

농업시설 난방을 위한 축산폐기물의 고품 연료화 연구

이귀현

Study on the Development of Solid Fuel of Animal Wastes for Heating of Agricultural Facilities

G. H. Lee

Abstract

This study was carried out to obtain the basic data for the development of the solid fuel with investigating the characteristics of mixtures of animal wastes and wasted coal and supply it as an energy resource to agricultural farms for heating of agricultural facilities. It was investigated for the characteristics of animal wastes (swine waste, swine waste with sawdust, cattle waste), wasted coal, the mixtures of animal wastes and wasted coal with or without mixing seawater. The characteristics of solid fuel according to the mixture ratio of animal wastes and wasted coal were analyzed. The effects of seawater affecting on calorific value and thermal pyrolysis of solid fuels were investigated. The results of this study are as follows: 1) The calorific value was improved with mixing seawater into wasted coal due to chemical reaction. 2) The diverse solid fuels of various calorific values can be made with adjusting the ratio of animal wastes and wasted coal. 3) Animal wastes and wasted coal had each different reaction temperature of thermal pyrolysis and the decreasing rate of weight. 4) The mixture of animal wastes and wasted coal would be ignited easily. Therefore, the solid fuel could be ignited more conveniently when seawater is mixed with it.

Keywords : Animal wastes, Wasted coal, Alternative fuel, Agricultural energy, Agricultural facility heating

1. 서론

현재, 우리나라의 농업은 에너지 집약형 산업으로 변하고 있다. 그 동안 농업의 생력화를 위해 농업생산 시설의 자동화 정책을 추진해 오면서 온실, 축사 등을 중심으로 하여 농업도 에너지 소비형 산업으로 변모하였다. 우리나라의 일반적인 에너지 소비 추세를 보면 석유, 가스, 전기 등의 고급에너지 소비가 급증하는 반면 석탄소비의 감소로 에너지의 해외 의존도 및 석유 의존도가 점차 증가 추세로 1998년 통계에 의하면 국내 에너지 사용량의 97% 이상이 수입에 의존하고 있는 실정이다(에너지관리공단, 2000). 특히, 자본구조가 취약

한 농업부문에서는 에너지가격의 상승이 농업생산비를 증가시키고 있으며, 시설농업분야는 그 운영에 있어서 위기를 맞이하고 있다. 따라서 농업에너지난을 타개하기 위해서는 근본적으로 대체에너지 개발, 에너지원의 다양화, 부존자원 이용의 극대화가 이루어지지 않으면 안 된다.

국내의 탄광 수는 1940년대 이후 점차 감소하기 시작한 이후 품위 저하와 채산성 감소로 근래에는 급격히 줄어들고 있다(민 등, 1997). 채탄 후 석탄은 수세의 정도에 따라서 회분이 적은 순서로 특, 상, 보통, 2등으로 분류된다. 그러나 폐탄은 9등급 이하인 등외품으로 열량이 16,742 kJ/kg이하이며, 무연탄으로 제조할 수 없어 각 탄전지역과 일부 역두에 다량

This study was conducted by the research fund supported by grant No. 0102109-1-1(2002128) from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering Foundation and by an assistance of Institute of Agricultural Science, Kangwon National University. The article was submitted for publication in August 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2007. The author is G. H. Lee, Professor, Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University, Chuncheon. Corresponding author: G. H. Lee, Professor, Division of Agricultural Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea. E-mail: <ghlee@kangwon.ac.kr>.

이 생산 및 적재되어 환경 오염원이 되고 있으나, 정확한 량은 파악되고 있지 않다. 최근에는 에너지원의 가격 상승에 따라 폐타이어, 장작, 연탄, 폐오일, 하수 슬러지(정, 1999) 등 폐자재를 활용한 난방설비가 개발되고 있는 실정이다.

생활수준의 향상으로 육류의 소비가 점점 늘어남에 따라 국내의 가축 사육두수가 늘어나고 있으나, 축산규모가 영세하다 보니 수질오염에 대하여는 관심을 돌릴 수 없었으며, 따라서 해당지역에서 발생하는 폐수와 폐기물은 큰 수질오염으로 작용하게 되었다. 최근 고농도 축산 폐수인 가축(소, 돼지, 닭, 등)의 분뇨를 처리함에 있어서 기존의 퇴비화 방법과 더불어 화훼단지, 축사 등의 농가에서 필요로 하는 저가의 난방용 연료로서 사용할 수 있는 방법이 검토되고 있다. 축산폐기물은 고품연료화 함으로써 폐수처리도 겸할 수 있고, 만들어진 고품연료는 저장과 운반이 간편하며 탈취장치를 이용하여 분뇨의 냄새를 제거하기 쉬우므로 연료로 사용하는데 거부감을 줄일 수 있다(김과 김, 2000). 또한 건조장치에 의하여 수분함량을 조절할 수 있고 고품화 하기 전에 분탄, 톱밥을 적절하게 혼합함으로써 난방용 연료에 적합한 발열량을 가진 고품연료를 만들 수 있는 장점이 있다. 축분은 점화성이 우수한 왕겨와 혼합하여 연소조건을 개선할 경우 지속적으로 연소가 가능하게 되어 난방용 연료로서 우수하게 사용할 수 있을 것이다(김 등, 2000). 국외에서는 오래 전부터 환경오염 저감 및 폐기물의 자원화 차원에서 축산폐기물 자체만을 직접 연소하여 에너지원으로 사용하는 연구뿐만 아니라 분탄과 혼합하여 연료화 하는 연구가 활발히 수행되고 있다(Sweeten 등, 1986; Annamalai 등, 1987; Sami 등, 2001; Sweeten 등, 2003).

이와 같이 대체에너지의 한 자원으로서 축산 폐기물은 재자원화 가능성이 높고 공해방지와 지역증진 등에 큰 효과가 있어 에너지 전환이용 가능성이 크며 직접연소 또는 발효 처리하여 농업용 에너지원으로서의 실용화 가능성이 매우 크다. 또한 발열량이 낮아 각 탄전지역에 방치되어 환경오염원이 되고 있는 저품질 분탄은 발열량이 낮으나 축분과 혼합 처리하여 발열량을 높여 농업용 대체에너지로 사용할 수 있다. 그러므로 전량 외국에서 수입하고 있는 유류 에너지의 의존에서 탈피하여 에너지원으로 우리나라에 다량 부존되어 있는 저품질 분탄과 축산폐기물인 축분을 이용한 대체에너지를 개발한다는 것은 농가에 저렴한 연료를 공급할 수 있어 경제성이 클 뿐만 아니라, 폐자원을 연료화 함으로써 환경오염을 줄일 수 있어 환경정화 차원에서도 매우 중요한 것이다.

따라서, 본 연구의 목적은 환경폐기물로 발열량이 풍부하고 축분 및 발열량이 낮아 폐기되고 있는 저품질 분탄과 축분 및 저품질 분탄의 혼합연료에 대한 열 및 물리화학적 특성을 분석하여 시설난방을 위한 유류 대체용 축산폐기물의 대체에너지

지원 개발을 위한 기초자료로 사용하기 위한 것이다.

2. 재료 및 방법

가. 저품질 분탄의 열 및 물리화학적 특성분석

저품질 분탄은 강원도 도계광업소(Dogae), 사북광업소(Sabook), 백산역(Baksan)의 3지역에서 채취하였으며, 해수 첨가에 의한 발열량 증대 효과 및 회분의 화학적 조성을 조사하였다. 분탄의 발열량은 열량계(Model 1281, Parr Instrument Co., USA)를 이용하여 측정하였으며, 회분의 화학적 조성은 X선 형광 분석기(Philips 1480, Philips, USA)를 이용하여 분석하였다.

나. 축분 및 축분·분탄 혼합시료의 열 특성분석

본 실험에서 저품질 분탄의 대표시료로 강원도 사북 광업소에서 채취한 저품질 분탄(Wasted Coal: WC)을 축분과 혼합시료로 사용하였다. 축분은 강원도 춘천시 동산면에 위치한 (주)녹색산업의 돈사 외부에 설치된 돈분 배출구에서 채취한 돈분(Swine Waste: SW)과 퇴비장에서 채취한 톱밥이 혼합된 돈분(톱밥돈분, Swine Waste + Sawdust: SWS)을 시료로 사용하였으며, 우분(Cattle Waste: CW)은 강원대학교 목장의 우분 처리장에서 채취하여 실험재료로 사용하였다. 축분의 3종류(돈분, 돈분톱밥, 우분)와 저품질 분탄 및 완전 건조된 돈분, 톱밥돈분, 우분을 분탄 과 2 : 8, 5 : 5, 8 : 2 로 각각 혼합한 9종류 시료, 그리고 발열량 증가 효과를 조사하기 위해 시료에 해수(Seawater: S)를 첨가한 13개의 시료, 총 26종류의 시료를 이용하여 실험을 수행하였다. 채취된 각 축분 시료의 수분함량을 측정하기 위해 일정무게의 시료를 100°C 캐비넷 건조기에 24시간 건조하여 완전히 수분을 제거한 후 무게를 측정하여 수분함량을 계산하였다. 여기서 돈분 및 우분의 초기 함수율은 각각 76.2%(wb) 및 74.0%(wb)이었으며, 톱밥이 혼합된 돈분의 함수율은 56%(wb)로 나타났다.

축분과 분탄을 적정비율로 혼합하기 위해 완전 건조된 축분 및 분탄 시료를 일정 크기로 분쇄한 후 분쇄된 시료를 30mesh 체를 이용하여 입도를 선별하였다. 일정한 크기로 선별된 축분과 분탄의 무게 비를 2 : 8, 5 : 5, 8 : 2가 되도록 일정하게 혼합하여 축분 및 분탄의 혼합시료를 제조하였다. 해수의 혼합이 시료의 발열량에 미치는 영향을 조사하기 위해 분탄, 축분(돈분, 톱밥돈분, 우분), 분탄과 축분의 혼합연료에 해수를 일정비율로 배합한 후 건조하여 해수혼합 시료를 만들었다. 시료의 발열량은 열량계(Model 1281, Parr Instrument Co., USA)를 이용하여 측정하였다. 발열량 측정실험은

각 시료 당 3회 반복 수행되었다. 발열량 측정을 위한 시료의 무게는 0.5 g을 기본으로 하였으며, 무게 측정은 0.001 g까지 오차측정이 가능한 전자저울(FA300KV, A&D Co., Japan)을 이용하였다. 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 위해 사용된 각 시료의 양은 10~30 mg이었으며, 분당 20°C로 승온시켜 1,300°C까지 열분해하면서 온도대별 누적 무게감소량(%)을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 저품질 분탄 특성 분석

시료 채취 지역별 저품질 분탄 및 분탄에 해수를 첨가한 시료에 대한 회분의 화학적 조성을 분석한 결과를 표 1에 나타내었다. 도계광업소, 사북광업소, 백산역의 3지역 분탄시료는 모두 같은 구성성분을 갖고 있으나, 다소 다른 무기물질의 함유량을 나타내었다. 대체로 저품질 분탄은 일반 점토 성분과 같이 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분으로써 30~62%를 차지하며 특히 Fe₂O₃가 약 3~5%의 낮은 함유량을 나타내고 있다. Fe₂O₃, MgO, Na₂O 등 회분 중에 알칼리성분은 회분의 용융온도를 낮추고 점성을 낮추는 역할을 하며 반대로 Al₂O₃는 용융을 높이는 역할을 한다. 용융온도가 낮은 탄이 slagging성이 크다는 점을 고려할 때, 본 연구의 시료는 slagging성이 낮은 것으로 판단된다. 또한 K₂O의 함유량은 fouling을 야기 시키는 것으로 알려져 있으며 특히 국내 혼합탄의 경우 K₂O의 함유

량이 큰 것으로 알려져 있다.

시료 채취 지역별 분탄시료에 해수를 첨가한 저품질 분탄의 발열량 값은 해수 첨가 없는 순수 분탄의 발열량 값보다 최소 1,659 J/g 이상 높게 나타났다(Table 2). 이러한 결과는 모든 저품질 분탄 시료에 해수를 첨가 할 경우 해수에 포함된 많은 이온들과의 반응으로 인하여 발열량이 증가함을 암시하고 있다. 그러므로 분탄과 해수의 화학적 반응을 정확히 분석할 수는 없으나 해수가 저품질 분탄의 발열량을 증대시키는데 큰 효과가 있음을 확인 할 수 있었다.

나. 축분 및 축분과 분탄 혼합시료의 특성분석

열량계를 이용한 시료의 발열량분석에서 축분의 기본 발열량은 돈분이 17,051.5 J/g, 우분이 16,931.4 J/g, 톱밥돈분이 16,507.7 J/g, 사북광업소에서 채취한 저품질 분탄이 11,527.2 J/g로 나타났다(Table 3). 또한, 순수 저품질 분탄의 경우 발열량이 11,527.2 J/g인데 반해 축분과 분탄을 혼합한 경우는 15,800~16,800 J/g로 발열량이 크게 증가하였다. 이러한 결과는 농산 부산물인 왕겨의 발열량 12,600~14,700 J/g보다는 다소 높고, 장작의 발열량 16,800~18,900 J/g보다는 다소 낮으나(홍 등, 1999), 축분과 분탄의 혼합시료는 충분히 연료로서 가치가 있는 것으로 판단된다. 또한 축분 및 분탄의 혼합시료는 각 혼합 비율에 따라 발열량의 크기가 다소 다르게 나타났으며, 그러므로 축분과 분탄의 혼합비를 적절히 조절함으로써 혼합시료의 발열량 크기를 다양하게 조절할 수 있을 것으로 생각된다. 해수를 혼합한 분탄의 경우는 순수 분탄에 비해 약 1,659 J/g 정도의 발열량 증가 효과를 나타내었으며, 이와 같이 순수 분탄에 해수를 혼합한 시료의 발열량 증가는

Table 1 Chemical components for ash of wasted coal according to obtained region of sample

(weight percent)

Sample	Component									
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Dogae	59.65	3.19	31.60	1.71	0.00	0.44	0.48	2.94	0.00	0.00
Dogae (S)	57.11	3.15	32.24	1.90	0.02	0.61	0.63	3.06	1.09	0.15
Sabook	53.94	3.98	33.86	1.81	0.04	0.56	0.72	4.77	0.09	0.22
Sabook (S)	52.23	4.25	33.82	1.88	0.04	0.66	0.81	4.99	1.09	0.21
Baksan	61.34	3.24	29.56	1.28	0.00	0.52	0.58	3.47	0.00	0.00
Baksan (S)	60.12	3.15	29.68	1.24	0.05	0.64	0.64	3.50	0.89	0.11

†S: Seawater (Sample mixed with seawater)

Table 2 Calorific values of wasted coal according to obtained region of sample

Sample	Calorific value (J/g)	Sample	Calorific value (J/g)	Sample	Calorific value (J/g)
Dogae	13,058.8	Sabook	11,527.2	Baksan	8,559.3
Dogaes (S)	14,770.6	Sabook (S)	13,186.0	Baksan (S)	10,380.0

†S: Seawater (Sample mixed with seawater)

Table 3 Results of analysis for calorific value of various materials

Material	Calorific value (J/g)	Material	Calorific value (J/g)
WC	11,527.2	WC+S	13,185.8
SW	17,051.5	SW+S	15,795.8
CW	16,931.4	CW+S	14,658.0
SWS	16,507.7	SWS+S	14,891.3
SW : WC (2 : 8)	16,429.9	SW : WC (2 : 8)+S	15,284.2
SW : WC (5 : 5)	16,589.7	SW : WC (5 : 5)+S	16,076.2
SW : WC (8 : 2)	16,737.2	SW : WC (8 : 2)+S	15,868.3
CW : WC (2 : 8)	15,872.8	CW : WC (2 : 8)+S	15,156.5
CW : WC (5 : 5)	16,430.1	CW : WC (5 : 5)+S	15,837.9
CW : WC (8 : 2)	16,735.8	CW : WC (8 : 2)+S	15,393.5
SWS : WC (2 : 8)	15,921.8	SWS : WC (2 : 8)+S	14,887.7
SWS : WC (5 : 5)	16,019.7	SWS : WC (5 : 5)+S	15,206.8
SWS : WC (8 : 2)	16,149.7	SWS : WC (8 : 2)+S	14,921.3

해수의 여러 성분이 시료의 무게 증가를 가져왔음에도 불구하고 해수에 포함된 화합물과 분탄이 화학반응을 일으켜 시료의 단위질량 당 발열량을 증가시킨 것으로 사료된다. 그러나 분탄의 경우와 달리 축분(돈분, 톱밥돈분, 우분)의 경우는 해수를 첨가하더라도 해수를 첨가하지 않은 축분시료 보다 더 낮은 발열량을 나타냈다(Fig. 1). 이러한 결과로 볼 때 해수는 발열량 증대를 위해 축분과 전혀 화학반응을 일으키지 않으며 단지 해수의 구성성분에 의한 무게만을 증가시킴으로서 단위 무게 당 발열량의 감소를 가져온 것으로 사료된다.

축분(돈분, 톱밥돈분, 우분) 및 분탄의 혼합시료(축분 : 분탄 = 8 : 2)에 해수를 첨가한 경우 발열량이 높은 축분(돈분, 돈분톱밥, 우분)의 량이 발열량이 낮은 분탄의 량에 비해 큰데도 불구하고 축분의 량이 분탄의 량과 같은 비율로 혼합한 시료(축분 : 분탄 = 5 : 5)에 해수를 첨가한 경우에 비해 발열량이 낮았으나, 축분의 량이 분탄의 량에 비해 적은 혼합시료(축분 : 분탄 = 2 : 8)에 해수를 첨가한 경우보다는 다소 크게 나타났(Figs. 2, 3, and 4). 이러한 결과로 볼 때 전체적으로는 축분 및 분탄의 혼합시료에 해수를 첨가하였을 때 해수의 구성성분이 혼합시료의 무게 증가에 기여하여 해수 첨가 없는 축분 및 분탄의 혼합시료에 비해 단위무게 당 발열량을 낮추는 결과를 초래하였다고 사료된다. 그러나 축분 및 분탄의 혼합비율이 5 : 5인 시료에 해수를 첨가한 경우가 축분 및 분탄의 혼합비가 8 : 2인 혼합연료에 해수를 첨가한 경우보다는 축분과 분탄의 상대적 발열량 크기에도 불구하고 더 높은 발열량을 나타냈으며, 이것은 분탄이 축분과 적절한 비율로 혼합됨으로써 분탄이 해수와 화학반응을 일으켜 발열량이 증가된 결과로 사료된다. 또한, 축분과 분탄의 혼합비율이 2 : 8인

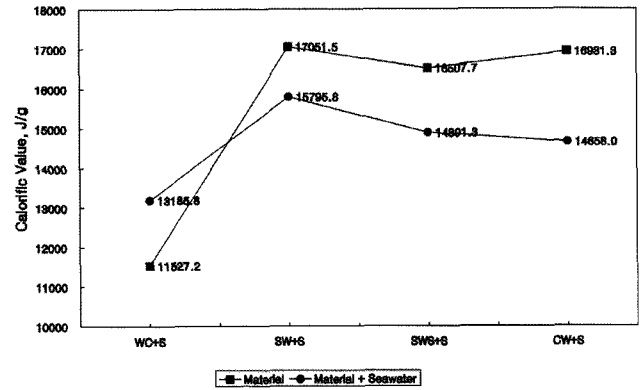


Fig. 1 Change of calorific values for wasted coal (WC) and animal wastes (swine waste: SW, swine waste with sawdust: SWS, cattle waste: CW) with mixing seawater (S).

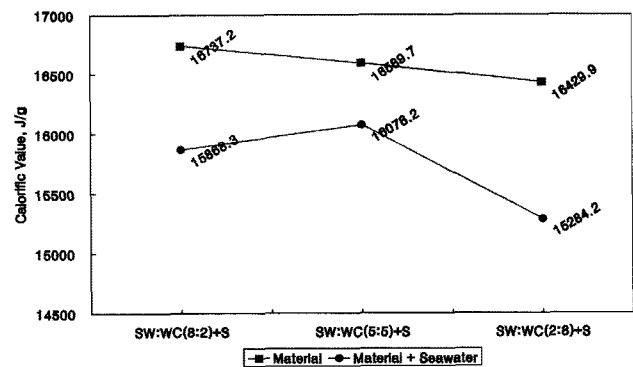


Fig. 2 Change of calorific values according to mixture ratio of swine waste (SW) and wasted coal (WC) and with mixing seawater (S).

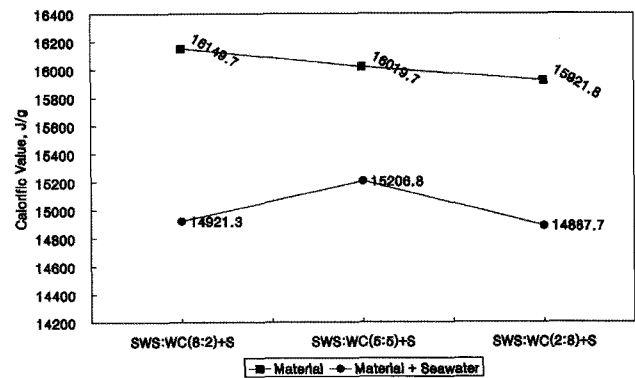


Fig. 3 Change of calorific values according to mixture ratio of swine waste with sawdust (SWS) and wasted coal (WC) with mixing seawater (S).

혼합시료에 해수를 첨가한 경우는 축분 및 분탄의 혼합비율이 5 : 5인 경우에 비해 매우 낮은 발열량을 나타내었으나, 혼합비가 8 : 2인 시료에 비해서는 약간 낮은 발열량을 나타내었다. 이러한 경우에는 축분에 비해 많은 량을 포함하는 분탄이 해수와 서로 화학반응을 일으켜 다소 발열량 증대를 가져온 것으로 생각되나, 높은 혼합비를 갖는 분탄의 낮은 발열

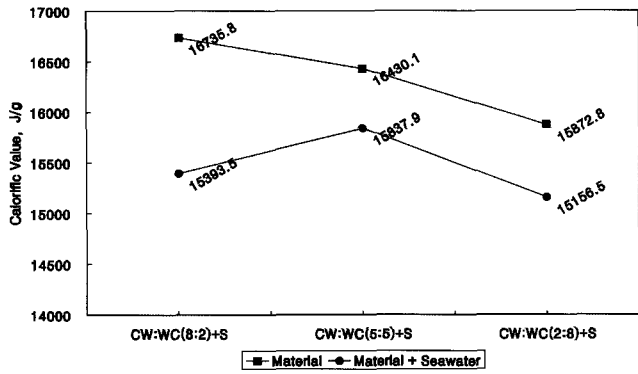


Fig. 4 Change of calorific values according to mixture ratio of cattle waste (CW) and wasted coal (WC) with mixing seawater (S).

량 때문에 전체적인 혼합시료의 발열량은 낮아진 것으로 사료된다. 그러나 축분 및 분탄의 혼합비가 8 : 2인 혼합시료에 해수를 첨가한 경우는 분탄의 적은 양으로 인해 해수에 포함된 화합물이 분탄의 구성성분과 화학반응을 일으키지 못하고 단지 해수의 구성성분에 의한 무게만을 증가시킴으로서 단위 무게 당 발열량의 감소를 가져온 것으로 생각된다.

이러한 결과로 볼 때 분탄 자체를 연료로 사용할 경우는 해수를 첨가함으로써 발열량을 증대시켜 고품질의 연료로 사용할 수 있다. 그러나 분탄을 축분과 혼합하여 연료로 사용할 경우는 해수를 첨가하여 화학반응에 의한 발열량을 다소 증대시킬 수 있다 하더라도, 해수의 구성성분이 혼합시료의 무게 증가에 기여하는 만큼의 발열량 증대를 가져올 수 없으므로 해수첨가 없이 축분 및 분탄 자체만을 적절한 비율로 혼합하여 용도에 따라 혼합비에 따른 여러 종류의 발열량을 갖는 혼합연료로 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

저품질 분탄, 축분(돈분, 톱밥돈분, 우분), 5 : 5의 비율로 혼합된 축분 및 분탄, 돈분 및 분탄을 5 : 5로 혼합하여 해수를 첨가한 시료에 대한 열분석 결과인 무게 감소율 및 최고 열분해 반응점 온도를 표 4에 나타내었다. 최고 열분해 반응점 온도는 순수 분탄이 718.3°C로 가장 높았고, 다음은 돈분, 톱밥돈분, 우분이 각각 524.7°C, 479.8°C, 372.6°C의 순으로 나타났다. 또한 축분(돈분, 톱밥돈분, 우분)에 분탄을 혼합한 시료의 최고 열분해 반응점 온도는 분탄의 높은 발열점으로 인해 전체적으로 증가되는 경향을 나타내었다. 그러나 돈분과 분탄을 5 : 5로 혼합한 시료에 해수를 첨가하였을 경우 최고 열분해 반응점 온도는 해수가 첨가되지 않았을 때 보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 분탄과 해수와의 화학반응 때문인 것으로 사료되고, 그러므로 해수의 첨가로 시료의 연소용이하게 할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 이것은 해수 첨가에 의한 분탄의 발열량 증대 효과와도 연관된 것으로 사료된다.

열분해에 의한 무게 감소율의 크기는 우분, 톱밥돈분, 돈분, 분탄 각 92.9%, 89.7%, 82.5%, 60.1%로 나타났다. 그러므로 축분의 연소 후 회분함량은 20% 이하로 분탄의 39.9%에 비해 매우 낮게 나타났다. 그러나 분탄이 축분(돈분, 톱밥돈분, 우분)과 5 : 5로 혼합된 경우의 무게 감소는 64~73%로 낮게 나타났으며, 이러한 결과는 축분과 혼합된 분탄의 열분해에 의한 무게 감소율이 매우 낮기 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 돈분 및 분탄이 5 : 5로 혼합된 시료에 해수를 첨가한 경우는 해수를 첨가하지 않은 시료보다 무게 감소율이 10% 높게 나타났으나, 이와 같은 결과로는 해수가 시료의 열분해시 무게감소에 어떤 영향을 미쳤는지는 판단하기 어렵다고 생각된다.

Table 4 Results of analysis for TGA-DTA

Material	Decreasing rate of weight (%)	Maximum reaction temperature of thermal pyrolysis (°C)
WC	60.1	718.3
SW	82.5	524.7
SWS	89.7	479.8
CW	92.9	372.6
SW : WC (5 : 5)	65.3	652.2
SWS : WC (5 : 5)	72.4	520.7
CW : WC (5 : 5)	64.4	746.9
SW : WC (5 : 5)+S	75.3	329.0

그림 5~12는 각 시료에 대한 열분해 기간동안 중량감소 및 열분해 반응온도를 나타낸 그림이다. 그림 5와 같이 분탄의 열분석 결과를 보면 1차 반응점은 약 100°C 부근에서 무게 감소량이 약간 커진 반응을 나타냈는데 이 같은 결과는 분탄내의 수분 증발온도로 알 수 있으며, 수분이 증발한 다음 500°C까지 상승하여도 큰 무게 변화는 없다가 600°C부터 극열한 열분해로 분탄의 조성분이 기화되면서 급격히 무게가 감소하여 718.3°C에서 최고 정점에 달하는 2차 반응점을 보였고, 900°C까지 무게감소가 지속되다 그 이후에는 큰 무게 변화가 없는 분탄의 열분해 곡선을 나타내었다.

돈분의 열분해 곡선에서 1차 반응점은 약 130°C 부근에서 시료의 유리수분 증발에 의한 급격한 무게 감소량이 이루어진 후에 나타났으며, 그 후 큰 무게 감소와 함께 휘발성 유기조성물 및 저분자들이 분해하는 2차와 3차 반응점 온도는 310.9°C 및 369.8°C였다(Fig. 6). 다시 온도가 상승하면서 524.7°C에서 최대의 3차 열분해 반응점이 나타났는데 돈분의 조성성분 중 고분자 유기물질들의 분자결합이 파괴되면서 거의 탄소성분이 존재하지 않는 상태로 열분해되며 600°C 이후에는 회분만이 남는 무게 감소곡선을 보이고 있다.

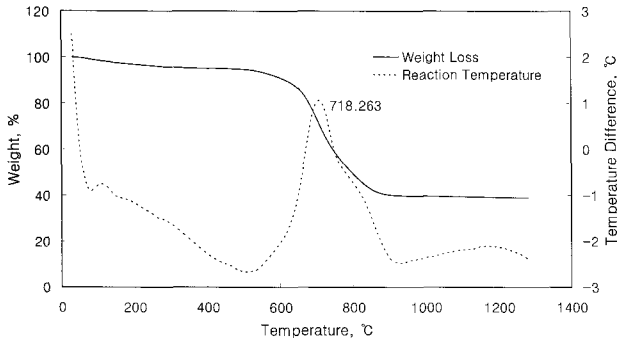


Fig. 5 Results of TGA-TDA analysis for wasted coal.

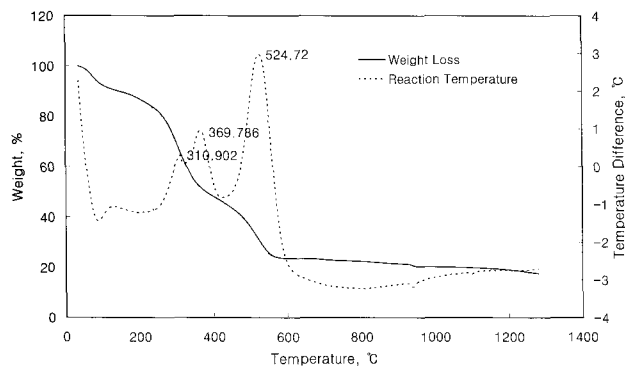


Fig. 6 Results of TGA-TDA analysis for swine waste.

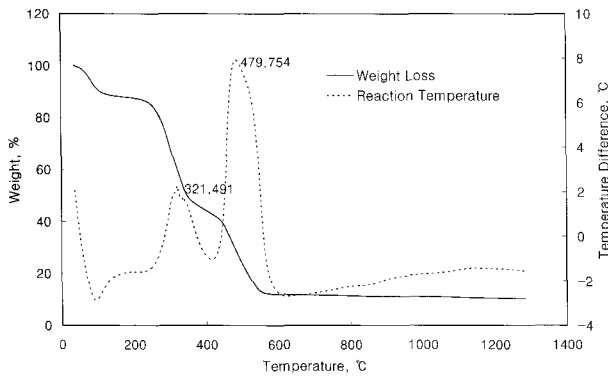


Fig. 7 Results of TGA-TDA analysis for swine waste with sawdust.

톱밥돈분의 열분해 곡선을 보면 큰 무게 감소와 함께 321.5°C 및 480.0°C에서 각 1차 및 2차 열분해 반응점 온도를 나타내었고, 휘발성 유기조성물 및 저분자들이 1차 열분해 한 후 셀룰로오스 등의 고분자 유기물들의 2차 열분해를 거쳐 600°C 이후에서는 회분만이 존재하는 것을 나타내고 있다 (Fig. 7).

그림 8과 같이 우분의 열분해 반응은 돈분과 매우 유사하

였으며, 유리수분 증발에 의한 급격한 무게감소 후 130°C 부근에서 1차 반응점을 보였다. 그 후 온도 증가와 함께 휘발성 유기조성물이 열분해하는 2차 및 3차 반응점 온도가 309.4°C 및 372.6°C로 나타났다. 3차 열분해 후 지속적인 무게 감소와 함께 고분자 유기물들이 열분해 하는 4차 반응점 온도가 530.1°C로 나타났으며, 600°C 이하에서는 거의 회분만이 존재하는 무게 감소곡선을 나타내었다.

돈분과 분탄을 5 : 5로 혼합한 경우의 열분해 결과는 돈분과 분탄 각각의 열분해 결과를 혼합한 것과 매우 유사하게 나타났다(Fig. 9). 즉, 유리수분 증발에 의한 급격한 무게감소 후 130°C 부근에서 1차 반응점을 보였으며, 돈분의 열분해 반응으로 대부분 돈분의 무게 감소가 이루어진 2차, 3차, 4차 반응점 온도가 311.1°C, 363.3°C, 555.8°C로 나타났다. 그 후 최대 분해 정점온도인 652.2°C에서 5차 반응점 온도를 보이면서 분탄의 열분해가 이루어지면서 900°C 까지 무게감소가 지속되다 그 이후에는 큰 무게 변화가 없는 열분해 곡선을 나타내었다.

톱밥돈분 및 분탄을 5 : 5로 혼합한 경우의 열분해 결과는 590°C 이상에서 여러 열분해 반응점 온도를 보이면서 광범위

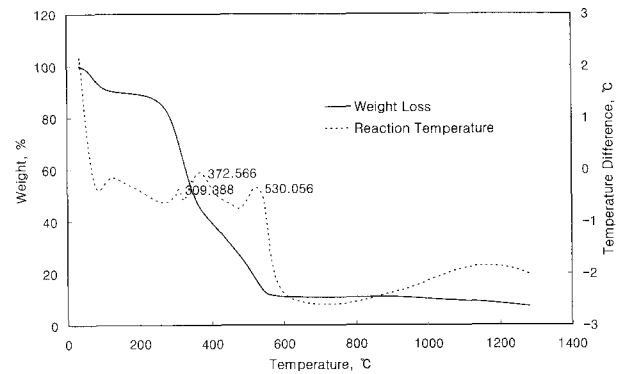


Fig. 8 Results of TGA-TDA analysis for cattle waste.

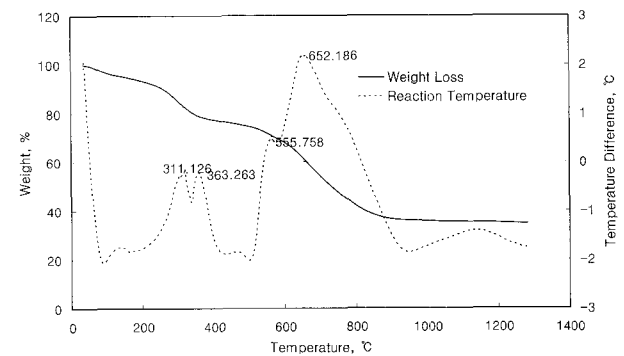


Fig. 9 Results of TGA-TDA analysis for mixture of swine waste and wasted coal mixed as the ratio of 5 : 5.

하게 열분해가 이루어지고 있다는 점에서 톱밥돈분 및 분탄의 개별적 열분해 결과를 혼합한 것과는 다소 차이를 보이고 있는 것 같다(Fig. 10). 유리수분 증발에 의한 급격한 무게감소 후 130°C 부근에서 1차 반응점을 보인 다음 주로 톱밥돈분의 열분해에 기여하는 반응점 온도로 생각되는 2차, 3차 반응점이 346.3°C 및 520.7°C에서 나타났다. 그 후 대부분 분탄의 열분해에 기여하는 것으로 생각되는 4차, 5차, 6차 반응점 온도가 598°C, 662.8°C, 766.2°C에서 넓게 분포하면서 나타났으며, 온도 증가와 함께 900°C까지 무게감소가 지속되다가 그 이후에는 큰 무게 변화가 없는 열분해 곡선을 나타내었다.

우분 및 분탄을 5 : 5로 혼합한 경우의 열분해 결과는 우분 및 분탄의 개별적 열분해 결과를 종합한 것과 매우 유사하게 나타났다(Fig. 11). 즉, 유리수분 증발에 의한 급격한 무게감소 후 130°C 부근에서 1차 반응점을 보인 다음 370°C 및 539.5°C에서 2차 및 3차 반응점을 지나면서 우분이 열분해된 후 746.9°C의 4차 반응점을 지나면서 분탄의 열분해가 이루어진 것으로 생각된다.

돈분 및 분탄을 5 : 5로 혼합한 시료에 해수를 첨가한 경우의 열분해 결과는 해수를 첨가하지 않은 경우와 다소 다른 양

상을 보였다(Fig. 12). 즉, 유리수분 증발에 의한 급격한 무게감소 후 130°C 부근에서 1차 반응점을 보인 다음 329.0°C의 2차 반응점을 지나면서 돈분이 열분해 되고, 다시 579.8°C의 3차 반응점을 지나면서 분탄이 열분해 되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 해수 첨가 없는 돈분 및 분탄 혼합시료에 비해 열분해 반응점 온도 및 최대 열분해 반응점 온도가 낮아진 것으로 나타났으며, 이는 해수의 첨가가 혼합시료의 연소를 용이하게 할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

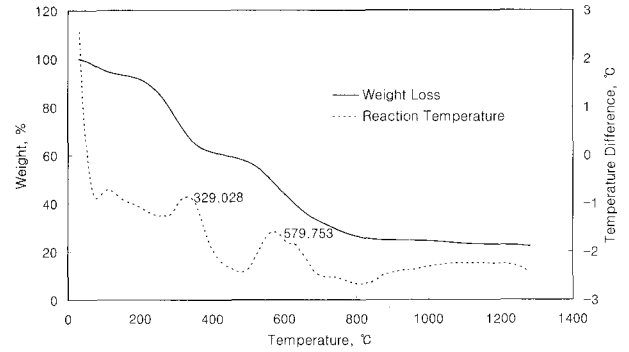


Fig. 12 Results of TGA-TDA analysis for mixture of swine waste and wasted coal mixed as the ratio of 5 : 5 with mixing seawater.

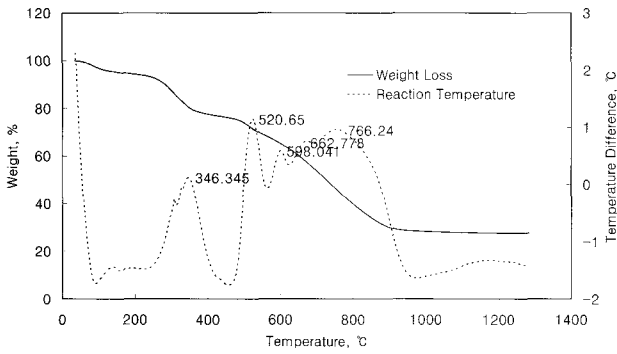


Fig. 10 Results of TGA-TDA analysis for mixture of swine waste with sawdust and wasted coal mixed as the ratio of 5 : 5.

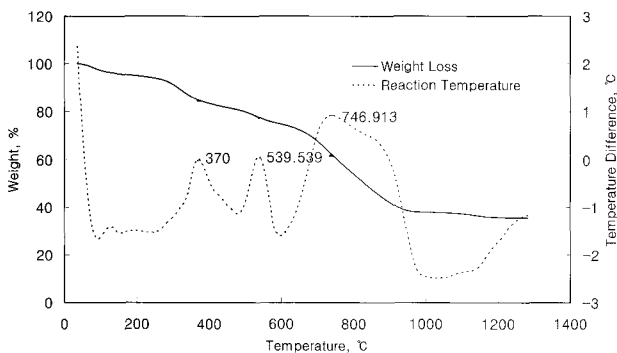


Fig. 11 Results of TGA-TDA analysis for mixture of cattle waste and wasted coal mixed as the ratio of 5 : 5.

4. 요약 및 결론

본 연구는 우리나라의 폐부존자원 및 폐기물인 저품질 분탄과 축분을 이용한 농업시설난방을 위한 고형연료화를 위한 기초 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 분탄에 해수를 첨가한 경우 발열량이 증가하였으나, 축분의 경우는 그러한 효과를 보지 못하였다. 그러므로, 분탄 자체를 연료로 사용할 경우는 해수를 첨가함으로써 발열량을 증대시켜 연료로 사용할 수 있을 것이다.
- (2) 분탄을 축분과 혼합하여 연료로 사용할 경우는 해수를 첨가하여 화학반응에 의한 발열량을 다소 증대시킬 수 있다 하더라도, 해수의 구성성분이 혼합시료의 무게 증가에 기여하는 만큼의 발열량 증대를 가져올 수 없으므로 해수첨가 없이 단지 축분 및 분탄을 혼합한 고형연료로 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다.
- (3) 분탄과 축분의 혼합시료는 각 혼합비율에 따라 다소 다른 발열량을 나타내었으며, 혼합비율을 조정함으로써 용도에 따른 다양한 발열량을 갖는 고형연료 제조가 가능할 것이다.
- (4) 돈분, 톱밥돈분, 우분, 분탄은 각 상이한 열분해 반응점 온도 및 무게 감소율을 보였으며, 축분(돈분, 톱밥돈분,

우분) 및 분탄이 혼합될 때 각 시료의 열분해 특성이 혼합된 복합적인 열분해 반응을 나타내었다.

- (5) 축분 및 분탄 혼합연료는 연소가 용이한 축분이 분탄과 혼합되므로 분탄 자체 연료 보다 연소가 매우 용이하여 고품연료로 사용하기에 매우 적합할 것이다.

참고문헌

1. Annamalai, K., M. Y. Ibrahim and J. M. Sweeten. 1987. Experimental studies on combustion of cattle manure in a fluidized bed combustor. *J. Energy Resour. Technol.* 109(2): 49-57.
2. Sami, M., K. Annamalai and M. Wooldridge. 2001. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Sci.* 27:171-214.
3. 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* 82:1-16.
4. Sweeten, J. M., J. Korenberg, W. A. LePori, K. Annamalai and C. B. Parnell. 1986. Combustion of cattle feedlot manure for energy production. *Energy Agric.* 5:55-72.
5. 김형만, 김무근. 2000. 축산폐수 정화조의 오염 절감을 위한 축분의 고품 연료화 기술개발. 제 10회 김해발전연구과제 세미나.
6. 김형만, 김무근, 손영복. 2000. 축분 혼합 고품연료의 연소성에 관한 실험적 연구. 한국연소학회. 제20회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집.
7. 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남, 1997, 광산지역 광해조사 및 대책연구.
8. 에너지관리공단. 2000. 기술세미나 자료집.
9. 정재택. 1999. 시설원에 난방 시스템 및 저가 원료 대체기술 개발. 연구 보고서. 농림부.
10. 홍지형, 박금주, 전병태, 홍성철. 1999. 축산폐기물 자원화. 동화기술.