



사료화 및 퇴비화 공정 유래 음폐수의 성상 비교 연구

신승구, 한규성, 배영신*, 황석환†

포항공과대학교 환경공학부, 수도권매립지관리공사 미래전략홍보실*
(2015년 6월 12일 접수, 2015년 9월 7일 수정, 2015년 9월 10일 채택)

Characteristics of Food Waste Leachate Derived from Feed Supplement- and Compost-Producing Facilities

Seung Gu Shin, Gyuseong Han, Young-shin Bae*, Seokhwan Hwang†

School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology,
Future Strategy & Public Relations Division, Sudokwon Landfill Site Management Corporation*

ABSTRACT

This study was conducted to characterize food waste leachate (FWL) and to compare its characteristics according to generation source: feed supplement- and compost-producing facilities. FWL contained high levels of organic compounds such as carbohydrate, protein and lipid. The moisture content of FWL was among the range of conventional wet anaerobic digestion. FWL was acidic (pH of 4.0±0.3) and showed high coefficients of variance for specific parameters: carbohydrate, protein, lipid, ethanol, acetic acid and propionic acid. FWL derived from feed supplement-producing facilities showed slightly lower concentrations of most parameters than FWL derived from compost-producers. However, the difference was not significant at 5% significance level according to analysis of variance.

Keywords : food waste leachate, anaerobic digestion, characterization, analysis of variance

초 록

본 연구에서는 수도권매립지 반입 음폐수에 대한 성상분석을 통하여 음폐수의 일반적인 특성을 살펴 보고, 음폐수 유래 공정(사료화, 퇴비화)에 따른 음폐수 성상 특징을 비교하였다. 음폐수는 고농도의 유기물을 함유한 폐수이며 습식 혐기소화가 가능한 범위의 함수율을 나타내었다. 음폐수는 산성을 띠며 비교적 높은 세부 성상(탄수화물, 단백질, 지방, 에탄올, 아세트산, 프로피온산 등)의 변화율을 나타

†Corresponding author(shwang@postech.ac.kr)

냈다. 사료화 및 퇴비화 공정 유래 음폐수 성상을 비교한 결과, 평균값 기준으로 사료화가 다소 낮은 정도를 보였으나 분산분석에 따른 통계적 차이는 유의성이 없었다.

주제어 : 음폐수, 혐기소화, 성상분석, 분산분석

1. 서론

국내에서는 대부분(91%)의 음식물류폐기물을 분리수거하여 자원화하고 있다¹⁾. 2013년 기준 국내에는 총 240개소의 음식물류폐기물 처리시설이 있으며, 이중 81%인 194개소가 사료 또는 퇴비를 생산하는 시설이다²⁾. 음식물류폐기물의 자원화 과정에서는 원료의 탈수 및 세척 과정 등에서 고농도의 유기성 폐수가 발생되는데, 이것을 음식물탈리액 혹은 음폐수라 한다. 2013년 기준 국내 음식물류폐기물 처리시설은 하루 8,208톤의 폐수를 발생하는데, 이중 79%는 사료 또는 퇴비를 생산하는 시설에서 발생되며 17%는 혐기소화 시설에서 배출된다²⁾. 이중 사료 또는 퇴비 생산시설에서 발생하는 음폐수는 높은 유기물 함량과 많은 발생량을 나타내므로 환경오염 유발 물질인 동시에 유기성 폐자원으로서 에너지 잠재력이 높다.

혐기소화는 유기성 폐자원으로부터 바이오에너지를 생산하는 공정이다. 혐기소화는 혐기성 미생물의 상호작용에 의하여 탄수화물, 단백질, 지방 등의 원료 유기물을 당류, 아미노산, 지방산 등의 중간물질을 거쳐 최종적으로는 메탄, 이산화탄소 등의 바이오가스로 전환시킨다. 혐기소화는 음식물류폐기물을 비롯하여 축산분뇨, 하수슬러지 등 다양한 유기성 폐자원을 처리하는데 이용되고 있다³⁾. 음식물류폐기물에서 유래된 음폐수는 음식물류폐기물과 비교적 유사한 성상을 가지고 있으며, 따라서 음폐수의 혐기소화 처리는 그 가능성이 보고되었다^{4,5)}. 이에 따라 현재 국내에는 10개소 이상의 음폐수 단독 혹은 병합 혐기소화 시설이 운영되고 있으나, 바이오가스 발생량은 EU와 비교하였을 때 19.3% 수준에 불과하다⁶⁾.

혐기소화 공정의 설계 및 운전에 있어서 원료 물질의 성상은 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 유기성 폐자원은 유입 성상 편차가 있으므로 유기물 과부하의 위험성이 존재한다. 가령 미생물 분해가 비교적 쉬운 탄수화물이 과량 유입되는 경우 혐기성 세균(bacteria)과 고세균(archaea)간의 성장불균형이 일어나 유기산 축적과 pH 감소 등의 문제가 발생할 수 있다⁷⁾. 한편 단백질이나 지방의 과부하가 일어날 경우에는 단백질과 지방 분해에서 유래되는 암모니아와 고급지방산(long chain fatty acid)에 의하여 공정 저해가 일어날 가능성이 있다. 따라서 혐기소화 원료 물질의 성상은 변화율을 고려하여 파악되어야 한다.

국내 유기성 폐자원의 물리화학적 성상은 EU 등 외국의 사례와 차이가 크며⁶⁾, 특히 음식물류폐기물과 음폐수 발생 특성은 한국인의 식습관과도 밀접한 연관이 있다. 따라서 음폐수 바이오가스화 공정의 설계 및 운전을 위하여 국내 음폐수의 성상 파악이 필요하다. 문헌에서는 최대 3회의 독립된 시료 채취를 통하여 음폐수의 성상을 파악하였거나^{4,5)}, 음폐수 성상변동에 대한 고찰이 충분히 제시되지 않았다^{8,9)}. 따라서 음폐수 성상 정보를 체계적으로 수집하고 그 변화율에 대하여 고찰해야 할 필요성이 있다.

전술한 바와 같이 고농도 유기성 폐수인 음폐수를 주로 발생하는 공정은 사료화 및 퇴비화 시설이다. 사료화 공정에서는 음식물류폐기물을 85~120℃에서 1~3시간 건조 및 살균하여 고액분리 후 축산용 사료 보조제(펠릿)를 생산하는 것이 특징이다¹⁰⁾. 반면 퇴비화 공정에서는 8시간 이상의 부숙 과정을 통하여 퇴비를 제조하고 후부숙, 분쇄 과정을 거친다¹⁰⁾. 이와 같이 사료화 및 퇴비화 시설은 단위 공정이 상이하므로 발생

되는 음폐수의 성상 역시 상이할 수 있다. 그러나 발생 공정별 음폐수의 성상 정보가 문헌에 보고된 바는 거의 없어, 이에 대한 조사 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 음폐수의 체계적인 성상 분석을 통하여 음폐수 혐기소화의 공정 설계 및 운영에 기초자료를 제공하고자 하였으며, 특히 사료화 및 퇴비화 시설에서 유래하는 음폐수의 성상을 비교하였다. 시료는 수도권매립지에 반입되는 음폐수를 무작위적으로 27개 선택하였고, 탄수화물, 단백질, 지방과 같은 유기물 성분과 중금속을 포함하여 총 21개 항목을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시료의 채취

음폐수 시료는 수도권매립지로 반입되는 음폐수 이송 차량이 음폐수를 저장조로 내리는 이송호스에서 채취하였다. 2009년 1월부터 12월 사이에 약 2주 간격으로 1회씩 샘플을 채취함으로써 음폐수의 연중 성상 변동이 실험 결과에 반영되도록 하였다. 채취된 시료의 개수는 사료화 공정 유래 음폐수가 20건, 퇴비화 공정 유래 음폐수가 7건으로서 2009년 당시 수도권매립지 음폐수 반입량 비율을 대변하였다.

2.2 분석 방법

시료 채취 후 1.2 μm 필터를 이용하여 용존성 시료를 분리하여 에탄올, 아세트산, 프로피온산 등의 분석에 이용하였다. pH는 실험실용 전자 pH 측정기를 이용하여 측정하였다. Standard Methods 방법을 이용하여 총고형물(total solids), 휘발고형물(volatile solids; VS) 및 현탁고형물(suspended solids; SS)을 측정하였고¹¹⁾, 전체 시료 중 총고형물을 제외한 질량비를 함수율(moisture content; MC)로 정의하였다. COD(chemical oxygen demand) 및 용존성 COD는 Standard Methods의 “closed reflux, colorimetric method”에 따라 결정하였다. 탄수화물 농도는 페놀-황산법을 이용하여 분석하였

고¹²⁾, 지방 농도는 클로로포름:메탄올(1:2 v/v) 용매를 이용한 추출법으로 분석하였다¹³⁾. TKN(total Kjeldahl nitrogen) 농도와 암모니아성 질소 농도는 증류-적정법을 이용하여 분석하였고¹¹⁾, 단백질 농도는 TKN과 암모니아성 질소 농도의 차이(유기성 질소)에 6.25를 곱하여 산정하였다. 에탄올, 아세트산, 프로피온산 농도는 FID(flame ionization detector)를 장착한 GC(gas chromatograph)를 이용하여 분석하였다. 중금속 및 독성물질(Cu, Cd, Pb, Hg, As, Cr⁶⁺, 총Cr, 시안(CN⁻))은 폐기물공정시험법에 따라 분석하였다. pH, 중금속 및 독성물질을 제외한 모든 분석은 2반복하였다.

2.3 통계 분석

두 시료 집단(사료화 및 퇴비화 공정 유래 음폐수)의 평균값이 동일한지 여부는 일원분산분석(one-way analysis of variance)을 통하여 검정하였다. 일원분산분석은 R 프로그램의 “anova” 함수를 이용하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 음폐수 성상의 일반적인 특징

1년간의 음폐수 성상 분석 결과를 [Table 1]에 나타내었다. 음폐수는 89.9%의 평균 함수율을 나타냈으며, 이 값은 습식 혐기소화의 일반적인 적용 범위인 85-90% 이상의 함수율 구간에 포함되었다¹⁴⁾. 따라서 음폐수를 단독 혐기소화할 경우 습식 혐기소화 공법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 음폐수 함수율은 변동폭이 크며(표준편차 2.9%) 최소값이 85%에 근접하므로 습식 혐기소화 운영에 주의점이 요구된다. 국내 축산분뇨, 하수슬러지 등은 일반적으로 함수율이 10% 이내인 경우가 많으므로¹⁵⁾, 음폐수와 축산분뇨, 하수슬러지 등을 병합소화한다면 원료물질의 통합 함수율은 음폐수의 단일 함수율보다 높아질 것으로 사료된다.

음폐수의 휘발고형물은 85.0 \pm 2.9 g/L로서, 총고형물 대비 평균 84.4%의 높은 비율을 보였다.

[Table 1] Analysis Results of Physico-chemical Parameters

Parameter	Source	Feed supplement producer		Compost producer		Overall		
		Mean	SD ¹	Mean	SD	Mean	SD	p value ²
pH		4.0	0.3	4.1	0.4	4.0	0.3	0.487
MC (%)		90.3	2.8	88.9	3.2	89.9	2.9	0.359
VS (g/L)		82.3	23.5	93.9	26.9	85.0	24.2	0.370
SS (g/L)		61.4	22.2	86.6	30.2	67.2	25.9	0.101
COD (g/L)		148.0	30.5	158.1	30.3	150.6	30.2	0.466
Soluble COD (g/L)		91.2	23.7	95.9	18.2	92.5	22.2	0.599
TKN (g/L)		4.4	1.2	4.6	0.8	4.5	1.1	0.777
NH ₄ ⁺ -N (g/L)		0.60	0.29	0.78	0.76	0.65	0.45	0.568
Carbohydrates (g/L)		18.6	7.0	25.7	17.6	20.4	10.8	0.335
Proteins (g/L)		24.0	6.5	25.5	5.8	24.3	6.2	0.639
Lipids (g/L)		30.8	12.8	35.1	16.4	31.9	13.6	0.578
Ethanol (g/L)		9.6	3.1	10.1	4.1	9.7	3.3	0.793
Acetic acid (g/L)		4.5	1.6	5.5	2.0	4.8	1.7	0.248
Propionic acid (g/L)		0.28	0.26	0.58	0.62	0.36	0.40	0.261

¹SD, standard deviation.

²ANOVA was performed to validate the statistical significance of the difference for each parameter using "anova" function in R software package. This indicates the p value from ANOVA.

음폐수의 COD 값은 평균 150.6 g/L로서 매우 높은 유기물 함량을 나타내었다. 음폐수의 세부 성상 중 COD 유발 물질인 탄수화물(113%), 단백질(120%), 지방(203%), 에탄올(209%), 아세트산(107%), 프로피온산(151%)의 COD 전환율(괄호 안의 값)16)을 적용하여 합산한 결과, COD 당량의 합계는 평균 143.1 g/L로서 실측 COD인 150.6 g/L의 95.0%에 해당하였다. 따라서 음폐수의 유기물은 본 연구의 분석 항목인 탄수화물, 단백질, 지방, 에탄올, 아세트산, 프로피온산의 조합으로 대부분 설명됨을 알 수 있다.

pH를 제외한 음폐수 성상 항목들은 20.0% 이상의 변화율(coefficient of variance)을 나타내어, 시료 간 성상변동이 비교적 컸음을 알 수 있었다. pH는 7.4%의 비교적 작은 변화율을 나타냈으나, pH는 수소이온 농도의 음의 로그값을 나타내므로 수소이온 농도의 변화율을 살펴보면

51.0%로 큰 값을 보였다. 음폐수의 “종합(aggregate) 성상”을 대표하는 휘발고형물, 현탁고형물, COD, 용존성 COD의 변화율은 각각 28.5, 38.6, 20.1, 24.0%를 나타냄에 반면, 세부 성상 항목인 탄수화물, 단백질, 지방, 암모니아성 질소, 에탄올, 아세트산, 프로피온산은 각각 52.9, 25.6, 42.6, 68.9, 33.6, 36.6, 111.7%의 변화율을 보였다. 음폐수 세부 성상 항목의 변화율이 종합 성상 항목의 변화율보다 높게 나타난 이유는 다음과 같이 고찰해볼 수 있다. 세부 성상 항목의 경우 음폐수 발생/보관/이송 과정의 환경조건 및 기간에 따라 생성 또는 분해가 특이적으로 이루어질 수 있는 반면, 종합 성상 항목은 세부 항목을 포괄하는 수치로서 세부 항목의 증감이 서로간 일부 상쇄된 값으로 풀이할 수 있다.

예를 들어 탄수화물은 비교적 분해가 쉬운 유기물질이며, 음식물류폐기물 또는 음폐수의 보관

및 이송 과정에서 일부분 발효가 일어날 수 있다. 이것은 음식물류폐기물과 음폐수의 낮은 pH와 비교적 높은 용존성 COD 비율, 그리고 에탄올과 아세트산과 같은 발효산물의 존재 등에서 유추할 수 있다¹⁷⁾. 이러한 유기물의 발효 시에는 COD의 직접적인 감소보다는 COD를 구성하는 물질간의 전환(예: 탄수화물→에탄올, 아세트산)이 주로 일어난다고 볼 수 있다. 따라서 종합 성상 항목인 COD보다 세부 항목인 탄수화물, 에탄올 등의 시료 간 변이 요소가 더 크며, 이것은 더 높은 변화율로 나타날 수 있다.

혐기소화 공정에서 유기물 부하(organic loading)는 수리학적 부하(hydraulic loading)와 유입 농도의 곱으로 표현되며, 실규모 공정에서 유입 농도는 통제하기 매우 어려운 요인이다. 따라서, 유입 농도에 대한 자세한 통계적 분석 자료는 혐기소화 공정의 설계 및 운전에서 중요한 참고 요인이 될 수 있다. 특히 탄수화물, 단백질, 지방과 같은 세부 유기물 항목에 대한 자료를 바탕으로, 탄수화물 과부하에 의한 소화조 pH 감소, 단백질 과부하에 의한 암모니아 증가 및 저해, 지방 분해에 따른 고급지방산(long-chain fatty acid)의 축적과 혐기미생물 저해와 같은

상황을 가늠해볼 수 있다. 따라서 각 세부 항목의 평균값은 물론 변동폭에 대한 정보가 중요함을 알 수 있고, 본 연구에서는 이러한 기초자료를 제공하였다.

음폐수에 존재하는 중금속 및 독성물질 분석 결과를 [Table 2]에 나타내었다. 음폐수에서 Cu, Cd, Pb, As, Cr⁶⁺, 총Cr의 6개 항목이 검출되었고, Hg 및 시안은 모든 시료에서 불검출되었다. 수도권매립지는 Cu, Cd, Pb, As, Cr⁶⁺, 총Cr에 대하여 각각 3.0, 0.15, 1.0, 0.5, 0.5, 2.0 mg/L 이하의 반입기준을 운영 중이며 반입기준을 초과한 경우는 없었다. 중금속은 고농도로 존재할 경우 식물, 어류 등의 진핵생물은 물론 미생물의 생장에 저해를 줄 수 있다^{18,19)}. 음폐수에 포함된 Cu 등의 중금속은 혐기소화 미생물의 활성에 영향을 끼칠 수 있으므로 단기/장기적인 저해 효과에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

3.2 사료화 및 퇴비화 공정 유래 음폐수의 성상 차이

사료화 및 퇴비화 공정 유래 음폐수(이하 “사료화 음폐수” 및 “퇴비화 음폐수”)의 성상 분석 비교 결과를 [Table 1]과 [Fig. 1], [Fig. 2]에

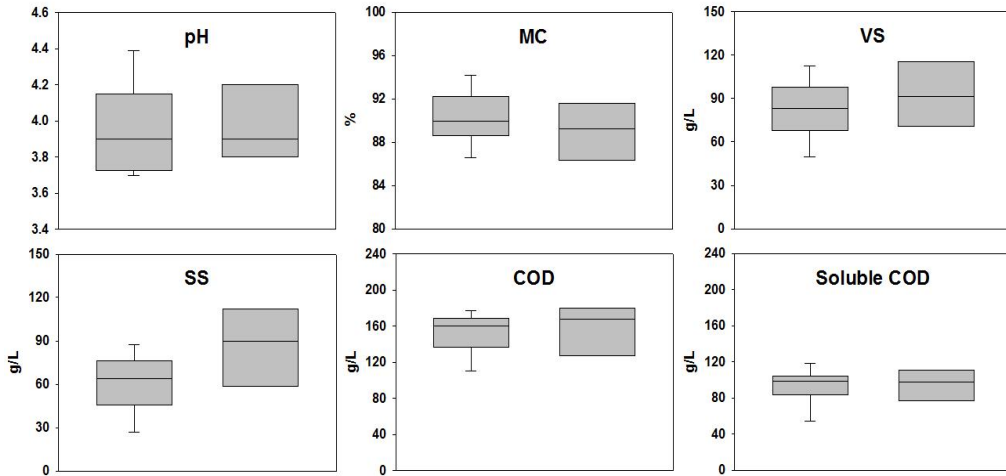
[Table 2] Analysis Results of Heavy Metals and Cyanide

Parameter	Source		Compost producer		Overall		
	Feed supplement		Mean	SD	Mean	SD	p value ²
Cu (mg/L)	0.583	0.408	0.576	0.290	0.581	0.374	0.961
Cd (mg/L)	0.048	0.026	0.048	0.023	0.048	0.025	0.961
Pb (mg/L)	0.020	0.042	0.066	0.153	0.032	0.086	0.464
Hg (mg/L)	ND ³		ND		ND		—
As (mg/L)	0.027	0.050	0.022	0.395	0.025	0.046	0.817
Cr ⁶⁺ (mg/L)	0.125	0.153	0.096	0.131	0.117	0.146	0.643
Total-Cr (mg/L)	0.315	0.535	0.297	0.545	0.310	0.526	0.941
Cyanide (mg/L)	ND		ND		ND		—

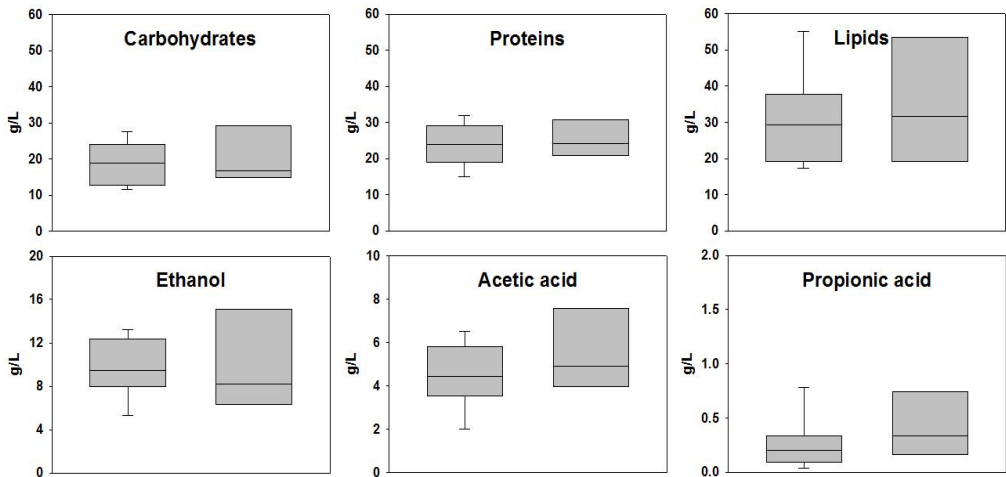
¹SD, standard deviation.

²ANOVA was performed to validate the statistical significance of the difference for each parameter using "anova" function in R software package. This indicates the p value from ANOVA.

³ND, not detected.



[Fig. 1] Aggregate parameters of food waste leachate derived from feed supplement (left) and compost (right) producing facilities. No parameter showed p value < 0.1 from the ANOVA test.



[Fig. 2] Particular parameters of food waste leachate derived from feed supplement (left) and compost (right) producing facilities. No parameter showed p value < 0.1 from the ANOVA test.

표시하였다. 사료화 음폐수는 퇴비화 음폐수에 비하여 pH, 휘발고형물(12.4%), 현탁고형물(22.4%), COD(4.7%), 용존성 COD(3.6%) 등 대부분의 종합 성상은 물론, 탄수화물(20.5%), 단백질(4.5%), 지방(9.1%), TKN(2.3%), 암모니아성 질소(16.8%), 에탄올(3.3%), 아세트산

(13.9%), 프로피온산(38.3%) 등 대부분의 측정 항목이 낮게 나타났다. 즉, 사료화 음폐수는 퇴비화 음폐수에 비하여 2.3~38.3% 가량 농도가 낮은 폐수인 것으로 나타났다. 그러나 일원분산 분석 결과 관찰된 모든 항목에서 사료화 음폐수와 퇴비화 음폐수의 성상이 차이를 보이지 않았

다(5% 또는 10% 유의수준). 즉, 사료화 및 퇴비화 음폐수의 성상을 평균값으로 비교했을 시에는 사료화 음폐수가 대부분의 항목에서 농도가 다소 낮은 것으로 나타났지만, 통계적으로 유의할 만큼의 수준은 아니었다. 이것은 비록 사료화 및 퇴비화 공정이 서로 다른 단위공정으로 이루어져 있으며 생산물도 서로 다르지만, 음폐수가 주로 발생할 것으로 예상되는 단위공정(세척, 파쇄 등)은 서로 유사하기 때문인 것으로 사료된다¹⁰⁾. 다만, 각각의 자원화 시설별 단위공정 구성은 서로 다르기 때문에 개별 자원화 시설의 공정 특성에 따라 서로 다른 성질의 음폐수가 발생할 소지가 있으며, 이에 대해서는 후속연구가 필요할 것으로 생각된다.

3.3 겨울 및 여름철 음폐수의 성상 차이

겨울 및 여름철에 채취된 음폐수의 성상 분석 비교 결과를 [Fig. 3]과 [Fig. 4]에 표시하였다. 겨울철 음폐수는 여름철 음폐수에 비하여 pH, 함수율(5.1%), 탄수화물(60.8%), 단백질(5.7%), 에탄올(12.7%) 값이 더 높았고, 휘발고형물(37.6%), 현탁고형물(40.4%), COD(6.7%), 용존성 COD(20.2%), TKN(7.5%), 지방(44.5%), 아세트산(37.9%), 프로피온산(80.0%)은 더 낮은 값을 나타내었다. 일원분산분석 결과 COD, 용존성 COD, 단백질, 에탄올의 4개 항목은 10% 유의수준에서 차이가 없었으며, 나머지 8개 항목에 대해서는 유의성이 있었다([Fig. 3]과 [Fig. 4]). 여름철 음폐수는 겨울철에 비하여 pH와 탄수화물이 낮고 아세트산과 프로피온산이 높았는데, 그 원인 중 하나로서 보관/수송 중 높은 외기 온도에 의하여 미생물 활성이 증대되어 부분적인 산발효가 일어났을 것으로 추측할 수 있었다⁵⁾. 한편 COD 중 용존성 COD의 비율은 겨울철 54%, 여름철 64%로서, 여름철 음폐수가 용존성 유기물을 더 높은 비율로 함유하고 있는 것을 알 수 있었다(p value = 0.083). 본 연구에서 채취된 사료화 공정 음폐수의 시료 수는 20건이었으나, 퇴비화 공정 음폐수의 시료 수는 총 7건으로서 계절별 성상을 통계적으로 유의미하

게 비교하기에는 다소 적었다. 후속 연구로서 사료화 및 퇴비화 공정 모두를 계절별로 충분한 시료 수를 확보하여 비교·분석한다면 재활용 공정 및 계절의 두 가지 요인에 의한 음폐수 성상 변화를 조사할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

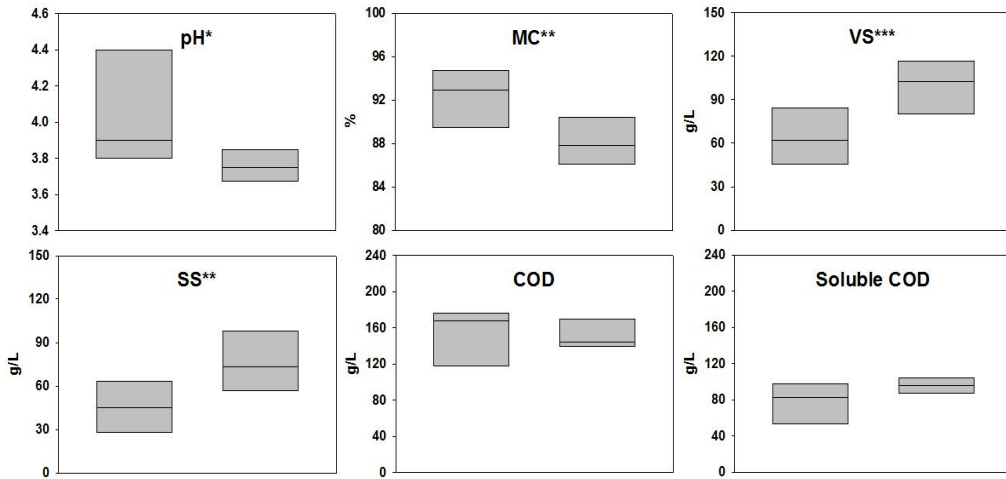
본 연구에서는 수도권매립지 반입 음폐수에 대한 장기간의 음폐수 성상 분석을 통하여 음폐수의 일반적인 특징과 음폐수 유래 공정(사료화, 퇴비화)에 따른 음폐수 성상 특징을 비교하였다. 음폐수는 유기물의 함량이 높은 폐수이며 습식 혐기소화가 가능한 범위의 함수율을 가지고 있었다. 음폐수는 산성을 띠며 비교적 높은 세부 성상(탄수화물, 단백질, 지방, 에탄올, 아세트산, 프로피온산 등)의 변화율을 나타냈다. 사료화 및 퇴비화 음폐수 성상을 비교한 결과, 평균값 기준으로 사료화가 다소 낮은 농도를 보였으나 일원분산분석에 따른 통계적 차이는 유의성이 없었다.

사사

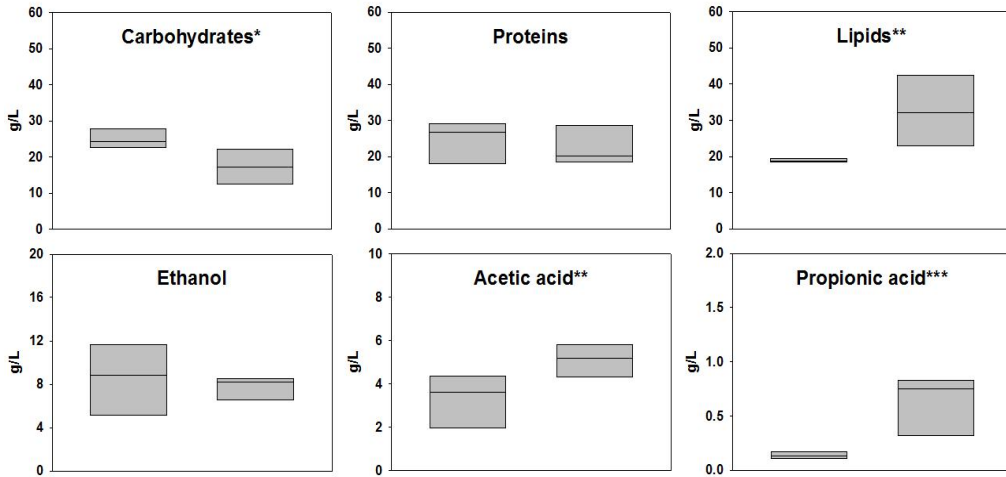
본 연구는 2015년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(NO.20144030200460). 또한, 이 논문은 환경부의 지식기반 환경서비스(폐자원에너지화) 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

References

1. [환경부, 제4차(2011~2012년) 전국폐기물 통계조사] Korea Ministry of Environment, National waste statistics survey, 4th ed., Korea Ministry of Environment, pp. 32~36. (2013).
2. [한국음식물자원화협회, 2013년 음식물류 폐기물 처리시설 설치·운영 현황] Korea Food Recycling Association, Installation and



[Fig. 3] Aggregate parameters of food waste leachate taken in winter (left) and summer (right). Number of asterisks represents the level of p value (***) < 0.01 < ** < 0.05 < * < 0.1).



[Fig. 4] Particular parameters of food waste leachate taken in winter (left) and summer (right). Number of asterisks represents the level of p value (***) < 0.01 < ** < 0.05 < * < 0.1).

operation fact sheet on food waste recycling facilities in 2013, Korea Food Recycling Association. (2014).

- [안중화, 이창수, 정명숙, 오길중, 황석환, "유기성폐기물의 통합처리 및 바이오매스 이용기술",

유기성자원학회지] Ahn, J.-H., Lee, C., Jung, M.-S., Oh, G.-J., and Hwang, S., "Co-treatment organic wastes and technologies for biomass utilization", J. of KORRA, 15(1), pp. 85~94. (2007).

4. Lee, D.H., Behera, S.K., Kim, J.W., and Park, H.-S., "Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study", *Waste Manage.*, 29(2), pp. 876~882. (2009).
5. Shin, S.G., Han, G., Lim, J., Lee, C., and Hwang, S., "A comprehensive microbial insight into two-stage anaerobic digestion of food waste-recycling wastewater", *Water Res.*, 44(17), pp. 4838~4849. (2010).
6. [이동진, 황동건, 정진, 이수영, 최익원, 박재성, 김영란, 김규연, 김기현, 오길정, "유기성폐자원의 바이오가스화에 대한 설치 및 검사 기준(안) 연구-음식물류폐기물 및 음폐수를 중심으로", 국립환경과학원] .Lee, D., Hwang, D., Chung, J., Lee, S., Choi, I., Park, J., Kim, Y., Kim, K., Kim, K., and Oh, K., A study on guideline of the construction and inspection in the bio-gasification facility of organic waste, National Institute of Environmental Research, pp. 1~30 (2013).
7. Shin, S.G., Zhou, B.W., Lee, S., Kim, W., and Hwang, S., "Variations in methanogenic population structure under overloading of pre-acidified high-strength organic wastewaters", *Process Biochem.*, 46(4), pp. 1035~1038. (2011).
8. Lee, J., Hwang, B., Koo, T., Shin, S.G., Kim, W., and Hwang, S., "Temporal variation in methanogen communities of four different full-scale anaerobic digesters treating food waste-recycling wastewater", *Bioresour. Technol.*, 168, pp. 59~63. (2014).
9. Kim, S., Bae, J., Choi, O., Ju, D., Lee, J., Sung, H., Park, S., Sang, B.-I., and Um, Y., "A pilot scale two-stage anaerobic digester treating food waste leachate (FWL): Performance and microbial structure analysis using pyrosequencing", *Process Biochem.*, 49(2), pp. 301~308. (2014).
10. [한국음식물자원회협회, 처리방법 소개] Korea Food Recycling Association, "Introduction to treatment methods", url: <http://www.kofra.org/business/02.php>, accessed date ; June 12, 2015.
11. APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater", 21st ed., American Public Health Association. (2005).
12. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., and Smith, F., "Colorimetric determination of sugars and related substances", *Anal. Chem.*, 28(31), pp. 350~356. (1956).
13. Bligh, E.G., and Dyer, W.J., "A rapid method of total lipid extraction and purification", *Can. J. Biochem. Physiol.*, 37(8), pp. 911~917. (1959).
14. Weiland, P., "Biogas production: current state and perspectives", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 85(4), pp. 849~860. (2010).
15. [신승구, 황석환, "바이오매스의 효과적 에너지 생산을 위한 신기술 전략 및 향후과제", *유기물자원화*] Shin, S.G. and Hwang, S., "Bioenergy production from biomass: technical guidelines and developmental suggestions", *J. or KORRA*, 17(2), pp. 13~18. (2009).
16. Sophonsiri, C., and Morgenroth, E., "Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters", *Chemosphere*, 55(5), pp. 691~703. (2004).
17. [박종웅, 김민철, 송주형, 임점호, "음식물쓰레기의 발생원 및 계절별 특성에 관한 연구", *한국폐기물학회지*] Park, J., Kim, M., Song, J., and Lim, J., "A study on the characteristics of food wastes according to generation source and season", *J. Korea Solid Wastes Eng. Soc.*, 18(7), pp. 595~603. (2001).

18. [안윤주, 김영미, 이은정, 권태임, 양혜원, “구리 오염토양의 생태독성학적 평가”, 대한환경공학회 2003 춘계학술연구발표회] Ahn, Y., Kim, Y., Lee, E., Kwon, T., and Yang, H., "Ecotoxicological evaluation of soils contaminated by copper", in Proceeding of Spring 2003 Symp. of Korean Soc. Environ. Eng., pp. 1444~1445. (2003).
19. [류태권, 조재구, 김경태, 양창용, 정기은, 윤준현, 최경희, “다양한 시험생물종을 이용한 산업폐수 생태독성 평가 및 원인물질 탐색”, Environ. Health Toxicol] .Ryu, T.-K., Cho, J.-G., Kim, K.-T., Yang, C.-Y., Joung, K.-E., Yoon, J., and Choi, K., "Ecotoxicity test of wastewater by a battery of bioassay and toxicity identification evaluation", Environ. Health Toxicol.25(3), pp. 207~214. (2010). 