

산업단지 및 주거지역에 대한 환경대기 중 주요 악취물질의 농도특성에 관한 연구 - 안산시 반월공단을 중심으로 -

최여진 · 김기현* · 전의찬

세종대학교 지구환경과학과, 143-747 서울특별시 광진구 군자동 98

Odorous Pollutant Concentration Levels in the Ban-Wall Industrial Area and Its Surrounding Regions

Ye-Jin Choi, Ki-Hyun Kim* and Eui-Chan Jeon

Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

Abstract: In this study, the distribution patterns of major odorous compounds in ambient air were investigated in the areas surrounding the Ban-Wall industrial complex of Ansan, Korea (Aug. 2004 to Sep. 2005). The results indicated the environmental significance of several major odorous compounds which include carbonyl compounds, reduced sulfur compounds (RSC), and volatile organic compounds (VOC). When the results were compared on a diurnal basis, the afternoon time concentration of most odorous compounds were notably higher than their morning time counterparts. It also indicated that the odor concentrations differed greatly, in terms of spatial grouping scheme of data sets, such as between industrial area and non-industrial area. The comparison of spatial patterns indicated that the concentrations of most of the compounds at the industrial area were maintained at high concentration levels, compared to the surrounding areas. The overall results of this study thus suggest that the distribution of odorous compounds in a large industrial complex can exhibit a unique pattern of their own.

Keywords: odor compounds, Ban-Wall industrial complex area, RSC, VOC, carbonyl compounds

요약: 본 연구에서는 악취민원이 빈발한 경기도 안산시에 위치한 반월공단의 주거지역과 공단지역 등을 중심으로 주요 관리대상으로 설정된 악취성분들에 대한 환경대기 중 농도분포 특성을 2년여 기간동안 6차례에 걸쳐 조사하였다. 이들의 거동을 이해하기 위해, 시간적(오전과 오후) 및 공간적(공단 내외부의 위치) 기준으로 분포특성에 대한 비교를 시도하였다. 그 결과, 오전시간대에 비해 오후시간대에 고농도 분포가 현저하게 높은 것으로 나타났다. 이와 유사하게 공간적인 기준으로 비교한 결과도 공단 내부에서 관측한 결과에서 대부분의 성분들이 고농도를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 안산시 주변 및 공단지역의 환경대기 중에 존재하는 악취성분들이 시간적 및 공간적 기준으로 다양한 분포특성을 취한다는 것을 보여주었다.

주요어: 악취, 반월공단, 환원당, 휘발성 유기화합물, 카보닐 화합물

서론

생활수준의 향상으로 인해 삶의 질에 대한 요구나 수준도 가파르게 향상되고 있다. 이러한 발전적인 상

황의 이면에는 그에 대한 반대급부적인 현상도 동시에 나타나고 있다(Davoli et al., 2003; Emerson and Rajagopal, 2004). 특히 생활환경에서 나타나는 악취와 같은 문제도 (민원의 형태로) 행정기관 등에 불만을 호소하는 사례가 급증하는 양상에 있다. 그런데 이러한 민원이 대도시 인근에 위치한 대규모 산업단지 인근지역의 주민들에 의해 주로 발생한다는 사실에 주목할 필요가 있다(안상영과 최성우, 2005). 실제

*Corresponding author: khkim@sejong.ac.kr

Tel: 82-2-499-9151

Fax: 82-2-499-2354

로 대규모 공단지역 또는 매립장과 같이 주요 악취 유발시설물들이 존재하는 지점을 중심으로 주거지역이 풍하방향 또는 그와 유사한 위치에 존재할 경우, 이러한 민원이 심각한 환경문제로 발전하는 상황을 어렵지 않게 발견할 수 있다(Kim et al., 2005). 지금까지 이런 문제들을 이해하는데 필수적이고 긴요한 방안을 강구하기 위해, 여러 가지 관리대책의 도입이나 학제적인 연구과제등이 다양한 유형으로 시도되었다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고, 현재까지 공개적으로 제시된 다수의 연구결과들조차 대표적인 악취성분들의 발생이나 분포특성을 포괄적으로 설명하기에는 부족한 실정이다(Na and Kim, 2001; 윤병석 등, 2003).

시화반월공단이 소재한 안산지역은 인천, 울산, 여천지역 등과 함께 악취민원의 다발 지역으로 알려져 있다(조석연 등, 2002). 본 연구진은 안산시 지역의 악취문제를 해소하기 위한 노력의 일환으로 악취성분들에 대한 기기계측 방법 등에 기초하여, 2004년부터 여러 유형의 현장조사를 기획 및 실시하였다: [1] 산업단지 내 주요 배출원별 악취배출농도의 현장조사 및 악취배출특성의 DB 구축, [2] 동심원기법에 기초

한 공단 및 주거지역내 환경대기 중 악취성분의 농도계측 조사, [3] 주거지역을 중심으로 주요 악취성분들에 대한 온라인 방식의 연속계측 조사 등을 포함하는 연구를 수행하였다.

본문에서는 상기 나열한 3가지 유형의 조사방식 중 동심원 기법에 기초한 연구결과를 제시하고, 이를 토대로 환경대기 중에 존재하는 주요 악취성분들의 거동을 설명하고자 하였다. 동심원 관측을 위하여 가장 먼저 주거지역과 반월산단이 인접한 지점에 안산시를 대상으로 구심점을 지정하고, 반경 수 km 이내에 총 10개의 관측점을 설정하였다. 그리고 이들 조사 대상지점들을 중심으로 주요 악취성분들에 대한 농도분포를 2004년에서 2005년까지 2차년에 걸쳐 총 6차례의 현장조사를 실시하는 방식으로 조사하였다 (Fig. 1, Table 1). 총 6차례에 걸쳐 확보한 조사자료를 이용하여, 안산지역의 공단 및 주거지역의 환경대기에 존재하는 주요 악취성분들의 공간적 및 시간적 농도분포의 특성을 여러 가지 기준을 중심으로 분류하였다. 그리고 이들에 대한 세밀한 분석을 통해, 악취의 발생특성을 다각도로 설명하고자 하였다.

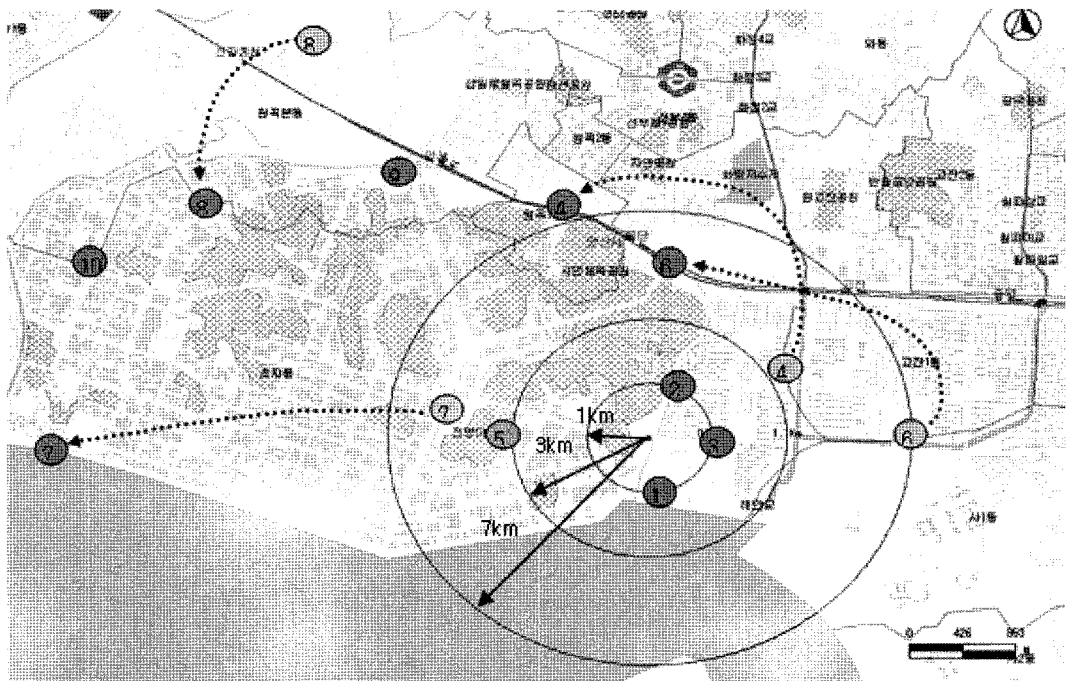


Fig. 1. A geographical map showing 10 sampling points selected in Ansan city, Korea. *Note that 4 sampling points (4, 6, 7, and 8) changed after the 3rd field campaign.

Table 1. A summary of field measurement durations for the 6 field campaigns. Information of sampling duration is given for each of the selected sites. The selected measurement points have changed at the 3rd field campaign (refer to Table 1)

Site	The order of field campaign	
	1	2
	04-8-11	04-8-12
1	19:30	7:50
2	20:00	7:45
3*	20:30	7:05
4	19:10	9:00
5*	21:05	8:20
6	19:30	6:50
7*	21:35	8:40
8	19:50	9:25
9*	20:15	9:30
10*	21:15	10:05

Site	The order of field campaign			
	3	4	5	6
	05-1-11	05-7-27	05-8-4	05-9-27
1	15:30	19:20	10:35	16:00
2	16:15	20:40	9:45	17:30
3	15:51	20:50	10:00	15:39
4N	15:47	19:50	11:47	17:00
5	15:00	20:00	11:00	16:23
6N	15:26	19:15	10:30	14:30
7N	17:00	21:17	9:40	16:00
8N	15:30	19:40	10:00	14:50
9	16:12	20:30	11:16	14:10
10	16:02	19:20	10:21	15:40

*Industrial (I): 3, 5, 7, 9, 10 and non-industrial (NI): 1, 2, 4, 6, 8.

**4 sampling points (4, 6, 7, and 8) changed after the 3rd field campaign.

연구방법

위치 선정배경

연구대상지역은 Fig. 1에 제시한 바와 같이 경기도 안산시의 반월산단, 주거지역, 수로가 경계한 공단입구 지역(126° 48' 27", 37° 17' 50")을 기점으로 설정하였다. 그리고 이 기점을 중심으로 여타 측정점들을 동심원상에 배치하는 방식으로 측정영역을 확장하였

다. 결과적으로 기점에서 반경 수 km 범위 내에 존재하는 10개 지점들을 동심원 측정의 대상으로 선정하였다. 이들 10개 측정점에 대한 간략한 위치설명은 Table 1에 제시한 바와 같다. 이들 조사지점은 1, 2차 조사를 실시한 후 3차 조사부터 지점들이 다수 교체되었다. 먼저, 1, 2차 조사의 10개 측정점들을 단순히 물리적인 위치를 기준으로 비교하면, 공단의 직접적인 영향권역에 해당하느냐의 유무로 다음과 같이 분류하는 것도 가능하다. 1, 5, 7, 9, 10번의 5개 지점들은 모두 공장시설에 인접한 지점으로서 공단의 직접 영향권에 위치한다고 볼 수 있다. 이에 반해, 나머지 5개 지점들(2, 3, 4, 6, 8번)은 공단의 간접 영향권에 위치한다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 위치 기준을 배출원의 직접적인 영향권역에 속하느냐의 여부를 식별할 수 있는 하나의 기준으로 활용하는 것이 가능하다. 또한, 3-6차 조사에는 Table 1에 제시한 바와 같이, 기존에 4, 6, 7, 8번에 해당하는 지점들을 4N, 6N, 7N, 6N으로 이동시켰다. 이렇게 새로이 이동시킨 조건에서 현장조사를 진행하였다. 측정지점은 공단의 영향을 직접적으로 받는 지역들을 확보하기 위해, 일부 지점들의 위치를 재선정하였다. 이를 통해 공단 내부지역들에 대한 악취성분들의 유동특성을 보다 면밀하게 설명하고자 하였다. 3-6차의 경우에도 단순히 물리적인 위치를 공단의 직접적인 영향권역에 해당하느냐의 유무를 기준으로 다음과 같이 분류하는 것도 가능하다. 먼저 1, 5, 7N, 9, 10번 5개 지점들은 공단의 직접영향권으로 그리고 나머지 5개 지점들(2, 3, 4N, 6N, 8N번)은 공단의 간접영향권에 위치한다고 볼 수 있다(7N 지점은 측정위치를 재선정한 후에도 직접영향권에 속한다.). 이러한 분류체계를 모델링의 기초 조사결과뿐만 아니라 공단 및 비공단지역들 간의 농도차이를 구분하는데도 활용하였다.

공간적인 특성 뿐만아니라, 시간대적인 농도특성을 확인하기 위하여, 2, 5차 조사에는 오전시간대를 중심으로 그리고 1, 3, 4, 6차 조사는 오후시간대를 중심으로 측정을 하였다. 참고로 5차 동심원 측정은 반월/시화 산단지역의 대부분의 사업장이 여름휴가 기간으로 가동을 멈춘 상태에서 이루어졌다. 그러므로 공장시설에 가동유무에 의한 기준을 중심으로 악취오염도를 판단할 수 있는 비교자료로 사용하는 것도 가능하다.

Table 2. A full list of odorous pollutants investigated in this study.

Order	Pollutants Full name	Short name (or chemical form)	Structural formula	Regulation criteria type*
A. Carbonyl compounds	Formaldehyde	Form-A	HCHO	I
	Acetaldehyde*	Acet-A	CH ₃ CHO	
	Acrolein	Acrolein	CH ₂ =CHCHO	
	Acetone	Acetone	CH ₃ COCH ₃	
	Propionaldehyde*	Propion-A	CH ₃ CH ₂ CHO	II
	crotonaldehyde	Croton-A	CH ₃ CH=CHCHO	II
	Butyraldehyde*	Butyr-A	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CHO	
	Benzaldehyde	Benz-A	C ₆ H ₅ CHO	
	Isovaleraldehyde*	Isovaler-A	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CHO	
	valealdehyde*	Vale-A	CH ₃ (CH ₂) ₃ CHO	
	o-Tolualdehyde	o-Tolu-A	CH ₃ C ₆ H ₄ CHO	
m-Tolualdehyde	m-Tolu-A	CH ₃ C ₆ H ₄ CHO		
p-Tolualdehyde	p-Tolu-A	CH ₃ C ₆ H ₄ CHO		
B. Reduced S compounds	Hydrogen sulfide*	H ₂ S	H ₂ S	I
	Methyl mercaptan*	CH ₃ SH	CH ₃ SH	I
	Dimethyl sulfide*	DMS	(CH ₃) ₂ S	I
	Carbon disulfide	CS ₂	CS ₂	I
	Dimethyl disulfide*	DMDS	(CH ₃) ₂ S ₂	
C. Total and individual VOC	Total VOC	TVOC		I
	Benzene	B	C ₆ H ₆	
	Toluene	T	C ₆ H ₅ CH ₃	
	Ethylbenzene	E	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	
	m,p-Xylene	MPX	(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	
	Styrene*	STY	C ₆ H ₅ CH=CH ₂	
	o-Xylene	OX	(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄	
	Bromobenzene	BB	C ₆ H ₅ Br	
	1,3,5-Trimethylbenzene	1,3,5-TMB	(CH ₃) ₃ C ₆ H ₆	
	1,2,4-Trimethylbenzene	1,2,4-TMB	(CH ₃) ₃ C ₆ H ₇	
p-Isopropyltoluene	p-IPT	C ₁₀ H ₁₄		
n-Butylbenzene	n-BB	C ₁₀ H ₁₄		
D.	Ammonia*	NH ₃	NH ₃	I
E.	Trimethyl amine*	TMA	(CH ₃) ₃ N	I

*Type I and II denote malod or compounds regulated from prior to and after Feb. 2005 by the Korean Ministry of Environment (KMOE), respectively.

시료채취 및 분석방법

위에서 선정된 10개의 대상지점들에 분포하는 악취성분들에 대한 조사는 다음과 같이 진행하였다. 현장조사는 Table 1에 제시한 것과 같이 2004년 8월부터 2005년 9월까지 총 6차 조사기간에 걸쳐 매회 10개의 채취점으로 부터 환경대기 시료를 채취하였다. 그리고 이들 현장시료를 실험실로 가져와서 정밀분석을 수행하였다. 시료의 화학적인 분석은 시료의 채취가 이루어진 시점으로부터 24시간 이내 신속하게 진행하였다. 다양한 악취성분들을 관측하기 위해, Table 2에 제시한 성분들을 각 성분별로 총 3가지의 채취 기법을 적용하였다. 그리고 이들 성분들에 대한 분석

을 위해 총 5가지의 독립적인 분석기법을 적용하였다. 먼저, 황계열, VOC계열, TMA 성분들에 대한 시료는 간접시료채취 방식에 기초한 진공형 링샘플러 방식으로 채취하였다. 시료의 채취 및 보관을 위해 10 L의 테들라백을 이용하였다. 특히 시료채취 단계에서 시료의 손실을 최소화하기 위하여, 실험에 사용할 채취시스템의 밸브와 라인은 모두 테플론재질을 이용하였다. 카르보닐계열의 성분들에 대한 채취는 DNPH-카트리지를 이용하였다. 이때 오존에 의한 간섭을 배제하기 위해, KI 오존 스크리버를 카트리지 전단에 연결하여 사용하였다. 암모니아는 공정시험법에 따라 봉산용액을 담은 임핀저를 직렬로 연결하여

Table 3. Results of basic analytical parameters for the determination of odorous compounds in this study (DL and precision)

	Odorous compounds	DL ^a (ppb)	Precision ^b (RSE in %)
1. Carbonyls (ppb)	Form-A	0.37	1.54
	Acet-A*	0.33	1.79
	Acrolein	0.30	2.37
	Acetone	0.31	1.91
	Propion-A*	0.32	1.67
	Croton-A	0.30	1.55
	Butyr-A*	0.33	1.99
	Benz-A	0.29	1.52
	Isvaler-A*	0.35	2.26
	Valer-A*	0.34	2.36
	o-Tolu-A	0.24	2.67
m-Tolu-A	0.32	1.22	
p-Tolu-A	0.31	2.30	
2. Reduced S (ppt)	H ₂ S*	16.6	1.95
	CH ₃ SH*	7.65	1.69
	DMS*	5.68	1.38
	CS ₂	2.04	0.54
	DMDS*	4.24	3.83
3. VOC (ppb)	B	0.14	1.55
	T	0.11	5.54
	E	0.11	3.82
	MPX	0.04	2.83
	STY*	0.12	3.78
	OX	0.08	3.25
	BB	0.24	2.95
	1,3,5-TMB	0.15	0.50
	1,2,4-TMB	0.21	1.06
	p-IPT	0.16	1.75
n-BB	0.23	1.56	
4. N-compounds	Ammonia*	80	10
	TMA*	0.1	

*Malodor compounds regulated by the Ministry of Environment in Korea.

a: DL = detection limit

b: RSE = relative standard error

채취하는 방식을 준용하였다. 암모니아를 흡수한 봉산용액은 테플론 마개로 유리병을 봉한 후, 저온으로 유지시킨 상태에서 실험실로 운반하였다.

이들 성분에 대한 세부적인 분석기법들은 대략 다음과 같이 요약할 수 있다. 또한 각 분석방식에 대한 분석화학적 품질관리(QC)의 기초적인 결과는 Table 3에 제시한 바와 같다.

1) 가장 우선적으로 황화합물들의 경우, 최첨단 김출기법으로 알려진 GC/PFPD(Donam Instruments, Model DS 6200, PFPD: O.I. Co., Model 5380)에 열탈착기법(thermal desorption unit(TDU)-UNITY, Markes, Ltd.)을 적용하였다(김기현 등, 2004; 최여진 등, 2004). 이를 통해, 환경대기 중에서(이들이 실제로 존재하는) ppt 수준의 농도까지 초정밀 분석을 실시하였다. GC 분석에서 시료 분리를 위한 컬럼으로는 BP-1(60 m × 0.32 mm, 5 μm, SGE사 제작)을 사용하였다.

2) 스티렌과 같은 VOC군의 악취성분은 GC-FID (Varian 3400, Varian) 방식과 앞서 언급한 UNITY 열탈착기법(thermal desorption unit: TDU-UNITY, Markes, Inc.)을 조합한 방식으로 측정하였다(최여진 외, 2003). 스티렌의 분석은 DB-VRX column (Length: 60 m, ID: 0.32 mm, Film thickness: 1.8 μm, J&W사 제작)을 이용하였다.

3) 알데하이드 성분의 분석은 DNPH 카트리지를 이용한 샘플링과 HPLC(Lab alliance, Model 500)를 조합하는 방식으로 채취 및 분석을 수행하였다(홍윤정과 김기현, 2005). 알데하이드 계열의 성분들을 효과적으로 분리검출하기 위해, 25 cm × 4.6 mm ID 비극성(reversed phase) 컬럼인 Hichrom 5 C₁₈를 사용하였다.

4) 트라이메틸아민(TMA)의 경우, 고체 흡착제를 이용한 추출방식(SPME: polydimethylsiloxane/dicynylbenzene, 65 μm film)에 기초하여, 대기 중의 TMA 성분들을 1차적으로 농축시켰다. 1-3차 측정에서는 GC/NPD(Shimadzu 17A)방식으로 그리고 4-6차 측정의 경우 GC/FID(Donam Instruments, Model DS 6200) 방식으로 변경하여 분석하였다. 두 가지 분석기법에 대한 실험오차는 유의수준 이하인 것으로 확인하였다.

5) 암모니아 성분의 경우, 공정시험방법 등에서 기초한 가장 보편적인 흡광도/비색측정 방식인 인도페놀법에 기초하여 분석을 실시하였다. UV/VIS Spectrophotometer(Thermo electron Corp. Model: Genesis™ 10 series)를 640 nm의 파장대에 고정하여 암모니아를 분석하였다.

Table 4. A statistical summary of odorous pollutant measurements (all concentrations in ppb unit) with their respective odor strength. All data obtained from 10 locations (N for all parameters = 60)

[1] Carbonyl compounds

	Form-A	Acet-A	Acrolein	Acetone	Propion-A	Croton-A	Butyr-A	Benz-A	Isovaler-A	Vale-A	o-Tolu-A	m-Tolu-A	p-Tolu-A
Mean	19.3	19.5(2)*	0.24	15.6	19.0(2)	0.41	12.4(2.5)	3.77	0.40(1)	0.37	0.21	0.20	0.96
SD	10.1	10.6	0.18	15.2	23.2	0.78	19.5	6.62	0.39	0.31	0.12	0.13	2.50
Med	20.6	15.7	0.21	13.4	15.0	0.22	5.26	1.99	0.24	0.25	0.23	0.22	0.23
Min	2.15	5.94	0.09	0.21	1.43	0.07	0.07	0.04	0.07	0.06	0.04	0.04	0.04
Max	42.2	46.8	1.44	96.9	166	5.58	120	36.4	1.71	1.68	0.42	0.65	12.72

[2] Individual and total VOC (TVOC = ppbC)

	TVOC	B	T	E	MPX	STY	OX	BB	1,3,5-TMB	1,2,4-TMB	p-IPt	n-BB
Mean	842	0.75	13.0	4.90	4.95	2.42	1.58	0.29	1.13	4.47	0.40	0.41
SD	1079	0.80	12.6	11.67	13.0	5.79	4.61	0.09	5.71	24.2	0.88	0.46
Med	388	0.46	9.08	1.68	1.62	1.23	0.50	0.24	0.18	0.42	0.22	0.23
Min	143	0.07	1.26	0.17	0.15	0.12	0.08	0.10	0.08	0.08	0.15	0.17
Max	4664	3.58	68.6	71.9	89.3	42.6	34.3	0.66	44.2	185	6.67	3.36

[3] Reduced S compounds and others

	H ₂ S	CH ₃ SH	DMS	CS ₂	DMDS	NH ₃	TMA
Mean	1.06(1)	0.12(1)	0.24(1)	0.84	0.36(1)	262(1)	1.02(1)
SD	2.07	0.23	0.83	0.54	1.21	238	0.92
Med	0.26	0.02	0.04	0.82	0.01	179	1.08
Min	0.01	1.98E-03	4.24E-03	0.01	1.05E-03	10.0	0.10
Max	10.34	1.18	6.24	2.23	7.85	896	2.58

*Numbers in the parenthesis denote malodor intensity.

결과 및 토론

전체적인 악취성분들의 분포특성

매회 조사 기간동안 10개의 지점에서 관측한 악취성분의 농도분포 분석결과 및 기본적인 환경변수들의 요약결과를 Table 4에 총괄하는 방식으로 제시하였다. 개별 성분명은 Table 3에 제시한 약어 표기 기준을 이용하였다. 총 6차례 동심원 측정결과를 총괄적으로 통계 처리한 결과를 평가하면 다음과 같다. 카르보닐 계열성분들 중에서는 아세트 알데하이드, 포름 알데하이드, 프로피온 알데하이드가 일관성 있게 비교적 높은 농도인 19 ppb대 수준으로 나타났다. 평균농도의 크기를 기준으로 보았을 때, 아세트알데하이드가 19.5 ppb로 가장 높다. 그렇지만, 최대값을 기준으로 보았을 때는 아세트이 96.9 ppb로 모든 비교 대상성분들 중에서 가장 큰 결과를 보였다. 이소발레르알데하이드와 발레르알데하이드를 위시한 대부분의 카르보닐 계열성분들은 기기적인 검출한계 수준에서 발견되었다. 다수의 방향족 VOC 성분들도, 일반적으로

서울과 같은 도심대기에서 관측되는 수준보다 조금 높은 수준으로 나타났다. 특히 톨루엔이 13 ppb로 가장 높은 평균농도를 기록하였다. 그리고 그 뒤를 이어서, 에틸벤젠, 엠피자일렌과 스티렌은 각각 4.90, 4.95, 2.42 ppb의 평균농도를 기록하였다. 참고로 본 연구진이 환경대기 중 VOC를 조사한 선행연구결과를 보면, 서울시의 군자동에서 겨울철에 연속 관측한 톨루엔의 농도는 9 ppb 수준인 것으로 보고하였다(최여진 등, 2003). 그리고 Na and Kim(2001)이 서울의 청량리에서 관측한 결과가 6.4 ppb 수준이었다. 민감한 악취성분으로 볼 수 있는 황계열 성분들의 경우, 황화수소가 1.06 ppb로 가장 높은 농도를 기록하였다. 다음으로 이황화탄소가 0.84 ppb의 농도로 검출되었다.

시간적 악취성분들의 분포특성

모든 악취성분들의 분석결과를 오전과 오후시간의 그룹으로 무리지어 비교하는 것도 악취발생특성을 이해하는데, 중요한 단서를 제공할 수 있다. 실제로 시간대의 농도분포를 비교한 결과에 의하면, 성분별로

Table 5. Comparison of the mean concentration levels of odorous pollutants (all concentrations in ppb unit) measured across 'Morning' and 'Afternoon' period in the study area (N for Morning parameters = 20 and for Afternoon parameters = 40)

[1] Carbonyl compounds

	Form-A	Acet-A	Acrolein	Acetone	Propion-A	Croton-A	Butyr-A	Benz-A	Isovaler-A	Vale-A	o-Tolu-A	m-Tolu-A	p-Tolu-A
Morning													
Mean	24.0	23.1(2)*	0.21	19.5	31.0(2)	0.19	11.2(2.5)	3.01	0.68(1)	0.44	0.17	0.16	0.73
SD	6.88	13.3	0.01	20.3	35.7	0.03	7.78	4.66	0.55	0.29	0.07	0.06	0.68
Med	24.3	16.6	0.21	13.5	24.5	0.19	7.54	1.59	0.24	0.25	0.17	0.16	0.30
Min	10.3	8.32	0.20	3.21	2.55	0.16	2.58	0.10	0.17	0.15	0.10	0.09	0.23
Max	37.7	46.8	0.22	96.9	166	0.22	24.4	20.8	1.71	1.08	0.24	0.22	2.78
Afternoon													
Mean	16.9	17.8(2)	0.25	13.6	13.0(1)	0.52	13.0(2.5)	4.15	0.26(1)	0.33	0.23	0.23	1.08
SD	10.6	8.53	0.22	11.7	9.18	0.94	23.3	7.43	0.14	0.32	0.13	0.15	3.03
Med	13.6	15.4	0.21	10.5	14.1	0.22	4.41	2.15	0.24	0.25	0.23	0.22	0.23
Min	2.15	5.94	0.09	0.21	1.43	0.07	0.07	0.04	0.07	0.06	0.04	0.04	0.04
Max	42.2	36.3	1.44	41.2	48.2	5.58	120	36.4	0.46	1.68	0.42	0.65	12.7
t	0.83	0.37	0.88	0.58	0.73	1.03	1.01	1.06	0.16	0.29	0.00	0.37	1.94
P	0.410	0.716	0.385	0.562	0.467	0.308	0.317	0.295	0.871	0.772	0.996	0.716	0.057

[2] Individual and total VOC (TVOC = ppbC)

	TVOC	B	T	E	MPX	STY	OX	BB	1,3,5-TMB	1,2,4-TMB	p-IPT	n-BB
Morning												
Mean	453	0.62	6.87	1.09	0.93	1.79	0.88	0.27	0.18	0.42	0.23	0.35
SD	769	0.50	5.05	0.81	0.92	2.58	1.61	0.09	0.03	0.34	0.21	0.23
Med	281	0.48	5.93	0.77	0.70	1.03	0.45	0.24	0.16	0.29	0.19	0.23
Min	152	0.07	1.50	0.32	0.15	0.22	0.08	0.10	0.15	0.08	0.16	0.17
Max	3704	1.39	22.6	2.81	4.28	12.1	7.51	0.37	0.23	1.27	1.12	0.95
Afternoon												
Mean	1036	0.82	16.1	6.81	6.96	2.74	1.94	0.30	1.60	6.50	0.49	0.44
SD	1166	0.92	14.1	13.9	15.5	6.87	5.52	0.10	6.97	29.6	1.06	0.54
Med	511	0.46	13.1	2.54	2.40	1.34	0.56	0.24	0.19	0.55	0.22	0.23
Min	143	0.14	1.26	0.17	0.16	0.12	0.08	0.13	0.08	0.18	0.15	0.23
Max	4664	3.58	68.6	71.9	89.3	42.6	34.3	0.66	44.2	185	6.67	3.36
t	2.02	0.91	2.83	1.83	1.73	0.60	0.84	1.17	0.91	0.92	1.08	0.72
P	0.048	0.368	0.006	0.073	0.089	0.554	0.405	0.247	0.368	0.364	0.285	0.476

[3] Reduced S compounds and others

	H ₂ S	CH ₃ SH	DMS	CS ₂	DMDS	NH ₃	TMA	Temp ¹⁾	RH ²⁾
Morning									
Mean	1.47(1)	0.03	0.02	1.02	0.03	226(1)	0.68(1)	32.9	54.4
SD	2.45	0.02	0.02	0.39	0.09	196	0.59	3.39	9.90
Med	0.41	0.03	0.02	0.90	0.01	164	0.68	32.9	53.4
Min	0.12	0.01	0.01	0.53	4.64E-03	17.1	0.10	27.9	36.5
Max	10.3	0.07	0.08	1.87	0.42	599	1.26	43.8	70.0
Afternoon									
Mean	0.86(1)	0.16(1)	0.34(1)	0.75	0.52(1)	286(1)	1.25(1)	22.5	49.8
SD	1.85	0.27	1.00	0.59	1.46	262	1.04	13.0	15.0
Med	0.22	0.02	0.11	0.70	0.01	189	1.08	28.6	48.3
Min	0.01	1.98E-03	4.24E-03	0.01	1.05E-03	10.0	0.10	-2.80	25.2
Max	7.73	1.18	6.24	2.23	7.85	896	2.58	34.4	76.8
t	1.08	2.13	1.42	1.85	1.49	0.87	2.22	3.48	1.21
P	0.285	0.037	0.160	0.069	0.141	0.387	0.031	0.001	0.232

**Numbers in the parenthesis denote malodor intensity. ¹⁾Temperature (°C) and ²⁾Humidity (%).

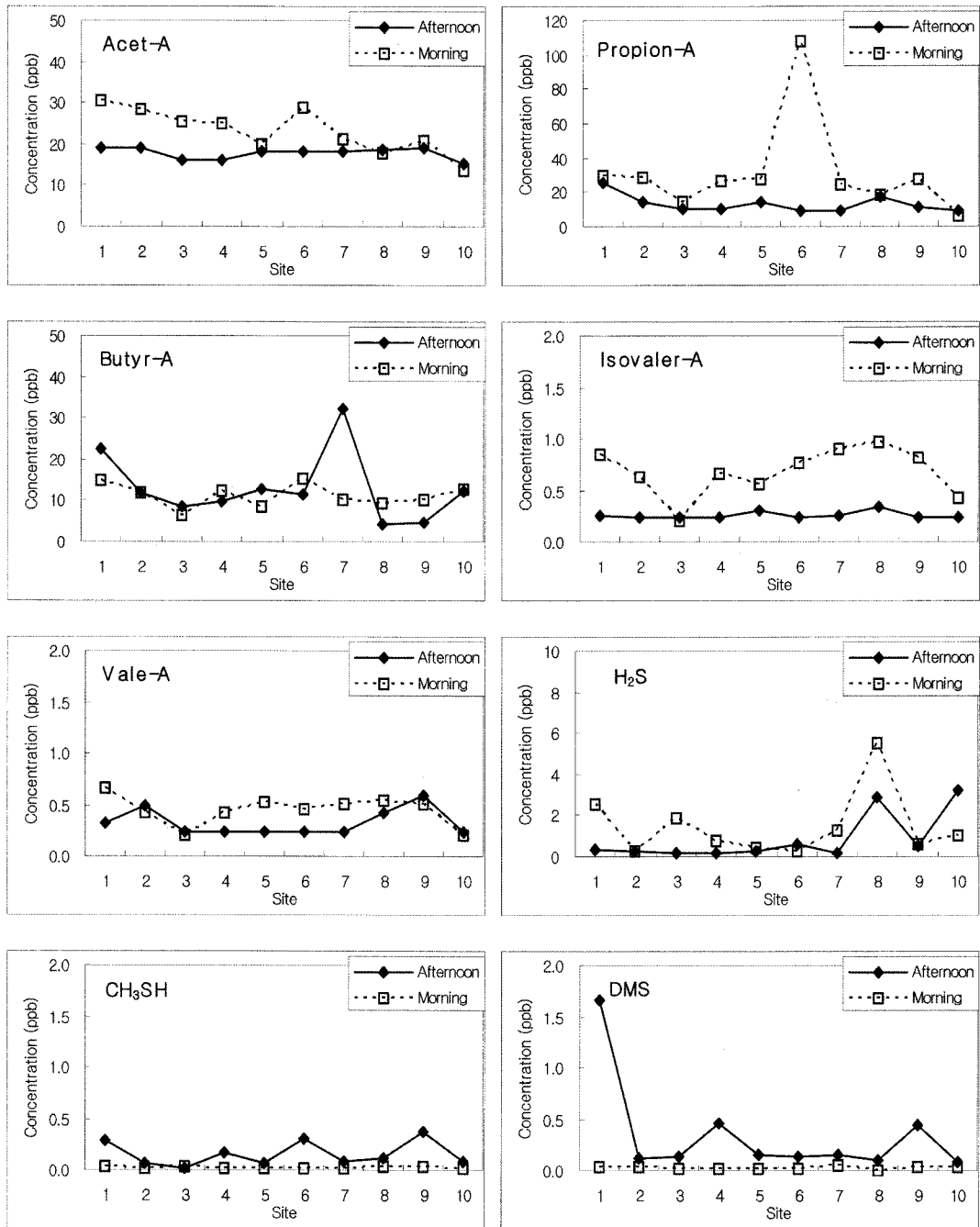


Fig. 2. Temporal variations patterns of odorous components are compared across 10 measurement points between AM and PM period.

어느 정도 경향성을 파악할 수 있다(Table 5). 시간의 기준을 정오를 기준으로 분류하여 오전시간대에 측정이 이루어진 2, 5차 조사와 오후시간대에 측정이 이루어진 1, 3, 4, 6차 조사로 비교분석하였다. 일부 관측점에서 현장 관측팀들이 비교적 강한 악취냄새를

경험한 오후에 대부분의 성분들은 고농도를 유지하는 것으로 나타났다. 실제 비교를 시도한 32개의 성분들 중에서 23개의 성분들은 오후시간대의 관측결과가 상대적으로 고농도를 띄는 것으로 나타났다. 특히 황화합물과 질소계열화합물의 경우, 오후시간대의 농도

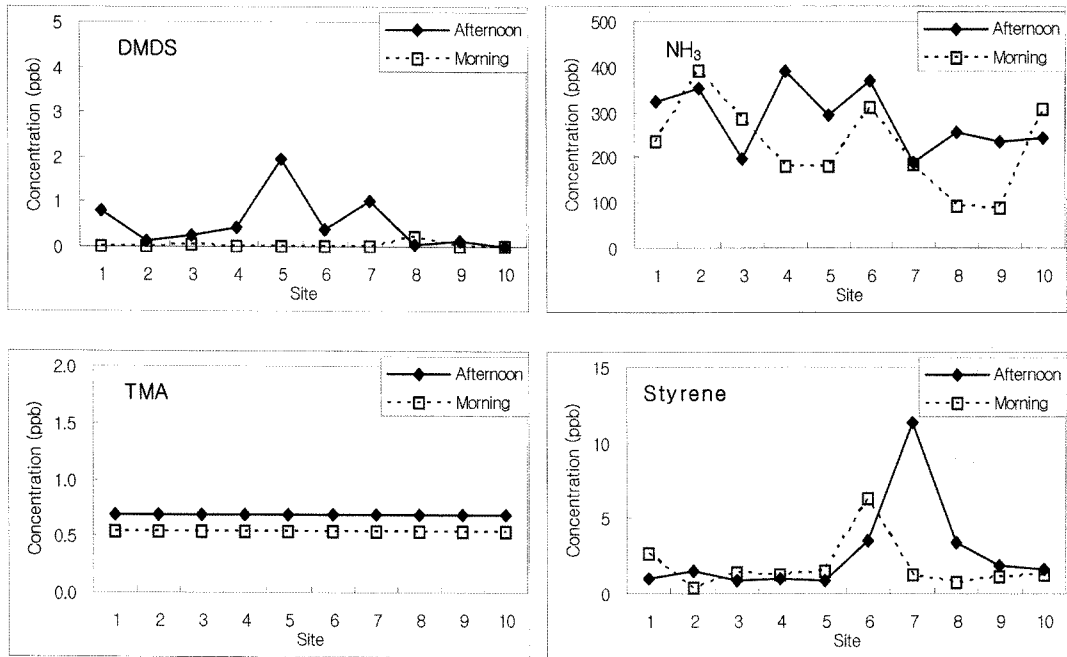


Fig. 2. Continued.

가 더 높게 관측되었다. 특히 트리메틸아민은 t-test결과 유의한 수준인 것으로 나타났다($t=2.22, P=0.03$). VOC의 경우에는 거의 모든 성분들이 오후에 농도가 더 높은 것으로 나타났다.(TVOC($t=2.02, P=0.05$)와 TEX($t=2.83, 1.83, 1.73; P=0.01, 0.07, 1.73$) 성분들이 t-test결과 유의한 수준인 것으로 나타났다.) 반면에 카르보닐계열의 성분들 중에는 오전에 고농도를 띠는 성분들이(다른 계열의 성분들보다) 비교적 높은 것을 알 수 있다. 특히 포름알데하이드, 아세트알데하이드, 아세톤, 프로피온알데하이드와 같이 주요 카르보닐 계열 성분들은 오전에 고농도를 취하는 경향이 뚜렷한 편이다.

본 연구에서 관측한 결과를 토대로 악취규제물질들에 대한 시간대별 특징을 10개 지점별로 Fig. 2에 제시하였다. 오후에 높은 농도를 보이는 VOC 성분 중 대표적인 물질인 스티렌은 7, 8지점에서 특히 그러한 특성이 두드러졌다. 카르보닐 계열 성분 중 부티르알데하이드 역시 7번 지점에서 오후시간대에 고농도를 보이고 있었다. 7번 지점은 공단에 속하는 지역으로, 공단의 배출에 의한 영향을 직접적으로 반영할 수 있다. 오전에 고농도를 보이는 성분 중 프로피온알데하이드를 비교한 결과, 6번 지점에서 오전에 특히 고농도를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

공간적 악취성분들의 분포특성

동심원 조사결과로부터 악취성분들의 공간적 분포 특성을 설명하기 위해, 공단과의 직접적인 영향권에 속하느냐의 유무를 기준으로 영향권과 비영향권에 대한 통계량을 비교분석하였다. Fig. 3에서 1, 2차 동심원 측정시에는 1, 5, 7, 9, 10번의 5개의 지점들을 공단의 직접영향권으로 구분할 수 있다. 이에 반해, 나머지 5개 지점들(2, 3, 4, 6, 8번)은 공단의 간접 영향권으로 분류할 수 있다. 3-6차 측정시에는 1, 5, 7N, 9, 10번을 공단의 직접영향권, 2, 3, 4N, 6N, 8N 번을 간접영향권으로 분류하였다. 그 결과, 일부 성분들이 이러한 영향권의 유무에 따라 농도분포에 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Table 6).(그러나 t-test 결과 통계적으로 유의하지는 않은 것으로 나타났다) 먼저, 카르보닐 계열 성분들의 특성을 비교해 보면, 직접영향권에서는 아세트알데하이드가 가장 높은 농도를 보였다. 그리고 그 다음으로 포름알데하이드, 프로피온알데하이드, 부티르알데하이드의 농도순으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 반면, Table 6에 제시한 공단의 간접영향권에 속하는 지역의 카르보닐 계열 성분들은 그것과 조금 차이가 있는 것을 발견할 수 있었다. 프로피온알데하이드가 21.2 ppb로 가장 높은 농도를 보이고 그 다음으로 포름알데하이드

Table 6. Comparison of the mean concentration levels of odorous pollutants measured between industrial (I) and non-industrial (NI) locations (N for All parameters = 30)

[1] Carbonyl compounds

	Form-A	Acet-A	Acrolein	Acetone	Propion-A	Croton-A	Butyr-A	Benz-A	Isovaler-A	Vale-A	o-Tolu-A	m-Tolu-A	p-Tolu-A
I													
Mean	18.2	19.1(2)*	0.22	16.8	16.8(2)	0.30	14.9(2.5)	2.87	0.41(1)	0.38	0.21	0.20	0.35
SD	10.1	10.2	0.09	18.4	13.0	0.33	24.9	3.36	0.40	0.34	0.12	0.12	0.35
Med	17.2	16.5	0.21	14.8	13.7	0.22	5.39	2.26	0.24	0.25	0.23	0.22	0.23
Min	2.15	5.94	0.09	0.21	2.34	0.07	0.22	0.04	0.07	0.06	0.04	0.04	0.04
Max	34.2	46.8	0.38	96.9	48.2	1.76	120	17.4	1.56	1.68	0.42	0.41	1.53
NI													
Mean	20.4	20.1(2)	0.26	14.5	21.2(2)	0.51	9.86(2.5)	4.67	0.39(1)	0.35	0.21	0.21	1.57
SD	10.1	11.0	0.24	11.3	30.3	1.05	11.9	8.72	0.38	0.29	0.12	0.14	3.44
Med	21.6	15.4	0.21	12.9	15.1	0.22	5.09	1.64	0.24	0.25	0.23	0.22	0.23
Min	4.33	8.32	0.09	0.64	1.43	0.07	0.07	0.04	0.07	0.06	0.04	0.04	0.04
Max	42.2	46.1	1.44	41.2	166	5.58	39.7	36.4	1.71	1.27	0.41	0.65	12.7
t	0.83	0.37	0.88	0.58	0.73	1.03	1.01	1.06	0.16	0.29	0.005	0.37	1.94
P	0.410	0.716	0.385	0.562	0.467	0.308	0.317	0.295	0.871	0.772	0.996	0.716	0.057

[2] Individual and total VOC

	TVOC	B	T	E	MPX	STY	OX	BB	1,3,5-TMB	1,2,4-TMB	p-IPT	n-BB
I												
Mean	855	0.84	13.8	6.23	6.06	2.77	1.92	0.29	1.92	7.95	0.28	0.45
SD	1072	0.95	14.1	15.8	17.1	7.59	6.28	0.10	8.05	34.1	0.26	0.59
Med	387	0.46	10.4	1.88	1.49	1.65	0.47	0.24	0.17	0.44	0.19	0.23
Min	183	0.07	1.26	0.32	0.15	0.12	0.08	0.10	0.08	0.08	0.15	0.23
Max	4664	3.58	68.6	71.9	89.3	42.6	34.3	0.66	44.2	185	1.47	3.36
NI												
Mean	829	0.66	12.3	3.58	3.84	2.07	1.25	0.29	0.34	0.99	0.53	0.37
SD	1105	0.62	11.0	4.90	6.72	3.20	1.86	0.09	0.37	1.51	1.21	0.27
Med	411	0.44	7.24	1.56	1.62	1.03	0.52	0.24	0.19	0.40	0.22	0.23
Min	143	0.09	1.80	0.17	0.20	0.12	0.08	0.10	0.15	0.10	0.16	0.17
Max	4085	2.95	43.4	20.2	31.7	12.1	7.51	0.49	1.63	7.16	6.67	1.26
t	0.09	0.89	0.48	0.88	0.66	0.46	0.57	0.20	1.08	1.11	1.12	0.66
P	0.927	0.375	0.636	0.383	0.512	0.644	0.574	0.841	0.286	0.270	0.269	0.511

[3] Reduced S compounds

	H ₂ S	CH ₃ SH	DMS	CS ₂	DMDS	NH ₃	TMA	Temp ¹⁾	RH ²⁾
I									
Mean	0.99(1)	0.13(1)	0.34(1)	0.84	0.53(1)	234(1)	1.02(1)	26.0	51.7
SD	1.80	0.26	1.15	0.49	1.66	202	0.93	12.0	14.7
Med	0.31	0.02	0.04	0.85	0.01	171	1.08	29.9	53.3
Min	0.01	1.98E-03	4.24E-03	0.01	1.05E-03	10.0	0.10	-2.80	25.2
Max	7.73	1.18	6.24	1.77	7.85	597	2.58	43.8	76.8
NI									
Mean	1.13(1)	0.10	0.13(1)	0.85	0.18	289(1)	1.02(1)	25.9	50.9
SD	2.33	0.19	0.24	0.60	0.42	270	0.93	11.9	12.7
Med	0.23	0.02	0.04	0.82	0.01	184	1.08	29.4	49.2
Min	0.01	1.98E-03	4.24E-03	0.05	1.05E-03	10.0	0.10	-1.30	28.9
Max	10.3	0.96	1.21	2.23	1.67	896	2.58	36.6	76.0
t	0.27	0.45	0.97	0.09	1.14	0.89	0.00	0.02	0.22
P	0.788	0.654	0.336	0.928	0.261	0.376	1.000	0.984	0.824

*Same as Table 5. ¹⁾Temperature (°C) and ²⁾Humidity (%).

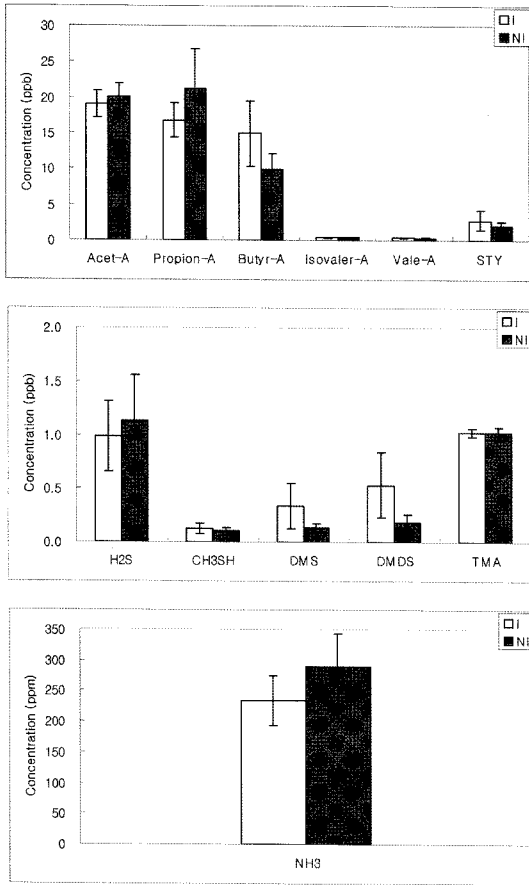


Fig. 3. Comparison of the mean concentrations of odorous pollutants measured between industrial (I) and the surrounding non-industrial (NI) locations investigated during this study.

드, 아세트알데하이드, 부티르알데하이드 순으로 감소하는 경향이 나타났다.

이러한 차이는 VOC 성분들 중에서 좀 더 뚜렷하게 나타났다. 실제로 벤젠을 위시한 대부분의 성분들이 공단의 직접영향권에서 관측한 농도가 비영향권의 결과 보다 높은 것을 확인할 수 있었다. 특히 에틸벤젠과 엠피자일렌의 경우, 공단의 영향을 직접적으로 받는 곳의 농도가 그렇지 않은 곳보다 2배 가까이 높은 것을 알 수 있었다. 황계열 성분들 중에서도 메틸머캅탄, 이황화메틸, 이황화이메틸 성분이 직접영향권에서 더 높은 것으로 나타났다.

Fig. 3는 공간적 분포특성을 구체적으로 비교하기 위해, 악취규제물질 12가지의 평균농도를 그래프로 도식화한 것이다. 결과를 보면, 전체 악취규제물질 12가지 중 절반에 해당하는 6가지 성분이 공단의 직

접영향권에서 농도가 더 높은 것을 알 수 있었다. 특히 부티르 알데하이드, 이황화메틸, 이황화이메틸과 같은 성분들의 농도 차이가 상대적으로 현저한 것으로 나타났다.

결론

본 연구에서는 대규모 산업단지가 인접한 주거지역을 대상으로 주요 관리 대상 악취성분들의 환경대기 중 농도분포를 측정하였다. 그리고 이 측정 자료들을 공간적 및 시간적 기준에서 구분한 후 여러 가지 통계적인 비교분석을 시도하였다. 2년여의 연구조사 기간중 총 6차례에 걸쳐 반월공단에 인접한 안산시 지역을 대상으로 매회 총 10개 지점에서 동심원 관측 방식을 실시하였다. 총 6차례 동심원 측정결과를 총괄적으로 통계처리한 결과를 평가하면 다음과 같다. 카르보닐 계열성분들 중에서는 아세트 알데하이드, 포름 알데하이드, 프로피온 알데하이드가 일관성 있게 비교적 높은 농도인 19 ppb대 수준으로 나타났다. 다수의 방향족 VOC 성분들도 일반적으로 서울과 같은 도심대기에서 관측되는 수준보다 조금 높은 수준으로 나타났다. 특히 톨루엔이 13 ppb로 가장 높은 평균농도를 기록하였고, 에틸벤젠, 엠피자일렌과 스티렌은 각각 4.90, 4.95, 2.42 ppb의 평균농도를 기록하였다. 민감한 악취성분으로 볼 수 있는 황계열 성분들의 경우, 황화수소가 1.06 ppb로 가장 높은 농도를 기록하였다. 그 다음으로 이황화탄소가 0.84 ppb의 농도로 검출되었다.

환경대기 중 악취성분들에 대한 관측이 오전과 오후시간대에 각각 실시되었다는 점 그리고 관측지점이 공단 내부와 외부에 상존한다는 지점들을 감안하여, 이러한 시공간적인 기준에 준하여 악취성분들의 농도 분포를 비교해 보았다. 그 결과에 의하면, 연구기간 중 관측된 절대 다수의 악취성분들이 오후에 그리고 공단지역에서 높은 농도분포를 유지하는 것으로 나타났다. 이러한 연구결과는 공단지역의 산업활동이 주변 지역의 악취발생에 중요한 원인으로 작용한다는 것을 시사한다. 또한 시간의 농도분포 차이가 뚜렷하게 드러나는 현상은 이와 연계된 기상적인 요인은 물론 물리적으로 공단에 인접한 가의 여부를 반영하는 공간적인 요인 등에 의해서도 상당 수준 차별화 되는 것으로 나타났다. 공단지역에서 배출되는 악취 성분들이 인접 지역에 미치는 영향을 보다 체계적으

로 진단하기 위해서는 본 연구진이 시도한 예비적 성격의 연구를 보다 확장하여, 주요 악취성분들의 시공간적 거동을 체계적으로 해석할 수 있는 계측자료를 지속적으로 확보하려는 노력이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 안산환경기술개발센터의 지원으로 이루어졌습니다. 그리고, 교신저자는 황화합물 분석기술을 부분적으로 지원한 학술진흥재단의 연구사업(KRF-2005-201-C00045)에도 사의를 표하는 바입니다.

참고문헌

김기현, 오상인, 최여진, 2004, 대기 중 악취항 성분들에 대한 GC 분석의 특성. 한국분석과학회지, 17(2), 145-152.

안산영, 최성우, 2005, 산업단지에서 배출되는 악취원인물질의 규명. 한국환경과학회지, 14(1), 81-89.

윤병석, 임익현, 정태섭, 2003, 제지공장의 악취 및 VOCs의 발생 특성에 관한 연구. 전북대학교 공학연구, 34, 93-97.

최여진, 김기현, 오상인, 손장호, 2004, 연속측정방법을 이

용한 도심권 대기질 내 저농도 황화합물의 관측에 대한 연구. 한국대기환경학회지, 20(2), 195-204.

최여진, 오상인, 김기현, 2003, 방향족 휘발성 유기화합물의 겨울철 연속 관측 연구. 한국대기환경학회지, 19(5), 491-502.

최여진, 전의찬, 김기현, 2005, 반월공단의 대기배출시설을 대상으로 한 악취성 황화합물의 측정과 배출특성에 대한 연구. 한국대기환경학회지, 21(5), 515-524.

홍윤정, 김기현, 2005, 대기 중 카보닐 계열 성분의 분석기법의 연구: 포름알데하이드와DNPH의 반응 특성을 중심으로. 한국분석과학회, 18(1), 43-50.

Davoli, E., Gangai, M. L., Morselli, L. and Tonelli, D., 2003, Characterisation of odorants emissions from landfills by SPME and GC/MS. Chemosphere, 51, 357-368.

Emerson, C. W. and Rajagopal, R., 2004, Measuring toxic emissions from landfills using sequential screening. Computers, Environment and Urban Systems, 28, 265-284.

Na, K. and Kim, Y. P., 2001, Seasonal characteristics of ambient VOC in Seoul, Korea. Atmospheric Environment, 35, 2603-2614.

Kim, K.-H., Choi, Y. J., Jeon, E. C. and Sunwoo, Y., 2005, Characterization of malodorous sulfur compounds in landfill gas. Atmospheric Environment, In Press.

2006년 2월 2일 접수
 2006년 3월 22일 수정원고 접수
 2006년 3월 23일 원고 채택