

Concentrations of metabolite in the leachate from pilot scale burial

Tae-Wan Jeon[★], Ho-Yeun Park, Dong-Gun Hwang, Young-Yeul Kang,
Yong-Jun Kim, Mi-Jeong Jang, and Sun-Kyoung Shin

*Environmental Resource Research Department, National Institute of Environmental Research,
Hwangyong-ro 42, Seogu, Incheon 22689, Korea*

(Received April 19, 2018; Revised September 28, 2018; Accepted October 1, 2018)

실험용 매몰지 침출수의 대사체물질 농도변화

전태완[★] · 박호연 · 황동건 · 강영렬 · 김용준 · 장미정 · 신선경

국립환경과학원 환경자원연구부

(2018. 4. 19. 접수, 2018. 9. 28. 수정, 2018. 10. 1. 승인)

Abstract: At the end of November 2010, livestock infected with foot and mouth disease (FMD) were buried, increasing concern about secondary pollution of drinking water and groundwater with odor. Hence, measures to reduce pollution of drinking water and groundwater are needed. In this study, based on livestock type and soil texture, five pilot-scale burial sites were monitored for the past three years from Feb 2012 to 2015. Leachate from the site was analyzed for 90 compounds. A detailed investigation has been completed, looking into organic matter decomposition characteristics of the buried bodies, relevant trace elements thereof, and in particular metabolite concentration changes such as the degree of decomposition of a carcass. From the results, no detectable heavy metals, including cadmium and arsenic, were measured. Among animal types, the rate of cattle decomposition is faster than swine decomposition, and the decomposition of the bodies were performed in sequence from sand, clay loam, sandy loam.

요약: 2010년 11월말 5번째 구제역이 발생하여 가축 매몰지로 인한 악취물질, 지하수, 음용수 등에 2차 환경오염 발생 가능성에 대한 문제제기 등 환경영향 저감 방안 마련이 필요하다. 본 연구의 목적은 축종별, 토성별 파일럿 규모 가축매몰지 5기를 설치하여 2012년 2월부터 2015년 2월까지 약 3년 동안 침출수를 채취하여 90 항목을 분석하였으며, 매몰사체의 유기물 분해특성, 사체관련 미량원소 특히 대사체물질 농도변화, 사체분해정도 등을 정밀 조사하였다. 그 결과 비소, 카드뮴 등 대부분의 중금속은 검출되지 않았으며 토성에 따른 축종별 분해정도를 파악한 결과 돼지보다는 소가 더 빨리 분해되고 사질 > 식양질 > 사양질 토양 순으로 사체분해가 이루어지는 것으로 판단된다.

Key words: Foot and Mouth Disease (FMD), pilot-scale, carcass, leachate, soil texture

[★] 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.

1. 서 론

2010년 11월말 경상북도 안동시에서 발생한 구제역은 2000년대 이후 5번째로 발생한 것으로 전국적으로 총 11개 광역시·도와 75개 시·군·구로 확산되어 4,790 개소의 매몰지가 설치되었고, 347만 마리의 소와 돼지가 살처분되며 큰 피해가 발생한 사례가 있었다.¹

국제수역사무국(OIE)에서는 매년 세계 각국에서 신고된 가축전염병을 토대로 방역 및 질병 전염 관리를 하고 있으며,² 특히, 영국, 미국, 캐나다를 중심으로 구제역과 관련된 가축사체 처리기술, 매몰지 환경영향평가, 매몰지 처리방법, 가축사체 분해정도, 환경 모니터링 등 연구가 활발히 추진되었다.³⁻⁹

우리나라의 경우 구제역에 걸린 가축은 가축전염병 예방법에 따라 살처분 후 소각하도록 되어 있으나,¹⁰⁻¹¹ 외국과 비교할 경우 가축사체 매몰처리에 따른 환경영향과 오염물질에 대한 자료가 많이 부족한 실정이다.

특히, 매몰지 가축사체의 유기물 분해 특성, 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 환경영향 저감 방안 필요성, 가축 매몰지의 사체분해와 관련된 ‘용도제한 3년’의 적정성 여부, 매몰지 조기안정화를 위한 국내의 환경적 특성에 맞는 자료, 매몰지 설계 및 환경관리지침¹² 개선을 위해 많은 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 우리나라 특성에 적합한 가축 매몰지 설치를 위해 소와 돼지의 사체를 이용하여 우리나라에 가장 넓게 분포되어 있는 사양질, 식양질, 사질의 토성에 대한 사체분해특성을 살펴보고자 하였다. 이에 따라 파일럿 규모의 가축 매몰지 5기를 설치

하여 약 3년간(2012년 2월~2015년 2월) 매몰사체의 유기물 분해특성, 사체관련 미량원소, 대사체 물질 농도변화, 사체분해정도 등을 조사하였다.

2. 연구내용 및 방법

본 연구는 2011년 실험실 규모 사전 모의실험¹³을 통해 기초자료를 확보하고 2012년 2월부터 실제 매몰지 사체층 높이의 1/3 규모의 파일럿 매몰지 5기를 설치하였으며, 2015년 2월까지 약 3년 동안 축종과 토성에 따른 가축사체의 분해특성에 대한 연구를 수행하였다.

특히, 소와 돼지의 사체로부터 발생된 침출수에서 환경영향인자와 관련된 대사체 물질 등 미량원소를 모니터링 하였으며, 매몰 경과에 따른 침출수 중 유기물 농도를 파악하였다.

2.1. 파일럿 매몰지 설치

파일럿 매몰지 설치에 필요한 재료로 복토 및 성토용 토양, 생석회, 가스 및 침출수 유공관, 모니터링 장비 그리고 매몰될 사체를 준비하였다.

복토와 성토에 사용한 토양은 국토의 43.8%로 가

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

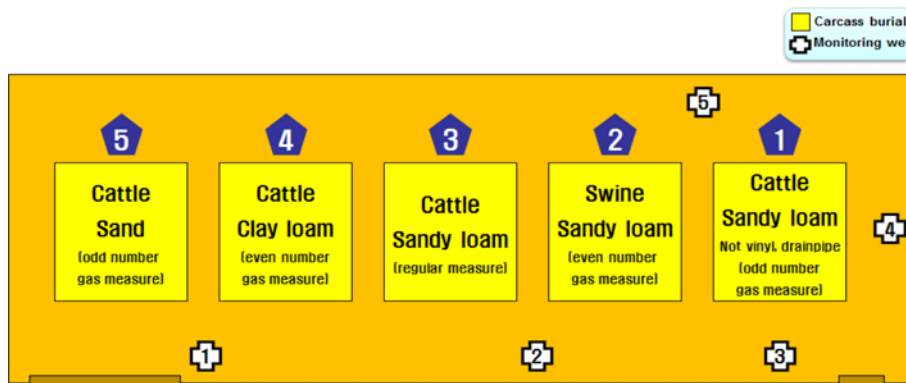


Fig. 1. Pilot burial site layout.

장 많이 분포하고 있는 사양질과 35.4%를 차지하는 식양질, 그리고 쉽게 구할 수 있는 모래입자로 되어있는 사질 토양 등 3종류의 토양¹⁴을 선정하여 파일럿 매몰지를 설치하였다.

파일럿 매몰지의 설치에 Table 1과 Fig. 1에 나타난 것과 같이 우리나라에서 가장 많이 분포되어 있는 사양질의 토양을 이용하여 소와 돼지의 사체를 각각 1기씩 설치하여 축종별 분해특성을 비교하였다. 또한, 소의 사체를 이용하여 토성별로 사양질, 식양질, 사질로 분류하여 매몰지를 설치하였다. 이 중 사양질 토양의 매몰지 1기는 비닐 및 유공관을 설치하지 않아 주변 환경에 미치는 오염도를 파악하고자 별도로 구축하였다.

매몰두수는 소의 경우 한 매몰지 당 약 600 kg의 젓소 2두씩 총 8두(2두 × 4매몰지)를 매몰하였으며, 돼지의 경우 한 매몰지 당 약 100 kg의 돼지 10두를 매몰하여 파일럿 매몰지 5기에 총 18두(소 8두, 돼지 10두)를 매몰하였다.

본 연구에서는 2011년 개정된 가축 매몰지 모식도¹²를 참고하여 실제 매몰지의 사체 매몰층 높이의 1/3 규모로 파일럿 매몰지를 설치(12.2.10) 하였으며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 2.5 m(W) × 3.5 m(L) × 2.5 m(H) 규모로 중장비를 이용해 굴토하고 여기에 토양을 일부 채운 후 2.0 m(W) × 2.5 m(L) × 2.2 m(H)의 매몰지 5기를 설치하였다.

매몰지 모식도에 자동계측시스템의 센서들 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 돼

지의 사체를 순서에 따라 중장비를 이용해 굴토작업을 하여 기본적인 매몰지 틀을 마련한 후 토성별로 바닥을 채운 뒤 비닐을 2중으로 설치하였다. 이후 주문 제작한 침출수 유공관을 2°의 기울기를 주어 침출수 배출관 방향으로 침출수가 모아질 수 있도록 설치하였다.

유공관의 윗 부분에는 막힘을 방지하기 위해 자갈을 깔은 후 가축사체를 유공관 위에 위치하도록 하였다. 이때 사체 내부가 분해되면서 생성된 가스에 의해 사체가 터지는 현상을 방지하고자 사체에 칼집을 내어 가스를 분출시킨 후 흙으로 매몰하였다.

사체 위에는 온도, 수분, 토압을 측정할 수 있는 센서와 가스관을 설치하였으며, 침출수 유공관과 가스 유공관을 설치하고 최종적으로 성토하여 파일럿 매몰지 설치를 완료하였다.

2.2. 주요 조사항목

본 연구에서는 가축 사체가 매몰되어 생성되는 가스와 침출수에 대한 문헌조사 및 전문가 자문을 통하여 분석 항목을 선정하였고, 이에 대한 자료를 확보하고자 하였다.

일반적으로 매몰 후 일련의 부패과정을 통해 고농도의 유기물질, 암모니아 등을 포함한 침출수와 가스가 형성된다. 따라서 매몰지에서 발생된 침출수를 시료채취하여 중금속, 대사체 물질 등 약 90 항목을 정밀분석하여 매몰 사체의 분해특성을 조사하고자 하였다. 또한 사체분해정도를 파악할 수 있는 매몰지 내부의 온도, 수분, pH 등을 조사하였다. 조사항목은 3년 동안의 연속성을 고려하여 주기적으로 모니터링 하였

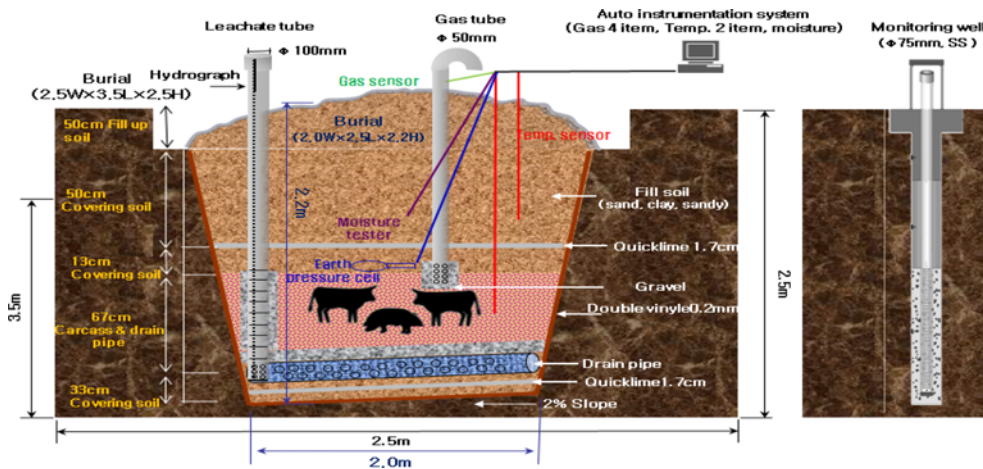


Fig. 2. Schematic view showing the pilot scale burial site.

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, Penicilline 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 ₃ -N, NH ₃ -N, Cl-, TOC, TN, TP, COD, BOD, K, Na, Mg, Ca, SO ₄ , F, B, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, As, Cd, Cr, Ni, Al, Se, Ba, Co, Mo, Ag, Ti, V, Leachate generation amount

고, 특히 본 연구결과에서는 사체관련 미량원소 및 대사체 물질 농도변화에 주목하고자 하였다.

2.3. 주요 설치장비

본 연구에서 매몰지 내부의 온도, 수분, 압력에 대한 측정은 각각의 측정 센서를 매몰지 내부에 설치하였으며 가축의 사체가 분해되며 변화되는 환경조건을 실시간으로 측정하고 기록될 수 있도록 컴퓨터와 연결하여 데이터를 측정하였다.

또한 가축의 사체가 분해되며 발생하는 가스의 측정을 위해 가스 배출관에 설치하여 실시간으로 자동 측정될 수 있도록 설치하였다.

침출수의 경우에는 침출수 배출관에 침출수가 발생하는 양을 파악하기 위해 수위계를 설치하였으며, 더불어 침출수를 직접 확인할 수 있도록 유공관 내부를 확인할 수 있는 산업용 내시경을 확보하여 수시 모니터링을 수행하였다.

2.4. 침출수 시료채취

본 연구에서 설치된 파일럿 매몰지 중 주변환경에 누출영향을 파악하고자 설치된 매몰지 1번을 제외한 2~5번의 경우 매몰지 바닥에 침출수 유공관을 설치하였고, 총 4곳에 설치된 침출수 유공관을 통해 침출수를 채취하였다.

침출수의 발생여부는 산업내시경을 이용하여 침출수 유공관을 통해 수시로 관찰하였고, 발생한 침출수는 연동 펌프(Peristaltic pump)를 사용하여 침출수 유공관을 통해 시료채취 하였다. 침출수의 시료채취는 2012년 2월부터 2014년 10월까지 총 27회 79건의 시

Table 3. LOD and LOQ of ICP by element

(Unit : mg/L)

Element	LOD	LOQ	Element	LOD	LOQ
Al	0.00705	0.071	Fe	0.00498	0.049
Ba	0.00980	0.098	Mo	0.00509	0.051
B	0.00688	0.068	Ni	0.00482	0.048
Cd	0.00435	0.043	Ag	0.00858	0.086
Cr	0.00431	0.043	Ti	0.00980	0.098
Co	0.00619	0.062	V	0.00677	0.068
Cu	0.01040	0.104	Zn	0.00437	0.044

료를 채취하였다.

2.5. 정량한계

ICP의 방법검출한계 및 정량한계는 수질오염공정시험기준의 정도보증/정도관리에 따라 표준물질을 정제수에 정량한계 근처의 농도를 첨가한 시료 7개를 준비하여 표준용액의 농도와 흡광도에 대한 검정곡선을 작성하고 표준편차를 구하였다. 표준편차에 3.14를 곱한값을 방법검출한계로 하였으며 정량한계는 검출한계에 10을 곱한값으로 하였다(Table 3).

2.6. 핵자기공명분광기를 이용한 대사체 분석

파일럿 매몰지별 침출수 중 분해산물의 종류와 양을 확인하고 시간 경과에 따른 농도변화 및 토성별 분해정도를 확인하고자 대사체 물질을 분석하였다. 대사체 분석은 핵자기공명분광기(NMR; Nuclear Magnetic Resonance), 가스 크로마토그래프 질량분석계(GC/MS; Gas Chromatograph-Mass Spectrometer), 초고성능 액

체크로마토그래피(UPLC; Ultra Performance Liquid Chromatography) 등의 분석기기로 복잡한 대사체 분석이 가능하나 본 연구에서는 분석이 빠르고 재현성, 특정 대사체 동정 및 정량분석, 분석 후 시료회수를 위해 본 연구에서는 NMR 장비를 활용하여 분석하였다.

침출수 샘플은 실험 전까지 -70°C 의 냉동고에서 보관하였으며 분석을 위해 침출수를 원심분리한 후 상층액 500 μL 와 기준물질인 TSP- d_4 20 mM 첨가된 D_2O 200 μL 를 섞은 후 NMR tube에 옮긴다. 600 MHz NMR spectroscopy (Agilent Technologies, USA)를 이용하여 1D spectrum을 얻었으며 측정된 pulse sequence는 고분자 물질과 물을 제거하기 위한 CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) pulse sequence를 이용하여 299.1 K에서 측정하였다. 스캔 횟수는 128회, acquisition time은 3초, relaxation delay은 1초, width는 24,000 Hz이며 total acquisition time은 12분의 조건에서 정밀 분석 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 사체 분해 정도

'12년 2월 파일럿 매몰지를 설치하여 '15년 2월까지 3년이 경과한 후 '가축 매몰지역 환경조사지침'에 따라 가축 매몰지 발굴금지 기간인 3년을 기준으로 매몰지 내부 상태를 확인하고자 매몰지를 굴토 및 해체하였다.

매몰지의 굴토 및 해체는 우리나라 대표적 토양인

사양질 토양에 약 600 kg의 소 두 마리가 매몰된 매몰지 3번을 대상으로 수행하였다. 해체된 매몰지에서는 약간의 악취와 함께 소의 털과 뼈들이 발견되었으며 거의 분해가 완료된 것을 확인하였고, 발견된 주변의 토양은 수분을 함유하고 있었으며 수분함량은 평균 16.49%, pH는 평균 8.22로 나타났다.

매몰지 사체 부패에 영향을 주는 것으로 문헌에서는 영양소(탄소, 질소, 인산 등)의 유효성, 수분, 부패에 가장 좋은 중성상태의 pH, 부패를 촉진시키는 흙의 온도, 토성, 매몰깊이, 외적인 요소인 사체의 특징(냉동, 해동, 기전적 손상)에 따라 부패속도에 영향¹⁶⁾을 줄 수 있다고 평가하였다. 따라서 3년 기한내 사체분해를 위해서는 상기 열거한 조건들과 함께 대량 매몰을 피하고 적정한 사체량과 규모를 조절하여 매몰하는 것을 권장하고자 한다.

3.2. 통계분석

결과의 통계 분석은 통계 프로그램인 SIMCA-P+ software를 이용하였다. NMR 측정을 통해 얻은 스펙트럼을 0.5~9 ppm의 영역을 0.04 ppm으로 binning 하고 물 peak 영역인 4.5~5.0 ppm은 제외시킨다. Binning file은 SIMCA-P+를 이용하여, PCA, PLS-DA 그리고 OPLS-DA 통계 방법을 이용하여 score plot 과 S-plot을 구하였다. S-plot은 score plot에서 그룹을 구분 짓도록 하는 성분이 어느 것인지 확인할 수 있는 데이터로 중심축에서 가장 벗어난 성분들을 확인하여 그

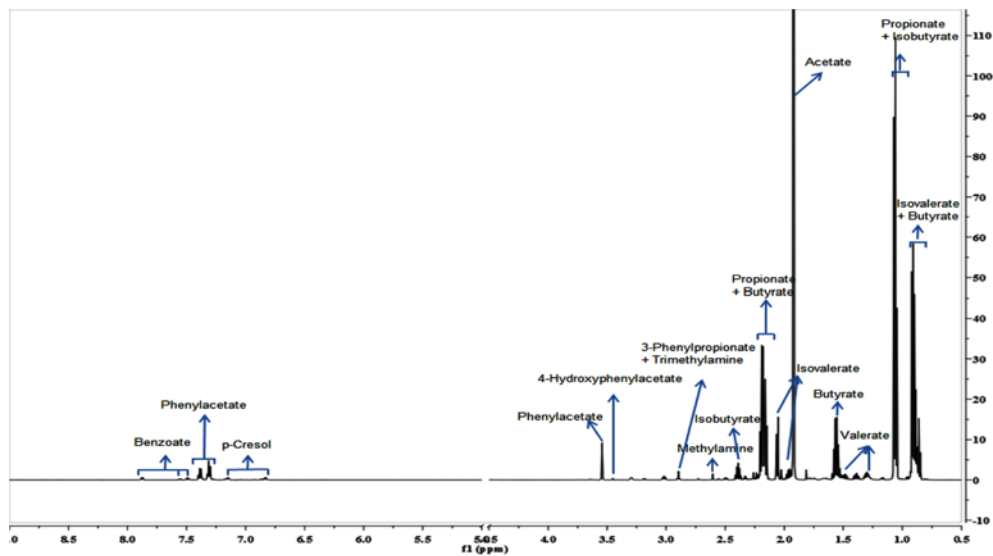


Fig. 3. The type of the compound observed in the leachate.

성분에 해당하는 대사체의 종류를 찾음으로써 score plot에서 그룹 간을 구분하는데 영향을 미치는 대사산물을 나타내었다.

3.3. 정성 및 정량분석

1D proton NMR 스펙트럼은 Fourier 변환하고 baseline 과 phase를 조정하여 정량의 오차를 최소화 시켰다. 정성 및 정량 분석은 Chenomx NMR suite 7.1 software (Chenomx Inc., Canada)를 이용하였다. 기준물질 TSP-d₄ 5.7 mM을 기준으로 화학이동(chemical shift) δ 0 ppm을 맞추고, 이를 기준으로 하여 검출되는 대사산물의 상대농도를 결정한다. 본 연구에서는 채취한 침출수를 Fig. 3과 같이 스펙트럼에서 관측된 신호와 화

합물을 알아보고자 Chenomx의 600 MHz 라이브러리를 이용하여 침출수에 포함 된 대사산물들을 확인하였으며 이후 각 대사체에 대한 농도를 정량하였다.

3.4. 매몰조건에 따른 검출된 대사체 물질

3.4.1. 매몰지의 경시변화에 따른 분해산물의 농도 변화

Table 4에서 7에 정리한 것과 같이 가축 매몰지에서 발생하는 대표적인 대사체는 14종으로 파악되었다. 가축 매몰지의 대사체 물질은 시간이 경과함에 따라 3-Phenylpropionate, Isobutyrate, Isovalerate, Benzoate, Butyrate, Valerate, Propionate, p-Cresol의 대부분의 대사산물의 농도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히

Table 4. Concentration change of main metabolites detected in burial (No. 2) (Unit : mM)

Compound	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
3-Phenylpropionate	0.2608	0.2711	0.1652	0.1513	0.1169	0.1539	0.0926	0.1315	0.1635
Isobutyrate	4.3142	4.9828	3.2655	3.8526	3.8415	4.5446	0.7932	1.5470	1.5896
Isovalerate	4.1955	5.1318	2.7665	2.6865	2.4994	2.3377	1.3601	1.9091	2.7832
Benzoate	0.3841	0.4531	0.2623	0.2404	0.2168	0.2224	0.1199	0.2107	0.3270
Butyrate	2.1439	10.1947	4.5136	6.9280	6.5993	8.4870	6.9990	6.5293	0.5441
Valerate	1.2807	1.3902	0.9822	0.6408	0.8272	1.6876	0.5253	0.8107	0.3630
Propionate	15.9378	18.4853	8.8212	6.7193	6.5447	6.3895	4.1295	6.4317	10.4833
p-Cresol	0.2761	0.2684	0.2344	0.2654	0.2250	0.2354	0.1517	0.2841	0.2932
Acetate	58.8608	55.7434	29.0274	31.5857	30.1536	25.4652	18.3005	37.1054	35.7582
Oxalacetate	0.0463	0.0445	0.0341	0.0380	0.0231	0.0400	0.0279	0.0402	0.0367
Phenylacetate	2.0108	2.5004	1.3972	1.3811	1.1601	1.2488	0.8709	1.2740	1.8126
Dimethylamine	ND	0.0333	0.0116	0.0109	0.0063	0.0041	ND	ND	ND
Acetone	0.0696	0.1533	0.0648	0.0519	0.0266	0.0411	0.0475	0.0482	0.0737
Methanol	0.1212	ND	ND	0.0070	0.0441	0.0270	ND	ND	ND

Table 5. Concentration change of main metabolites detected in burial (No. 3) (Unit : mM)

Compound	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
3-Phenylpropionate	0.4918	0.4834	0.2132	0.2500	0.1952	0.1750	0.054	0.0449	ND
Isobutyrate	12.2310	6.3145	1.5952	2.7889	1.5412	0.4723	ND	0.0384	ND
Isovalerate	9.0283	8.6332	4.0052	4.0563	3.3451	3.4909	ND	0.0138	ND
Benzoate	0.9056	0.8588	0.5595	0.5872	0.5990	0.4253	0.0871	0.2757	ND
Butyrate	4.3254	3.3203	1.0287	3.1961	1.2035	0.1181	ND	0.0223	ND
Valerate	3.0430	1.8881	0.8580	1.2484	0.8323	0.3719	ND	0.0184	ND
Propionate	26.5457	26.451	10.489	10.8228	8.6277	4.7006	ND	2.4324	0.1696
p-Cresol	0.4851	0.4627	0.3666	0.3871	0.3367	ND	ND	0.2577	ND
Acetate	123.9588	108.9449	26.1452	33.2151	18.2637	8.7408	0.0044	6.6498	1.9809
Oxalacetate	0.0987	0.0970	0.0786	0.0841	0.0818	0.0630	ND	0.0436	0.0284
Phenylacetate	5.2161	5.4001	3.1521	3.1012	2.5749	2.4656	0.2201	0.9617	0.8220
Dimethylamine	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Acetone	0.0983	0.1277	0.0621	0.0470	0.0391	0.0322	ND	0.0210	0.0140
Methanol	0.0230	0.0089	ND	ND	0.0295	0.0270	ND	ND	ND

Table 6. Concentration change of main metabolites detected in burial (No. 4) (Unit : mM)

Compound	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
3-Phenylpropionate	0.8165	0.9677	ND	ND	0.1735	0.0223	0.3205	0.3674	0.4476
Isobutyrate	26.0279	38.6969	14.1701	ND	3.7823	0.1770	2.8622	1.5421	2.2302
Isovalerate	13.9089	19.2056	ND	ND	1.5074	0.1282	3.3789	4.0544	4.9868
Benzoate	0.6213	0.5828	ND	ND	0.5003	0.1485	0.2415	0.4064	0.8123
Butyrate	67.5418	95.1187	13.746	ND	4.1206	0.2115	14.6516	15.5326	8.3746
Valerate	23.1199	36.8623	11.4795	ND	1.3803	0.0390	1.3547	2.0356	2.2597
Propionate	36.0472	51.7275	10.1951	ND	3.1774	0.1322	7.6567	10.6622	14.5575
p-Cresol	0.7736	0.6747	ND	ND	0.2789	0.0416	0.0382	0.2835	0.3153
Acetate	150.5304	210.8799	31.8822	ND	11.6893	0.2180	47.3556	76.4831	112.754
Oxalacetate	0.1982	0.3122	ND	ND	ND	0.0354	0.0498	0.0527	0.0638
Phenylacetate	6.6681	8.8986	9.5711	ND	1.0394	0.1046	2.0202	2.4432	3.1518
Dimethylamine	0.1053	0.1759	ND	ND	ND	0.0219	ND	ND	ND
Acetone	ND	ND	ND	ND	0.0804	0.0331	0.0865	0.0628	0.0937
Methanol	0.0637	ND	ND	ND	ND	0.0287	ND	ND	ND

Table 7. Concentration change of main metabolites detected in burial (No. 5) (Unit : mM)

Compound	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.
3-Phenylpropionate	0.1628	0.2111	0.0674	0.0859	0.0723	0.0529	ND	ND	ND
Isobutyrate	2.0983	1.6401	0.7214	0.5855	0.4527	0.2474	ND	ND	ND
Isovalerate	4.9424	5.6828	1.2150	1.6934	1.1561	0.6748	ND	ND	0.027
Benzoate	0.5784	0.7798	0.2152	0.3181	0.2953	0.2148	ND	ND	ND
Butyrate	0.9815	1.0569	0.6214	0.3154	0.1251	0.0172	ND	ND	0.0369
Valerate	0.6777	0.6828	0.3616	0.1469	0.1160	0.0200	ND	ND	0.0129
Propionate	13.4359	16.4728	3.7316	4.1418	2.4027	0.0856	ND	0.0401	0.1221
p-Cresol	0.4565	0.4317	0.2625	0.3200	0.2705	0.0066	ND	ND	ND
Acetate	64.4159	81.8164	17.2508	23.2408	16.1699	1.0190	0.0049	0.9985	1.9135
Oxalacetate	0.0916	0.0990	0.0390	0.0486	0.0410	ND	ND	0.0127	ND
Phenylacetate	2.0833	2.8685	0.753	1.0993	0.9512	0.7531	ND	0.2587	0.1778
Dimethylamine	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Acetone	0.0351	0.0413	0.0111	0.0138	0.0150	0.0049	ND	0.0044	ND
Methanol	0.0297	ND	ND	0.0043	0.0260	0.0191	ND	ND	ND

Acetate, Oxaloacetate, Phenylacetate는 4 개의 매물지에서 공통적으로 경시변화에 따라 감소하는 경향을 보였다. 각각의 매물지에서 일어나는 분해 반응의 속도가 상이한 것으로 조사되었다.

특히, 4번 매물지에서는 1월의 acetate 농도가 150.5304 mM에서 6월에 0.2180 mM 까지 감소했다가 9월 샘플에서는 112.7540 mM 까지 증가한 것을 확인할 수 있었다. Phenylacetate의 경우 12년도 샘플의 11주차 농도는 0.0020 mM에서 31주차에는 0.3285 mM까지 증가하는데, 이 대사체는 아미노산인 phenylalanine과 tyrosine의 분해에 의해 생성되어 그 양이 증가하게 되며, 미생물이 산소환경에서는 phenylacetate를 phenylacetyl-

CoA 형태로 에너지 대사에 사용하게 되는데 산소가 부족한 환경에서는 이 경로가 작용하지 않아 phenylacetate가 축적되어 그 양이 증가하였다. 이 대사과정은 초기의 단백질이 분해되어 아미노산이 생성되고, 산소가 소모 된 후에 진행되는 과정으로 11주차 이후에 급격히 진행되는 것으로 판단된다. 하지만 이 샘플 들에서는 시간이 지남에 따라 phenylacetate 의 농도가 2월 2.8685 mM에서 9월 0.1778 mM 까지 감소하는 것을 알 수 있었다.

Isobutyrate와 isovalerate는 아미노산의 분해에 의해 생성되는데 isobutyrate는 albumin과 valine으로부터, isovalerate는 albumin과 leucine의 분해로 부터 생성된

다. 12년도 시료의 경우 두 가지 대사산물의 농도가 시간에 따라 증가하는 것으로 확인 되었으나, 13년도 샘플의 Isobutyrate는 2.0983 mM에서 0.2472 mM까지 낮아졌다가 7월 유출수 부터는 더 이상 검출되지 않았고 Isovalerate는 4.9424 mM에서 0.0270 mM으로 그 농도가 감소하였다.

5번 매몰지의 경우, Butyrate, propionate, valerate는 volatile fatty acid에 속하는 물질로, 이들은 사체분해 초기에 미생물의 작용에 의해 많이 생성되다가 시간이 지남에 따라 메탄과 이산화탄소 형태로 분해되어 그 양이 점차 감소한다. 13년 1월에 채취한 침출수의 농도(단위 :mM)는 각각 0.9815 mM, 13.4359 mM, 0.6777 mM이었으나 이들은 9월 샘플에서는 0.0369 mM, 0.1221 mM, 0.0129 mM까지 감소하였다. Acetate도 butyrate, propionate, valerate와 마찬가지로 volatile fatty acid에 속하여 1월에는 그 농도가 64.4159 mM로

높게 나타난 후 0.0049 mM까지 감소했다가 1.9135 mM까지 증가하게 되는데 acetate는 혐기성 미생물의 glucose 대사산물로 산소가 없는 환경에서 증가한다. 하지만 휘발성의 성질 때문에 시간이 지남에 따라 감소함을 알 수 있었다.

3.4.2. 사체 종류별 침출수의 농도 비교

사체의 종류에 따른 비교를 위하여 동일한 토양 조건인 매몰지 2번과 3번에서 검출된 화합물의 농도를 비교해본 결과 Fig. 4~Fig. 5에 나타난 것과 같이 acetate, butyrate, propionate, isovalerate 등의 농도가 매몰지 2번에서 더 높은 농도로 관측되었으며 대사체가 시간에 따라 농도가 어떻게 변하는지 주요 대사체에 대해 농도변화를 그래프로 나타내었다.

이는 12년도 결과와 비교를 해보았을 때, 매몰지 3번에서 acetate, butyrate, methylamine, propionate 등의

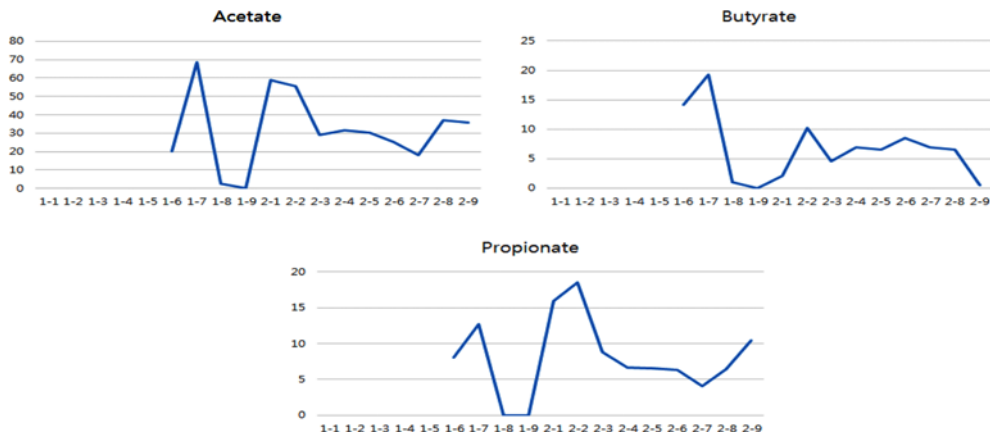


Fig. 4. Concentration of metabolites detected in burial (No. 2).

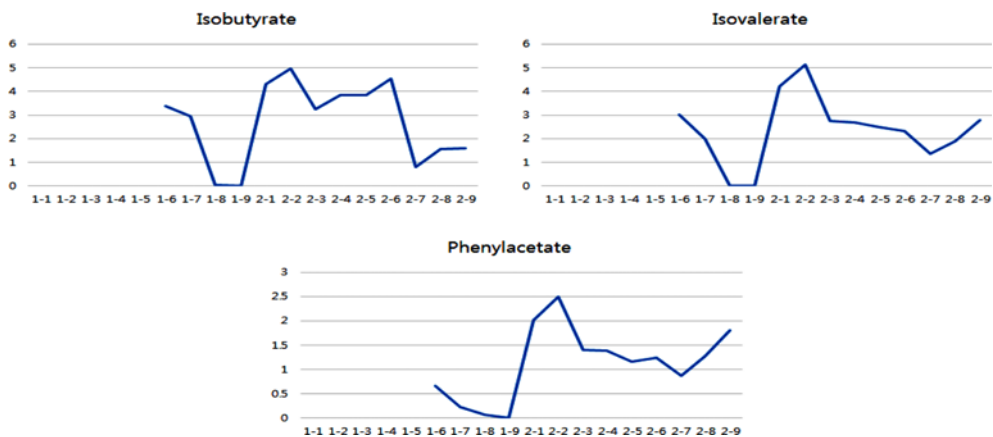


Fig. 5. Concentration of metabolites detected in burial (No. 2).

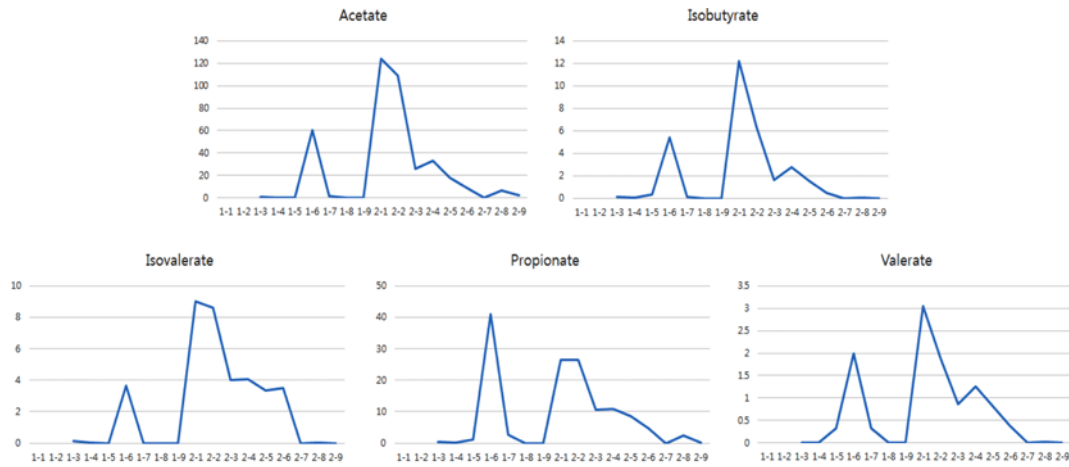


Fig. 6. Concentration of metabolites detected in burial (No. 3).

농도가 18주에 최대로 관측된 반면 매몰지 2에서는 22주에 최대치를 보여 소의 경우가 돼지보다 빠르게 분해가 있어났음을 유추할 수 있었다. 이를 계속적으로 관측한 결과 빠른 분해가 일어난 소의 사체의 경우 시간이 지남에 따라 분해 속도가 느려진 것을 유추할 수 있었다. 돼지의 경우 소보다 느리게 사체 분해가 일어나고 있으며 계속적으로 사체분해 과정이 일어나는 것을 확인하였다. 또한 토양의 종류에 따른 비교를 위하여 동일한 소의 사체를 서로 다른 토양에 매몰한 매몰지 3, 4, 5를 비교한 결과를 보면 시간의 흐름에 따라 5번 매몰지에서 극미량의 대사산물이 검출되었다. 이것으로부터 사질의 경우 사체분해 유출액이 식양질에 비해 쉽게 빠져나올 수 있는 환경으로서 초기에 많이 유출되고 이후에는 분해산물의 대부분이 미량 존재하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

국내에서 처음으로 축종별, 토성별 과일렛 매몰지 5기를 설치하여 매몰지가 설치된 2012년 2월부터 2015년 2월까지 시간경과에 따른 가축사체의 유기물 분해 정도, 사체 분해정도, 대사체 물질 등 환경적 안정화 지표를 조사함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 소, 돼지 축종에 따른 비교를 위하여 동일한 토양 조건인 매몰지 2와 3에서 검출된 대사체 물질의 농도를 비교해본 결과 acetate, butyrate, propionate, isovalerate 등의 농도가 매몰지 2에서 더 높은 농도로 관측되었다. 매몰지 3에서 acetate, butyrate, methylamine,

propionate 등의 농도가 18주에 최대로 관측된 반면 매몰지 2에서는 22주에 최대치를 보여 소의 경우가 돼지보다 빠르게 분해가 있어났음을 유추할 수 있었다.

2. 가축 매몰지역 환경조사지침에 따른 가축 매몰지 발굴금지기간인 3년을 기준으로 사양질 토양의 소 매몰지 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.

3. 토양의 종류에 따른 영향 및 분해정도를 비교하기 위해 소의 사체를 서로 다른 토양에 매몰한 매몰지와 비교한 결과 시간이 경과함에 따라 5번 매몰지(사질)에 극미량의 대사산물이 검출되었다. 이는 사질 토양이 식양질 토양에 비해 분해물질이 쉽게 빠져나올 수 있는 환경으로 초기에 많이 유출되고 이후에 분해산물이 대부분 미량 존재하는 것을 알 수 있었다. 따라서 사질 > 식양질 > 사양질 토양 순으로 사체분해가 이루어지는 것으로 추정된다.

References

1. Ministry of Safety Administration and Home Affairs, 'FMD Central Disaster Countermeasures Headquarters Operation Safety White Paper', 2011.
2. H. S. Yoo, *Infect. Chemother.*, **43**(2), 178-185 (2011).
3. G. T. Lee, Method of Disposal Killed Handling Live-

- stock by Livestock Epidemics, *J. of Environmental Agriculture of Spring Workshop*, 61-80 (2011).
4. Department for Environment Food & Rural Affairs, 'Foot and Mouth Disease Control Strategy for Great Britain, www.defra.gov.uk, Assessed 27 June 2012.
 5. Kansas State University, 'Carcass Disposal : a Comprehensive Review (Chapter 14 Evaluating Environmental Impact, Executive Summary)', 2004.
 6. Department for Environment Food & Rural Affairs, 'FMD Control Strategy for Great Britain', 2011.
 7. Department for Environment Food & Rural Affairs, 'Origin of the UK Foot and Mouth Disease Epidemic in 2001, 2002', 2010.
 8. Gareth Davies, 'The Foot and Mouth Disease (FMD) Epidemic in the United Kingdom 2001', *Comparative Immunology, Microbiology & Infectious Diseases* **25**, 331-343 (2002).
 9. National Institute of Environmental Research, 'Biodegradation of Livestock Carcass and Evaluation of Secondary Pollution to Surrounding Environments', 2014.
 10. National Institute of Environmental Research, 'Investment Manual Related Livestock', 2012.
 11. Ministry of Environment, 'Livestock Burial Regional Environmental Research Guidelines', 2013.
 12. Ministry of Agriculture, 'FMD Emergency Action Standard Operation Procedure (SOP)', 2011.
 13. T. W. Jeon, Y. W. Jeong, M. J. Jeong, J. Y. Lee, S. K. Jeong, H. Y. Yoo, S. K. Shin and G. J. Oh, *J. of Korea Society of Waste Management*, **31**(3), 250-258 (2014).
 14. Korean Soil Information System, <http://soil.rda.go.kr>, Assessed 7 mar 2012.
 15. National Institute of Environmental Research Notification, Korean Water Test Method, No. 2017-57(2017. 12. 22.), Republic of Korea.
 16. National Institute of Environmental Research, 'Livestock Burial Related Documents', 68-70 (2012).
 17. Dyan Lindsay Pratt, 'Environmental Impact of Livestock Mortalities Burial', 46-52 (2009).

Authors' Positions

Tae-Wan Jeon	: Research Scientist, Manager
Ho-Yeun Park	: Research Scientist
Dong-Gun Hwang	: Research Scientist
Young-Yeul Kang	: Research Scientist
Young-Jun Kim	: Research Scientist
Yong-Jun Kim	: Research Fellow
Mi-Jeong Jang	: Research Scientist
Sun-Kyoung Shin	: Director General