

축분 퇴비화시스템 운용방식에 따른 실내 대기오염 평가

김기연* · 최홍림* · 고한중* · 김치년**

서울대학교 농생명공학부*, 연세대학교 산업보건연구소**

Evaluation of Air Quality in the Compost Pilot Plant with Livestock Manure by Operation Types

K. Y. Kim*, H. L. Choi*, H. J. Ko* and C. N. Kim**

School of Agric. Biotechnol., Seoul National University*,
Institute for Occupational Health, Yonsei University**

ABSTRACT

Air quality in the livestock waste compost pilot plant at the Colligate Livestock Station was assessed to quantify the emissions of aerial contaminants and evaluate the degree of correlation between them for different operation strategies; with the ventilation types and agitation of compost pile, in this study. The parameters analyzed to reflect the level of air quality in the livestock waste compost pilot plant were the gaseous contaminants; ammonia, hydrogen sulfide, and odor concentration, the particulate contaminants; inhalable dust and respirable dust, and the biological contaminants; total airborne bacteria and fungi.

The mean concentrations of ammonia, hydrogen sulfide, and odor concentration in the compost pilot plant without agitation were 2.45ppm, 19.96ppb, and 15.8 when it was naturally ventilated, and 7.61ppm, 31.36ppb, and 30.2 when mechanically ventilated. Those with agitation were 5.50ppm, 14.69ppb, and 46.4 when naturally ventilated, and 30.12ppm, 39.91ppb, and 205.5 when mechanically ventilated. The mean concentrations of inhalable and respirable dust in the compost pilot plant without agitation were $368.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ and $96.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ with natural ventilation, and $283.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ and $119.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ with mechanical ventilation. They were also observed with agitation to $208.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ and $139.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ with natural ventilation, and $209.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ and $131.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ with mechanical ventilation. Averaged concentrations of total airborne bacteria and fungi in the compost pilot plant without agitation were observed to $28,673\text{cfu}/\text{m}^3$ and $22,507\text{cfu}/\text{m}^3$ with natural ventilation, and $7,462\text{cfu}/\text{m}^3$ and $3,228\text{cfu}/\text{m}^3$ with mechanical ventilation. They were also observed with agitation to $19,592\text{cfu}/\text{m}^3$ and $26,376\text{cfu}/\text{m}^3$ with the natural ventilation, and $18,645\text{cfu}/\text{m}^3$ and $24,581\text{cfu}/\text{m}^3$ with the mechanical ventilation.

It showed that the emission rates of gaseous pollutants, such as ammonia, hydrogen sulfide, and odor concentration, in the compost pilot plant operated with the mechanical ventilation and with the agitation of compost pile were higher than those with the natural ventilation and without the agitation. While the concentrations of inhalable dust and total airborne bacteria in the compost pilot plant with the natural ventilation and with the agitation, the concentrations of respirable dust and total airborne fungi in the compost pilot plant with the mechanical ventilation and agitation were higher than those with the natural ventilation and without the agitation of compost pile. It was statistically proved that indoor temperature and relative humidity affected the release of particulates and biological pollutants, and ammonia and hydrogen sulfide were believed primary malodorous compounds emitted from the compost pilot plant.

(Key words : Compost, Air quality, Pollutant, Odor, Dust)

I 서 론

최근 들어 농촌 정주환경에 대한 경각심이 날로 높아지고 있는 시점에 물과 토양의 오염과 더불어 대기 내 방출되는 오염물질 관리의 필요성 또한

대두되고 있다. 토양환원이라는 자연순환형 장점 때문에 축분퇴비 이용에 대해 경종농가의 선호가 점차 높아지고 있는 것이 사실이며, 생산 또한 계속 증가하고 있는 추세이다. 하지만 축분퇴비의 대량 생산에 따른 악취 및 대기환경 오염물질의

본 연구는 2001년도 환경부 환경기초조사사업 연구지원비에 의해 수행되었음.

Corresponding author : Ki Y. Kim, School of Agricultural Biotechnology Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea, Tel : (02) 871-4822, E-mail : kksnu5@hanmail.net

발생량도 증가하고 있어 이에 대한 대책 마련이 시급하다. 특히 퇴비 생산과정 중 발생하는 악취는 주변환경을 악화시키는 주요 오염원으로 지목되고 있으며(Haug, 1990), 급기야 축분 퇴비공장을 상대로 민원을 제기하는 사례가 발생되고 있다. 국립환경연구원 연구자료(1999)에 따른 공해요인별 전국 민원건수 현황을 살펴보면, 악취로 인해 접수된 민원은 1990년 137건에서 1993년 274건, 1996년 423건으로 계속 증가 추세를 알 수 있다. 악취와 더불어 축분퇴비공장 내 발생하는 유기먼지와 bioaerosol은 작업자에게 직접 노출되어 호흡을 통해 체내에 침투되어 호흡기 질병의 주된 원인(Louhelainen, 2001; Lacey, 1991; Bungler, 2000)이라는 연구 결과가 보고되고 있으며, 퇴비공장 작업자의 건강 보호를 위한 작업장 내 유해물질 노출기준 현장 평가도 여러 선진국에서는 수행되고 있다(Clark 등, 1984; Lees 등, 1987; Millner 등, 1994). 그러나 국내에서 운영되고 있는 축분퇴비공장은 작업환경이 매우 열악할 뿐만 아니라(김 등, 2002) 퇴비공장 작업 환경 평가도 거의 이루어지지 않고 있어 이에 대한 관리대책 마련이 시급한 실정이다. 또한 1999년부터 산업안전보건법(노동부, 2002)에 의거하여 노동부는 소규모 작업장의 작업환경평가를 본격적으로 수행하고 있기 때문에 대부분 5인 미만으로 운용되고 있는 축분퇴비공장은 현재의 작업환경을 개선하지 않는 한 법적인 제재를 면하기는 어려울 것이라 예측된다. 그러나 축분퇴비공장에서 발생하는 대기오염물질 제어에 관한 국내의 연구는 아직 미흡할 뿐만 아니라, 대기 오염물질의 발생량 산정과 같은 기초자료에 관한 연구도 거의 수행되지 못하고 있는 것이 지금의 현실이다.

따라서 이번 연구는 축분퇴비화 시스템 운용시 발생하는 대기오염물질의 정량화 및 운영방식에 따른 각 대기오염 물질 간의 상관성 분석을 통해 축분퇴비화 시스템내 환경 평가를 실시하는 데 목적을 두고 있다.

II 재료 및 방법

1. 축분퇴비화 시스템 pilot plant의 개요

- (1) 축분퇴비화 시스템의 위치 및 구조
서울대학교 부속실험목장에 위치하고 있는 축

분퇴비화 시스템 pilot plant는 지상 높이 6.7m, 길이 46.5m, 폭 13.5m로 1일 최대 축분처리량 10ton(수분 70% 기준)으로 시공되었다. 발효조 전면부에는 발효조 및 후숙조 이송라인, 탈취시설 등 **全** 공정을 monitoring할 수 있는 2층 중앙통제실이 있으며, 공장내부는 밀폐 형태로 음압(音壓)으로 운전되고 있어 악취가스의 관리가 용이하도록 설계되었다(〈Fig. 1〉 참조)



Exterior view



Interior view

Fig. 1. The compost pilot plant for experimentation.

(2) 축분퇴비화 시스템의 공정 구성

혼합공정은 발효조 옆에 위치하여 축분과 수분조절재의 이송거리를 최소화하였으며, 지표水準보다 2m 낮은 부분에 설치하여 벨트 컨베이어를 통한 반입 축분과 수분조절재 이송 차량의 작업이 최대한 편리하도록 설계되었다. 발효조는 스크류 교반식으로 운영되며, SRT(Sludge Retention Time)는 최대 40~5일로 운전되었다. 후숙조의 운영은 발효조와 함께 한 반응조 안에서 진행되도록 설계되었다. 각 공정별 자세한 제원사항은 아래 〈Table 1〉과 같다.

Table 1. Specifications of the compost pilot plant

Process	Dimension
Mixing	W(11.2m)×L(3.7m)×H(2.4m) = 99.5m ³
Composting	W(37.3m)×L(6m)×H(1.8m) = 402.8m ³
Taking out	W(2.2m)×L(1.1m)×H(1.1m) = 2.7m ³

2. 실험 설계

2002년 9월 중순부터 2003년 2월 초순까지 실험이 진행되었으며, 환기 방식 및 교반 유무에 따른 축분퇴비화 시스템내 대기 환경 평가를 위해 실험기간을 총 80일로 설정하였다(〈Table 2〉 참조). 각 실험조건에 대한 외부기상의 영향을 최대한 줄이기 위해 기상조건이 유사한 날을 임의로 10일 선택하여 실험을 수행하였으며, 작업자 노출 정도 평가를 위해 NIOSH(1994)에서 제시한 분석방법을 통해 시스템 내에서 발생되는 대기환경 오염물질의 농도를 산정하였다. 시료 채취 위치는 퇴비 더미 중앙 약 30cm 상부 지점 3곳을 선정하였으며, 시스템 내부의 물리적 요인 및 측정 대상 대기 오염물질의 분석방법은 〈Table 3〉과 같다.

3. 통계처리

본 실험에서 얻어진 분석 결과는 SAS package program(2000)을 이용하여 분산분석 및 상관분석을 실시하였으며, 처리 평균간 비교는 Duncan의 다중 분석법을 적용하여 분석하였다.

III 결과 및 고찰

1. 온도 및 상대습도 변화에 따른 축분 퇴비화 시스템 내 대기오염 물질 발생량 분석

(1) 가스상 물질

1) 암모니아(NH₃)

〈Fig. 2〉에 나타난 바와 같이 실험기간 동안 축분 퇴비화 시스템의 실내 온도는 8~ 3℃ 범위를 유지하고 있었다. 이에 따른 암모니아 농도는 강제환기 1반시가 평균 30ppm을 나타냈으며, 그 외 다른 실험 조건하에서는 평균 10ppm 이하의 낮은 암모니아 농도를 보이는 것으로 분석되었다. 일반적으로 주변 온도가 상승하면 퇴비더미 표면에 집적되어 있는 NH₄⁺ 이온이 암모니아(NH₃) 형태로 전환된 후 표면 내 암모니아

Table 2. Experiment design for evaluation of air quality in the compost pilot plant

Natural Ventilation		Mechanical Ventilation	
20 days		20 days	
¹ W/ Agitation	² W/O Agitation	¹ W/ Agitation	² W/O Agitation
10 days	10 days	10 days	10 days

¹W/ : With.

²W/O : Without.

Table 3. Specifications of the airborne environmental factors measured in this experiment

Environmental parameters		Measurment instrument	Sampling time	Method
Physical factor	Temperature	6242, Kanomax	-	-
	Relative humidity	SK-110TRH, Sato		
Gas	Odor concentration	Odor sensor(XP-329, Cosmos)	-	-
	NH ₃	-	30 minute	NIOSH(1994)
	H ₂ S	-	30 minute	NIOSH(1994)
Particle	Inhalable dust	-	8 hours	NIOSH(1994)
	Respirable dust			
Bioaerosol	Total airborne bacteria	-	30 minute	Thorne et al.(1992)
	Total airborne fungi			

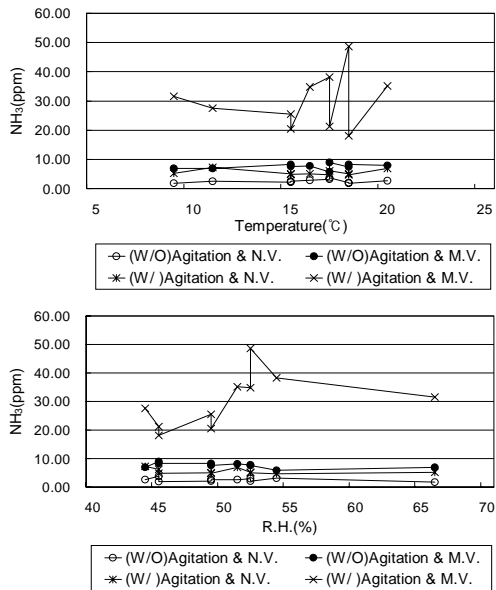


Fig. 2. Fluctuation of NH_3 concentration in the compost pilot plant with operation types according to the physical environments.

의 부분압을 증가시켜 대기 중으로 빨리 휘산된다고 알려져 있으나(Freney 등., 1981), 이번 실험에서는 내부 온도 15~18°C 범위에서의 강제환기·교반시를 제외하고는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 이는 축분 퇴비화 시스템 내 투입된 축분의 종류가 암모니아 발생이 가장 적은 우분 사용되었고, 수분조절재를 기준량보다 많이 투입되었기 때문에 상대적으로 암모니아 발생을 저감시키는 요인으로 작용하여 내부온도와 거의 무관한 상관성 평가가 이루어지지 못한 이유라 판단된다. 내부 상대습도의 경우, 실험기간 동안 43~68% 범위를 나타내는 것으로 조사되었는데, 온도의 경우와 마찬가지로 강제환기·교반시를 제외하고는 10ppm 이하의 낮은 농도를 보이는 것으로 조사되었으며, 전반적으로 축분 퇴비화 시스템 내에서 발생하는 암모니아는 상대습도와 거의 무관한 것으로 분석되었다.

2) 황화수소(H_2S)

실험기간 동안 황화수소의 농도는 강제환기·교반시 최고 56ppb, 자연환기·교반시 최저 11ppb 까지 생성되는 것으로 조사되었는데, <Fig. 3>에

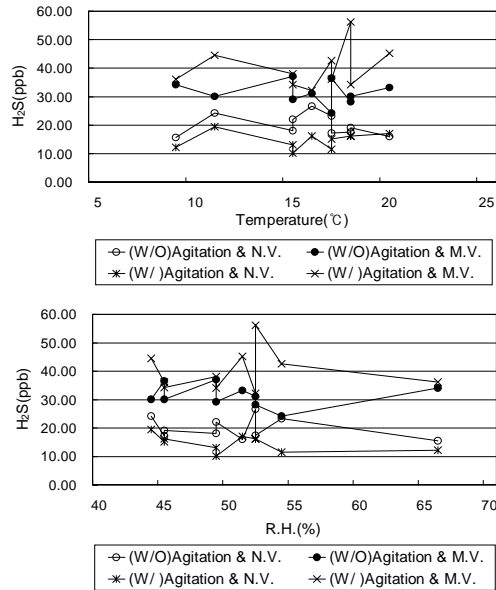


Fig. 3. Fluctuation of H_2S concentration in the compost pilot plant with operation types according to the physical environments.

서와 같이 모든 실험조건 하에서 내부온도와 상관성은 거의 없는 것으로 분석되었다. 내부 상대습도도 온도와 마찬가지로 모든 실험조건 하에서 발생하는 황화수소 농도와 상관성이 거의 없는 것으로 조사되어 축분 퇴비화시스템 내에서 발생하는 황화수소는 내부온도와 상대습도 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

3) 악취농도(Odor concentration)

<Fig. 4>에 나타난 바와 같이 축분 퇴비화 시스템 내 온도 변화에 따른 악취농도의 변화는 앞에서 언급한 암모니아의 발생 양상과 거의 비슷한 것으로 분석되었다. 이는 암모니아와 악취농도와의 높은 상관성을 간접적으로 암시해 주는 것으로 축분 퇴비화 시스템 내에서 발생하는 악취의 원인물질 중 하나가 암모니아라는 것을 유추할 수 있다. 시스템 내부 상대습도 변화에 따른 악취농도의 변화 양상도 온도의 경우와 거의 비슷한 경향을 나타내 모든 실험조건 하에서 발생하는 악취농도는 시스템 내부 상대습도의 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 조사되었다. 실험이 수행된 기간 동안 상

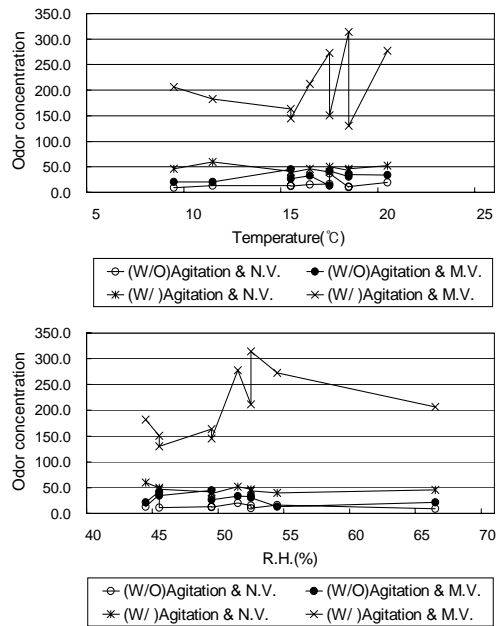


Fig. 4. Fluctuation of odor concentration in the compost pilot plant with operation types according to the physical environments.

대습도가 극단적으로 높은 경우가 관찰되지 않았기 때문에 상대습도와 가스상 물질 간의 상관성을 심도있게 연구하기 위해서는 이에 대한 보완 실험이 요구되는 바이다.

(2) 입자상 물질

1) 흡입성 분진(Inhalable dust)

〈Fig. 5〉에서 나타난 바와 같이 시스템 내부 온도 변화에 따른 흡입성 분진간의 관계는 15~20℃ 범위에서 모든 실험조건이 온도가 상승함에 따라 흡입성 분진의 농도도 증가하는 경향을 보였다. 하지만 내부 상대습도 변화에는 일정한 발생 양상을 보이지 않는 것으로 분석되었다.

2) 호흡성 분진(Respirable dust)

흡입성 분진과는 달리 호흡성 분진의 농도는 시스템 내부 온도와 상대습도 변화에 의해 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다(〈Fig. 6〉 참조). 이는 호흡성 분진의 입자크기가 10 μ m 이하인 미세입자인 까닭에 외부 물리적 기상 요인의 변화에도 불구하고 쉽게 대기 중에 부유해 있기 때문으로 판단된다.

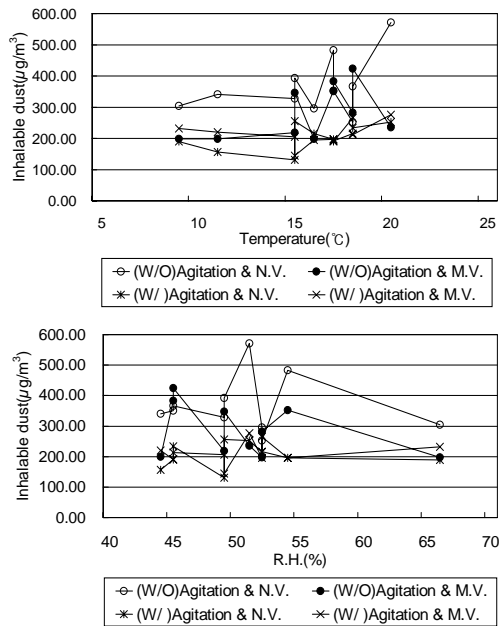


Fig. 5. Fluctuation of inhalable dust concentration in the compost pilot plant with operation types according to the physical environments.

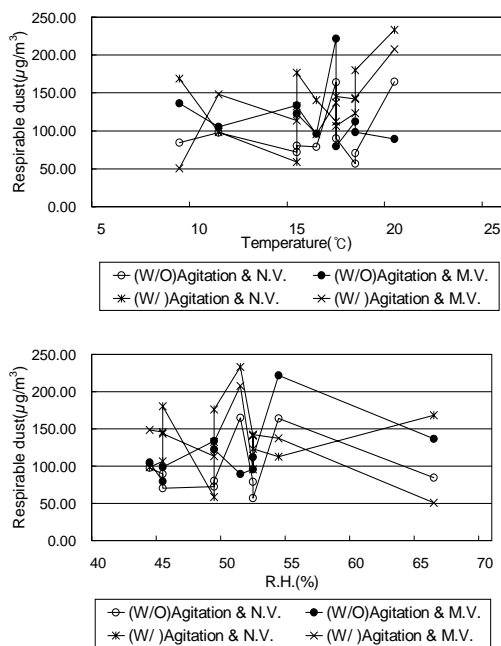


Fig. 6. Fluctuation of respirable dust concentration in the compost pilot plant with operation types according to the physical environments.

(3) 생물학상 물질(Bioaerosols)

1) 총 부유 박테리아(Total airborne bacteria)

축분 퇴비화 시스템 내 온도와 상대습도의 변화에 따른 총 부유 박테리아의 농도는 큰 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다(〈Fig. 7〉 참조). 이는 실험이 진행된 날의 외부 기상조건이 극단적인 경우가 없었기 때문에, 즉 시스템 내 부온도와 상대습도 조건이 부유 미생물이 생존하기에 상당히 높거나 낮은 경우가 없었기 때문이라 추정된다.

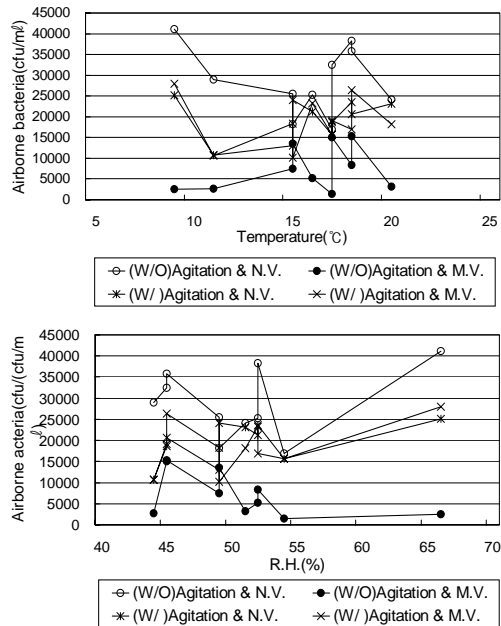


Fig. 7. Fluctuation of total airborne bacteria concentration in the compost pilot plant with operation types according to the physical environments.

2) 총 부유 곰팡이(Total airborne fungi)

실험기간 동안 축분 퇴비화 시스템내 대기 중에 부유하고 있는 곰팡이의 경우도 박테리아의 경우와 마찬가지로 내부 온도와 상대습도의 변화에 급격한 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다(〈Fig. 8〉 참조). 이는 박테리아의 경우와 동일하게 실험이 진행된 날의 외부 기상조건이 곰팡이가 대기 중에 부유하면서 생존이 불가능할 정도의 극단적인 상황은 관찰되지 않았기 때문으로 추측된다.

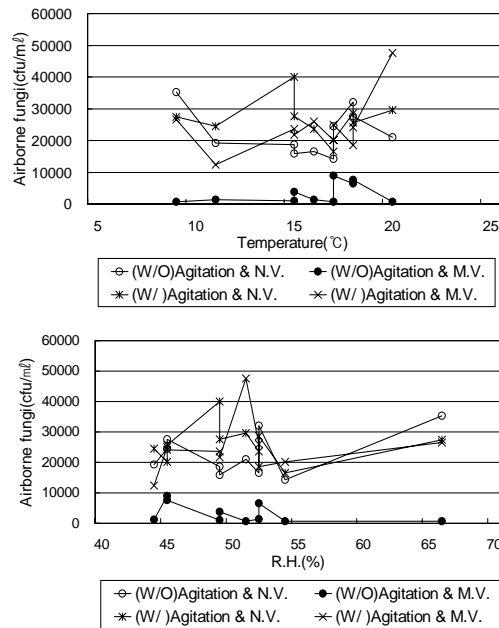


Fig. 8. Fluctuation of total airborne fungi concentration in the compost pilot plant with operation types according to the physical environments.

2. 축분 퇴비화 시스템 운영방식에 따른 각 대기오염 물질 농도 및 상관성 분석

(1) 환기방식에 따른 대기오염 물질의 농도 비교 및 통계적 유의성 평가

환기 방식에 따른 축분 퇴비화 시스템내 발생되는 대기 오염물질의 농도는 개방 형태의 자연 환기 방식보다는 밀폐 형태의 강제환기 방식으로 운용되는 경우에 상대적으로 높게 나타난 것으로 분석되었다(〈Table 4〉 참조). 흡입성 분진과 호흡성 분진을 제외한 모든 항목이 두 환기 방식에 대해 유의적인 차이가 있는 것으로 분석되었으며 ($p < 0.01$), 이는 실험기간 동안 측정된 시스템 내부의 평균 온도와 상대습도가 두 처리구간 큰 차이가 없음을 고려한다면 신뢰성 있는 통계 분석 결과라 사료된다. 분진의 경우 환기방식에 따라 발생 정도가 통계적으로 차이가 없는 것으로 분석되었는데($p > 0.05$), 이는 실험이 진행된 시기가 계절상 가을과 겨울이기 때문에 대체로 온도가 낮으면 분진의 농도가 상대적으로 감소한다는 연구 결과(Epstein 등, 2001)에 근거를 둘 수 있다.

Table 4. Concentration of aerial pollutants and physical factors(Temp. & R.H.) in the compost pilot plant with ventilation types

Parameters		Particulates		Bioaerosol		Gases			Physical factors	
		I.D.	R.D.	T.A.B.	T.A.F.					
Ventilation type		(µg/m ³)		(cfu/m ³)		Odor	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppb)	Temp. (°C)	R.H. (%)
Natural ventilation	Mean	288.6	117.9	24,132	24,441	31.1	4.03	17.33	17.9	53.3
	S.D.	109.1	48.9	8,057	6,807	17.2	1.72	4.32	8.1	9.3
	Max.	571.4	233.2	41,123	39,935	60.00	7.23	26.67	32.0	76.6
	Min.	130.7	56.7	10,736	14,253	9.5	1.81	10.25	6.1	37.7
Mechanical Ventilation	Mean	246.5	125.6	13,054	13,905	117.8	18.87	35.63	14.9	49.6
	S.D.	74.2	39.9	7,956	12,829	100.2	13.27	7.19	6.3	6.5
	Max.	424.1	221.8	27,911	47,647	314.0	48.64	56.14	27.7	66.7
	Min.	145.0	50.8	1,433	604	13.5	5.82	24.16	5.7	34.3
p-value		0.1619	0.5898	<.0001	0.0025	0.0005	<.0001	<.0001	–	–

Ref) I.D. : Inhalable dust, R. D. : Respirable dust, T.A.B. : Total airborne bacteria, T.A.F. : Total airborne fungi, Odor : Odor concentration, Temp. : Temperature, R.H. : Relative humidity.

(2) 교반방식에 따른 대기오염 물질의 농도 비교 및 통계적 유의성 평가

교반방식에 따른 축분 퇴비화 시스템내 대기 오염물질의 농도는 퇴비더미의 미교반시 보다는 교반시에 상대적으로 높은 것으로 나타났다(<Table 5> 참조). 황화수소를 제외한 모든 항목이 두 환기 방식에 대해 유의적인 차이가 있는 것으로 분석되었으며($p < 0.01$, 호흡성 분진의 경우 $p < 0.05$), 앞에서 언급한 근거대로 이 통계 분석값은 대체로 객관적이라 판단된다. 황화수소의 경우 일반적으로 퇴비더미가 혐기성 상태

로 전환되면 발생하는 휘발성 물질로 인식되고 있어(Wilber와 Murray, 1990; Vanderghenst 등, 1998) 퇴비더미의 호기적 조건을 유지시켜 주는 교반 시보다 미교반 시에 상대적으로 높게 방출될 것이라 생각된다. 하지만, 교반시에도 퇴비더미 내 혐기성 상태를 유지하고 있던 입자들이 재배열되어 그것들에 흡착되고 있던 고농도의 황화수소가 순간적으로 방출되는 특성(Patni와 Clarke, 1991; Ni 등, 2000)을 고려한다면 이러한 분석 결과의 도출이 가능하리라 판단된다.

Table 5. Concentration of aerial pollutants and physical factors(Temp. & R.H.) in the compost pilot plant with and without agitation

Parameters		Particulates		Bioaerosol		Gases			Physical factors	
		I.D.	R.D.	T.A.B.	T.A.F.					
Agitation type		(μg/m ³)		(cfu/m ³)		Odor	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppb)	Temp. (°C)	R.H. (%)
W/O Agitation	Mean	326.2	107.8	18,068	12,868	23.0	5.07	25.66	19.4	49.6
	S.D.	98.1	40.0	12,800	11,269	11.4	2.71	6.96	8.6	7.3
	Max.	571.4	221.8	41,123	35,268	45.0	8.95	37.06	32.0	61.1
	Min.	198.1	56.7	1,433	604	9.5	1.78	15.56	5.7	34.3
W/ Agitation	Mean	208.9	135.8	19,119	25,479	125.9	17.81	27.30	13.4	53.3
	S.D.	38.2	44.7	5,329	7,659	92.6	14.22	14.02	4.2	8.6
	Max.	276.0	233.2	27,911	47,647	314.0	48.64	56.14	20.3	76.6
	Min.	130.7	50.8	10,151	12,365	38.6	4.65	10.16	6.1	37.7
p-value		<.0001	0.0438	0.7365	0.0002	<.0001	0.0003	0.6408	–	–

Ref) I.D. : Inhalable dust, R. D. : Respirable dust, T.A.B. : Total airborne bacteria, T.A.F. : Total airborne fungi, Odor : Odor concentration, Temp. : Temperature, R.H. : Relative humidity.

(3) 운영방식 혼용에 따른 대기오염 물질의 발생량 비교 및 통계적 유의성 평가

축분 퇴비화 시스템내 환기방식과 교반방식의 혼합 적용에 따른 대기오염 물질의 농도 및 유의성 평가는 <Table 6>과 같다. 입자상 오염물질 중 흡입성 분진은 자연환기 - 미교반시에 가장 높았으며, 자연환기 - 교반시에 가장 낮게 발생되는 것으로 분석되었다($p < 0.01$). 퇴비 원료에 따라 상이하겠지만 일반적으로 퇴비화시 발생하는 흡입성 분진의 농도는 $0.1 \sim 2.0\text{mg/m}^3$ 로 (Rylander 등, 1983) 이번 실험에서 측정된 흡입성 분진은 위의 범위에 포함된 것으로 나타났다. 흡입성 분진의 경우 일반적으로 교반을 하게되면 퇴비더미 내 입자들의 재배열로 인해 대기 중으로 쉽게 방출될 것이라 생각되지만, 이번 실험의 경우 반대의 결과를 나타내었는데 이는 교반을 하게 되면 퇴비더미 내 수분 함량이

높은 입자들이 바깥으로 노출되어 대기 중으로 방출되는 것이 아니라 오히려 표면에서 건조되어 퇴비 입자들의 대기 중 방출을 억제하는 요인으로 작용했기 때문이라 판단된다. 따라서 퇴비 표면에서 건조된 입자들이 외부에서 유입되는 바람 및 강제환기에 의해 휘산되는 발생율이 더 큰 것이라 판단된다. 또한 흡입성 분진은 가스상 물질과는 달리 대기 중에 오랜 기간 동안 부유하고 있는 것이 아니라, Stoke 법칙에 따라 중력에 의해 다시 바닥으로 침전되기 때문에 환기의 운용만으로는 완전히 제어할 수 없는 물질이다. 따라서 축분 퇴비공장내 발생하는 흡입성 분진의 방지를 위해서는 새로운 개념의 관리 대책이 요구된다.

흡입성 분진의 작업장 노출기준은 10mg/m^3 (노동부, 1998)로 네 운영 조건 모두 이를 초과하지 않는 것으로 평가되었다. 반면, 호흡성 분진은

Table 6. Concentration of aerial pollutants and physical factors(Temp. & R.H.) in the compost pilot plant with operation types

Parameters		Particulates		Bioaerosol		Gases			Physical factors	
		I.D.	R.D.	T.A.B.	T.A.F.					
Operation type		(µg/m ³)		(cfu/m ³)		Odor	NH ₃ (ppm)	H ₂ S (ppb)	Temp. (°C)	R.H. (%)
Natural ventilation & W/O Agitation	Mean	368.6 ^a	96.0 ^a	28,673 ^a	22,507 ^a	15.8 ^a	2.54 ^a	19.96 ^a	25.1	51.3
	S.D.	94.6	37.9	8,173	7,141	8.1	0.63	3.81	3.7	8.0
	Max.	571.4	165.0	41,123	35,268	37.0	3.80	26.67	32.0	61.1
	Min.	252.6	56.7	16,947	14,253	9.5	1.78	15.56	20.1	38.1
Natural ventilation & W/ Agitation	Mean	208.7 ^b	139.8 ^a	19,592 ^b	26,376 ^a	46.4 ^b	5.50 ^b	14.69 ^b	10.8	55.3
	S.D.	44.4	50.5	4,946	6,208	6.4	0.91	2.88	3.1	10.4
	Max.	265.3	233.2	25,111	39,935	60.0	7.23	19.45	15.4	76.6
	Min.	130.7	58.8	10,737	16,587	38.6	4.65	10.16	6.1	37.7
Mechanical ventilation & W/O Agitation	Mean	283.9 ^c	119.5 ^a	7,462 ^b	3,229 ^a	30.2 ^b	7.61 ^{bc}	31.36 ^c	13.7	47.8
	S.D.	86.0	40.4	5,397	3,260	9.8	0.89	3.94	8.3	6.5
	Max.	424.1	221.8	15,270	8,925	45.0	8.95	37.06	27.7	55.3
	Min.	198.1	79.6	1,433	604	13.5	5.82	24.16	5.7	34.3
Mechanical ventilation & W/ Agitation	Mean	209.2 ^b	131.7 ^a	18,645 ^c	24,581 ^b	205.5 ^b	30.12 ^c	39.91 ^d	16.1	51.3
	S.D.	33.3	40.5	5,917	9,139	63.5	9.46	7.28	3.4	6.4
	Max.	276.0	207.9	27,911	47,647	314.0	48.64	56.14	20.3	66.7
	Min.	145.0	50.8	10,151	12,365	130.0	18.08	32.14	9.1	45.0
p-value		<.0001	0.1300	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	–	–

ref. 1) I.D. : Inhalable dust, R. D. : Respirable dust, T.A.B. : Total airborne bacteria, T.A.F. : Total airborne fungi, Odor : Odor concentration, Temp. : Temperature, R.H. : Relative humidity.

2) ^{a,b,c,d} Means that averaged values within the row by the same letter are not significantly different.

자연환기 - 교반시에 가장 높게 발생하는 것으로 나타났고, 자연환기 - 미교반시에 가장 낮았으나, 통계적 유의성은 없는 것으로 분석되었다($p > 0.05$). 호흡성 분진의 경우 입자크기가 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세입자로 흡입성 분진과는 달리 대기 중으로 방출되면 흡입성 분진보다는 대기 중에 계속 부유하는 시간이 상대적으로 더 길기 때문에 흡입성 분진 측정에서 나타난 실험결과의 해석을 동일하게 적용하는 것은 문제가 있을 것이라 판단된다. 다만 미교반 시 보다는 교반시에 호흡성 분진의 발생 분포가 높다는 사실은 호흡성 분진에 해당되는 입자크기는 퇴비 입자의 건조상태 보다는 교반과 같은 물리적 작용에 더 영향을 받는 것으로 추정된다.

생물학상 오염물질 중 총 부유 박테리아는 자연환기 - 미교반시에 가장 높고 강제환기 - 미교반시에 가장 낮게 발생되었으며($p < 0.01$), 총 부유 곰팡이는 자연환기 - 교반시에 가장 높고 강제환기 - 미교반시에 가장 낮게 대기 중으로 방출되는 것으로 분석되었으나 통계적 유의성은 없었다($p > 0.05$). 총 부유 미생물과 곰팡이는 이번 실험에서 발생 경향이 거의 유사한 것으로 분석되었다. 다만 농도 측면에서 미생물보다는 곰팡이가 더 높은 것으로 조사되었고, 특히 교반시에 이러한 현상이 더 현저한 것을 알 수 있다. 이는 퇴비더미 내에서 잔존해 있던 균류(곰팡이)들의 생존 밀도가 미생물보다 높기 때문에 교반으로 인한 대기 중으로의 방출이 쉽게 유도된 것이라 판단된다. 대기 중 생물학상 오염물질의 작업장 노출기준은 우리나라 뿐만 아니라 외국에서도 아직 제시되지 못한 상황이라 이번 실험에서 정량화된 농도가 작업자 건강에 유해한 수준인지를 판단하는 것은 현재 불가능하다. 따라서 추후 이에 대한 연구가 수반되어야 할 것이라 사료된다.

가스상 오염물질인 암모니아, 황화수소, 악취의 대기 중 농도는 강제환기 - 교반시에 가장 높은 것으로 분석되었고($p < 0.01$), 자연환기 - 미교반시에 가장 낮은 것으로 나타났으나, 다만 황화수소의 경우는 자연환기 - 교반시에 가장 낮은 농도를 보였다($p < 0.01$). 암모니아의 경우 일반적으로 밀폐형 퇴비화 시스템 내 교반시 발생하는 암모니아 농도는 최소 100ppm, 최대 2,500ppm을 나타내는 것으로 보고되고 있

는데(Tanaka 등, 1983; Kazutaka 등, 1996; 김 등, 2001), 이는 암모니아 발생 원인 물질인 TKN 함량이 높은 돈분이나 계분을 대상으로 한 연구 결과이기 때문에 우분을 대상으로 한 이번 실험의 결과와 비교한다는 것은 무리가 있는 것으로 판단된다. 또한 퇴비화시 수분조절제로 사용되는 톱밥이 일반 퇴비공장에 비해 상대적으로 많이 투입되었기 때문에 초기 C/N비 기준치보다 높을 것이라 판단된다. 따라서 퇴비 부숙단계에서 유기물의 C/N비가 증가하면 암모니아의 방출이 감소된다는 연구 결과(Kissel과 Henry, 1992)에 근거를 둔다면 이번 실험에서 분석된 암모니아 농도의 해석이 가능하다. 특징적인 점은 자연환기 - 교반시에 측정된 암모니아 농도가 강제환기 - 미교반시에 측정된 암모니아 농도보다 낮게 분석되었다라는 사실이다.

일반적으로 교반을 하게 되면 퇴비더미 내 입자들의 공극이 커지면서 그것들에 흡착되었던 암모니아 가스의 발생이 촉진된다. 하지만, 이번 실험의 경우 자연환기에 따른 시스템 내부와 외부의 공기 전환율(air exchange rate)이 환기팬을 운용한 강제환기시 보다 높아 자연환기시에 외부로의 암모니아 가스 배출량이 상대적으로 많았기 때문에 이와 같은 결과가 분석된 것이라 판단된다. 실제 실험결과 자연환기 - 교반시 시스템 내부와 외부의 온도차는 평균 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 기록했으나, 강제환기 - 미교반시에는 $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 정도의 차이를 나타내 위의 실험 결과를 뒷받침해주고 있다. 암모니아의 작업장 노출기준은 25ppm(노동부, 1998)으로 이번 실험의 경우 강제환기 - 교반시를 제외한 세 운영 조건이 이를 만족시키는 것으로 평가되었다.

황화수소의 경우 암모니아보다는 상대적으로 교반시보다는 미교반시에 황화수소의 농도가 더 높았는데, 이는 황화수소의 발생기작은 혐기성 조건하에서 이루어지는 것으로(김 등, 1994) 교반으로 인한 퇴비내 입자들의 호기적 상태 보다는 미교반시의 조건이 황화수소의 발생을 더 촉진시킬 것이라는 사실로 설명될 수 있다. 황화수소의 작업장 노출기준은 10ppm(노동부, 1998)으로 이번 실험의 경우 네 운영조건 모두 이 기준치를 만족시키는 것으로 평가되었다.

악취농도는 암모니아와 황화수소의 발생 경향과

Table 7. Correlation of aerial pollutants, temperature, and relative humidity observed in the compost pilot plant

Parameters	I.D.	R.D.	T.A.B.	T.A.F.	Odor	NH ₃	H ₂ S	Temp.	R.H.
I.D.	1.00								
R.D.	0.04	1.00							
T.A.B.	0.25	-0.24	1.00						
T.A.F.	-0.15	0.04	0.69**	1.00					
Odor	-0.38*	0.19	-0.04	0.31	1.00				
NH ₃	-0.36*	0.15	-0.12	0.17	0.98**	1.00			
H ₂ S	-0.17	0.06	-0.39*	-0.27	0.73**	0.80**	1.00		
Temp.	0.71**	-0.17	0.51**	0.19	-0.08	-0.09	-0.02	1.00	
R.H.	-0.03	0.03	0.34*	0.36*	0.08	0.05	-0.18	0.09	1.00

ref. 1) I.D. : Inhalable dust, R. D. : Respirable dust, T.A.B. : Total airborne bacteria, T.A.F. : Total airborne fungi, Odor : Odor concentration, Temp. : Temperature, R.H. : Relative humidity.

2) significant → * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$.

유사한 것으로 분석되었다. 악취는 단일물질이 아닌 여러 물질들이 복합적으로 상호 작용하여 사람의 코에서 인지되는 감각 공해이므로(양과 이, 1997), 향후 연구에서는 이 두 물질 외 다른 악취 원인 물질들의 발생 특성도 파악해야 할 것이다.

(4) 축분 퇴비화 시스템내 발생하는 대기오염 물질과 물리적 요인(온도 및 상대습도)간의 상관성 분석

축분 퇴비화 시스템내 발생하는 대기오염 물질과 물리적 요인과의 상관관계는 <Table 7>과 같다. 99% 유의수준에 해당되는 변수들은 온도 - 흡입성 분진, 총 부유 박테리아 - 총 부유 곰팡이, 온도 - 총 부유 박테리아, 악취농도 - 암모니아, 악취농도 - 황화수소, 암모니아 - 황화수소로 나타났으며, 95% 유의수준에서는 흡입성 분진 - 악취농도, 흡입성 분진 - 암모니아, 총 부유 박테리아/황화수소, 상대습도 - 총 부유 박테리아, 상대습도 - 총 부유 곰팡이로 조사되었다.

분석 결과 물리적 요인인 온도와 상대습도는 축분 퇴비화 시스템내에서 주로 입자상 오염 물질과 생물학상 오염물질의 발생량에 영향을 미치는 주요 인자로 입증되었다. 즉, 시스템 내부 온도와 상대습도가 높으면 이것들의 발생 농도도 높아짐을 알 수 있다. 하지만, 분진과 부유 미생물과의 상관관계는 통계적 유의성이 없는 것으로 분석되어($p > 0.05$) 대기 중 부유 미생물들은 분진에 흡착되어 생

존 및 이동을 한다는 기존 연구 결과(Bruce와 Sommer, 1987; Crook 등., 1991; Epstein 등, 2001)와 상반된 것으로 조사되었다. 하지만, 분진과 암모니아와 황화수소는 통계적 상관성이 있는 것으로 입증되어($p < 0.05$) 분진입자가 휘발성 악취 원인 물질들을 흡착하여 대기 중으로 이동시킨다는 연구결과(Hartung, 1986; Hinz와 Krause, 1988; Liao 등, 2000; Bottcher, 2001)와 부합하는 것으로 밝혀졌다. 또한 가스상 오염물질인 악취 농도, 암모니아, 황화수소는 통계적 상관성이 상당히 높은 것으로 분석되어($p < 0.01$) 암모니아와 황화수소는 축분 퇴비화시 발생하는 주요 악취 원인 물질이라는 기존의 연구 결과(Wilber와 Murray, 1990; Walker, 1991)에 상응한 것으로 입증되었다.

IV 요 약

본 연구는 환기 방식 및 교반 유무에 따른 축분 퇴비화 시스템 내 대기 및 작업 환경을 평가하기 위해 수행되었다. 측정대상 가스상 물질인 암모니아, 황화수소, 악취농도의 경우 자연환기 - 미교반시 2.45ppm, 19.96ppb, 15.8, 강제환기 - 미교반시 7.61ppm, 31.36ppb, 30.2, 자연환기 - 교반시 5.50ppm, 14.69ppb, 46.4, 강제환기 - 교반시 30.12ppm, 39.91ppb, 205.5가 평균적으로 발생되는 것으로 분석되었다. 각 운용조건에 따른 흡

입성 분진과 호흡성 분진의 평균 농도는 자연환기 - 미교반시 $368.6\mu\text{g}/\text{m}^3$, $96.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강제환기 - 미교반시 $283.9\mu\text{g}/\text{m}^3$, $119.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 자연환기 - 교반시 $208.7\mu\text{g}/\text{m}^3$, $139.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, 강제환기 - 교반시 $209.2\mu\text{g}/\text{m}^3$, $131.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것으로 조사되었다. 총 부유 박테리아와 곰팡이의 경우 자연환기 - 미교반시 $28,673\text{cfu}/\text{m}^3$, $22,507\text{cfu}/\text{m}^3$, 강제환기 - 미교반시 $7,462\text{cfu}/\text{m}^3$, $3,229\text{cfu}/\text{m}^3$, 자연환기 - 교반시 $19,592\text{cfu}/\text{m}^3$, $26,376.29\text{cfu}/\text{m}^3$, 강제환기 - 교반시 $18,645\text{cfu}/\text{m}^3$, $24,581\text{cfu}/\text{m}^3$ 가 평균적으로 발생하는 것으로 분석되었다. 대체로 가스상 물질은 자연환기와 교반을 하지 않는 경우보다 강제환기와 교반을 하는 경우에 더 많이 발생하는 경향을 보였다. 또한 흡입성 분진과 총 부유 박테리아의 경우, 자연환기 - 미교반시에 대체로 더 높게 발생된 반면, 호흡성 분진과 총 부유 곰팡이의 경우 강제환기 - 교반시에 더 많이 발생하는 경향을 보였다. 내부 온도와 상대습도는 입자상 물질과 생물학적 오염물질 발생에 영향을 주는 것으로 분석되었고, 암모니아와 황화수소는 축분 퇴비화시 발생하는 악취 원인물질로 입증되었다. 물리적 요인인 온도와 상대습도는 축분 퇴비화 시스템내에서 주로 입자상 오염물질과 생물학적 오염물질의 발생량에 영향을 미치는 주요인자로 입증되었는데, 시스템 내부 온도와 상대습도가 높으면 이것들의 농도도 높아지는 것으로 분석되었다.

V 사 사

본 연구는 2001년 환경부 첨단기술개발 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

VI 인 용 문 헌

- Bruce, J. M. and Sommer, M. 1987. Environmental aspects of respiratory disease in intensive pig and poultry houses, Including the implications for human health. Proceedings EC Meeting Aberdeen, 29-30 October 1986. EC Commission Publications, Brussels.
- Bottcher, R. W. 2001. An environmental nuisance: odor concentrated and transported by dust. *Chemical Senses*. 26:327-331.
- Bunger, J., Antlauf-Lammers, M., Schulz, T. G., Westphal, G. A., Muller, M. M., Ruhnau, P. and Hallier, E. 2000. Health complaints and immunological markers of exposure to bioaerosols among biowaste collectors and compost workers. *Occupational and Environmental Medicine*. 57(7):458-464.
- Clark, C. S., Bjoranson, H. S., Schwartz-Fulton, J., Holland, J. W. and Gartside, P. S. 1984. Biological health risks associated with composting of wastewater treatment plant sludge. *Journal of Water Pollution and Control Federation*. 56:1269-1276.
- Crook, B., Robertson, J. F., Travers, G. S., Botheroyd, E. M., Lacey, J. and Topping, M. D. 1991. Airborne dust, ammonia, microorganisms, and antigens in pig confinement houses and the respiratory health of exposed farm workers. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 52:271-279.
- Dravnieks, A. and O'Neill, H. J. 1979. Annoyance Potentials of Air Pollution Odors. *J. Am. Ind. Hyg. Assoc.* 40.
- Epstein, E., Wu, N., Youngberg, C. and Croteau, G. 2001. Controlling dust and bioaerosols at a biosolids composting facility. *Biocycle*. April 50-54.
- Epstein, E., Wu, N., Youngberg, C. and Croteau, G. 2001. Dust and bioaerosols at a biosolids composting facility. 9(3):250-255.
- Hartung, J. 1986. Dust in livestock buildings as a carrier of odours. In: Nielsen, V. C., Voorburg, J. H. and L'Hermite, P. (eds), *Odour Prevention and control of organic sludge and livestock farmings*. Elsevier, London, pp. 321-332.
- Haug, R. T. 1990. An easy on the elements of odor management. *Biocycle*. 31(10):60-67.
- Hinz, T. and Krause, K. H. 1988. Emission of respiratory biological-mixed-aerosols from animal houses, In: *Environmental aspects of respiratory disease in intensive pig and poultry houses, including the implications for human health*, pp. 81-89. Proceedings: EEC-Meeting Aberdeen, 29-30 October, 1986.
- Kazutaka, K., Osada, T. and Yonag, M. 1996. Emissions of malodorous compounds and greenhouse gases from composting swine feces. *Biore-source Technology*. 56:265-271.
- Kissel, J. C. and Henry, C. L. 1992. Emissions of Volatile and Odorous Organic Compounds from Municipal Waste Composting Facilities: A Literature Review. The National Composting Council, Alexandria, VA.
- Lacey, J. 1991. Aerobiology and health: the role of airborne fungal spores in respiratory disease. In D. L. Hawksworth(ed). *Honorary and general lectures from the Fourth International Mycological Con-*

- gress, Regensburg, Germany, C.A.B. International. pp. 157-185.
15. Lees, P. S. J. and Douwes, J. 1997. Towards an occupational exposure limit for endotoxin. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2:17-19.
16. Liao, C. M., Chen, J. S. and Chen J. W. 2000. Dynamic model for predicting dust-borne odour concentrations in ventilated animal housing. *Applied Mathematical Modelling*. 24:131-145.
17. Louhelainen, K., Kangas, J., Veijanen, A. and Viilos, P. 2001. Effect of *In Situ* Composting on Reducing Offensive Odors and Volatile Organic Compounds in Swineries. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 62(2): 159-167.
18. Millner, P. D., Olenchok, S. A., Epstein, E., Rylander, R., Haines, J., Walker, J. Ooi, B. L., Horne, E. and Maritato, M. 1994. Bioaerosols associated with composting facilities. *Compost Science & Utilization*. 2(4):6-57.
19. National Institute for Occupational Safety and Health. 1994. NIOSH Manual of Analytical Method. Cincinnati, Ohio, 4th Ed.
20. Ni, J. Q., Heber, A. J., Diehl, C. A., Lim, T. T., Duggirala, R. K. and Haymore, B. L. 2000. Burst release of hydrogen sulfide in mechanically ventilated swine buildings. *Odors/VOC Emissions Conference*, Cincinnati, OH, April 17-19.
21. Patni, N. K. and Clarke, S. P. 1991. Transient hazardous conditions in animal buildings due to manure gas released during slurry mixing. *Applied Engineering in Agriculture*. 7(4):478-484.
22. Rylander, R., Lundholm, M. and Clark, C. S. 1983. Exposure to aerosol of micro-organisms and toxin during the handling of sewage sludge, pp. 69-78. In Wallis, P. M. and Lehemann, D. L.(eds.). *Biological Health Risk of Sludge Disposal to Land in Cold Climates*. Calgary University, Alberta, BC, Canada.
23. SAS. 1996. User's Guide: Statistics, version 6.0 Editions, SAS Inst., Inc., Cary, NC. USA.
24. Tanaka, H., Haga, K., Yonaga, M. and Nakajima, K. 1983. "Control of malodors from swine feces on composting." *Proceedings of New Strategies for Improving Animal Production for Human Welfare - The Fifth World Conference on Animal Production*. Tokyo. Japanese Society of Zootechnical Science. 2:835-837.
25. Thorne, P. S., Niekhaefer, M. S., Whitten, P. and Donham, K. J. 1992. Comparison of bioaerosol sampling methods in barns housing swine. *Applied and Environmental Microbiology*. Aug, pp. 2543-2551.
26. Vandergheynst, J. S., Cogan, D. J., Defelice, P. J., Gossett, J. M. and Walker, L. P. 1998. Effect of process management on the emission of organosulfur compounds and gaseous antecedents from composting processes. *Environmental Science and Technology*. 32:3713-3718.
27. Walker, J. N. 1991. Fundamentals of odor control. *Biocycle*. 32(9):50-55.
28. Wilber, C. and Murray, C. 1990. Odor source evaluation. *Biocycle*. 31(3):68-72.
29. 국립환경연구원. 1999. 공해요인별 전국 민원건수 현황.
30. 김기연, 최홍립, 김치년. 2002. 한강유역 축분퇴비공장 근로자의 작업환경 만족도 평가. 44(2): 261-270.
31. 김기연, 최홍립. 2001. 한강유역내 축분퇴비공장 악취발생에 대한 현장 평가. *동물자원과학회지*. 43(6):1005-1018.
32. 김남천 외 11명. 1994. 유기성 폐기물의 퇴비화 기술. *동화기술*. p. 166.
33. 노동부. 1998. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준(고시 제1997-65호).
34. 노동부. 2002. 산업안전보건법(법률 제5886호).
35. 양성봉, 이성화. 1997. 악취의 성분 분석. *동화기술*. p. 4.

(접수일자 : 2004. 2. 16. / 채택일자 : 2004. 3. 25.)