

# 축산퇴비를 이용한 돼지사체 매몰처리의 pilot 규모 평가 및 악취물질 배출특성

## Evaluation of Field Applicability and Odor Emission Characteristics for Pig Carcasses Burial Treatment of Pilot Scale using Livestock Compost

채정석<sup>1,2)</sup> · 전준민<sup>2)</sup> · 오경철<sup>2)</sup> · 류희욱<sup>3)</sup> · 김신도<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울시립대학교 환경공학과, <sup>2)</sup>그린환경종합센터, <sup>3)</sup>승실대학교 화학공학과  
(2017년 2월 20일 접수, 2017년 3월 7일 수정, 2017년 3월 7일 채택)

Jeong-Seok Chae<sup>1,2)</sup>, Jun-Min Jeon<sup>2)</sup>, Kyeong-Cheol Oh<sup>2)</sup>, Hee-Wook Ryu<sup>3)</sup>  
and Shin-do Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

<sup>2)</sup>*Green Environmental Complex Center*

<sup>3)</sup>*Department of Chemical Engineering, Soongsil University*

(Received 20 February 2017, revised 7 March 2017, accepted 7 March 2017)

### Abstract

Contaminated livestock disposal method includes burial method using soil. But the slow rate of decay process of carcasses has caused various problems. In this study, 4 pig carcasses (80~90 kg/pig) were buried in livestock compost as a cover material to improve carcasses decaying rate. The result of experiment showed the temperature of the carcass layer remained 40°C or higher even when the outside temperature dropped below zero. After the experiment, it was confirmed that carcasses in the compost burial was decomposed substantially than the carcasses from soil burial. The moisture content of the compost burial was 40~65%. The pH was affected by ammonia produced by decaying carcasses and the pH level was increased from pH 8.7~8.9 at the beginning of the experiment to 9.3~9.7 at the end of the experiment. The residues of typical odor components in the compost layer were decreased after volatilized and due to decaying carcasses strong odor was observed. The odor intensity evaluation by measured odor substances and olfactory evaluation showed overall favorable correlation, and among the measured odor substances the reduced sulfur compounds (RSC) were found to be dominantly contributing to malodorous substances of decaying carcasses. The above results proved rapid decay rates due to the thermal effects of livestock compost.

**Key words** : Livestock compost, Pig carcass, Infectious disease, Odor emission, Burial method

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-6490-2860, E-mail : sdkim@uos.ac.kr

## 1. 서 론

전 세계적으로 매년 수백 건의 다양한 가축전염병 발병 사례가 국제수역사무국 (Office International des Epizooties, OIE)에 보고되며 국가별 발병 시기, 감염된 가축의 종 및 발병 규모 등의 관련 정보를 OIE 웹페이지를 통해 확인할 수 있다 (OIE, 2017). 국내 또한 OIE에 가입된 회원국으로서 발병 사례를 보고하고 있으며, 2016년에 AI로 닭과 오리, 구제역으로 소와 돼지 등 가축의 대량 폐사가 여전히 이루어지고 있다.

대표적인 가축의 처리 방법은 매몰(구덩이 매몰, 대량 매몰, 매립), 소각, 연소, 렌더링 및 퇴비화를 들 수 있으며, 그 외 혐기성 소화, 알칼리 가수분해 등의 다양한 처리 방법이 있다 (Gwyther *et al.*, 2011). 국가별 우선처리 방법은 자국의 여건 및 발병 상황에 맞추어 주로 환경적 요인에 의해 결정되고, 그 외에 주변 처리 시설의 유무와 처리용량, 지역주민들의 찬반 여론 등이 영향을 미친다 (Yoo *et al.*, 2012).

국내에는 가축 전염병의 특성상 외부로 전파되는 것을 방지하기 위해 감염 가축의 지역 간 이동을 금지하고 있다. 이는 곧 처리 방법상의 제약으로 이어지기 때문에 감염 사육 처리에 있어 중요 고려사항인 신속함과 안정성 그리고 경제성을 고려하여 대량의 감염 사육의 처리는 매몰처리법이 통상적인 처리 방법으로 이용되고 있다 (KMOE, 2010). 이렇게 조성된 매몰지 중 매몰 지침을 준수하지 않거나 규격 이상의 사체를 매몰한 매몰지들은 사후관리의 어려움으로 환경오염 및 사회적 문제를 발생시킨다. 이러한 문제점들은 많은 언론 보도와 관련 연구 자료를 통하여 확인되고 있다 (Kim and Kim, 2013; Ko and Seol, 2013; Hong and Ha, 2012; Kim, 2011). 가축 사체 처리에 따른 매몰지의 환경문제는 주로 사체의 중량과 부피가 큰 감염된 가축 사체가 대량으로 처리되기 때문이다. 국내는 이러한 감염 가축 대상이 주로 돼지이며 구제역뿐만 아니라 콜레라와 같은 전염병으로 매년 대량의 돼지 사체가 발생되고 있다.

매몰지에서 비롯되는 주요 환경문제는 사체 부패 과정에서 발생하는 악취 및 침출수 문제, 침출수 처리 및 외부로의 누출 문제, 침출수로 인한 지하수 및 토양오염 문제, 내부에서 사멸하지 않은 병원균의 대기 노출 문제와 함께 느린 분해 속도로 인한 병원균 생존 우려

및 토지이용 문제 등을 들 수 있다 (Gwyther *et al.*, 2011; MAF BioSecurity Authority, 2005). 매몰처분 이후 5년의 경과시점에 일부 매몰지를 파서 돼지 사체 상태를 확인한 결과, 부패가 많이 진행되지 않고 사체 원형을 유지한 상태를 보였다 (KBS, 2016). 느린 사체 분해속도의 주요 원인으로는 부패를 가속화할 만한 열원의 부족과 생석회의 첨가를 들 수 있다. 열원의 경우 주변 환경 이외의 열원 공급이 존재하지 않으며, 생석회 첨가의 경우 매몰 지침 상 생석회층을 조성하여 물 (침출수)와 반응 시 발생하는 고온의 열로써 병원균에 대한 살균·살충의 소득작용을 기대하지만 (Sherman and Larkin, 2005), 이러한 생석회의 첨가는 부패에 관여하는 미생물의 성장을 방해하여 사체의 분해를 지연시키기도 한다 (Gwyther *et al.*, 2011).

가축전염병 예방법상 3년 이내에 발굴하지 못함에 따라 3년 이후 자연 분해되어야 매몰지를 처분할 수 있으나, 부패가 완료되지 않은 사체는 사체 내부에 병원균이 존재할 수 있기 때문에 처분할 수 없다. 결과적으로 부패완료가 지연될수록 가축 전염병의 생존우려는 커질 수 있고 매몰 토지의 재 이용률은 떨어질 것이다. 따라서 이를 보완한 현실적 상황에 맞는 개선 방안이 요구된다.

본 연구에서는 기존 토양 매몰법의 느린 분해속도를 개선하고자 충분한 열적 효과를 기대할 수 있는 축산퇴비를 복토재로 이용하여 돼지 사체를 매몰처리하였다. 이를 통하여 기존 토양 매몰처리 방법에 비해 보다 고온에서 고속으로 매몰처리하고자 하였고, 이러한 사체 처리 과정에서 배출되는 악취물질을 측정하여 퇴비매몰법의 현장 적용성을 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 축산퇴비를 복토재로 적용하여 돼지 사체를 매몰처리하고자 현장실험 (Pilot Plant)을 약 11개월간 진행하였고, 매몰지 구축 후 돼지 사체 부패과정에서 배출되는 악취물질을 측정하여 부패특성을 파악하였다 (그림 1). 현장 매몰지의 구축은 토양을 파내고 2 m (wide) × 2 m (long) × 2.4 m (deep) 크기의 구덩이를 조성한 후 외벽을 콘크리트 벽으로 구축하였다. 돼

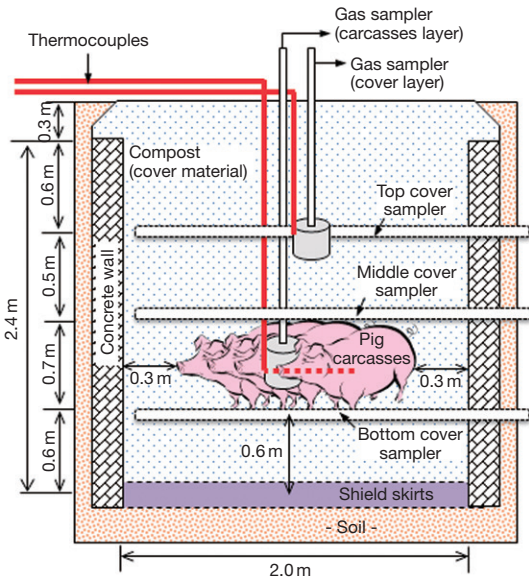


Fig. 1. Pilot test structure of burial method for pig carcasses treatment.

지 사체를 매몰하기 전 매몰지 하부에 침출수 유출 방지를 위한 차수막을 설치하였고, 약 0.6m 높이로 퇴비를 복토한 후 도축장에서 도축된 식용용 돼지 성돈 4마리(80~90kg/1두)를 넣고 퇴비로 최종 복토(사체층 포함 약 2.1m 높이)하였다. 돼지 사체의 구축 조건으로 좌·우 외벽으로부터 약 0.3m의 이격거리를 두어 열 보존효과를 유지할 수 있도록 하였다. 약취시료를 채취하고자 돼지사체 지점(사체층)과 사체층에서 0.5~0.6m 높이의 복토층에 가스포집관을 설치하였다. 가스포집관은 PVC 재질의 관을 내부에 삽입하여 매몰지 외부에서 약취시료의 채취가 가능하게 설계하였다. 부패과정 시 매몰지 내부의 온도 변화를 측정하기 위해 온도센서(TSL-101 Temperature Data Logger, Korea)를 약취 채취지점과 동일한 높이인 복토층과 사체층(사체 내부)에 설치하여 2분 간격으로 자동 측정하였다. 또한 매몰지 내부의 수분 함량 및 pH 변화를 측정하고자 매몰지를 상·중·하단 3개 지점으로 구분하여 시료채취봉을 삽입할 수 있도록 설계하였다.

최종적으로 매몰지에 비닐하우스를 설치하여 매몰지 내부로의 우수 유입 및 주변 지역으로의 약취 확산을 방지하였다. 대조 실험군으로 퇴비 매몰지와 동일 규격의 토양 매몰지를 구축하여 온도 변화를 측정하였

고, 실험 종료 후 사체의 외형을 비교·평가하였다.

## 2.2 약취물질 분석방법

약취물질 측정은 국내 약취공정시험기준을 준수하여 후각을 이용한 관능평가인 복합약취도 평가와 22가지 지정 약취물질 중 지방산 항목을 제외한 18가지 약취물질을 분석하였다(표 1). 지방산의 경우 기존 연구 사례인 퇴비 부자재를 이용한 가축 사체 퇴비화 처리 연구(Akdeniz *et al.*, 2007)에서 사체 부패 기간 동안 검출되지 않는 것으로 보고하여 측정물질에서 제외하였다.

복합약취는 공기희석관능법을 이용한 희석배수(Dilution to Threshold ratio, D/T ratio)를 산정하는 방법이다. 시료의 채취는 진공형 간접채취(Lung Sampling) 방법으로 고순도 질소(99.999%)로 3회 이상 세척한 Tedlar 10 L Bag (TOP Trading Eng., Korea)에 1 L/min의 유량으로 5~10분간 시료를 채취하였다. Bag에 채취된 시료는 무취공기 제조장치(일반공기를 활성탄과 흡수제를 통과시켜)를 이용하여 조제된 무취공기에 채취 시료를 단계적으로 주입하여 희석시료를 제조한 후 5명의 판정요원에 의해 냄새의 감지 여부를 단계별로 평가하였다. 최종 희석배수의 산정은 5명의 판정요원으로부터 구한 각각의 희석배수 값(최대 100,000배까지 평가) 중 최대·최소값을 제외한 나머지 값들의 기하평균으로 산출하였다(KMOE, 2014).

황화합물(Reduced Sulfur Compound, RSC)의 시료는 복합약취 시료 채취와 동일한 방법으로 채취되며 GC (Shimadzu-17A, Japan)-FPD (Flame Photometric Detector, Shimadzu-17A, Japan)에 펠티어 트랩(Peltier Trap)을 사용한 전자식 저온농축장치(SPIS-TD 3000, Donam Instrument Inc., Korea) 시스템을 활용하였다. 이때 TD (Thermal Desorber) 내에 Carboxen B와 Silica gel을 1.5:2.5의 부피비로 혼합한 CT (Cold Trap)에서 -15°C의 조건으로 저온 농축하였다. 저온 농축 시 수분 제거를 위해 시료 유입구에 전자식 수분제어장치 (Moisture dryer model-100, Donam instrument Inc., Korea)를 설치하여 수분을 약 95% 이상 제거 후 TD (Thermal Desorber) 내부로 시료를 유입하였다. CT에 흡착된 황화합물은 250°C의 고온에서 탈착하여 GC의 CP-SIL 5 CB column (Film thickness: 5 µm, Diameter : 0.32 mm, Length: 60 m, Agilent, USA)를 적용하여 화

**Table 1. List of analyzed compounds parameters.**

Odor group	Compound	Abbreviation	Chemical formula	OTV <sup>a</sup> (ppb)	MDL <sup>b</sup> (ppb)	Repeatability (RSD <sup>c</sup> , in%)	
A. Nitrogenous	Ammonia	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>	100	5.2	3.70	
	Trimethylamine	TMA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N	0.1	9.0E-02	3.51	
B. Reduced Sulfur Compound (RSC)	Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> S	0.5	2.7E-03	3.82	
	Methyl mercaptan	CH <sub>3</sub> SH	CH <sub>3</sub> SH	0.1	2.6E-03	5.11	
	Dimethyl sulfide	DMS	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S	0.1	3.2E-03	3.27	
	Dimethyl disulfide	DMDS	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	0.3	2.6E-03	4.75	
D. Aldehyde compounds	Acetaldehyde	AA	CH <sub>3</sub> CHO	2	0.52	0.78	
	Propionaldehyde	PA	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO	2	0.34	1.95	
	Butyraldehyde	BA	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CHO	0.3	0.55	2.24	
	Isovaleraldehyde	IVA	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> CHO	0.7	0.63	3.02	
	Valeraldehyde	VA	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CHO	0.2	0.51	4.05	
B. Volatile organic compounds (VOCs)	Styrene	Sty	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH=CH <sub>2</sub>	30	4.1E-02	2.56	
	Toluene	Tol	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	900	5.2E-02	1.05	
	Xylene	m,p-Xylene	m,p-Xyl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	41/58 <sup>d</sup>	7.5E-02	2.55
		o-Xylene	o-Xyl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	380	8.7E-02	1.87
	Methyl ethyl ketone	MEK	CH <sub>3</sub> COC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	440	2.0E-02	4.35	
	Methyl isobutyl ketone	MIBK	CH <sub>3</sub> COCH <sub>2</sub> CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	200	8.2E-02	4.17	
	Butyl acetate	BuAc	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>	8	7.8E-02	4.61	
	Isobutyl alcohol	i-BuAl	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHCH <sub>2</sub> OH	10	4.0E-02	3.87	

<sup>a</sup>OTV: Odor threshold value: Refer to KMOE (2007)

<sup>b</sup>MDL: method detection limit

<sup>c</sup>RSD: Relative Standard Deviation

<sup>d</sup>m-xylene = 41 ppb, p-xylene = 58 ppb

합물을 분리하였다. 최종적으로 개별 성분들은 180°C의 FPD에서 검출이 이루어졌다.

암모니아(NH<sub>3</sub>)는 2개의 임핀저에 0.5% 봉산용액 50 mL를 나누어 담고 직렬로 연결한 후 먼지필터가 장착된 유입부를 통해 50 L (10 L/min × 5 min)의 시료를 흡수시켜 주었다. 흡수가 끝난 봉산용액은 10 mL를 분취하여 인도페놀법으로 1시간 동안 발색시켰다. 발색된 시료는 UV (160A, Shimadzu, Japan)를 사용하여 640 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 농도로 계산하였다.

트리메틸아민(Trimethylamine, TMA)은 산성여과지를 SPME (Solid Phase Microextraction, 65 µm, Supelco, USA) 방식으로 시료를 농축 후 분석하였다. 이를 위해 원형유리섬유 거름종이(Glass microfiber: 47 mm, Whatman, UK)를 산성여과지 처리하여 50 L (10 L/min × 5 min)의 시료 가스의 흡착을 유도하였다. 채취된 fiber를 증류수 20 mL에 깨트린 후 3 mL를 바이알에 넣고 NaOH 50% 2 mL를 주입하여 교반 후 용출시켜 fiber에 흡착·농축시켰다. 분석은 GC (2010Plus, Shimadzu, Japan)의 주입구에서 220°C로 3분간 열탈

착하여 아민류 분석에 용이한 Column Stabilwax-DB (Film thickness: 1 µm, Diameter: 0.32 mm, Length: 30 m, Restec, USA)를 적용하였다. 그리고 200°C의 온도 조건하에서 TMA를 고감도로 검출이 가능한 NPD (Nitrogen Phosphorous Detector)로 정량 분석하였다.

알데하이드류는 DNPH (2,4-dinitrophenylhydrazine) cartridge (S10, Supelco, USA)를 이용하여 Personal Air Sampler (Gilian, USA)로 1 L/min으로 10분간 총 10 L를 채취하였다. 채취 시 오존의 영향을 제거하기 위하여 2,4-DNPH 카트리지 전단부에 KI가 채워져 있는 오존 스크리버 (Waters, U.S.A)를 적용하였다. DNPH로 유도체화 시킨 알데하이드류 화합물은 Acetonitrile과 증류수를 7.5:2.5의 부피비로 조제한 용리액을 바탕으로 비극성 Column인 ZORBAX Eclipse xdb-C18 (Particle size: 5 µm, Diameter: 4.6 mm, Length: 250 mm, Agilent, USA)을 적용하여 분리하였다. 이후에 HPLC/UV (YL9100, Younglin, Korea)에서 360 nm의 파장으로 알데하이드류 성분들을 측정하였다.

악취성 VOCs의 시료 채취는 Tedlar 10 L bag에 채취

한 후 휴대용 펌프(MP-Σ30KN, Sibata)를 사용하여 총 1L(100 mL/min × 10 min)의 시료를 Tenax-TA 흡착제(Supelco, USA) 200 mg이 충전된 흡착관(Perkin elmer, Supelco)에 흡착을 유도하였다. 그리고 이를 열탈착분석기(TD)와 GC(GC 6890N, Shimadzu, Japan)-MS(Mass Spectrometer; GC 5973N, Shimadzu, Japan)가 결합된 분석 시스템으로 분석하였다. 열탈착 분석은 Carboxpack B와 Carboxpack C를 1:1의 부피비로 혼합한 CT를 이용하여, -30°C에서 저온 농축하였다. 농축된 시료는 다시 320°C의 고온에서 열탈착을 유도한 후, GC 내의 DB-1 Column(Film thickness: 0.25 μm, Diameter: 0.25 mm, length: 60 m, Agilent, USA)으로 화합물의 분리를 유도하여 정량 분석하였다.

표 1은 조사대상 악취물질에 대한 최소감지농도(OTV)를 나타냈고, 품질보증(Quality Assurance, QA)에 대한 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL)와 분석에 대한 재현성을 나타내는 상대표준편차(Relative Standard Deviation, RSD)를 나타냈다. MDL값은 7회 반복 분석하여 산출한 값이며, RSD는 0.78~5.11%로 국내 악취공정시험 기준인 10%보다 낮게 평가되어 양호한 재현성을 보였다(KMOE, 2014). 사체 부패 특성을 파악하기 위해 장기간 측정이 이루어졌으므로 채취 시료의 분석 전에는 앞서 언급한 바와 같이 분석 기기의 정도 관리가 이루어진 상태에서 분석을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 축산퇴비 특성

국내 농촌진흥청고시「비료 공정규격설정 및 지정(2016.6.25. 기준)」에 따르면 비료의 종류는 크게 보통 비료와 부산물비료로 구분하고 있다. 축산퇴비는 부속 유기질의 부산물비료로서 우분, 돈분, 계분 등의 가축 종별의 개별 퇴비와 다양한 축분을 혼합한 혼합퇴비가 유통되고 있다. Nam *et al.* (2010)는 농협중앙회에 국내 가축분뇨 퇴비 공급업체로 지정된 381개 업체의 퇴비 약 1,900점을 축분 종류에 따른 퇴비 유형별 성분 분석을 수행한 바 있다(표 2). 본 연구에서 사용된 축산퇴비(돈분, 계분, 왕겨, 톱밥 등을 주원료로 혼합하여 6개월간 호기 발효시킨 완숙퇴비)를 비료 시험 지정기관에 의뢰하여 분석한 결과, 퇴비 공정규격상의 항목별 규격을 만족하는 것으로 평가되었다(표 2).

따라서 본 연구에서는 위와 같은 축산퇴비 중 가장 대중적으로 많이 이용되고 있는 혼합퇴비를 선정하여 복토재로 사용하였다. 또한, 공정규격 항목 이외의 pH, 용적밀도, 공극률, 수분보유력을 평가하였다(표 3). 용적밀도는 퇴비의 건조 질량을 퇴비의 용적으로 나누어 계산하였으며, 공극률은 매스실린더를 이용하여 비중 측정 후  $[1 - (\text{용적밀도} \div \text{입자밀도})] \times 100$ 의 계산식을 이용하여 산정하였다. 수분보유력은 수분의 최대흡수 시 수분의 중량과 시료의 건조중량의 무게비에 퇴비의

Table 2. Types and contents of domestic livestock manure compost for standards.

Item	Standard <sup>a</sup>	Nam <i>et al.</i> (2010)				This study	
		Poultry (n = 82)	Swine (n = 33)	Cattle (n = 6)	Mix (n = 260)	Mix (n = 3)	
Organic matter (OM) (%)	30 ≤	39.1	40.7	39.6	39.9	45.1	
OM/N <sup>b</sup>	none	25.1	31.2	27.6	27.4	29.1	
NaCl (%)	≤ 2.0	0.52	0.45	0.61	0.51	0.47	
H <sub>2</sub> O (%)	≤ 55	37.0	42.1	41.6	39.1	36.5	
Heavy metal (mg/kg)	As	≤ 45	0.73	0.83	0.82	0.98	0.84
	Cd	≤ 5	0.36	0.43	0.57	0.42	0.31
	Hg	≤ 2	0.04	0.02	- <sup>c</sup>	0.06	0.006
	Pb	≤ 130	12.63	9.10	8.53	8.32	2.29
	Cr	≤ 200	10.46	10.95	15.34	11.65	2.68
	Cu	≤ 360	57.39	117.0	55.35	77.74	150.29
	Ni	≤ 45	6.22	6.34	7.98	7.92	3.42
Zn	≤ 900	217.44	346.34	209.91	234.43	341.44	

<sup>a</sup>Establishment and designation of compost organic fertilizer process specification - notification No. 2016-26 of rural development administration.

<sup>b</sup>Organic matter/nitrogen ratio.

<sup>c</sup>Data was below the detection limit.

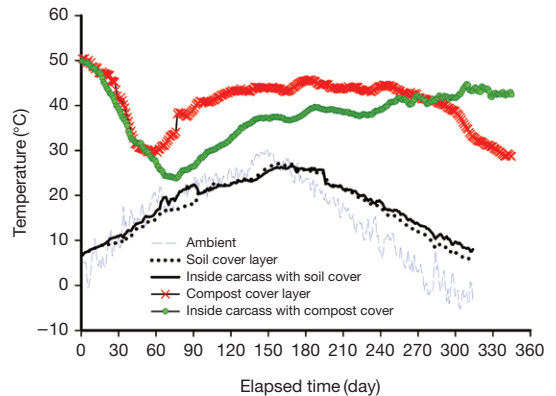
**Table 3. Physical properties of cover material.**

Item	Cover materials	
	Compost (n = 3)	Soil (n = 3)
pH	8.54	6.15
Bulk density (g/mL)	0.233	1.431
Porosity (%)	64.2	47.1
Water holding capacity (v/v, %)	1,123.2	34.9

겉보기 밀도를 곱하여 부피비로 나타냈다. 실험에 사용된 퇴비의 초기 pH는 8.54, 용적밀도는 0.233 g/mL, 공극률 64.2%, 수분보유력 1,123.2%로 평가되었으며, 실험 현장의 매몰지 토양은 pH 6.05, 용적밀도 1.431 g/mL, 공극률 47.1%, 수분보유력은 34.9%로 평가되었다. 특히, 퇴비의 수분보유력이 토양에 비해 약 32배 높게 평가되어 사체 부패 시 배출되는 침출수를 흡수할 수 있는 완충지 역할을 함으로써 효과는 더 뛰어날 것으로 판단된다.

### 3.2 온도 및 사체 변화

시간경과에 따른 매몰지 내부의 온도 변화를 확인하였다(그림 2). 대조 실험군인 토양 매립지의 경우 사체 내부와 복토층의 온도 변화가 외기 온도 변화와 유사한 경향성을 보여, 외기 온도가 사체 부패에 필요한 주요 열원으로 판단된다. 퇴비 매몰지의 경우, 실험 초기 외기 온도가  $-6^{\circ}\text{C}$ 일 때 퇴비 자체의 보유열에 의해 사체 내부 온도가  $49.8^{\circ}\text{C}$ , 복토지점은  $50.4^{\circ}\text{C}$ 로 퇴비에 의한 강한 열전달 효과를 보여 주고 있다. 이후 외기 온도 차에 의해 지속적으로 매몰지 내 온도가 하강하였으나 퇴비층은 57일, 사체 내부는 76일 경에 다시 온도가 상승하여 약 270일 경에 사체 내부와 복토층의 온도가 역전되는 현상이 나타났다. 실험 종료 시기에는 외기 온도가  $-5^{\circ}\text{C}$ 에도 불구하고 사체 내부 온도는  $42^{\circ}\text{C}$  이상을 유지하였다. 온도 역전현상은 사체 내부의 부패작용이 활발해짐에 따라 온도가 상승한 것으로 판단된다. 이러한 온도 변화 양상은 매몰지 내부의 사체 부패시기 정도를 판단할 수 있는 자료로 볼 수 있다. 매몰지 내부의 높은 온도는 부패 촉진과 더불어 병원균의 살균 및 불활성화에 중요한 영향 인자임으로 (Imbeah, 1998; Stentiford, 1996), 초기에 높은 부패 온도를 유지하는 것은 병원균 처리에 바람직하다. 구제역 바이러스의 경우  $50^{\circ}\text{C}$ 에서 급격히 불활성화 되어



**Fig. 2. Average temperatures of ambient air, soil cover layer, compost cover layer, inside carcasses according to burial methods.**

$56^{\circ}\text{C}$ 에서 30분 처리 시 사멸하는 것으로 알려져 있다 (Dimopoulos, 1960; Bachrach *et al.*, 1957).

그림 3과 같이 실험 종료 후 매몰지를 파내어 돼지 사체의 부패 상태를 확인하였다. 토양으로 매몰한 매몰지의 사체 (A)는 복토층 무게로 인하여 압축된 형태의 돼지 사체 원형을 보여 부패가 많이 진행되지 않은 것으로 확인되었다. 퇴비로 매몰한 사체 (B)는 상대적으로 토양 매몰지에 비해 부패가 많이 진행되어 돼지 원형을 확인할 수 없었고, 뼈와 일부 단백질 및 지질, 연골 등의 잔류물질이 확인되었다. 이러한 사체 형태의 변화는 퇴비의 부패 촉진 효과에 의한 직접적인 결과로 볼 수 있다.

### 3.3 수분 함량 및 pH 변화

부패 과정 동안의 사체 주변의 수분 함량 변화는 그림 4(A)와 같다. 기존 연구결과에 의하면 가축 사망 이후 침출수 발생량은 2개월 이내에 대부분 배출되는 것으로 추정하고 있다(MAF BioSecurity Authority, 2005; Munro, 2001). 본 연구기간 동안 퇴비 내 수분 함량 변화는 약 60일 이전 시점까지 증가하였고 이후 감소 추세를 보이는 것으로 나타나 기존 침출수 배출특성이 반영된 결과로 판단된다. 상·중·하단의 평균 수분 함량 변화는 약 40~65%의 수준으로서, 중단(사체층 상부) > 하단(사체층 하부) > 상단(사체 상부 60 cm 위 복토층) 순으로 높게 나타났다. 하단에 비해 중단 지점의 높은 수분 함량은 퇴비열에 의한 사체층 상부로 침

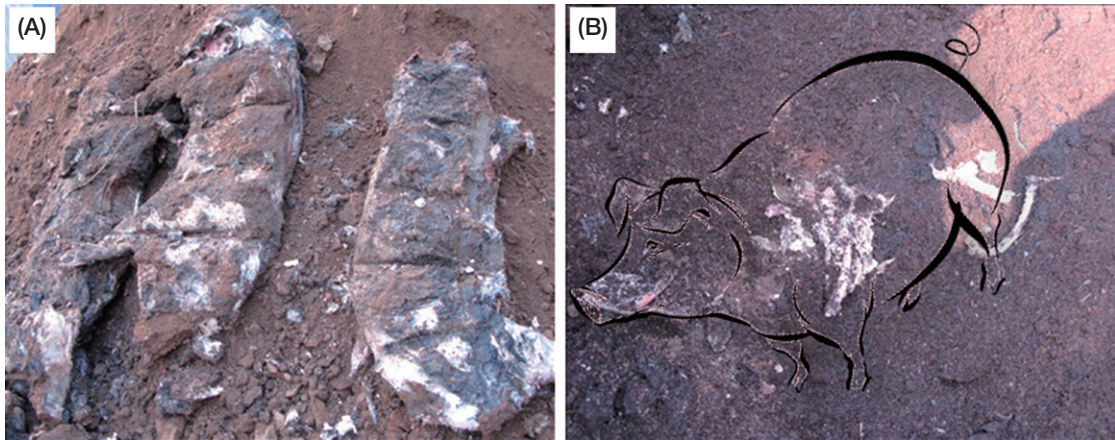


Fig. 3. Appearances of pig carcasses after experiment end : (A) soil burial method, (B) compost burial method.

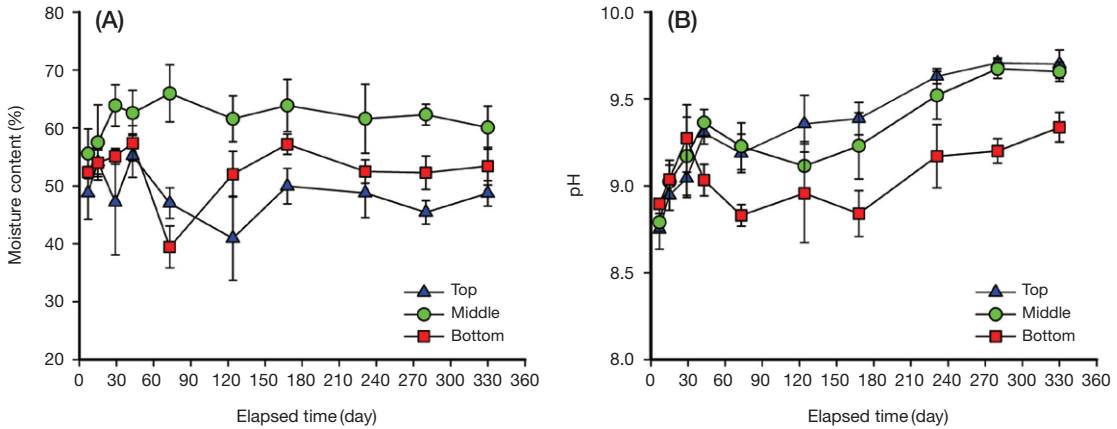


Fig. 4. Changes in the moisture content and pH from different sampling point of compost layer with pig carcasses: (A) moisture content, (B) pH.

출수가 기화되었기 때문인 것으로 사료된다. 실험 종료 후 매몰지를 파내어 사체 하단을 확인한 결과 침출수의 존재 유무를 육안으로 판단할 수 없었다. 이는 퇴비의 뛰어난 수분보유력과 퇴비열에 의한 침출수의 건조 및 일부 기화작용 효과로 판단된다. 따라서 사체 처리를 위한 축산 퇴비의 복토재 이용 시 침출수 배출에 대한 완충지대 효과를 기대해 볼 수 있다.

그림 4(B)의 pH는 약 60일 이전 시기에 pH 9.3까지 상승하여 이후 90일 이전 시기까지 감소 후 다시 증가하여 pH 9.7까지 상승하였다. 일반적으로 가축 사체에서 발생된 침출수의 pH는 약 6~8 정도의 범위로서 중

성에 가까운 약산성과 약염기성을 띤다(Yuan *et al.*, 2013; Bao *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2010). 퇴비 내 pH의 상승은 부패과정 동안의 유기성 질소가 분해되어 발생되는 암모니아성 질소에 의한 영향이 크다. 사체의 단백질이 탈카르복실화 반응(Decarboxylation Reaction)에 의해 발생된 암모늄 농도와 이산화탄소의 분해 과정에서 침출수의 pH를 상승시키는 것으로 보고되고 있다(Schotsmans *et al.*, 2012; Bao *et al.*, 2010; Dent *et al.*, 2004). 중단과 하단 지점의 수분 함량과 pH는 통계적으로 유의미한( $p < 0.05$ ) 차이를 보였으며, 중성에 가까운 침출수의 직접적 영향을 받기 때문에 하단 지점

의 pH가 가장 낮았다. 그리고 하단에 비해 pH가 높은 상·중단은 사체 부패과정에서 배출되는 암모니아와 퇴비 재료에서 배출된 암모니아 가스의 잔류로 인해 상층부의 pH( $r=0.76, p<0.05$ )가 더 높게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.4 시간 경과에 따른 악취물질 배출특성

돼지 사체 매물 후 축산퇴비 복토층과 사체층에서 경과일 15일(D-15)에 처음 악취물질을 측정하여 340일(D-340)까지 총 20회 측정할 결과를 표 4와 5에 나타냈다. 연구기간 동안 매물지의 주요 악취 발생원은 크게 2가지로서, 첫째는 복토재로 활용된 축산퇴비에서 비롯된 악취와, 둘째는 사체가 부패하면서 배출하는 악취이다.

실험 초기(D-15)의 악취물질은 주로 퇴비의 잔류 악취물질로서 측정지점의 깊이에 따라 악취물질 휘발조건 차이로 인하여 사체층에 비해 복토층의 악취농도가 더 낮게 분포하는 것을 알 수 있다. 복토층은 NH<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>S의 농도가 수백~수천 ppm 수준으로 다른 물질에 비해 대체로 농도가 높고, 사체층에서는 NH<sub>3</sub>와 환원성 황화합물(RSC), 알데하이드류(AA, BA, VA) 및 악취성 VOC(MEK, i-Bual) 등의 다양한 악취물질들이 농도가 높게 분포하고 있었다. 악취 강도가 높은 일부 악취물질에 의한 마스킹(Masking) 효과와 후각으로 인지 가능한 악취물질의 최소감지농도(표 1) 관점에서 보면 측정항목 중 환원성황화합물(RSC)이 퇴비의 주요 악취물질로 판단된다. 본 연구에서는 퇴비 복토층에 15일 경과시점에 악취농도가 높게 검출되었으나, 현장에서 대기 중 악취는 약 7일 내에 약화되어 후각적으로 감지가 되지는 않았다. 즉, 축산퇴비를 복토재로 사용했을 시 매물 초기에는 주변지역에 악취의 영향을 줄 수 있으나 그 시기는 비교적 짧은 것으로 판단된다.

일반적으로 대기 중에 노출된 사체 부패 과정을 육안으로 관측하면, 부패가 진행됨에 따라 사체 내부 혐기발효에 의해 생성된 가스로 인하여 복부의 팽창과 수축이 반복되면서 부패가 진행되며(Dekeirsschieter *et al.*, 2009), 이러한 팽창과 수축 작용은 부패가 활발히 진행되고 있다는 외형적 증거이다. 부패과정에서 배출된 악취물질의 시간적 배출 경향성을 확인하고자 그림 5에 복토층과 사체층의 농도를 비교하였다. 퇴비

에 잔류하고 있는 악취물질의 간섭에 의해 농도 변화가 크므로 지수적인 관점에서 보면, 측정된 악취물질 중 사체층에서 시간적 농도 변화 폭이 크게 나타나고 있는 성분은 NH<sub>3</sub>와 TMA, RSC로 나타났다. TMA는 계속적으로 증가하여 약 230일 경에 가장 높은 농도로 검출된 후 감소하였고, NH<sub>3</sub>는 약 100일 경과시점 이전에 증감의 변화가 있었으나 이후 지속적으로 증가하였다. RSC는 약 100일을 전후로 농도가 증가하여 실험 종료 시점에서는 감소한 특성을 보였다. 전반적으로 복토층과 사체층에서 농도가 급격히 감소하는 약 100일 이전의 경과 시점이 잔류 퇴비의 악취가 휘발되어 감소하는 시기인 것으로 파악되며, 100일 이후 증가된 악취물질 농도는 사체 부패에 의한 영향으로 판단된다. 특히, 앞서 사체 부패에 따른 농도 변화가 크게 나타난 NH<sub>3</sub>와 TMA, RSC의 경우 사체층에서 고농도로 나타난 시기에 복토층에서는 고농도 특성이 반영되지 않은 것으로 나타났다.

또한 그림 6에 후각을 이용한 관능평가인 복합악취(공기희석배수)를 보면, 사체층의 악취 강도 경향성은 앞서 악취물질의 특성이 반영되어 퇴비의 악취 영향이 감소하는 시점인 약 100일 전후로 가장 높은 악취 강도를 보였다. 복토층의 악취 강도는 지속적으로 감소하여 사체층의 악취 강도가 높게 나타날 때(약 100일 이후) 사체층 상부인 복토층에서는 동일한 변화 양상을 보이지 않고 낮게 나타났다. 따라서 퇴비의 침출수 흡수에 대한 완충지대 역할뿐만 아니라 사체 부패 과정 시 배출되는 악취물질의 차단 및 흡수 효과의 영향 또한 있을 것으로 판단된다.

### 3.5 개별 악취성분들의 상관분석 결과

사체층에서 배출된 악취물질들 간의 상관성 평가는 통계 프로그램 SPSS (IBM version 21)를 이용하여 pearson correlation analysis을 실시하였다. 퇴비 매물법의 배출 악취를 퇴비에 의한 잔류 악취와 사체 부패에 의한 악취 영향 시기로 구분하고자, 앞서 그림 5와 6의 악취 배출특성을 고려하여 사체 매물 100일 전후 시점으로 구분하여 평가하였다. 분석대상 물질 중 최소감지농도 미만의 낮은 농도 수준의 악취물질들은 평가에서 제외하였다.

표 6(A)는 실험 직후 100일 경과시점 이전까지의 자료에 대한 상관분석 결과로서, 퇴비 내에 다양한 악취



**Table 4. Concentration (ppb) of target odorous compounds measured from cover layer of compost burial method included pig carcasses up to 340 days.**

Order	Odorants	D-15	D-28	D-42	D-48	D-57	D-64	D-70	D-79	D-84	D-92	D-104	D-119	D-132	D-152	D-166	D-202	D-230	D-287	D-308	D-340
1	NH <sub>3</sub>	125.242	5,382	536	17,089	27,576	20,183	436	191	122,155	296	173,141	2,708	188	284	192	53	153	13	36	76
2	TMA	0.93	N.D. <sup>a</sup>	0.70	0.42	0.17	0.33	0.43	1.18	1.11	1.39	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.45	0.32
3	H <sub>2</sub> S	1,227.019	68,739	95,963	47,933	106	1.79	73.39	0.40	10.74	0.70	0.11	N.D.	N.D.	4.98	0.13	0.76	N.D.	N.D.	N.D.	0.31
4	CH <sub>3</sub> SH	7,371	147.22	789.96	376.95	6.84	N.D.	4.27	N.D.	3.90	0.10	N.D.	N.D.	N.D.	0.82	0.27	0.45	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	DMS	5,469.59	52.44	107.24	88.51	0.71	0.26	1.19	36.48	10.07	2.41	0.97	0.61	23.27	41.64	58.96	14.08	57.41	0.70	0.10	N.D.
6	DMSDS	277	157.64	34.31	14.92	0.16	0.11	2.09	2.95	6.62	1.12	0.86	N.D.	10.53	8.73	4.75	3.67	0.72	0.50	2.06	0.26
7	AA	8.17	66.08	12.95	12.97	2.10	7.07	14.81	17.38	21.60	18.95	11.84	10.95	6.23	17.05	11.16	8.61	10.82	9.23	N.D.	1.79
8	PA	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.38	0.63	N.D.	1.57	0.57	N.D.	N.D.	N.D.	2.22	1.03	N.D.	0.38	N.D.	N.D.
9	BA	438.78	543.43	286.80	231.18	185.07	121.86	84.37	103.87	54.03	18.29	8.10	7.97	4.52	0.73	N.D.	2.29	N.D.	2.92	N.D.	N.D.
10	IVA	N.D.	N.D.	120.47	91.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	18.43	2.99	2.87	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
11	VA	80.62	206.34	55.38	36.18	79.71	41.23	30.94	39.70	5.91	N.D.	N.D.	0.96	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
12	Sty	5.49	2.84	3.07	3.59	3.15	3.06	4.28	5.37	5.33	1.49	3.63	3.56	4.18	3.07	3.31	1.41	1.12	0.78	0.69	0.05
13	Tol	100.35	19.80	13.94	13.33	16.82	15.88	15.49	17.63	16.57	1.56	11.85	13.40	13.33	5.62	12.95	15.17	15.16	1.40	1.09	4.98
14	m,p-Xyl	3.84	2.90	3.99	2.36	2.03	2.24	2.95	3.08	4.24	1.74	2.42	3.15	3.49	3.94	3.99	2.61	3.09	0.53	0.33	0.68
15	o-Xyl	2.28	1.97	2.14	1.45	1.37	1.25	1.61	1.54	2.05	0.89	1.02	1.24	1.23	1.38	1.73	0.88	1.09	0.58	0.55	0.30
16	MEK	1,400.45	483.64	342.27	280.63	282.28	177.29	99.54	127.86	80.72	6.01	11.74	14.12	14.91	3.77	6.64	2.09	1.15	0.43	0.76	1.63
17	MIBK	66.55	47.71	35.99	32.35	38.70	25.11	15.14	13.88	21.66	0.30	9.63	6.01	6.85	5.38	0.81	0.47	0.60	N.D.	0.22	N.D.
18	BuAc	7.69	1.15	4.45	0.46	0.43	0.74	0.76	0.74	1.41	0.42	0.92	0.97	1.60	1.22	1.31	0.73	0.65	0.36	0.55	0.27
19	i-BuAl	68.23	1.58	0.61	1.99	0.50	N.D.	1.21	2.12	3.53	N.D.	1.06	1.79	1.93	1.69	1.54	0.78	0.46	0.49	0.81	N.D.

<sup>a</sup>N.D.: not detected or below method detection limit

Table 5. Concentration (ppb) of target odorous compounds measured from carcass layer of compost burial method included pig carcasses up to 340 days.

Order	Odorants	D-15	D-28	D-42	D-48	D-57	D-64	D-70	D-79	D-84	D-92	D-104	D-119	D-132	D-152	D-166	D-202	D-230	D-287	D-308	D-340
1	NH <sub>3</sub>	63,694	149	422	405	107	304	5,283	7,005	696	26,341	247	38,942	115,190	278,885	286,653	173,298	231,129	336,548	460,389	509,700
2	TMA	0.23	N.D	0.24	3.17	0.96	5.32	8.93	11.85	24.33	23.92	7.50	23.33	16.18	47.32	51.70	1,819	2,673	426.83	93.26	7.75
3	H <sub>2</sub> S	1,486,133	198,232	1,622,579	1,424,997	1,139,997	1,577,643	1,104,350	359,677	87,695	61,386	39,901	31,921	12,784	5,208,577	36,120	929,253	3,093,946	8,295	5,169	386
4	CH <sub>3</sub> SH	2,021,722	44,875	189,180	184,036	147,228	14,517	10,162	2,215	4,504	3,152	2,049	1,639	2,150	907,153	2,593	462,254	347,693	31,312	270.45	120.04
5	DMS	265,735	5,367	27,714	27,136	21,709	1,577	1,104.21	376,28	185.16	129.61	84.25	67.40	274.42	2,392	1,257	2,085.03	1,063.30	234.72	120.84	50.67
6	DMDS	212,492	4,039.66	10,960.11	4,099.60	3,279	305.23	213.66	75.21	32.48	2.74	93.04	74.43	11,453	4,753	1,825	51,172	695.61	112.54	87.56	680.92
7	AA	1,513.12	76.16	31.83	15.44	84.08	10.22	15.25	16.79	98.40	191.92	102.92	64.56	57.98	27.19	135.36	79.89	27.31	62.21	185.34	726.92
8	PA	400.35	N.D	N.D	N.D	39.62	N.D	N.D	N.D	69.09	56.29	36.19	31.91	14.31	N.D	63.25	N.D	N.D	22.03	73.55	193.97
9	BA	1,200.14	633.21	573.08	538.81	733.63	641.42	608.97	657.75	793.25	816.69	909.94	926.82	639.77	786.15	777.42	535.76	238.96	264.88	638.57	500.13
10	IVA	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	510.36	552.00	N.D	N.D	N.D	N.D	483.55	161.95	122.82	114.37	68.23
11	VA	320.63	313.95	362.57	256.71	364.10	297.83	294.42	308.02	395.07	84.06	96.41	656.96	480.58	473.99	507.93	201.66	N.D	44.95	58.62	272.77
12	Sty	4.17	2.79	2.37	4.45	2.98	1.96	4.48	3.03	2.82	1.97	1.54	10.86	2.60	2.5	7.77	20.90	7.86	2.49	0.89	0.54
13	Tol	292.08	128.20	57.86	77.17	29.36	31.44	25.66	31.36	24.59	24.52	27.50	32.14	39.56	42.27	50.12	79.77	45.07	8.65	0.67	2.62
14	m-p-Xyl	13.90	10.48	7.32	5.55	4.45	3.39	3.78	4.36	3.64	3.44	3.85	4.19	3.81	3.65	5.67	5.84	3.11	0.85	0.04	0.22
15	o-Xyl	4.96	4.55	3.36	3.32	1.88	1.55	1.85	2.13	1.79	1.77	1.83	1.88	0.86	1.52	2.44	2.18	8.76	0.66	0.53	0.77
16	MEK	1,862.13	1,314.44	929.28	1,408.19	1,045.46	747.80	660.24	812.77	662.97	733.31	824.53	931.50	880.52	779,161	1,02,07.07	388.79	230.58	480.89	166.60	181.25
17	MIBK	43.26	125.91	95.39	139.53	119.87	105.02	89.53	123.86	24.62	96.82	131.25	156.49	159.32	140.04	199.04	41.95	148.98	38.64	0.91	8.78
18	BuAc	398.50	230.45	174.62	222.84	206.30	195.61	156.31	28.59	2.17	21.62	15.90	16.39	6.98	3.91	87.09	28.84	71.90	0.51	0.54	7.23
19	i-BuAl	2,210.34	1,584.17	1,605.67	1,769.38	1,528.23	1,173.59	982.49	1,200.35	881.47	907.44	1,024.35	1,161.55	1,028.13	750.06	1,053.25	287.70	351.88	16.61	1.48	18.29

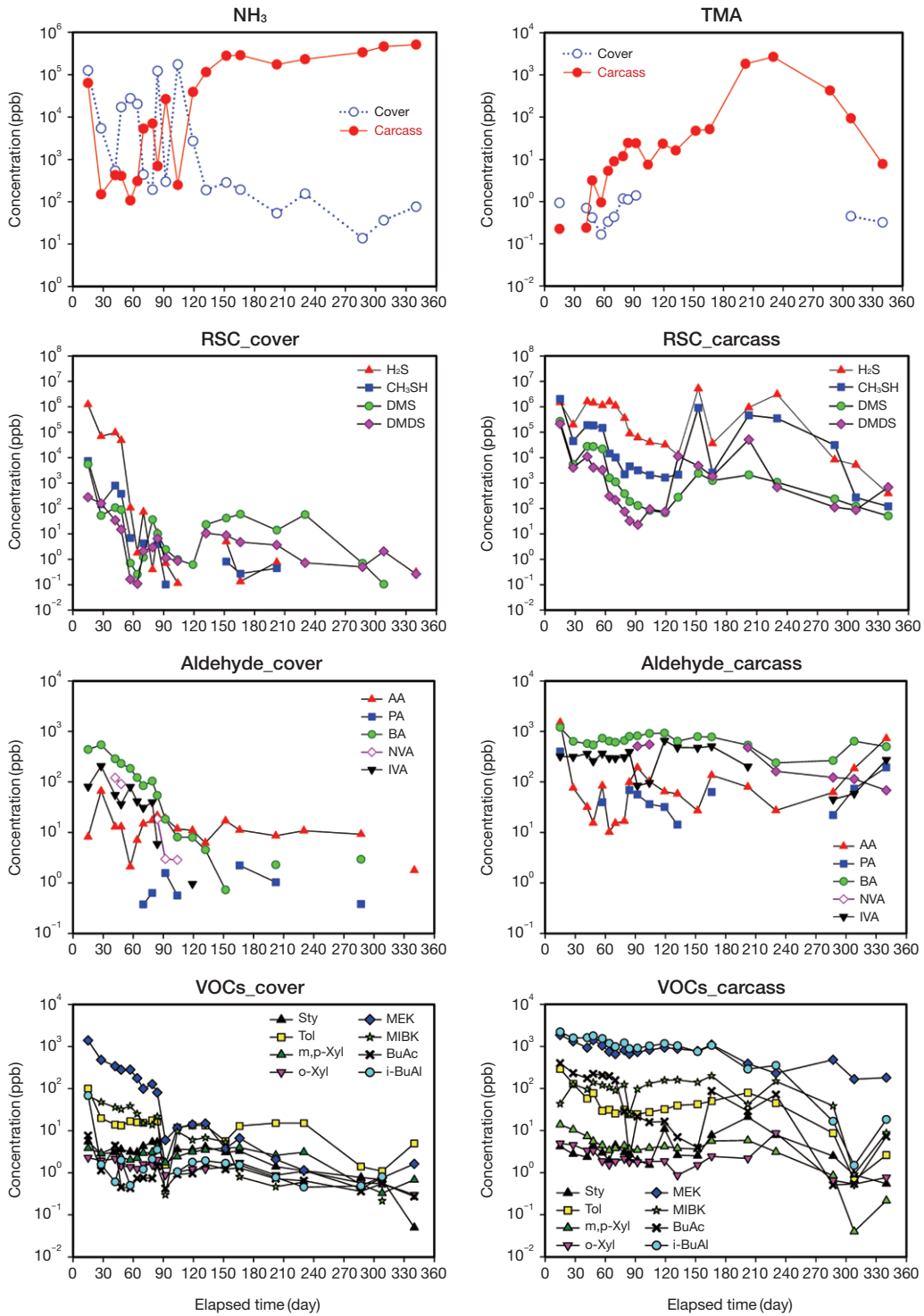


Fig. 5. Concentration change of all compounds measured from cover layer and pig carcasses layer in compost burial method.

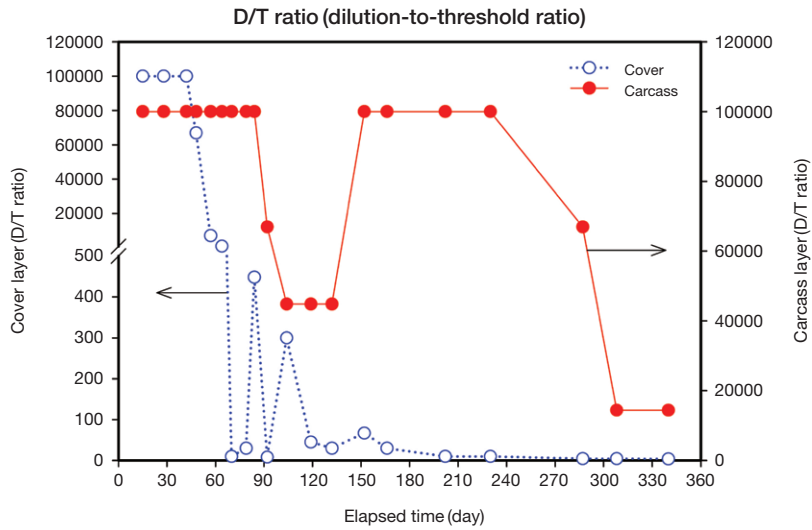


Fig. 6. Changes of D/T ratio measured from cover layer and pig carcasses layer depending on compost burial method.

Table 6. Result of correlation coefficients of each odorous compounds measured from compost burial method according to elapsed time.

(A) up to 92 days (n = 10)

	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>3</sub> SH	DMS	DMDS	TMA	AA	PA	BA	IVA	MEK	BuAc
H <sub>2</sub> S	.100	1										
CH <sub>3</sub> SH	.890**	.385	1									
DMS	.886**	.395	1.000**	1								
DMDS	.909**	.336	.996**	.995**	1							
TMA	-.017	-.704*	-.361	-.369	-.317	1						
AA	.946**	.232	.981**	.978**	.990**	-.213	1					
PA	.931**	.189	.962**	.959**	.971**	-.124	.990**	1				
BA	.912**	-.034	.845**	.839**	.868**	.091	.923**	.954**	1			
IVA	.274	-.454	-.146	-.150	-.124	.597	-.010	-.001	.178	1		
MEK	.475	.204	.669*	.672*	.655*	-.605	.611	.537	.356	-.266	1	
BuAc	-.481	.108	-.461	-.454	-.497	-.410	-.536	-.618	-.668*	.004	-.032	1
iBuAl	.460	.682*	.734*	.738*	.703*	-.835**	.637*	.570	.368	-.414	.729*	.030

\*p < 0.05 (2-tailed), \*\*p < 0.05 (2-tailed)

(B) after 92 days (n = 10)

	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>3</sub> SH	DMS	DMDS	TMA	AA	PA	BA	IVA	MEK	BuAc
H <sub>2</sub> S	.026	1										
CH <sub>3</sub> SH	-.004	.927**	1									
DMS	-.019	.740*	.884**	1								
DMDS	-.193	.032	.359	.552	1							
TMA	-.072	.355	.353	.397	.437	1						
AA	.619	-.315	-.318	-.351	-.158	-.270	1					
PA	.625	-.425	-.464	-.466	-.316	-.406	.967**	1				
BA	-.477	-.099	-.050	-.019	-.101	-.639*	-.108	.000	1			
IVA	-.376	-.133	.037	.078	.492	.351	-.111	-.196	.012	1		
MEK	-.179	.442	.254	.257	-.034	.824**	-.286	-.341	-.403	.103	1	
BuAc	-.637*	.249	.103	.214	-.208	-.024	-.521	-.456	.428	-.241	.383	1
iBuAl	-.107	.101	.002	.316	.021	.486	-.182	-.139	-.107	-.018	.703*	.558

물질들이 유의한 수준에서 높은 상관관계를 보임에 따라 다양한 악취물질들이 강한 짝을 이루며 안정적인 형태로 존재하고 있음을 알 수 있다. 표 6(B)의 사체 부패 시기(100일 이후)에는 퇴비 내에 존재하고 있는 악취물질들이 휘발되어 안정된 형태의 악취물질 그룹들이 분해된 후 일부 악취물질 간에만 유의한 차이를 보이고 있으며, 이러한 일부 물질들이 사체 부패와 연관된 주요 악취물질로 판단된다. 특히 강한 상관성을 보이는 물질로서 H<sub>2</sub>S는 CH<sub>3</sub>SH 및 DMS (r=0.927, 0.740, p<0.01, p<0.05)와 CH<sub>3</sub>SH는 DMS (r=0.884, p<0.01)와 상호 간 유의성이 높은 것으로 나타났고, AA는 PA (r=0.967, p<0.01)와 TMA는 MEK (r=0.824, p<0.01)와 높은 상관성을 보였다.

### 3.6 악취 강도 중심 비교 평가

악취 평가에 있어 기기분석에 의해 검출된 개별 악취물질의 농도가 후각 평가를 충분히 반영하고 있는지가 중요하다. 따라서 앞서 제시된 개별 악취물질 농도 수치를 선행연구의 두 가지 악취 강도 환산 식으로 표현하여 복합악취의 공기희석배수와 상관관계를 평가하였다. 첫 번째 악취 강도 환산방법으로, 검출된 개별 악취물질 농도를 각각의 후각 감지의 최소감지농도 (Odor Threshold Value, OTV)로 나누어 평가하는 식 (1)~(2)로 상대적인 악취 강도인 악취활성수치 (Odor Activity Value, OAV)를 계산하였다 (Capelli *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013; Parker *et al.*, 2013; Feilberg *et al.*, 2010). 여기서 악취활성수치 (OAV)는 기기분석에 의한 이론적 악취 크기이며 SOAV는 개별 OAV의 합을 나타낸 것이다. 따라서 성분별 최소감지농도가 반영됨으로 주요 악취물질에 대한 악취 세기가 반영될 수 있다. 두 번째로, 개별 악취물질들에 대하여 악취물질 농도와 악취 강도 (Odor Intensity, OI) 사이의 관계를 웨버-페크너 (Weber-Fechner) 식으로 표현한 Nagata (2003)의 환산 식을 이용하였다 (Jo *et al.*, 2012). 다양한 성분을 고려했을 시의 포괄적인 악취 강도의 합 (Sum of odor intensity, SOI)은 식 (3)과 같으며, 식 (3)의 i는 개별 악취성분들의 악취도를 나타낸 것이다. SOI에 의한 악취 강도 평가는 악취 기여도가 큰 성분의 지수함수적 기여도가 커지는 특성을 가짐으로 지배적인 악취물질의 영향을 나타낸다 (Kim *et al.*, 2014). 위와 같은 두 가지 악취 강도 환산 방법 모두 주요 악취물질에 의

한 악취 기여도가 높을 시 지배성분에 의한 마스킹 효과를 보여 줄 수 있는 장점이 있으므로 복합악취의 공기희석배수 값과 연계성을 파악해 볼 수 있다.

$$OAV = \frac{\text{Odor concentration}_i \text{ (ppb)}}{OTV_i \text{ (ppb)}} \quad (1)$$

$$SOAV = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Odor concentration}_i \text{ (ppb)}}{OTV_i \text{ (ppb)}} \quad (2)$$

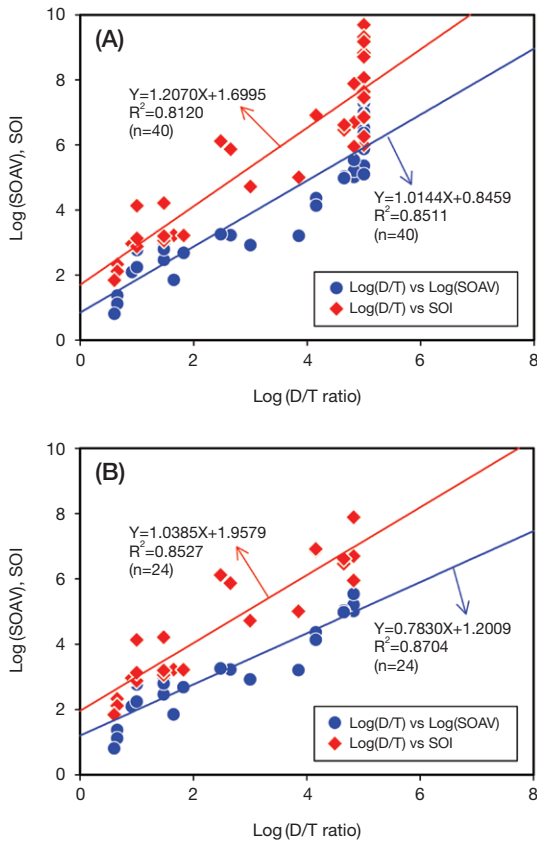
$$SOI = \text{Log} \left( \sum_{i=1}^n 10^{OI(i)} \right) \quad (3)$$

$$= \text{Log} (10^{OI(i)1} + 10^{OI(i)2} + 10^{OI(i)3} + \dots + 10^{OI(i)n})$$

복합악취 공기희석배수 (D/T ratio)와 악취성분들의 SOAV와 SOI의 값과의 상관관계는 그림 7과 같으며, 복합악취와 SOAV는 log 값을 취하여 지수함수적인 수준에서 직선성을 평가하였다. 그림 7(A)의 실험 종료 시점까지 퇴비 복토층과 사체층에서 총 40회 측정된 결과의 경우 결정계수 (R<sup>2</sup>)의 값이 0.8 이상으로 양호한 직선성을 나타냈다. 공기희석배수와 SOAV의 log 수준에서의 pearson 상관계수는 0.923 (p<0.01), SOI와는 0.901 (p<0.01)로 유의성이 매우 높게 나타났다. 본 연구에서는 안정적인 복합악취 평가를 위해 최고 10만 배까지 공기희석배수를 평가했으며, 악취 강도가 매우 높은 시료의 특성으로 10만 배까지 공기희석배수를 보인 시료는 총 16회로 조사되었다. 최고 희석배수 (10만 배)를 제외한 평가결과에서 또한 그림 7(B)와 같이 결정계수 (R<sup>2</sup>)가 0.8 이상으로 양호한 직선성을 나타냈으며, 공기희석배수와 SOAV의 log 수준에서의 pearson 상관계수는 0.933 (p<0.01), SOI와는 0.923 (p<0.01)로 유의성이 매우 높게 나타났다. 따라서 복합악취 공기희석배수와 SOAV 및 SOI 값과 상관성이 높게 평가되어 후각 평가와 기기분석에 의한 전반적인 악취 강도 평가는 양호한 결과를 보여, 개별 악취물질 농도들이 후각 평가를 반영하고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

국내에서 감염된 가축 처리는 토양을 이용한 일반 매몰법이 주로 이용되고 있으며, 이에 따른 환경오염 및 처리 방법상의 한계성을 보이고 있다. 따라서 본 연



**Fig. 7. Results of linear regression analysis between dilution threshold (D/T) ratio vs. SOAV or SOI, (A) log (D/T ratio) vs. log (SOAV) or SOI, (B) analysis without maximum D/T ratio value in condition (A).**

구에서는 토양 매물법의 가장 큰 문제점 중 하나인 사체 처리의 느린 부패 속도를 개선하고자 축산퇴비를 복토재로 선정하여 매물처리 실험을 진행하였다.

1. 일반 토양에 비해 상대적으로 높은 온도를 지닌 축산퇴비 매물지는 영하의 낮은 외기 온도 수준에서도 사체층에서 40°C 이상의 온도를 유지하며 부패 촉진을 위한 열적 효과를 보였다. 실험 종료 후 사체 외형을 확인한 결과, 토양 매물법에 비해 부패가 많이 진행되었음을 알 수 있었다. 이러한 온도 및 사체 형태의 변화는 퇴비의 부패 촉진 효과에 의한 직접적인 결과로 볼 수 있다.
2. 퇴비 매물지 내 수분 함량은 실험기간 동안 약 40~65%의 수준으로서, 퇴비의 열적효과 및 흡수작용의

특성으로 중단(사체층 상부)>하단(사체층 하부)>상단(사체 상부 60 cm 위 복토층) 순으로 높게 나타났다. 매물지를 파내어 사체 하단을 확인한 결과 침출수의 존재 유무를 육안으로 판단할 수는 없었다. pH는 실험 초기 약 pH 8.7~8.9에서 사체 부패 과정에서 발생된 암모니아의 영향을 받아 실험 종료 시점(330일 경과)에 pH 9.3~9.7 수준까지 상승하였다.

3. 주요 악취 발생원은 복토재로 활용된 축산퇴비와 사체 부패 과정에서 발생된 악취물질로 나타났다. 측정된 악취물질 중 악취 특유의 마스킹 효과와 최소 감지농도 관점에서 보면 환원성황화합물(RSC)이 주요 악취 성분으로 판단된다. 퇴비층에 잔류한 악취 성분들이 휘발되어 감소 후 사체 부패에 의한 강한 악취가 관측되었으며, 사체층에서의 고농도 악취는 복토층에서 매우 낮게 검출되는 특성을 보였다. 따라서 퇴비층은 사체 부패 과정 시 배출되는 악취물질의 차단 및 흡수 효과의 가능성이 있는 것으로 판단된다. 후각 평가와 기기분석 평가 간의 악취 강도 상관성은 전반적으로 양호한 결과를 보였다.

이상과 같이 축산퇴비 매물법은 사체 부패 촉진을 위한 열적 효과를 충분히 기대해 볼 수 있으며, 부수적으로 침출수 및 악취 배출에 대한 완충지대로서의 역할 또한 기대해 볼 수 있다. 그러나 본 연구는 축산퇴비 및 토양매물지에 각각 돼지 4마리의 소규모 현장실험 결과로서, 국내 가축 전염병(구제역) 발병 특성상 대량의 사체가 발생하는 경우가 많으므로 연구의 한계성 또한 존재한다. 따라서 대량 사체 처리가 이뤄지는 매물지를 대상으로 추가적인 현장 실험이 이루어져야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원의 환경산업선진화기술개발사업(402-111-007)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

Akdeniz, N., J.A. Koziel, H.K. Ahn, B.P. Crawford, and T.D. Glanville (2007) Stability evaluation of simulated

- plant and animal composts utilizing respiration rates and VOC emissions, American society of Agricultural and Biological Engineers, An ASABE Meeting Presentation, 074155.
- Bachrach, H.L., S.S. Breese, J.J. Callis, W.R. Hess, and R.E. Patty (1957) Inactivation of foot-and-mouth disease virus by pH and temperature changes and by formaldehyde, *Experimental Biology and Medicine*, 95(1), 147-152.
- Bao, Y., L. Guan, Q. Zhou, H. Wang, and L. Yan (2010) Various sulphur fractions changes during different manure composting, *Bioresource Technology*, 101(20), 7841-7848.
- Capelli, L., S. Sironi, R.D. Rosso, and J.M. Guillot (2013) Measuring odours in the environment vs. dispersion modelling: A review, *Atmospheric Environment*, 79, 731-743.
- Dent, B.B., S.L. Forbes, and B.H. Stuart (2004) Review of human decomposition processes in soil, *Environmental Geology*, 45(4), 576-585.
- Dekeirsschietter, J., F.J. Verheggen, M. Gohy, F. Hubrecht, L. Bourguignon, G. Lognay, and E. Haubruge (2009). Cadaveric volatile organic compounds released by decaying pig carcasses (*Sus domesticus* L.) in different biotopes, *Forensic Science International*, 189(1), 46-53.
- Dimopoulos, G.T. (1960) Effects of physical environment on the virus of foot and mouth disease, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 83(4), 706-726.
- Feilberg, A., D. Liu, A.P.S. Adamsen, M.J. Hansen, and K.E.N. Jonassen (2010) Odorant emissions from intensive pig production measured by online proton-transfer-reaction mass spectrometry, *Environmental Science & Technology*, 44, 5894-5900.
- Gao, M., F. Liang, A. Yu, B. Li, and L. Yang (2010) Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios, *Chemosphere*, 78(5), 614-619.
- Gwyther, C.L., A.P. Williams, P.N. Golyshin, G. Edwards-Jones, and D.L. Jones (2011) The environmental and biosecurity characteristics of livestock carcass disposal methods: A review, *Waste Management*, 31(4), 767-778.
- Hong, S.M. and D.H. Ha (2012) Broadening environmental disaster and securing common site: focusing on the FMD case in 2010-2011, *Journal of Governance Studies*, 7(1), 43-65. (in Korean with English abstract)
- Imbeah, M. (1998) Composting piggery waste: a review, *Bio-resource Technology*, 63(3), 197-203.
- Jo, S.H., K.H. Kim, H.J. Jo, M.H. Lee, Y.H. Kim, J.H. Ahn, E.Y. Ryu, and Y.W. Kim (2012) Changes in odorant emission patterns of boiled egg samples between fresh and decayed stages, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 11, 65-79. (in Korean with English abstract)
- KBS (2016) <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=3251746&ref=A>
- Kim, B.W., K.H. Kim, Y.H. Kim, and J.H. Ahn (2014) A Study of odorants and volatiles released from pork belly meat when treated by different cooking methods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(3), 211-222. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.S. (2011) Environmental problem and Citizens Science owing to the failure of foot and mouth disease (FMD) policy, *The Korean Association for Environmental Sociology*, 15(1), 85-119.
- Kim, M. and G. Kim (2013) Cost analysis for the carcass burial construction, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 18(1), 137-147. (in Korean with English abstract)
- KMOE (Korean Ministry of Environment) (2007) Odorant management handbook.
- KMOE (Korean Ministry of Environment) (2010) Guidelines for the management of livestock burial site environment.
- KMOE (Korean Ministry of Environment) (2014) Standard method of odor compounds.
- Ko, C.R. and S.S. Seol (2013) Technology and policy measures for landfill sites of foot-and-mouth disease in Korea, *Journal of Korea Technology Innovation Society*, 16(4), 978-1005. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.D., S.B. Jeon, W.J. Choi, S.S. Lee, M.H. Lee, and K.J. Oh (2013) A novel assessment of odor sources using instrumental analysis combined with resident monitoring records for an industrial area in Korea, *Atmospheric Environment*, 74, 277-290.
- MAF BioSecurity Authority (2005) Construction specifications for carcass burial facilities, Ministry of Agriculture and Forestry (MAF), New Zealand.
- Munro, R. (2001) Decomposition of farm animal corpses in mass burial sites, *Veterinary Laboratories Agency report*, United Kingdom, 1-9.
- Nagata, Y. (2003) Measurement of odor threshold by triangle

- odor bag method, *Odor Measurement Review*, MOE, Japan, 118-127.
- Nam, Y., S.H. Yong, and K.K. Song (2010) Evaluating quality of fertilizer manufactured (livestock manure compost) with different sources in Korea, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 43(5), 644-649. (in Korean with English abstract)
- OIE (World Organization for Animal Health) (2017) OIE-Listed Disease Information. [http://www.oie.int/wahis\\_2/public/wahid.php/Diseaseinformation/WI](http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Diseaseinformation/WI)
- Parker, D.B., J. Gilley, B. Woodbury, K.H. Kim, G. Galvin, S.L. Bartelt-Hunt, X. Li, and D.D. Snow (2013) Odorous VOC emission following land application of swine manure slurry, *Atmospheric Environment*, 66, 91-100.
- Schotsmans, E.M., J. Denton, J. Dekeirsschieter, T. Ivaneanu, S. Leentjes, R.C. Janaway, and A.S. Wilson (2012) Effects of hydrated lime and quicklime on the decay of buried human remains using pig cadavers as human body analogues, *Forensic Science International*, 217(1), 50-59.
- Sherman, S.C. and K. Larkin (2005) Cement burns, *The Journal of Emergency Medicine*, 29(1), 97-99.
- Stentiford, E.I. (1996) Composting control: principles and practice, In *The science of composting*, Springer Netherlands, 49-59.
- Yoo, H.M., S.J. Cho, W.S. Yang, B.H. Han, K.H. Kim, H.Y. Jung, and Y.C. Seo (2012) Comparison and analysis of disposal methods and regulations on slaughter animals for implementing mobile incinerators, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 29(6), 595-602. (in Korean with English abstract)
- Yuan, Q., D.D. Snow, and S.L. Bartelt-Hunt (2013) Potential water quality impacts originating from land burial of cattle carcasses, *Science of the Total Environment*, 456, 246-253.