

안산시 반월공단을 중심으로 한 주요 배출시설의 업종 및 배출시설별 VOC의 배출특성

Emission Characteristics of VOC due to Major Industrial Activities in the Ban Wall Industrial Complex

임문순 · 김기현* · 최여진 · 전의찬

세종대학교 지구환경과학과

(2005년 12월 11일 접수, 2006년 5월 30일 채택)

MS Im, KH Kim*, YJ Choi and EC Jeon

Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University

(Received 11 December 2005, accepted 30 May 2006)

Abstract

The presence of volatile organic compounds (VOC), produced and released from both anthropogenic and natural sources, can accelerate the degradation of air quality in the surrounding area. In this study, we investigated the emission concentrations of VOC based on a total of 115 sample analysis made from 47 companies (representing 17 types of industry) at the Ban Wall industrial complex (Jun. 2004 to Jan. 2005). Through a statistical analysis of these measurement data, we inspected the emission characteristics of VOC in relation with industrial type and processing unit. When these data were compared each other, toluene was found to record the highest value of 423 ppb followed by ethylbenzene (68.3 ppb), m, p-xylene (43.6 ppb), o-xylene (27.2 ppb), styrene (23.9 ppb), and benzene (16.4 ppb). In addition, by converting these VOC concentration data into malodor intensity, we attempted to account for their distribution patterns in terms of relative contribution to the malodor formation. The results of odor intensity conversion generally indicated that the odor intensities of individual VOC do not exceed the degree of 1. When our VOC results were compared against other odorous compounds measured concurrently, the results were highly contrasting each other. Despite relative insignificance as odorous compounds, these VOCs are generally found ubiquitously and in abundant quantities in this strong source area.

Key words : Malodor, Emission, Industrial complex, Analysis, VOC

1. 서 론

휘발성 유기화합물질 (Volatile Organic Compounds:

이하 VOC)은 질소화합물과 함께 자외선에 의하여 광화학 반응을 일으킬 수 있는 유기물질을 통칭한다. 또한 이들 화합물은, 대류권내에서 발견되는 오존의 전구 물질로 작용하는 것으로 알려져 있다 (Derwent *et al.*, 2000; 김영성 등, 1998). 그 외에도 인체에 발암을 야기하는 유해물질 또는 악취의 원인물질로도 주

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-499-9151, E-mail : khkim@sejong.ac.kr

Table 1. A list of industry types investigated for the characterization of VOC emission patterns in this study. Classification is made based on a standard industrial classification code. A total of 47 companies investigated in this study are classified.

Order	Major code (first 2 digits)	Type of industry (Original)	Industry classification (Modified)	Number of company
1	15	Food and beverage	A	2
2	17	Textiles	B	5
3	19	Leather, bag and shoes production	C	6
4	21	Pulp, paper, etc.	D	4
5	24	Compound and chemical product	E	13
6	28	Metal assembly and production	F	5
7	90	Sewage, waste treatment, and cleaning	G	5
8	18	Fur and dressmaking	H	1
	20	Wood and its product		1
	29	Miscellaneous machine and instrument		1
	31	Electronic machine and convertor		1
	34	Automobile and trailer		1
	36	Furniture		1
	40	Electronics, gas, and vapor		1
up to 14 classes			up to 8 classes	47

목 받고 있다 (Komilis *et al.*, 2004; 최원욱 등, 1998). 대기환경 중에 존재하는 VOC의 환경학적 중요성은 이미 많은 환경학자들에 의하여 연구되어 왔다 (Heeb *et al.*, 2000; Yamamoto *et al.*, 2000).

VOC의 주요 배출원은 크게 자연적 배출원과 인위적 배출원으로 구분하는 것이 가능하다 (Kesselmeier *et al.*, 2000; Pio and Valente, 1998). 그런데 후자에 속하는 여러 유형의 산업시설들이 주거지역에 인접하게 위치할 경우, 거주자 및 지역 대기 환경에 악영향을 미치는 요인으로 작용할 수도 있다 (Na *et al.*, 2001). 환경대기 중에 인위적으로 배출된 VOC의 분포특성은 주변 지역의 기상 및 기후적 특성과 지형적 특성의 영향을 동시에 받게 된다. 따라서 주거지역이 주로 풍하방향에 위치할 경우, 주변 지역의 거주자들이 체감하는 악취관련 민원의 유형이나 향의 빈도 등의 정보만으로도 그러한 현상의 특성에 대한 간접적인 평가를 내리는 것이 어느 정도 가능하다. 특히, 주변에 반월 및 시화공단이 인접한 안산시 지역은 국지풍인 해륙풍의 영향을 강하게 받는 연안도시로 분류된다. 따라서 해풍의 유입과 관련한 오염물질의 이동과 확산으로 발생하는 악취민원 발생 가능지역에 대한 범위예측, 고농도 발생일의 원인 규명 등을 위해서는 객관적이고 정확한 분석자료를 확보하는 것이 중요하다 (송동웅 등, 2003).

본 연구진은 2004년 6월부터~2005년 1월까지 경기도 안산시 반월공단 내에 위치한 대기배출사업소 중 47개를 선정하여 VOC를 위시한 주요 악취성분들에 대한 배출농도를 관측하였다 (김기현 등, 2005a). 본 연구에서는 이들 배출원에 의한 VOC 배출특성을 평가할 수 있는 정량적인 자료를 확보하기 위한 방법의 일환으로, 각각의 조사 대상 사업체마다 배출농도가 가장 높을 것으로 예상되는 배출원 들을 2~6 지점 범위 내에서 선정하였다. 그리고 이들 지점으로부터 시료를 채취하고 분석하였다. 본문에서는 이들 사업장을 대상으로 확보한 VOC 성분들의 분석 결과를 집중적으로 비교하였다. 또한, 모든 조사 대상 업종 및 공정 등에 대한 VOC 성분의 배출특성을 분류하고 설명을 하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상 지역의 특성

본 연구에서 확보한 VOC 성분들의 분포특성을 체계적으로 설명하기 위해, 안산시 반월공단 내에 위치한 47개의 조사 대상업체들을 표준산업 분류코드를 기초로 분류하였다 (표 1). 전체적으로 조사대상으로 선정한 업체들은 안산시 (또는 경기도)의 악취민원관

Table 2. A tabulation of VOC emission processes (or systems) from a total of 47 companies investigated in this study with a brief statistics.

Type of industry	Junction box	Aeration tank	Settling tank	Scrubber	Manufacturing process	Storing place	Stack	Miscellaneous
Food and beverage		2		2	1			
Textile		2		3	4		1	
Leather, bag, and shoes production	2	5	2	3	4	4		
Pulp, paper, etc.		2		1	2	1	1	
Compound and chemical product		5		13	5	3	1	2
Metal assembly and production				6	5			
Sewage, waste treatment, and cleaning		4	2	3		8	2	
Miscellaneous ¹	2	1		8	1	1	1	
Total	4	21	4	39	22	17	6	2

¹Miscellaneous companies include the followings: Sewing and fur product, Wood and its product, Miscellaneous machine and instrument, Electronic machine and convertor, Automobile and trailer, Furniture, Electronics gas and vapor.

리 차원에서 조사관리를 받는 업체명단을 일차적인 참고자료로 활용하였다(김기현 등, 2005a). 그리고, 그 외 전반적인 업종 분포 등을 감안하여 자체적으로 분석대상 업체를 추가적으로 선정하였다(김기현 등, 2005a).

표 1에 제시한 바와 같이 본 연구에서 조사한 전체 사업장을 업종별로 분류하면, 총 14개 업종에 해당한다. 각 업종별 구성내역을 보면, (1) 화합물 및 화학제품 제조업이 13업체, (2) 가죽, 가방 및 신발 제조업 6업체, (3) 조립금속제품제조업체 5업체, (4) 하수처리폐기물처리 및 청소관련 서비스업 5업체, (5) 섬유제조업 5업체, (6) 펄프, 종이 및 종이제품 제조업 4업체, (7) 음식물 제조업 2업체를 선정하였으며, (8) 이들 외 각 업종을 대표하는 1개 업체씩 총 7개 업체를 기타 업종으로 포함시켰다. (8)항으로 분류한 산별적인 기타 업체들을 하나로 묶어 주는 방식으로, 전체 업체를 총 8개의 업종으로 중분류한 후, 세부적인 분석에 활용하였다. 또한 본문 중에는 VOC의 배출특성을 또 다른 각도에서 평가하고 분석해 보기 위해, 업종의 기준에 상관없이 처리시설의 공정단계를 기준으로도 분류를 시도해 보았다(표 2). 이와 같이 처리시설 또는 처리방법에 의한 분류결과를 보면, VOC의 발생원으로 예상되는 집수조(4지점), 포기조(21지점), 침전조(4지점), 스크러버(39지점), 제조공정

(22지점), 저장소(17지점), Stack(6지점), 기타(2지점) 등으로 구분할 수 있다. 이러한 기준에 의하면, 본 연구기간 내에 총 115지점의 시료를 채취 및 조사한 것에 해당한다.

2. 2 시료의 채취

일반적으로 VOC 시료의 채취는 크게 두 가지의 방법으로 이루어진다. VOC 성분을 물리적으로 채취할 수 있는 흡착튜브를 이용한 샘플링법과 일정한 용기를 사용하는 캐니스터(Canister) 및 테들라백(Tedlar bag)을 이용한 용기 채취법 등이 주로 활용되고 있다. 본 연구에서는 공단 내부 배출시설의 다양한 배출조건을 감안하여, 테들라백을 이용하는 그랩(grab) 샘플링 방식을 위주로 시료를 채취하였다. 이를 위해, 진공형 링 샘플러에 빈 백을 장진한 후, 일정한 유량에서 진공상태를 형성할 수 있는 초소형 진공펌프를 가동하여 감압을 유도하였다. 적정수준의 감압이 유도되면, 테들라백과 연결된 샘플 스크류 밸브(테플론 재질)를 열어주므로써 채취하고자 하는 시료가 백 내부로 고속으로 충전 되도록 유도하였다. 테플론 재질의 튜빙으로 구성된 샘플라인을 통해, 채취 대상 시료가(10L) 테들라백을 충전하면, 시료 채취를 종료하였다. 또한, 채취한 시료는 테들라백 내부에 흡착되거나, 자연광에 의한 화학적 손실을 최대한

줄이기 위해, 검은 비닐봉투에 담아 운반하였으며, 24 시간 이내에 신속하게 분석하였다.

2.3 분석 방법

다양한 배출원에서 발생하는 다양한 농도대의 VOC를 정확하게 측정하기 위해서는, VOC의 채취와 분석에 숙련된 기술과 높은 수준의 정도관리(QA/QC)가 필요하다(Yamamoto *et al.*, 2000). 본 연구에서 VOC의 분석은 저온농축 및 열탈착 기법(Peltier Cooling/Thermal Desorption (이하 PC/TD))을 기초로 하였다. 이를 적용하기 위해, UNITY 열탈착 시스템(Markes Ltd.)과 GC/FID (Model: DS-6200, 도남인스트루먼트)를 연동하였다. 백으로 채취한 시료를 분석하기 위해, 일차적으로 PC/TD 시스템에 백시료를 연결시켰다. Nafion dryer를 이용하여 분석과정에서 불필요한 수분의 영향을 최소화한 상태에서 시스템 내부로 시료를 유입시켜주면, 이는 다시 PC/TD 내부의 cold trap으로 이송되었다. 이 단계에서는 분석 대상

물질을 저온 농축하기 위하여, -15°C에서 PC를 통해 냉각을 유도하는 과정을 거쳤다. 분석 대상 성분의 저온농축이 완료되면, cold trap을 320°C로 급격하게 승온시켜 분석대상 VOC 성분들의 열탈착(TD)을 유도하였다. 열탈착된 시료는 GC의 column으로 이송되고, 여기서 분리된 개별성분들은 최종적으로 FID(불꽃 이온화 검출기)를 통해 검출이 이루어졌다. VOC 성분들의 분리는 DB-VRX (Length: 60 m, ID: 0.32 mm, Film thickness: 1.8 µm, J&W, USA) 칼럼을 이용하였다. GC의 온도설정 및 PC/TD의 분석 조건은 표 3에 제시한 바와 같다.

본 연구에 사용한 분석기기의 성능을 평가하기 위한 기본적인 척도로 검출한계 및 정밀도 등의 기본적인 분석변수를 산출하였다. 시료의 분석시 signal 대 noise의 비가 3배가 되는 최소한의 peak를 선택하여, 그 면적을 각 개별 성분의 검량선에 대입하여 최소감지농도를 계산하였다. 이렇게 구한 최소 감지값들의 표준편차를 취하는 방식으로 검출한계를 구하였다. 연구기간 내에 구한 기기의 검출한계는 절대 질량 기준으로 benzene 0.18 ng, toluene 0.17 ng, ethylbenzene 0.19 ng, m, p-xylene 0.07 ng, styrene 0.21 ng 등으로 나타났다. 실질적으로 분석 시료의 부피(400 mL)를 감안하면, benzene 0.14 ppb, toluene 0.11 ppb, ethylbenzene 0.11 ppb, m, p-xylene 0.04 ppb, styrene 0.12 ppb 등으로 검출한계를 정의할 수 있다. 상대표준오차(RSE)를 이용하여 정밀도를 산출하면, 5% 내외의 수준인 것으로 나타났다(표 4).

본 연구기간 내에 채취한 미지시료를 분석하는 단

Table 3. An analytical set-up for the operation of PC/TD and GC-FID system used in this study.

PC/TD (Unity: Markes international)	GC-FID (DS-6200: Donam instruments)
Cold trap Temp Low: -15°C	Initial oven Temp: 50°C
Cold trap Temp High: 320°C	Initial hold Time: 5 min
Cold trap Time: 5 min	Rate: 6°C/min
Valve Temp: 80°C	Final oven Temp: 230°C
Transfer line Temp: 80°C	Final hold Time: 5 min
Minimum pressure: 15 psi	Total Time: 40 min
Sampling flow: 40 mL/min	Detector Temp: 230°C

Table 4. Comparison of the basic analytical parameters for VOC analysis in this study.

Full name	Name modified	Structural formula	DL		Precision (RSE in %)
			(ng)	(ppb)	
Total VOC	TVOC	C			
Benzene	B	C ₆ H ₆	0.18	0.14	1.55
Toluene	T	C ₆ H ₅ CH ₃	0.17	0.11	5.54
Ethylbenzene	E	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	0.19	0.11	3.82
m, p-Xylene	MPX	(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	0.07	0.04	2.83
Styrene	STY	C ₆ H ₅ CH=CH ₂	0.21	0.12	3.78
o-Xylene	OX	(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	0.14	0.08	3.25
Bromobenzene	BB	C ₆ H ₅ Br	0.63	0.24	2.95
1, 3, 5-Trimethylbenzene	1, 3, 5-TMB	(CH ₃) ₃ C ₆ H ₃	0.31	0.15	0.5
1, 2, 4-Trimethylbenzene	1, 2, 4-TMB	(CH ₃) ₃ C ₆ H ₃	0.43	0.21	1.06
p-Isopropyltoluene	p-IPT	C ₁₀ H ₁₄	0.36	0.16	1.75
n-Bulylbenzene	n-BB	C ₁₀ H ₁₄	0.51	0.23	1.56

*Assuming the sampling volume of 400 mL

Table 5. A list of conversion formula for representative odorous pollutants concentration into malodor grade¹.

Compounds	Functional relation formula (X : ppm)	Degree of malodor and matching concentration (ppb)													
		1		2		2.5		3		3.5		4		5	
		(ppm)	ppb	(ppm)	ppb	(ppm)	ppb	(ppm)	ppb	(ppm)	ppb	(ppm)	ppb	(ppm)	ppb
Toluene	$Y = 1.400 \log X + 1.05$	9.2×10^{-1}	920	4.8	4800	11	11000	25	25000	56	56000	130	130000	660	660000
Styrene	$Y = 1.420 \log X + 3.10$	3.3×10^{-2}	33	1.7×10^{-1}	170	3.8×10^{-1}	380	8.5×10^{-1}	850	1.9	1900	4.3	4300	22	22000
Xylene (o : m : p = 1 : 2 : 1)	$Y = 1.530 \log X + 2.44$	1.1×10^{-1}	110	5.2×10^{-1}	520	1.1	1100	2.3	2300	4.9	4900	10	10000	47	47000
o-Xylene	$Y = 1.660 \log X + 2.24$	1.8×10^{-1}	180	7.2×10^{-1}	720	1.4	1400	2.9	2900	5.7	5700	11	11000	46	46000
m-Xylene	$Y = 1.460 \log X + 2.37$	1.2×10^{-1}	120	5.6×10^{-1}	560	1.2	1200	2.7	2700	5.9	6500	13	13000	63	63000
p-Xylene	$Y = 1.570 \log X + 2.44$	1.2×10^{-1}	120	5.2×10^{-1}	520	1.1	1100	2.3	2300	4.7	4700	9.9	9900	43	43000
i-propylbenzene	$Y = 1.160 \log X + 3.12$	1.5×10^{-2}	15	1.1×10^{-1}	110	2.9×10^{-1}	290	7.9×10^{-1}	790	2.1	2100	5.7	5700	42	42000
1,2,4-trimethylbenzene	$Y = 1.130 \log X + 2.75$	2.8×10^{-2}	28	2.2×10^{-1}	220	6.0×10^{-1}	600	1.7	1700	4.6	4600	13	13000	98	98000
1,3,5-trimethylbenzene	$Y = 1.110 \log X + 2.60$	3.6×10^{-2}	36	2.9×10^{-1}	290	8.1×10^{-1}	810	2.3	2300	6.5	6500	18	18000	150	150000

¹Degree of malodor is reported by Nagatai(2003) and references therein. Guidance level is made by KMOE(2.2005)

Table 6. An overall summary of emission concentration data of each VOC from a total of 47 companies investigated in this study.

Unit	TVOC	B	T	E	MPX	STY	OX	BB	1, 3, 5-TMB	1, 2, 4-TMB	p-IPT	n-BB
	ppb C	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
Mean	9675	16.4	423	68.3	43.6	23.9	27.2	4.12	4.41	7.04	6.65	4.75
SD	15244	66.2	1491	328	138	89.4	110	11.6	11.7	27.0	18.2	16.9
Med	3941	1.35	48.2	7.53	7.56	3.91	2.17	0.37	0.97	1.57	0.90	0.35
Min	417	0.27	4.55	0.33	0.41	0.19	0.18	0.09	0.12	0.21	0.10	0.06
Max	83704	515	11659	3341	1074	855	751	81.8	82.9	277	116	112
N	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115	115

*Refer to Table 4 for full information.

계에서, (실제로 각 업체별 및 공정단계별로 구분할 경우) 시료별 농도의 차이가 현저하게 나타났다. 따라서 이를 감안하여 고농도 및 저농도로 예상되는 지점에서 채취한 시료의 분석은 PC/TD의 cold trap 내부로 유입할 시료의 양을 사전에 조절하여, PC/TD 내부 및 칼럼의 오염을 최소화하고자 하였다. 고농도 시료를 분석할 경우, PC/TD 및 칼럼의 blank test, conditioning 등의 단계를 추가하여, 다음 분석에 영향이 미치지 않도록 하였다.

연구기간 내에 분석한 시료의 분석결과에서 개별 VOC 성분을 정성, 정량하여 농도를 산출하였다. 이와 함께, VOC 전체의 양이나 규모를 확인 하기 위해서, TVOC의 농도도 산출하였다. 시료의 분석결과로 나타나는 크로마토그래프에서 C₆~C₁₆까지의 성분들에 대한 peak area를 모두 합한 면적 값을 toluene의 검량선으로 계산해 줌으로써, TVOC의 농도도 동시에 산출하였다. 그리고 TVOC에 대한 농도는 $\mu\text{g}/\text{C}/\text{m}^3$ 또는 ppb C의 단위로 제시 하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 전체사업장의 배출 특성

본 연구기간 중 총 47개의 사업장에서 채취한 시료의 분석결과를 토대로 VOC성분들에 대한 배출농도를 비교하였다. 이를 이용하여 반월공단의 대기배출시설들에 대한 전체적인 배출특성을 설명하고자 시도하였다. 연구결과를 다각도로 해석하기 위해, 분석 자료를 (1) 업체별, (2) 공정 단계별 등의 기준으로 분류하였다. 이러한 기준에서 VOC의 배출특성에 대한 절대적 및 상대적인 경향을 해석하는 것은 중요

한 의미를 지닐 수 있다(전의찬, 2005). 각 업체별, 공정단계별 분류를 통해 VOC의 배출특성을 파악함으로써, 고농도 배출이 발생하는 VOC성분을 중심으로 가장 효율적인 저감방법을 강구할 수 있으며, 결과적으로 주거지역에서 발생하는 VOC에 의한 악취 유발을 방지할 수 있을 것이다. 또한, 분석한 VOC의 농도분포자료를 악취도와 연계하여, 악취 원인물질이란 관점에서 결과를 해석하는 것도 새로운 의미를 부여할 수 있다(표 5).

전체 사업장의 조사 결과(표 6)로부터 통계 처리한 결과를 각 성분별 및 TVOC의 농도로 비교해 보았다. 이를 위해, 개별 성분 중 상대적으로 가장 높은 농도를 보이는 toluene을 중요한 기준으로 활용하였다. toluene 성분의 평균치를 보면, 47개의 사업장에서 423 ppb의 평균농도($\pm 1,491$ ppb)를 기록하였다. 그 뒤로 ethylbenzene, xylene, styrene, benzene의 순으로 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 본 연구 기간 중 안산시 주거지역을 대상으로 한 환경 대기 중 toluene의 평균 농도가 약 20 ppb 정도로 나타난 것을 감안하면(김기현 등, 2005b), 전체 사업장에서 관측한 VOC의 평균 배출농도는 약 20배 이상 높다고 할 수 있다. 참고로 과거에, 1997년 시화공단에서 주거 지역을 대상으로 관측한 VOC 중 toluene의 농도가 약 10 ppb 수준인 것으로 관측되었다는 점도 참조할 필요가 있다(허귀석 등, 1998). 또한, 서울시와 같은 대도시의 도심권역에서 toluene의 평균 농도가 10 ppb 전후에서 관측되었다(최여진 등, 2003; Na and Kim, 2001). 만약 본 연구진의 선행연구에서 확인한 결과들이 안산시의 대표적인 농도라고 할 수 있다면, 반월공단에 산재한 대기배출 업소들이 안산시 VOC의 배경 농도를 높이는데 일조하였을 가능성도 배제

할 수 없다(김기현 등, 2005b).

3.2 업종 분류별 배출농도 및 배출특성

앞서 표 1, 2에 제시한 업종분류의 기준을 적용하여, VOC의 배출농도를 통계처리한 결과를 표 7에 제시하였다. 본 연구에서 분석한 VOC성분들의 농도는 표 7에 제시한 바와 같이 업종별로 비교적 큰 차이를 보인다. 따라서 이들 업종 중심의 표 분류를 기준으로 주요 배출성분을 비교하는 것도 중요한 의미가 있으며, 이러한 기준으로 분석 결과를 살펴볼 수 있다. 그림 1에 부연한 TVOC의 업종별 분류결과를 보면, D 분류(펠프, 종이 및 종이제품 제조업)에서 가장 높은 농도를 보였다. E 분류(화합물 및 화학제품 제조업)와 C 분류(가죽, 가방 및 신발 제조업)가 그 뒤를 이었다. 또한, toluene의 농도를 비교하면, TVOC의 경향과 마찬가지로 D 분류군에서 가장 높게 나타났다. D 분류군의 TVOC 농도에 대비한 toluene의 비율을 계산하면, 약 11.3%를 차지하는 것을 알 수 있다. 전체 자료의 TVOC 농도 대비 toluene의 평균농도 비율이 약 4.29%라는 점을 감안하면, D 분류군은 그보다 2배 이상 높은 비율에 해당한다. 따라서 D 분류군에서는 TVOC 중 toluene이 상대적으로 큰 비중을 차지한다는 것을 알 수 있다.

악취는 감각적이고 주관적인 오염물질로 상황에 따라 또는 개인의 성향에 따라 문제의 심각성 여부를 판단하기도 한다(국립환경연구원, 2003). VOC의 배출로 인해 발생하는 악취물질의 영향력을 평가하는 것은 단순하지 않은 일이다(Domeno *et al.*, 2004). 따라서 본 연구진의 분석 결과가 실질적으로 얼마만큼 악취강도와 연계되는 가를 보기 위하여, 냄새의 세기와 분석 농도와의 함수식을 이용하여, 각 성분의 농도를 악취도로 평가하였다. VOC 성분의 농도를 분석한 대부분의 시료를 악취도로 환산한 결과, 1도에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 예외적으로 D 분류군의 toluene과, E 분류군의 ethylbenzene, styrene의 평균농도가 악취도 1을 보였다(표 7). 따라서 D, E 분류군을 의미하는 제지 및 화학분야의 경우, 여타 업종에 비해 toluene, ethylbenzene, styrene의 악취기여도가 절대적 및 상대적으로 중요한 인자로 작용할 수 있다는 것을 시사한다. 이러한 결과는 본 연구진의 선행연구에서 황계열 및 알데하이드 계열의 악취도를 평가한 결과와는 상당한 차이를 나타

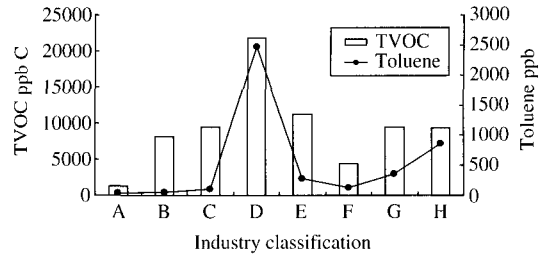


Fig. 1. Comparison of TVOC and Toluene concentrations among various industrial types investigated in this study *Capital letters of A through H denote, (A) Food and beverage, (B) Textiles, (C) Leather, bag and shoes production, (D) Pulp, paper, etc., (E) Compound and chemical product, (F) Metal assembly and production, and (G) Sewage, waste treatment, and cleaning.

낸다(홍윤정 등, 2005; 최여진 등 2005). 이들 선행 연구를 통해, 황이나 알데하이드류의 성분들은 악취 기여도가 상당히 크다는 것을 확인한 바 있다.

식품 산업에서의 VOC의 배출은 생물학적 분해과정을 통한 배출 보다는, 주로 음식물을 가공하는 가열, 건조, 훈제 등의 열적 과정을 통해 배출되는 것으로 보고된 바 있다(Rappert and Muller, 2005). 본 연구의 결과를 보다 상세히 보면, 여러가지 경향이 발견된다. 본 연구의 음식료품 제조업에서는 전체적으로 다른 업종에 비해 VOC의 배출이 적은 것을 확인할 수 있다. 특히, 일부 VOC 성분에서 검출한계 이하의 농도로 검출되는 결과도 나타났다. 섬유제품 제조업에서는 고분자 VOC물질인 bromobenzene (10.5 ppb), p-isopropyltoluene (15.5 ppb), n-butylbenzene (16.6 ppb) 등이 여타 다른 업종보다 높은 농도를 보이는 특성을 보였다. 종이 제품 제조업은 toluene (2,466 ppb), ethylbenzene (12.0 ppb), m, p-xylene (14.3 ppb), styrene (10.4 ppb) 등이 고농도를 기록하였는데, 특히 toluene의 경우 악취도 1도에 해당하는 농도로 산출되었다. 종이제품 제조업의 사업장내 공간에 쌓아둔 폐지가 적당한 습도와 온도 조건에서 썩을 경우, 악취성분 및 여러 오염물질의 배출을 촉진시킬 우려가 있다. 특히, 여름철에 습도와 온도가 상승할 경우, 악취 발생 농도가 높아질 것이란 사실을 예상할 수 있다(국립환경연구원, 2003). 화학 및 화학제품 제조업에서는 m, p-xylene (112 ppb), styrene (61.2 ppb) 등이 각각 악취도 1도를 기록하였다. 그리고 o-

Table 7. A statistical summary of VOC emission concentrations on the basis of industrial grouping among A though H.

Industrial group	Pollutants Mod name	TVOC ppbC	B ppb	T ppb	E ppb	MPX ppb	STY ppb	OX ppb	BB ppb	1, 3, 5-TMB ppb	1, 2, 4-TMB ppb	p-IPT ppb	n-BB ppb
A	Mean	1273	1.21	35.8	2.08	2.55	1.44	2.05	0.31	0.24	1.05	0.22	0.23
	SD	508	1.08	32.8	2.64	2.49	1.63	0.86	0.12	0.01	1.66	0.10	0.0011
	N	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B	Mean	8120	1.53	45.7	11.6	26.5	14.5	16.3	10.5	3.84	5.54	15.5	16.6
	SD	9372	0.74	46.7	12.7	44.2	20.9	36.7	25.7	6.04	5.72	27.9	31.4
	N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
C	Mean	9412	1.30	97.5	21.3	11.3	6.87	2.43	6.59	4.70	4.43	4.66	0.99
	SD	10410	0.86	116	46.8	17.4	10.0	4.56	9.52	14.9	7.28	9.42	2.28
	N	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
D	Mean	21807	4.32	2466*	12.0	14.3	10.4	3.58	1.80	3.20	6.40	9.53	9.42
	SD	30213	9.06	4497	9.65	13.6	13.6	4.28	3.62	4.70	8.70	20.0	22.7
	N	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
E	Mean	11275	21.1	277	201	112*	61.2*	87.8	4.45	8.03	14.5	7.06	3.88
	SD	18356	41.4	657	639	257	171	209	14.2	18.1	52.7	22.1	14.5
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
F	Mean	4353	1.86	132	21.3	13.7	7.10	1.71	2.90	0.80	1.68	2.16	0.59
	SD	3269	1.97	242	51.4	25.9	12.4	1.75	7.92	0.69	1.51	4.98	0.90
	N	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
G	Mean	9448	34.8	367	32.5	26.4	16.0	10.0	2.38	3.83	7.28	9.84	8.56
	SD	11797	124	721	94.0	70.2	39.1	19.9	4.80	5.05	10.6	25.5	26.8
	N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
H	Mean	9354	39.4	865	43.2	38.8	17.9	11.1	0.97	2.80	3.32	2.89	1.27
	SD	18063	114	2268	70.9	47.3	28.6	21.0	1.21	6.18	3.35	4.05	1.02
	N	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

*Numbers in bold phase correspond to malodor degree of 1.

** Refer to Table 4 for full information.

xylene (87.8 ppb)의 경우 다른 업종에 비해 가장 높은 농도로 관측되었다. 하수, 폐기물 처리 및 청소 관련 서비스업(G 분류)과 여러 기타 업체들을 하나의 중분류로 포괄적으로 나타낸 기타 업종(H 분류)에서는 benzene의 농도가 각각 34.8, 39.4 ppb로써, 여타 업종에 비해 고농도를 기록하였다.

업종 분류별 특성과 함께 각 업종별 공정단계에서 나타나는 세부적인 특성들도 주목할 필요가 있다. 섬유제품 제조업의 섬유염색, 염색, 가공 등을 하기 위한 제조공정에서 benzene을 제외한 모든 VOC 성분들이 다른 공정에 비해 높은 농도로 나타났다. 그로 인한 작업장내 근로자의 (VOC에 의한) 피폭도가 높을 것이라는 것을 추정할 수 있다. VOC는 체내에 흡수되면 중추신경계 등 중요기관에 독성으로 작용할 수 있다(김석재 등, 2000). 따라서 작업장 내부에서 장시간 근무하는 근로자의 건강에 지장이 오지

않도록, 작업장내 공기질을 적정수준으로 관리해야 할 필요성이 있다. 피혁 및 가죽 신발 제조업의 집수조에서는 toluene (173 ppb), ethylbenzene (113 ppb), m, p-xylene (45.0 ppb) 및 styrene (26.8 ppb)의 배출이 주를 이룬다. 이들 성분들이 피혁 및 가죽 신발 제조업의 평균 농도를 상승시키는 것으로 나타났다. 또한, 종이 제품제조업의 경우, 제조공정 내 toluene의 농도(8,473 ppb)가 악취도 2의 수준을 기록하였다. 따라서 폐지의 보관 및 저장과정에서 뿐만이 아니라 제조공정도 악취 발생에 어느 정도 기여할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 배출원 및 배출 처리 시설별 배출농도와 배출특성

산업체에서 사용하는 유기용제의 저장탱크나 저장용기, pipeline 및 장비에서의 유기용제의 누출 또는

Table 8. Comparison of VOC concentration for by each industrial processing unit.

	Pollutants	TVOC	B	T	E	MPX	STY	OX	BB	1,3,5-TMB	1,2,4-TMB	p-IPT	n-BB
	Mod name	ppbC	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
Junction box	Mean	4372	1.29	96.7	59.1	27.5	14.6	8.65	0.30	2.24	8.37	4.54	1.34
	SD	2515	0.95	88.3	97.3	28.5	17.5	7.38	0.08	1.68	6.26	5.55	1.10
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Aeration tank	Mean	4391	2.93	55.5	5.88	14.8	3.10	4.02	1.70	0.74	1.46	1.68	0.46
	SD	6278	4.62	76.6	5.67	43.1	2.91	9.29	4.40	0.74	1.32	3.36	0.72
	N	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Settling tank	Mean	5906	0.97	22.8	7.14	5.32	5.56	1.73	0.37	4.08	8.24	10.6	37.5
	SD	5610	0.98	16.0	4.01	3.13	5.39	1.45	0.0002	6.66	11.1	18.0	64.6
	N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Scrubber	Mean	11513	17.4	285	140	73.7	45.7*	26.5	4.87	6.20	11.4	7.55	5.79
	SD	16250	38.6	698	553	219	148	121	13.2	16.0	45.4	20.8	16.2
	N	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
Manufacturing process	Mean	14952	20.2	1257*	38.2	28.9	13.2	21.2	6.33	6.10	6.71	7.45	6.7
	SD	22918	90.1	3079	70.0	40.2	18.0	39.4	17.7	14.4	8.10	19.4	21.5
	N	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
Storing place	Mean	9835	35.5	414	46.2	36.6	21.9	83.9	5.66	4.65	6.29	11.7	1.66
	SD	11988	124	742	97.5	73.7	41.8	208	8.72	6.38	10.0	26.0	1.87
	N	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Stack	Mean	2283	0.96	24.4	5.98	6.68	2.93	3.81	0.42	1.08	1.87	1.49	1.21
	SD	1652	0.28	22.4	5.59	4.92	1.25	4.98	0.21	0.68	2.63	1.70	1.14
	N	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Miscellaneous	Mean	8877	46.5	108	276	352*	117*	1.31	0.37	1.94	1.77	0.97	0.23
	SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	N	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

*Numbers in bold phase correspond to malodor degree of 1.

**Refer to Table 4 for full information.

폐수가 흘러가는 과정에서도 VOC의 배출이 이루어진다(Khan and Ghoshal, 2000). 이러한 일반적인 배출과 함께, 각 업체에 따라 생산과정, 처리과정, 보관과정 등에 따라 VOC의 배출특성이 다양하게 결정되기도 한다. 본 연구의 조사대상인 47개 업체에서 분석한 자료를 업종에 상관없이 단순히 처리시설을 기준으로 비교하면, 집수조, 포기조, 침전조, 스크러버, 제조공정, 저장소, Stack 등의 구분이 가능하다. 따라서 모든 결과를 이러한 기준으로 분류한 후 동일한 배출시설별로 배출 특성을 비교해 보았다. 표 8에 제시한 바와 같이 배출시설별로 분류하면, 우선 제조공정, 스크러버, 저장소 등에서 고농도로 VOC의 배출이 이루어지는 것으로 나타났다. 제조공정에서는 toluene (1,257 ppb), 스크러버에서는 styrene (45.7 ppb)이 악취도로 환산할 때, 1도를 기록하였다. 스크러버에서 styrene의 경우 악취도 1도에 해당하는 농도를

보였다. 이는 대기오염방지시설의 후단에서 측정된 결과란 점을 감안하면, 대기오염방지시설의 설치 및 운영 시 악취물질인 styrene에 대한 관리가 여러 각도에서 이루어져야 할 필요성을 시사한다. styrene의 경우 약 33 ppb 이상(악취도 1도)일 때, toluene은 약 920 ppb 이상 이어야 동일한 수준의 악취도(악취도 1도)를 기록한다(일본 악취법령 연구회, 2002). 따라서 styrene의 경우, toluene에 비해 약 30배나 적은 농도로 배출된다고 하더라도, 각각 공해인 악취의 원인 물질로 기여할 수 있다. 저장소의 특징은 스크러버를 제외한 여타 다른 지점에 비해 toluene (414 ppb)과 o-xylene (83.9 ppb) 등이 상대적으로 높은 농도로 관측되었다. 또한, 고농도가 예상되었던 화합물 및 화학제품 제조업의 시료채취지점 중 기타 시료채취 지점에서도 xylene 및 styrene이 악취도 1을 나타내었다. 비록 저장소, 제조공정, 스크러버 등의 주

요 배출시설이 아닌 지점들도, 악취배출의 주요한 원인으로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 이처럼 각 업체별로 악취물질이 고농도로 발생하는 배출특성을 확인하는 것은 악취성분이나 VOC의 배출 저감에 있어 중요한 정보를 제공할 것이라 사료된다.

3. 4 선행연구와의 비교 연구

VOC를 효율적으로 관리하고 제어하기 위해서는 다양한 산업시설에서 발생하는 VOC의 성상에 대한 정보를 파악하는 것이 중요하다. 그러나, 산업시설의 업종별 VOC 배출특성을 분류하고 파악하는 작업은 많은 비용과 노력을 수반하기 때문에, 이에 대한 연구는 극히 제한적으로 이루어져 왔다(김선태 등, 2004). 그럼에도 불구하고, 본 연구와 같이 시화, 반월 공단 내 여러 종류의 사업체에서 VOC의 고농도 배출이 이루어지리라 예상되는 지점의 측정을 시도하는 연구는 이미 일부 선행 연구자들에 의해 시도되어 왔다(전의찬, 2005). 특히, 시화, 반월 지역은 수도권과 근접해 있는 지리적, 지형적 특성과, 공단 주변의 악취 민원 증가로 많은 주목을 받고 있으며, 그러한 결과로써 시화, 반월공단에 관한 많은 보고서 및 논문들이 보고 되었다. 본 연구의 연구방향과 유사성을 보이는 비교자료를 조사한 결과, ‘시화, 반월 지역 악취 배출원조사 및 저감방안 연구’ 국립환경연구원(국립환경연구원, 2003)의 보고서를 확인할 수 있었다. 따라서 이 두 연구들의 VOC 자료들을 가지고 비교 분석해 보았다.

선행연구는 2002년 8월부터~10월까지 주로 하절기에 샘플을 채취하고 분석한 결과로써, 본 연구와 비교함에 있어서 샘플 채취 지점이나, 당시의 현장 조건, 분석 물질 등, 많은 차이를 가지고 있을 수 있다. 이들 자료의 공통적인 분석 대상 물질로써 BTEX

와 styrene 등의 방향족 VOC 성분을 주 대상으로 포함된다. 선행연구들의 VOC 자료는 주로 공단 업체 주변의 환경대기를 측정된 자료로써, 본 연구와 비교하기 위하여 배출원 자료만을 선별하는 작업이 필요하였다. 이들 선별된 자료를 살펴보면, 저장소, 스크러버, 제조공정 등에서 측정된 자료가 주를 이룬다. 이러한 측정 지점은 본 연구에서 선택한 것과 같이 VOC의 주요 배출지점에 속한다. 이들 선행연구 결과를 토대로, VOC의 주요 발생원에서 배출되는 특성을 본 연구와 비교하기 위해, 선행 연구결과를 측정지점에 관계없이 배출원 자료로 사용하여 비교를 시도하였다. 본 연구진의 자료 또한, NIER의 선행연구와 동일한 저장소, 스크러버, 제조공정에서의 자료만을 선별하여 통계처리 하였다(표 9). 양 자료를 비교한 결과에 의하면, 가장 큰 차이점으로 두 자료군의 절대값이 큰 차이를 보인다. 우선 toluene의 경우, NIER의 보고결과가 약 30배 정도 큰 것으로 나타났다(표 9). 또한, 선행 연구 결과를 악취도의 관점에서

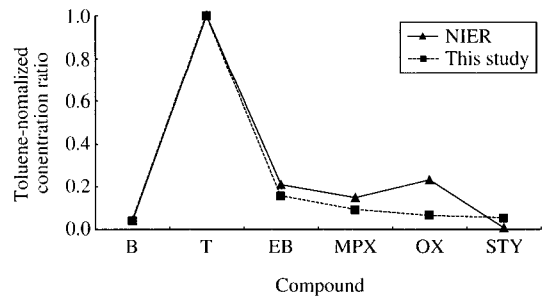


Fig. 2. Normalization of emission source concentration of VOC measured between two studies (NIER in 2003 and this study), *Refer to Table 9 for the original concentration data sets for the NIER report and this study.

Table 9. Comparison of VOC emission data between two studies (NIER data set vs this study)¹.

	NIER ² (2003)						This study					
	B ³	T	EB	MPX	OX	STY	B	T	EB	MPX	OX	STY
Mean	748	17392	3628	2589	4054	85.3	22.2	591	90.4	52.7	37.7	31.2
SD	1632	31811	7209	9739	8844	117	79.1	1776	393	159	132	106
Min	10.0	37.0	198	45.6	153	2.60	0.29	7.42	0.33	0.41	0.18	0.19
Max	3668	104927	18324	41575	24081	220	515	11659	3341	1074	751	855
N	5	10	6	18	7	3	77	77	77	77	77	77

¹All concentrations in ppb: (part (s) per billion), ²National Institute of Environmental Research (NIER) in Korea, ³Refer to Table 4 for full information.

살펴 보면, toluene (17,392 ppb, 약취도 2.5도), o-xylene (4,054 ppb, 약취도 3도), styrene (85.3 ppb, 약취도 1도)에 해당하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구진의 결과에서는 styrene이 31.2 ppb로 약취도 1도에 근접한 농도로 산출되었을 뿐이다. 다른 VOC 성분에서는 대개 약취도 1도에 미치지 못하는 농도로 산출되었다. 그림 2에서 두가지 연구에서 관측한 각 성분별 배출농도를 나타내었는데, 여기에 따르면 각 성분별 배출 경향은 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 보면, 배출농도의 DB를 객관적으로 구축하고 검증하기 위한 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것이란 점을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구진은 반월 공단내의 47개 배출업소를 중심으로 각 업체별 배출 특징을 VOC 성분의 배출농도와 연계하는 방식으로 살펴보고자 하였다. 연구대상으로 선정된 대기오염 배출업소들이 안산시의 주요 배출업체들을 일정 수준 대표 할 수 있다는 전제 하에, 여러 가지 기준으로 배출농도자료를 비교하였다. 가장 먼저 모든 결과를 A, B, C, D... 등 여러 가지 산업분류기준에 기초한 업종군을 중심으로 구분하였다. 전체 측정자료로부터 각 VOC성분의 평균 농도를 산출하였으며, 이들 중에서 toluene이 423 ppb의 농도로 나타났다. 이러한 수준의 농도는 안산시 주거지역 대기 중에서 발견되는 것보다 약 20배 가량 높은 수준에 해당한다. 업종별 배출특성을 비교한 결과, 섬유제품 제조업에서는 고분자 VOC 성분들이 높은 농도로 나타나는 특성을 보였으며, 펄프, 종이제품 제조업(D 분류군)에서는 toluene (2,466 ppb)의 기여도가 상대적으로 큰 것으로 산출되었다(약취도 1도). 화학 및 화학제품 제조업에서도 m, p-xylene (112 ppb)과 styrene (61.2 ppb)의 농도가 약취도 1도로 산출되었다. 따라서 이들 toluene, m, p-xylene, styrene의 VOC성분들이 주변 환경에 악취물질로 작용할 가능성이 상대적으로 클 것으로 예상된다.

배출처리 시설별 배출특성을 살펴 보면, 제조공정에서는 toluene이 1,257 ppb로 약취도 1도를 기록하였다. 따라서 제조공정내의 실내 작업장 근로자에 대한 지속적인 VOC의 노출 및 악취에 대한 대책을 강

구하는 것도 중요 할 것으로 사료된다. 스크러버와 같은 방지시설을 설치하고 운영함에 있어, styrene의 농도 자료가 악취 관리 측면에서 중요한 지표로 활용 가능하다. 스크러버 후단에서 관측한 styrene의 평균농도가 약 45.7 ppb로도 약취도 1을 기록하는 것으로 나타났다. 저장소에서는 toluene, o-xylene과 같은 특정 VOC 성분의 배출이 중요한 인자로 작용한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 주된 배출시설의 분류에 들지 않는 기타 지점들에서도 VOC 성분의 배출이 일정수준 또는 그 이상으로 일어난다는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 다양한 배출원이 존재하는 산업시설물에서는 고농도 VOC의 배출이 기대되는 제조 공정, 저장시설 및 폐수처리시설 등을 적절한 방법으로 밀폐하고 대기방지시설로 연결하기 위한 노력이 지속적으로 이루어져야 한다. 이러한 노력을 통해, 반월공단의 풍하 지역에 위치한 주거지역으로 악취가 확산되는 현상을 줄여 나갈 수 있는 대안을 제시할 수 있을 것이다. 또한, 밀폐된 제조 공정 및 실내 작업장 근로자의 VOC 및 악취의 노출에 대한 적절한 환기 시설과 대책을 마련하여, 작업장내 공기질을 관리하기 위한 노력도 추진되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 안산시의 악취조사 연구사업의 일부 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

국립환경연구원 (2003) 시화, 반월 지역 악취 배출원조사 및 저감방안 연구, 1 pp, 280 pp.
 김기현, 최여진, 홍윤정, 사재환, 박종호, 전의찬, 최정렬, 구운서 (2005a) 반월공단내 주요 산업시설물들의 대기 배출시설을 중심으로 한 주요 악취성분의 배출특성 및 배출원별 악취인자 선별 방식에 대한 예비 연구, 한국대기환경학회지, 21(2), 215-226.
 김기현, 주도원, 최여진, 홍윤정, 사재환, 박종호, 전의찬, 최정렬, 구운서 (2005b) 안산시 주거지역을 중심으로 한 환경대기 중 휘발성 유기화합물과 황제열 성분의 온라인 연속측정 연구, 한국대기환경학회지, 21(1), 107-118.

- 김석재, 강순아, 유지숙, 국승희, 윤진상, 문재동, 이형영 (2000) 유기용제에 장기간 폭로된 근로자의 정신 의학적 기능과 삶의 질, 신경정신의학회지, 39(5), 849-859.
- 김선태, 정구희, 이규성, 이종환 (2004) 반월, 시화 산업의 산업 업종별 VOCs 배출특성 조사, 2004년 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 147-148.
- 김영성, 송철한, 심상규, 김용표, 문길주 (1998) 여천 공업단지 봄, 가을 대기 중 휘발성 유기화합물 농도 비교 연구, 한국대기보전학회지, 14(2), 153-160.
- 송동웅, 송창근, 김영노 (2003) 반월, 시화공단 악취물질의 안산지역 확산 연구, 환경과학학회지, 24. 일본 악취법령 연구회, 핸드북 악취방지법 (2002), 489-491 pp.
- 전의찬 (2005) 안산지역 악취관리방안 연구, 안산환경기술개발센터, 109 pp.
- 최여진, 전의찬, 김기현 (2005) 반월공단의 대기배출시설을 대상으로 한 악취성 황화합물의 측정과 배출특성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 21(5), 515-524.
- 최여진, 오상인, 김기현 (2003) 서울시 북동지점에서 휘발성 유기화합물의 겨울철 연속관측 연구, 한국대기환경학회지, 19(5), 491-502.
- 최원욱, 김윤신, 박태술, 전준민 (1998) 공단지역 유해대기오염물질에 대한 인체위해도 평가에 관한 연구, 환경과 산업의학회지, 7(1), 1-13.
- 허귀석, 전선주, 김병주 (1998) 시화지구 대기 중 VOC 화합물 측정, 1998년 한국대기보전학회, 추계학술대회 발표 논문집, 385-386.
- 홍윤정, 전의찬, 김기현 (2005) 카보닐 계열의 배출 특성과 그에 따른 악취 발생 기여도 비교 연구: 반월공단 내 주요 산업시설물들을 중심으로, 지구환경정책학회 투고중.
- Derwent, R.G., T.J. Davies, M. Delaney, G.J. Dollard, R.A. Field, P. Dumitrean, P.D. Nason, B.M.R. Jones, and S.A. Pepler (2000) Analysis and interpretation of the continuous hourly monitoring data 26 C2-C8 hydrocarbons at 12 United Kingdom sites during 1996, Atmospheric Environment, 34, 297-312.
- Domeno, C., Fca. Martinez-Garcia, L. Campo, and C. Nerin (2004) Sampling and analysis of volatile organic pollutants emitted by industrial stack, Analytica Chimica Acta, 524, 51-62.
- Heeb, N.V., A.-M. Forss, C. Bach, S. Reimann, A. Herzog, and H.W. Jackle (2000) A comparison of benzene, toluene and C₂-benzenes mixing ratios in automotive exhaust and in the suburban atmosphere during the introduction of catalytic converter technology to the Swiss Car Fleet, Atmospheric Environment, 34, 3103-3116.
- Kesselmeier, J., U. Kuhn, A. Wolf, M.O. Andreae, P. Ciccioli, E. Brancaleoni, M. Frattoni, A. Guenther, J. Greenberg, P.D.C. Vasconcellos, T.D. Oliva, T. Tavares, and P. Artaxo (2000) Atmospheric volatile organic compounds (VOC) at a remote tropical forest site in central Amazonia, Atmospheric Environment, 34, 4063-4072.
- Komilis, D.P., R.K. Ham, and J.K. Park (2004) Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid waste, Water Research, 38, 1707-1714.
- Khan, F.I. and A. Kr. Ghoshal (2000) Removal of Volatile organic compounds from polluted air, Loss prevention in the process industries, 13, 527-545.
- Na, K.S., Y.P. Kim, K.C. Moon, I.I. Moon, and K. Fung (2001) Concentrations of volatile organic compounds in an industrial area of Korea, Atmospheric Environment, 35, 2747-2756.
- Na, K.S. and Y.P. Kim (2001) Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in seoul, Korea, Atmospheric Environment, 35, 2603-2614.
- Nagata, Y. (2003) Odor intensity and odor threshold value. Journal of Japan Air Clearing Association, 41(2), 17-25.
- Pio, C.A. and A.A. Valente (1998) Atmospheric fluxes and concentrations of monoterpenes in resin-tapped pine forests, Atmospheric Environment, 32(4), 683-691.
- Rappert, S. and Muller R. (2005) Odor compounds in waste gas emission from agricultural operations and food industries, Waste Management, in press.
- Yamamoto, N., H. Okayasu, S. Murayama, S. Mori, K. Hunahashi, and K. Suzuki (2000) Measurement of volatile organic compounds in the urban atmosphere of Yokohama, Japan, by an automated gas chromatographic system, Atmospheric Environment, 34, 4441-4446.