

퇴비단 여과재 구성에 따른 혐기소화액 여과 효과

이동현¹ · 정광화^{1*} · Modabber Ahmed Khan¹ · 김중곤¹ · 박정훈¹ · 안희권² · 김은종²

¹농촌진흥청 국립축산과학원, ²충남대학교

A Study on Filtration Effect of Anaerobic Digestion Wastewater by Composition of Filtration Layer Materials

Dong-Hyun Lee¹, Kwang-Hwa Jeong^{1*}, Modabber Ahmed Khan¹, Jung-Gon Kim¹, Jung-Hun Kwak¹, Heekwon Ahn², Eun-Jong Kim²

¹National Institute of Animal Science, R.D.A., Suwon, Korea, ²Department of Animal Biosystems Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT

This study was carried out to compare the filtration effect of anaerobic digestion waste water by compost filtration bed. Three types of filtration systems were set for filtration test following to composition of bedding materials. Two filtration systems were filled with sawdust, rice-hull and wood-chip. And the other was filled with sawdust and rice-hull. Anaerobic digestion waste water was applied evenly on the surface of the filtration bed with spraying nozzle. The concentration of nitrogen, biochemical oxygen demand (BOD), suspended solids (SS) of anaerobic digestion waste water was decreased by filtration treatment. The total nitrogen content was decreased from 1,313 mg/L to 1,090~1,293 mg/L and BOD concentration was decreased from 529.7 mg/L to 125~162.3 mg/L, respectively. The SS content was decreased from 69~79% by filtration process. In addition, the electrical conductivity (EC) was decreased from 10.22 ds/m to 7.91~8.31 ds/m.

(Key words : Anaerobic digestion waste water, Filtration, Liquid fertilizer, Pig slurry)

서 론

우리나라 전체 농림산업에서 발생하는 소득액을 기준하여 볼 때 축산업이 차지하는 비율이 꾸준히 증가하여 2012년에는 전체 농업분야 소득액의 약 40.3%를 차지할 정도로 그 산업적 규모가 커지는 추세에 있다. 축산

업 규모의 확대에 의해 가축 사육두수도 늘어나고 있고 이에 따라 가축분뇨의 발생량 또한 증가하고 있다. 지난 2012년 기준으로 총 46,489천 톤의 가축분뇨가 발생하였으며 이 분뇨 중의 81%에 달하는 36,656천 톤이 퇴비화에 의해 처리되었고 7.7%에 해당하는 3,580천 톤은 액비화 방법에 의해 처리되었

Corresponding author : Kwang-Hwa Jeong, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-706, Korea. Tel: +82-31-290-1732, E-mail: gwhaju@korea.kr

2013년 8월 27일 투고, 2013년 9월 18일 심사완료, 2013년 9월 23일 게재확정

다. 발생한 전체 분뇨 중의 88.7%가 퇴·액비화 등의 자원화 방법에 의해 처리된 것이다(농식품부, 2013). 현재 우리나라 가축분뇨 처리관련 방침은 가능한 한 최대한 자원화 한다는 것이다. 가축분뇨 자원화 방법에는 퇴·액비화 외에도 바이오 가스화에 의한 에너지화 방법이 있는데 최근 들어서 국내에서도 이 에너지화 방법에 대한 관심과 투자가 늘어가고 있다. 가축분뇨 바이오가스화는 가축분뇨 처리와 에너지 획득이라는 일거양득의 장점이 있어서 그 효용가치가 높다고 할 수 있다. 그러나 현재 우리나라의 가축분뇨 바이오가스화는 수분함량이 97% 내외인 돈분뇨 슬러리를 주 대상으로 하고 있는 관계로 바이오가스화 후에 배출되는 소화폐액의 처리에 많은 노력이 투입되고 있는 실정이다. 현재 기술로서는 소화폐액을 정화처리하거나 액비화 처리하는 방법을 적용하고 있지만 최근 들어서 액비화에 의한 소화폐액 처리에 대한 연구(Albuquerque et al, 2012)와 경작지 환원 관련기술에 대한 관심이 높아진 상황이다(Kim et al, 2011; Kim et al, 2011). 하지만 혐기소화 과정에서 탄소가 많이 소모된 상태의 소화폐액을 처리하는 경우 생물학적 영양 밸런스가 맞지 않아 액비화 처리에 어려움이 있고 특히 정화처리의 경우 부족한 탄소원 보충이 필요하므로 폐수처리의 어려움이 더하다. 이런 문제에 대한 대안으로서 2단 여과 방법에 의한 가축분뇨 혐기소화액 여과 연구가 수행된 바 있다(Xia et al, 2012). 그러나 바이오가스를 생산한 후 발생하는 소화폐액을 처리하는데 있어 퇴비단 여과단의 구성에 따른 여과효과에 대한 연구는 아직까지 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 여과단을 구성하는 재료와 여과단 구성방법이 돈분뇨 슬러리 혐기소화 폐액의 여과효율에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

퇴비단 여과상 구성을 위하여 두께 10 mm 인 아크릴 재질의 평판으로 가로 1,000 mm, 세로 2,000 mm, 높이 1,800 mm 크기의 장방형 시험기를 제작하였다. 시험기의 형태는 아래 바닥 면과 네 방향의 측벽 면은 밀폐하였고 상층부는 개방된 상태로 하였다. 하층 면에는 여과액 배출구와 공기공급관 설치를 위한 밀폐공간을 설치하였다. 이 공간은 시험기 맨 밑바닥을 이루는 바닥 면으로부터 상부 100 mm 높이에 추가로 설치한 평판에 의해 형성되었으며 이 평판에는 직경 3 mm의 원형 구멍을 2 열로 하여 총 40개의 구멍을 천공함으로써 퇴비단 여과상을 통과한 여과액이 상기 밀폐공간으로 수집될 수 있도록 하였다. 여과재의 구성에 따른 여과효과를 조사하기 위해 3 조의 시험 장치를 설치하여 톱밥과 왕겨, 톱밥과 왕겨 그리고 목편을 충전하였다. 여과상의 실제 유효높이는 1200 mm로 하였으며 그 구성은 Table 1에 수록된 바와 같다.

Table 1. Composition of the filtration layer of filtration bed.

(Unit : mm)

Item	T 1	T 2	T 3
Sawdust	300	300	300
Rice-hull	900	700	600
Woodchip	—	200	300

Table 1과 같이 톱밥(300 mm)과 왕겨(900 mm) 만으로 구성한 시험 1구(T 1)와 톱밥과 왕겨 그리고 우드칩을 각각 300, 700, 200 mm 높이로 구성한 시험 2구(T 2) 그리고 300, 600, 300 mm 수준의 높이로 구성한 시험 3구(T 3)로 구분하여 시험을 수행하였다. 본 시험의 수행을 위하여 제작된 시험 장치

에 공기를 상향식으로 공급하기 위하여 링-블로어를 설치하였으며 투입되는 공기공급량을 조절할 수 있도록 각각의 시험장치의 공기 공급관에 면적식 유량계 (0~300 m³/min)를 설치하였다. 시험기의 하단 여과액 배출구에는 전동식 볼-밸브를 설치하여 공기 공급 시에는 밸브가 자동으로 닫히게 함으로써 시험기 내로 유입시킨 공기가 외부로 유출되는 것을 막을 수 있도록 하였다. 공기공급량은 시험용 여과상 1 m³당 50 L/min 수준으로 조

절하였다. 본 연구에서 사용된 시험용 퇴비단 여과상에 투입하는 돈분뇨 슬러리 혐기소화 폐액은 1일 2회, 투입량은 시험용 여과상 1 m³당 50 L/min 수준으로 조절하였다. 혐기소화 폐액은 펌프 가압방식으로 여과상 상부에 설치된 노즐까지 이송된 후 압력에 의해 여과상 표면에 고르게 살수될 수 있도록 소화조를 구성하였다. 본 시험을 위하여 제작한 시험장치의 구조를 Fig. 1에 도시하였다. 시험과정에서 수집된 여과액은 채취하는 즉시 실험실로 이송하여 수질오염공정시험법에 준하여 분석하였다.

결과 및 고찰

퇴비단 여과상의 매질을 톱밥 위주로 조성한 기존의 실험용 여과상의 경우에는 충전된 톱밥의 밀도 (250 kg/m³, 수분함량 35% 내외) 때문에 살수된 혐기소화 폐액중의 유기물이 여과상 상층부에 고착되는 데에 기인하여 퇴비단 여과상 상층부의 톱밥 부식정도가 더 높은 것으로 조사되었다. 톱밥 위주의 퇴비단 여과상을 이용하여 돈분뇨 슬러리 혐기소화 폐액을 여과한 기존의 여과상 단면은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 Fig. 2에서 볼 수 있는 여과상 상층부에서만 부식발생 문제를 해소하

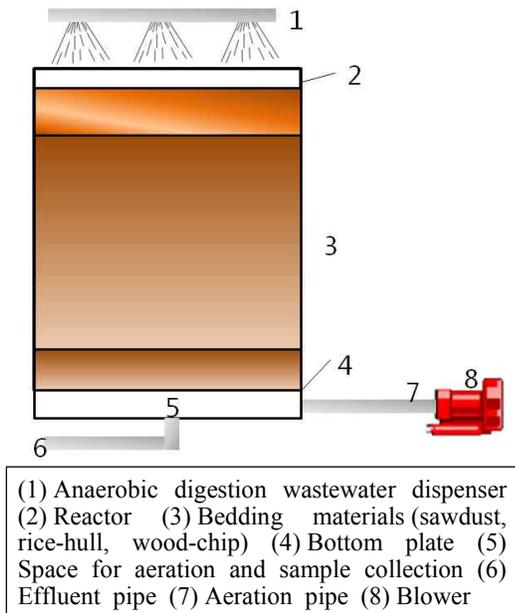


Fig. 1. Schematic diagram of the filtration system.



Fig. 2. Compost filtration layer after 1 year.

고 여과상 이용효율을 높이기 위하여 톱밥과 왕겨 그리고 목편을 여과재로 조합한 시험용 여과상을 이용하여 돈분뇨 슬러리 혐기소화 폐액 여과시험을 6주간 수행하고 그 결과를 분석하였다.

1. 여과상 운영에 따른 EC 변화

유기물질이 부속 되어가는 과정에서 H^+ , OH^- , K^+ , Cl^- , NH_4^+ , NO_3^- 등을 포함한 여러 종의 이온의 분포정도에 따라 EC 값이 결정되어진다. 기존의 연구결과에 의하면 혐기소화 과정에서의 EC는 암모늄태 질소 (NH_4-N) 생성과 미생물 분해로 인한 중성이온의 배출로 인해 상승하는 것으로 보고된 바 있다(Mahimairajia et al, 1994; Fang and Wong, 1999). 본 시험에서도 혐기소화 과정 중에서 수거한 혐기소화 폐액의 EC 값은 상기 연구자들의 보고와 유사한 결과를 보였다. 이 혐기소화 폐액을 퇴비단 여과상을 이용하여 여과하였을 경우, 투입한 혐기소화 폐액 대비 여과수 중의 EC 값이 전체적으로 낮아지는 결과를 얻었다. 혐기소화 폐액에서 10.22 dS/m 수준이었던 EC는 T 1에서는 8.31 dS/mAvr로 T 2에서는 8.19 dS/mAvr로 그리고 T 3에서는 7.91 dS/mAvr로 각각 낮아지는 결과를 보였다. 여과작용에 의한 EC 저하 현상은 시험기간 동안 지속적으로 유지되었다. Fig. 3은 혐기소화 과정에서 발생하는 혐기소화 폐액과 여과시험구 처리별 여과수의 EC 변화를 도식화한 결과이다.

일반적으로 EC가 너무 높으면 염류장애 등 작물 생육에 좋지 않은 영향을 미치므로 본 시험에서 수행한 여과작용에 의해 EC 값이 낮아지는 것은 혐기소화 폐액의 액비화 처리에 있어 바람직한 결과로 볼 수 있다.

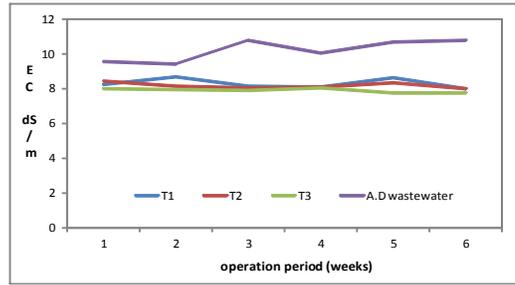


Fig. 3. Variations of EC during operational period.

2. 여과상 운영에 따른 pH 변화

혐기소화에 있어서 적절한 산도는 pH 7 내외의 중성이다. 본 시험에서도 혐기소화 폐액의 pH는 혐기소화 기간이 경과함에 따라 중성으로 접근하는 추세를 보였다. 이 혐기소화 폐액을 여과처리 시험구를 통과시킴에 따라 pH가 전체 처리구에서 공히 낮아지는 결과를 보였다. 혐기소화 폐액에서 7.65 수준이었던 pH는 T 1에서는 6.21_{Avr}로 T 2에서는 6.36_{Avr}으로 그리고 T 3에서는 6.19_{Avr}로 각각 낮아지는 결과를 얻었다. Fig. 4는 혐기소화 과정에서 발생하는 혐기소화 폐액과 여과시험구 처리별 여과수의 pH 변화를 도식화한 결과이다.

여과작용에 의한 pH 저하 현상은 시험기간 동안 지속적으로 유지하는 추세를 보였다. 여과액의 pH가 소화폐액에 비해 낮은 이

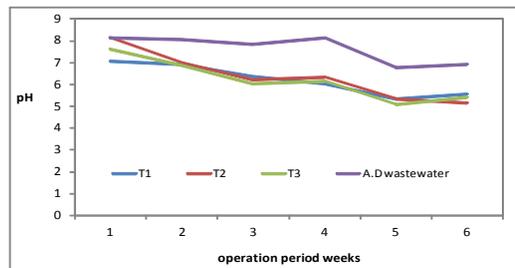


Fig. 4. Variations of pH during operational period.

유는 유기물 중에 포함되어 있던 질소 함유 물질의 분해로 인해 존재하던 NH_4^+ 농도가 여과 작용에 의해 낮아진데 기인한 것으로 판단된다. 기존의 연구결과에 따르면 혐기소화 과정에서 NH_4^+ 가 생성되어 pH를 높이는 결과를 나타낸다고 하였다 (Wong et al, 2001; S'anchez-Monedero et al., 2001). 특히 가축분뇨를 혐기소화할 경우 NH_4^+ 등의 축적에 의해 혐기소화조 내에 높은 알칼리도가 유지되는 경향이 있다. 토양의 산도에 따른 작물생육 정도는 작물의 종류에 따라 다르기는 하지만 통상적으로 pH 5~7.5 사이에서 원활히 성장하므로 여과상에서 배출된 여과액을 액비로 사용하는데 pH 문제는 없는 것으로 볼 수 있다.

3. 여과상 운영에 따른 BOD 농도 변화

유기 탄소화합물의 생물학적 분해 정도를 나타내는 지표인 BOD는 혐기소화에서의 유기물 부하와 관련된 중요한 운영요소이다. 혐기소화 과정에서 대부분의 BOD 유발물질이 제거되지만 일부는 분해되지 않고 혐기소화 폐액에 함유되어 소화조 외부로 배출되어진다. 본 시험에서는 혐기 소화조로 투입되는 돈분의 유기물 농도 및 성상에 따라 혐기소화를 거쳐 나오는 소화폐액의 BOD 성상도 다른 양상을 보였다. 이 혐기소화 폐액을 여과상에 살포하였을 경우 여과단을 통과한 여과액 중의 BOD 농도는 유입되는 혐기소화 폐액의 BOD 농도 변화와 비슷한 패턴을 보이며 낮아졌다. 여과작용에 의한 BOD 저하 현상은 시험기간 동안 지속적으로 유지되었다. 퇴비단 여과와 같이 중력을 이용한 하향류식 여과법은 여과재 입자 크기와 투입되는 유기물 농도에 따라 여과율이 영향을 받는다 (Xia et al. 2012). Fig. 5는 혐기소화 과정에서

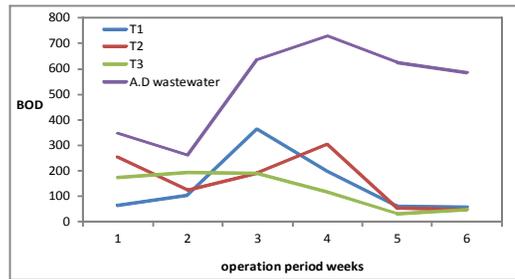


Fig. 5. Variations of BOD during operational period.

발생하는 혐기소화 폐액과 여과 시험구 처리별 여과수의 BOD 농도 변화를 도식화한 결과이다.

퇴비단 여과에 의한 BOD 농도변화를 분석한 결과 혐기소화 폐액에서 529.7 mg/L 수준이었던 BOD가 T 1에서는 141, T 2에서는 162.3, 그리고 T 3에서는 125.3 mg/L 수준으로 각각 낮아지는 결과를 보였다.

4. 여과상 운영에 따른 SS 농도 변화

돈분뇨 중의 유기물에는 분해 가능한 고형물 농도가 높게 함유되어 있다. 축산업 현장에서 사용되는 돼지 사료는 인산칼슘이나 탄산칼슘, 석회석 등의 분해되지 않는 고형물 소량과 사료 주요성분인 옥수수 등의 곡물에 포함된 회분 외에는 대부분이 분해가 가능한 유기물로 구성되어진다. 따라서 소화과정을 거친 돼지분뇨라 하더라도 분해성 유기 고형물의 함량은 어느 정도 높게 유지된다고 볼 수 있다. 혐기소화 도중에 이러한 유기물은 분해과정을 거치게 되는데 기존 연구결과에 의하면 돈분뇨 슬러리가 혐기소화를 거치면서 TS 농도가 약 70~80% 감소된다고 하였다 (Lorimor 2000). 본 실험에 쓰인 소화액의 SS 농도는 평균 3,289 mg/L 이었지만 퇴비단 여과상을 거치며 T 1, T 2, T 3에서 각각 79%_{Avr}, 73%_{Avr}, 69%_{Avr}의 SS 농도가 감소하였다. Fig.

6은 혐기소화 과정에서 발생하는 혐기소화 폐액과 여과시험구 처리별 여과수의 SS 농도 변화를 도시한 결과이다.

퇴비단 여과에 의한 SS 농도변화를 분석한 결과 혐기소화 폐액에서 3,289.3 mg/L 수준이었던 SS 농도가 T 1에서는 691.7, T 2에서는 891.7, 그리고 T 3에서는 1,025 mg/L 수준으로 각각 낮아지는 결과를 보였다. 여과작용에 의한 SS 저하 현상은 시험기간 동안 지속적으로 유지되었다. SS 여과율은 퇴비단 여과상 내에서 차지하는 목편층이 두꺼운 구성일수록 더 낮아지는 결과를 보였다.

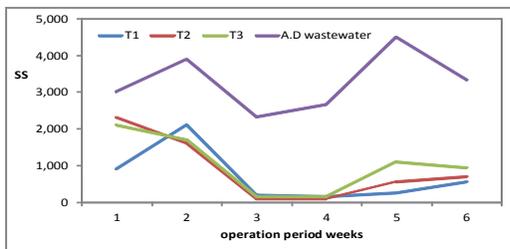


Fig. 6. Variations of SS during operational period.

5. 여과상 운영에 따른 질소의 변화

유기물 중에 포함된 질소는 산화과정을 거치면서 암모니아성 질소를 거쳐 최종적으로는 NO₃⁻-N의 형태를 나타내게 된다. 질소는 공기 유무의 여부나 pH 또는 온도에 따라 NH₃-N이나 NH₄⁺-N 형태 또는 NO₂⁻-N 또는 NO₃⁻-N 형태 등 여러 형태로 존재하게 된다. 유기물의 혐기소화에서 NH₄⁺-N 농도가

3,000 mg/L 이상이면 혐기소화균에 대한 독성요소로 작용한다 (Hong and Bae, 1997). 본 시험에서는 혐기소화액에 포함된 총질소 1,313 mg/L 중 785 mg/L가 NH₄⁺-N이고 166 mg/L가 NO₃⁻-N의 형태를 가짐으로써 질소로 인한 알칼리도가 혐기소화에 미치는 독성 영향은 거의 없다고 볼 수 있다. 퇴비단 여과상을 거치면서 나타난 각 처리구별 질소의 변화형태를 Table 2에 수록하였다.

퇴비단 여과상을 거치고 난 여과액의 총 질소는 여과하기 전의 돼지분뇨 슬러리 혐기소화 폐액 대비 감소 정도가 BOD나 SS 등 다른 요소에 비해 낮은 수준이었다. 총 질소 농도 1,313 mg/L인 혐기소화 폐액을 퇴비단 여과상에 여과하였을 경우 T 1에서는 1,293, T 2에서는 1,090, 그리고 T 3에서는 1,200 mg/L 수준으로 나타나 그 감소율은 각각 1.52%, 16.94%, 8.61%에 해당하였다. 그러나 작물의 흡수선포도가 높은 NO₃⁻-N의 농도는 여과전 혐기소화 폐액의 166 mg/L 수준에 비해 높아지는 결과를 보였다. 여과에 따른 NO₃⁻-N의 농도는 T 1에서는 391, T 2에서는 340, 그리고 T 3에서는 352 mg/L 수준으로 각각 235.5%, 204.8%, 212.0% 증가하였다. 식물의 뿌리에서 흡수하는 질소의 형태는 NH₄⁺-N과 NO₃⁻-N이다. 식물은 NH₄⁺-N과 NO₃⁻-N 등의 이온화된 형태의 질소 외에 유기성 질소는 거의 흡수하지 않는다. 특히 작물이 결실을 하기 전까지는 NO₃⁻-N에 대한 선택적 흡수가 높은 경우가 많다. 작물의 종류와 토양 pH에

Table 2. Changes of nitrogen according to filtration treatment.

(Unit : mg/L)

Item	Anaerobic digestion wastewater	T 1	T 2	T 3
T-N	1,313	1,293	1,090	1,200
NH ₄ ⁺ -N	785	221	242	195
NO ₃ ⁻ -N	166	391	340	352

따라서 물에 따라서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 에 대한 흡수 정도가 높은 작물이 있지만 일반적으로 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 형태의 질소흡수가 많다. 따라서 Table 2에 나타난 바와 같이 혐기소화액을 여과하였을 때 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 형태의 질소함량이 높아진다는 것은 여과액을 액비로 사용하는데 있어 긍정적인 요소로 작용할 수 있다. 퇴비단 여과상을 거치고 난 여과액의 총 질소는 여과하기 전의 돼지분뇨 슬러리 혐기소화 폐액 대비 감소 정도가 BOD나 SS 등 다른 요소에 비해 낮은 수준이었다.

결 론

본 연구는 여과단을 구성하는 재료와 여과단 구성방법이 돈분뇨 슬러리 혐기소화 폐액의 여과효율에 미치는 영향을 분석하기 위한 목적으로 수행되었다. 퇴비단 여과상을 이용하여 돈분뇨 슬러리 혐기소화 폐액을 여과하였을 경우, 투입된 혐기소화 폐액 대비 여과수 중의 EC 값과 pH, BOD, SS 농도가 전체적으로 낮아졌다. 퇴비단 여과상을 거치고 난 여과액의 총 질소는 여과하기 전의 돼지분뇨 슬러리 혐기소화 폐액 대비 감소 정도가 BOD나 SS 등 다른 요소에 비해 낮은 수준이었다. 퇴비단 여과상을 거친 여액의 EC 값과 pH 그리고 무기성 질소의 구성비를 고려하였을 경우 퇴비단 여과상은 적용은 혐기소화 폐액의 액비가치를 높이는 데에 긍정적인 요소로 작용할 수 있다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구인 가축분뇨 바이오가스 생산비 절감 수행에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2013. Outcome of animal waste generation and recycling ('06~'12).
2. Alburquerque, J.A., C. Fuente, de la., Campoy, M., Carrasco, L., Nájera, I., Baixauli, C., Caravaca, F., Roldán A., Cegarra, J., Bernal, M.P., 2012. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *European Journal of Agronomy*. 43, 119-128.
3. Kim, H.C., Yeo, J.K., Koo, Y.B., Shin, H., Choi, J.Y., Lee, H.H., 2011. Growth and Biomass Production of Fast Growing Tree Species Treated with Slurry Composting and Biofiltration Liquid Fertilizer. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44, No. 2, 206-214.
4. Kim, H.Y., Gwak, K.S., Kim H.Y., Ryu, K.O., Kim, P.G., Cho, D.H., Choi, J.Y., Choi, I.G., 2011. Effect of Treatment amounts of slurry composting and biofiltration liquid fertilizer on growth characteristics and bioethanol production of yellow poplar. *Korean wood Sci&Tech.* 39, 459-468.
5. Xia, M., Xia, T., Shayya, W., Lu, Z., 2012. Passive solid-liquid separation of anaerobically digested dairy manure using two-stage filtration. *Biosystems Engineering*, 111, 392-397.
6. Mahimairajia, S., Bolan, N.S., Hedley, M.J., Macgregor, A.N., 1994. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendents: and incubation experiment. *Bioresour*

- Technology. 47, 265-273.
7. Fang, M., Wong, J.W.C., 1999. Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting. Environ. Pollut. 106, 83-89.
 8. Wong, J.W.C., Mak, K.F., Chan, N.W., Lam, A., Fang, M., Zhou, L.X., Wu, Q.T., Liao, X.D., 2001. Co-composting of soybean residues and leaves in Hong Kong. Bioresour. Technol. 76, 99-106.
 9. S'anchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., Bernal, M.P., 2001. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. Bioresour. Technol. 78, 301-08.
 10. Lorimor, J., 2000. RCM Digesters : Swine USA anaerobic digester. <http://www.rcmdigesters.com/publications/swusa.htm>
 11. Hong, Y.S., Bae, J.H., 1997. The effect of cations and ammonia-nitrogen on the methanogenesis of landfill leachates. Journal of korea society of environmental engineers. 19. No. 11, 1433-1442.