한국대기환경학회지 제 22 권 제 3 호
J. KOSAE Vol. 22, No. 3 (2006) pp. 337~351
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

생활악취 배출원의 악취 배출 특성 연구: 하수처리장을 중심으로

Odorous Emissions from Household-related Sources: A Case Study on a Sewage Treatment Plant

전의찬 · 사재환[1] · 김선태[2] · 홍지형[3] · 김기현*
세종대학교 지구환경과학과, 세종대학교 환경 · 에너지 연구소
[2]대전대학교 환경생명공학과, [3]국립환경과학원 대기총량과

(2005년 12월 15일 접수, 2006년 3월 13일 채택)

EC Jeon, JH Sa[1], ST Kim[2], JH Hong[3] and KH Kim*
Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University,
[1]Environmental & Energy Research Center, Sejong Unverisity
[2]Department of Environmental & Life Engineering, Daejeon University
[3]Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research

(Received 15 December 2005, accepted 13 March 2006)

Abstract

In this study, to describe the basic characteristics of strong odorous sources, the emissions of odorous compounds from a large-scale sewage treatment plant in K city were investigated. According to this study, the emission patterns of major odorous compounds were distinguished clearly by several factors such as treatment processing types, chemical compositions of odors released, and temporal changes (e.g., seasonal variations). For the purpose of this study, emission rates of odorous compounds were quantified using a dynamic flux chamber (DFC) method from three major treatment (T) processes including T1 (Grit sedimentation basin), T2 (Aeration tank), and T3 (Final sedimentation). When the relative strengths of each emission source were compared, the strongest one was seen from T1 with the maximum of NH_3 (34.5 μg/m^2/min) followed by H_2S (20.4 μg/m^2/min). While the strongest emissions of most odorous compounds were seen commonly from T1, those seen from T2 and T3 were significantly reduced relative to the ones found in T1. Considering the general patterns of odorous emission, it is concluded that control of odors from T1 unit is most important because of its considerably high emission strengths.

Key words : Emission, Malodor, Hydrogen sulfide, Chamber, Odor intensity

1. 서 론

생활악취배출원의 효율적 관리를 위해서는 배출이 이루어지는 악취물질에 대한 배출원 파악, 악취물질

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

의 배출 특성 및 강도, 악취물질의 배출량 등을 포함하는 배출원 목록(inventory) 작성과 모델링을 통한 기여도 분석 등이 필수적이다. 생활악취배출원에 대한 배출원 목록을 작성하기 위해서는 실측을 통하여 악취물질의 배출계수를 조사하고, 배출계수를 중심으로 악취물질의 시공간적 배출 특성을 살펴보아야 한다.

생활악취배출원의 악취배출원은 대부분 면배출원이므로 생활악취배출원의 악취물질 배출계수를 산정하기 위해서는 챔버시스템을 이용하여 플럭스를 측정하는 것이 일반적이다. 그런데 아직까지 이와 관련된 연구는 매우 부족한 상태이다. 일부 연구자들이 이에 대한 연구를 수행하였는데, 비교적 최근에 들어 전의찬 등은 광주시의 상무소각장 주변지역에 대한 악취발생원 실태조사를 통하여 생활폐기물 처리시설에 대한 악취배출 특성을 상세하게 조사한 바 있다(광주광역시, 2001). 또한 "환경기초시설에서 발생하는 유해대기오염물질 배출계수 산정연구"를 통하여, 폐수 및 하수처리장 등에서의 대기오염물질 배출계수의 산정을 시도한 바 있다(국립환경연구원, 2002).

본 논문은 "생활악취 배출원에서의 악취물질 inventory 작성 및 배출계수 개발" 연구의 연구 목적을 달성하기 위해, 3년에 걸쳐 조사한 연구결과를 바탕으로 한다. 본 연구에서는 생활악취 배출원 중 생활폐기물처리시설에 해당하는 하수처리장에서 배출하는 악취물질의 플럭스 특성 및 배출량을 산정하였다. 이를 위해, 열린챔버 (Dynamic Flux Chamber; DFC) 방식을 이용하여 (전의찬 등, 2005; US EPA, 1986), 처리공정별, 계절별 악취 플럭스를 측정하였다. 그리고 측정한 실측 플럭스 및 배출량을 바탕으로 하수처리장의 악취물질 배출계수를 도출하고, 공정별 시간별 배출 특성을 분석하고자 하였다

2. 연구 방법

본 연구에서는 K시에 소재한 하수처리장의 여러가지 처리공정에 대한 악취성분들의 발산량을 측정하기 위하여 여러가지 조사를 실시하였다. K시의 하수처리장은 표준활성법을 이용하여 하루 600천톤 규모의 하수를 처리하는 대규모 하수처리시설에 해당한다. 본 연구에서는 표 1에 제시한 바와 같이, 하계 1차례, 추계 2차례, 동계 2차례 등 - 총 5회에 걸쳐 본 조사대상 시설을 조사하였다. 매 조사시점에는 8가지 중요 악취성분들(황계열 4가지 성분, 스티렌, 트리메틸아민, 아세트 알데하이드, 암모니아)을 주분석 대상으로 설정하여, 악취배출량과 변화 특성을 파악하고자 하였다. 이들 대상 성분들이 하수처리장에서 배출되는 특성을 면밀하게 파악하기 위해, 하수처리시설의 가장 중요한 처리단계에 속하는 침사지, 포기조, 최종침전지 등을 중심으로 플럭스 값의 실측을 시도하였다.

2.1 시료채취

2.1.1 열린챔버시스템 (Dynamic Flux Chamber: DFC)

열린챔버는 지면용(Land Surfaces)과 수면용(Liquid Surfaces)으로 분류할 수 있다. 전자는 토양표면에 챔

Table 1. General information of the sewage treatment plant investigated in this study.

A. Operation condition

Processing method	Activated sludge method		
Operation size	600,000	ton/day	

B. Study site

Order	Process	Short name	Active area (m^2)
1	Grit sedimentation basin	T1	614
2	Aeration tank	T2	33,600
3	Final sedimentation basin	T3	25,598

C. Study period

Process	Summer (1st)	Fall (1st)	Fall (2nd)	Winter (1st)	Winter (2nd)
T1, T2, T3	2003. 08. 20	2003. 10. 27	2003. 11. 02	2004. 01. 07	2004. 02. 09

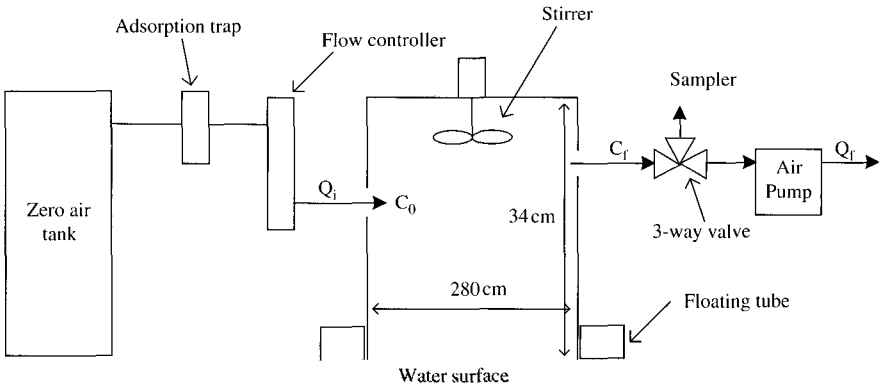

Fig. 1. A schematic diagram of dynamic flux chamber (DFC) used in this study.

버를 설치하고, 후자는 Chamber 밑부분에 부양 튜브(Floating Tube)를 넣어서 수면 위에 띄운 상태로 사용한다(Butnor and Johnsen, 2004; US EPA, 1986). 본 연구는 하수처리장을 중심으로 이루어졌기 때문에, 기본적으로 모든 측정은 수면용 챔버를 이용하여 수면 상의 플럭스를 측정하는 방식으로 이루어졌다.

열린챔버의 크기는 내경 28 cm, 높이 34 cm이며, 몸통은 원통형, 상부는 반구형으로 제작하였다(그림 1). 아크릴 재질로 만든 챔버 내벽은 내벽과 악취물질과의 반응으로 인한 시료 유실을 줄이기 위해 테플론(polytetrafluoroethylene)으로 표면처리를 하였다. 열린챔버 system의 플럭스 산출을 위해, 챔버의 유입구에는 zero air를 공급하였다. 또한 열린챔버 내부로 공급하는 제로공기의 유입유량을 5 L/min, 유출유량은 3 L/min으로 설정하였다. 그리고 챔버 내부의 공기흐름을 균질화 하기 위하여, Teflon재질의 stirrer를 항상 일정한 속도로 회전시켜 주었다. 유입유량을 유출유량보다 크게 한데 따른(열린챔버 내부의) 압력 발생 가능성을 줄이기 위하여, 열린챔버의 상단에 vent hole를 설치하였다. 그리고, 챔버의 상부에는 챔버 내부의 온도를 측정할 수 있게 K-type의 thermo-couple을 설치하였다. 또한, 열린챔버 내부의 압력을 가급적 대기압과 유사하게 유지할 수 있게 Stainless Steel (SS)재질의 감압 유니언(1/4″ bulkhead union [Swaglok, USA])을 설치하였다. 그리고 가스가 유출입되는 곳은 1/4″ 테프론 tubing을 연결하여 사용하였다.

2. 1. 2 챔버 유출 시료에 대한 채취 장비

악취물질의 시료채취는 분석방법에 따라 열린챔버 유출구에 각각 다른 시료채취장치를 적용하였다. 트리메틸아민, 황화합물, 스티렌의 경우에는 열린챔버의 유출구에 lung smapler를, 아세트알데히드의 경우에는 DNPH cartridge를, 암모니아의 경우에는 흡수장치를 각각 연결하였다.

2. 1. 3 진공형 간접채취방식 (lung sampling)

진공형 간접채취 (lung sampling) 방법은 악취물질 등을 포함한 대기오염물질의 채취과정에서 채취 대상 시료가 펌프 등의 내부를 통과시키지 않고 채취용기에 바로 집적되는 방식에 해당한다. 따라서, 진공형 간접채취 방법은 측정장치의 오염 가능성을 낮춘 상태에서, 공기시료를 채취할 수 있도록 고안한 시료채취방법에 해당한다. 본 연구에서는 악취물질 중 황화합물, 트리메틸아민, 스티렌 등의 시료를 채취하기 위한 용도로 이용하였다.

열린챔버의 유출구에 lung샘플러를 연결하여 악취물질을 채취하는 방법은 그림 2에 제시한 것과 같다. lung sampler에 테들러 재질의 악취채취백(5 혹은 10 L)을 넣은 후, 펌프를 이용하여 lung sampler의 내부에 음압이 점차 커지도록 하였다. 적정 수준의 음압에 도달하면, 밸브를 열어서 악취물질이 함유된 시료가 악취채취 백에 유입되도록 하였다. 악취 채취백으

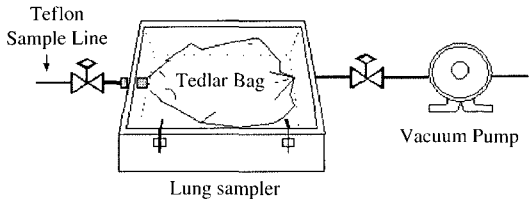

Fig. 2. A plot of field operation conditions for DFC and lung sampler.

로 유입시켜 주는 유량은 열린챔버의 유출유량과 같은 수준인 3 L/min에 맞추었다. 시료채취 장소에 따라 수분이 과다 발생할 경우, lung smapler의 유입구에 저온응축 방식을 이용한 수분제거장치를 설치하여 수분에 의한 영향을 최소화 하고자 하였다. 또한 Bag를 이용한 악취물질 시료채취 시 Bag 내면에서의 흡착으로 인한 손실을 최소화하기 위하여 Bag 내부를 동일한 시료를 이용하여 1회 이상 치환시킨 후에 시료를 채취하였다.

2. 1. 4 카트리지 (Cartridge) 채취 방식

아세트알데히드는 1 cm (i.d) × 4 cm (total length)의 폴리프로필렌 튜브에 350 mg의 2, 4-DNPH-coated silica (1mg DNPH)를 충전한 LpDNPHS10L 카트리지 (Supelco Inc., USA)를 사용하여 채취하였다. 이때 1차 유량조절장치 (Bios International Coperation: DryCal® DC-Lite, USA)가 부착된 시료채취용 펌프를 이용하여, 약 1 L/min의 유량으로 60분 동안 시료를 채취하였다 (총 채취량 ~60 L). 또한 오존에 의한 시료손실을 줄여 주기 위해, 1 cm (i.d) × 4 cm (total length)의 폴리프로필렌 튜브에 KI 결정을 채운 오존 스크러버를 LpDNPH S10L 카트리지 앞에 연결하여 사용하였다. 채취된 시료는 추출 전까지 냉장 보관하였다.

2. 1. 5 흡수법

암모니아의 채취는 흡수법을 적용하였다. 암모니아 흡수액은 붕산 5 g을 증류수에 녹인 용액을 1 L만큼 사용하였다. 암모니아 시료채취장치는 챔버 내로 청정공기를 5 L/min으로 유입시키고, 챔버 출구에 암모니아를 채취할 수 있는 2개의 200 mL흡수병에 흡수액을 각각 50 mL씩 채워 주었다. 그리고 이를 직렬로 연결하여, 3 L/min의 유량으로 흡수병에 공기시료를 통과시켜 주는 방식으로 시료의 채취를 완성하였다.

Table 2. A brief summary of sampling and analytical methods for odor measurements.

A. Methods

Chemical	Sampling	Analysis	Instrumentation
H_2S	Lung sampler	GC/PFPD plus TD	GC/PFPD plus TD (Markes, Ltd)
CH_3SH	Lung sampler	GC/PFPD plus TD	GC/PFPD plus TD (Markes, Ltd)
$(CH_3)_2S$	Lung sampler	GC/PFPD plus TD	GC/PFPD plus TD (Markes, Ltd)
$(CH_3)_2S_2$	Lung sampler	GC/PFPD plus TD	GC/PFPD plus TD (Markes, Ltd)
C_8H_8	Lung sampler	GC/FID plus TD	GC/FID plus SPIS TD (Donam)
$(CH_3)_3N$	Lung sampler	GC/NPD plus SPME	GC/NPD (Shimadzu 17A)
NH_3	Absorption	Indo-phenol	UV/VIS (Shimadzu UV-160A)
CH_3CHO	DNPH cartridge	HPLC method	HPLC : Yong-Lin M720

B. Basic analytical parameters

Chemical	DL in concentration Concentration	Sampling volume (L)	precision (RSE, %) 5 replicate analysis	Accuracy*
H_2S	10.9 ppt	4	7.38	Uncertainty of+5%
CH_3SH	2.4 ppt	4	5.96	Uncertainty of+5%
$(CH_3)_2S$	1.6 ppt	4	1.96	Uncertainty of+5%
$(CH_3)_2S_2$	0.8 ppt	4	1.52	Uncertainty of+5%
C_8H_8	1.1 ppb	4	5.47	Uncertainty of+0.05 μg/mL
$(CH_3)_3N$	0.1 ppb	10	3.89	Uncertainty of+5%
NH_3	10 ppb	20	2	
CH_3CHO	0.01 ppb	2.25	1.61	Uncertainty of±5%

All of accuracy information is based on the primary standard gas offered by the manufacturers.

2.2 분석 방법

2.2.1 시료분석 방법

본 연구에서는 표 2에서 보는 바와 같이, 여러가지 분석방식을 적용하여 악취물질들을 분석하였다. 간접 채취방식을 이용하여 Bag으로 채취한 황계열 성분, 스티렌, 트리메틸아민 등의 시료손실을 최소화 하기 위하여 차광용기에 보관하였다. 대부분의 채취시료들은 12시간 이내에 분석이 이루어지도록 하였다. 또한, 아세트알데히드와 암모니아 채취에 사용한 LpDNPH 카트리지와 흡수액은 분석 시까지 냉장보관하였다.

황계열 성분들은 저온농축 시킨 후 GC-PFPD법을 적용하여 분석하였다. 스티렌은 Bag으로 채취한 시료를 열탈착장치에 농축시킨 후 GC/FID법을 이용하여 분석하였다. 트리메틸아민은 Bag으로 채취한 시료를 SPME로 농축 시킨 후 GC/NPD법을 적용하여 분석하였다 (Pericas *et al.*, 2005; 박종호, 2003; 이종철, 2000). 백채취와 SPME를 이용한 트리메틸아민의 분석기법에 대한 세부적인 분석변수와 특성 등에 대한 정보는 최근에 본 연구진의 추가적인 연구를 통해 제시한 바 있다 (김기현 등, 2006). 아세트알데히드는 LpDNPH 카트리지로 채취한 후 아세토니트릴로 분해시키고, HPLC방법을 적용하여 분석하였다. 암모니아는 흡수방식으로 채취한 시료를 대기오염공정시험법인 인도페놀법을 적용하여 분석하였다.

2.2.2 배출계수 산정 방법

열린챔버 방식은 닫힌챔버와 달리 챔버 내에 일정한 양의 청정공기 (Zero grade air)를 흐르게 하고 유출구의 가스농도를 측정한다. 그 다음에 챔버가 덮고 있는 (즉, 악취가 배출되는) 면적으로 이를 나누어 주는 방식으로 악취 플럭스를 산정한다. 그리고 이렇게 구한 플럭스를 대상 면 오염원의 면적에 곱하는 방식으로 전체적인 악취배출량을 산정할 수 있다 (Kim, 1997; Kim and Lindberg, 1995; US EPA, 1986). 열린챔버 방법으로 구한 플럭스 자료는 배출계수의 산정에 직접적으로 활용하였다.

배출계수란 배출원에서의 활동도 (매립량, 소각량, 하수처리량 등)를 기준으로 대기오염물질이 대기로 배출되는 평균값을 산출하는 것을 의미한다. 일반적으로 해당 오염물질의 무게를 대기오염원의 활동도로 나누어 주므로서, 오염물질의 배출계수를 추정할 수 있도록 한다 (US EPA, 1997, 1994). 악취배출계수는 악취물질의 배출량을 예측할 수 있으나, 그 정밀도도 다양하기 때문에, 실제 악취물질의 배출량과 차이가 존재할 수 있다.

3. 결과 및 토론

3.1 배출농도와 플럭스 자료의 처리

본 연구를 통해 관측한 모든 악취 관련 분석결과는 표 3에 요약하여 제시하였다. 모든 분석 결과는 크게 농도와 플럭스 값을 중심으로 여러 유형으로 동시에 제시하였다. 먼저 열린챔버를 통해 유출입되는 가스는 다음과 같은 관점에서 크게 구분할 수 있다. 먼저 유입부분은 제로가스의 형태로 공급하고 유출부분은 악취성분이 적정 수준 이상이 함유된 상태로 채취한다. 따라서 본 연구에서 확보할 수 있는 분석자료는 [1] 유출구에서 채취한 가스의 농도와 [2] 그 농도를 이용하여 구한 플럭스 값으로 구분할 수 있다. 표 3에는 농도와 연계된 자료로서 ppb, $\mu g/m^3$, 악취도 (odor degree: OD), 악취강도 (odor intensity: OI)의 4가지 변수를 제시하였다. 그리고 플럭스와 직접적으로 연계된 자료로 3가지의 변수-flux 형태의 $\mu g/m^2/min$ 또는 mg/min 그리고 활동도와 연계된 kg/activity/ton -를 도출하였다.

농도와 연계된 변수들의 경우, 악취도 (OD)는 개별 항목의 측정농도를 일본 악취방지법에 기초한 악취도 환산공식에 대입하여 구한 것이다. 악취강도 (OI)는 악취의 감지 감도에 해당하는 것으로서, 이를 다시 역로그 값으로 치환한 것에 해당한다. 플럭스와 연계된 변수들의 경우, 다음과 같은 고려를 하였다. 가장 먼저 유출입구의 농도차, 제로 에어의 채취 유속, 챔버와 접촉하는 단면적을 동시에 감안하여 일반적인 플럭스를 $\mu g/m^2/min$ 단위로 산출한다 (Aneja *et al.*, 2001a). 그리고 단순히 챔버 하나로부터 구한 개별 플럭스 값에 조사대상 전체의 단면적을 곱해 주므로서, 조사 대상 시설 또는 공정을 전체적으로 대표할 수 있는 배출율을 mg/min으로 구할 수 있다. 그리고 다시 이렇게 산정된 단위시간당 악취배출량 (mg/min)은 처리량을 기준으로 한 활동도 (activity : ton/day)로 나누어 배출계수를 도출하였다.

Table 3. A statistical summary of emission concentration and flux related parameters measured during the entire study period.

	H_2S	CH_3SH	$(CH_3)_2S$	$(CH_3)_2S_2$	C_8H_8	$(CH_3)_3N$	CH_3CHO	NH_3
[1] Concentration (ppb)								
Mean	123	11.7	3.48	3.08	8.08	1.86	8.39	738
SD	326	23.8	4.41	11.4	4.12	2.40	6.40	790
Min	0.05	0.01	0.31	0.01	0.57	0.06	2.50	9.85
Max	1339	95.3	15.8	59.9	17.6	8.95	27.5	2479
N	25	25	26	27	17	24	25	27
[2] Concentration ($\mu g\ m^{-3}$)								
Mean	186	25.1	9.65	12.7	37.5	4.90	16.5	560
SD	496	51.1	12.2	47.0	19.2	6.33	12.6	600
Min	0.08	0.02	0.86	0.06	2.63	0.15	4.92	7.48
Max	2037	205	44.0	247	82.0	23.6	54.1	1881
N	25	25	26	27	17	24	25	27
[3] Odor Degree (OD)								
Mean	4.85	2.54	1.80	2.03	0.13	2.10	1.75	2.16
SD	5.38	2.79	1.90	2.60	0.29	2.20	1.63	2.21
Min	0.62	2.43	0.80	−0.28	−1.51	0.73	1.22	−0.97
Max	6.15	5.61	2.43	3.31	0.61	2.71	2.27	3.04
N	25	25	26	27	16	24	25	27
[4] Odor Intensity (OI)								
Mean	70878	350	63.8	108	1.34	126	56.6	145
SD	240788	612	79.8	394	0.52	158	43.1	162
Min	1.00	270	1.00	0.52	0.03	1.00	16.7	0.11
Max	1407285	408806	269	2019	4.07	518	188	1092
N	27	25	27	27	17	25	25	27
[5] Flux ($\mu g\ m^{-2}\ min^{-1}$)								
Mean	7.42	1.00	0.38	0.51	1.49	0.19	0.66	22.3
SD	19.7	2.03	0.49	1.87	0.76	0.25	0.50	23.9
Min	0.003	0.001	0.03	0.002	0.10	0.01	0.20	0.30
Max	81.1	8.15	1.75	9.82	3.27	0.94	2.15	74.9
N	25	25	26	27	17	24	25	27
[6] Emission rate ($mg\ min^{-1}$)								
Mean	6.74	0.85	2.19	2.23	13.9	2.02	8.48	336
SD	14.7	1.16	2.64	4.19	16.7	3.57	9.22	520
Min	0.06	0.02	0.17	0.03	0.49	0.02	0.26	1.47
Max	49.8	5.00	13.6	15.9	45.0	13.272	30.8	1815
N	25	25	26	27	17	24	25	27
[7] Emission factor (kg/Ativity-ton)								
Mean	1.5E-08	1.9E-09	4.8E-09	4.9E-09	3.1E-08	4.5E-09	1.9E-08	7.4E-07
SD	3.3E-08	2.6E-09	5.9E-09	9.3E-09	3.7E-08	7.9E-09	2.0E-08	1.2E-06
Min	1.3E-10	4.1E-11	3.8E-10	7.0E-11	1.1E-09	4.5E-11	5.7E-10	3.3E-09
Max	1.1E-07	1.1E-08	3.0E-08	3.5E-08	1.0E-07	2.9E-08	6.8E-08	4.0E-06
N	25	25	26	27	17	24	25	27

3. 2 조사대상 하수처리장의 악취 배출 특성

본 연구를 통해 관측한 전체 자료의 결과는 농도 및 플럭스와 연계한 두 가지 기준의 변수를 중심으로 제시하였다. 다양한 종류의 변수가 농도와 플럭스로부터 파생하였다는 점을 감안하여, 실질적으로 자료의 경향성에 대한 해석은 전체를 대표할 수 있는 ppb 단위의 농도와 일차적인 플럭스 산출치인 $\mu g/m^2/min$을 중심으로 제시하고자 하였다. 표 3에 제시한 전체 연구기간의 통계치를 단순한 관점에서 비교하면, 열린챔버의 유출구를 통해 계측이 된 8종류의

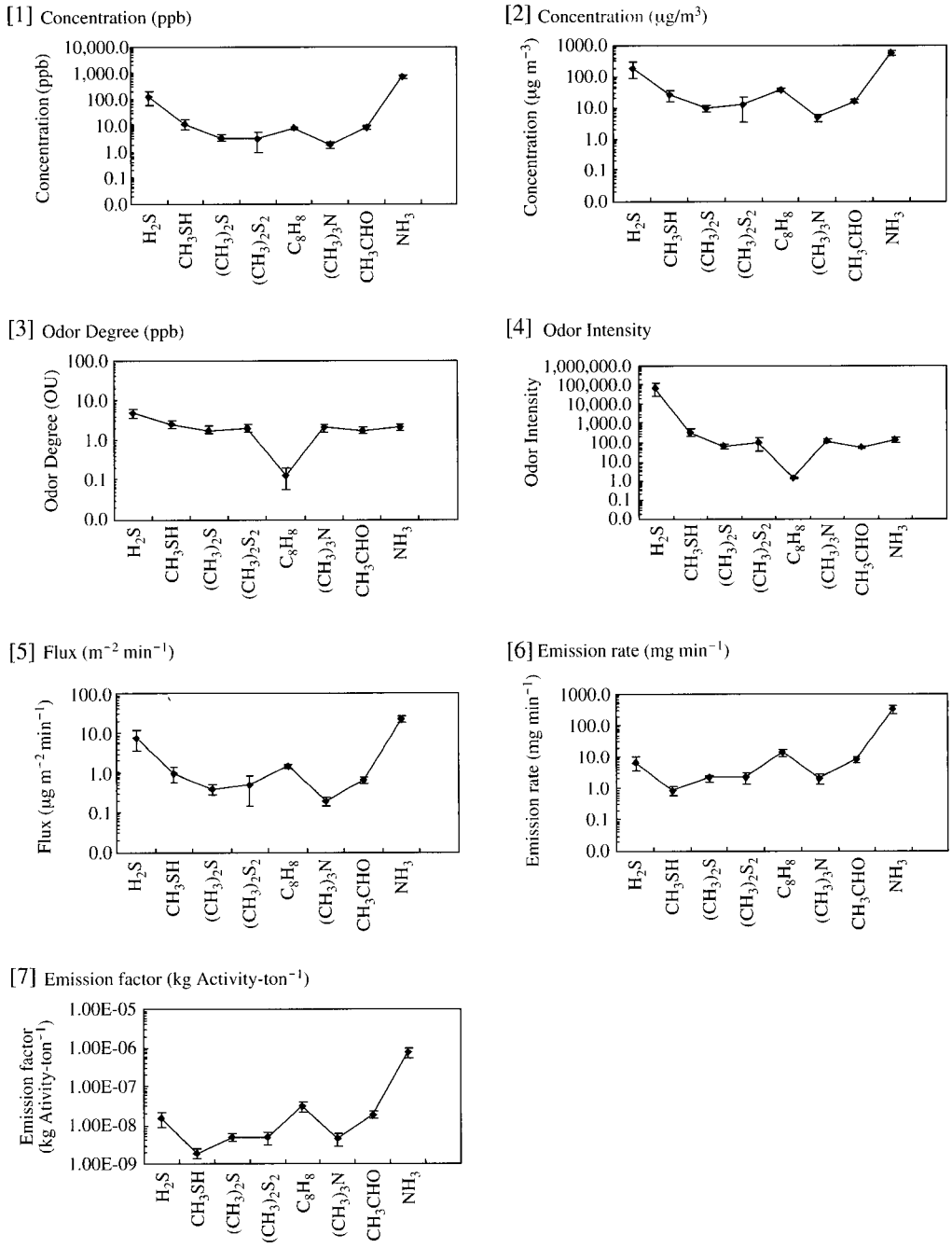

Fig. 3. Comparison of emission concentration and flux data sets measured during the entire study period.

악취성분들의 평균농도는 암모니아가 738 ppb 단위로서 가장 고농도, 그 다음으로 황화수소가 123 ppb를 기록하였다. 그러나 이들 두 가지 성분을 제외하면, 메틸멀캡턴, 아세트 알데하이드, 스티렌 등의 순

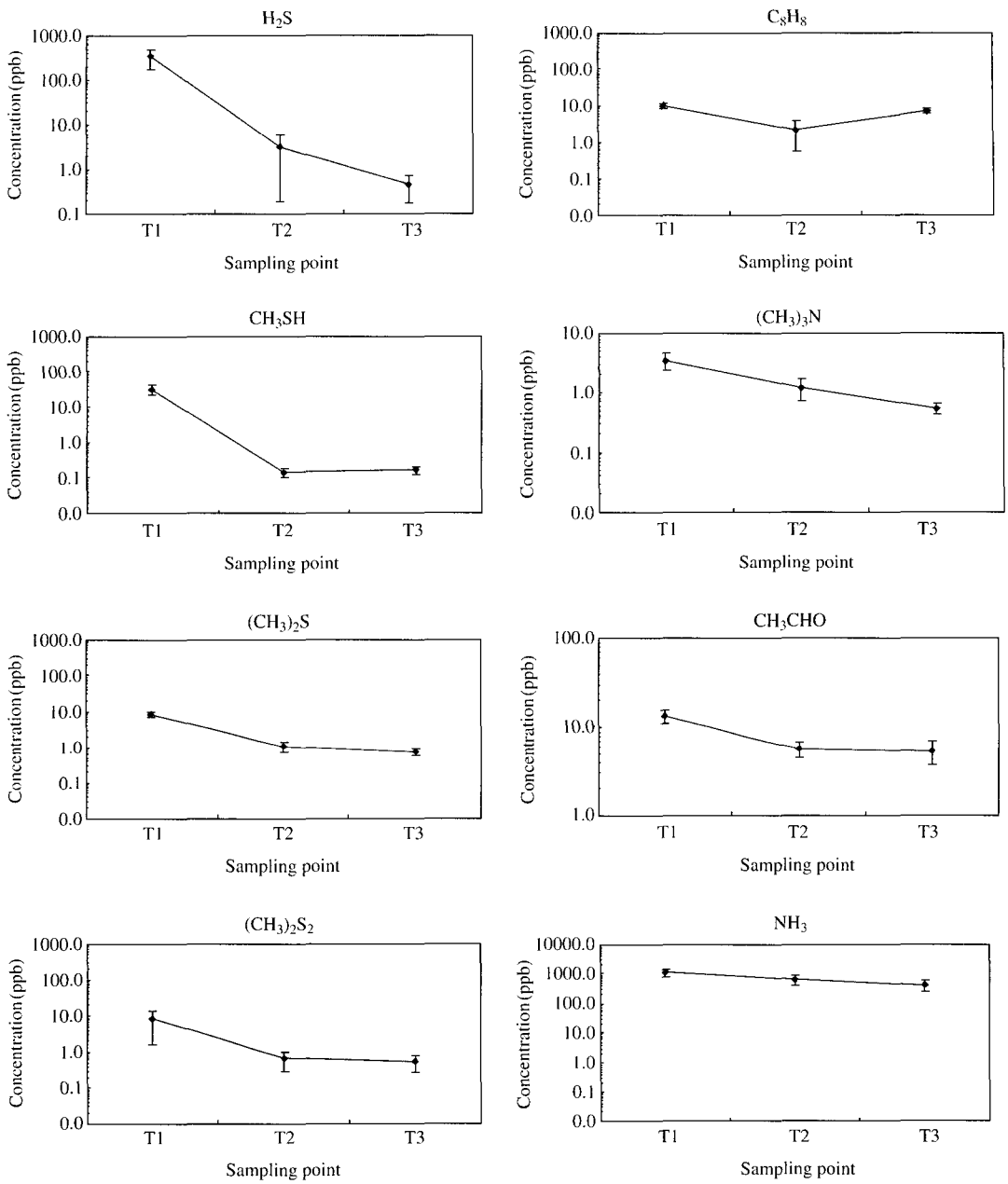

Fig. 4a. Comparison of emission concentration data sets measured among different treatment processing.

서를 유지하며, 모두가 수 ppb 범위 전후를 유지하였다. 이에 반해, 질량단위를 사용하는 플럭스 값의 경우, 단순 농도 비교의 상대적 순위와 유사하게 암모니아와 황화수소가 22.3과 7.42 μg/m^2/min으로서 가장 큰 수치를 기록하였다. 이들 다음에는, 스티렌, 메틸멀캡턴, 아세트 알데하이드 등이 차례로 그 뒤를 이었다.

표 4에는 하수처리장 내부의 조사 대상시설물인

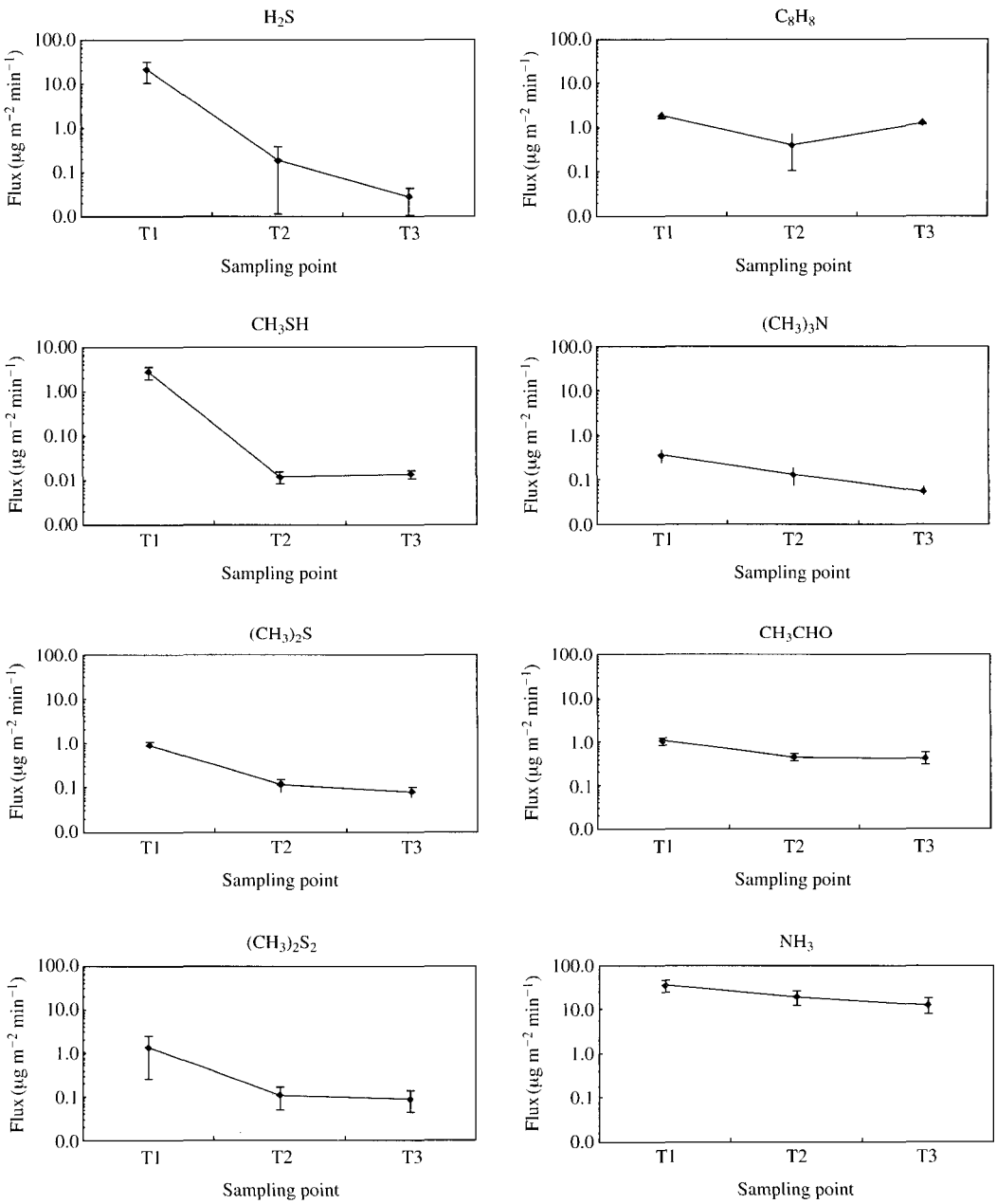

Fig. 4b. Comparison of emission flux data sets measured among different treatment processing.

침사지, 포기조, 최종침전지를 중심으로 농도와 플럭스 자료의 결과를 요약하였다. 이들 분석결과를 보면, 조사 대상 시설물들에 따라 배출량의 차이가 현저하다는 것을 알 수 있다. 특히 침사지의 경우, 포기조나 최종침전지에 비해 대부분의 악취성분들의 배출이 현격한 차이를 보일 정도로 강하게 나타난 것을 알 수 있다. 반면 포기조와 최종침전지에서 관측된 플럭스 값을 비교하면, 일부 성분을 제외하고는

Table 4. A statistical summary of concentration and fluxes for each sewage treatment processing.

A. T1 process

	H_2S	CH_3SH	$(CH_3)_2S$	$(CH_3)_2S_2$	C_8H_8	$(CH_3)_3N$	CH_3CHO	NH_3
[1] Concentration (ppb)								
Mean	337	32.1	8.35	8.06	10.1	3.40	13.5	1143
SD	488	31.0	4.31	19.5	3.96	3.13	7.09	992
Min	1.59	1.24	2.51	0.31	4.31	0.31	5.31	79.3
Max	1339	95.3	15.8	59.9	17.6	8.95	27.5	2479
[2] Flux ($\mu g\ m^{-2}\ min^{-1}$)								
Mean	20.4	2.75	0.92	1.32	1.87	0.36	1.05	34.5
SD	29.5	2.65	0.48	3.19	0.73	0.33	0.56	30.0
Min	0.10	0.11	0.28	0.05	0.80	0.03	0.42	2.40
Max	81.1	8.15	1.75	9.82	3.27	0.94	2.15	74.9
N	9	9	9	9	9	9	9	9

B. T2 process

[1] Concentration (ppb)								
Mean	3.07	0.14	1.06	0.66	2.16	1.19	5.66	649
SD	8.16	0.12	1.00	1.10	2.26	1.47	3.28	693
Min	0.09	0.03	0.31	0.01	0.57	0.07	2.86	9.85
Max	23.3	0.41	3.67	2.88	3.76	3.76	10.7	1788
N	8	8	9	9	2	9	8	9
[2] Flux ($\mu g\ m^{-2}\ min^{-1}$)								
Mean	0.19	0.01	0.12	0.11	0.40	0.13	0.44	19.6
SD	0.49	0.01	0.11	0.18	0.42	0.15	0.26	20.9
Min	0.01	0.003	0.03	0.002	0.10	0.01	0.22	0.30
Max	1.41	0.04	0.41	0.47	0.70	0.39	0.84	54.0
N	8	8	9	9	2	9	8	9

C. T3 process

[1] Concentration (ppb)								
Mean	0.45	0.16	0.72	0.54	6.99	0.54	5.43	424
SD	0.78	0.10	0.45	0.84	2.31	0.30	4.58	512
Min	0.05	0.01	0.32	0.02	2.98	0.06	2.50	23.1
Max	2.36	0.31	1.74	2.63	9.49	0.86	15.4	1552
N	8	8	8	9	6	6	8	9
[2] Flux ($\mu g\ m^{-2}\ min^{-1}$)								
Mean	0.03	0.01	0.08	0.09	1.29	0.06	0.43	12.8
SD	0.05	0.01	0.05	0.14	0.43	0.03	0.36	15.5
Min	0.003	0.001	0.04	0.003	0.55	0.01	0.20	0.70
Max	0.14	0.03	0.19	0.43	1.76	0.09	1.20	46.9
N	8	8	8	9	6	6	8	9

뚜렷하게 차별화할 수 있는 경우가 드문 것으로 나타났다. 침사지에서 고농도의 악취 배출이 뚜렷하지만, 이중에서도 특히 황계열 악취성분들은 타 성분들에 비해 가장 뚜렷하게 차별이 이루어진다. 침사지에서 배출되는 황화수소나 메틸멀캡턴은 타 시설에 비해 100배 정도 이상의 고농도를 보이며, DMS나 DMDS는 10여배 가까운 차이를 보인다. 황계열을 제외한 나머지 성분들은 침사지와 타 시설간 배출량의 차이가 현저하게 감소되었다. 암모니아를 비롯한 나머지 대부분의 성분들은 침사지의 배출량이 타 시설물에 비해 수 배 정도 큰 범위에서 배출되는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과를 보면, 배출시설물들간에 악취배출이 현저하게 차이가 나타나는데, 이중에서도 초기 처리시설인 침사지에서의 배출이 가장

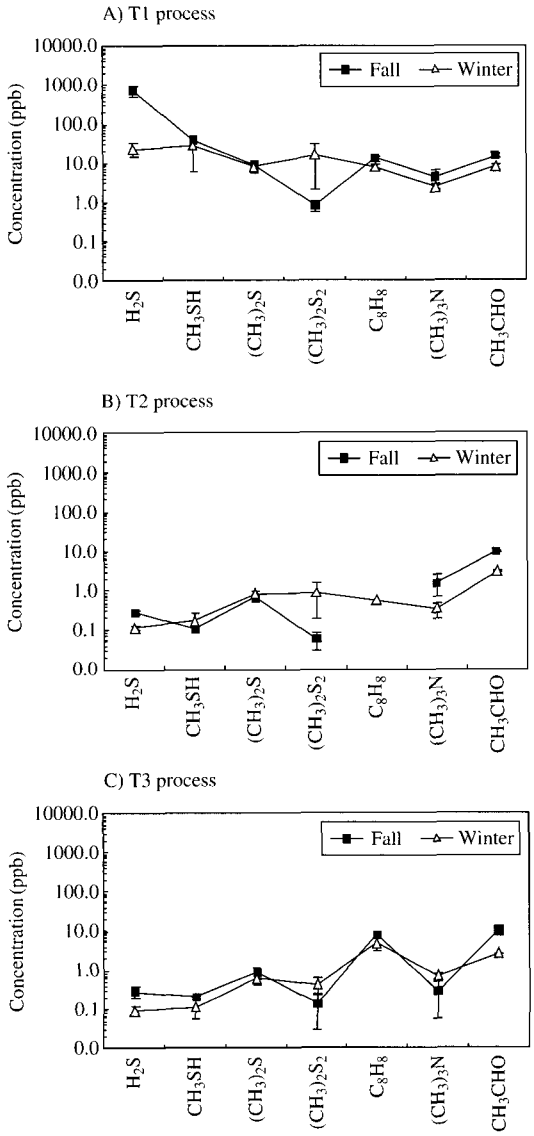

Fig. 5a. Seasonal pattern of emission concentration data sets for different treatment processing.

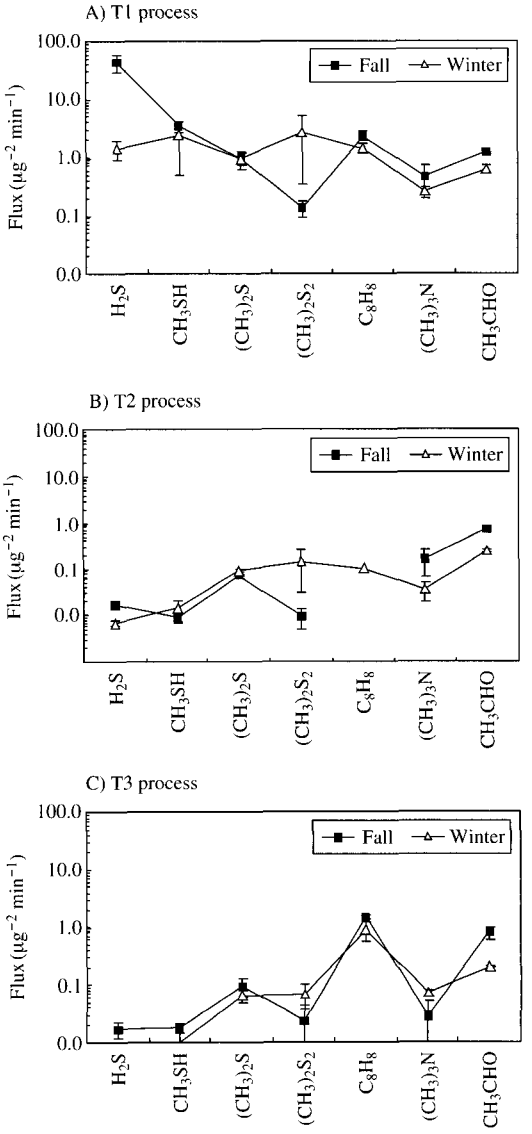

Fig. 5b. Seasonal pattern of flux data sets for different treatment processing.

현저하게 진행된다는 것을 알 수 있다. 그리고 이외에 동일한 시설물 내에서도 악취성분들의 배출규모에 현저한 차이가 존재할 수 있는데, 하수처리장의 침사지에서 가장 현격하게 배출이 두드러진 성분들로는 황화수소와 메틸멀캡턴과 같은 성분으로 요약된다는 것을 알 수 있다. 이들 성분들은 앞서 언급한 바와 같이 다음 단계의 처리시설로 넘어 가면서 배출량이 100여배 가까운 수준으로 떨어진다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 3 시간적 관점에서 본 하수처리장의 악취 배출 특성

본 연구에서는 한 개의 대규모 하수처리시설을 대상으로 여름에 1회, 가을에 2회, 겨울에 2회 현장조

Table 5. Seasonal patterns of odor concentration and flux for each processing unit.

A. T1 process

		H_2S	CH_3SH	$(CH_3)_2S$	$(CH_3)_2S_2$	C_8H_8	$(CH_3)_3N$	CH_3CHO	NH_3
[1] Concentration (ppb)									
Summer	Mean	6.64	13.5	7.03	3.05	8.95	3.11	27.5	1302
	N	1	1	1	1	1	1	1	1
Fall	Mean	734	40.8	8.71	0.83	12.8	4.46	15.4	2083
	SD	506	17.5	4.24	0.54	4.30	4.73	3.68	384
	Min	129	23.2	4.68	0.31	9.00	0.31	10.0	1558
	Max	1339	62.7	14.1	1.44	17.6	8.95	18.3	2479
	N	4	4	4	4	4	4	4	4
Winter	Mean	23.3	28.1	8.32	16.5	7.76	2.41	7.98	162
	SD	17.7	44.9	5.55	29.0	2.51	1.01	3.08	81.8
	Min	1.59	1.24	2.51	0.85	4.31	1.03	5.31	79.3
	Max	41.7	95.3	15.8	59.9	9.83	3.40	10.6	268
	N	4	4	4	4	4	4	4	4
[2] Flux ($\mu g\ m^{-2}\ min^{-1}$)									
Summer	Mean	0.40	1.15	0.78	0.50	1.66	0.33	2.15	39.34
	N	1	1	1	1	1	1	1	1
Fall	Mean	44.46	3.49	0.96	0.14	2.36	0.47	1.21	62.9
	SD	30.6	1.50	0.47	0.09	0.80	0.50	0.29	11.6
	Min	7.81	1.98	0.52	0.05	1.67	0.03	0.79	47.1
	Max	81.1	5.36	1.56	0.24	3.27	0.94	1.44	74.9
	N	4	4	4	4	4	4	4	4
Winter	Mean	1.41	2.41	0.92	2.71	1.44	0.25	0.62	4.90
	SD	1.07	3.84	0.61	4.74	0.46	0.11	0.24	2.47
	Min	0.10	0.11	0.28	0.14	0.80	0.11	0.42	2.40
	Max	2.53	8.15	1.75	9.82	1.82	0.36	0.83	8.09
	N	4	4	4	4	4	4	4	4

B. T2 process

[1] Concentration (ppb)									
Summer	Mean	23.3		3.67	2.23	3.76	3.17	4.26	195
	N	1		1	1	1	1	1	1
Fall	Mean	0.29	0.11	0.66	0.06		1.56	9.52	1338
	SD	0.07	0.05	0.25	0.05		1.79	1.10	348
	Min	0.21	0.06	0.31	0.01		0.07	8.53	1004
	Max	0.35	0.16	0.89	0.13		3.76	10.7	1788
	N	3	4	4	4		4	3	4
Winter	Mean	0.11	0.17	0.81	0.86	0.57	0.33	3.10	72.8
	SD	0.03	0.17	0.24	1.36		0.30	0.28	118
	Min	0.09	0.03	0.51	0.06	0.57	0.17	2.86	9.85
	Max	0.16	0.41	1.06	2.88	0.57	0.78	3.35	249
	N	4	4	4	4	1	4	4	4

사를 실시하였다. 비록 제한적이기는 하지만, 이들 자료로부터 악취성분의 계절적 배출특성을 진단하는 것도 어느 정도 가능하다(표 5). 그런데 실제 여름철의 경우, 모든 시설물에서 단 1차례의 측정만 이루어졌기 때문에 의미있는 비교결과를 도출하는 것이 어렵다. 따라서 각 배출시설별로 4회씩 관측이 이루어

Table 5. To be continued.

B. T2 process

		H_2S	CH_3SH	$(CH_3)_2S$	$(CH_3)_2S_2$	C_8H_8	$(CH_3)_3N$	CH_3CHO	NH_3
[2] Flux ($\mu g\ m^{-2}\ min^{-1}$)									
Summer	Mean	1.41		0.41	0.37	0.70	0.33	0.33	5.89
	N	1		1	1	1	1	1	1
Fall	Mean	0.02	0.01	0.07	0.01		0.16	0.75	40.4
	SD	0.004	0.004	0.03	0.01		0.19	0.09	10.5
	Min	0.01	0.01	0.03	0.002		0.01	0.67	30.3
	Max	0.02	0.01	0.10	0.02		0.39	0.84	54.0
	N	3	4	4	4		4	3	4
Winter	Mean	0.01	0.01	0.09	0.14	0.10	0.04	0.24	2.20
	SD	0.002	0.01	0.03	0.22		0.03	0.02	3.56
	Min	0.01	0.003	0.06	0.01	0.10	0.02	0.22	0.30
	Max	0.01	0.04	0.12	0.47	0.10	0.08	0.26	7.54
	N	4	4	4	4	1	4	4	4

C. T3 process

[1] Concentration (ppb)									
Summer	Mean	2.36			2.63			2.71	138
	N	1			1			1	1
Fall	Mean	0.28	0.21	0.86	0.14	8.08	0.27	10.1	863
	SD	0.16	0.08	0.59	0.23	1.36	0.30	4.54	483
	Min	0.12	0.15	0.56	0.02	6.80	0.06	7.25	456
	Max	0.43	0.31	1.74	0.48	9.49	0.48	15.4	1552
	N	3	4	4	4	4	2	3	4
Winter	Mean	0.09	0.11	0.58	0.41	4.80	0.67	2.60	55.9
	SD	0.05	0.11	0.29	0.38	2.57	0.22	0.11	32.3
	Min	0.05	0.01	0.32	0.05	2.98	0.45	2.50	23.1
	Max	0.16	0.23	0.88	0.94	6.61	0.86	2.70	93.9
	N	4	4	4	4	2	4	4	4
[2] Flux ($\mu g\ m^{-2}\ min^{-1}$)									
Summer	Mean	0.14			0.43			0.21	4.17
	N	1			1			1	1
Fall	Mean	0.02	0.02	0.10	0.02	1.50	0.03	0.79	26.1
	SD	0.01	0.01	0.06	0.04	0.25	0.03	0.36	14.6
	Min	0.01	0.01	0.06	0.00	1.26	0.01	0.57	13.8
	Max	0.03	0.03	0.19	0.08	1.76	0.05	1.20	46.9
	N	3	4	4	4	4	2	3	4
Winter	Mean	0.01	0.01	0.06	0.07	0.89	0.07	0.20	1.69
	SD	0.003	0.01	0.03	0.06	0.48	0.02	0.01	0.98
	Min	0.003	0.001	0.04	0.01	0.55	0.05	0.20	0.70
	Max	0.01	0.02	0.10	0.15	1.22	0.09	0.21	2.84
	N	4	4	4	4	2	4	4	4

진 가을과 겨울철의 자료를 중심으로 계절적 경향성을 비교분석하는 것이 가능하다. 앞서 전체 자료를 계절 구분없이 비교하였을 때의 결과와 유사하게 침사지의 결과는 계절적인 비교에서도 가장 현격한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히 암모니아와 황화수소의 경우 가을철의 배출량이 각각 62.9와 44.5

$\mu g/m^2/min$로서 겨울철에 비해 수 십배 큰 배출량을 기록하였다. 반면 다른 대부분의 성분들은 가을철의 결과가 겨울철에 비해 수 배 정도 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 계절적 특성은 전의찬 등(2005)이 본 연구와 유사한 하수처리장에서 실시한 연구에서도 유사한 플럭스 특성을 보였다. 침사지에서 관측된 대부분의 악취성분들이 비교적 뚜렷하게 계절적인 차이를 보인 것에 반해 다른 시설물의 결과는 상당 수준 구분되었다. 포기조나 최종침사지 모두 암모니아 성분 하나만이 가을철의 배출량이 겨울철에 비해 현저하게 큰 것으로 차별화되었다. 그러나 이를 제외하면, 차이가 거의 미미하거나 오히려 겨울철에 배출량이 더 크게 나타나는 경우도 확인되었다. 결과적으로 악취성분들의 배출 특성은 계절적 인자에 강하게 영향을 받을 수 있다는 것을 알 수 있다. 기온이 낮은 겨울철에는 상대적으로 생물학적 활동이 저하되기 때문에 악취의 발생이 저하되는 경향을 보였다. 이런 경향은 Aneja 등(2001b)이 축산폐수처리시설인 lagoon으로부터 배출되는 암모니아가 lagoon의 수온과 상관성이 있는 것으로 밝힌 것과 유사하다. 그리고 Engin *et al.*(2005)은 하수처리장의 악취도를 예측하는 하수의 BOD 농도를 활용하였는데, BOD 농도는 계절별로 차이가 크므로 악취 배출 특성도 계절별로 차이가 존재한다는 것을 의미하는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 주요 악취성분들의 배출특성을 조사하기 하기 위해, K시에 소재한 대규모 하수처리장을 택하여 계절별로 악취의 플럭스를 측정하고 비교분석하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 악취성분의 배출은 처리시설의 종류, 악취 성분들의 조성, 시간과 같은 환경변수의 영향에 따라 큰 차이를 보인다는 것을 보여준다. 특히 모든 시설물들 중에서 침사지에서 관측되는 악취성분의 배출은 현격한 차이를 보이며, 이 중에서 암모니아와 황화수소와 같은 성분의 배출규모가 양적인 관점에서 가장 크다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 관측한 결과에 의하면, 나머지 대부분의 성분들도 침사지에서의 배출이 대개 수 배 규모로 왕성하게 이루어진다는 것을 확인할 수 있다. 시설물들간의 배출경향을 기준으로 보면, 황계열 성분들의 변화가 가장 뚜렷하다. 타성분들에 비해 침사지에서의 배출 수준이 크기 때문에 침사지를 제외한 시설에서 황성분의 배출은 미미한 수준으로 줄어든다. 이러한 결과를 감안하면, 하수처리장에 대한 악취 배출을 관리하기 위해서는 침사지에 대한 설계나 운영 등에 보다 큰 비중을 두어야 할 것이다.

비록 제한적이나마, 가을과 겨울철에 확보한 자료를 구분하는 방식으로 본 연구자료를 계절적인 관점에서 비교해 보았다. 그 결과에 의하면, 성분별로 배출특성이 계절적인 요인에 따라 현저하게 영향을 받을 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히 암모니아와 같은 성분은 모든 시설물에서 예외없이 가을철에 현저하게 높은 배출량을 기록하고, 겨울철에 줄어드는 경향이 지속적으로 확인되었다. 이러한 결과는 기온과 하수 특성 등 계절적 요인이 악취의 배출에 상당히 중요한 역할을 한다는 것을 명확하게 확인시켜 주는 결과라고 간주할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 차세대 핵심환경기술개발사업 중 "대기 inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정 연구"의 연구비로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

광주광역시(2001) 상무신도심 주변지역의 악취발생원 실태조사, 77-116.

국립환경연구원(2002) 환경기초시설에서 발생하는 유해대기오염물질 배출계수 산정 연구.

김기현, 현성혁, 임문순(2006) 환경대기 중 TMA의 측정: Tedlar bag 방식의 채취와 SPME 분석법의 특성 연구. 한국분석과학회지, 게재예정.

박종호(2003) 생활폐기물 매립장의 악취 분석 및 배출 특성 연구, 동신대학교 대학원 석사학위논문.

이종철(2000) SPME와 GC/AED에 의해 규제악취성분의 동시분석법 개발, 경기대학교 대학원 석사학위논문.

전의찬, 사재환, 박종호(2005) 부유형 챔버를 이용한 하수처리장에서의 암모니아 배출 특성 연구, 환경영향평가학회지, *14*(5), 263-273.

Aneja, V.P., B. Bunton, J.T. Walker, and B.P. Malik (2001a)

Measurement and analysis of atmospheric ammonia emissions from anaerobic lagoons, Atmospheric Environment 35, 1949-1958.

Aneja, V.P., P.A. Roelle, G.C. Murray, J. Southerland, J.W. Erismar, D.W. Fowler, W.A.H. Asmam, and N. Patni (2001b) Atmospheric nitrogen compounds 2: emissions, transport, transformation, deposition and assessment, Atmospheric Environment 35, 1903-1911.

Butnor, J.R. and K.H. Johnsen (2004) Calibrating soil respiration measures with a dynamic flux apparatus using artificial soil media of varying porosity, European Journal of Soil Science 55, 3639-647.

Engin, G.O., I. Demir, and S.N. Engin (2005) Determination of the relationship between sewage odor and BOD by neural networks, Environmental Modeling & Software 20, 843-850.

Kim, D.S. (1997) Emission of nitric oxide (NO) from intensively managed agricultural soils in the lower coastal plain retion, North Carolina, Journal of Korean Sociery for Atmospheric Environment, 13(E), 11-24.

Kim, K.H. and S.E. Lindberg (1995) Design and initial tests of a dynamic enclosure chamber for measurements of vapor-phase mercury fluxes over soil, Water, Air and Soil Pollut., 80, 1059-1068.

Pericas, C.C., P.C. Falco, and R.H. Hernandez (2005) Comparative study of the determination of trimethylamine in water and air by combining liquid chromatography and solid-phase microextraction with on-fiber derivatization, Talanta.

US EPA (1986) Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission isolation flux chamber user's guide, Contract No. 68-02-03389-WA18.

US EPA (1997) Emission factor documentation for AP-42 section 2.4 municipal solid waste landfills revised, 3.1-4.31.

US EPA (1994) Development and selection of ammonia emission factors (final report), Contract No 68-D3-0034 WA 0-3, 5.1-5.11.