

고체연료원으로서의 우분 펠릿 연소특성

정광화[†], 이동준^a, 이동현^a, 이성현^a

Combustion Characteristics of Cow Manure Pellet as a Solid Fuel Source

Kwang-Hwa Jeong[†], Dong-jun Lee, Dong-Hyun Lee, Sung-Hyoun Lee

(Received: Jun. 8, 2019 / Revised: Jun. 19, 2019 / Accepted: Jun. 19, 2019)

ABSTRACT: In Korea, 51,013 thousand tons of livestock manure was generated in 2018. A total of 46,530 thousand tons, which is 91.2% of the total amount of livestock manure generated, was treated by composting(40,647 thousand tons) or liquid fertilization(5,884 thousand tons) method. At present, the policy of livestock manure treatment in Korea is to make livestock manure into organic fertilizer(compost, liquid fertilizer) and then to applicate it on agricultural land. And this policy is very effective in terms of livestock manure treatment and nutrient recycling. However, considering the steadily declining farmland area for decades, the use of livestock manure compost could be limited in the future. There is also concern that local nutrient overloading, nutrient management regulation, and restrictions on the number of livestock may become serious problem for livestock manure treatment. In addition, there are some opinions that nutrient derived from livestock manure may flow into tributaries of major dams. In recent years, there has been a suspicion that fine dust may be generated from livestock manure compost. In recent years, the use of livestock manure fertilizer has been rapidly increasing, there is a growing demand of the development of new technologies for livestock manure treatment. Especially, cow excretes a larger amount of manure than other livestock, so that the efficiency of development of new technology for cow manure treatment will be high. Therefore, in this study, the combustion characteristics of cow manure pellet were investigated in order to analyzed whether cow manure could be used as source of solid fuel. During the combustion test, the weight loss of the cow manure pellet began to increase when the temperature of the combustion chamber reached 300°C. The ratio of H₂, CH₄, CO in the pyrolysis gas produced in the pyrolysis process of cow manure pellet were 6.65~11.62%, 0.58~1.54 and 11.47~14.07%, respectively.

Keywords: Cow manure, Combustion, Pellet, Solid fuel

초 록: 가축분뇨는 2018년 말 기준으로 연간 총 51,013천 톤이 발생하였고 그 중의 91.2%인 46,530천 톤이 퇴비화(40,647천 톤)나 액비화(5,884천 톤) 방법에 의해 처리되었다. 현재 우리나라의 가축분뇨 처리 관련 정책방향은 가축분뇨를 퇴비화나 액비화 방법을 적용하여 비료자원화 한 후 농경지에 유기성 비료로서 환원한다는 것이고, 이 정책은 가축분뇨 처리와 영양물질 순환 측면에서 그 효과가 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 지난 수십 년 동안 지속적으로 감소하는 농경지 면적과 환경관련 제도의 변천상황을 고려하면 향후에 가축분 퇴비의 시용에 대한 제한이 강화될 우려가 있다. 지역적인 양분 과잉발생 현상, 양분관리제 그리고 지자체별 가축 사육두수 제한 조항과 같은 환경관련 제도 등이 가축분뇨 처리 및 자원화에 난제요인으로 작용하게 될 우려가 있다. 이에 더해 가축분뇨로부터 유래된 영양물질이 주요 담의 상류에 위치한 지류로 유입될 수도 있을 것이라는 일부의 견해도 존재한다. 특히 최근 들어서는 가축분뇨 퇴비에서 미세먼지가 발생된다는 문제까지 제기되기도 했다. 이렇듯 가축분

^a 국립축산과학원 축산환경과 연구직(Researcher, Animal environment Division, National Institute of Animal Science)

[†] Corresponding author(e-mail: gwhaju@korea.kr)

노 퇴비화에 대한 일반의 관심이 높아지고 있어서 새로운 방식의 가축분뇨 처리기술 개발의 필요성이 높아진 상황이다. 특히 소는 타 축종에 비해 마리당 분뇨발생량이 많아 우분처리 관련 신기술 개발은 그 효과가 매우 클 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 우분을 고체연료원으로서 사용시의 효과를 분석하기 위하여 우분펠릿의 연소과정에서 나타나는 특성을 조사하였다. 연소실험 결과 연소실의 온도가 약 300°C 내외에 도달했을 때 우분펠릿의 무게감소가 급격하게 나타나기 시작하였다. 우분펠릿의 열분해 과정에서 생성된 열분해가스중의 수소와 메탄 그리고 일산화탄소 농도는 각각 6.65~11.62%, 0.58~1.54% 그리고 11.47~14.07% 수준이었다.

주제어: 우분, 고체연료, 펠릿, 연소

1. 서론

가축분뇨는 가축이 섭취한 사료 중에서 소화, 흡수하지 못한 물질과 체내 대사과정에서 생성된 물질이 가축체외로 배출된 것으로서 거의 대부분이 수분과 유기성 물질로 구성되어 있다. 따라서 가축분뇨는 재활용가치가 높은 유기성자원으로서 그 발생량 또한 국내 재활용 가능 유기성물질 중 가장 많은 양을 차지하고 있다. 국내 가축분뇨 발생량은 지난 2018년 말 기준으로 총 51,013천 톤이었으며 이중 79.7%에 해당하는 40,647천 톤의 가축분뇨가 퇴비화되어 농경지로 환원되었다¹⁾. 가축분뇨 퇴비는 질소, 인산, 칼리와 같은 주요 비료성분 외에도 칼슘, 마그네슘과 같은 미량요소까지 포함하고 있어 비료로서의 가치가 높다. 칼슘과 마그네슘은 토양의 나트륨 흡착비율(SAR; Sodium Adsorption Ratio)을 낮춰서 토양의 입단형성과 투수성 향상에 도움이 되는 등 토양구조를 좋게 하는데 도움이 될 수 있다²⁾. 또한 퇴비는 양분이 서서히 용출되는 효과가 있고 토양 공극을 형성하는 등 화학비료에 비해 비료로서의 더 우수한 장점들을 많이 지니고 있다³⁾. 우리나라는 가축분뇨를 가급적 최대한 퇴비화나 액비화하여 농경지에 환원하는 것을 원칙으로 하고 있으며, 이 방법은 현재까지도 가장 좋은 가축분 자원화 방법임에 틀림이 없다. 그러나 최근 들어 점차 강화되고 있는 가축분뇨 관련 환경제도와 주요 담등을 비롯한 수계지역 관리강화, 그리고 가축분뇨 퇴비의 최종 수용처인 농경지 면적이 지속적으로 감소하는 상황 등을 고려하면 가축분을 친환경적인 방법으로 자원화 할 수 있는 새로운 기술들을 추가로 개발해야 할 필요가 있다⁴⁾. 가축분 자원화 방법

은 현재로서는 비료자원화 방법과 에너지자원화 방법으로 대별할 수 있다. 우리나라의 가축분뇨 비료자원화 기술수준은 해외 축산선진국과 비교하여도 손색이 없을 정도로 잘 발달되어 있는 상태이지만 향후에는 환경적인 부담을 최소화하는 기술개발이 필요해질 것으로 판단된다. 반면에 가축분뇨를 이용한 에너지자원화 방법의 현재 국내 기술수준은 바이오가스화 방법에 전적으로 의존하고 있기 때문에 자원화 방법을 더 다양화 할 필요가 있다. 바이오가스화 방법과 함께 가축분뇨 고체연료화 방법이 현재 국내의 가축분뇨 에너지화 방법을 대표하고 있다. 국내의 고형연료 기술은 생활폐기물이나 하수슬러지 등을 대상으로 고형연료화하여 사용할 수 있는 물질에 대한 가공효과 및 연료적 특성 분석에 대한 연구가 진행되어 왔다^{5,6)}. 유기성 폐기물을 해양에 배출하는 방법이 금지되고, 매립방법도 환경적 부담에 의해 적용이 어려워짐에 따라 슬러지를 복토재나 건축재로서 활용하는 방안에 대한 연구가 이루어졌다⁷⁾. 그러나 가축분뇨 고체연료화 방법은 최근 들어서야 고체연료 원료의 특성분석 및 열량 분석 등의 연구가 진행되어 왔다⁸⁾. 이는 가축분뇨 고체연료가 국내에 공식적으로 도입가능하게 되는 관련제도 정립이 최근에 이루어진 데에서 그 연유를 찾을 수 있다. 가축분뇨 고체연료화 관련제도는 가축분뇨 고형연료 품질기준 설정 연구에 의해 기반이 형성된 후 관련법규가 추가적으로 제정되면서 가축분뇨 연구 활성화의 기틀이 닦여졌다^{9,10)}. 가축분뇨 고체연료를 연소하는 과정에서 연소효율을 높이기 위해서 가축분뇨 펠릿 소형화기술 개발이 진행되기도 하였다¹¹⁾. 그러나 최근 들어 미세먼지 문제가 범국가적인 관심사로 대두되면서 가축분 고체

연료 연소시 미세먼지 감소를 비롯한 연소청정도 향상기술 개발에 대한 필요성이 높아지게 되었다. 따라서 본 연구에서는 가축분 고체연료 연소청정도를 향상하기 위해 우분을 직경 5~10 mm 규격인 소형펠릿으로 가공하여 연소시 특성을 분석하였다. 또한 연소청정도 향상 목적으로 우분 펠릿을 열분해하는 실험을 수행하고 발생된 열분해 가스의 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

국내 J시에 위치한 우사에서 수거한 우분과 우분 퇴비를 원료로 하여 가공한 펠릿을 사용하여 연소 실험을 수행하였다. 우분과 퇴비를 구 모양(Sphere type)의 직경 5~10 mm의 펠릿 형태로 가공한 후 수분함량이 20% 수준이 될 때까지 건조시킨 후 연소하였을 시의 특성을 분석하였다.

2.1. 펠릿가공

우분 퇴비를 스크루 타입의 균질기를 이용하여 분쇄한 다음 자체 제작한 회전원통형 펠릿 가공장치를 이용하여 직경 5~10 mm 규격을 지닌 구 모양의 펠릿으로 가공하였다. 우분을 구형 펠릿으로 가공하는 단계에서 우분에 혼합되어 있는 볏짚이나 건초, 톱밥 등의 이물질이 펠릿화 효율을 감소시키는 요인이 되기 때문에 입상화장치의 앞단에 균질

화장치를 설치하여 우분을 분쇄, 혼합하였다. 본 실험에서 제작한 균질화장치의 개략도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

입상화 원료인 우분과 퇴비를 균질화하기 위한 장치를 제작하였다. 원통형 실린더 내에 20 rpm의 속도로 회전하는 직경 100 mm의 스크루를 설치하고 전동기와 감속장치에 의해 스크루를 회전시키는 방법을 적용하였다. 균질화장치에 투입된 우분이 스크루의 회전에 의해 혼합과 이송과정을 거친 다음 직경 5 mm 규격의 구멍들이 천공된 압출부를 통과하면서 균질화되도록 실험장치를 제작하였다. 균질화 된 우분은 컨베이어 벨트를 타고 이동하여 직경 550 mm인 회전원통이 설치된 펠릿화장치로 투입되어 입상화 과정을 거치도록 실험시스템을 구성하였다. 회전원통 방식의 펠릿화장치에 투입된 우분은 25 rpm으로 회전하는 회전원통의 내면을 구르는 과정에서 구 형태로 가공되어지도록 하였다. 투입된 우분이 회전원통에 투입된 후부터 배출되기까지 구

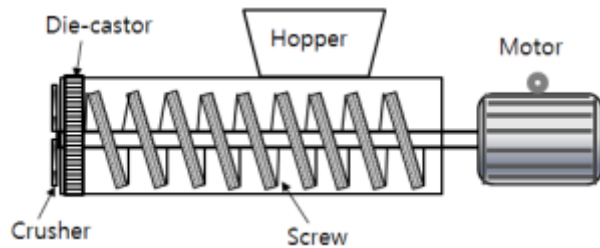


Fig. 1. Schematic diagram of homogenizer.



(Pellet with a diameter of 5 mm)

(Pellet with a diameter of 10 mm)

Fig. 2. Sphere type cow manure pellet manufactured in this study.

르는 거리는 약 45 m 내외 정도가 되도록 가공조건을 설정하였다. 가공된 우분 펠릿의 모양은 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

2.2. 펠릿 열적 특성분석 실험

펠릿형태로 가공된 우분과 퇴비펠릿의 열적 특성 분석은 열 분석기를 이용하여 수행하였다. 열중량분석은 STA 449 F5 Jupiter (Netzsch)를 사용하여 분석하였고, 반응 가스는 N₂, 유량은 50 mL/min 수준으로 하였으며 승온속도는 10 °C/min로 설정하였다. Table 1은 우분펠릿의 열분석 실험을 수행하기 위한 실험조건을 나타낸 것이다.

원소분석은 Thermo Scientific FLASH 1000 (Thermo)를 이용하였고, 반응가스는 Air, 유량은 50 mL/min로 하였으며 온도는 950 °C로 하였다. 공업분석은 Muffle Furnace (DAIHAN Scientifics)를 사용하여 수행하였다. 연소생성물 (Non-condensable gases)은 INFICON 3000A (SWITZLAND)를 사용하여 270~950°C의 범위에서 분석을 실시하였고, Heating rate는 10 °C/min, Flow rate는 600 mL/min 조건으로 분석하였다. 재 형상 분석은 Hitachi S-4200 (Hitachi)를 이용하였고 배율은 2 k로 하였다. 타르 성분분석은 GC-MS: Clarus 500 (Perkin-Elmer), GC-FID: Varian 450 (Varian)을 사용하였고, Transfer Line 온도는 140°C, Injector 온도는 240°C, Column은 DB-5MS, 승온 속도는 50°C (5min), 10 K/min, 120°C (10min), 15 K/min, 210°C (5min), MS Transfer Line 온도는 230°C로 하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

우분과 우분퇴비 펠릿제품을 대상으로 하여 연소 실험과 열분해 실험을 수행하고 그 효과를 분석하였다.

3.1. 우분과 우분 펠릿 특성

우분과 우분퇴비를 사용하여 가공한 구 모양 펠릿의 물리적 특성을 분석한 결과는 Table 2에 나타난 바와 같다.

우분으로 가공한 구 모양 펠릿은 겉보기 비중이 250~350 kg/m³ 수준이었고 내 압축력은 27.5 kg/cm² 수준으로서 유통이나 취급에 따른 손상이 발생하지 않을 정도의 내구성을 가진 것으로 판단된다. 우분 펠릿을 고체연료로서 이용하기 위해서는 수분함량을 20% 이하로 낮춰야하는데, 본 실험에서 가공한 우분 펠릿의 수분함량도 20% 이하로 분석되었다. 건조물 형태의 우분과 우분펠릿의 원소분석과 공업 분석 결과는 Table 3에 수록된 바와 같다.

원소분석 결과 우분에 비해 퇴비의 탄소비율이 더 높게 나타났는데 이는 퇴비가 주로 목질계로 이루어진 톱밥과 혼합된 데에 기인한 것으로 판단된다. 반면에 우분은 사료 중에 포함된 미량 무기물질, 축사에서 수거할 시에 축사바닥의 모래나 먼지의 혼입 등과 같은 2차적 요인이 탄소성분 함량에 영향을 줄 수 있다. 공업분석 결과에서도 나타나듯이 우분의 경우 회분함량이 높게 분석되었는데, 이 요소가 원소분석 시 탄소성분 함량과 연관된 것으로 볼

Table 1. Experimental Conditions for Thermal Analysis Experiment

Item	Condition
Temperature	20 °C → 900 °C
Temperature rise condition	10 °C/min
Gas flow rate	50 mL/min (N ₂)
Sample weight	10 ± 0.2 mg

Table 2. Characteristics of Cow Manure Pellet

Size	Specific gravity	Moisture content	Compressive strength
Diameter 5 mm	250~350 kg/m ³	20%	27.5 kg/cm ²

수 있다. 연소실험에 사용된 우분과 우분펠릿의 중금속 분석결과는 Table 4에 수록된 바와 같다.

우분과 우분펠릿의 중금속 함량을 분석한 결과 비소, 카드뮴, 납, 크롬, 니켈은 검출되지 않았다. 기타 중금속 성분도 미량만이 검출되었다. 그러나 현재 가축분 고체연료 품질기준에는 수은 1.2 mg/kg 이하, 카드뮴 9.0 mg/kg 이하, 납 200.0 mg/kg 이하, 크롬 70.0 mg/kg 이하인 것을 고려하면 검출된 농도는 문제요인이 되지 않는 것으로 판단된다¹²⁾. 또한 비료관리법에 의거하여 지정된 비료공정규격설정 및 지정에 의해 규정된 중금속 함량이 비소 45.0 mg/kg, 카드뮴 5.0 mg/kg, 수은 2.0 mg/kg, 납 130.0 mg/kg, 크롬 200.0 mg/kg, 구리 360.0 mg/kg, 니켈 45.0 mg/kg, 아연 900.0 mg/kg 수준이기 때문에 비료

로 사용시에도 문제가 없는 것으로 판단된다¹³⁾.

3.2. 우분과 우분 펠릿의 연소특성

우분과 우분퇴비를 사용하여 가공한 구 모양 펠릿의 연소시 특성을 분석하였다.

3.2.1. 우분과 우분 펠릿의 열중량 분석

Fig. 3은 각 시료에 대한 열중량분석 결과이며, 중량의 감소를 보다 자세히 확인하기 위하여 열곡선(TG)에 대한 미분곡선(DTG)을 함께 도시하였다.

Fig. 3의 a에 도시된 우분퇴비의 열곡선과 그 미분곡선 그래프를 분석해보면 퇴비에 함유되어있는 휘발분은 200°C부터 휘발되기 시작하여 380°C에서 모두 휘발되었으며, 352°C에서 가장 활발히 휘발이

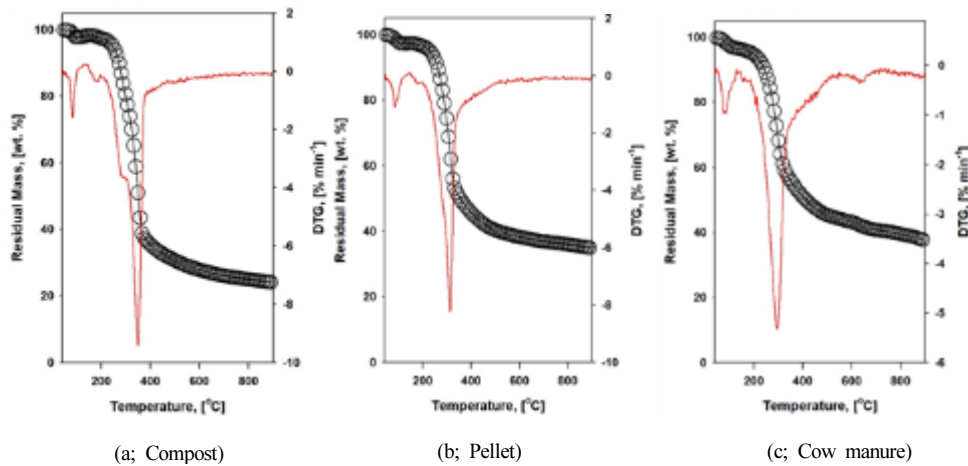


Fig. 3. Results of thermal gravimetric analysis of cow manure.

Table 3. Chemical Composition of Cow Manure Pellet

Classification	C(wt.%)	H(wt.%)	N(wt.%)	S(wt.%)	Moisture(wt.%)	Volatile(wt.%)	Ash(wt.%)	Fixed Carbon(wt.%)
Compost	55.159	5.731	1.995	0.003	11.521	87.760	0.410	0.310
Compost pellet	52.386	6.275	2.774	0.001	10.172	82.024	6.921	0.883
Cow manure	40.844	7.480	1.599	0.000	8.878	72.615	14.964	3.543

Table 4. Concentration of Heavy Metals in Cow Manure Pellet

Classification	As(mg/kg)	Cd(mg/kg)	Pb(mg/kg)	Cr(mg/kg)	Cu(mg/kg)	Ni(mg/kg)	Zn(mg/kg)	Hg(mg/kg)
Compost	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
Compost pellet	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.012
Cow manure	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.924	N.D.	8.825	0.007

진행되었음을 알 수 있다. 900°C에서 남은 시료량은 초기 시료의 중량 대비 24%가 남아있는 것으로 확인되었다. Fig. 3의 b에 도시된 우분 펠릿의 열곡선과 그 미분곡선 그래프를 보면 한우 펠릿에 존재하는 휘발분은 173°C부터 500°C까지 휘발이 진행되었으며 308°C에서 가장 활발히 진행되었다. 900°C에서 남은 시료량은 초기 중량 대비 35%가 남아있는 것으로 확인되었다. Fig. 3의 c에 도시된 우분에 대한 열중량 그래프를 보면 우분에 존재하는 휘발분은 156°C부터 458°C까지 휘발이 활발하게 진행되었으며 292°C에서 가장 활발한 휘발이 진행되는 것으로 나타났다. 900°C에서의 남은 시료량은 초기 중량 대비 38%가 잔존하는 것으로 확인되었다. 이 결과는 우분이 600°C까지 열분해 동안 무게의 감량이 60%에 달했다는 기존의 연구보고에 비해 더 높은 결과이다¹⁴⁾. 열중량 실험결과를 기준으로 분석해보면 고체연료원으로서 우분을 축사에서 수거할 시에는 모래나 기타 무기성 물질이 혼입되지 않도록 할 필요가 있고 펠릿제조시 직경을 작게 하는 것이 휘발 개시온도를 낮추는 효과가 있기 때문에 연소측면에서 유리한 것으로 판단된다. 최진환(2001) 등은 고체연료의 입자의 크기가 작을수록 빠르게 가열되기 때문에 연소속도가 증가하고 초기 투입시 탈 휘발 속도도 빠르다고 함으로써 고체연료의 입자크기를 줄일 필요가 있다고 하였다¹⁵⁾.

3.2.2. 우분과 우분 펠릿가운데 따른 가스 발생

우분퇴비와 우분을 포함한 몇 가지 원료를 대상으로 하여 가온시 발생하는 Non-condensable gas 중 Hydrogen, Methane, Carbon monoxide의 발생특성을 분석하였다. Fig. 4는 가열온도 대에 따른 각 시료에서의 수소, 메탄 그리고 일산화탄소의 발생패턴을 도시한 것이다.

가열에 따라 발생하는 수소와 메탄, 일산화탄소의 발생정도를 분석하였다. Fig. 4의 곡선중 역삼각형을 연결하는 곡선이 우분퇴비, 마름모를 연결하는 곡선이 우분 펠릿 그리고 연한 동그라미를 연결하는 곡선이 우분이다. 기타 진한 동그라미, 정사각형 그리고 정삼각형은 각각 톱밥, 짚소분 그리고 염소분에서의 발생패턴을 의미한다. 그림의 종축은 발생 가스 농도를 나타낸다. 온도 대에 따른 각 가스의 발생농도를 분석한 결과, 수소의 경우 약 500°C~600°C에서 발생량이 많으며 그 중 우분에서의 발생량이 가장 높은 것으로 나타났다. 메탄의 경우 500°C를 전후로 하여 짚소분, 우분, 우분퇴비 등에서 많이 발생하는 결과를 보였다. 일산화탄소는 340°C를 전후하여 우분, 짚소분, 우분 펠릿, 우분퇴비 순으로 발생량이 많은 것으로 나타났다. 반면에 아세틸렌, 에틸렌, 에텐과 같은 Condensable gas는 검지되지 않았다. 이 결과는 상기 시료들을 가열함에 따라 일산화탄소와 메탄이 다량 발생하였기 때문에 아세틸렌, 에틸렌, 에텐이 발생하지 않았거나 또는 매우 미미하게 발생하여 바로 연소반응에 참여하였기 때문일 것으로

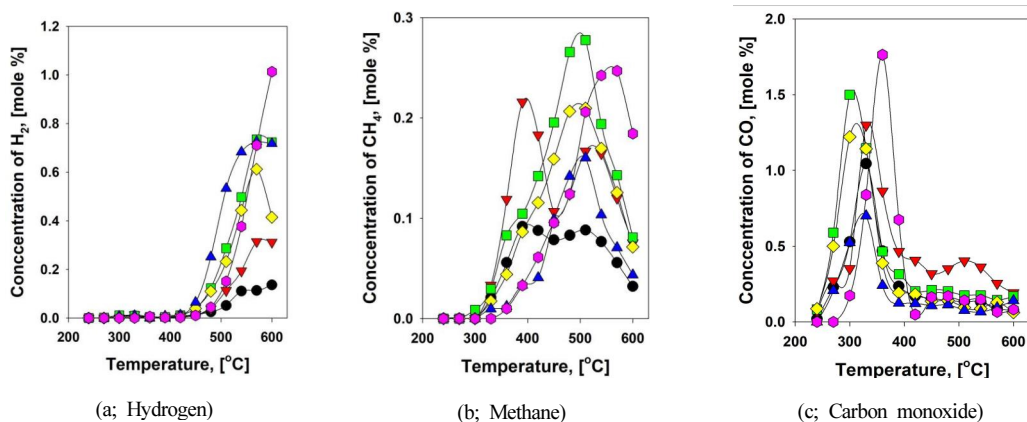


Fig. 4. Generation of hydrogen, methane, carbon monoxide from cow manure by heating with high temperature.

판단된다.

3.2.3. 타르의 특성 분석

연소과정에서 발생된 타르의 열중량 분석과 연소 잔재물의 물리적 구조를 분석하였다. Fig. 5는 연소 시험에서 발생한 타르에 대한 시료별 열중량 분석 결과로서 열곡선(TG)에 대한 미분곡선(DTG)을 함께 도시한 것이다.

Fig. 5의 a에 도시된 우분퇴비의 연소과정에서 발생된 타르의 열곡선과 그 미분 곡선 그래프의 분석해 보면 72°C부터 351°C까지 중량 감소가 일어났으며, 193°C에서 가장 활발히 감소하는 것으로 나타났다. 잔여물은 900°C에서 14%가 잔존하였다. Fig. 5의 b에 도시된 우분 펠릿의 연소과정에서 발생된 타르의 열곡선을 보면 72°C부터 535°C까지 중량감소가 일어났으며, 207°C에서 가장 활발히 감소하였다. 우분 펠릿의 경우 900°C에서 잔여물은 남아있지 않은 것으로 확인되었다. Fig. 5의 c에 도시된 우분의 연소과정에서 발생된 타르의 열곡선을 분석한 결과, 72°C부터 530°C까지 중량 감소가 일어났으며, 240°C

에서 가장 활발히 감소하는 것으로 나타났다. 우분의 경우 900°C에서 13%의 잔여물이 남아있는 것으로 분석되었다. 타르의 열중량 분석결과를 종합해 보면 우분에 비해 휘발되는 온도대가 더 낮고 잔존물 함량도 적은 것으로 나타났다. 따라서 타르에도 분해 가능한 물질이 존재하는 것으로 판단되므로 연소과정에서 타르로 전환되는 양을 줄이는 기술개발이 필요할 것으로 판단된다. 우분과 우분퇴비의 연소과정에서 발생된 타르의 원소분석 결과는 Table 5에 수록된 바와 같다.

타르의 원소분석 결과 탄소함량은 우분 연소시에 생성된 타르에 비해 우분퇴비와 펠릿의 연소과정에서 생성된 타르에서 더 높게 나타났다.

3.2.4. 연소 잔존물의 외형적 특성

연소 또는 탄화 후의 잔존물은 복토재나 Bio-char 등과 같은 유용한 자원으로서 재활용이 가능할 것이다. 실험 후 잔존된 탄화물의 모습은 Fig. 6에 도시된 바와 같다.

Fig. 6의 a사진은 퇴비의 열분해 후 남은 재의 형

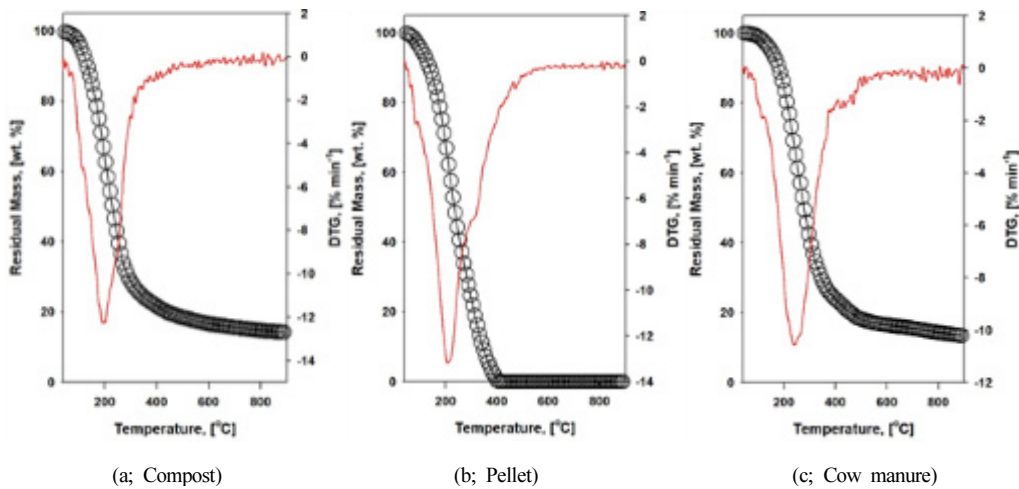


Fig. 5. Results of thermal gravimetric analysis of tar.

Table 5. Elemental (C, H, N, S) Composition Ratio of Tar

Classification	C(wt.%)	H(wt.%)	N(wt.%)	S(wt.%)
Compost	83.992	4.574	5.452	0.001
Compost pellet	89.203	4.199	6.173	0.000
Cow manure	62.654	7.982	5.178	0.000

상이다. 퇴비 연소재의 경우 재의 표면에서 원통형의 공극이 다량 존재하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 b사진은 우분 펠릿의 열분해 후 남은 재의 형상이며, 여러 개의 층이 중첩된 형상을 보이며 그 틈으로 다량의 공극이 존재하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 c사진은 우분의 열분해 후 남은 재의 형상이며, 원통형 공극을 가진 형상 위로 여러 작은 성분들이 존재하는 것을 볼 수 있다. 연소후 재가 가지는 공극과 연소재의 증급속 함량 등을 고려하면 연소재를 흡착성 재료나 비료로 사용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

3.3. 우분 펠릿의 열분해 특성

소는 풀이나 볏짚 등과 같이 섬유소가 풍부한 사료를 섭취하는 동물이다. 따라서 풀 사료를 섭취하는 소가 배설하는 분에는 섬유소가 포함되어 있기 때문에 저위발열량이 3,000 kcal/kg 이상인 것으로 분석되었으므로, 연소용 연료원으로서의 가치가 있다. 에너지원 측면에서는 우분을 고체연료로 하여 직접 연소원으로 활용하는 방법이 가장 타당하겠지만 최근 들어 문제가 되고 있는 미세먼지 문제로 직접 연소방법을 적용하기 위해서는 적절한 연소장치가 구비되어야 한다¹⁶⁾. 거기에 연소장치 배기온도와

먼지나 연소산화물에 대한 관리기술이 병용되어야 한다¹⁷⁾. 이런 문제를 최소화하기 위한 목적으로 본 연구에서는 우분 고체연료를 열분해하여 가스화 시킨 다음 연소하는 실험을 수행하였다. 실험수행을 위해 내용적 100리터 규모의 파일럿 실험장치를 제작하여 운용하였다. 열분해가스를 발생시키기 위해 반응조 내의 온도를 750°C로 설정하였다. 우분 펠릿을 원료로 하여 열분해실험을 수행한 결과 발생된 가스는 Table 6에 수록된 바와 같다.

우분 펠릿을 무산소적 상태에서 열분해한 결과로 발생한 열분해가스를 분석하였다. 열분해 시작되는 단계를 초기(Initial stage), 열분해가 왕성하게 진행되는 시기를 중기(Middle) 그리고 열분해실험을 마치는 시기를 후기(Finish)로 구분하여 발생가스 시료를 채취하여 가스성분을 분석하였다. 수소는 열분해가 진행됨에 따라 발생량이 많아지는데 반해 산소는 열분해가 진행될수록 감소하는 결과를 보였다. 메탄도 산소의 경우와 마찬가지로 열분해 초기에 발생량이 많은 것으로 나타났다. 일산화탄소는 열분해가 왕성하게 진행되는 단계에서 발생량이 많았다. 열분해 실험을 수행하기 전의 우분 펠릿과 열분해 과정을 마치고 배출된 우분 펠릿의 열분해 잔존물의 열중량 분석을 수행하였다. Fig. 7은 열분해 전의

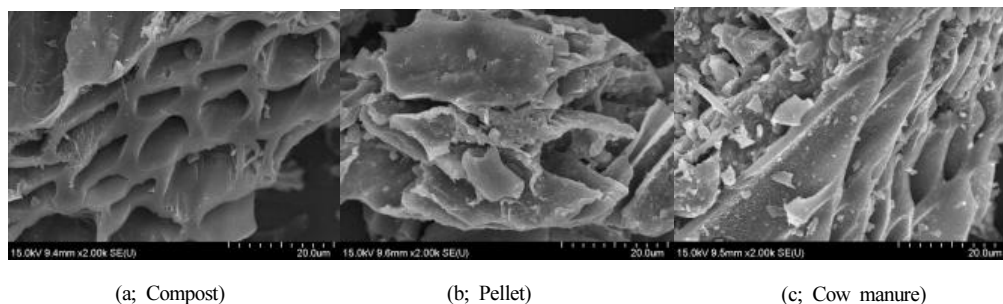


Fig. 6. Microscopic photograph of burnt residue.

Table 6. Non-condensable Gases Generated by Each Experimental Stage

Classification	Non-condensable gases, [mol %]						
	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	
Stage	Initial	6.6544199	0.0317305	0.5218232	1.5419103	12.85888	10.52239
	Middle	9.18122	0.0268932	0.4686188	1.41305	14.077725	10.52239
	Finish	11.622773	0.0187268	0.475162	0.58028	11.474628	13.317194

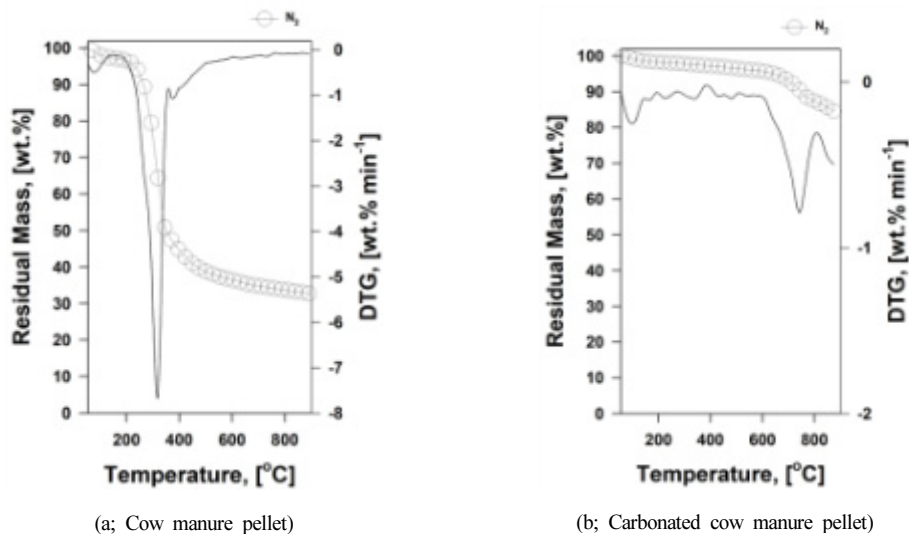


Fig. 7. Results of thermal gravimetric analysis of cow manure pellet.

우분펠릿과 열분해 과정을 거친 우분 펠릿의 열중량 분석결과를 도시한 것으로서 열곡선(TG)에 대한 미분곡선(DTG)을 함께 도시하였다.

Fig. 7의 a에 도시된 열곡선과 그 미분곡선 그래프의 열곡선과 그 미분곡선 그래프의 분석해 보면 약 220°C 이상부터 중량 감소가 일어났으며, 320°C에서 가장 활발히 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 Fig. 7의 b에 도시된 열분해 과정을 거치고 난 우분 펠릿의 열곡선을 보면 가열 초기에는 중량감소가 매우 완만하게 이루어지다가 700°C 근처에 도달하고 나서야 중량감소가 일어나기 시작하였다. 가열에 따른 잔존물 감소량도 현상도 열분해 과정을 거치고 난 우분 펠릿이 열분해전의 우분 펠릿에 비해 현저하게 낮은 것으로 나타났다. 이 결과는 열분해 과정에서 우분 펠릿의 산화성 물질이 거의 모두가 감소한데에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결론

우분과 우분퇴비 그리고 우분 펠릿을 원료로 하여 열중량 분석과 열분해 실험을 실시하였다. 실험결과를 요약한 결론은 다음과 같다.

1. 우분과 우분퇴비의 열곡선과 그 미분곡선 그래

프를 분석해보면 퇴비에 함유되어있는 휘발분은 352°C에서 가장 활발히 휘발이 진행되었고 우분 펠릿은 308°C에서 가장 활발하였으며 우분은 292°C에서 가장 활발한 휘발이 진행되는 것으로 나타났다.

2. 온도 대에 따른 각 가스의 발생농도를 분석한 결과 수소의 경우 약 500°C~600°C에서 발생량이 많으며, 메탄은 500°C를 전후, 일산화탄소는 340°C를 전후하여 발생량이 많은 것으로 나타났다. 반면에 Condensable gas (Acetylene, Ethylene, Ethane) 발생량은 검지되지 않았다.
3. 우분퇴비의 연소과정에서 발생된 타르는 중량 감소가 193°C에서 가장 활발히 진행되었으며 우분 펠릿의 연소과정에서 발생된 타르는 207°C에서 가장 활발히 중량이 감소하였다.
4. 연소 후 재가 가지는 공극과 연소재의 중금속 함량 등을 고려하면 연소재를 흡착성 재료나 비료로 사용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.
5. 우분펠릿을 무산소적 상태에서 열분해한 결과로 발생한 열분해가스를 분석한 결과 수소는 열분해가 진행됨에 따라 발생량이 많아지는데 반해 산소는 열분해가 진행될수록 감소하는 결과를 보였다. 메탄도 산소의 경우와 마찬가지로 열분해초기에 발생량이 많은 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구과제인 우분 고체연료 안전 연소기술 개발(PJ0136272019)과정에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Korean Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, "Yield of Livestock Manure in South Korea". (2018).
2. Jeong-Eun Lee., Dong-Hyuk Seo., Seok-In Yun., "Salt Removal in a Reclaimed Tidal Land Soil with Gypsum, Compost and Phosphate Amendment", Korean Society Of Soil Sciences And Fertilizer, 48(50), pp. 326~331. (2015).
3. Sa, T.M., Chung, J.B., Han, G.H., "Effect of Livestock Manure on Yield of Plant and Change in Physio-chemical Properties of Soil", Korean Society Of Soil Sciences And Fertilizer, pp. 63~75. (2008).
4. Statistics Korea, "Statistical Information Service". (2019).
5. Il-Hyun Chung., Dae-Gi Kim., Jang-Ho Chae., "The Study on Possibility of RDF by Analysis of Physicochemical Characteristics of MSW by the Size Distribution", J. of Korea Society of Waste Management, 26(7), pp. 626~634. (2009).
6. Sang-Woo Park., Cheol-Hyeon Jang., "A Product Assessment and Case Study with Solid Fuel of Sewage Sludge". J. of Korea Society of Waste Management, 25(6), pp. 493~498. (2008).
7. Jae-Hyuk Hyun., Byeong-Du Jung., Min-Gil Kim., "Environmental Characteristics of the Solidified Sewage Sludge", J. of Korea Society of Waste Management, 25(7), PP. 605~612. (2008).
8. Sung-Hyoun Lee., Byeong-Kkee Yul., Sun-Yi Ju., Yeon-Ku Kang., Gwang-Wha Jung, "Characteristics of Solid Fuel from Cattle Manure", New & Renewable Energy., 12(4). (2016).
9. Jin, H.E., Yoon, Y.M., Hong, J.H, Byeong, B.S., Na, P.S., Ahn, Y.M., Kim, S.H., Oh, S.Y and Hong, J.M., "Study on Setting Quality and Grade standards of Livestock Manure Solidified Fuel", Keco. (2013).
10. Ministry of Environment., "Notification on Construction of Facility for Livestock Manure Solidified Fuel", Notification No. 2015-110 of the Ministry of Environment. (2015).
11. Kwang-Hwa Jeong., Jung-Kon Kim., Dong-Jun Lee., " Feasibility test for Solidified Fuel with Cow Manure" J. Soli Groundwater Environ, 22(6), pp. 112~119. (2017).
12. Ministry of Environment., "Act on the Management and Use of Livestock Manure, Enforcement regulations", Attached table 4.2. (2016).
13. Ministry of Agriculture, Forestry and Livestock, "Act on the Fertilizer Regulation", Article 4. (2019).
14. G. H. Lee., "Thermal and Physicochemical Characteristics of Solid Fuel Extruded with Cattle Feedlot Manure", J. of Biosystems Eng, 35(1), pp. 64~68. (2010).
15. Jin-Wan Choi, Young-Ho Park, Sang-Min Choi., "Fluid-phase combustion of solid waste fuel" J. of Korea Society of Waste Management, 18(3), pp. 1~9. (2001).
16. Sang-An Ha., "A Study on the Characteristics of Combustion and Manufacturing Process on Refuse-derived Fuel by Mixing Different Ratios with Organic and Combustible Wastes", Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 17(1), pp. 27~38. (2009).
17. Sung-Hoon Shim., Sang-Hyun Jeong., Ji-Soo Ha., "High Temperature Exhaust Gas Recirculation for Low NOx Emission in Solid Fuel MILD Combustion in Pilot-scale Combustion Furnace", J. of Korea Society of Waste Management, 30(1), pp. 21~27. (2013).