

메탄발효와 퇴비화 공정이 연계된 가축분뇨 처리시설에서 발생되는 악취물질 특성 조사

고한종* · 김기연** · 김현태*** · 고문석* · 히구치 다카시**** · 우메다 미키오***

농촌진흥청 난지농업연구소*, 한양대학교 환경 및 산업의학연구소**, 경도대학 농학연구과***,
입명관대학교 환경시스템공학과****

Characteristic of Odorous Compounds Emitted from Livestock Waste Treatment Facilities Combined Methane Fermentation and Composting Process

Han Jong Ko*, Ki Youn Kim**, Hyeon Tae Kim***, Moon Seok Ko*, Takasi Higuchi****
and Mikio Umeda***

National Institute of Subtropical Agriculture*, Institute of Environmental & Industrial Medicine,
Hanyang University**, Graduate School of Agriculture, Kyoto University***,
Department of Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan University****

ABSTRACT

Odor management is significantly concerned with sustainable livestock production because odor nuisance is a primary cause for complaint to neighbors. This study was conducted to measure the concentration of odorous compounds, odor intensity, and odor offensiveness at unit process in animal waste treatment facility combined composting and methane fermentation process by an instrumental analysis and direct olfactory method. Ammonia, sulfur-containing compounds, and volatile fatty acid were analyzed at each process units and boundary area in summer and winter, respectively. Higher concentration of odorants occurred in the summer than in the winter due to high ambient temperature. The maximum concentration of odorants was detected in composting pile when mixed manure was being turned followed by inlet, curing, outlet, and screen & packing process. Highest concentration of detected odorous compounds was ammonia ranging from 3.4 to 224.7 ppm. Among the sulfur-containing compounds measured, hydrogen sulfide was a maximum level of 2.3 ppm and most of them exceeded reported odor detection thresholds. Acetic acid was the largest proportion of VFA generated, reaching a maximum of 51 to 89%, followed by propionic and butyric acid at 1.9 to 35% and 1.8 to 15%, respectively. Malodor assessment by a human panel appeared a similar tendency in instrumental analysis data. Odor quotient for predicting major odor-causing compounds was calculated by dividing concentrations measured in process units by odor detection thresholds. In the composting process, hydrogen sulfide, ammonia, dimethyl sulfide, and methyl mercaptan were deeply associated with odor-causing compounds, while the major malodor compounds in the inlet process were methyl mercaptan, hydrogen sulfide, and butyric acid.

(Key words : Ammonia, Sulfur-containing compounds, VFA, Direct olfactory method, Odor quotient)

Corresponding author : Han Jong Ko, Division of livestock, National Institute of Subtropical Agriculture, RDA.
Tel: 064-754-5760, Fax: 064-754-5713, E-mail : khjong333@hanmail.net

I. 서 론

최근 들어 축산업을 영위하는 과정에서 발생하는 악취로 인해 인근 지역주민들이 악취민원을 제기하는 사례가 증가하고 있다(Mahin, 2001; 장 등, 2004; Schlegelmilch et al., 2005). 이처럼 악취민원이 증가하는 이유는 축산농가의 전업화, 규모화가 진전되면서 한정된 공간에서 사육두수와 규모가 증가된 것과 더불어 일반 대중의 쾌적한 삶에 대한 관심과 욕구가 증대되고 있기 때문이다(Both, 2001; Reisner, 2005). 따라서 악취공해를 담당하는 환경부서 및 규제기관에서는 효율적인 악취규제와 경제적인 저감방안을 지속적으로 모색하고 있으며, 그 일환으로써 우리나라의 경우에는 ‘대기환경보전법’에서 규정하고 있던 악취관련 조항을 분리하여 보다 세분화되고 규제수준을 강화시킨 ‘악취방지법’을 2005년에 제정입법 예고하여 시행하고 있다(환경부, 2005). 그러나 악취는 자극성이 강한 기체상 물질들이 인간의 후각을 자극하여 정신적, 심리적 피해를 끼치는 감각공해로서, 단일 성분 보다는 여러 가지 물질이 복합적으로 작용하여 인간에게 인식되기 때문에 일률적인 기준을 설정하기가 어렵다. 또한 악취 물질이나 배출원이 다양하고, 저농도에서도 피해를 유발하기 때문에 효과적인 관리와 대응기술을 수립하여 적용하기가 매우 힘든 실정이다.

축산에서 기인된 악취물질 발생원은 주로 축사와 시설물, 분뇨 저류조 및 처리시설, 분뇨의 토양환원으로 구분할 수 있으며, 각각의 발생원마다 서로 다른 종류의 유기성 화합물들이 혼합된 상태로 방출되고 있다(Powers, 1999; Edeogu et al., 2001). 일반적으로 가축에게 급여되는 사료나 가축 자체에서 발생하는 냄새는 그다지 불쾌하지 않지만 분뇨의 수거, 저장 및 처리과정에서 미생물에 의한 불완전 혐기분해의 산물로 생성된 물질들이 강한 취기를 유발시키는 것으로 간주되고 있으며, 이와 관련된 악취성분의 발생기작과 생화학적 특성에 관한 연구들도 보고되었다(Zhu, 2000; Rappert and Muller, 2005). Mackie 등(1998)은 분뇨 유래 악

취와 특정 미생물 속(genus)의 작용에 관한 연구에서, 혐기성 조건의 분뇨에서 발생하는 악취물질을 휘발성 지방산(VFA), 인돌(indoles)과 페놀류(phenols), 암모니아와 휘발성 아민(amines) 및 휘발성 황화합물(sulfur-containing compounds)로 분류하였으며, Miner (1997)는 가축분뇨의 분해과정에서 대략 47개의 악취물질들이 대기중으로 휘산되며 아민류, 머캅탄(mercaptans), 유기산(organic acids) 및 이성질체 방향족 질소 화합물(heterocyclic nitrogen compounds)이 악취와 높은 상관성을 보인다고 하였다. 또한 McGinn 등(2003)은 축사와 인근 마을간 이격거리 설정을 위한 연구에서, 14가지 악취유발 가스들이 검출되었으며 그 가운데 암모니아와 아세트산이 가장 높은 농도로 분석되었다고 발표하였고, 유 등(2005)은 돈사 및 돈사 부지경계선에서의 악취물질 발생에 대한 조사 연구를 보고하기도 하였다. 한편 분뇨처리시설에서의 악취 발생과 관련하여 김 및 최(2001)는 퇴비원료 및 운영방식에 따른 퇴비공장 악취 평가 연구를 수행하였고, Merrill and Halverson(2002)은 양돈 분뇨 저장 시스템에 따른 악취물질 농도에 대한 조사 결과를 보고 하였다.

그러나 지금까지 선행된 연구들은 대부분 가축분뇨 자체에서 발생하는 악취물질 평가에 관한 내용들과 축사 및 분뇨 저류조에서 방출되는 악취평가에 관한 조사 연구들으로써 상대적으로 고농도의 악취물질이 단기간에 발생하는 가축분뇨 처리시설에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다. 따라서 본 연구는 고품질의 퇴비화 처리 및 액상분뇨의 메탄발효공정이 연계된 가축분뇨 처리시설에서 각 공정별로 발생하는 악취농도 및 악취물질에 대한 특성을 조사하여 적정 악취대책 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 조사 대상지 및 가축분뇨 처리시설 특성

본 연구 조사의 대상지는 일본 교토부(京都

府) 야기조(八木町)에 소재한 생물생태센터(Bio-ecology center)로서 인근에 산재해 있는 낙농가와 양돈농가에서 배출되는 가축분뇨를 일괄처리하기 위해 원형 규모의 메탄발효시설과 퇴비화 공정이 연계된 가축분뇨 처리시설이다. 본 생물생태센터는 바이오가스 플랜트에 의한 에너지 생산과 퇴·액비 처리에 의한 가축분뇨의 자원 재순환이라는 측면을 고려하여 도입된 시설로 주요 공정은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 개별 농가에서 수집된 분뇨 중 슬러리 형태의 우분 및 돈분뇨는 비지를 혼합하여 메탄발효조에 투입되고, 깔개와 혼합된 우분 및 운동장에서 수거된 건조우분은 로타리식 교반기에 의한 기계적 교반이 반복되는 퇴비 발효조에 투입되게 된다. 또한 메탄발효조에서 발생된 소화액은 오탁제거 후 고상물은 퇴비화 공정으로 이송되고, 액상물은 인근 농경지에 액비로 이용되거나 고도처리를 통해 방류하는 공정으로 운영되고 있다.

2. 악취원인 물질 선정

가축분뇨 처리시설에서 방출되는 악취는 분뇨 내 유기물이 분해되는 과정에서 기인한 것이기 때문에 분뇨에서 발생할 수 있는 악취 물질 전체를 대상으로 원인 물질 규명과 정량적

분석이 필요하다고 사료된다. 그러나 이들 악취물질 분석 시 정밀도와 신뢰성을 담보할 수 있는 분석장비와 기술에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구자들이 가축분뇨 분해과정에서 방출되는 주요 악취물질(Varel and Miller, 2001; Whitehead and Cotta, 2004)이라고 보고한 물질들 가운데 축산에서 발생하는 대표적인 악취물질로 간주되고 있는 ammonia(NH₃), 분뇨의 저장 및 처리 조건에 따라 방출 양상이 차이가 심하고, 최소감지농도가 매우 낮은 황화합물 악취물질인 hydrogen sulfide(H₂S), methyl mercaptan(MeSH), dimethyl sulfide(DMS) 및 dimethyl disulfide(DMDS)와 더불어 휘발성 지방산인 acetic acid(AA), propionic acid(PA) 및 butyric acid(BA)를 악취 원인물질로 선정하였다.

3. 시료채취 지점 및 방법

메탄발효와 퇴비화 공정이 연계된 가축분뇨 처리시설에서 발생하는 악취물질 측정을 위해 처리 공정과 처리시설의 부지경계선에서 하계(8월)와 동계(1월)에 걸쳐 대기 시료를 포집하였다. 시료채취 시 기온과 풍속은 하계가 30.2℃ 및 2.4 m/s, 동계가 2.8℃ 및 1.2 m/s였고 주 풍향은 공히 동풍계열의 빈도가 높은 기상조건

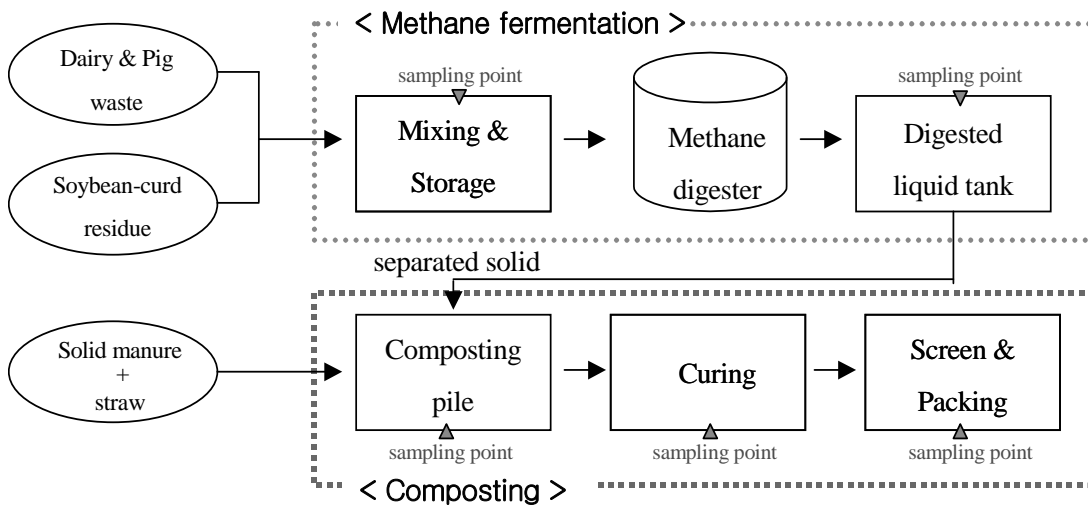


Fig. 1. Main process of the livestock waste treatment system with methane fermentation and composting.

이었다. 시료채취 위치는 처리 공정은 각 시료의 headspace상이고, 부지경계선은 관능평가 악취강도가 가장 높은 방향을 선정하였다. 또한 시료채취 대상 공정은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 메탄발효 공정 2곳(분뇨 투입조 및 소화액 유출조)과 퇴비화 공정 3곳(발효조, 후숙조, 선별 및 포장조)을 선정하였다. 암모니아를 분석하기 위해 흡수액(0.1N sulfuric acid, 10 ml)을 넣은 impinger와 moisture trap을 air sampling pump (224-PCXR4, SKC, USA)에 병렬로 연결하여 1.7 l/min의 유량으로 10분간 채취하였다(NIOSH, 1994). 황화합물 악취물질은 폴리프로필렌 필름으로 만들어진 테들러 백(Tedlar bag, SKC, USA)을 시료채취용기로 선정하고, 시료를 채취하기 전에 질소가스로 3회 세척과정을 거쳐 시료를 1 l/min의 유량으로 10분간 10 l 테들러 백에 채취하였다. 또한 휘발성 지방산은 air sampling pump에 흡착관(ORBO101, Supelco, USA)을 연결하여 1.0 l/min의 유량으로 15분간 채취한 후 테플론 테이프로 밀봉하였고, 드라이아이스가 채워진 시료상자에 보관하여 분석실로 운반하였다. 한편 복합악취 평가를 위한 직접관능법은 처리시설의 개별 공정에서 악취판정원을 대상으로 수행되어야 하지만 공정별로 발생한 악취의 교차영향 및 객관적인 관능평가가 어려운 점을 고려하여 간접방식으로 테들러 백에 각 공정별 시료를 채취하였다.

4. 분석 방법

(1) 기기분석법

1) 암모니아 농도 분석

흡광광도법으로 암모니아를 분석하기 위해 암모니아 흡수액으로 황산을 이용하였으며, 10분간 gas를 흡입한 흡수액을 여과 후 적정 비율로 희석시킨 용액 3 ml를 채취하여 NIOSH 공정시험법(1994)에서 제시한 발색시약(nessler's agent) 0.2 ml를 첨가한 후 spectrophotometer(UV-1700, Shimadzu, Japan)를 이용하여 440 nm 파장에서 측정하였다. 검량선은 암모니아 표준용액으로 황산암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)을 이용하여 0, 2,

4, 8, 12 $\mu\text{g/ml}$ 농도를 설정한 후 측정된 암모늄 이온(NH_4^+)을 전환하여 암모니아 농도를 계산하였다. 또한 공시료의 경우 분석시료와 함께 같은 조건으로 분석하였다.

2) 황화합물 농도 분석

일반적으로 대기 중 황화합물 악취물질은 수 ppb 정도의 저농도로 존재하기 때문에 농축과정이 필요하고, 농축된 시료에 반응할 수 있는 감도와 선택성이 높은 검출기가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 테들러 백에 채취된 시료를 pyrex 유리재질로 된 U자형 관을 이용하여 농축하였으며, 농축관의 냉각은 액체 아르곤을 사용하였다. 농축이 완료된 시료는 연결관을 통하여 GC-PFPD(Gas chromatography with Pulsed Flame Photometric Detector, HP5890, Hewlett-Packard, USA)의 시료도입부에 주입하여 농도를 분석하였으며, 분석 시 GC 조건은 Table 1과 같다.

3) 휘발성 지방산 농도 분석

휘발성 지방산 분석을 위해 다단 흡착물이 충전된 흡착관을 사용하여 처리 공정별 시료를 포집하였으며, 시료의 농축과 탈착과정에서 발생될 수 있는 지방산 손실을 최소화하기 위해 용매 추출이 아닌 열탈착 장치(thermal desorption device)를 이용하였다. 열탈착 장치에 장착된 흡착관은 170°C에서 50 ml/min의 질소 가스를 통과시켜 흡착관 내에 존재할 수 있는 불순물과 수분을 제거하였다. 불순물 제거 후 흡착관을 225°C로 승온시켜 휘발성 지방산을 탈착시키고, 운반가스인 헬륨을 주입하여 GC-FID(Shimadzu GC-9 AM, Shimadzu, Japan)의 컬럼으로 도입시켰으며, 분석에 적용된 GC 운영조건은 Table 1과 같다.

(2) 직접관능법

관능법에 의한 악취 평가 방법으로 본 연구에서는 악취 강도(odor intensity)와 악취 불쾌도(odor offensiveness)를 선택하여 평가하였다. 악취 평가의 신뢰성을 확보하기 위해 후각 기능이 정상적인 악취 판정원을 대상으로 후각 측정 시 표준물질이라 할 수 있는 아세트산에 탈에 정상적으로 반응하는 6명의 악취 판정원

Table 1. Analysis GC conditions for measuring volatile sulfur compounds and fatty acids

Instrument	Analytical condition
GC-FPD	Detector : Flame Photometry Detector Column : HP-5 capillary Column flow : 2.5 ml/min → 5.0 ml/min Temp. : Oven [−10℃(4 min), 20℃/min to 200℃] Carrier gas : He 1.3 ml/min
GC-FID	Detector : Flame Ionization Detector Column : glass packed column Temp. : Oven [50℃(1 min), 20℃/min to 195℃] Injector (240℃), Detector (250℃) Carrier gas : He 1.0 ml/min

을 선정 후 무취실에서 채취된 시료를 평가하는 직접 관능법을 적용하였다. 악취 판정원들의 결과는 기하 평균하여 표시하였다. 악취 강도 및 불쾌도는 6단계 악취 강도 표시법과 5단계 악취 불쾌도 표시법을 이용하였는데, 악취 강도와 불쾌도 모두 0은 무취(no odor) 또는 불쾌하지 않은 냄새(not offensive)이며 냄새가 심할수록 강도가 높아져 악취 강도 5는 참을 수 없는 강렬한 냄새(very strong), 악취 불쾌도 4는 극단적으로 불쾌한 냄새(extremely offensive)로 분류하였다(Burton 등, 1998; 고 등, 2006).

III. 결과 및 고찰

1. 기기분석에 의한 처리공정별 악취물질 농도

메탄발효와 퇴비화 공정이 연계된 가축분뇨 처리시설에서 발생된 악취물질 농도 분석 결과를 하계와 동계로 구분하여 Table 2와 3에 나타내었다. 하절기 처리공정별 암모니아 농도를 살펴보면 퇴비 발효조(composting pile)에서 224.7 ppm으로 가장 높았고, 다음으로는 퇴비 후숙조(curing)와 메탄발효 분뇨투입조(inlet)에서 높은 것으로 분석되었다. 황화합물 악취물질 중에서는 황화수소가 처리공정에 관계없이 가장 높은 농도로 검출되었으며, 퇴비 발효조와 메탄발효 분뇨투입조에서 각각 2.3 ppm 및 499 ppb인 것으로 나타났다. 그러나 황화수소를 제외한 메틸머캅탄, 황화메틸 및 이황화메틸 농도는 메탄발효 분뇨 투입조에서 가장 높은 농도인 것으로 나타났다. 휘발성 지방산의 경우 아세트산이 분뇨투입조에서 470.4 ppb로 가장 높은 농도로 검출되었으며, 퇴비 발효조에서는

Table 2. Concentrations of odorous compounds measured at animal waste treatment processes in summer

Site	Category	Ammonia	Volatile Sulfur Compounds				Volatile Fatty Acids		
		NH ₃	H ₂ S	MeSH	DMS	DMDS	AA	PA	BA
		ppm ppb						
Composting process	Composting pile	224.7	2,301.3	12.5	32.1	7.1	9.8	6.7	2.8
	Curing	26.9	254.6	2.8	8.8	5.1	153.4	11.3	9.2
	Screen & Packing	4.9	9.2	0.9	1.9	1.3	15.6	3.0	1.1
Methane process	Inlet	13.1	499.0	108.3	45.4	10.2	470.4	17.6	15.6
	Outlet	5.0	37.5	21.1	3.6	4.4	43.3	4.9	0.9

MeSH : Methyl mercaptane, DMS : Dimethyl sulfide, DMDS : Dimethyl disulfide
 AA : Acetic acid, PA : Propionic acid, BA : Butyric acid

Table 3. Concentrations of odorous compounds measured at animal waste treatment processes in winter

Site	Category	Ammonia	Volatile Sulfur Compounds				Volatile Fatty Acids		
		NH ₃	H ₂ S	MeSH	DMS	DMDS	AA	PA	BA
		ppm	ppb						
Composting process	Composting pile	96.6	1,938.0	12.7	43.2	5.6	30.8	8.6	1.7
	Curing	9.7	84.4	2.5	17.4	2.0	90.0	6.5	16.1
	Screen & Packing	3.4	6.4	0.7	1.6	1.9	8.8	2.6	0.9
Methane process	Inlet	10.2	234.3	83.0	92.2	9.0	379.1	8.3	41.1
	Outlet	5.1	50.1	13.8	6.9	3.5	33.7	5.1	6.4

가장 낮은 농도인 9.8 ppb로 나타났다. 또한 휘발성 지방산의 조성은 아세트산, 프로피온산, 부트르산 순으로 나타났다. 한편 동절기 처리 공정별 악취물질 농도는 Table 3에서 보는 바와 같이 하절기와 비슷한 경향을 보이고 있지만 전반적으로 낮은 농도 분포를 보이는 것으로 조사되었다. 즉, 암모니아와 황화수소의 경우 퇴비 발효조에서 각각 96.6 ppm 및 1.9 ppm으로 전체 처리공정 가운데 가장 높은 농도를 보이고 있지만 하절기 농도와 비교 시 각각 57% 및 16% 가량 저감된 농도인 것으로 나타났다. 이는 하절기의 외기온 상승에 의한 미생물의 유기물 분해 활성도가 동절기에 비하여 높아진 결과로 사료되며, 분뇨에서 암모니아 휘발에 중요한 영향을 미치는 인자가 외기온과 복사열이라는 Sommer 등(2001)의 연구 결과에 의해서도 설명될 수 있다.

본 연구에서 측정된 암모니아 농도의 경우, Kuroda 등(1996)이 보고한 돈분 퇴비화 시 방출되는 암모니아 최고 농도인 1,000 ppm 보다는 낮은 농도로 분석되었으나 김 및 최(2001)가 조사한 혼합 축분뇨 퇴비 발효조에서 방출되는 암모니아 농도와는 비슷한 측정치로 나타났다. 또한 생물학적 처리를 이용하여 축산폐수를 처리하고 있는 시설에서 발생하는 암모니아 농도와 비교하여 본다면, 퇴비 발효조를 제외한 다른 공정에서는 비슷한 농도로 검출되었다. 암모니아는 혐기성 미생물에 의한 분 중의 아미노산이 탈아미노화(deamination) 반응을 통해 생성될 뿐만 아니라 노 중의 요소들이 가수분해되어 직접 암모니아를 생성(Mackie 등, 1998)하기 때문에 그 농도가 다른 물질에 비교적 높게

나타나는 것으로 사료된다. 황화합물 악취물질의 경우에는 황화수소와 메틸머캅탄의 농도가 축사(박 등, 2005), 액비 저류조(Heber and Ni, 1999) 및 생물학적 분뇨처리시설(홍 등, 2007)에서 방출되는 농도에 비해 상대적으로 높은 농도로 검출되었다. 한편 휘발성 지방산 농도는 축종과 분뇨관리 형태에 따라 농도 및 조성의 차이가 큰 것으로 나타났다. McGinn 등(2003)이 보고한 비육장(feedlot) 주변에서의 휘발성 지방산 농도는 본 연구에서 분석된 농도 보다는 낮았지만 농도 조성은 같은 경향을 보였다. 그러나 양돈 분뇨를 저장하고 있는 야외 저장조에서 방출되는 휘발성 지방산은 부트르산이 다른 지방산 보다 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다(Zahn 등, 2001). 이처럼 휘발성 지방산의 농도와 비율이 차이를 보이는 원인은 분뇨 중의 탄수화물과 단백질이 이화작용(catabolism)을 거치고, 혐기적 분해과정에서 서로 다른 혐기성 미생물들의 대사과정을 통해 각기 다른 대사경로로 생성되기 때문이다(Rappert and Muller, 2005). 따라서 이러한 악취 발생 기작을 이해한다면, 폭기처리에 의한 호기적 조건 유지가 어떻게 악취발생을 저감시키고 있는가를 이해할 수 있다.

2. 직접관능법에 의한 처리공정별 악취평가

Table 4에 가축분뇨 처리공정별 복합악취 평가를 위해 실시한 관능평가 결과를 나타내었다. 계절에 따라 다소 악취강도의 차이가 있으나 퇴비 발효조와 메탄발효 분뇨투입조에서 취기가 강한 4.5도에서 5도의 높은 악취강도를

Table 4. Comparison of odor intensity and offensiveness in animal waste treatment processes using direct olfactory method

Site	Season	Summer		Winter	
		Odor intensity ¹⁾	Odor offensiveness ²⁾	Odor intensity	Odor offensiveness
Composting process	Composting pile	5.0	4.0	5.0	4.0
	Curing	3.3	3.2	2.3	2.0
	Screen & Packing	1.7	2.0	1.8	1.3
Methane process	Inlet	4.8	4.0	4.5	3.7
	Outlet	2.8	2.7	1.8	2.0

¹⁾ Odor intensity : 0~5 scale

²⁾ Odor offensiveness : 0~4 scale

나타내는 것으로 조사되었다. 또한 취기의 용인성을 판단하는 악취 불쾌도 평가에서도 강한 불쾌함을 느끼게 하는 취기인 것으로 나타났다. 이러한 원인은 퇴비 발효조의 경우 지속적인 기계식 교반에 의한 호기적 조건하에서 분뇨내 유기물들이 급격한 산화가 발생하는 과정에서 분해 산물로 방출되기 때문이고, 메탄발효 분뇨투입조의 경우에는 농가에서 수거된 분뇨들의 혼합과정에서 자연스레 통성혐기성 조건이 형성되고 이에 따른 혐기분해 미생물들의 대사과정에서 악취물질이 휘산되기 때문인 것으로 사료된다. 한편 분뇨처리 공정을 거친 퇴비의 포장공정이나 메탄소화액 유출조에서는 악취 강도와 악취 불쾌도가 저감된 양상을 보였다.

3. 악취농도지수를 이용한 처리공정별 주요 악취원인물질 예측

전술한 바와 같이 악취는 자극성이 강한 기체상 물질이 후각에 작용하여 피해를 끼치는 감각공해(sensual pollution)로서 단일 성분보다는 여러 가지 물질이 복합하여 작용하고, 인간의 후각이 개별 악취물질마다 반응하는 농도가 다르기 때문에 검출된 악취물질의 농도치가 높고 낮음을 기준으로 악취에 기여하는 정도를 파악하기에는 어려움이 있다. 따라서 기기분석에 의해서 검출된 개별 악취유발물질의 농도를 그 물질의 최소감지농도로 나누어 준 값인 악취농도지수(Odor Quotient)를 이용하여 주요 악취원인물

질을 예측하였으며, 이용된 식은 다음과 같다.

악취농도지수 (Odor Quotient, OQ) =

$$\frac{\text{검출농도 (ppb)}}{\text{최소감지농도 (ppb)}}$$

악취농도지수를 이용하여 산정된 처리공정별 주요 악취원인물질은 Table 5에서 보는 바와 같다. 악취물질의 농도지수를 모두 합한 총악취농도지수는 퇴비 발효조에서 가장 높은 것으로 나타났으며, 이 공정에서의 주된 악취원인물질은 황화수소, 암모니아, 황화메틸, 메틸머캅탄 및 부트르산으로 예상되었다. 기기분석에 의한 단순 측정결과는 암모니아 농도가 황화수소 농도보다 훨씬 높았지만 황화수소의 최소감지농도가 0.1 ppb로 암모니아 최소감지농도인 0.1 ppm 보다 1,000배 가량 낮기 때문에 악취원인물질에 기여하는 정도가 다르게 나타났다. 또한 퇴비화 과정에서는 다른 공정에서도 황화수소, 암모니아 및 황화메틸이 주요 악취물질로 예상되었다. 반면, 메탄발효 분뇨 투입조에서는 암모니아 보다는 황화수소, 메틸머캅탄 및 황화메틸과 같은 황화합물 악취물질들이 악취원인물질로 더욱 크게 기여하는 것으로 나타났다.

4. 처리시설 부지경계선상에서의 악취물질 평가

가축분뇨 처리시설에서 발생된 악취물질은

Table 5. Determination of major odor-causing compounds in animal waste treatment processes using odor quotient¹⁾

Site	Rank	Summer						Winter					
		1st	2nd	3rd	4th	5th	SOQ ²⁾	1st	2nd	3rd	4th	5th	SOQ ²⁾
Composting process	Composting pile	H ₂ S	NH ₃	DMS	Mesh	BA	7,343	H ₂ S	NH ₃	DMS	MeSH	BA	5,433
	Curing	H ₂ S	NH ₃	BA	DMS	AA	1,070	BA	DMS	H ₂ S	NH ₃	MeSH	724
	Screen & Packing	NH ₃	DMS	H ₂ S	BA	MeSH	116	NH ₃	DMS	H ₂ S	BA	DMDS	90
Methane process	Inlet	H ₂ S	MeSH	DMS	BA	NH ₃	2,835	DMS	MeSH	BA	H ₂ S	NH ₃	2,872
	Outlet	MeSH	H ₂ S	NH ₃	DMS	DMDS	375	MeSH	H ₂ S	BA	DMS	NH ₃	447

¹⁾ Odor quotient = odor concentration/odor threshold

²⁾ SOQ = Sum of odor quotient

대기 중으로 방출되고 공기와 희석되어 이동하는 일련의 과정에서 인근 주민들에게 반응하여 민원을 유발하게 된다. 따라서 개별처리 공정에서 발생하는 악취물질의 농도뿐만 아니라 주민들에게 악취를 느끼게 할 수 있는 처리시설 부지경계선상에서의 악취 평가가 병행하여 이루어져야 한다.

Table 6에 시료채취 시 주풍향의 부지경계선상에서 측정된 개별 악취물질의 농도 및 관능평가 결과를 나타내었다. 암모니아는 부지경계선상에서 하계와 동계에 각각 1.8 및 1.6 ppm의 농도로 검출되었다. 황화합물 악취물질인 황화수소는 9.2 및 11.3 ppb로 황화합물 가운데 가장 높은 농도를 보였고, 나머지 황화합물의 경우에는 0.8~4.8 ppb의 농도 범위로 검출되었다. 본 연구에서 측정된 암모니아와 황화수소의 농도는 김 및 최(2001)가 보고한 축분퇴비공장 부지경계선에서 측정된 농도와 홍 등(2007)이 축산폐수처리시설 부지경계선에서 조사한 농도 분포와 비슷한 결과인 것으로 나타났다.

휘발성 지방산은 아세트산이 4.0~4.1 ppb로 가장 높은 농도로 측정되었다. 관능평가에 의한 부지경계선상에서의 악취강도는 2도에서 3도 범위로 측정되었고, 악취 불쾌도는 2도 가량으로 조사되었다.

또한 부지경계선상에서 기 측정된 개별 물질들 가운데 상대적으로 어떤 물질이 악취원인으로 기여하고 있는지에 대한 정도를 알아보고자 개별 악취농도지수를 총악취농도지수로 나누었고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 하절기에는 부트르산이 가장 높은 기여율을 보인 반면 동절기에는 황화메틸이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 계절에 상관없이 황화수소, 메틸머캅탄 및 암모니아가 본 처리시설에서 발생되고 있는 악취에 주된 기여를 하고 있는 것으로 예측되었다. 가축분뇨 처리시설에서 발생하는 악취의 효율적인 저감을 위해서는 악취 배출원의 특성을 이해하고 충분한 자료를 확보하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 조사된 처리공정별 악취 배출특성은 향후 악취

Table 6. Odor measurement using instrumental analysis and human panels on the boundary of animal waste treatment facilities

Season	Ammonia	Volatile Sulfur Compounds				Volatile Fatty Acids			Direct Olfactory	
	NH ₃	H ₂ S	MeSH	DMS	DMDS	AA	PA	BA	Odor intensity	Odor offensiveness
	... ppm ppb								
Summer	1.8	9.2	2.2	1.4	1.6	4.1	2.3	1.6	2.8	2.3
Winter	1.6	11.3	1.2	3.9	0.5	4.0	2.0	0.7	2.0	1.8

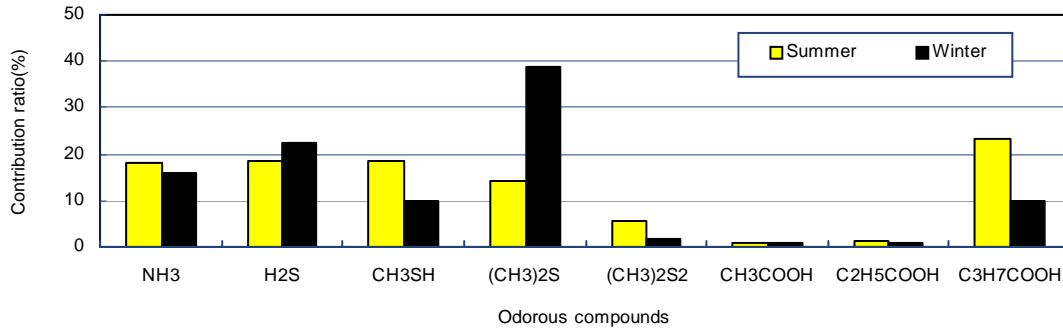


Fig. 2. Relative odor contribution on boundary of animal waste treatment facilities.

방지 시설의 선정과 설치 시 기초자료로 활용 할 수 있으리라 사료되며, 분뇨의 처리과정에서 발생될 수 있는 방향족 화합물과 같은 보다 광범위한 물질에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

IV. 요약

악취는 이웃주민들로 하여금 민원을 유발시키는 주요 원인이기 때문에 악취관리 는 지속가능한 축산과 매우 밀접한 관계가 있다. 본 연구는 메탄발효와 퇴비화 공정이 연계된 가축분뇨 처리시설에서 각 공정별로 기기 분석과 직접 관능법을 병행하여 악취 물질의 농도, 악취 강도 및 악취 불쾌도를 측정하고자 수행하였으며, 하계와 동계로 구분하여 처리 공정과 부지경계선에서 각각 암모니아, 황화합물 및 휘발성 저급지방산의 농도를 분석하였다. 높은 외기온에 기인하여 하계의 악취농도가 동계보다 높은 것으로 나타났다. 공정별로는 혼합된 분뇨를 교반하는 퇴비화 공정에서 악취 농도가 가장 높게 검출되었으며, 분뇨 투입조, 퇴비 후숙조, 분뇨 유출조 및 퇴비 선별 과 포장 공정의 순으로 악취 농도가 낮았다. 검출된 악취 물질 중 가장 높은 농도는 암모니아로 3.4에서 224.7 ppm의 농도 범위로 분석되었다. 황화합물 중에서는 황화수소가 가장 높은 농도인 2.3 ppm인 것으로 분석되었으며, 대부분의 황화합물 농도가 기존에 보고된 최소감지한계농도를 초과하는 것으로 측정되었다. 또한 아세트산은 휘발성 저급지방산 가운데 51에

서 89%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 다음으로는 프로피온산과 부트르산이 각각 1.9에서 35% 및 1.8에서 15%의 비율을 보이는 것으로 나타났다. 처리공정에서 발생하는 주요 악취원인 물질을 예측하고자 각각의 공정에서 측정된 악취물질의 농도를 최소감지한계농도로 나누어 악취농도지수를 계산하였다. 그 결과 퇴비화 공정에서는 황화수소, 암모니아, 황화메틸 및 메틸머캅탄이 악취원인 물질로 밀접한 연관이 있는 것으로 나타났으며, 분뇨 투입조에서는 황화수소, 메틸머캅탄 및 부트르산이 주요 악취물질인 것으로 나타났다.

V. 인용문헌

- Both, R. 2001. Directive on odour in ambient air : an established system of odour measurement and odour regulation in Germany. *Wat. Sci. Technol.* 44:119-126.
- Burton, C. H., Sneath, R. W., Misselbrook, T. H. and Pain, B. F. 1998. The effect of farm scale aerobic treatment of piggery slurry on odour concentration, intensity and offensiveness. *J. Agric. Engng. Res.* 71:203-211.
- Edeogu, I., Feddes, J., Colemann, R. and Leonard, J. 2001. Odour emission rates from manure treatment/storage systems. *Wat. Sci. Technol.* 44 (9):269-275.
- Heber, A. J. and Ni, J. Q. 1999. Odor emission from a swine finishing facility with a surface aerated lagoon. ASAE Paper No. 994129, ASAE,

- St. Joseph, MI 49085.
5. Kuroda, K., Osada, T., Yonaga, M., Kenematu, A., Nitta, T, Mouri, S. and Kojima, T. 1996. Emissions of malodorous compounds and greenhouse gases from composting swine feces. *Bioresour. Technol.* 56:265-271.
 6. Mackie, R. I., Stroot, P. G. and Varel, V. H. 1998. Biochemical identification and biological origin of key odour components in livestock waste. *J. Anim. Sci.* 76:1331-1342.
 7. Mahin, T. D. 2001. Comparison of different approaches used to regulate odours around world. *Wat. Sci. Tech.* 44(9):87-102.
 8. McGinn, S. M., Janzen, H. H. and Coates, T. 2003. Atmospheric ammonia, volatile fatty acids, and other odorants near beef feedlots. *J. Environ. Qual.* 32:1173-1182.
 9. Merrill, L. and Halverson, L. J. 2002. Seasonal variation in microbial communities and organic malodor indicator compound concentrations in various types of swine manure storage systems. *J. Environ. Qual.* 31:2074-2085.
 10. Miner, J. R. 1977. Characterization of odors and other volatile emissions. *Agric. Environ.* 3(2-3): 129-137.
 11. NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). 1994. *Manual of Analytical Method* (4th Ed.). Cincinnati, Ohio.
 12. Powers, W. J. 1999. Odour control for livestock system. *J. Anim. Sci.* 77(Suppl. 2):169-176.
 13. Rappert, S. and Muller, R. 2005. Odor compounds in waste gas emissions from agricultural operations and food industries. *Waste Manage.* 25:887-907.
 14. Reisner, A. E. 2005. Newspaper coverage of controversies about large-scale swine facilities in rural communities in Illinois. *J. Anim. Sci.* 83: 2705-2712.
 15. Schlegelmilch, M., Streese, J. and Stegmann, R. 2005. Odour management and treatment technologies: An overview. *Waste Manage.* 25:928-939.
 16. Sommer, S. G., Sogaard, H. T., Moller, H. B. and Morsong, S. 2001. Ammonia volatilization from sow on grassland. *Atmos. Environ.* 35: 2023-2032.
 17. Varel, V. H. and Miller, D. N. 2001. Effect of carvacrol and thymol on odour emissions from livestock wastes. *Wat. Sci. Tech.* 44:143-148.
 18. Whitehead, T. R. and Cotta, M. A. 2004. Isolation and Identification of hyper-ammonia producing bacteria from swine manure storage pits. *Curr. Microbiol.* 48:20-26.
 19. Zahn, J. A., DiSpirito, A. A., Do, Y. S. and Brooks, B. E., Copper, E. E., and Hatfield, J. L. 2001. Correlation of human olfactory response to airborne concentrations of malodorous volatile organic compounds emitted from swine effluent. *J. Environ. Qual.* 30:624-634.
 20. Zhu, J. 2000. A review of microbiology in swine manure odour control. *Agric. Ecosystems and Environ.* 78:93-106.
 21. 고한중, 최홍립, 김기연, 이용기, 김치년. 2006. 액상 가축분뇨의 처리 및 토양환원에 따른 악취 및 악취물질의 평가. *한국동물자원과학회지.* 48 (3):453-466.
 22. 김기연, 최홍립. 2001. 한강유역내 축분퇴비공장 악취발생에 대한 현장 평가. *동물자원과학회지.* 43(6):1005-1018.
 23. 박귀환, 오길영, 정경훈, 정선용, 차규석. 2005. 축산시설의 악취 특성에 관한 연구. *한국냄새환경학회지.* 4(4):207-215.
 24. 유용희, 김태일, 정종원,곽정훈, 최희철, 송준익, 양창범, 장영기, 김호정, 송기봉. 2005. 돈사 내 및 부지경계에서 악취물질 발생 조사 연구. *축산 시설환경학회지.* 11(1):45-54.
 25. 장영기, 송기봉, 유효정, 유용희. 2004. 축산시설에서 발생하는 악취의 축종별 특성에 대한 설문 조사. *환경영향평가.* 13(1):33-40.
 26. 홍대웅, 김수정, 문동호, 주창한, 이종필. 2007. 축산폐수처리시설에서 발생하는 악취물질 배출 특성 - 복합악취 및 12가지 지정악취물질을 중심으로. *한국냄새환경학회지.* 6(1):1-9.
 27. 환경부, 2005. 악취방지법 시행규칙 (접수일자 : 2007. 10. 11. / 수정일자 : 2008. 5. 16. / 채택일자 : 2008. 5. 27)