들로는 1,2,4-trimethylbenzene, 1,3,5-trimethylbenzene, methylene chloride, styrene 등으로 검출되었다. 기존의 여수 석유화학 단지 내 도장 공정에서의 배출 물질 질량 기여율 조사(전준민 등, 2005)에서도 톨루엔(30%), o-xylene(1.89%), ethylbenzene(17.5%), p-xylene(12.92%)로 본 연구 결과

와 유사한 항목 및 질량 기여율을 보여주었다. 표 4에 제시된 분석결과에 의하면 공정별 차이와 함께 계절에 따른 배출량변화도 함께 나타남을 보였다.

화학제품 제조업에서의 배출 가능 공정은 저장, 이송 운반, 혼합, 반응, 탈지세정, 분리정제, 기계가공, 포장검사, 용제 회수, 기타공정 등이다. 일반적인 화학제품제조업의 경우 제조시설에서는 대부분의 공정 및 배관 설비 등에서 발생량이 많으며, 특히 원료 등의 이송을 위한 이송설비의 처리과정에서 발생한다. 또 폐수 처리 시 개방된 시설이나 저장 탱크에서 이루어지기 때문에 폐수처리장에서 배출되는 VOC는 공정배수구, 유수분리기, 폐수처리조의 표면에서 증발되어 발생하거나, 폭기조나 용존 공기 부상 시스템과 같이 공기와 폐수가 급격히 접촉하는 처리공정에서 대기배출 가능성이 있다. 시료채취는 사업장 내 제조공정 1개, 배출구 1개 지점을 선정하여 수행되었다. 조사결과, 검출된 주요 VOCs는 톨루엔, 자일렌, 벤젠 등이었으며, 질량기여율은 톨루엔 (36%), styrene (26%), 1,2,4-trimethylbenzene (1%), ethylbenzene (9%), p-xylene (8%), o-xylene (4%) 순으로 나타났다. 특히 겨울철에 톨루엔이 약 1 ppm 수준으로 검출되어 주요 배출원의 적절한 관리가 요구되었다. 화학제품의 경우는 동종업종인 경우에도 생산되는 제품 및 원료에 따라 배출성분과 농도가 상이할 수 있어 화학제품 제조에서의 배출량 및 항목을 비교하기에는 어려움이 따를 수 있다.

그림 1은 각 업종 및 계절별 발생하는 부피 농도를 CMB수용모델의 입력 자료로 활용되는 source profile 도출을 위한 중량농도로 산출한 후 연평균(여름과 겨울평균)하여 중량 기여도를 비교한 결과이다. 조사된 각 업종별 평균 중량농도와 VOCs 성분들 중 가장 높은 중량기여를 나타낸 성분은 플라스틱제품 제조업의 경우 120.1 ng/L의 배출총량과 1,1,1-trichloroethane의 16%기여율이었고, 금속가공제품 제조업 배출총량은 7,804.1 ng/L, toluene의 32%기여율이었다. 자동차제품 제조업은 배출총량 170.0 ng/L, toluene (26%), 그리고 화학제품 제조업은 7,196.8 ng/L, toluene (36%)를 각각 나타내었다.

3. 2 일반지역 배출원 조사 결과

공단 외 일반지역에 위치한 주요 일반배출원(주유소와 세탁소)으로부터 측정된 VOCs의 성분별 농도

Table 5. VOCs concentrations in ppb at the general source sampling sites in urban area of Wanju.

(unit in ppb)

Species	Warm season		Cold season	
	Vg-1 (gas station)	Vg-2 (dry cleaning)	Vg-1 (gas station)	Vg-2 (dry cleaning)
chloromethane	2.65	0.24	1.64	1.25
freon-11	n.d.	n.d.	tr.	0.32
methylene chloride	1.01	n.d.	1.79	20.35
chloroform	n.d.	0.89	n.d.	0.77
benzene	1.13	0.59	2.23	1.84
toluene	5.04	9.32	10.20	21.88
chlorobenzene	n.d.	n.d.	n.d.	7.05
ethylbenzene	2.41	2.35	2.47	3.98
p-xylene	2.33	2.34	2.41	3.96
styrene	1.72	3.52	0.48	1.67
o-xylene	2.31	n.d.	2.17	n.d.
1,3,5-trimethylbenzene	2.02	1.95	2.00	2.15
1,2,4-trimethylbenzene	3.17	n.d.	2.77	n.d.
n-butane	2.77	2.79	3.42	5.29
n-hexane	4.92	n.d.	5.22	n.d.
Total	31.48	23.99	36.8	70.51

*n.d.: not detected, tr.: traceable

분석 결과를 표 5에 제시하였다. 일반배출원 자료는 수용모델에 의한 수용점에서의 배출기여도 평가를 위한 목적으로 조사되었다. 공단 외 일반 지역 소재 배출원의 경우 사업장배출원에 비해 검출된 성분이 적었으며, VOC총량은 24~70 ppb 수준으로 사업장 배출량에 비해 현저히 낮았고 그 변화 폭도 작게 나타났다. 이러한 측정결과는 일반지역에 소재한 사업장의 경우는 공단 지역과는 달리 인근에 다른 주요 배출시설들이 밀집되어 있지 않음으로 해서 특정 배출원들에 의해 나타나는 오염물 가중으로 인한 영향이 거의 없고, 사업장 배출시설들과는 달리 배출되는 공간이 비교적 오염 가능성이 적은 외기와의 혼합(mixing)이 가능한 열린 공간이기 때문으로 사료된다.

주유소에서 측정된 주요 VOCs 물질로는 톨루엔, 벤젠류 (benzene, ethylbenzene, 1,3,5-trimethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene), n-hexane, xylene, styrene 등이 주로 검출되었으며, 계절에 큰 차이 없이(여름 32 ppb; 겨울 37 ppb) 검출된 항목 및 배출농도가 유사한 형태를 보여주었다. 세탁소의 경우 역시 톨루엔,

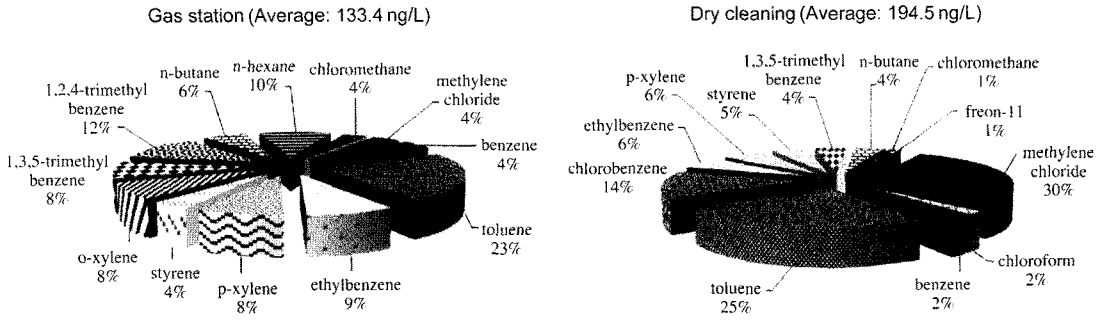


Fig. 2. Average mass contributions of species to total VOCs from general source samples.

벤젠류와 자일렌이 주요 물질로 검출되었고, methylene chloride와 chlorobenzene이 또한 주요 VOCs 성분으로 검출되었다. 세탁소의 경우, 특히 겨울철 측정 시 염소화합물인 methylene chloride (20.35 ppb)가 비교적 고농도로 검출되었으며, 이는 세탁소 클리닝 공정에서 염소화합물을 세척제로 사용하기 때문으로 나타난 결과일 것으로 사료된다.

그림 2는 공단 외 지역의 일반배출원으로 선정된 주유소와 세탁소의 배출농도를 source profile 도출을 위한 중량농도로 산출한 후 평균하여 성분별 중량기여율을 제시한 결과이다. 주유소의 경우 연간 평균 배출량이 133.4 ng/L이었으며, toluene이 23%, 1,2,4-trimethylbenzene이 12%, ethylbenzene이 9%, 1,3,5-trimethylbenzene과 o,p-xylene이 8%의 기여율 순으로 검출되었고, 세탁소는 주유소에서 보다 다소 높아 배출총량은 194.5 ng/L였으며, 세탁소 주요 공정 특성에 따른 결과로 methylene chloride가 30%기여를 나타냈고, 이어서 톨루엔과 벤젠류의 순서로 나타났다. 기존 여수 석유화학 단지 내 gasoline vapor에서의 배출 물질 질량 기여율 조사(전준민 등, 2005)에서도 톨루엔 (39.37%), 1,2,4-trimethylbenzene (26.95%), 1,3,5-trimethylbenzene (8.72%), o-xylene (5.55%)로 유사한 항목 및 질량 기여율 순을 보여주었다.

3.3 수용지점 농도 및 질량 분포

표 6은 대상지역의 공단사업장 VOCs 배출에 따른 영향을 평가하기 위해 공단을 기준으로 한 주풍향측상에 위치한 공단 내 중심지점과 풍하 측 공단 외 인근지점을 수용지점으로 선정하여 환경대기 시료 중 농도조사 결과(24시간 연속 샘플링)를 요약한 것

으로, warm season과 cold season에 속한 측정월 중에 3일간 측정된 결과이다. 공단 내 지역에서 측정된 주요 VOCs 물질로는 chloromethane, methylene chloride, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, styrene, 1,3,5-trimethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, n-butane 등으로 검출되었다. 공단 주변 지역의 경우도 chloromethane, methylene chloride, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, styrene, 1,3,5-trimethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, n-butane 등으로 공단 내 지역과 유사한 물질로 검출되었다. 공단 내 지역의 수용지점과 공단 주변지역 수용지점의 검출 항목은 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene) 위주로 대부분이 유사한 성분구성을 보여주고 있었지만, 측정농도 크기는 공단 내 지역대기에서의 농도가 공단 주변지역의 농도에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 한편 1차(6월), 3차(11월), 4차(1월) 측정 결과에서 공단 내 지역에 비하여 공단 외 지역에서의 methylene chloride 농도가 더 높은 것으로 검출되었다. 공단 내 대상 금속제품 제조업과 플라스틱 제품제조업의 주요 배출원에서도 methylene chloride가 일부 검출되었으나, 공단 외 지역에서 더 높은 농도를 나타내는 결과는 공단 외 수용지점과 비교적 근접한 지역의 일반배출원(주로 세탁소)으로 인한 영향이 가중된 것으로 추정된다.

그림 3은 공단지역 내 중심과 공단 외 수용지점에서 측정된 계절별 대기 중 부피농도를 중량농도로 산출한 후 평균하여 도시한 결과이다. 공단지역 내 수용지점에서의 총 VOC 농도는 158.3 ng/L로 공단 외 수용지점의 농도인 84.8 ng/L보다 상대적으로 높게 나타났으며, 가장 높은 분포를 나타낸 성분은 톨

Table 6. VOCs concentrations in ppb at receptor sampling sites.

(a) Warm season

(unit in ppb)

Species	June, 2007						August, 2007					
	Vr-1 (center of industrial park)			Vr-2 (downwind residential area)			Vr-1 (center of industrial park)			Vr-2 (downwind residential area)		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
chloromethane	0.66	0.76	3.73	0.75	0.63	0.94	0.49	1.57	1.74	0.28	0.43	0.36
methylene chloride	tr.	tr.	tr.	tr.	2.52	2.56	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
benzene	1.31	tr.	1.49	0.98	0.75	0.97	1.25	1.04	0.65	tr.	tr.	1.02
toluene	24.74	1.67	6.38	5.27	2.01	2.41	18.7	9.98	37.8	1.83	1.56	6
ethylbenzene	5.74	1.81	2.78	2.6	2.02	2.31	6.94	3.16	4.95	tr.	1.91	3.07
p-xylene	7.68	1.84	2.09	2.86	1.94	1.98	8.96	5.52	10.78	1.76	1.78	2.95
styrene	1.14	tr.	0.41	2.1	0.6	tr.	0.76	0.74	0.88	n.d.	n.d.	n.d.
1,1,2,2-tetrachloroethane	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
o-xylene	4.80	1.85	2.46	2.48	1.92	1.94	5.74	3.82	6.69	n.d.	n.d.	2.5
1,3,5-trimethylbenzene	2.38	tr.	tr.	1.97	tr.	n.d.	2.53	2.31	2.31	n.d.	n.d.	n.d.
1,2,4-trimethylbenzene	4.69	tr.	tr.	2.79	tr.	2.54	5.2	4.29	4.75	n.d.	n.d.	2.74
1,3-dichlorobenzene	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1,4-dichlorobenzene	2.88	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1,2-dichlorobenzene	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
n-butane	2.04	n.d.	n.d.	2.57	2.32	2.48	tr.	2.31	2.43	2.27	2.34	2.38
n-hexane	5.37	n.d.	n.d.	tr.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
cyclohexane	n.d.	n.d.	n.d.	1.38	n.d.	n.d.	1.16	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	63.43	7.93	19.34	25.75	14.71	18.13	51.73	34.74	72.98	6.14	8.02	21.02

(b) Cold season

Species	November, 2007						January, 2008					
	Vr-1 (center of industrial park)			Vr-2 (downwind residential area)			Vr-1 (center of industrial park)			Vr-2 (downwind residential area)		
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd
chloromethane	0.50	1.37	1.63	0.39	1.57	1.14	0.73	2.66	0.6	1.09	1.11	1.17
methylene chloride	tr.	1.19	0.86	tr.	0.71	10.02	n.d.	2.5	n.d.	11.2	n.d.	1.33
benzene	0.92	3.31	2.35	0.65	3.11	1.92	1.26	1.48	1.96	1.55	1.28	1.33
toluene	1.75	5.53	2.96	3.57	4.49	2.31	5.64	5.86	3.65	2.55	8.45	3.75
ethylbenzene	1.80	2.46	3.03	1.90	2.32	2.20	2.15	2.25	1.91	1.99	2.21	3.02
p-xylene	1.81	2.35	3.26	1.84	2.47	2.19	2.2	2.46	1.84	1.93	2.21	2.38
styrene	tr.	1.58	4.47	n.d.	0.63	0.41	5.08	0.79	0.40	0.43	n.d.	0.43
1,1,2,2-tetrachloroethane	n.d.	2.25	3.77	n.d.	n.d.	2.09	n.d.	2.25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
o-xylene	1.86	2.54	3.55	tr.	2.07	2.22	2.1	2.26	1.83	1.94	n.d.	2.16
1,3,5-trimethylbenzene	1.94	2.26	4.70	n.d.	1.10	1.29	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.00
1,2,4-trimethylbenzene	2.33	2.95	7.68	2.40	2.04	1.77	2.58	3.08	2.39	n.d.	n.d.	3.13
1,3-dichlorobenzene	n.d.	1.40	3.03	n.d.	1.10	1.31	n.d.	n.d.	n.d.	1.97	n.d.	n.d.
1,4-dichlorobenzene	n.d.	1.87	4.26	n.d.	1.68	1.83	n.d.	n.d.	n.d.	2.89	n.d.	n.d.
1,2-dichlorobenzene	n.d.	1.97	5.18	n.d.	1.12	1.39	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
n-butane	3.59	2.77	2.40	2.30	2.48	2.71	2.39	2.7	2.31	2.53	2.38	2.82
n-hexane	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
cyclohexane	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	16.5	35.8	53.13	13.05	26.89	34.8	24.13	28.29	16.89	30.07	17.64	23.52

*n.d.: not detectable, tr: traceable

루엔이었으며 질량기여율은 공단 내와 외 지점에서 22%와 15%로 각각 나타났다. 수용지점의 대기환경

중 검출성분의 농도는 사업장 및 일반배출원에 비하여 상대적으로 미량으로 나타났으며, 존재하는 성분

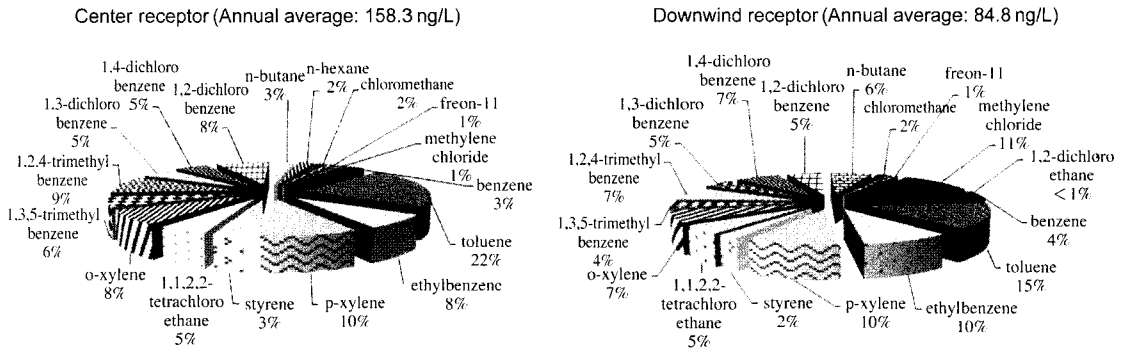


Fig. 3. Average mass contributions of species to total VOCs in ambient air at center receptor and downwind receptor.

들은 사업장배출원에서 나타나는 성분들을 포함해서 다양한 항목이 BTEX를 제외한다면 수% 정도로 비교적 고른 비율로 검출되었다. 이들 미량 성분들은 tetra-chloro-ethane, di-chloro-benzene, n-hexane, cyclohexane 등으로 배출원 시료에서는 거의 확인되지 않았던 성분들이다. 대기환경 중의 항목 및 농도분포는 지역 내 존재하는 특정배출원에서 배출된 물질들이 대기환경으로 배출된 후 혼합 및 희석되어 나타난 결과이므로 배출원에서 직접 채취된 시료분석 결과에 비교하여 다양한 성분과 농도분포를 나타내고 있는 것으로 추정된다.

그림 4는 측정기간 동안 공단 내 주요 사업장 배출원(4곳)과 공단 외 일반 배출원(2곳)에서 측정된 결과를 평균하여 연평균 VOC총량으로 가정 한 후, 총량에 대한 각 배출원별 중량비율(mass ratio)을 나타낸 것이다. 금속가공제품 제조업(6,342 ng/L)과 화학제품(4,976 ng/L)에서 95% 이상의 배출기여를 보이며, 일반배출원인 주유소(133 ng/L)와 세탁소(195 ng/L)에서는 1~2% 정도 기여하고 있는 것으로 나타났다. 그 외에 자동차제품 제조업과 고무 플라스틱 제품 제조업의 경우 공정 및 배출원 관리가 비교적 잘 이루어지고 있는 사업장으로 연간 평균 배출량은 각각 188 ng/L과 135 ng/L으로 나타나 일반배출원인 세탁소에서 보다 낮은 배출기여도를 보였다. 물론 공단 내에 소재하는 모든 사업장배출원으로부터의 배출량이 이번 연구에서 조사되지는 않았지만, 이번 연구를 통해 조사된 제한된 배출량 분석 결과만으로도 공단 외 일반지역에 있는 세탁소의 경우도 지역 배출량에 일정부분 기여함으로써 일부 사업장 배출원

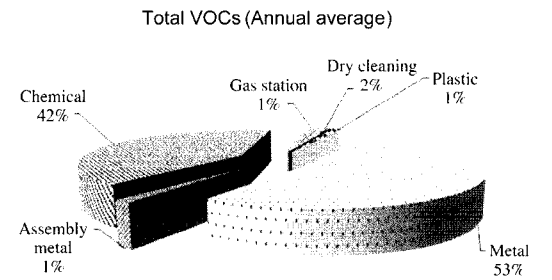


Fig. 4. Annual average mass contributions of the sources to the total VOCs resulted from measurement data at industrial sources and general sources.

의 경우에서 보다 높은 영향을 미치고 있음을 보였다. 비록 이상의 결과가 제한된 측정결과와 모든 사업장배출원을 대상으로 하지 못한 제한은 있으나, 일반 배출원에서 발생하는 배출량도 지역 대기환경의 수준을 결정하는 데 필히 고려해야 할 요소임을 나타내고 있다.

4. 결 론

이번 연구에서는 지역 대기환경에 미치는 사업장과 일반지역 내 주요 배출원별 VOC 배출기여도 파악을 위해 공단 내 주요 배출시설과 일반지역 배출원으로부터 시료를 채취 분석하였다. 총 39종의 VOCs 물질이 분석되었으나 이 중에서 21종의 성분들은 대부분 검출한계 이하 수준 또는 불검출로 판독되었다. 고무 플라스틱제품 제조업의 경우, 주요 VOCs 물질로는 chlo-

romethane, toluene, 1,2,4-trimethylbenzene, p-xylene, n-butane, methylene chloride, 1,1,1-trichloroethane, o-xylene, 1,3,5-trimethylbenzene, ethylbenzene 순으로 중량농도를 나타냈다. 특히, 겨울철 배출시료 중 VOC 총량이 여름철 시료 중 총량에 비해 3배 가까이 높게 나타나 계절적으로 차이를 보였다. 금속가공제품 제조업의 경우는 최고 중량농도를 나타낸 성분은 톨루엔이었으며, 그 이외의 성분들의 중량농도는 p-xylene, o-xylene, ethylbenzene, methylene chloride, 1,2,4-trimethylbenzene, 1,2-dichloroethane, 1,3,5-trimethylbenzene, benzene, styrene 순으로 나타났다. 또한, 배출구에서의 농도가 상대적으로 높은 것을 보여주었으며, 계절적으로 비교적 변동이 심한 것으로 나타나 대표적인 배출자료 확보를 위해서는 대상 사업장에서의 지속적인 모니터링의 중요성이 강조되어야 할 것이다. 검출된 주요 VOCs의 질량기여율에 의하면 평균적으로 톨루엔, o-xylene, p-xylene, 에틸벤젠이 VOC총질량의 전체의 90% 이상을 차지하여 특정 물질의 주요 배출원의 공정 관리 또는 개선이 요구된다.

자동차제품 제조업의 경우는 toluene, ethylbenzene, p-xylene, o-xylene, 1,2,4-trimethylbenzene, 1,3,5-trimethylbenzene, benzene, methylene chloride, styrene, chloroform 순으로 나타났다. 화학제품제조업의 경우는 styrene이 가장 높은 중량 농도를 나타내었으며, 그 외 toluene, 1,2,4-trimethylbenzene, ethylbenzene, p-xylene, o-xylene, benzene, trichloroethylene 순으로 나타났다. 특히 겨울철에 톨루엔이 약 1ppm 수준으로 검출되어 주요 배출원의 적절한 관리가 요구되었다. 화학제품의 경우는 동종업종인 경우에도 생산되는 제품 및 원료에 따라 배출성분과 농도가 상이할 수 있어 화학제품 제조에서의 배출량 및 항목을 비교하기에는 어려움이 따를 수 있다. 위의 결과와 같이 각 업종별 배출된 주요 물질은 화학물질 배출량 조사보고서(환경부, 2007)에 제시된 업종별 주요 대기오염물질 배출항목과 비교적 유사한 결과를 보여 주었다. 일반지역 배출원이라 함은 대상 산업단지 이외의 주거지를 포함한 도시지역에 산재하는 VOCs 배출원으로 주유소와 세탁소의 배출시료를 측정 분석하였다. 모든 샘플에서 14종 이상의 다양한 성분이 ppb수준 내에서 검출되었으며, BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)는 모든 배출원에

서 상당부분을 차지하였다. 특히, 세탁소의 경우는 드라이클리닝 공정 중에 사용되는 염소로 인하여 염화화합물의 일부 항목이 검출되었다.

한편 수용지점에서의 측정은 사업장 내 외부의 주거지 내 각 한 지점씩을 선정하여 기여도 평가를 위한 모델의 입력 자료로 활용하기 위한 목적으로 수행되었다. 측정일 동안 분석된 VOCs의 성분별 농도를 이용하여 총량 기준으로 공단지역 내 수용지점에서의 총VOC농도는 158.3 ng/L로 공단 외 수용지점의 농도인 84.8 ng/L보다 상대적으로 높게 나타났으며, 톨루엔의 질량기여율은 공단 내와 외 지점에서 22%와 15%로 각각 가장 높게 나타났다. 공단 외곽의 수용지점보다 공단 내부 수용지점 대기환경에서 총량이 높게 나타난 사실은 공단내부 수용지점의 대기환경농도가 사업장 부근의 직접적인 배출 영향으로 총량 면에서 높게 나타난 것으로 추정될 수 있다. 검출된 화학종은 역시 BTEX성분들이 주요 종으로 조사되었다.

이상의 측정결과는 수용모델을 이용하여 실질적인 기여도 추정을 수행하는 기초 자료로서, 지역에서 수행된 여러 사업장 배출원 측정 자료들과 그동안에 측정되어 왔던 산업단지 내의 배출원 정보와 함께 화학질량평형(CMB; Chemical Mass Balance 8.2 Model, U.S. EPA)모델을 이용한 지역에 미치는 사업장의 VOC 배출기여도 추정을 위한 지역VOC배출원목록(local VOC source profile)을 작성하는 데 매우 필요한 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2007년도 전북지역환경기술개발센터의 환경기술연구개발사업과 전북지역친화기업의 연구지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김득수, 박비오, 양고수(2007) 전주공단지역의 주요 VOCs 배출농도 측정 및 배출원별 특성 분석, 한국환경과학회지, 16(3), 299-310.
- 김선태, 최일환, 이규성(2007) 피혁산업장의 휘발성유기화합물(VOCs) 배출특성에 관한연구, 한국대기환경학

- 회지, 23(3), 332-343.
- 김영성 (1999) 산업단지 대기질 관리, HAP인가 VOC인가?, 한국대기환경학회지, 15(4), 513-517.
- 백성욱, 김성렬, 김배갑 (2002) 도시대기 중 휘발성 유기화합물의 농도변경 및 영향인자, 대한환경공학회지, 24(8), 1391-1404.
- 봉춘근, 윤중섭, 황인조, 김창년, 김동술 (2003) 서울지역에서의 VOCs 오염원 기여도 추정에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 19(4), 387-396.
- 임문순, 김기현, 최여진, 전의찬 (2006) 안산시 반월공단울 중심으로 한 배출시설의 업종 및 배출시설별 VOC의 배출특성, 한국대기환경학회지, 22(2), 325-336.
- 전준민, 허 당, 김동술 (2003) 여수산단 대기중 휘발성유기화합물질 농도 경향, 한국대기환경학회지, 19(6), 663-677.
- 전준민, 허 당, 김동술 (2005) 여수석유화학산단 내 VOCs에 대한 오염원 분류표의 개발 및 CMB모델에 의한 기여도 산정, 한국대기환경학회지, 21(1), 83-96.
- 한진석, 문광주, 김록호, 신선아, 홍유덕, 정일록 (2006) PMF를 이용한 수도권지역 VOCs의 배출원 추정, 한국대기환경학회지, 22(1), 85-97.
- 환경부 (2007) 화학물질 배출량 조사 결과보고서, 환경부.
- Doskey, P.V., Y. Fukui, M. Sultan, A.A. Maghraby, and A. Taher (1999) Source profile for nonmethane organic compounds in the atmosphere of Cairo, Egypt, J. Air & Waste Manage. Assoc., 49, 814-822.
- Na, K.S. and Y.P. Kim (2001) Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in Seoul, Korea, Atmos. Environ., 35, 2603-2614.
- US EPA (1997) Compendium Method TO-14A Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ambient air Using Specially Prepared Canisters with subsequent analysis by Gas chromatography, Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air, 2nd ed., EPA-625/R-96/010b.
- US Environmental Protection Agency (2004) EPA-CMB 8.2 Users Manual. Publication No. EPA-452/R-04-011. Office of Air Quality Planning & Standards, Research Triangle Park, N.C.; December 2004.