

## The Bioenergy Conversion Characteristics of Feedlot Manure Discharging from Beef Cattle Barn

Seung-Yong Oh, Chang-Hyun Kim<sup>1</sup>, and Young-Man Yoon\*

Biogas Research Center, Hankyong National University, Anseong, Gyeonggi, 17579, Republic of Korea

<sup>1</sup>Department of Animal Life and Environment Science, Hankyong National University, Anseong, Gyeonggi, 17579, Republic of Korea

(Received: October 16 2015, Revised: November 25 2015, Accepted: December 10 2015)

This study was carried out to assess bioenergy conversion efficiency by biogas and solid fuel production in the cattle feedlot manure discharged from beef cattle barn. Feedlot manure was sampled from the cattle farmhouse located in Yong-in, Gyeonggi during the mid-fattening stage, periodically. The chemical characteristics, BMP (Biochemical methane potential) and HV (Heating values) of feedlot cattle manures were analyzed. Total solid contents of cattle feedlot manure were in the range of 29.98~44.28%, and volatile solid contents were in the range of 23.53~24.47%. In the anaerobic digestion of cattle feedlot manure, the methane production potential has increased from 0.141 to 0.187 Nm<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>-VS<sub>added</sub>. The methane production of fresh cattle feedlot manure showed the range 0.141~0.187 Nm<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>-Manure (average 0.047 Nm<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>-Manure), the LHV<sub>s</sub> (lower heating values) of the produced methane were in the range of 316~560 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure (average 400 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure). In the direct combustion of fresh cattle feedlot manure, the LHV<sub>s</sub> were measured in the range of 747~1,271 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure (average 916 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure), and LHV<sub>s</sub> of solid fuel which have the water content of 20% were in the range of 2,694~2,876 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure (average 2,791 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure). Then, the drying energy of average 443 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure was consumed in the production of solid fuel which has a water content of 20%. Therefore, the direct combustion of cattle feedlot manure showed about 2.3 times higher LHV than the LHV of methane produced by anaerobic digestion. And LHV of solid fuel was about 6.0 times higher than the LHV of methane produced by anaerobic digestion. Then, the production of solid fuel presented more bioenergy conversion efficiency than the biogas production in the bioenergy use of cattle feedlot manure.

**Key words:** Anaerobic digestion, Biogas, Cattle feedlot manure, Heating value, Solid fuel

The direct combustion of the cattle feedlot manure showed about 2.3 times higher LHV than the that of methane produced by anaerobic digestion. LHV of solid fuel was about 6.0 times higher than the LHV of methane produced by anaerobic digestion. Then, the production of solid fuel presented more bioenergy conversion efficiency than the biogas production in the bioenergy use of the cattle feedlot manure.

Breeding period	Anaerobic digestion				Solid fuel	
	Methane potential & production		Caloric value		Caloric value	
	B <sub>u</sub> <sup>†</sup>	MP <sup>‡</sup>	HHV <sup>§</sup>	LHV <sup>¶</sup>	HHV (wet basis)	LHV (wet basis)
	Nm <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> -VS <sub>added</sub>	Nm <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> -Manure	kcal kg <sup>-1</sup> -Manure		kcal kg <sup>-1</sup> -Manure	
7	0.141	0.037	351	316	1,296	849
28	0.176	0.041	393	354	1,187	747
49	0.166	0.043	409	369	1,285	855
70	0.160	0.042	399	359	1,295	860
91	0.188	0.065	621	560	1,700	1,271
112	0.187	0.051	487	439	1,347	911
Average	0.170	0.047	443	400	1,352	916

<sup>†</sup>Biochemical methane potential, <sup>‡</sup>Methane production, <sup>§</sup>Higher heating value calculated by the caloric unit of 9,500 kcal/Nm<sup>3</sup>-methane, <sup>¶</sup>Lower heating value calculated by the caloric unit of 8,560 kcal/Nm<sup>3</sup>-methane.

\*Corresponding author: Phone: +82316705665, Fax: +82316705666, E-mail: yyman@hknu.ac.kr

<sup>§</sup>Acknowledgement: This research was supported by Bio-industry Technology Development Program, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.

## Introduction

국내 바이오에너지 및 폐기물에너지의 가용 잠재량은 연간 14,025 TOE (Tonnage of oil equivalent)로 임산 바이오매스가 약 68.0%, 도시고형폐기물이 16.6%, 가축분뇨가 11.4%, 농산 바이오매스가 4.1%로 임산 바이오매스가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 도시고형폐기물이 두 번째로 큰 비중을 차지하는 것으로 보고되고 있다 (New & renewable energy data center, [http://kredec.kier.re.kr/kier/Default\\_New.aspx](http://kredec.kier.re.kr/kier/Default_New.aspx)). 그러나 도시고형폐기물에는 음식물쓰레기, 폐지, 폐목재 등 바이오에너지 이외에 폐플라스틱, 페타이어 등 가연성의 폐기물 에너지를 포함하고 있어 바이오에너지 측면만을 고려하는 경우 실질적으로 농촌에서 발생하는 가축분뇨가 두 번째로 큰 비중을 차지하는 것으로 추정되고 있다 (Yoon, 2014). 축종별 가축분뇨의 바이오에너지 가용 잠재량은 젓소·한우 분뇨가 510 TOE/년, 돼지 분뇨가 760 TOE/년, 닭·오리 분뇨가 326 TOE/년으로 국내 바이오에너지의 이용 확대를 위해서는 임산 바이오매스와 더불어 가축분뇨의 에너지 자원화가 매우 중요시 되고 있는 상황이다. 특히, 가축분뇨는 농업·농촌 부문에서 발생하는 대표적인 바이오매스 자원이라는 측면에서 농업·농촌 부문 바이오에너지 활성화를 위해서는 매우 중요한 가치를 지닌다.

또한, 우리나라에서 발생하는 가축분뇨는 2012년 기준 46,489 천톤/년으로 한우 분뇨가 15,315 천톤 (32.9%), 젓소 분뇨가 5,681 천톤 (12.2%), 돼지 분뇨가 17,748 천톤 (38.2%), 닭·오리 분뇨가 6,559 천톤 (14.1%)을 차지 (MAFRA, 2013) 하고 있어 가축분뇨 에너지 자원화 확대를 위해서는 양돈슬러리를 대상으로 하는 습식 혐기소화 중심에서 한우 및 젓소 분뇨를 대상으로 하는 건식 혐기소화 및 고체연료화 기술로의 확대가 절실히 요구되고 있는 상황이다.

현재 상용화 가능한 가축분뇨 에너지화 기술은 혐기소화에 의한 바이오가스 생산 기술과 건조·성형에 의한 고체연료 생산 기술이 있다. 가축분뇨 바이오가스화 기술은 현재 보급 확산 중에 있는 기술로서 가축분뇨 단독 혐기소화시설 7개소와 가축분뇨 병합 혐기소화시설 8개소가 가동 중에 있다 (ME, 2014). 특히, 농림축산식품부에서는 2010년부터 가축분뇨 에너지 자원화 촉진을 위해 가축분뇨 에너지화 시설 설치를 지원하여 가축분뇨 혐기소화시설 4개소가 가동 중에 있으며, 3개소가 설치 중에 있는 상황이다. 가축분뇨 건조·성형을 통한 가축분뇨 고체연료화 기술은 과거 관련 제도의 미흡으로 기술 보급이 제한되었으나 최근 「가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시」 (ME, 2015)를 통해 가축분뇨 고체연료의 품질기준이 제도화되면서 향후 기술 보급이 확대될 전망이다.

일반적으로 혐기소화 기술은 총고형물 (TS; total solid) 함량 10% 이하의 액상 또는 슬러리상의 물질을 대상으로 하

는 습식 (wet) 혐기소화 기술과 총고형물 함량 15% 이상의 고상의 물질을 대상으로 하는 건식 (dry) 혐기소화기술로 구분하고 있다 (Yoon, 2013). 국내에 보급되고 있는 혐기소화 기술은 돼지의 사육과정에서 발생하는 양돈 슬러리를 대상으로 하는 습식 혐기소화 기술에 국한하고 있다. 그러나 한우, 젓소의 톱밥우사 배출물과 같이 상대적으로 수분함량이 적은 고상 가축분뇨의 혐기소화 사례는 전무한 실정이다. 국외에서는 ten Brummeler et al. (1991)가 음식물쓰레기와 같은 도시고형폐기물에 관한 건식 혐기소화 연구를 기반으로 음식물쓰레기의 건식 혐기소화 기술이 다수 상용화 보급 되었으나 한우, 젓소 사육사에서 배출되는 고상 가축분뇨에 대한 혐기소화 연구는 최근에야 진행되고 있으며, Macias-Corral et al. (2008)는 젓소분뇨와 도시고형폐기물, 농산부산물 등의 병합소화 (co-digestion)을 통한 회분식 건식 혐기소화 연구를 보고한 바 있다. 국내에서는 최근에 들어서야 국내 한우, 젓소의 사육과정에서 발생하는 고상 가축분뇨의 에너지화 연구를 진행하고 있으며, 고상 가축분뇨의 특성 및 건식 혐기소화 평가방법에 관한 연구 (Choi and Lee, 2015), 고상 가축분뇨의 혐기적 가수분해를 통한 건식, 습식 혐기소화공정 체계 연구 (Ahn et al., 2014) 사례가 보고되고 있다. 이와 함께 최근 가축분뇨 고체연료화 기술에 관한 연구가 진행되어 한우 및 젓소의 톱밥우사에서 발생하는 고상 가축분뇨 물질을 대상으로 분뇨의 발생 특성, 이화학적 성상, 발열량, 대기오염물질 발생량 등의 분석을 통해 기술 적용성 및 고체연료의 품질기준이 검토된 바 있다 (ME, 2013).

가축분뇨 고체연료의 경우 고체연료 생산을 위한 건조·성형 공정의 기술적 난이도가 낮아 건조·성형 공정에 대한 연구는 매우 미미한 상황이며, 가축분뇨 고체연료 연소를 통한 회수가능한 에너지량 (발열량)이 원료 또는 제품의 수분 함량에 따라 크게 차이를 보이고 있어 건조과정에서 소비되는 건조에너지의 과다 투입으로 인한 경제성 문제가 지적되고 있는 상황이다 (ME, 2013).

특히 고체연료의 발열량은 크게 고위발열량 (HHV; higher heating value)과 저위발열량 (LHV; lower heating value)으로 구분하는데, 일반적으로 고위발열량은 불 (Bomb) 열량계를 이용하여 측정한 건조시료의 발열량으로 연료의 최대 연소 발열량을 의미하고, 저위발열량은 연료에 포함되어 있는 수분이나 연소 생성물인 수분이 연소시 기화하면서 소비하는 수분잠열을 고위발열량에서 제외한 발열량을 의미한다. 실질적으로 연료의 연소과정에서 회수·이용 가능한 발열량은 저위발열량이다. 따라서 수분함량과 저위발열량은 서로 반비례하는 상관관계를 가지며, 연료로서의 이용효율성을 높이기 위하여 최근에 고시한 「가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시」 (ME, 2015)에서는 가축분뇨 고체연료의 품질기준에서 수분함량을 20% 이하로 정

하고 있다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 주요 축종인 한우, 젖소의 톱밥우사에서 발생하는 고상가축분뇨의 바이오에너지 생산 이용을 위한 합리적인 에너지화 기술 적용을 위하여 한우 톱밥우사에서 발생하는 고상 가축분뇨의 발생 특성을 조사 분석하였으며, 발생 고상 가축분뇨의 성상 특성을 기준으로 바이오가스화 기술과 고체연료화 기술 적용에 따른 바이오 에너지 생산 및 에너지 전환 효율을 비교·분석하였다.

### Materials and Methods

**시험재료** 본 연구에서는 경기도 용인에 위치한 개방형 톱밥우사 구조를 채택하고 있는 상시사육두수 80두의 한우 농가에서 2014년 11월부터 4개월간 입식 후 7일부터 3주간격 (7, 28, 49, 70, 91, 112일)으로 톱밥우사 분뇨 배출물을 채취하여 시험에 공시하였다. 시료채취를 위한 한우 사육사는 가로 4 m, 세로 8 m의 평사구조로서 톱밥 5 cm 층을 깔 후 약 18개월령, 평균체중 450 kg의 비육 중기 (Mid-fattening period) 한우 3두를 입식하였다. 사료는 볏짚, 알팔파, 사료용 옥수수, 효소제 등을 자가에서 혼합 제조하고 조사료 40%, 농후사료 60%의 비율로 사료를 급여하였으며, 급여한 사료의 조성은 Table 1과 같다.

**이론적 메탄생산퍼텐셜 (B<sub>th</sub>)** 이론적 메탄생산퍼텐셜은 Boyle (1976)의 혐기적 유기물 분해 반응식 Eq. 1을 이용하여 시료의 원소분석 결과로부터 화학양론적으로 계산하였으며, Eq. 2를 이용하여 표준상태 (0°C, 1기압)에서 휘발성 고형물 (VS; volatile solid) 함량을 기준으로 이론적 메탄생산퍼텐셜을 산출하였다.

$$C_aH_bO_cN_dS_e + (a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2})H_2O \rightarrow (\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4})CH_4 \tag{Eq. 1}$$

$$+ (\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4})CO_2 + dNH_3 + eH_2S$$

$$B_{th-vS} (Nm^3 kg^{-1} - VS_{added}) = 22.4 \times \left[ \frac{(4a+b-2c-3d-2e)/8}{12a+b+16c+14d+32e} \right] \tag{Eq. 2}$$

**실험적 메탄생산퍼텐셜 (B<sub>i</sub>)** 실험적 메탄생산퍼텐셜 시험에 사용한 접종액 (Inoculum; I)은 전북 정읍에 위치하는 100 톤/일 규모 혐기소화 시설에서 발생하는 혐기 소화액을 채취하였으며 (Table 2), 채취한 혐기소화액은 2 mm 체를 통과시킨 후, 38°C 항온 배양기에서 배양하여 소화액 중의 이분해성의 유기물과 잔여가스를 충분히 제거하여 접종액으로 사용하였다. 투입기질 (Substrate; S)은 기질의 휘발성 고형물 함량과 접종액의 휘발성 고형물 함량의 비율 (S/I ratio)이 0.5가 되도록 조절하여 3반복으로 회분식 혐기반응기를 준비하였다. 메탄생산퍼텐셜의 측정을 위한 혐기반응기는 160 mL serum bottle을 이용하였고, 상층부는 N<sub>2</sub> 가스를 충전하여 산소가 없는 혐기적 상태에서 완전 밀폐시켜 중온 (38°C) 배양기에서 90일간 배양하였다. 또한 접종액에서 발생하는 메탄가스를 보정하기 위해 접종액만을 투입한 3반복의 바탕시험용 혐기반응기를 시료와 동일한 조건에서 운영하였다. 혐기반응기의 바이오가스 발생량 측정은 2% 황산에 resazurin 0.1%를 함유하는 수주차식 가스량 측정기를 사용하였으며 (Williams, 1996; Beuvinck, 1992), 발생 바이오가스는 Eq. 3과 같이 온도와 수분을 보정하여 표준상태 (0°C, 1기압)에서의 건조 가스 부피로 환산하여 누

**Table 1. Composition of feeding material used in the mid-fattening of beef cattle.**

Items	Dry matter	Crude protein	Ether extract	Crude fiber	Ash	Nitrogen free extract
----- % (w/w) -----						
Values	97.77	12.65	4.89	11.47	9.81	58.95

**Table 2. Chemical composition of inoculum.**

Parameter	pH	Total solid	Volatile solid	Fixed solid	Total suspended solid	Volatile suspended solid	Fixed suspended solid	COD <sub>C</sub>	Total nitrogen	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
----- % (w/w) -----										
Inoculum	8.79 (0.1) <sup>†</sup>	3.21 (0.13)	1.73 (0.08)	1.48 (0.05)	1.91 (0.23)	1.24 (0.08)	0.67 (0.16)	1.89 (0.26)	0.57 (0.06)	0.41 (0.04)

<sup>†</sup>Number in Parentheses means the standard deviation (n = 3).

적 메탄생산곡선을 구하였다. Eq. 3에서  $V_{dry\ gas}$ 는 표준상태 (0°C, 1기압)에서의 건조 가스의 부피, T는 반응기의 운전온도,  $V_{wet\ gas\ at\ T^\circ C}$ 는 반응기 운전온도 (38°C)에서의 습윤 가스의 부피, P는 가스의 부피측정 당시의 대기압,  $P_T$ 는 T°C에서의 포화수증기압 (mmHg)이며, 본 연구에서는 P를 760 mmHg로 간주하고  $P_T$ 는 38°C에서의 포화수증기압으로 계산하였다.

$$V_{dry\ gas} = V_{wet\ gas\ at\ T^\circ C} \times \frac{273}{(273 + T)} \times \frac{(P - P_T)}{760} \quad (\text{Eq. 3})$$

**고위발열량 및 저위발열량 측정** 한우 톱밥우사 배출물의 건조기준 (dry basis) 고위발열량 (HHV; higher heating value)은 105°C에서 24시간 건조한 후 Bomb 열량계 (model 6400, Parr Instrument Company, USA)를 이용하여 산소압력 30 atm, 질소압력 5 atm, 재킷 (Jacket) 온도 30°C 조건에서 측정하였다. 한우 톱밥우사 배출 원물 (fresh weight)의 습윤기준 (wet basis) 고위발열량은 Eq. 5와 같이 원물의 수분함량을 고려하여 산출하였으며, 습윤기준 저위발열량 (LHV; lower heating value)은 Eq. 6를 이용하여 원물의 수분상태의 변화에 따른 저위발열량을 산출하였다. Eq. 4에서 HV (heating value by Bomb calorimeter)는 Bomb 열량계를 이용하여 측정된 측정발열량을 의미하며, Eq. 5에서 WC (Water content)는 증량수분함량을 의미한다. 또한 Eq. 6에서 H는 건조 시료의 수소 (H) 원소 함량을 의미한다.

$$HHV(\text{kcal/kg; dry basis}) = HV(\text{kcal/kg}) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$HHV(\text{kcal/kg; wet basis}) = HV(\text{kcal/kg}) \times \left[ \frac{100 - WC(\%)}{100} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

$$LHV(\text{kcal/kg; wet basis}) = HHV(\text{kcal/kg; wet basis}) - 600 \times \left[ 9 \times H \times \left( 1 - \frac{WC}{100} \right) + \frac{WC}{100} \right] \quad (\text{Eq. 6})$$

**시험분석** 바이오가스 성분분석은 TCD (Thermal conductivity detector)가 장착된 Gas chromatography (Clarus 680, PerkinElmer, USA)를 이용하였다. 컬럼은 HayesepQ packed column (3 mm × 3 m, 80~100 mesh size)을 이용하였으며, 고순도의 아르곤 (Ar) 가스를 이동상으로 사용하여 30 mL min<sup>-1</sup>의 운전 상태에서 주입부 (Injector) 온도 150°C, 컬럼부 (Column oven) 90°C, 검출부 (Detector) 150°C에서 분석하였다 (Sorensen et al., 1991). 시료의 원소분석은 원소분석기 (EA1108, Thermo Finnigan, CA)를 사

용하였으며, 총고형물 (TS; total solid), 휘발성 고형물 (VS; volatile solid), 고정성 고형물 (FS; fixed solid), 총부유성 고형물 (TSS; total suspended solid), 휘발부유성 고형물 (VSS; volatile suspended solid), 고정부유성 고형물 (FSS, fixed suspended solid), 화학적산소요구량 (COD; chemical oxygen demand), 암모니아태 질소 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), 총질소 (TN; total nitrogen) 등은 표준분석법 (APHA, 1998)에 따라 3반복으로 분석하였다.

## Results and Discussion

**공시재료의 이화학적성** 본 연구에서 사육기간별 한우 톱밥우사에서 채취한 고상 가축분뇨의 화학적 성상은 Table 3과 같다. 사육기간 중 배출된 고상 가축분뇨 원물의 수분함량은 55.72~70.02% 범위를 보였으며, 총고형물 함량은 29.98~44.28%, 휘발성 고형물 함량은 23.53~24.47% 범위를 보여 사육기간 중 고상 가축분뇨의 수분함량 변이가 큰 것으로 나타났다. 또한 사육기간 중 고상 가축분뇨의 고형물 특성을 파악하기 위하여 총고형물 중의 고형물 조성 특성을 분석한 결과 Table 4와 같다. 사육기간 경과에 따른 휘발성 고형물은 사육초기 (7일) 총고형물의 81.7%에서 사육말기 (112일) 77.3% 수준으로 감소하였으며, 회분의 함량을 나타내는 고정성 고형물의 함량은 사육초기 (7일) 총고형물의 18.3%에서 사육말기 (112일) 22.7%로 증가하였다. 총질소의 함량은 사육초기 (7일) 총고형물의 2.6%에서 사육중기 (49일)에 3.7%까지 증가하다가 사육말기 (112일)에는 3.0% 수준으로 감소하였다. 암모니아태 질소도 총질소와 비슷한 경향을 나타내어 사육초기 (7일) 총고형물의 0.7%에서 1.1%까지 증가하였다가 사육말기 (112일) 0.6% 수준으로 감소하였다. 톱밥우사 배출물의 원소구성은 Table 5에 나타내었으며, 탄소 (C) 함량의 경우 36.00~39.09%, 수소 (H) 함량의 경우는 4.80~5.46%의 범위를 보였다. 산소 (O) 함량은 사육초기 (7일) 37.82%에서 사육중기 (70일) 19.18%까지 감소하였다가 사육말기 (112일) 22.09%로 증가하는 경향을 보였으며, 질소 (N) 함량은 사육초기 (7일) 2.29%에서 사육말기 (112일) 2.76%로 증가하였다. 한우 톱밥우사 배출물의 측정발열량은 사육초기 (7일) 4,040 kcal kg<sup>-1</sup>에서 점차 감소하여 사육말기 (112일) 3,790 kcal kg<sup>-1</sup>까지 감소하였다. Kim and Lee (2013)는 우분, 우분과 톱밥의 혼합을 통해 제조한 고체연료의 측정발열량 분석에서 각각 우분 3,578 kcal kg<sup>-1</sup>, 우분과 톱밥 혼합물 3,792 kcal kg<sup>-1</sup>을 보고한 바 있으며, Lee (2010)는 우분 톱밥우사 배출물의 열화학적 특성 분석에서 건조 우분의 측정발열량을 3,560 kcal kg<sup>-1</sup>으로 보고한 바 있어 본 연구결과에서의 한우분뇨 측정발열량과 유사한 측정발열량 범위를 나타내었다. 또한 본 연구에서 채취한 한우 톱밥우사 배출물의 발생특성 변화는 동절

**Table 3. Chemical composition of the feedlot manure discharged from beef cattle barn during the mid-fattening period.**

Mid-fattening period	Total solid	Volatile solid	Fixed solid	Total suspended solid	Volatile suspended solid	Fixed suspended solid	COD <sub>Cr</sub>	Total nitrogen	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Water content
days	% (w/w)									
7	32.06 (0.40) <sup>†</sup>	26.20 (0.62)	5.87 (0.30)	29.82 (0.30)	25.47 (0.34)	4.36 (0.40)	15.43 (0.18)	0.84 (0.02)	0.23 (0.01)	67.91 (0.40)
28	29.98 (0.38)	23.53 (0.10)	6.45 (0.43)	24.56 (0.47)	21.02 (0.07)	3.54 (0.52)	28.68 (2.11)	0.94 (0.01)	0.32 (0.01)	70.02 (0.38)
49	33.03 (0.75)	25.93 (0.70)	7.10 (0.10)	26.63 (0.84)	20.40 (0.80)	6.23 (0.05)	29.70 (0.46)	1.21 (0.10)	0.27 (0.01)	66.97 (0.75)
70	32.79 (0.30)	25.18 (0.42)	7.62 (0.19)	24.98 (0.75)	23.37 (0.52)	1.61 (0.50)	15.72 (3.34)	1.11 (0.12)	0.27 (0.02)	67.21 (0.60)
91	44.28 (1.51)	33.85 (1.10)	10.44 (0.45)	39.11 (2.07)	33.13 (1.02)	5.97 (1.02)	16.78 (1.88)	1.45 (0.10)	0.27 (0.06)	55.72 (1.51)
112	35.55 (1.41)	27.47 (0.83)	8.08 (0.60)	29.99 (0.54)	26.26 (0.73)	3.73 (0.36)	16.68 (0.30)	1.07 (0.04)	0.21 (0.005)	64.45 (1.41)

<sup>†</sup>Number in Parentheses means the standard deviation (n = 3).

**Table 4. Solid composition characteristics of the feedlot manure discharged from beef cattle barn during the mid-fattening period.**

Mid-fattening period	Volatile solid	Fixed solid	Total suspended solid	Volatile suspended solid	Fixed suspended solid	Total nitrogen	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
days	% (w/w)						
7	81.7	18.3	93.0	79.4	13.6	2.6	0.7
28	78.5	21.5	81.9	70.1	11.8	3.1	1.1
49	78.5	21.5	80.6	61.8	18.9	3.7	0.8
70	76.8	23.2	76.2	71.3	4.9	3.4	0.8
91	76.4	23.6	88.3	74.8	13.5	3.3	0.6
112	77.3	22.7	84.4	73.9	10.5	3.0	0.6

**Table 5. Elemental composition and heating value of the feedlot manure discharged from beef cattle barn during the mid-fattening period.**

Mid-fattening period	Elemental composition					HV <sup>†</sup>
	C	H	O	N	S	
days	% (w/w)					kcal/kg
7	39.09	5.46	37.82	2.29	nd.	4,040
28	38.83	5.21	34.15	2.48	nd.	3,960
49	36.00	4.80	19.65	2.79	nd.	3,890
70	38.05	5.02	19.18	2.70	nd.	3,950
91	36.50	4.80	20.97	2.62	nd.	3,840
112	37.67	5.05	22.09	2.76	nd.	3,790
Average	37.69	5.06	25.64	2.61	-	3,912

<sup>†</sup>Heating value by Bomb calorimeter.

기 중 개방형 우사에서 얻은 결과이며 사육 초·중기 낮은 외기 기온과 습도 조건에서 미생물 활성이 낮아 한우 분뇨에서 기인하는 유기물이 축적되다가 사육말기 외기 기온과 습도의 상승으로 미생물의 활성과 암모니아의 휘산량이 증가

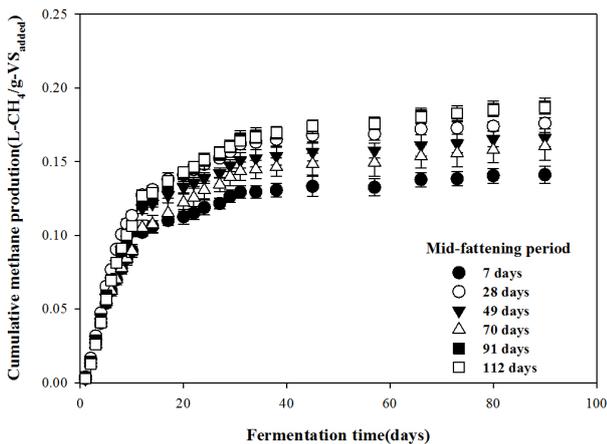
하면서 나타난 변이특성으로 파악된다. 따라서 본 연구결과는 낮은 외기 기온과 습도로 인해 톱밥우사 배출물 내의 미생물 활성이 매우 낮게 유지되는 특정한 환경에서 얻어진 결과로서 외기 기온과 습도가 상승하는 하절기의 정상변화

와는 차이가 있을 것으로 판단된다.

**바이오가스화 에너지 전환 특성** 본 연구에서는 한우 톱밥우사에서 배출되는 고상 가축분뇨의 바이오가스화를 통한 에너지 전환특성을 파악하고자 고상 가축분뇨의 이론적 메탄생산퍼텐셜, 실험적 메탄생산퍼텐셜을 구하였고, 원물량을 기준으로 얻어지는 에너지 (kcal)량을 산출하였다. Fig. 1은 사육기간 중 한우 톱밥우사에서 발생하는 고상 가축분뇨의 누적 메탄생산 곡선을 나타내었다. 또한 Table 6은 한우 톱밥우사에서 발생하는 고상 가축분뇨의 메탄생산 퍼텐셜과 메탄생산량 그리고 생산된 메탄가스의 에너지 가치를 나타내었다. 이론적 메탄생산퍼텐셜 ( $B_{th}$ )은 사육초기 (7일)  $0.437 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ 에서 사육중기 (70일)  $0.633 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ 까지 증가하였다가 사육말기  $0.589 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ 로 감소하였다. 또한 실험적 메탄생산 퍼텐셜 ( $B_u$ )은 사육초기 (7일)  $0.141 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ 에서 점차 증

가하여 사육말기 (112일)  $0.187 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ 로 증가하였다. 이론적 메탄생산퍼텐셜은 고상 가축분뇨의 원소구성을 기초로 산출한 이론적 최대 메탄생산량으로 사육기간 중 이론적 메탄생산퍼텐셜의 약 25~38%가 실제 메탄으로 전환 ( $B_u/B_{th}$ )되는 것으로 나타났다. 이는 Kim et al. (2011)이 양돈슬러리에서의 이론적 메탄생산퍼텐셜  $0.525 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ 에 실험적 메탄생산퍼텐셜  $0.360 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ , 메탄전환율 ( $B_u/B_{th}$ ) 68.6%와 비교하면 매우 낮은 메탄전환율을 나타내었다. 고상 가축분뇨에서 나타나는 낮은 메탄전환율은 고상가축분뇨에 다량으로 함유되어 있는 목질계 바이오매스인 톱밥의 낮은 혐기적 유기물 분해 특성에서 기인하는 것으로 판단된다.

실험적 메탄생산퍼텐셜을 적용하여 고상 가축분뇨 원물당 (kg) 메탄 생산량은 사육초기 (7일)  $0.037 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-Manure}$ 를 나타냈으며, 사육후기 (91일)에는  $0.065 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-Manure}$ 까지 증가하였다가 사육말기 (112일)에는  $0.051 \text{ Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-Manure}$ 로 감소하였다. 사육기간 중 고상 가축분뇨 원물당 (kg) 생산된 바이오가스의 에너지 가치는 메탄 생산량과 동일한 경향을 나타내었다. 저위발열량은  $316 \text{ kcal kg}^{-1}$ 에서 사육후기 (91일)에는  $560 \text{ kcal kg}^{-1}$ 까지 증가 하였다가 사육말기 (112일)에는  $439 \text{ kcal kg}^{-1}$ 의 에너지 가치를 보이는 것으로 나타났다. 여기서 메탄가스의 경우 수분을 포함하지 않는 건조 기체로서 고위발열량은  $9,500 \text{ kcal kg}^{-1}$ 이며, 저위발열량은 연소생성물에 포함되는 수분만을 고려하여  $8,560 \text{ kcal kg}^{-1}$ 이다. 따라서 메탄가스의 고위발열량과 저위발열량은 수분함량에 영향이 없어 큰 차이를 나타내지 않는 특성이 있다.



**Fig. 1. Cumulative methane production of the feedlot manure discharged from beef cattle barn during the mid-fattening period by BMP assay.**

**고체연료화 에너지 전환 특성** 고상 가축분뇨의 고체 연료화시 에너지 전환특성은 Table 7에 나타내었다. 한우 톱밥우사에서 배출되는 고상 가축분뇨의 원물기준 (습기준)

**Table 6. Methane potential, production and caloric value produced by anaerobic digestion in the feedlot manure discharged from beef cattle barn during the mid-fattening period.**

Mid-fattening period	Methane potential & production			Caloric value	
	$B_{th}^{\dagger}$	$B_u^{\ddagger}$	MP <sup>§</sup>	HHV <sup>¶</sup>	LHV <sup>§</sup>
days	----- $\text{Nm}^3 \text{ kg}^{-1}\text{-VS}_{added}$ -----			----- $\text{kcal kg}^{-1}\text{-Manure}$ -----	
7	0.437	0.141	0.037	351	316
28	0.462	0.176	0.041	393	354
49	0.606	0.166	0.043	409	369
70	0.633	0.160	0.042	399	359
91	0.593	0.188	0.065	621	560
112	0.589	0.187	0.051	487	439
Average	0.553	0.170	0.047	443	400

<sup>†</sup>Theoretical methane potential, <sup>‡</sup>Biochemical methane potential, <sup>§</sup>Methane production, <sup>¶</sup>Higher heating value calculated by the caloric unit of  $9,500 \text{ kcal/Nm}^3\text{-methane}$ , <sup>§</sup>Lower heating value calculated by the caloric unit of  $8,560 \text{ kcal/Nm}^3\text{-methane}$ .

**Table 7. Methane potential, production and caloric value produced by anaerobic digestion in the feedlot manure discharged from beef cattle barn during the mid-fattening period.**

Mid- fattening period	Water content	Caloric value			DE <sub>20</sub> <sup>¶</sup>	Net LHV <sub>20</sub> <sup>§</sup>
		HHV <sup>†</sup> (wet basis)	LHV <sup>‡</sup> (wet basis)	LHV <sub>20</sub> <sup>§</sup>		
days	%(w/w)	----- kcal kg <sup>-1</sup> -Manure -----				
7	67.91	1,296	849	2,876	403	2,473
28	70.02	1,187	747	2,823	417	2,406
49	66.97	1,285	855	2,785	396	2,389
70	67.21	1,295	860	2,823	398	2,425
91	55.72	1,700	1,271	2,745	321	2,424
112	64.45	1,347	911	2,694	379	2,315
Average	65.38	1,352	916	2,791	386	2,405

<sup>†</sup>Higher heating value in the wet basis, <sup>‡</sup>Lower heating value in the wet basis, <sup>§</sup>Lower heating value in the water content of 20%, <sup>¶</sup>Drying energy requested to the water content of 20% (Drying energy unit = 539 kcal/kg-water), <sup>§</sup>Net lower heating value in the water content of 20% (Net LHV<sub>20</sub> = LHV<sub>20</sub> - DE<sub>20</sub>).

고위발열량은 사육기간 중 1,187~1,700 kcal kg<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. 따라서 에너지의 회수·이용이 가능한 저위발열량은 747~1,271 kcal kg<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. 고상 가축분뇨의 경우 사육기간 중 날씨, 습도 등의 변화와 함께 고상 가축분뇨 중의 수분함량의 변이가 큰 특성이 있으며, 수분함량이 많은 경우 원물의 고위 및 저위발열량이 측정발열량과 비교하여 크게 감소하는 특성이 있다. 따라서 「가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에 관한 고시」(ME, 2015)에서는 가축분뇨 고체연료의 수분함량을 20%이하로 규정하고 있으며, 본 연구에서 채취한 고상 가축분뇨를 수분함량 20%로 건조시키는 경우 저위발열량은 2,694~2,876 kcal kg<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. 이때, 수분의 기화열 (539 kcal/kg-water)만을 고려하여 고상 가축분뇨를 수분함량 20% 수준까지 건조하는데 필요한 건조에너지를 산출한 결과 321~416 kcal kg<sup>-1</sup>의 범위를 보였다.

#### 바이오가스화 및 고체연료화 에너지 전환 특성 비교

고상 가축분뇨의 바이오가스화의 경우 사육기간 중 원물에서 발생하는 바이오가스의 양은 평균 0.047 Nm<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>-Manure로 나타났다. 발생 바이오가스를 연소하는 경우 저위발열량은 평균 400 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure이었다. 또한 고상 가축분뇨의 고체연료화의 경우 원물의 저위발열량은 평균 916 kcal kg<sup>-1</sup>이었다. 따라서 고상 가축분뇨 원물을 직접 혐기소화 하는 경우와 원물을 직접 연소하는 경우 회수·이용 가능한 에너지의 양은 직접연소가 바이오가스화와 비교하여 약 2.3배 높은 에너지 전환 효율을 나타내었다. 또한 고상 가축분뇨 원물을 가축분뇨 고체연료의 품질기준인 수분함량 20%로 제조하는 경우 건조 고체연료의 저위발열량은 2,791 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure이었으며, 투입되는 건조에너지는 약 386 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure으로 나타나 수분 20%로 건조하는

데 소비되는 에너지를 제외한 순발열량은 2,405 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure이었다. 따라서 고상 가축분뇨 원물을 직접 혐기소화 하는 경우와 원물을 건조시켜 고체연료로 제조하는 경우를 비교하면 회수·이용 가능한 에너지의 양은 고체연료화가 약 6배의 높은 효율을 나타내었다.

## Conclusion

본 연구는 한우 톱밥우사에서 배출되는 고상 가축분뇨의 효율적인 에너지 자원화를 위해 바이오가스화 방식과 고체연료화 방식을 비교 검토하였다. 이를 위해 고상 가축분뇨는 동절기 기간 중 경기도 용인에 위치한 비육 중기의 한우 톱밥우사에서 4개월간 정기적으로 채취하여 발생특성을 분석하였다. 채취한 고상 가축분뇨의 메탄생산퍼텐셜과 발열량을 측정하여 발생 원물을 기준으로 고상 가축분뇨의 바이오가스화에 따른 에너지 생산량과 고체연료화에 따른 에너지 생산량을 비교·분석하였다. 한우 톱밥우사에서 배출되는 고상 가축분뇨는 한우의 입식 전에 투입하는 톱밥과 분뇨가 혼합 배출되는 특성을 가지고 있다. 사육기간 중 외부기온과 날씨의 영향으로 고상 가축분뇨의 수분함량에 변이가 큰 특성이 있었으며, 사육기간 중 수분함량은 55.72~70.02% 범위를 보였다. 일반적으로 사육기간 중 배설한 한우 분뇨 중의 수분은 지속적으로 증발하는 특성이 있어 사육기간의 경과에 따라 총고형물 함량은 29.98~44.28%, 휘발성 고형물 함량은 23.53~24.47% 범위를 보였다. 또한 고상 가축분뇨 중 염분을 포함하는 회분의 함량이 증가하는 특성을 보였다. 발생 고상 가축분뇨 원물의 바이오가스 생산량은 사육기간 중 평균 0.047 Nm<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>-Manure이었으며, 생산된 메탄가스에서 비롯되는 저위발열량은 사육기간 중 평균 400 kcal kg<sup>-1</sup>-Manure이었다. 또한 고상 가축분뇨 원물의

저위발열량은 사육기간 중 평균  $916 \text{ kcal kg}^{-1}\text{-Manure}$ 이었으며, 가축분뇨 고체연료 품질기준인 수분함량 20%에서의 저위발열량은 사육기간 중 평균  $2,791 \text{ kcal kg}^{-1}\text{-Manure}$ 이었다. 이때 원물의 고상 가축분뇨를 수분함량 20%까지 건조하는데 소요되는 건조에너지는 사육기간 중 평균  $386 \text{ kcal kg}^{-1}\text{-Manure}$ 으로 나타나 건조에 투입되는 에너지를 제외한 수분함량 20%인 고상가축분뇨 고체연료의 순발열량은  $2,405 \text{ kcal kg}^{-1}\text{-Manure}$ 으로 나타났다. 따라서 원물을 기준으로 하였을 때 고상 가축분뇨의 에너지 자원화에 있어 혐기소화에 의한 바이오가스화보다 직접 연소를 통한 고체연료화가 약 2.3배 높은 에너지 생산효율을 보였으며, 고상 가축분뇨를 건조시켜 수분함량을 20%의 고체연료로 제조하는 경우 약 6.0배의 높은 에너지 생산 효율을 나타내었다. 본 연구는 바이오가스 및 고체연료 제조를 위한 공정 설치비 및 운영비는 고려하지 않고 원물을 기준으로 기술적 측면에서 에너지 전환 효율만을 검토한 것이다. 특히, 바이오가스화의 경우 전력변환을 통한 매진 소득과 소화액비 활용 등의 장점이 있는 반면, 고체연료인 경우 안정적인 수요처 확보에 어려움이 있다. 따라서 향후 고상 가축분뇨의 효율적인 에너지화 시설 도입을 위해서는 바이오에너지 전환기술별 에너지 활용특성 고려와 함께 시설설치비 및 운영비를 고려하는 경제성 검토가 요구된다.

## References

- Ahn, H., S. Lee, E. Kim, H. Lee, and Y. Sung. 2014. Effects of thermal pretreatment temperature on the solubilization characteristics of dairy manure for dry anaerobic digestion. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47(2):127-132.
- APHA. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edition. American Public Health Association, Washington, D.C..
- Beuvink, J.M., S.F. Spoelstra, and R.J. Hogendrop. 1992. An automated method for measuring the time course of gas production of feedstuffs incubated with buffered rumen fluid. *Neth. J. Agri. Sci.* 40:401-407.
- Boyle, W.C. 1976. Energy recovery from sanitary landfills a review. In: Schlegel HG, Barnea J, editors. *Microbial Energy Conversion*. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Choi, Y.J. and S.R. Lee. 2015. Review of database configuration of manure characteristics, analysis methods, bio-methane potential test for high solid manure recycling. *J. Anim. Environ. Sci.* 21(1):9-20.
- Kim, S.H., C.H. Kim, and Y.M. Yoon. 2011. Bioenergy and material production potential by life cycle assessment in swine waste biomass. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1245-1251.
- Kim, S.J. and J.H. Lee. 2013. A study on the possibility that livestock waste to RDF. *J. of KORRA*, 21(2):53-57.
- Lee, G.H. 2010. Thermal and physicochemical characteristics of solid fuel extruded with cattle feedlot manure. *J. of Biosystems Eng.* 35(1):64-68.
- Macias-Corral, M., Z. Samani, A. Hanson, G. Smith, P. Funk, H. Yu, and J. Longworth. 2008. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. *Bioresource Technology* 99:8288-8293.
- MAFRA (Ministry of agriculture, food and rural affairs). 2013. The plan for utilization of livestock manure in middle and long time perspective. MAFRA, Sejong, Korea (in Korean).
- ME (Ministry of environment). 2013. The study for the establishment of quality and classification criteria of solid fuel using livestock manure. ME, Sejong, Korea (in Korean).
- ME (Ministry of environment). 2014. the facts of bioenergy conversion facility in 2013. ME, Sejong, Korea.
- ME (Ministry of environment). 2015. Bulletin for the set-up of solid fuel production facility using livestock manure. ME, Sejong, Korea (in Korean).
- New & renewable energy data center. ([http://kredc.kier.re.kr/kier/Default\\_New.aspx](http://kredc.kier.re.kr/kier/Default_New.aspx))
- ten Brummeler, E., H.C.J.M. Hobach, and I.W. Koster. 1991. Dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 50:191-209.
- Williams, A., M. Amat-Marco, and M.D. Collins. 1996. Phylogenetic analysis of *Butyrivibrio* strains reveals three distinct groups of species within the *Clostridium* subphylum of the gram-positive bacteria. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 46:195-199.
- Yoon, Y.M. 2014. The strategy for the utilization of domestic biomass. *World Agriculture* 162(2):73-97 (in Korean).
- Yoon, Y.M. 2013. Status and development way of biogas production technology and policy using livestock waste. *J. of KORRA*, 21(2):18-40.