

퇴비단을 이용한 혐기소화폐액의 액비화에 대한 연구

한덕우 · 이동현 · 정광화 · 김중곤 · 최동윤 · 곽정훈*

농촌진흥청 국립축산과학원 축산환경과

Utilization of Compost Bed for the Treatment of Anaerobic Digestion Wastewater

Deug-Woo Han, Dong-Hyun Lee, Kwang-Hwa Jeong, Jung-Gon Kim, Dong-Yoon Choi, Jung-Hoon Kwag*

National Institute of Animal Science, R.D.A., Suwon, Korea

ABSTRACT

This study was aimed at investigating a filtration bed system for the production of liquid fertilizer using wastewater generated after anaerobic digestion of animal manure. Slurry, Compost, & Biofiltration-Methane System, designed by Korean National Institute of Animal Science, is now a standard method to recycle anaerobic digestion wastewater. However, currently provided protocol to run the system needs continuous upgrades as the system is relatively new and can be more cost-effective if few adjustments are made. In this study, we tried to enhance the capability of the system to process anaerobic digestion wastewater by replacing the bed materials with the cheaper one, and determining the time point of operation from which filtrates can be utilized for fertilization.

(Key words : Anaerobic digestion, Compost, BOD, COD, Manure)

서 론

최근 우리나라 축산업 규모의 확대에 의해 가축 분뇨의 발생량이 급격한 증가세에 있다. 지난 2012년 기준으로 총 46,489천 톤의 가축분뇨가 발생하였으며 대부분은 퇴액비로 이용되고 있다(Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs, 2013). 생산된 퇴액비는 대부분 경작지에 살포되는데 경작지 면적당 살포되는 양이 계속적으로 증가하여 적정 수준

을 이미 넘어선 상황이다. 분뇨의 처리법 중 퇴액비를 비교적 적게 생산하는 방법으로서 바이오가스 생산을 들 수 있는데 가축분뇨의 처리와 동시에 에너지의 획득이라는 장점이 있어서 그 효용가치가 높다고 할 수 있다. 그러나 가축분뇨를 이용하여 바이오가스 생산시설을 운용함에 있어서 발생하는 문제점은 혐기소화 과정 완료 후 다량의 액상 폐기물인 혐기소화폐액이 발생되므로 이의 처리를 위한 추가적인 과정을 필요로 한다는 점

*Corresponding author : Jung-Hoon Kwag, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-706, Korea. Tel: +82-31-290-1723, E-mail: kwagjh@korea.kr

2014년 3월 20일 투고, 2014년 4월 12일 심사완료, 2014년 4월 16일 게재확정

이다. 발생한 혐기소화폐액은 정화처리 후 방류되거나 액비로 이용될 수 있으며 최근 들어 자원의 순환 개념이 강조되면서 액비화 후 경작지 환원의 방법이 제시되고 있다 (Albuquerque et al., 2012; Kim et al., 2011a; Kim et al., 2011b). 최근에는 Slurry, Composting, & Bio-filtration(SCB) 처리기법을 혐기소화폐액에 적용한 SCB-Methane(SCB-M) 기법이 등장한 바 있다. 본 연구에서는 SCB-M 기법을 이용하여 돈분뇨 슬러리 혐기소화폐액을 여과처리할 경우, 여과액의 성상이 어떻게 변하는지를 분석하였으며 톱밥, 왕겨, 목편 등의 여과재로서 이루어진 다층구조 퇴비단을 구성하여 여과재 조합에 따른 여과 효율도 비교 검토하였다.

재료 및 방법

퇴비단 여과상 제작을 위하여 두께 10 mm 인 아크릴 평판으로 가로 1,000 mm, 세로 2,000 mm, 높이 1,800 mm 크기의 장방형 시험기를 제작하였으며(Fig. 1) 여과재의 조합에 따른 여과효율을 측정하기 위해 3종의 퇴비단(T1, T2, and T3)을 조합하였다(Table 1).

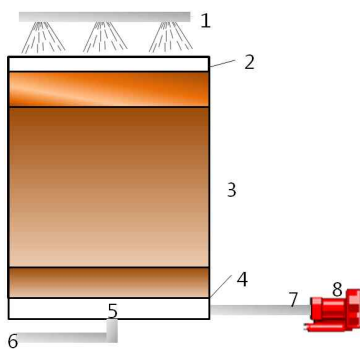


Fig. 1. A Diagram of compost bed filtration system in action.

1. Anaerobic digestion(AD) wastewater dispenser
2. Reactor
3. Bedding materials (sawdust, rice-hull, wood-chip)
4. Bottom plate
5. Space for aeration and sample collection
6. Effluent pipe
7. Aeration pipe
8. Blower

Table 1. Set-ups of 3 compost beds (T1, T2, T3).

(Unit : mm)			
Materials	T 1	T 2	T 3
Sawdust	1050	700	600
Rice-hull	—	350	300
Wood chip	—	—	150

공기를 주입함으로써 퇴비단 내부의 호기성 환경을 유지하였는데 링-블로어를 이용하여 하부에서 상향으로 공기공급이 이루어지도록 하였다. 송풍량은 시험용 여과상 1 m³당 50 L/min 수준으로 설정하였다. 돈분뇨혐기소화 폐액의 1일 투여량은 140 L이며 2회에 나누어 투여하였다. 시험과정에서 수집된 여과액은 채취하는 즉시 실험실로 이송하여 수질오염공정시험법(Ministry of Environment, 2011)에 준하여 분석되었다. 본 연구는 2013년 9월 26일 시작하여 12월 26일 종료되었으며 총 수행기간 92일이었다.

결과 및 고찰

1. 실험공간의 온도변화 분석

실험기간 동안 퇴비단이 위치한 실험공간의 온도를 추적하였다(Fig. 1). 오전 10시를 기준으로 24시간 동안의 최고온도와 최저온도 그리고 현재온도를 기록하였으며 예상대로 계절적인 원인으로 인해 퇴비단이 위치한 공간의 온도는 점차 하락하였다. 24시간 최고온도의 경우 실험기간 동안 빙점 이하를 기록하지 않았으며 24시간 최저온도의 경우 12월 12일부터(실험시작 후 78일) 빙점 이하를 기록하였고 실험 종료시까지 -2℃~-4℃대의 온도를 유지하였다.

2. 퇴비단 내부의 온도변화 추적

실험 공간 뿐 아니라 퇴비단 내부의 온도

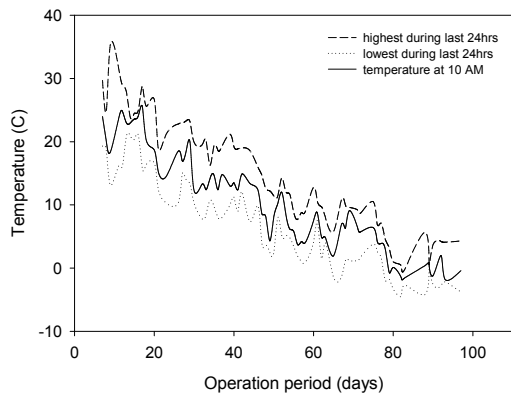


Fig. 2. Changes of temperatures of the room where experiments were carried out for 92 days.

를 추적하기 위하여 막대온도계를 퇴비단의 내부의 상중하 3곳에 설치하여 온도 변화를 추적하였다(Fig. 3). 외부기온과 마찬가지로 계절적인 원인으로 측정 온도가 점차 하락하였으나 퇴비단 내부의 온도는 영상의 온도를 유지하였다. 모든 처리구에서 퇴비단의 상층부의 온도가 상대적으로 높게 유지되었으며 하층부로 갈수록 온도가 하강하였다. 이는 아마도 퇴비단의 상층부가 상대적으로 산소의 공급이 원활하고 혐기소화폐액의 부유물이 집중적으로 걸러지는 곳이므로 호기성 발효가 가장 원활하게 진행되었기 때문으로 여겨진다. T3의 경우 초반 하층의 온도가 비정상적으로 높은 경향을 보였는데 이는 블로워의 뜨거운 바람이 T3의 하층을 이루는

목편층으로 쉽게 유입되었기 때문으로 여겨진다(Fig. 3-c).

3. 혐기소화폐액 및 여과액의 총부유물질농도(TSS)의 변화 추적

원수인 혐기소화폐액과 3종의 여과상에서 배출되는 여과액을 채취하여 총부유물질농도(TSS)를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 원수인 혐기소화폐액의 경우 TSS가 1000~3000 mg/L의 범위에서 불규칙하게 변동함을 알 수 있었다. 혐기소화폐액의 TSS가 급격히 변화하는 원인은 분뇨의 공급원인 돈사에서 일일관리 상황 및 바이오가스 생산시설에서의 배출 및 유입 상황에 따른 것으로 본 실험에서는 통제가 어려운 조건이라고 볼 수 있으며 오히려 사육현장의 현실을 반영한다는 점에서 긍정적으로 볼 수 있다. 혐기소화폐액과 달리 여과액의 TSS는 실험 종료까지 매우 낮은 수준을 유지하였는데 이로부터 TSS의 제거 효과는 외기 또는 퇴비단의 온도에 의해 크게 영향을 받지 아니하며 여과재의 구성에 의해서도 크게 영향을 받지 않는 것으로 여겨진다.

4. 전기전도도(EC)의 변화 분석

퇴비단 T1, T2, T3의 운영에 따른 소화폐액과 여과액의 전기전도도의 변화를 Fig. 5에

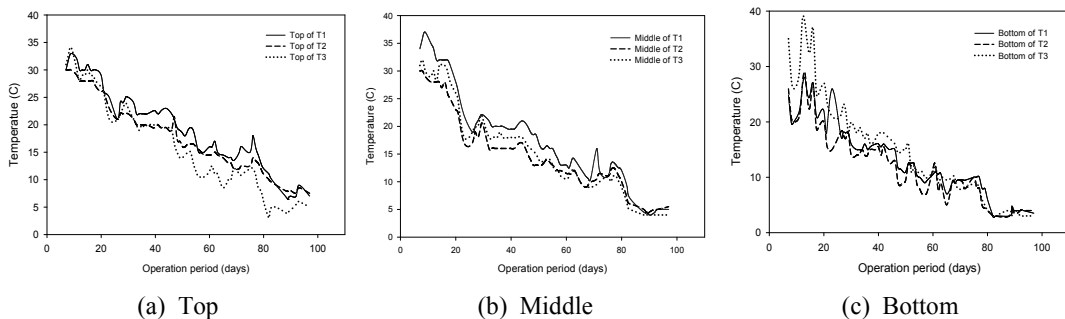


Fig. 3. Changes of temperatures inside of the compost beds at three different heights(top, middle, and bottom).

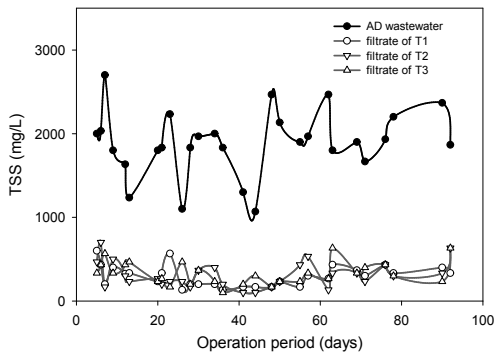


Fig. 4. Changes of total suspended solids (TSS) of AD wastewater and three filtrates.

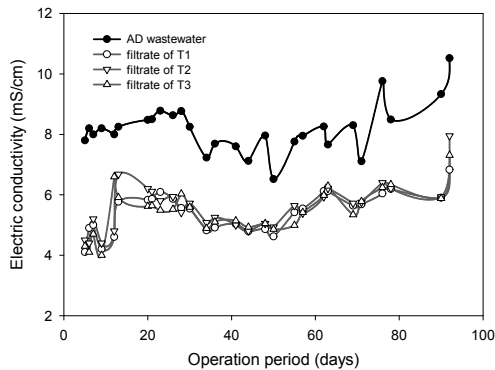


Fig. 5. Changes of electric conductivity of AD wastewater and three filtrates.

나타내었다. 전기전도도는 전기를 전달할 수 있는 이온 성분들의 합 즉 양이온과 음이온의 합과 비례하는 성질이 있다. 혐기소화폐액의 경우 암모늄(NH₄⁺), 칼슘, 마그네슘과 같은 양이온 그리고 인산, 아질산, 질산 성분과 같은 음이온에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 실험기간 동안의 원수인 혐기소화폐액의 EC는 8 mS/cm 이상으로 유지되었으며 여과액의 경우 퇴비단 구성에 상관없이 초기 10여 일 동안 4~5 mS/cm 수준을 유지하다가 이후 6~7 mS/cm 이상으로 급상승하였다가 점차 안정화되었으며 실험 후반에 다시 점차적으로 상승하는 추세를 보였다.

실험 초반 관찰되는 낮은 전기전도도는 여

과액에 용해되어 있는 이온 성분의 농도의 낮음을 의미하는데 이는 아마도 암모니아, 칼슘 등을 포함한 양이온들의 농도 변화와 연관이 있는 것으로 판단된다. 퇴비단을 이루는 톱밥은 배위결합(Co-ordination bonding)을 통해 양이온성분들과 결합하는 성질을 갖고 있음이 이미 보고된 바 있다(Argun et al., 2007; Yasemin and Zeki, 2007). 여과액의 pH 변화를 살펴보면 소화폐액보다 오히려 높게 상승하는데(Fig. 6) 이는 아마도 톱밥과의 흡착으로 인해 여과액에 용해된 양이온 농도의 하락이 수소이온농도에 영향을 미친 결과라고 볼 수 있다. 더불어 실험초반 여과액 총 질소의 농도가 매우 낮은 수준을 유지하는데(Fig. 9) 이는 혐기폐액 내의 양이온인 암모니움 이온이 흡착에 의해 제거된 결과라고 보여지며 마지막으로, 여과액의 EC가 12~13 일 이후 증가하는 현상은 톱밥 내에 양이온 결합부위가 어느 정도 채워진 이후 추가적인 결합이 어려워진 결과라고 유추해 볼 수 있다(Fig. 5).

5. pH의 변화 분석

퇴비단 T1, T2, T3의 운영에 따른 소화폐액과 여과액의 pH의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 실험기간 동안 혐기소화조에서 방출된 폐액의 pH는 7.8~8 수준에서 일정하게 유지되었다. 혐기소화폐액이 비교적 높은 pH를 갖는 이유는 혐기발효의 결과 생성된 암모니아(NH₃)가 다량 용해되어있기 때문이다. 반면 퇴비단을 통과한 여과액의 pH는 혐기소화폐액과 비교하여 초기 10여일 동안은 더 높게 유지되었으나 점차 낮아져 7 이하로 유지되었다가 실험시작 40일 이후 다시 반등하여 혐기소화폐액과 유사한 수준까지 상승하였다. 본 실험 중반 이후, pH가 점차적으로 상승하는 경향이 나타나는데 이는 아마도 외부이온과 퇴비단의 온도가 하락함에 따라 퇴

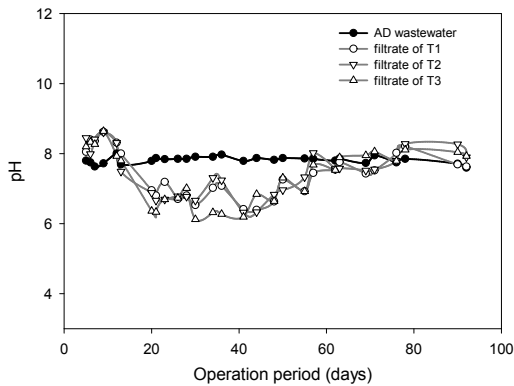


Fig. 6. Changes of pH of AD wastewater and three filtrates.

비단 내부에서 암모니아를 질산으로 전환시켜주는 질산화세균들의 활성이 하락함에 의한 것으로 유추해 볼 수 있다. 결과적으로 총질소 중 암모니아의 비중이 증가하게 되므로 pH는 상승하게 된 것으로 볼 수 있다 (Estelles et al., 2012).

6. COD의 변화 분석

원수인 소화폐액과 여과상에서 배출되는 여과액을 채취하여 화학적 산소요구량(COD)를 추적한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 소화폐액의 경우, COD은 매우 불규칙한 변화를 보였는데 초기 25일까지는 1,200 mg/L 이상의 높은 수준을 유지하였으나 그 후 실험 중

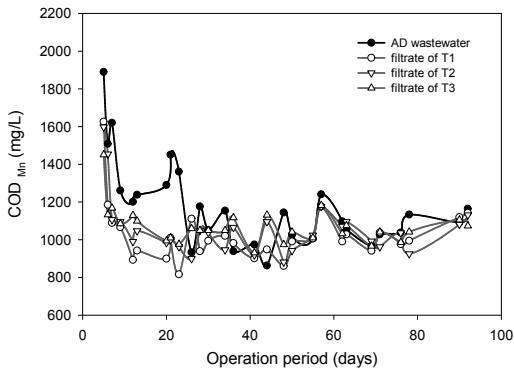


Fig. 7. Changes of COD of AD wastewater and three filtrates.

료까지 1,000 mg/L 수준을 유지하였다. 25일 이후 혐기소화폐액의 COD가 급감하는 원인은 TSS 데이터에 근거하여 판단해 볼 때(Fig. 4) 세척용수 사용의 증가에 기인하지는 않는 것으로 보이며 아마도 돈사에서 분뇨의 발생량 감소에 의하거나 혐기발효조의 메탄 생성의 효율성이 향상됨으로서 결과적으로 호기성 발효에 필요한 산소의 요구량이 감소하기 때문으로 판단된다. BOD의 경우(Fig. 8), COD과 마찬가지로 25일 이후 급감하는 경향을 보이는데 이는 돈사에서 슬러리 생산량이 감소했기 때문으로 여겨진다. 슬러리의 생산량이 감소할 경우 상대적으로 전반적인 처리기간이 길어지게 되고 이로 인해 발효가 더욱 충분히 진행되어 생물화학적 산소요구량이 감소하는 결과를 낳게 될 것이다. 본 실험이 실시된 돈사의 경우 총 200~300여 마리에서 배출되는 분뇨를 혐기소화방식으로 처리하고 있는데 9월 25일부터 11월 26일까지 3차례에 걸쳐 총 100두의 성숙한 수컷돼지를 출하하였으므로 이 시기 동안 배출되는 돈분뇨슬러리의 양이 상당히 감소되었을 것이다.

실험 시작 25일 이후에는 폐액과 여과액 모두 COD가 1,000 mg/L 수준에서 유지되었는데 이는 퇴비단 여과가 이 시기동안 COD에 별다른 영향을 미치지 못하였음을 의미한다. 퇴비단 여과를 통해 부유물(TSS)의 제거

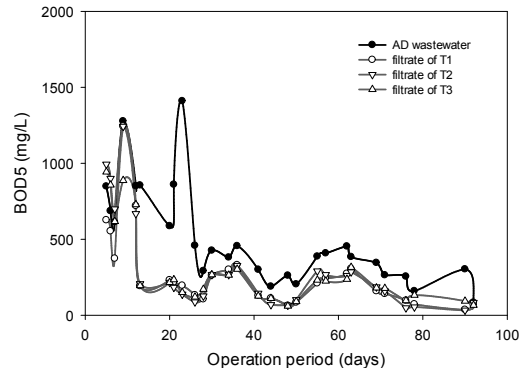


Fig. 8. Changes of BOD of AD wastewater and three filtrates.

가 충분히 이루어지고 있음에도 불구하고 여과액의 COD가 폐액의 COD에 비해 감소하지 않는 이유는 아마도 퇴비단 내의 여과재인 톱밥이 부식함에 따라 난분해성 성분이 용해되어 여과액과 함께 용출되어 COD를 상승시키기 때문으로 여겨진다. 이로부터 톱밥으로 구성된 퇴비단 여과법을 이용한 혐기소화폐액의 처리(SCB-M)에 있어서 COD를 1,000 mg/L 보다 낮은 수준으로 제어하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

7. BOD의 변화 분석

이미 언급한 바와 같이 혐기소화폐액의 BOD 변화 양상은 크게 25일을 기준으로 전과 후로 뚜렷이 구분되어진다. 혐기소화폐액의 BOD는 25일 이전에는 500 mg/L에서 1,500 mg/L 사이에서 진동하였으나 26일(10월 21일)부터 실험종료까지 500 mg/L 이하에서 유지되었다. 이러한 급작스런 변화의 원인은 정확히 설명되기 어려우나 우선 돈사로부터의 슬러리 공급의 감소를 고려해 볼 수 있다. 이러한 경우 슬러리가 혐기소화조를 지나는 시간이 연장되고 결과적으로 혐기소화조로부터 충분한 발효과정을 거친 산소요구량이 낮은 혐기소화폐액이 배출되게 된다.

여과액 BOD의 경우 초기 15일 이전까지는 매우 불안정한 변화를 보여주었는데 특히 소화폐액과 여과액의 BOD 수치가 동시에 급격히 증가하였다(Fig. 8). 이는 해당기간 동안 퇴비단 내에서 미생물에 의한 여과기능(유기물 분해)이 전혀 작동하지 않았음을 의미하는데 이미 언급한 것처럼 소화폐액에 풍부한 혐기성 미생물은 호기성 환경에서 사멸하며 또한 호기성미생물은 아직 충분히 증식하지 않아 이 시기 동안 미생물에 의한 분해작용은 대단히 부진하다고 할 수 있다. 그러나 퇴비단 내에서 호기성 미생물이 서서히 수적으로 증가하고 여과기능을 정상적으로 수행

됨에 따라 여과액의 BOD는 낮은 수준으로 안정화되었다고 볼 수 있다.

8. 총질소(T-N)의 변화 분석

혐기소화폐액과 퇴비단으로부터 배출되는 여과액을 채취하여 총질소(total nitrogen; T-N)의 농도를 추적한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 소화폐액의 경우, T-N은 800~1,100 mg/L 범위에서 불규칙한 농도변화를 보였다. 반면 여과액의 T-N 농도는 초기 10~15일에는 낮은 수준(300 mg/L)을 유지하다가 그 후 상승하여 소화폐액과 유사한 수준으로 유지되었다. 실험초반에 총질소 농도가 낮아진 이유는 미생물의 여과작용에 의한 것은 분명 아니며 아마도 퇴비단 여과재인 톱밥에 의한 흡착(킬레이션) 때문으로 여겨진다. 이후 흡착능력이 소진됨에 따라 더 이상 흡착하지 못하고 대부분 배출하는 것으로 여겨진다.

혐기소화폐액의 경우 질소의 상당 부분은 암모니아의 형태로 존재함이 이미 알려져 있으며 여과액의 경우 일부의 암모니아가 미생물의 작용에 의해 아질산 내지는 질산으로 전환됨이 알려져 있다(Lee et al., 2013). 본 실험에서 혐기소화폐액의 T-N이 점진적으로 증가한다는 것은 곧 암모니아 농도의 증가를 의미한다고 볼 수 있으나 여과액에서의 질소

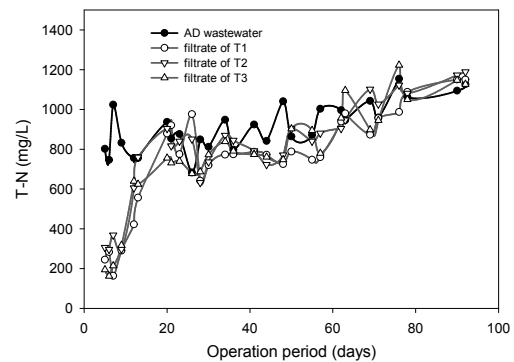


Fig. 9. Changes of total nitrogen(T-N) of AD wastewater and three filtrates.

성분 증가는 어떠한 원인에 의한 것인지 확실치 않다. Lee et al.(2013)에 의하면 혐기소화폐액과 달리 여과액(SCB-M)의 질소성분 중 암모니아의 비중은 크지 않은 것으로 보고되어 있다. 본 실험의 결과에서 판단하건데 퇴비단 여과 처리 과정 중 휘발에 의한 질소성분의 손실은 거의 발생하지 않는 것으로 여겨진다. 일반적으로 암모니아의 경우 스트리핑의 과정이 없다면 암모니아가 휘발하여 제거되는 비중은 크지 않은 것으로 알려져 있다(Lee, 2005).

결 론

본 연구의 주요한 목적의 하나는 고가의 퇴비단 원료인 톱밥을 저가의 왕겨 또는 목편으로 일부 대체하였을 때 퇴비단의 여과 능력에 어떠한 변화가 발생하는지를 분석하는 것이었다. 이를 검증하기 위해 다양한 여과재 조합의 여과능력을 여과단으로 이용해 보았다. 결과적으로 여과재의 구성에 따른 여과 효과의 차이는 미미했다. 이로부터 여과재를 구성함에 있어서 가장 우수하지만 가격이 고가인 톱밥을 대체하여 상대적으로 저가인 왕겨나 목편을 여과단의 하부에 배치함으로써 여과효과는 유지하면서 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다고 판단된다.

여과액 BOD의 경우 초기 15일 이전까지는 매우 불안정한 변화를 보여주었는데 특히 소화폐액과 여과액의 BOD 수치가 동시에 급격히 증가하였다. 이는 해당기간 동안 퇴비단 내에서 미생물에 의한 여과기능(유기물 분해)이 충분히 작동하지 않았음을 의미하는데 이미 언급한 것처럼 여과단 톱밥의 표면에 충분한 수의 호기성 미생물이 존재하여야만 혐기소화폐액의 BOD를 낮출 수 있다. 소화폐액에 풍부한 혐기성 미생물은 호기성 환경에서 사멸하며 또한 호기성미생물은 아직 충분히 증식하지 않아 종합적으로 이 시기 동

안 미생물에 의한 분해작용은 대단히 부진하다고 할 수 있다. 따라서 사용된 지 15일을 경과하지 않은 퇴비단(또는 퇴비단의 일부분)을 통과한 여과액은 액비저장고로 이송하지 말고 반복적으로 여과단에 투여하여 BOD 측정치가 충분히 낮아진 이후에 저장고로 이송하는 것이 바람직할 것이다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(PJ0091362014)의 지원에 의해 이루어진 성과입니다.

인 용 문 헌

1. Albuquerque, J.A., 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.
2. Argun, M.E., Dursun, S., Ozdemir, C., Karatas, M., 2007. Heavy metal adsorption by modified oak sawdust: Thermodynamics and kinetics. *Journal of Hazardous Materials* 141, 77-85.
3. Estelles, F., Calvet, S., Melse, R.W., Ogink, N.W.M., 2012. Uncertainty modelling to evaluate nitrogen balances as a tool to determine N₂ and N₂O formation in ammonia bioscrubbers. *Environmental Engineering Science* 29(6) 520-525.
4. Han, D.W., Lee, D.H., Kim, J.G., Yang, S.H., Bae, J.W., Kwag, J.H., Choi, D.Y., Chung, K.H., 2013. A study on the filtration of swine anaerobic digestate using

- multi-layered compost beds. Journal of Korea Organic Resources Recycling Association 21(4) 72-80.
5. 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 Journal of Soil Science and Fertilizer 44(2), 206-214.
 6. 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 Science & Technology 39, 459-468.
 7. Lee, D.H., Chung, K.H., Khan, M.A., Kim, J.K., Kwag, J.H., Ahn, H.K., Kim, E.J., 2013. Filtration efficiency of anaerobic digestion wastewater could be maintained when three sets of filter media were tested. Journal of Animal Housing and Environment Science. 19(1), 39-46.
 8. Lee, Y.W., 2005. A technical improvement to eliminate nitrogen from animal manure using a skimming process(A report submitted to Gwangju-Regional environment technology development center, No. 05-4-10-17).
 9. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2013. Outcome of animal waste generation and recycling('06~'12).
 10. Ministry of Environment, 2011. Official Testing Method with Respect to Water Pollution Process.
 11. Rural Development Administration, 2010. How to use compost and liquified fertilizer rightly, a guide for users who want a satisfaction, Chapter 4, Techniques to produce liquified fertilizer using animal manure. 54-58.
 12. Yasemin, B., Zeki, T., 2007. Removal of heavy metals from aqueous solution by sawdust adsorption. Journal of Environmental Science 19, 160-166.