

축산분뇨 혐기소화 잔재물의 특성 및 초지 적용성 평가

김승민 · 정웅기¹ · 성용주^{1†} · 안희권² · 김동성¹ · 윤도현¹ · 김동섭¹ · 정광화³
접수일(2014년 6월 7일), 수정일(2014년 6월 15일), 채택일(2014년 6월 16일)

Evaluation of the properties and the papermaking applicability of the residue originated from the anaerobic digestion of livestock manure

Seung Min Kim, Woong-gi Jung¹, Yong Joo Sung^{1†}, Hee-Kwon Ahn², Dong Sung Kim¹,
Do-Hyun Yoon¹, Dong-Seop Kim¹ and Hwa Gwang Jung³

Received June 7, 2014; Received in revised form June 15, 2014; Accepted June 16, 2014

ABSTRACT

Management of organic waste such as livestock manure has been considered as very important issue in terms of the environment. The anaerobic digestion of livestock manure become more attractive treatment method and has been widely applied. In this work, the properties of the residue after the anaerobic digestion of livestock manure was evaluated for providing the basic data to develop new application. The lignin and the ash contents of the residue were much higher than those of other biomass such as wood. The components of the residue were also analyzed with SEM-EDS and Elemental Analyzer. The addition of the residue into the handsheet paper resulted in the higher bulk and he higher air permeability with the loss of the strength properties. The water holding capacity of the handsheet were increased until the 40 % addition of the residue.

Keywords : Livestock manure, anaerobic digestion, chemical composition, residue.

• 천안연암대 친환경원예과 (Dept. of Eco-friendly Horticulture, Yonam College, Cheonan, Chungnam, Republic of Korea)

1 충남대학교 농업생명과학대학 환경소재공학과 (Dept. of Biobased Materials, College of Agriculture and Life Science, Chungnam Natl. Univ., Daejeon, Republic of Korea)

2 충남대학교 농업생명과학대학 동물바이오시스템과학과 (Dept. of Animal biosystem science, College of Agriculture and Life Science, Chungnam Natl. Univ., Daejeon, Republic of Korea)

3 농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과 (National Institute of Animal Science, Rural Development Administration, Suwon, Republic of Korea)

† 교신저자 (Corresponding author) E-mail : yosung17@cnu.ac.kr

1. 서론

전 세계적으로 기후변화 및 지구온난화는 더욱 심각한 이슈가 되고 있고 이에 따라 지속가능한 성장을 위하여 기존의 화석원료를 대체할 재생가능한 자원의 활용을 위한 노력들이 계속되고 있다. 특히, 유기성 폐기물의 경우 환경을 보호해야하는 측면과 자원의 활용을 위한 측면 등을 고려할 때 자원화가 더욱 절실히 요구되는 상황이기에 국내의 폐기물 관련 정책도 기존의 3R(Reduce, Reuse, Recycle) 정책에서 4R(Reduce, Reuse, Recycle, Recovery) 정책으로 전환되면서 이러한 유기성 폐기물의 자원화 관련연구가 집중적으로 수행되고 있다.¹⁻³⁾ 현재 국내에서 발생하는 유기성 폐기물은 생물유래의 자원으로 인식하여 바이오매스로 정의하고 있으며, 유기성슬러지, 음식물류폐기물, 축산분뇨 등을 들 수 있다.

현재 산업발달에 따른 인구 증가 및 서구화된 식습관에 따른 육류의 급속한 소비증가에 따라 국내의 축산업은 그 규모가 더욱 커져왔고, 이에 따라 가축분뇨의 발생도 더욱 증가되어 2012년 기준으로 연간 약 4,649만톤이 발생하였으며, 축종별로는 소 44%, 돼지 38%, 닭과 기타 가축이 18%를 차지하였다. 발생하는 가축분뇨의 약 85%는 퇴·액비로서 자원화 되고 나머지는 정화 후 방류하거나 해양 배출하였으나 2009년 1월 런던의정서 가입에 따라 2014년 이후부터 가축분뇨의 해양 배출이 전면 금지됨에 따라 향후 가축분뇨의 처리는 매우 시급한 문제가 되고 있다. 하지만 축산분뇨의 고농도 유기물질과 영양염류 등을 함유하고 있기 때문에 부적절하게 처리 및 관리 할 경우 토양 오염의 원인이 될 수 있기 때문에, 효율적 처리를 위한 다양한 방법과 기술들의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 실제 이러한 가축분뇨의 퇴비화 등을 통한 처리의 경우 처리 공간에서 발생하는 악취 등 여러 가지 문제의 소지를 가지고 있고 실제 혐기소화 기술을 통해 바이오가스를 생산하는 경우 가축분뇨 1톤당 약 36~206 kg의 온실가스를 저감하는 효과를 기대할 수 있기 때문에 국내외에서는 축산분뇨의 처리를 위한 방법으로 혐기성 소화기술에 대한 관심과 상용화가 지속적으로 증가되고 있다.^{1,3,4)}

실제로 이러한 혐기소화방식에서 축산분뇨는 유기

물의 분해, 안정화 시키는데 필요한 가수분해단계, 산성성단계, 메탄생성단계로 구성되어 있는 혐기소화과정을 통해 슬러지 형태로 전환되고 이러한 슬러지는 추가적인 퇴비화 공정을 통해 안정화되어 농작물의 비료나 토양개량제로서 활용될 수 있다.⁵⁾ 그러나, 실제 축산분뇨 잔사의 퇴비화 공정 등은 상당한 시간과 공간을 필요로 하며 퇴비화과정 중에 발생하는 악취 등으로 많은 민원의 발생의 원인이 되는 등 현장적용에서 많은 제약을 가지고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 많은 관심을 받지 못했던 축산분뇨의 혐기성 소화 잔재물의 화학적 특성 등을 조사하고 이러한 잔재물의 다양한 활용방안을 고려하여 퇴비화과정 없이 활용할 수 있는 방안을 구축하기 위한 기반자료를 확보하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시 재료

본 연구에서는 톱밥갈래가 포함된 젖소 분뇨를 반건식 혐기성소화공정을 통해 바이오가스를 생산하고 혐기성 소화공정 후 잔류되는 잔재물을 시료로 사용하였다. 이 소화 잔재물은 실험실 조건의 반건식 혐기성소화조(SCFMR) 용적 10L, 운전 온도 35℃, 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)이 40일의 조건에서 생성된 잔재물이며, 바이오가스의 발생량이 약 0.8 - 1 v/v-d 정도였다. 또한 발생된 잔재물은 농도는 약 6% 이었으며, 화학적 분석 및 중이에 적용하기 위해 실험용 건조기에 105℃로 건조하여 사용하였다.

수초지 제조에 사용한 펄프는 D사에서 분양받은 골판지 원지(OCC, Old Corrugated Container)를 재해리하여 사용하였고, 칩엽수 미표백펄프(UKP, Unbleached Kraft Pulp)를 해리 및 고해하여 여수도 600 ml CSF로 조정하여 사용하였다.

2.2 축산 분뇨 혐기성 소화 잔재물의 이화학적 특성 평가

2.2.1 축산 분뇨 혐기성 소화 잔재물의 화학 조성 분석

본 연구에서는 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 특성

을 알아보기 위한 성분분석은 TAPPI 표준분석법에 의거하여 회분(T211 om-02), 냉·온수 추출(T207 cm-99), Al-ben 추출(T204 cm-97)을 실시하였는데 유기용매 추출의 경우 온수추출 후 잔사를 적용하여 실험을 실시하였다. 또한 Klason Lignin(T222 om-98)과 홀로셀룰로오스의 함량을(T204 cm-99) 분석하였다. 또한 SEM EDS(Scanning Electron Microscope Energy Dispersive Spectroscopy, JEOL, JSM-7000F)를 통한 원소분석 및 자동원소분석기(Automatic Elemental Analyzer, Flash EA 1112 series)를 사용하여 유기원소 분석을 실시하였다.

2.2.2 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 형태적 특성 평가

배출된 축산분뇨 혐기성소화 잔재물의 형태적 특성을 알아보기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope, JSM-7000F)를 사용하여 이미지 분석을 실시하였다. 이미지 분석에 사용한 시료는 초지공정에 적용을 위하여 건조한 소화잔재물을 분쇄기를 사용하여 분쇄한 후 60-100mesh로 분급하여 조제한 입자의 형태적 특성을 평가하였다.

2.2.3 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 열분해 특성 평가

축산 분뇨 혐기성소화 공정 조건 중 TS(Total Solid)는 혐기성소화조에 들어가는 분뇨의 고형분 함량을 의미하며 각 축산분뇨의 고형분 함량에 따라 바이오가스 발생량이 각각 다르게 나타나며 이러한 경우에 각각의 소화잔재물의 성분 특성도 다르게 나타날 것으로 판단된다. 각 소화잔재물의 특성을 비교평가하기 위하여 열분해 특성을 실시하였다. 열분해 특성 비교평가에는 소화잔재물은 TS 13, 17%의 조건으로부터 바이오가스를 0.95, 0.84 v/v-d 발생시킨 후 각각 잔류한 잔재물을 시료로 사용하였고, 열분석기(Thermal Analyzer, TGA/DSC 1)를 사용하여 열분해 특성을 비교 분석하였다.

2.3 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 수초지 적용 특성평가

2.3.1 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물 적용 수초지 제조

축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 분쇄물을 적용하여 실험실용 수초지를 사용하여 수초지를 제조하였다. 이때 사용한 펄프는 OCC와 UKP를 중량비 7:3으로 혼합하여 사용하였고, 미세입자들의 보류를 위해 보류제로써 양이온성 PAM 0.1%를 사용하였으며, 건조지력을 향상시키기 위하여 양성 전분 1% 투입하였다. 또한 수분에 의한 강도 저하 등을 조절하기 위하여 예폭시 수지 1%를 투입하여 수초지를 제조하였다. 축산 분뇨 혐기성 소화 잔재물은 수초지의 충전제로써 10, 20, 30, 40, 50%를 첨가하였으며, 잔재물의 입자 크기는 60-100mesh의 크기로 분급하여 사용하였다.

2.3.2 수초지 적용에 따른 특성 평가

축산분뇨 소화 잔재물의 적용을 통한 수초지의 구조적 특성을 파악하기 위하여 잔재물의 함량에 따른 벌크 및 투기도를 측정하였고, 제조된 수초지의 활용성을 고려하여 수초지의 기본적인 강도적 특성 변화를 평가하기 위하여 인장강도(T231 cm-85)와 파열강도(T403 om-02)를 측정하였다. 또한 축산분뇨 소화 잔재물을 수초지에 적용함에 따른 광학적 특성을 평가하고자 사진 이미지로 나타내었으며, 잔재물의 함량에 따른 백색도를 측정하였다.

한편 축산 분뇨 혐기성 소화 잔재물은 주로 퇴비로 사용되기 때문에 수초지에 적용할 경우 멀칭용지로 사용되기에 적합한 특성을 가지고 있다. 따라서 소화잔재물을 적용한 수초지의 멀칭용지로서 기본적인 특성을 알아보기 위하여 소화잔재물의 함량에 따른 보수성 실험을 실시하였다. 소화잔재물의 함량에 따른 수초지를 증류수에 1시간 침지한 후 24시간 동안 지퍼백 안에 밀봉하여 보관하였고, 각각 수초지의 수분함량을 동일하게 하고자 하였다. 준비된 시료는 함수율 측정기를 사용하여 40℃의 조건에서 건조하면서 수분 손실율을 측정하였고, 이를 통해 보수성을 파악하고자 하였다.⁶⁾

3. 결과 및 고찰

3.1 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 구성성분 및 원소 분석

토양에 퇴비로 사용되는 식물성 유기물질은 시간에 따라 분해되는데 식물의 구성성분 중에서 헤미셀룰로

Table 1. Chemical composition of the residue originated from the anaerobic digestion of livestock manure

	Hot water extract	Alcohol-benzene extract	Klason Lignin	Holo-Cellulose	Ash
Content (%)	12.73	1.92	26.38	38.98	19.98

Table 2. Organic elements in the residue originated from the anaerobic digestion of livestock manure

Element	N	C	H	S
Content (%)	2.33	43.28	5.63	0.34

오스, 셀룰로오스, 리그닌 순으로 분해되며 분해속도는 리그닌의 함량에 따라 달라진다.⁷⁾ 본 연구에서는 톱밥 깔개와 혼합된 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 기본 구성성분을 알아보고, 퇴비로써 어떤 영향을 끼치는지 파악하고자 하였다. 연구에 사용된 소화 잔재물은 약 20% 정도의 무기물을 포함하고 있으며, 리그닌 함량이 25% 이상으로 높은 함량을 가지고 있는 것으로 나타났다.⁸⁾

작물의 성장과 관련된 필수 원소는 16종이며 C, H, O, N, P, K, Ca, Mg의 9종과 미량원소는 Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Cl로 총 7가지의 원소로 분류된다. 축산분뇨는 주로 퇴비로 활용되고 있는데 축산분뇨에는 N, P,

K 그리고 미량 원소인 Ca, Mg, Zn 등의 성분을 함유하고 있어 좋은 비료자원이라고 할 수 있다고 보고되었다.⁹⁾ 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물도 퇴비화되어 넓게 활용되고 있기 때문에 화학 조성 및 원소 분석을 통해 정확한 잔재물의 화학적 특성을 파악하고자 하였다.

축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 화학적 분석결과를 Table 1에 나타내었으며, EDS 및 자동원소분석기를 통한 원소분석 결과는 Table 2, 3에 나타내었다. 분석 결과 소화 잔재물의 주 원소는 유기 원소인 C가 주를 이루고 있으며 N, S도 소량 포함하고 있다. 또한 무기원소인 P, Mg, K, Ca, Cl 등을 소량 포함하고 있는 것으로 확인되었다.

따라서 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물을 퇴비나 멀칭용지로 사용될 경우 리그닌 함량이 높아 분해속도가 낮아 토양에 오래 잔류 될 것으로 판단되며, 각종 무기 원소를 포함하고 있어 농업용으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 3. Inorganic elements in the residue originated from the anaerobic digestion of livestock manure measured with SEM-EDS

Element	P	Cl	K	Ca	Mg
Weight (%)	2.43	1.88	3.52	3.99	1.48

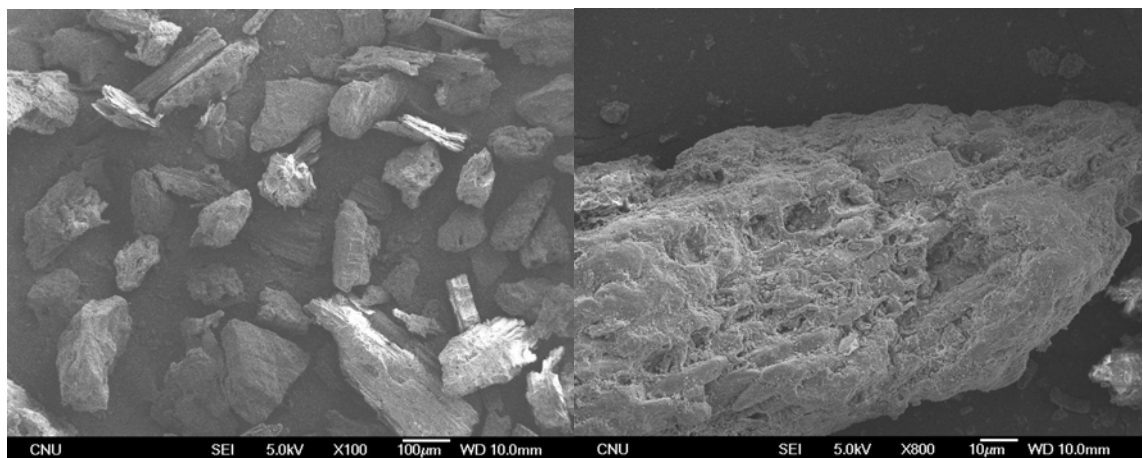


Fig. 1. The shape of the residue originated from the anaerobic digestion of livestock manure measured with SEM.

3.2 축산분뇨 혐기성소화 잔재물의 형태적 분석

축산분뇨 혐기성소화 잔재물의 형태적 특성을 파악하기 위하여 SEM 이미지를 분석하였다. 톱밥을 깔개가 포함된 축산분뇨이기 때문에 톱밥 입자와 소화 잔재물의 입자가 같이 포함되어 있었으며, 소화 잔재물의 입자 형태는 불규칙한 형태를 나타내었다. 이러한 불규칙한 입자 형태 및 사이즈는 분쇄 방법에 의해 달라질 것으로 판단되며, 멸칭용지에 적용될 경우 분쇄 방법에 따른 종이 특성이 달라질 것으로 생각된다.

3.3 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 열분해 특성

축산분뇨 혐기성 소화 잔재물의 TS에 따른 열분해를 실시하여 Fig. 2에 나타내었다. TS 13% 조건에서 혐기성소화한 잔재물은 200℃부터 분해를 시작으로 800℃에서 37%로 감소하였으며 TS 17%의 경우 800℃에서 35%로 감소하였다. TS가 다른 두 가지 조건으로 혐기성 소화한 잔재물들은 바이오가스 발생량 등의 차이가 나타나지만 열분해 평가에서는 유사한 열분해 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물 함량의 따른 구조적 특성

소화 잔재물 적용에 따른 종이의 구조적 변화를 알아보고자 벌크 및 투기도를 측정하였고, 결과는 Fig. 3

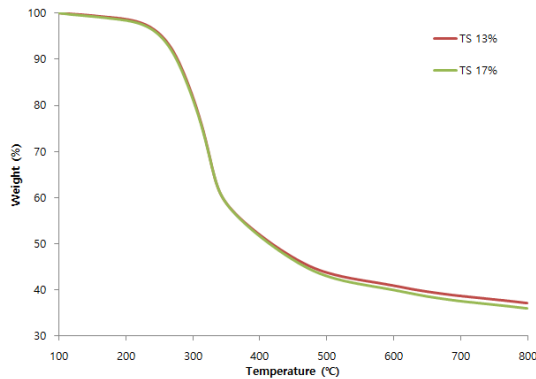


Fig. 2. Thermogravimetric analysis of the residues depending on the condition of the anaerobic digestion of livestock manure.

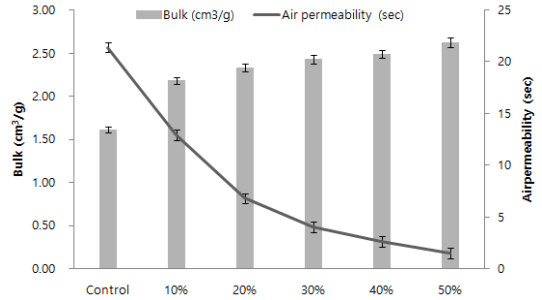


Fig. 3. The change in bulk and air permeability of handsheets depending on the contents of the residues.

에 나타내었다. 소화 잔재물 적용함으로써 벌크가 급격히 증가하였으며, 소화잔재물의 함량이 증가할수록 벌크가 소폭 상승하는 것으로 나타났다. 투기도는 소화 잔재물의 함량이 증가할 때마다 급격하게 증가하는 것으로 나타났다.

3.5 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물 함량의 따른 강도적 특성

축산분뇨 혐기성소화 잔재물의 종이 적용을 통한 종이 기본 강도적 특성을 평가하였다. 잔재물의 투입량을 0-50%로 각각 적용하여 수초하였으며, 인장강도, 파열강도를 측정하였고, Table 4에 나타내었다. 인장강도와 파열강도는 잔재물의 함량이 증가함에 따라 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

3.6 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물 함량의 따른 광학적 특성

축산분뇨 혐기성소화 잔재물의 적용 함량에 따른 광

Table 4. The changes in Tensile strength and Burst strength of handsheets depending on the contents of the residues

Contents of Residue (%)	Tensile strength (KN/m)	Burst strength (kPa)
Control	4.7	245.5
10%	3.5	185.4
20%	2.8	151.7
30%	2.5	127.4
40%	1.9	110.8
50%	1.4	77.2

Table 5. The changes in ISO brightness of handsheets depending on the contents of the residues

Residue content	ISO Brightness
Control	28.22
10%	26.47
20%	25.07
30%	23.94
40%	21.53
50%	19.23

학적 특성을 파악하기 위하여 사진 이미지 및 백색도의 변화를 Table 5에 나타내었다. 짙은 색을 가지고 있는 소화잔재물의 함량이 증가함에 따라 백색도가 감소하는 것을 알 수 있었다.

3.7 축산분뇨 혐기성 소화 잔재물 함량의 따른 보수성 특성

소화 잔재물의 함량을 10-50%로 다르게 적용한 수초지의 보수성을 수분손실율로 Fig. 4에 나타내었다. 대조구와 비교하여 소화 잔재물 10, 20% 적용한 수초지는 함량에 따른 벌크의 증가로 인해 높은 보수성을 나타나는 것으로 확인 되었으나, 30, 40% 고함량 수초지의 경우에는 보수성이 낮아지는 것을 볼 수 있는데 이는 상대적으로 리그닌 등의 함량이 높은 소화 잔재물이 OCC와 UKP와 같은 천연섬유에 비해 낮은 친수성을 가지고 있기 때문인 것으로 판단되었다.

4. 결론

축산분뇨의 처리 및 자원화는 환경적인 이슈로 인해 매우 중요한 사안이 되고 있다. 본 연구에서는 이러한 축산분뇨의 혐기성 소화 후 잔류하는 잔재물의 특성 및 활용성을 평가하여 보았다. 현재 혐기성 소화 공정 후에 발생하는 잔재물은 주로 퇴비화 등의 안정화 과정을 통해 폐기되고 있지만 소화 잔재물의 활용성 강화를 위한 구체적인 특성에 대한 연구들은 이루어지지 않은 실정이다.

갈개를 포함하는 유우 축산분뇨 혐기성 소화 후 얻어진 소화 잔재물은 상대적으로 높은 리그닌 함량을 가지고 있었으며, C, O, P, K 등의 유, 무기원소를 포함하고 있었다. 혐기성 소화 공정 조건에 따른 영향을 파악

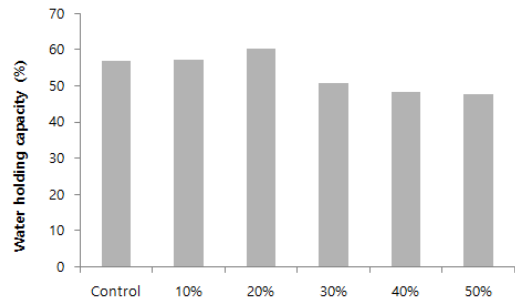


Fig. 4. The changes in water holding capacity of handsheets depending on the contents of the residues.

하고자 각각의 서로 다른 혐기성 소화공정 후 얻어진 시료의 열분해 분석을 실시하였으나, 공정 조건에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다.

축산 분뇨 소화 잔재물의 활용성을 알아보기 위해 수초지에 충전하여 그 영향을 비교 평가하였다. 본 실험에 사용한 소화잔재물은 분쇄 후 60 ~ 100mesh로 분급하여 사용하였으며, 10, 20, 30, 40, 50 %로 충전 함량을 달리하여 수초하였다. 구조적으로 충전함량이 증가할수록 벌크가 증가하였으며, 투기도도 향상되는 것을 확인하였고, 강도적으로는 인장강도 및 파열강도가 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 또한 충전 함량에 따른 백색도가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한 충전 함량이 증가할수록 벌크하기 때문에 보수성이 증가하지만 40% 이상으로 충전할 경우 보수성이 점차 감소하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 2013년 국가농업 R&D 어젠다 연구개발 사업(과제번호: PJ009864022013)의 지원에 의해 이루어졌습니다.

Literature Cited

- Kim, B. E., Treatment of livestock waste by anaerobic digestion and use of an aquatic plant system ensuring low-carbon green growth, Journal of Research Institute for Gangwon 2(1):35-54 (2011).
- An, J. H., Anaerobic digestion using organic waste(wa-

- ter), Autumn scientific meeting of Korean Society of Environmental Engineers 150-154 (2007).
3. Oh, S. U., Organic waste of energy production in anaerobic technology trends and revitalization, *Journal of KORRA* 18(1): 24-37 (2010).
 4. Lee, J. S., Jo, J. H., Kim, T. I., Woo, J. J., Lee, B. C., Park, K. J., Song, H. W., Livestock manure treatment using anaerobic digestion and clean bio-energy production, Autumn scientific meeting of Korea Society of Waste Management 328-331 (2011).
 5. Kim, N. C., Yu, K. Y., An, J. W., Kim, Y. J., Heo, K., Jung, Y. G., Bea, J. G., Principles and applications of Bio gasification technology by anaerobic digestion process, *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association* 10(1):7-23 (2002).
 6. Jung, W. K., Sung, Y. J., Change in the functional properties of mulching paper by the addition of inorganic materials, *Journal of Korea TAPPI* 45(6):64-71 (2013).
 7. Sommerfeldt, T. G., Chang, C., Entz, T., Long-term annual manure applications increase soil organic matter and nitrogen, and decrease carbon to nitrogen ratio, *Soil Sci. Soc. Am. J* 52(6):1668-1672 (1988).
 8. Yun, H. B., Lee, Y., Yu, C. Y., Lee, S. M., Hynu, B. K., Lee, Y. B., Effect of crude carbohydrate content in livestock manure compost on organic matter decomposition ratio in upland soil, *Korean Journal of Soil Science Fertilizer*, 40(5):364-368 (2007).
 9. Kim, Y. K., Phae, C. G., Choi, H. K., Kim, S. M., Hwang, E. Y., Physical and chemical analysis of organic wastes for the establishment of total management system, *Journal of Department of Environmental Engineering* 13(1):100-114 (2005).