바이오시스템공학 (*J. of Biosystems Eng.*)
Vol. 35, No. 1, pp.64~68 (2010. 2)

우분 성형 고형연료의 열 및 물리화학적 특성

이귀현

Thermal and Physicochemical Characteristics of Solid Fuel Extruded with Cattle Feedlot Manure

G. H. Lee

Abstract

Cattle feedlot manure could be used effectively as the solid fuel for heating of agricultural facilities. Therefore, this study was carried out to investigate the thermal and physicochemical characteristics of solid fuel extruded with cattle feedlot manure. Calorific values of the solid fuel extruded with cattle feedlot manure, which was dried to the moisture contents of 0.0% (w.b) and 35.0% (w.b,) were 14,906 kJ/kg and 11,797 kJ/kg, respectively. Calorific value of extruded solid fuel was linearly decreased with the increase of moisture content. The first, second, and third reaction point during thermal pyrolysis of solid fuels extruded with cattle feedlot manure was investigated as 108.1℃, 312.2℃, and 459.4℃, respectively. The maximum reaction point was presented at the temperature of 312.2℃. Weight loss of extruded cattle feedlot manure during thermal pyrolysis until 600℃ was reached to about 60%. Volume decrease of initial extruded cattle feedlot manure was 61% during drying for the use as solid fuel. Maximum strength of extruded cattle feedlot manure, which was dried as the moisture content of 10% (w.b.) was 41,9150 N/m^2. Ignition gas analysis of extruded cattle feedlot manure presented that it has small amount of NO_x and SO_x. It was shown that dried cattle feedlot manure had main components of C and O including small amount of Mg, Si, and Ca.

Keywords : Solid fuel, Cattle feedlot manure, Alternative energy, Agricultural energy, Heating of agricultural facilities

1. 서 론

우리나라의 시설원예 면적은 1995년 43,131 ha에서 2007년에는 53,036 ha로 크게 증가하였으며, 그 중 가온재배 면적은 12,962 ha로 시설면적의 24.4%를 차지하고 있고, 유류사용(대부분 경유 또는 중유 등을 사용) 시설이 93%로 농가의 농업경영비(50% 이상) 부담이 급격히 상승하고 있다. 또한 농업 면세유 공급량은 1995년 기준으로 147만 kL에서 2006년에는 248만 kL로 101만 kL가 증가하였고, 2006년 시설원예 난방유류 소비량은 135만 kL로 면세유 공급량의 54%를 차지하였으며, 2006년 면세유류 농민구입액 및 감면세액은 각각 1조 6천억원 및 1조 3천억원으로 총 면세류 비용은 2조 9천억원의 막대한 에너지 비용이 소요되고 있어 농업시설을 위한 저비용의 대체에너지 개발이 시급한 실정이다 (National Institute of Agricultural Engineering, 2006).

최근 고농도 축산 폐수인 가축(소, 돼지 닭, 등)의 분뇨를 처리함에 있어서 기존의 퇴비화 방법과 더불어 화훼단지, 축사 등의 농가에서 필요로 하는 저비용의 난방용 연료로서 사용할 수 있는 방법이 연구되고 있다(Lee, 2007). 축산폐기물은 고형연료화 함으로써 폐수처리도 겸할 수 있고, 만들어진 고형연료는 저장과 운반이 간편하며 탈취장치를 이용하여 분뇨의 냄새를 제거하기 쉬우므로 연료로 사용하는 데 거부감

This study was conducted by an assistance of Agriculture and Life Sciences Research Institute, Kangwon National University. The article was submitted for publication on 2009-10-21, reviewed on 2009-12-14, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-01-20.
The author is Gwi Hyun Lee, Professor, Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea. Corresponding author: G. H. Lee, Professor, Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea; Fax: +82-33-255-6406; E-mail; <ghlee@kangwon.ac.kr>.

을 줄일 수 있다(Kim and Kim, 2000). 축분은 점화성이 우수한 왕겨와 혼합하여 연소조건을 개선할 경우 지속적으로 연소가 가능하게 되어 난방용 연료로서 우수하게 사용할 수 있을 것이다(Son et al., 2000). 국외에서는 오래전부터 환경오염 저감 및 폐기물의 자원화 차원에서 축산폐기물 직접 연소하여 에너지원으로 사용하는 연구 연구가 활발히 수행되고 있다(Sweeten et al., 1986; Annamalai et al., 1987; Sweeten et al., 2003).

축산분뇨는 고농도 유기성분으로서 공장폐수와는 달리 중금속이 거의 없어 미생물에 의한 분해가 용이할 뿐만 아니라, 퇴비 및 연료로서의 가치가 인정되어 에너지자원화 및 재활용은 점점 그 중요성을 더해가고 있다. 일상적으로 사용하고 있는 연료인 도시가스, 프로판가스, 등유 등은 유기물이고, 유기물이 연소될 때에 발생하는 열과 힘을 우리들은 에너지로 이용한다. 가축분뇨는 사료가 가축의 체내에서 소화 흡수된 후에 남은 찌꺼기지만 아직 많은 유기물을 포함(70-80%)하고 있으므로 고형연료로 에너지 이용이 가능한 것은 매우 당연한 것이다.

현재 발생되는 축산폐기물 중 가장 높은 비율을 차지하는 것은 축산분뇨이며, 그만큼 환경오염과 직결된 분야이고, 환경을 보호하는 차원에서 축산분뇨는 당연히 자원화 되어야 하며 현재 자원화 기술로 이용되는 대표적인 세 가지는 퇴비화, 사료화 및 에너지화이고(Hong et al., 1999), 이중 퇴비화 및 사료화는 현재 실용화되어 쓰이고 있으나 에너지화에 대한 연구는 메탄발효에 의한 메탄가스생산에 치중하고 있는 실정이다. 경제성을 고려한다면 직접연소에 대한 고형연료로의 이용이 바람직하다 할 수 있다. 축산 농가에서 발효 퇴비화를 위해 사용하고 있는 톱밥은 자체 중량 보다 2배 이상의 기름을 흡착 할 수 있는 특징이 있고, 악취물질의 분해 작용이 있어 가축분뇨와 같은 유기성 폐기물을 혼합 처리하면 수분조절제 역할과 함께 성형이 가능하여 고형연료로 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구는 톱밥이 혼합된 우분을 적정하게 발효 및 건조시켜 성형기로 성형된 고형연료의 열 및 물리·화학적 특성을 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

생우분 및 성형우분의 열 및 물리화학적 특성을 분석하기 위해 2008년 9월 26일 강원도 횡성군 청일면 축산농가의 축사저장 생우분(그림 1a) 시료를 채취하였고, (주)이레가 제작하여 축산농가에 설치한 우분 고형연료화 장치로부터 반지름 약 2.8 cm 및 높이 약 6 cm 크기로 제조된 성형우분(그림 1b)을 실험재료로 사용하였다.

함수율별 성형우분의 발열량을 분석하기 위해 고형연료화 장치로부터 제조된 성형우분을 80℃의 건조기에서 건조하면서, 수시로 건조시간대별로 시료를 꺼내어 수분함량 및 발열량을 열량계(Model 1281, Parr Instrument Co., USA)를 이용하여 3반복 측정하였다.

건조 우분 시료의 열분해 특성은 SDT[Simultaneous, DTA (Differential Thermal Analyzer), TGA(Thermogravimetric Analyzer)]로 구성되어 있는 Thermal Analyzer(SDT-2960, TA Instrument, USA)를 사용하여 분석하였다. 여기서, 열분석을 위한 시료의 양은 5～10 mg을 취하였고, 분당 20℃로 승온시켜 질소 환경 하에서 0～600℃까지 열분해하면서 온도대별 누적 무게감소량(%)을 분석하였다.

건조에 따른 성형우분의 부피 감소 정도를 조사하기 위해 성형우분을 처음 채취한 시료(약 60% 함수율) 중에서 10개를 선별하여 각각의 높이와 반지름을 측정하였다. 측정한 재료는 80℃의 건조기에 24시간 건조시킨 후 건조된 10개 시료의 높이와 반지름을 다시 측정하여 건조에 따른 성형우분의 부피 감소율을 분석하였다.

성형우분(약 10% 함수율)의 압축강도를 분석하기 위해 성형우분을 반지름 2.5 cm, 높이 4.5 cm로 가공하였다. 성형우분의 압축강도는 만능시험기(SFM-20, United Calibration

(a) Raw cattle feedlot manure

(b) Extruded cattle feedlot manure

Fig. 1 Cattle feedlot manure for the use as the solid fuel for agricultural facilities.

Corporation, USA)에 13,345 N(3,000 lbf)의 Load Cell을 장착하여 압축시험을 3번 반복 수행하여 분석되었다.

성형우분의 연소 시 발생되는 연소가스를 분석하기 위해 20 kg의 건조 성형우분을 지름 50 cm 및 높이 80 cm의 원통형 금속으로 제작된 연소로에서 연소시킨 후 5분 간격으로 가스분석기(Testo 350-XL, Testo co., Germany)를 사용하여 연소가스를 측정하였다. 건조 생우분 및 톱밥이 포함된 건조 성형우분의 화학적 성분분석을 위해 전계 방사형 주사전자현미경(FE-SEM)(S4300, Chidach, Japan)을 이용하여 각 3개의 시료에 대한 원소분석을 수행하였다. 원소분석을 위한 시료는 일정 크기로 분쇄한 후 분쇄된 시료를 20 mesh 체를 이용하여 입도를 선별한 후 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

성형우분의 함수율별 발열량 분석결과 함수율이 0% 일 때 약 14,906 kJ/kg, 16% 일 때 약 13,405 kJ/kg, 19% 일 때 약 13,132 kcal/kg, 32% 일 때 약 11,797 kJ/kg, 35% 일 때 약 10,918 kJ/kg으로 함수율이 증가할수록 발열량은 감소함을 알 수 있었다. 함수율에 따른 성형우분의 발열량 값은 결정계수(r^2)가 0.98로 선형적으로 잘 표현됨을 알 수 있으며, 그림 2에 나타내었다. 따라서 본 연구결과에서 얻어진 선형 식은 수분함량이 알려지면 우분의 발열량을 예측하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

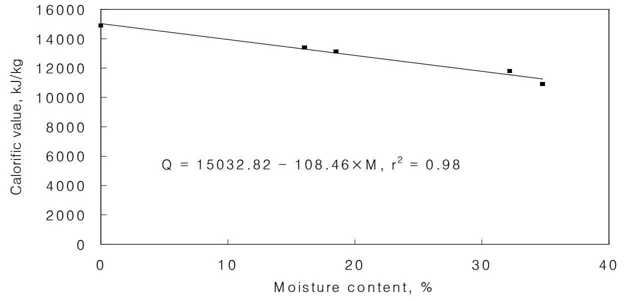

Fig. 2 Calorific value of solid fuel extruded with cattle feedlot manure according to moisture content (Q = Calorific value, M = Moisture content).

그림 3과 같이 우분의 열분해 반응 동안 유리수분 증발에 의한 점차적인 무게감소와 함께 108.1℃ 부근에서 1차 반응점을 보였다. 그 후 온도의 증가와 함께 휘발성 유기조성물이 열분해하는 2차 반응점 온도는 312.2℃로 최고 열분해 반응점을 나타냈다. 우분의 2차 열분해 동안 급속한 무게 감소를 보였으며, 고분자 유기물들이 열분해 하는 3차 반응점 온도는 459.4℃로 나타났다. 우분의 무게 감소율은 600℃까지의 열분해 동안 약 60%가 감소하는 것으로 나타났으며, 열분해 온도 600℃ 이하에서는 거의 회분만이 존재할 것으로 예상된다. 이러한 결과는 우분의 1차, 2차 및 3차 반응점이 각각 130℃, 309.4℃ 및 372.6℃이었으며, 유기물들이 열분해하는 4차 반응점 온도는 530℃를 나타낸 Lee(2007)의 연구결과와 매우 유사한 것으로 나타났다. 그러나 Lee(2007)의 연구결과에서 2차 및 3차 반응점과 4차 반응점이 본 연구에서는 각각 2차 및 3차 반응점으로 나타났고, 반응점 온도가 다소 낮았으나 이는 실험에 사용된 시료의 차이인 것으로 생각된다.

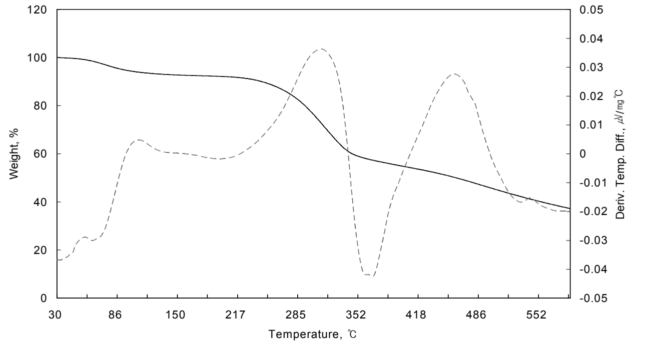

Fig. 3 Thermal analysis of cattle feedlot manure with TGA-TDA.

성형기로부터 성형 직후 약 60%의 함수율을 갖는 생 성형우분(함수율 약 60%)을 연료로 사용할 수 있게 건조한 후 건조에 따른 부피 감소율을 식 1에 의해 계산하였다. 성형우분의 건조에 따른 부피변화를 분석한 결과 평균적으로 전조 전의 부피 85.19 cm^3에서 건조 후의 부피 33.19 cm^3으로 약 61%의 부피가 감소함을 알 수 있었다. 수분함량이 약 10% 정도로 건조된 성형우분의 압축강도 시험결과를 그림 4와 같이 하중-변형곡선으로 나타내었고, 최고 압축강도는 419,150 N/m^2으로 나타났다. 여기서 최고압축강도는 파괴점의 하중을 시료의 접촉단면적으로 나눈 값으로, 시료의 파괴가 일어나는 지점의 강도를 나타낸다.

부피 감소율={(건조전 부피-건조후 부피)/(건조전 부피)}×100 (1)

Fig. 4 Load-deformation curve for the solid fuel extruded with cattle feedlot manure.

Table 1 Composition of combustion gas for the solid fuel extruded with cattle feedlot manure

Gases	Measurement				
	No 1	No 2	No 3	No 4	Average
O_2 (%)	18.29	18.49	16.88	18.43	18.02
CO (ppm)	1821	2013	2352	2078	2066
CO_2 (%)	3.38	2.51	4.21	1.97	3.02
NO (ppm)	131	60	56	38	71.25
NO_2 (ppm)	1.2	3.5	2.6	1.2	2.13
SO_2 (ppm)	17	31	60	39	36.75
NO_x (ppm)	106	47	47	40	60
SO_x (ppm)	24	48	33	36	35.25
H_2 (ppm)	584	355	582	273	448.5

Table 2 Composition of elements for raw and extruded cattle feedlot manure

(weight percent)

Materials	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca
Raw cattle wastes	48.66	42.48	0	0.6	0	4.25	0.79	0.26	0	0.2	8.31
Extruded cattle wastes	47.55	37.57	0.28	0.85	0.19	3.51	1.76	1.05	0.79	3.62	2.82

건조 성형우분의 연소가스 분석결과 표 1과 같이 가축분에는 질소가 다량 함유되어 있어 대기오염원이 되고 있는 NO_x(질소산화물) 외에도 SO_x(황산화물) 등 유해가스가 다소 함유되어 있는 것으로 나타났다. 따라서 성형우분의 연료화를 위해서는 연소 시 배출되는 유해가스를 제거하는 기술개발이 병행되어야 할 것으로 사료된다.

건조 생우분 및 건조 성형우분의 원소분석 결과를 표 2에 나타내었다. 건조 생우분 및 성형우분 모두 주성분은 C 와 O로 구성되어 있으며, 생우분은 C가 48.66%, O가 42.48%로 구성되어 있고, 성형우분은 C가 47.55%, O가 37.57%로 구성되어 있어 생우분의 C와 O의 구성성분이 성형우분보다 다소 크게 나타났다. 생우분 및 성형우분 모두 C와 O외에도 소량의 Mg, Si, Ca 등의 원소가 포함되어 있는 것으로 나타났다. 그러나 원소분석결과 건조 생우분 및 건조 성형우분 모두 H를 포함하고 있지 않는 것으로 나타났으며, 이는 시료의 수분함량이 0%로 시료에 수분이 존재하지 않기 때문인 것으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

우분을 적정하게 발효시켜 건조한 후 성형하면 고형연료가 되고, 이를 직접연소 시키면 농가의 시설난방에 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구는 톱밥이 혼합된 우분을 적정하게 발효 및 건조시켜 성형기로 성형된 고형연료의 열 및 물리·화학적 특성을 성형 전 생우분과 비교 및 분석하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 성형우분의 함수율별 발열량 분석결과 함수율이 0% 일 때 약 14,906 kJ/kg에서 함수율이35% 일 때 약 10,918 kJ/kg로 함수율이 증가할수록 발열량은 선형적으로 감소함을 나타내었다.

(2) 우분의 열분해 반응 동안 108.1℃ 부근에서 1차 반응점을 보였으며, 2차 반응점 온도는 312.2℃로 최고 열분해 반응점을 나타냈다. 우분의 2차 열분해 동안 급속한 무게 감소를 보였으며, 고분자 유기물들이 열분해하는 3차 반응점 온도는 459.4℃로 나타났다. 우분의 무게 감소율은 600℃까지의 열분해 동안 약 60%가 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 성형직후 성형우분의 건조에 따른 부피변화를 비교해 본 결과 평균적으로 약 61%의 부피가 감소함을 알 수 있었다.

(4) 수분함량이 약 10% 정도로 건조된 성형우분의 최대 압축강도 분석결과 41,9150 N/m^2 이었다.

(5) 건조 성형우분의 연소가스 분석결과 대기오염원이 되고 있는 NO_x(질소산화물) 외에도 SO_x(황산화물) 등 유해가스가 다소 함유되어 있는 것으로 나타났다.

(6) 건조 생우분 및 건조 성형우분의 원소분석 결과 건조 생우분 및 성형우분 모두 주성분은 C와 O로 구성되어 있으며, 소량의 Mg, Si, Ca 등의 원소가 포함되어 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Annamalai, K., M. Y. Ibrahim and J. M. Sweeten. 1987. Experimental studies on combustion of cattle manure in a fluidized bed combustor. Journal of Energy Resources Technology 109(2):49-57.
2. Hong, G. H., K. J Park, B. T. Jeon and S. C. Hong. 1999. Recycling Animal Wastes. pp. 15-23. DongHwa Technology Publishing Co., Seoul, Korea. (In Korean)
3. Kim, H. and M. Kim. 2000. Development of the solid fuel with domestic animal excreta for reducing contamination of purifier for livestock waste water. 10th Seminar for Subjects of Gimhae Development Study. Gimhae, Korea. (In Korean)
4. Lee, G. H. 1997. Study on the development of solid fuel of animal wastes for heating of agricultural facilities. Journal of Biosystems Engineering 32(5):316-323. (In Korean)
5. National Institute of Agricultural Engineering. 2006. Gide Book for Saving Energy of Agricultural Facilities. pp. 1-10. Sangrook Co., Suwon, Korea. (In Korean)
6. Son, Y., H. Kim and M. Kim. 2000. Experimental study on the combustion characteristics of the solid fuels blended with domestic animal excreta. KOSCO. 20th KOSCO Symposium. pp. 93-104. (In Korean)
7. Sweeten, J. M., J. Korenberg, W. A. LePori, K. Annamalai and C. B. Parnell. 1986. Combustion of cattle feedlot manure for energy production. Energy in Agriculture 5(1):55-72.
8. Sweeten, J. M., K. Annamalai, B. Thien and L. A. McDonald. 2003. Co-firing of coal and cattle feedlot biomass (FB) fuels. Part I. Feedlot biomass (cattle manure) fuel quality and characteristics. Fuel 82:1167-1182.