

우분뇨의 고형연료화와 고온호기산화 공정 적용 가능성에 관한 연구

김수량¹ · 홍인기² · 김하제² · 전상준² · 이정수³ · 이명규^{2*}

¹상지대학교 동물자원학과, ²상지대학교 환경공학과, ³(주)해온

Application of TAO System and RDF for Treatment of Cattle Manure

Soo-Ryang Kim¹, In-Gi Hong², Ha-Je Kim², Sang-Jun Jeon², Jeong-Soo Lee³,
Myung-Gyu Lee^{2*}

¹Dept. of Animal Life Resource, Sangji University, Wonju 220-702, Korea, ²Dept. of
Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea, ³HAEON Co., Ltd.
Wonju 220-702, Korea

ABSTRACT

We studied the possibility to produce solid fuel using cattle manure and to apply TAO (Thermophilic Aerobic Oxidation) process of solid-liquid separation fraction. The physiochemical compositions of cattle manure solid fuel chip were analyzed as water 0.12%, low calorific value 3,510 kcal/kg, ashes 11.9%, chlorine 0.82%, sulfur dust 0.5%, mercury non-detection, cadmium 1.0 mg/kg, lead 2 mg/kg, arsenic non-detection. In treating cattle manure with TAO reactor the internal temperature of the reactor was increasing higher and 50°C and over was maintained after 20 hours on. The physiochemical compositions of liquids increased from pH 7.3 to pH 9.18 and EC decreased from 4.6 to 3.48 mS/cm in treating process of cattle manure with TAO reactor. COD and SCOD decreased from 16,800 to 10,400 mg/L, from 4,600 to 2,040 mg/L respectively, which showed about 38% and 56% of remove efficiency respectively.

(**Key words** : Cattle manure, Thermophilic aerobic oxidation (TAO), Refuse derived fuel (RDF), Liquid fertilizer, Solid-liquid separation)

서 론

바이오매스인 농수축산 폐자원을 이용한 에너지원 및 비료자원 확보는 농축산업의 발전을 위한 국가적 과제이며, 환경과 에너지 안보를 동시에 고려해야 한다. 최근 가축분뇨를 처리함에 있어서 기존의 퇴비화 방법과 더불어 화훼단지, 축사 등의 농가에서 필요로 하는 저비용의 난방용 연료로서 사용할

수 있는 방법이 연구되고 있다(Lee, 2010). 축분을 이용한 고형 연료화 사업은 겨울철 연료 및 난방이용, 유기질비료 공급 등 경축 농가간의 다양한 편익구조를 활성화시킬 수 있으므로 농축산업 발전의 또 다른 대안으로 기대된다. 현재 국내에는 고형연료제품에 대한 품질·등급기준을 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 시행규칙 별표 7, 환경부령 제 503호, 2013」에서 규정하고 있다. 품질 기

*Corresponding author : Myung-Gyu Lee, Dept. of Environmental Engineering, Sangji University, Woosandong, Wonju 220-702, Korea. Tel: +82-33-730-0443, E-mail: mglee@sangji.ac.kr

2013년 11월 12일 투고, 2013년 12월 15일 심사완료, 2013년 12월 18일 게재확정

준으로 형상 및 크기, 저위발열량, 수분, 회분, 염소, 황, 금속성분 함유량 등을 규정하고 있으며, 품질등급은 발열량과 염소함량 기준 등급을 구분하고 있다. 한편, 기존 대부분의 축분 고형연료화 기술은 연료생산 시 발생하는 고액분리여액의 처리문제로 인하여 자원순환의 큰 걸림돌로 지적되고 있다. 고액 분리된 분뇨 액상물은 BOD 수만 ppm의 고농도이기 때문에 제대로 관리하지 않게 될 경우 수변지역, 토양 및 지하수의 오염을 야기 시킬 수 있다. 이러한 고농도 액상물의 친환경적 관리구축을 위한 핵심적 기술은 액비화에 따른 고품질화 및 위생적 관리이다. 이를 위한 기술개발은 농축산분야의 위생적 측면에서도 매우 중요하며, 친환경적 이용방안에 있어서도 필요하다. 본 연구는 가축분뇨의 적정처리와 자원화라는 측면에서 우분뇨를 이용한 고형연료의 생산과 고액분리여액의 고온호기산화(Thermophilic Aerobic Oxidation, TAO) 공정 적용 가능성에 대하여 기초자료를 수집하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

연구에 사용된 우분뇨는 강원도 원주시에 소재한 축산농가에서 시료를 채취하였다. 채

취한 시료는 패각 등의 칼슘질을 일정 비율로 혼합하여 자체 제작한 Pilot 규모의 축분 고형연료화 장치를 통해 우분고형연료 chip을 생산하였다. 생산된 우분고형연료 chip은 고형연료제품 품질 기준에 근거하여 저위발열량, 수분, 회분, 염소, 황, 금속성분 함유량 등을 분석하였다. 고액분리여액은 축분고형연료화 장치 및 농가현장의 세척수량을 고려하여 우분뇨와 지하수를 약 1:7로 혼합한 후 3 mm 체를 통과한 액상물을 시료로 하여 고온호기산화반응기에 처리하였다. 우분고형연료 chip과 고온호기산화반응기(이하 TAO system) 설치 모습을 Fig. 1에 나타내었다.

2. 고온호기산화(Thermophilic Aerobic Oxidation system, TAO system) 공정

TAO system은 가축분뇨와 같은 고농도의 유기물질을 함유하는 폐수를 처리하는 호기성 발효공법이다. TAO system은 외부로부터 별도의 열원 공급 없이 폭기로 인한 교반열 및 미생물반응 생성열을 이용하여 공정에 직접 이용한다. 미생물의 호기적 대사과정에서 생성되는 열에너지는 반응조의 내부온도를 고온으로 유지시키는 역할을 한다. 이러한 고온특성은 반응속도를 촉진시켜 고농도 유기물질을 단기간에 발효처리할 수 있으며, 이용



Fig. 1. Solid cattle manure fuel chip(Left), TAO system(Right) for use in research.

성과 안전성이 확보된 발효액의 생산이 가능하다. 본 연구에서는 TAO system에 약 120 L의 우분뇨를 투입하여 60시간 동안 처리하였으며, 처리에 따른 내부액상물의 온도 및 이화학적 성상 변화에 대하여 분석하였다.

3. 액상시료 분석방법

시료는 12시간 간격 구분하여 채취하였으며, 채취된 시료는 즉시 실험실로 이송하여 분석을 실시하였다. 시료의 pH, 전기전도도(Electrical Conductivity, EC)는 수질 다항목 측정기(Multi Sensor Meter, YSI-556 MPS, USA)를 이용하여 측정하였다. 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, SCODcr), 수용성화학적산소요구량(Soluble Chemical Oxygen Demand, SCODcr), 총킬달질소(Total Kjeldahl Nitrogen, TKN), 암모니아성질소(Ammonia Nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$)을 Standard method(AHPA, 1989)에 따라 분석하여 각 처리방법에 따른 시료의 이화학적 변화 특성을 알아보았다. SCOD_{Mn} 분석은 시료를 원심분리관에 20 ml 분취하고, 10,000 rpm에서 10분간 원심분리한 후 상등액을 이용하여 분석하였으며, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경우 일본하수시험방법(下水試驗方法, 1984)에 따라 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 우분고형연료 chip의 물리화학적 성상

가축분뇨는 사료가 가축의 체내에서 소화 흡수된 후 배출되는 찌꺼기이지만 약 70~80%의 유기물을 포함하고 있으므로 연료로서의 에너지 이용이 가능하다. 축분을 이용한 연료화에 있어서 대표적인 실용화 사례로는 계분보일러를 들 수 있다. 계분은 계사로부터 수거될 때 수분이 약 30% 정도로 건조되어 있으며, 이는 발열량이 2,000~3,000 kcal/kg인 연료가 된다(Kim, 2008). 본 연구에서는 자체 제작한 축분고형연료화 장치를 통해 우분 고형연료 chip을 생산하였으며, 특히 저위발열량의 경우 3,150 kcal/kg로 나타났다. 그 밖의 물리화학적 성상과 고형연료제품에 대한 품질·등급기준(환경부, 2013)을 Table 1에 나타내었다.

우분 고형연료 chip의 분석결과 대부분의 항목에서 환경부 고형연료기준(일반 고형연료제품)에 만족하는 것으로 조사되었다. 축분을 이용한 고형연료는 연소과정 중 유기물질은 연소되어 열량을 발생시키면서 산화되지만 무기물은 남아 재(Ash)의 형태로 남게 된다. 연소 후 남은 재는 인산, 칼륨, 칼슘 등

Table 1. Korean quality and rating criteria of general solid reuse fuel(SRF) products and the physicochemical characteristics of solid cattle manure fuel chip.

Division	Unit	SRF				Solid cattle manure fuel chip	
		Molded		Unmolded			
Formation and size	mm	Diameter	50 or less	Horizontal	50 or less	Diameter	100
		Length	100 or less	Vertical	50 or less	Length	50
Water	wt.%	10 or less		25 or less		0.12	
Low calorific value	kcal/kg	3,500 or higher				3,510	
Ash	wt.%	20 or less				11.9	
Chlorine	wt.%	2.0 or less				0.82	
Sulfur	wt.%	0.6 or less				0.5	
Metal substance	Hg	mg/kg		1.0 or less		undetected	
	Cd			5.0 or less		1.0	
	Pb			150 or less		2	
	As			13.0 or less		undetected	

의 비료성분이 많기 때문에 토양개량제 및 비료자원으로서의 자원순환이 가능할 것으로 기대된다.

2. 우분뇨의 고온호기산화반응기(TAO system) 처리에 따른 내부 및 외기온도 변화

TAO system 가동의 핵심인자는 반응기 내부온도를 50℃~60℃의 범위로 유지해야 하는 점이다. 그 이유는 처리온도가 50℃ 이하로 내려가게 되면 병원성미생물의 사멸을 기대할 수 없기 때문이다. 우분뇨의 TAO system 처리에 따른 내부 및 외기온도의 경시적 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

외기온도는 처리기간 동안 20~30℃로 나타났으며, TAO system의 내부온도는 시스템의 가동 후 외기온도와 관계없이 점차 상승하여 20시간 이후부터 병원성미생물 제어조건인 50℃ 이상을 유지하였다. 반응기 내부 액상물의 온도가 계속적으로 유지되는 것으로 보아 고온호기성미생물에 의한 유기물 분해과정이 활발히 진행되는 것으로 사료된다.

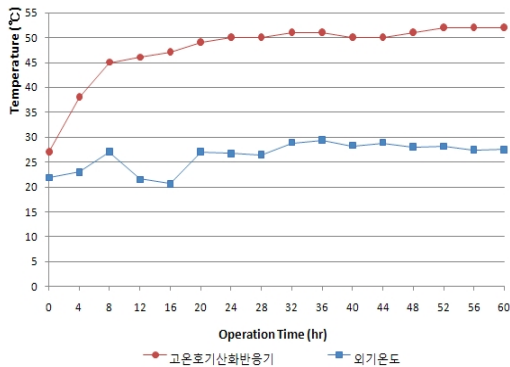


Fig. 2. Changes of Internal and External System Temperatures Caused by TAO system of Cattle Manure.

3. 우분뇨의 고온호기산화반응기(TAO system) 처리에 따른 이화학적성상 변화

TAO system에 약 120 L의 우분뇨를 투입하여 60시간 동안 처리하였으며, 시간의 경과에 따라 주요 항목에 대하여 이화학적 성상을 분석하였다. 반응기에 투입된 우분뇨의 초기 유입수 성상은 Table 2와 같다.

우분뇨의 TAO system 처리 시 pH의 경우 반응 초기 pH 7.3의 중성부근에서 시간이 경과함에 따라 pH 9.18로 다소 증가하였으며, EC의 경우는 초기 4.6 mS/cm에서 3.48 mS/cm로 감소하는 경향을 나타냈다. 일반적으로 돈분뇨의 경우 폭기처리를 통한 호기성 액비화시 부숙이 진행됨에 따라 pH는 증가하고 EC는 감소하는 경향을 보이며 (Han, 2008; Kim, 2010), 이와 같은 연구보고는 TAO system 통한 우분뇨의 처리에서도 유사한 결과가 도출되었다. 우분뇨의 TAO system 처리에 따른 pH 및 EC의 경시적 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 4에는 우분뇨의 TAO reactor 처리 시 COD와 SCOD의 변화를 나타내었다. 반응시간은 60시간이었으며, 분석결과 COD와 SCOD는 각각 16,800에서 10,400 mg/L, 4,600에서 2,040 mg/L로 감소하였고, 각각 약 38%, 56%의 제거율을 나타냈다. 가축분뇨는 고농도의 유기물질을 함유하고 있으므로, 적절한 처리를 하지 않으면 토양환원 시 토양 및 주변수계에 환경피해가 유발 될 수 있으므로 유의해야 한다. 일반적으로 COD는 BOD (생물학적산소요구량)와 더불어 오염물질 정도의 지표로 이용되고 있다. TAO system 처리를 통한 우분뇨의 COD의 제거효과는 축분고형연료화 및 고액분리에서 발생하는 액상물

Table 2. The physicochemical characteristics of cattle manure for use in research.

	pH	EC	CODcr	SCODcr	TKN	NH ₄ -N	T-P
		mS/cm	mg/L				
Cattle manure	7.3	4.6	16,800	4,600	742	126	237

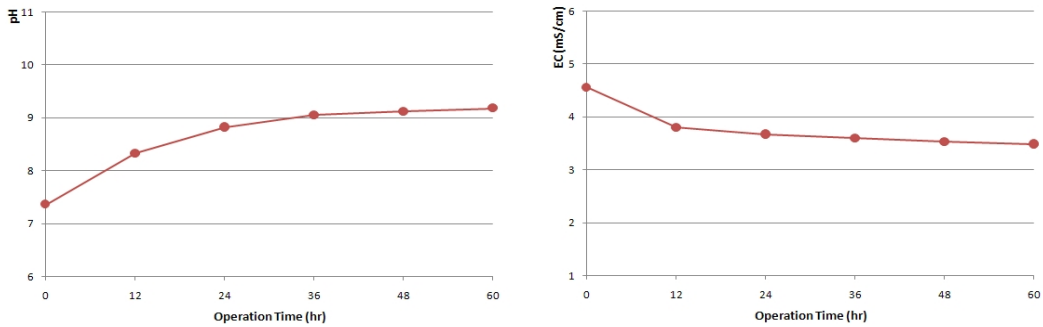


Fig. 3. Changes of pH (Left) and EC (Right) caused by TAO system of cattle manures.

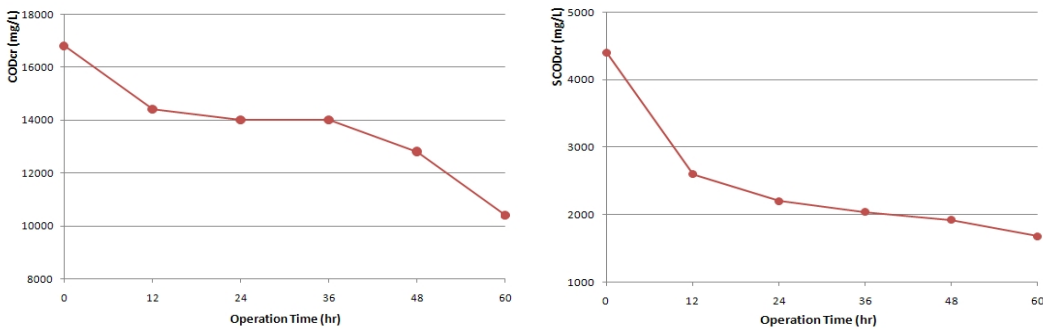


Fig. 4. Changes of CODcr (Left) and SCODcr (Right) caused by TAO system of cattle manures.

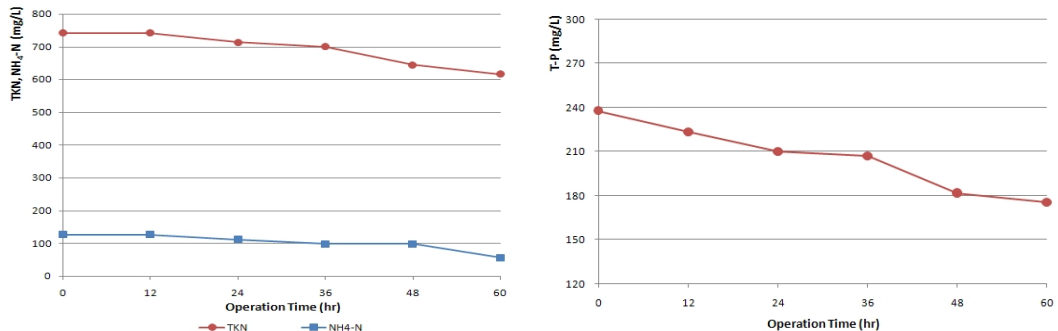


Fig. 5. Changes of TKN, NH₄-N (Left) and T-P (Right) caused by TAO system of cattle manures.

질 오염부하의 효율적인 저감이 기대되며, 향후 다양한 유입농도에 대한 추가적인 공정 특성 연구가 필요하다.

가축분뇨를 이용한 액비화에 있어 질소, 인산, 가리 등의 성분은 토양환원시 식물생육에 필수적인 주요 영양물질이므로, 토양 및 작물의 양분균형을 고려한 액비 제조는

핵심사항이라 할 수 있다. 우분뇨의 TAO system 처리에 따른 TKN, NH₄-N 및 T-P의 분석결과 각각 742에서 616 mg/L, 126에서 56 mg/L, 237에서 56 mg/L로 각각 감소하였으며 (Fig. 5), 이는 pH 및 EC와 마찬가지로 돈분뇨의 호기성 액비화시 나타나는 이화학적 특성과 유사한 경향을 나타내었다 (Hong et

al., 2012). 처리된 액상물의 질소 및 인의 농도가 비교적 낮게 나타내는 것은 실험특성에 따른 시료 전처리에 기인한 것으로 사료되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

결 론

본 연구는 우분뇨를 이용한 고행연료의 생산과 고액분리여액의 고온호기산화 (Thermophilic Aerobic Oxidation, TAO system) 공정 적용 가능성에 대한 기초자료를 수집하고자 수행하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 우분 고행연료 chip의 물리화학적 성상은 수분 0.12%, 저위발열량 3,510 kcal/kg, 회분 11.9%, 염소 0.82%, 황분 0.5%, 수은 불검출, 카드뮴 1.0 mg/kg, 납 2 mg/kg, 비소 불검출로 나타났으며, 대부분의 항목에서 환경부 고행연료 품질기준(일반 고행연료제품)에 만족하는 것으로 조사되었다.

둘째, 우분뇨의 TAO system 처리 시 외기 온도는 처리기간 동안 20~30℃로 나타났으며, 반응기의 내부온도는 시스템의 가동 후 외기온도와 관계없이 점차 상승하여 20시간 이후부터 병원성미생물 제어조건인 50℃ 이상을 유지하였다.

셋째, 우분뇨의 TAO system 처리에 따라 액상물의 이화학적 성상은 pH 7.3에서 pH 9.18로 증가하였으며, EC는 4.6에서 3.48 mS/cm로 감소하였다. COD와 SCOD는 각각 16,800에서 10,400 mg/L, 4,600에서 2,040 mg/L로 감소하여, 각각 약 38%, 56%의 제거율을 나타냈다. TKN, NH₄-N 및 T-P의 경우 742에서 616 mg/L, 126에서 56 mg/L, 237에서 56 mg/L로 각각 감소하였다.

가축분뇨를 이용한 고행연료화는 겨울철 농가의 시설난방 및 유기질비료 공급 등 경축농가의 다양한 편익구조 활성화가 가능하다. 그러나 축분 고행연료화 기술에서 발생하는

고액분리 여액은 가축분뇨의 친환경적 관리를 위한 해결과제이다. 본 연구결과를 통하여 우분뇨를 이용한 에너지원 및 비료자원 확보 가능성을 검토할 수 있었으며, 향후 고행연료화 및 축분 여액의 액비 자원화에 대한 기초자료로서의 활용이 기대된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 ‘가축분뇨 액비 품질 인증체계 구축 연구’(과제번호 : PJ907185)과 ‘2013년도 상지대학교 교내연구비 지원’, 환경부의 ‘지식기반 환경서비스(폐자원에너지화) 전문인력양성사업’ 및 ‘중소기업청 2013년도 산학협력 기술개발사업(No. C0096659)’으로 지원되었음을 알려드리며 이에 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. Han, C.B., 2008. The change of component of piggery slurry during fermentation period. Master thesis. Kongju University, Korea
2. Hong, I.K., Kim, S.R., Lee, M.G., 2012. Effect of SCODMn and pH Adjustment on Physicochemical Characteristics in Liquid Fertilizer Production Process Using Swine Manure. J. Lives. Hous. & Env. 18, 13-20.
3. Kim, J.H., 2008. In about resources of livestock nightsoil research. Master thesis. Kyungpook National University, Korea
4. Kim, S.R., 2010. Effect of aeration on the stabilization of liquid manure in storage tank. Master thesis. Sangji University, Korea
5. Lee, G.H., 2010. Thermal and Physicochemical Characteristics of Solid Fuel Extruded with Cattle Feedlot Manure. Journal of Biosystems Engineering. 35(1), 64-68.