

## Decomposition characteristics of pollutants by time dependent variation of livestock carcass leachate

Yong Jun Kim, Young Yeul Kang, Dong Gun Hwang, Tae Wan Jeon<sup>★</sup>, and Sun Kyoung Shin

National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea

(Received September 15, 2017; Revised November 3, 2017; Accepted November 4, 2017)

### 매몰지 침출수의 경시변화에 따른 오염물질 분해특성

김용준 · 강영렬 · 황동건 · 전태완<sup>★</sup> · 신선경

국립환경과학원 환경자원연구부 자원순환연구과  
(2017. 9. 15. 접수, 2017. 11. 3. 수정, 2017. 11. 4. 승인)

**Abstract:** The purpose of this study is to investigation of the decomposition characteristics in a pilot-scale burial site of livestock in three kinds of typical soils in Korea: sandy loam soil, clay loam soil, and sandy soil. In this study, we confirmed that most of the animals in the condition were decomposed within three years as mentioned in the “Livestock burial regional environmental research guidelines.” We also determined that the decomposition rate of dead cows was higher than that of dead pigs, and that the biodegradation rate depends on the soil types in the following order: sandy soil > clay loam soil > sandy loam soil. The various external environment factors, such as temperature, moisture, pH, earthiness, nutrient, and the burial depth, should be managed properly for appropriate decomposition of dead animals.

**요 약:** 본 연구의 목적은 돼지와 소를 대상으로 우리나라 대표 토양인 사양질, 식양질, 사질의 토양에 따른 실험실 규모 가축 매몰지를 설치하여 3년동안 분해특성을 살펴보는 것이다. 그 결과 가축 매몰지역 환경조사지침에 따른 가축 매몰지 발굴금지기간인 3년을 기준으로 대부분 분해되는 것을 확인하였으며, 사체분해를 위해 중요인자로 온도, 수분, pH, 토성, 영양소, 매몰지 깊이 등 다양한 외부환경 요인이 적절히 유지되어야 할것으로 판단되었다. 또한 소의 경우가 돼지보다 빠르게 분해되었는데, 토양에 따른 분해속도를 확인한 결과 사질 > 식양질 > 사양질 순으로 분해가 이루어지는 것으로 판단되었다.

**Key words:** pilot-scale, carcass, animal type, soil texture, degradation

### 1. 서 론

구제역(口蹄疫, FMD; Food and Mouth Disease)은

소, 돼지 등과 같이 말굽이 둘로 갈라진 동물에서 체온이 급격히 상승하고 거품섞인 침흘림, 입, 혀, 말굽 또는 젖꼭지 등에 물집, 가피, 궤양 등이 나타나며, 식

<sup>★</sup> Corresponding author

Phone : +82-(0)32-560-7520 Fax : +82-(0)32-568-1656

E-mail : jeonsa@korea.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

육이 저하되어 심하게 앓거나 죽게 되는 전파력이 강한 전염병으로 알려져 있다.<sup>1</sup>

이에 따라 세계동물보건기구(OIE; The Office International des Epizooties)는 관리대상 질병으로 분류·지정하여 구제역 발생시 보고하도록 하고 있으며, 우리나라의 경우 가축전염병 예방법에 따라 제1종 가축전염병으로 관리하고 있다.<sup>2,3</sup>

우리나라의 경우 2000년대 이후 4번의 구제역이 발생하였으며, 2010년 11월 경상북도 안동시에서 발생한 구제역은 5번째로 11개 시·도와 75개 시·군·구로 확산되어 소 149,930 마리, 돼지 3,326,553 마리, 기타 사슴·염소 등을 합쳐 약 350만 마리가 살처분되었으며, 4,583 개소의 매몰지가 설치되었다.<sup>4</sup>

국외의 경우 영국, 미국, 캐나다를 중심으로 가축사체 처리기술, 매몰지 환경영향평가, 매몰지 처리방법, 가축사체 분해정도, 환경 모니터링 등 관련 분야에 대한 연구<sup>5-11</sup>가 활발하게 추진되었다. 그러나 우리나라의 경우 구제역에 걸린 가축은 가축전염병 예방법에 따라 살처분 후 소각 또는 매몰하도록 하고 있으나<sup>3,12-13</sup> 많은 양의 가축사체를 매몰처리 함으로써 발생하는 환경영향과 오염물질에 대한 자료가 부족한 실정이다.

따라서 우리나라에서도 가축 매몰지에서 사체의 유기물 분해특성, 침출수 처리, 지하수, 토양의 환경영향, 악취물질, 발생가스, 사체 분해정도 등 신뢰성 있는 자료 확보가 필요한 실정이다. 또한, 가축 매몰지로 인한 2차 환경오염 발생 가능성에 대한 문제제기 등 환경영향에 대한 저감 방안 필요성, 가축 매몰지의 사체분해와 관련된 ‘용도제한 3년’의 적정성 여부, 매몰지 조기안정화를 위한 국내의 환경적 특성에 맞는 자료, 매몰지 설계 및 환경관리지침<sup>13</sup> 개선을 위해 많은 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 이러한 배경 및 필요성에 따라 축종비교를 위해 돼지와 소의 사체를 매몰하였으며, 우리나라에서 가장 넓게 분포되어 있는 사양질, 사양질, 사질 토양으로 토성별 실험실 규모 가축 매몰지 5기를 설치(‘12.2월)하여<sup>14</sup> 약 3년간(2012.2~2015.2) 매몰사체의 분해특성을 살펴보고자 하였다. 특히 가축 매몰지에서의 사체분해정도, 사체관련 미량원소, 악취물질 농도변화를 중심으로 조사하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구는 1차 년도(2011년)에 실험실 규모로 사전 모의실험을 통해 기초자료를 확보하고, 2차 년도(2012

년)부터 실제 매몰지의<sup>15</sup> 사체층 높이 1/3규모의 실험실 매몰지 5기를 설치하여 가축사체의 분해특성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 2012년 2월 설치된 매몰지에서 2015년 2월까지 3년 동안 침출수를 채취하여 소와 돼지의 환경영향인자인 pH, T-N, TOC, Cl, NH<sub>3</sub>-N 등 일반항목, 사체관련 미량원소 등을 모니터링하여 매몰 후 시간에 따른 침출수의 유기물 농도를 파악하고자 하였다.

### 2.1. 실험실 규모 매몰지 설치

매몰지 설치에 필요한 재료로 복토 및 성토용 토양, 생석회, 유공관(가스, 침출수), 모니터링 장비 그리고 매몰될 사체를 준비하였다. 복토와 성토에 사용한 토양은 국토의 43.8%로 가장 많이 분포하고 있는 사양질과 35.4%를 차지하는 식양질, 그리고 쉽게 구할 수 있는 모래입자로 되어있는 사질 토양 등 3 종류의 토양을 선정하여<sup>16</sup> 매몰지를 설치하였다.

우리나라에서 가장 많은 분포를 가진 사양질을 소와 돼지 각 1기씩 설치하여 축종별 분해특성을 비교하였다. 소의 경우 토성별로 사양질, 식양질, 사질로 분류하여 서로 비교 관찰하였으며, 최종적으로 돼지의 경우 사양질을 사용한 1기의 매몰지를 설치하였으며, 소의 경우 사양질 2기, 식양질 1기, 사질 1기 총 4기의 매몰지를 설치하였다. 매몰두수는 소의 경우 한 매몰지 당 약 600 kg 젓소 2두씩 8두(2두 × 4매몰지), 돼지는 한 매몰지에 약 100 kg, 10두를 매몰하여 총 18두(소 8두, 돼지 10두)를 매몰하였으며 현황은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 실제 매몰지의 사체 매몰층 높이의 1/3 규모의 실험실 매몰지를 설치(‘12.2.10) 하였으며, 2011년 개정된 매몰지 모식도를 참고하여<sup>16</sup> Fig. 1에서 보는 바와 같이 2.5 m(W)×3.5 m(L)×2.5 m(H) 규모의 구덩이를 중장비를 이용해 굴토하고 여기에 토양을 일부 채운 후 2.0 m(W)×2.5 m(L)×2.2 m(H)의 매몰지 5기를 설치하였다.

Table 1. Livestock type and soil texture of pilot-scale burial site

Type	Burial site	Soil texture			Number of heads
		Sandy loam	Clay loam	Sand	
Cattle	4	2	1	1	8
Swine	1	1	-	-	10
Sum	5	3	1	1	18

매몰지 모식도에 자동계측시스템의 센서 위치도 함께 표시하여 실제 매몰지를 설치할 때 참고 할 수 있도록 하였다. 준비된 복토 및 성토용 토양 3 종류(사양질, 식양질, 사질), 생석회, 비닐 그리고 소와 돼지의 사체를 순서에 따라 실험실 매몰지를 설치하였다.

먼저 중장비를 이용해 굴토작업을 하여 기본 매몰지의 틀을 만든 후 토성별로 바닥을 채운 뒤 비닐을 2중으로 설치하였다. 지침에 따라 복토하고 생석회를 도포하였다. 이후 주문 제작한 침출수 유공관을 침출수 배출관 방향으로 약 2°의 경사를 두어 침출수를 수집 할 수 있도록 하였다.

또한, 유공관의 막힘을 방지하기 위해 자갈을 깔은

후 가축사체를 유공관 위에 위치하도록 하였으며, 사체가 분해되면서 발생하는 가스로 인해 사체가 터지는 것을 방지하고자 사체에 칼집을 내어 가스를 방출시킨 후 소량의 흙을 덮은 후 센서(온도, 수분, 토압)와 가스관을 매설하였다. 가스관은 사체위에 설치하였으며, 관이 막히는 것을 방지하기 위해 자갈을 깔고 설치하였다. 이후 침출수 배출관과 가스 배출관을 결합하였으며 최종적으로 성토하여 매몰지를 설치 완료하였다.

2.2. 주요 조사항목

본 연구에서는 가축 사체가 매몰되었을 때 생성되는 가스와 침출수에 대해 문헌조사 및 전문가 자문을

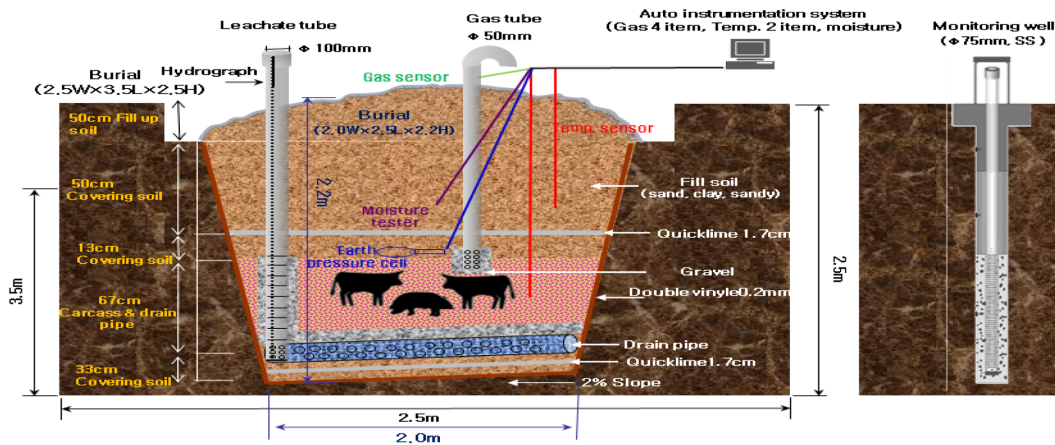


Fig. 1. Schematic view showing the pilot-scale burial site.

Table 2. Analysis item of leachate in buried

Substance	Substance
Antibiotics (27)	Acetylsalicylic acid, Acetaminophen, Sulfamethoxazole, Sulfathiazole, Sulfamerazine, Sulfadimidine, Sulfachloropyridazine, Trimethoprim, Fenbendazol, Sulfadimethoxine, Ciprofloxacin, Cephalexin, Cephadrine, Florfenicol, Enrofloxacin, Cefadroxil, Penicillin G, lincomycin, Oxytetracycline, Chlorotetracycline, Vancomycin, Clarithromycin, Ivermectin, Triclosan, Virginiamycin M1, Erythromycin, Tylosin
Fatty acids profile (8)	Palmitic acid, Palmitoleic acid, Stearic acid, Oleic acid, Linoleic acid, Myristic acid, Arachidic acid, Arachidonic acid
Amino acids profile (17)	L-alanine, L-arginine, L-aspartic acid, L-cystine, L-glutamic acid, glycine, L-histidine, L-isoleucine, L-leucine, L-lysine, L-methionine, L-phenylalanine, L-proline, L-serine, L-threonine, L-tyrosine, L-valine
Cholesterol (1)	Cholesterol
Nucleotide (4)	Pyrimidine, Cytosine, Thymine, Uracil
General item and heavy metal (33)	NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>3</sub> -N, Cl <sup>-</sup> , TOC, TN, TP, COD, BOD K, Na, Mg, Ca, SO <sub>4</sub> , F B, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, As, Cd, Cr, Ni, Al, Se, Ba, Co, Mo, Ag, Ti, V, Leachate generation amount

통해 분석 항목들을 선정하였고, 이에 대한 자료를 확보하고자 하였다. 일반적으로 매몰 후 일련의 부패과정을 통해 고농도의 유기물질, 암모니아 등을 포함한 침출수와 가스가 형성된다. 따라서 매몰지에서 발생된 침출수를 채취하여 Table 2에 정리한 것과 같이 항생제, 중금속 등 약 90 개 항목을 정밀분석하여 매몰 사체의 분해특성을 조사하고 사체분해정도를 파악할 수 있는 매몰지 내부의 온도, 수분, pH 등을 조사하였다. 조사항목은 3년 동안의 연속성을 고려하여 주기적으로 모니터링 하였고, 특히, 본 연구결과에서는 사체관련 미량원소 및 악취물질 농도변화에 주목하였다.

### 2.3. 주요 설치장비

본 연구에서 사용된 장비는 온도, 수분, 압력센서가 설치되었으며 측정된 정보는 하나의 화면에 나타내고 기록할 수 있는 컴퓨터와 연결하여 실시간으로 데이터를 축적하였다. 또한, 발생하는 가스와 침출수를 시료채취하기 위한 장비, 침출수가 발생함에 따라 그 수위를 측정하는 수위계, 침출수 유공관을 통해 침출수 발생여부를 관찰할 수 있는 산업용 내시경 등을 확보하여 모니터링을 진행하였다.

### 2.4. 침출수의 시료채취 및 분석방법

Fig. 2에서 보는바와 같이 매몰지 1번을 제외한 2~5번의 경우 매몰지 바닥에 침출수 유공관을 설치하였고, 총 4 기에 설치된 침출수 배출관을 통해 침출수를 채취하고자 하였다. 먼저 산업용내시경을 사용하여 침출수 배출관을 통해 침출수의 발생여부를 관찰하였고, 발생된 침출수는 연동 펌프(Peristaltic pump)를 사용하여 침출수 배출관에서 시료채취 하였다. 매몰지 설치 후 지속적으로 침출수 발생여부를 확인하였으며 매몰지에서 침출수가 발생한 2012년 2월부터 2014년 10월

까지 총 27회 79건의 시료를 채취하였다.

채취한 침출수의 유해물질은 수질오염공정시험기준<sup>17</sup>에 준하여 분석하였으며, 중금속의 경우 시료 10 mL를 취하여 증류수로 100 mL로 하고 진한질산 5 mL와 비등석을 넣고 가열하였다. 15 mL까지 농축하여 냉각시킨 뒤, 질산 5 mL와 황산 5 mL를 넣고 다시 가열하였다. 백색가스 발생 시 가열을 중지하는데 맑지 않을 경우 질산 5 mL를 더 넣어 가열하고 이 방법을 반복하였다. 이렇게 만들어진 맑은 용액에 증류수 50 mL를 넣어 끓기 직전의 온도로 가열하여 침전물을 녹였다. 마지막으로 여과 후 100 mL로 하고 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES) 및 원자흡광광도계(AAS)로 분석하였다.

### 2.5. 악취물질의 시료채취 및 분석방법

가축 매몰지의 토성 및 시간 경과에 따른 악취물질 조사를 위해 실험실 매몰지 5 개 지점에서 시료를 채취하였으며 매몰지 주변에서 공시료 1 개를 채취하여 분석하고자 하였다.

대상 물질로는 Table 3과 같이 Acids(6 종), Esters(11종), Alcohols(8 종), Phenols(4 종), Ketones(7 종), Sulfurs(4 종), Terpenes(5 종), Aldehydes(5 종), Aromatics(4 종), Nirtous(4 종), Ammonia(1 종), THC(1 종)로 총 12개군 60 개 물질을 대상으로 분석하였다.

이를 통해 국내 악취물질 관련법령의 배출허용기준과 비교하고자 하였다. 우리나라의 경우 악취물질은 악취방지법을 통해 관리되고 있으며 공업지역과 기타 지역에 따라 배출허용기준이 설정되어져 있다. 그러나 악취배출시설을 중심으로 관리되고 있으며 매몰지에서 발생된 악취를 관리하기 위한 배출기준은 마련되어 있지 않다. 그러나 이를 참고하여 본 연구에서 조사된 22 종(Ammonia, Methyl mercaptan, Hydrogen sulfide,

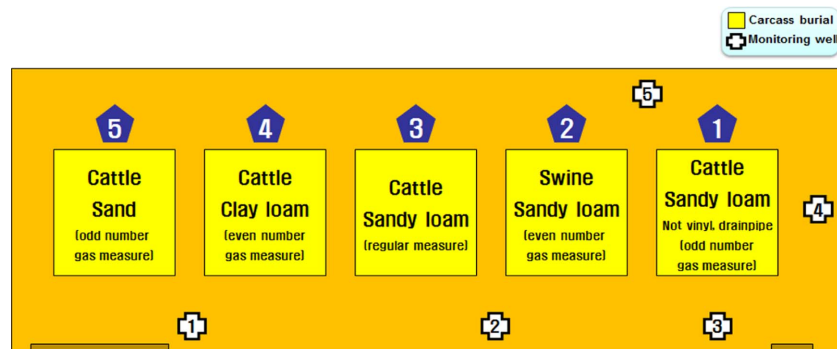


Fig. 2. Pilot-scale burial site layout.

Table 3. Analysis item of gas in buried

Group	Substance
Acids (7)	Acetic acid, Propanoic acid, Isovaleric acid, Valeric acid, Hexanoic acid, Hexanoic acid, butyric acid
Esters (11)	Methyl acetate, Ethyl acetate, ethyl propanoate, Propyl acetate, Ethyl butanoate, n-Butyl acetate, Propyl butanoate, Isobutyl butanoate, Butyl butanoate, Butyl hexanoate, Ethyl octanoate
Alcohols (8)	Ethanol, 2-Propanol, 2-Butanol, 1-Hexanol, 1-Heptanol, 1-Octanol, 2-Heptanol, Isobutyl alcohol
Phenols (4)	2-Methoxy phenol, Phenol, 4-Methyl phenol, 4-Ethyl phenol
Ketones (7)	2-butanone, 2-pentanone, 2-octanone, 3-Octanone, 2-Nonanone, 2-Decanone, Methyl isobutyl ketone
Sulfurs (4)	Dimethyl disulfide, Dimethyl sulfide, Hydrogen sulfide, Methyl mercaptan
Terpenes (4)	Camphene, A-Pinene, P-Myrcene, Delta 3-carene, Limonene
Aldehydes (5)	Acetaldehyde, Propionaldehyde, Butanaldehyde, i-Valeraldehyde, n-Valeraldehyde
Aromatics (4)	Toluene, m,p-Xylene, Styrene, o-Xylene
Nitrous Compounds (4)	Trimethylamine, 1H-Indole, Pyrimidine, 2-Piperidinone
Ammonia (1)	Ammonia
THC (1)	Total hydrocabon

Table 4. Analytical equipment in this study

Substance	Analytical equipment
Sulfurs	GC/FPD
Ammonia	Ammonia equipment (Gastec GV110)
THC*	GC/FID, GC/PID
Acids <i>et al.</i>	ATD-GC/MSD

\*THC : Total Hydro Carbon

Dimethyl sulfide, Dimethyl disulfide, Trimethylamine, Trimethylamine, Acetaldehyde, Styrene, Propionaldehyde, n-Butyl aldehyde, n-Valeraldehyde, i-Valeraldehyde, Toluene, Xylene, Methyl ethyl ketone, Methyl isobutylketone, Butyl acetate, Propionic acid, n-Butyric acid, n-Valeric acid, i-Valeric acid, I-Butanol)의 악취물질에 대해 악취방지법의 배출허용기준을 토대로 비교하고자 하였다.

악취물질의 분석방법은 Table 4에 정리한 것과 같이 Sulfurs는 GC/FPD를 이용하였으며, Ammonia는 검지관을 이용하여 분석하였고, THC는 GC/FID 또는 GC/PID를 이용하여 분석하였다. 그 밖의 물질의 경우 ATD400 (Perkin Elmer, USA)을 이용하여 채취한 시료를 농축하여 주입한 후 GC/MSD (Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 환경영향인자의 경향

가축 매몰지에서 사체의 분해에 영향을 주는 주요 인자로 온도, 수분, 토압과 분해에 따라 발생하는 가

스(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S)의 변화를 확인하고자 하였다.

그 결과 온도의 경우 계절적 요인에 따라 사체층 및 복토층 모두 겨울철에 낮아지고 여름철 높아지는 경향을 확인할 수 있었다. 특히, 복토층의 경우 외부 온도에 사체층 보다 민감하게 반응하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 사체가 부패됨에 따라 온도가 높아지는 경향은 뚜렷하게 확인하지 못하였다.

토압의 경우 0.1~0.3 kg/cm<sup>2</sup>로 시간에 따른 변화는 없는 것으로 나타났으며, 수분의 경우 약 20%를 유지하고 있었으며, 우기 시 약 30%까지 높아지는 경우가 있었다.

발생되는 가스의 경우 Fig. 3과 같이 CH<sub>4</sub>는 매몰 후 6개월부터 꾸준히 발생하였으며, H<sub>2</sub>S는 매몰 후 5개월부터 8개월까지 4개월 동안 일시적으로 발생하였고, CO<sub>2</sub>는 매몰 후 6개월부터 3개월 동안 최고 약 60%까지 급격히 발생하는 것을 확인하였다.

이를 통해 매몰 후 6개월이 된 시점부터 활발한 분해가 이루어지는 것으로 판단된다.

#### 3.2. 사체 분해 정도

‘12년 2월 10일 실험실 매몰지를 설치하고 ‘가축 매몰지역 환경조사지침’에 따른 가축 매몰지 발굴금지 기간인 3년을 기준으로 매몰지 내부 상태를 확인하고자 ‘15년 2월경 3년이 경과한 후 매몰지를 굴토·해체 하였다. 굴토·해체 매몰지는 우리나라의 대표적 토양인 사양질 토양에 약 600 kg의 소 2 마리가 매몰된 매몰지 3번을 발굴하였다.

해체된 매몰지에서는 Fig. 4와 같이 약간의 악취와 함께 소의 털과 뼈들이 발견되어 거의 분해가 완료된

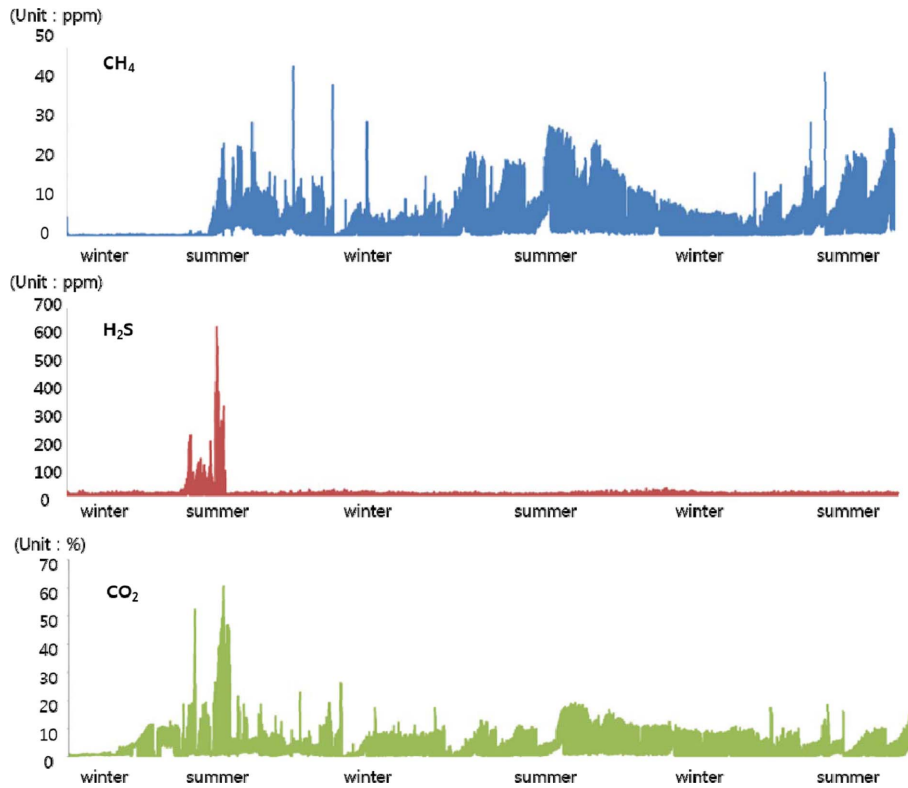


Fig. 3. Gas monitoring results of pilot-scale No. 1 burial example.



Fig. 4. Site image of demolition work.

것을 확인할 수 있었다. 사체 주변의 토양은 수분을 함유하고 있었으며, 토양을 채취하여 수분함량과 pH를 측정된 결과 수분함량은 평균 16.49%, pH는 평균 8.22로 나타났다.

사체 부패에 영향을 주는 인자로 문헌에 따르면 영양소(탄소, 질소, 인산 등)의 유효성, 수분, 부패에 적합한 중성상태의 pH, 부패를 촉진시키는 온도의 토양, 토성, 매몰깊이, 외적인 요소인 사체의 특징(냉동, 해

동, 기전적 손상)에 따라 부패속도에 영향을 줄 수 있다고 평가하였다.<sup>18</sup>

따라서 3년 기한내 사체분해를 위해서는 상기 열거한 조건들과 함께 대량 매몰을 피하고 적정한 사체량과 규모를 조절하여 매몰하는 것을 권장하고자 한다.

### 3.3. 사체관련 미량원소

사체가 부패함으로써 발생하는 침출수로부터 중금

속의 변화를 모니터링한 결과 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 매몰지 2번(a)과 3번(b)의 경우 매몰 후 8주가 경과한 날로부터 침출수가 발생하였으며, 매몰지 4번(c)의 경우 6주, 매몰지 5번(d)의 경우 1주가 경과한 날로부터 침출수가 발생하였다.

침출수의 중금속을 분석한 결과 Mo, Mn, Fe가 대표적으로 분해과정 중 검출되는 것으로 나타났으며, Mo, Mn, Fe를 제외한 대부분의 중금속은 불검출 또는 미량 검출되는 것으로 나타났다. 특히 Mo, Mn, Fe의 경우 매몰 후 42주가 경과한 날부터 농도가 높아지는 경향을 나타내고 있으며, 60주~64주에 가장 높은 농도로 발생함에 따라 활발한 분해가 이루어졌음을 짐작할 수 있었다. 이는 분해과정에서 발생하는 주요가스물질과 약취 물질에 대한 결과를 볼 때 활발한 분해시점이 다소 상이하게 나타나는 것으로 보이니 이는 활발한 분해과정을 거쳐 침출수가 토양의 공극을 통해 유출되는 시간에 따른 차이로 사료된다.

본 연구와 유사한 선행연구를 진행한 캐나다의 Pratt(2009)의 연구결과<sup>8</sup>(Al, Ba, B, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mo, Ni, Ag, Ti, V, Zn)와 비교하면 본 연구의 중금속 결과가 비교적 낮게 나타나는 것을 확인하였다.

그러나 일부 중금속의 경우 소(사양질)에서 발생한 침출수의 분석결과 Mo은 평균 10.474 mg/L로 나타나 Pratt(2009)의 0.700 mg/L보다 높게 나타났다. 또한 돼지(사양질)에서 발생한 침출수의 분석결과 Al은 평균 2.54 mg/L, Mo은 평균 10.43 mg/L, Ti은 평균 4.39 mg/L로 나타나 Pratt(2009) 연구결과의 Al 0.87 mg/L, Mo 0.33 mg/L, Ti 0.09 mg/L보다 높은 경향을 나타냈다. 사체의 중금속 농도차이는 매몰지의 토성 및 축종의 특성에 따른 결과로 추정된다.

### 3.4. 약취물질의 변화

약취물질에 대한 모니터링 결과 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 전체적으로 Sulfurs(5종)의 농도가 높게 나타났으며, Ketones(7종), Alcohols(8종), Aromatics(4종), Nitrous compounds(4종) 순으로 높게 검출되었다.

Ketones(7종)과 Aldehydes(5종), Acids(6종)의 경우 매몰 초기에 발생하여 이후 감소추세를 보이고 있으며, Sulfurs(5종)과 Nitrous compounds(4종)의 경우 매몰 후 5개월~7개월 사이에 뚜렷하게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 Alcohols(8종), Aromatics(4종), Esters(11종), Terpenes(7종)의 경우 분해과정에서 발



Fig. 5. Time dependent variation of trace elements in leachate.



Fig. 6. Time dependent variation of odor substance.

생되는 경향보다는 여름철이라는 계절적 요인에 따라 겨울철보다는 여름철에 다소 높게 검출되는 것으로 조사되었다.

또한, 악취물질의 경우 토양의 종류 및 매물 가축의 종류에 따라 발생하는 악취물질의 상관성은 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

그러나 Sulfurs(5종)는 토양종류에 따른 농도 수준이 다소 상이한 것으로 조사되었다. 사양질 토양에 비하여 사질 토양에서 낮은 농도로 검출되어 토양의 종류에 따른 Sulfurs(5종)의 생성/분해/유출 속도 등이 상이한 것으로 나타나 추가적인 조사가 요구된다. Sulfurs(5종)는 가축분뇨 저장조 및 처리시설에서 분해 시 발생하는 주요 악취 화합물 중 하나로서 달걀 썩은 냄새가 나며 자극성이 있으며 질식을 유발시키는 가스이다. 또한 비중이 공기보다 무겁기 때문에 대기 중으로 확산이 잘 되지 않는 특성을 지닌다. 이러한 특성으로 인해 매물 공간 내에 잔류하면서 높은 농도로 검출된 것으로 판단된다.

검출된 악취물질에 대해 악취방지법<sup>19</sup>의 배출허용기준과 비교한 결과 지정악취물질 22종 중 10종(Propanoic acid, n-Butyl acetate, Isobutyl alcohol, 2-Butanone, Methyl Isobutyl Ketone, Acetaldehyde, Propionaldehyde, Toluene, Xylene, Styrene)은 배출허용기준(공업지역)보다 낮거나 검출되지 않았다. 나머지 12종(Isovaleric acid, Valeric acid, Butyric acid, Dimethyl disulfide, Dimethyl sulfide, Hydrogen sulfide, Methyl mercaptan, Butanaldehyde, i-Valeraldehyde, n-Valeraldehyde, Trimethylamine, Ammonia)은 배출허용기준(공업지역)보다 높거나 유사한 농도수준으로 발생하는 것으로 조사되었다.

특히, Sulfurs 5종 중 지정악취물질인 4종(Dimethyl disulfide, Dimethyl sulfide, Hydrogen sulfide, Methyl mercaptan)의 경우 대부분의 시료에서 배출허용기준(공업지역)을 초과하여 검출되어 주요 악취유발물질이라고 할 수 있다. 특히, 매물 후 5개월~7개월 사이에 고농도로 검출되었고, 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으나, 사체분해 후반기에도 여전히 검출되고 있으므로 매물지 악취물질 관리를 위해 최우선적으로 고려해야 할 항목으로 나타났다.

Acids 6종의 경우 Isovaleric acid, Valeric acid, Butyric acid가 배출허용기준(공업지역)보다 높은 농도로 검출되었으며, Valeric acid와 Butyric acid는 시료채취 기간과 지점에 따라 농도변화가 뚜렷하지 않았으나 대다수 시료에서 검출되었다.

## 4. 결 론

국내에서 처음으로 축종과 토성에 따른 실험실 매물지 5기를 설치하여 매물지가 설치된 2012년 2월부터 2015년 2월까지 시간경과에 따른 가축사체의 유기물 분해정도, 발생가스, 사체 분해정도, 대사체 물질 등 환경적 안정화 지표를 조사함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 가축 매물지에서 사체가 분해됨에 따라 발생하는 주유가스물질로 CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>를 모니터링한 결과 매물 후 6개월이 지난 시점부터 농도가 높아지는 경향이 나타남에 따라 활발한 분해가 이루어지는 것으로 판단된다.

2. 사체가 분해됨에 따라 발생하는 침출수로부터 중금속을 분석한 결과 Mo, Mn, Fe가 주요물질로 검출되었으나 국외 문헌과 비교한 결과 다소 차이를 나타내었다. 이는 매물지의 토성 및 축종의 특성에 따른 결과로 추정된다. 또한, 토양의 종류에 따라 침출수가 발생하는 시간을 살펴본 결과 사질의 경우 매물 후 1주가 지난 시점부터 발생하기 시작하였으며, 사질의 경우 6주, 사양질의 경우 8주가 지난 시점부터 발생함에 따라 사질 > 사양질 > 사양질 토양 순으로 분해가 이루어지는 것으로 추정된다.

3. 가축 매물지역 환경조사지침에 따른 가축 매물지 발굴금지기간인 3년을 기준으로 사양질 토양의 소 매물지 사체의 분해정도를 확인한 결과 거의 분해가 완료된 것을 확인하였으며 약간의 악취, 소의 털과 뼈를 발견할 수 있었고 뼈에 묻어있는 토양 및 주변 토양을 분석한 결과 수분함량은 평균 16.49%, pH는 평균 8.22로 나타났다. 사체분해를 위해서는 분해의 주요 요인으로 온도, 수분, pH, 토성, 영양소, 매물지 깊이 등 다양한 외부환경 요인이 적절히 유지되어야 한다.

4. 가축 매물지에서의 주요 악취 물질로는 Sulfurs로 조사되었으며 매물 후 5개월~7개월 사이에 고농도로 발생하는 것으로 조사되었다. 또한, 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으나 사체분해가 종료되는 시점에도 검출됨에 따라 매물지에서 악취물질 관리를 위해 최우선적으로 고려해야 할 항목으로 나타났다.

## 감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다.

### References

1. Ministry of Agriculture, 'Food and Rural Affairs, Foot and Mouth Disease Emergency Action Guidelines (SOP)', 2017.
2. OIE, The World Organisation for Animal Health, www.oie.int, Assessed 6 september 2017.
3. Ministry of Agriculture, 'Food and Rural Affairs, Act on the Prevention of Contagious Animal Diseases', 2017.
4. Ministry of the Interior and Safety, 'Food and Mouth Disease Operational White Paper in National Disaster and Safety Management Center', 2011.
5. G. T. Lee, 'Method of disposal killed handling livestock by livestock epidemics', Korean Journal of Environmental Agriculture, 2011 spring workshop, 61-80 (2011).
6. Department for Environment Food & Rural Affairs, 'Foot and Mouth disease control strategy for Great Britain', 2012.
7. Kansas State University, 'Carcass disposal: a comprehensive review (chapter 14 evaluating environmental impact, executive summary)', 2004.
8. D. L. Pratt, 'Environmental impact of livestock mortalities burial', Master of Science, University of Saskatchewan, Saskatoon, 2009.
9. Department for Environment Food & Rural Affairs, 'FMD control strategy for great Britain', 2011.
10. Food & Rural Affairs, 'Origin of the UK foot and mouth disease epidemic in 2001, 2002', 2010
11. G Davies, 'The foot and mouth disease (FMD) epidemic in the United Kingdom 2001', comparative immunology, *Microbiology & Infectious Diseases*, **25**, 331-343 (2002).
12. National Institute of Environmental Research, 'Investment manual related livestock'. 2012.
13. Ministry of Environment, 'Livestock burial regional environmental research guidelines', 2013.
14. National Institute of Environmental Research, 'Biodegradation of livestock carcass and evaluation of secondary pollution to surrounding environments', 2014.
15. Ministry of Agriculture, 'FMD emergency action standard operation procedure (SOP)', 2011.
16. Korean Soil Information System, Soil information system, <http://soil.rda.go.kr>, Assessed 6 september 2017.
17. Ministry of Environment, 'Korea Water Test Method', 2014.
18. United States Department of Agriculture, 'Carcass Disposal: A Comprehensive Review (chapter 1 Burial)', 2004.
19. Ministry of Environment Malodor Prevention Act No. 698(2017.5.17.), Republic of Korea.