



[2016-12-BM-008]

우분의 고품 연료화를 위한 특성 분석

이성현^{1)*} · 유병기¹⁾ · 주선이¹⁾ · 강연구¹⁾ · 정광화²⁾

Characteristics of Solid Fuel from Cattle Manure

Sunghyoun Lee^{1)*} · Byeongkee Yu¹⁾ · Sunyi Ju¹⁾ · Yeongu Kang¹⁾ · Gwangwha Jung²⁾

Received 7 July 2016 Revised 16 November 2016 Accepted 17 November 2016

ABSTRACT Cattle manure solids might have used in heating agricultural facilities. This study focused on the possibilities of using cattle manure as a solid fuel instead of composting it. The moisture content, ash content, volatile content, calorific value, TGA (thermogravimetric analysis) data, and elements in the cattle manure were analyzed. After dehydrating the manure completely in a drying oven, the calorific value and ash content were measured to be 3,538 kcal/kg and 11.3%, respectively, which satisfies the standard value of livestock solid fuel: heating value of 3,000 kcal/kg or above and ash content of 30% or below. In addition, when the chemical elements, such as C, H, O, N, S, and Cl in the cattle manure solids were analyzed, there was 35.72~45.68% carbon and 29.48~50.43% oxygen. There were cases in which the water content in the manure exceeded 80%, implying that the costs for dehydration would be expensive and the moisture content needs to be lowered to 20% before cattle manure can be used as an energy source. Therefore, minimizing the water content at the farm without any outside financial input will be the greatest task.

Key words Cattle manure solids(우분 고품분), Solid fuel(고형연료), Calorific value(발열량), Ash contents(회분함량)

1. 서론

가축분뇨는 유기물 자원으로써 효율적으로 관리하면서 활용하면 그 이용 가치가 크지만 그렇지 않을 때에는 환경을 오염시키는 원인으로 작용할 수 있다. 우리나라 농경지 면적은 2005년 1,824천 ha로 전체 국토면적의 18.3%를 차지했지만 그 이후 지속적으로 줄어들어 2014년에는 1,691천 ha로 전체 국토면적의 16.8% 차지하고 있다. 이를 토대로 계산을 해 보면 우리나라 농경지 면적이 매년 약 14,000ha 씩 줄어들었음을 알 수 있다. 한(육)우 사육 농가수 및 사육두수는 2005년 192천호 1,819천두에서 2014년 104천호 2,759천두로 농가수는 46% 줄어들었으나 사육두수는 오

히려 52%가 증가하였다.^[1] 이는 한(육)우 사육 농가 호당 사육두수가 크게 증가하였음을 의미한다. 이와 같이 한(육)우 축분을 유기질 퇴비 등으로 조제하여 이용할 농경지 면적은 지속적으로 줄어들고 한(육)우 사육 마릿수는 지속적으로 증가하다보니 우분의 발생량과 이용량에 수급 불균형이 발생하고 있다. 따라서 우분을 유기질 퇴비 등으로의 지속적인 활용과 함께 에너지원으로 활용하는 것에 대한 관심이 높아지고 있으며, 최근 가축분뇨 고품분을 연소하여 에너지원으로 활용하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있다.^[2,3,4,5]

김성중 등은 축산폐기물의 고품연료화를 위한 시험 분석 결과 축산농가에서 발생하는 축산분뇨는 순수한 자체 성분만으로는 낮은 발열량으로 인해 연료화에 어려움이 있을 것으로 판단했다.^[2]

손영목 등은 고농도 축산폐수인 가축(소, 돼지, 닭 등)의 분뇨를 처리함에 있어서 기존의 퇴비화 방법과 더불어 화

1) Department of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences E-mail: leesh428@korea.kr
Tel: +82-63-238-4049 Fax: +82-63-238-4035

2) National Institute of Animal Science

훼손지, 축사 등 농가에서 필요로 하는 저가의 난방용 연료로 사용할 수 있는 방법을 검토한 결과 왕겨, 연탄 등과 혼합하여 연소조건을 개선하면 지속적으로 연소가 가능하게 되어 난방용 연료로서 우수하다고 하였다.^[3] 이귀현은 톱밥이 혼합된 우분을 적정하게 발효 및 건조시켜 성형기로 성형된 고품 연료의 열 및 물리·화학적 특성을 성형 전 생우분과 비교 분석한 결과 성형우분의 발열량이 함수율 0%일 때 약 3,560kcal/kg에서 함수율이 35%로 올라가면 약 2,607kcal/kg으로 함수율이 증가할수록 선형적으로 감소한다고 하였다.^[4] Sweeten 등은 우분 고품분을 이용한 에너지 생산을 위해 연소 시험을 수행하였다. 이때 우분의 함수율은 14~18% 이었고 발열량은 2,961~3,570kcal/kg으로 조사되었다.^[5] 강연구 등은 농림부산물물을 이용한 펠릿의 열적 특성을 분석한 결과 농업부산물 및 혼합 펠릿은 목재 펠릿에 비해 발열량이 80~85% 수준으로 다소 떨어지기는 하였지만 연료화가 가능한 것으로 제시하였다.^[6]

구재희 등은 목재펠릿, 왕겨, 벚짳과 고품 연료 제조설비로부터 생산된 RDF (refused derived fuel) 등의 연소특성 분석을 수행한 결과 모든 시료가 900°C의 연소온도에 도달하기 전에 연소가 대부분 일어남을 확인할 수 있었다.^[7] 류정석 등은 열병합 발전소용 목질계 바이오매스의 연소 특성에 관한 연구를 수행한 결과 석탄과 비교하여 연소반응속도가 크게 증가함을 확인할 수 있었다.^[8] 이원준은 폐목재에 해당되는 WCF(wood chip fuel)와 폐가구집 및 수순목재에 가까운 목재칩, 왕겨, 왕겨펠릿 등의 연소특성을 분석한 결과 종류에 따라 오염물질의 배출이 문제가 될 수 있으므로 주의가 필요하다고 하였다.^[9]

이준표 등은 국내 바이오매스 자원의 지리 및 기술적 잠재량을 산정한 결과 한(육)우 축분의 경우 이론적에너지 잠재량이 연 671,309 TOE라고 제시하였으며, 또한 한(육)우 축분의 경우 한곳에서 처리가 이루어지기 때문에 에너지 이용 가능성이 크다고 하였다.^[10] 노남선 등은 국내 폐기물에너지의 잠재량을 분석하기 위하여 폐기물 분류 및 종류별 잠재량, 시군구별 잠재량을 분석하여 제시하였다.^[11] Adekiigbe는 바이오매스 열공급시스템의 연료로써 5종의 경제수종 잔재물을 분석한 결과 가정용, 공장용 등 다양한 시설에 연료로써 이용 가능성이 있음을 제시하였다.^[12]

이처럼 가축분뇨를 다양한 방법으로 에너지원으로 이용

하고자 하는 시도는 꾸준히 되어 오고 있지만 그동안 가축분뇨를 에너지원으로 이용할 수 있는 제도적 기준이 없었기 때문에 주로 퇴비화를 통한 처리에만 크게 의존하였다. 하지만 퇴비화를 통한 가축분뇨의 처리는 지속적으로 줄어들고 있는 경지면적을 고려하면 이를 수용할만한 농경지가 점점 부족해지고 있는 실정이다. 따라서 가축분뇨의 고품 연료화는 농경지로 환원되는 퇴비의 절대량을 줄일 수 있는 하나의 대안이 되고 있다. 2015년 말 가축분뇨의 고품 연료화 기준이 마련되었기 때문에 향후 가축분뇨를 이용한 에너지 획득에 관한 연구가 크게 늘어날 것으로 판단된다. 본 연구에서는 한(육)우 농가에서 발생하는 다양한 형태의 우분 고품분을 수집하여 에너지원으로서의 활용가능성을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

우분은 전국의 한(육)우 농가에서 수집하였다. 우분의 형태는 농가에 따라 한우생분, 한우생분+톱밥, 혐기발효 한우분, 우분퇴비, 건조전 우분퇴비, 건조후 우분퇴비, 혐기발효 젖소분, 젖소 생분 등 다양하며 총 70점을 수집분석하였다. 수집한 우분의 수분함수율은 ASTM D2016-74의 방법으로 분석하였으며, 가연성 휘발분은 ASTM D3175-89, 회분함량은 ASTM D3174-89 방법으로 분석하였다. 수분분석 및 발열량 분석을 위한 건조에 사용된 건조기는 Ds-80 이었으며, 회분을 분석하기 위하여 사용한 소각로는 MCT-350S이었고, 우분의 발열량을 분석하기 위하여 CALORIMETER SYSTEM C500(IKA®)을 사용하였다. 우분의 발열량 측정을 위해서 건조기에서 더 이상 무게의 변화가 없을 때까지 완전히 건조하여 수분이 배제된 상태의 우분을 사용하였으며 각각의 계산식은 (1)~(3)과 같다. 건조 우분의 연소 프로파일 및 연소속도 특성 분석을 위하여 TGA701(LECO) 열중량 분석기를 사용하였으며, 분석은 ASTM D7582 MVA In Coal 방법으로 수행하였다. 우분 고품분의 원소분석은 환경부 고시 제2014-135호인 고품 연료제품 품질 시험·분석방법에 의해 수행하였으며 원소중 C, H, O, N은 Elemental Analyzer EA2000을 사용하여 분석을 하였고, S, Cl은 산소분배법으로 전처리를 하고난 후 Ion chromatography ICS-1100을 이용하여 분석하였다.

$$\% M.C. = \frac{Ww - Wd}{Ww} \times 100\% \quad (1)$$

여기서,

- % M.C. : percentage moisture content
- Ww : weight of the sample as received
- Wd : weight of the sample after oven-drying

$$\% V.M. = \frac{Ms - Mfd}{Ms} \times 100\% \quad (2)$$

여기서,

- % V.M. : percentage volatile matter
- Ms : mass of air dried sample
- Mfd : mass of sample after 10 mins in furnace at 900°C

$$\% A = \frac{Mar}{Ms} \times 100\% \quad (3)$$

여기서,

- % A : percentage ash content
- Ms : mass of air dried sample
- Mar : mass of ash residue

3. 결과 및 고찰

3.1 우분의 수분함량 및 건조소요 에너지

농가에서 사육하는 한(육)우 시설의 분뇨 관리는 대부분 우상에 톱밥, 왕겨 등의 깔개를 깔아서 소가 배설을 하면 바닥에 있는 깔개에 흡수된 후 기상 상황에 따라 대기중으



Fig. 1. Picture of Solid manure of cattle feedlot

로 수분이 증발되거나 흡수되는 과정을 거치면서 처리하게 되거나 후리스톨 우사에서와 같이 소가 분뇨를 배설하여 바닥에 쌓이면 스크레이퍼를 이용해 한쪽으로 긁어내어 모은 후 고액분리기를 이용해 고형분과 액상분을 분리하여 고형분은 퇴비화하고 액상분은 액비화 하여 농경지에 살포 유기질 비료로 활용하는 방법으로 처리된다. 따라서 농가에서 채취한 우분 고형분의 수분함수율은 채취 장소에 따라 20% 이하로 건조된 시료부터 소가 막 배설한 80% 이상까지 광범위하게 분포되었다. 우분의 함수율은 분과 노가 배설 직후 바로 분리가 이루어지면 고형분의 경우 80% 내외의 수분 분포를 가지지만 분과 노가 분리되지 않고 혼합되면 90% 이상의 수분을 유지하게 된다. 또한 우상 바닥에 깔아준 톱밥, 왕겨 등과 혼합되면 수분함수율은 낮아지게 되고, 건조한 기후조건에 오래 머물러 있게 되면 수분함수율은 증발에 의해 낮아지는 것으로 나타났다. 후리스톨 우사와 같이 분과 노가 한 장소에 섞이는 시설의 경우에는 슬러리 상태로 분뇨가 관리되기 때문에 수분함수율이 매우 높아 고형연료화를 위해서는 1차적으로 고형분과 액상분을 분리해야 한다. 이때 액상분과 고형분의 분리효율이 높은 고액분리기의 경우에도 분리된 고형분의 수분함수율은 약 70% 이상을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 우분의 효율적인 에너지 이용을 위해서는 축분 고형연료 함수율 기준인 20% 이하로 건조시키는 것이 중요한 것으로 나타났으며, 표 1은 우분 원료의 함수율에 따라 필요한 건조분 함수율로 건조시키는데 소요되는 필요에너지를 분석 제시하였다. 표 1에서 분석한 필요에너지는 이론적인 건조소요 에너

Table 1. Energy requirement for dehydrate of raw cattle feedlot manure in 1,000 kg (unit : 1,000 kcal)

Moisture contents of raw material (%)	Moisture contents of dried material(%)						
	40	35	30	25	20	15	10
80	359	373	385	395	404	412	419
75	314	332	347	359	371	380	389
70	270	290	308	323	337	349	359
65	225	249	270	287	303	317	329
60	180	207	231	252	270	285	299
55	135	166	193	216	236	254	270
50	90	124	154	180	202	222	240
45	45	83	116	144	168	190	210
40		41	77	108	135	159	180

지로 건조되지 않은 우분의 초기온도를 25℃로 가정하여, 25℃의 우분을 100℃의 우분으로 가온하는데 소요되는 열량과, 100℃에서 1kg의 물이 기화되는데 필요한 열량을 539kcal/kg으로 가정하여 계산한 건조에 필요한 이론적인 에너지 값이다. 따라서 우분을 건조하기 위한 건조기의 건조효율에 따라 실제 건조에 필요한 에너지는 더 커질 수도 있을 것으로 사료된다.

3.2 우분의 연료적 특성

표 2는 우분의 휘발분, 회분, 고정탄소를 나타낸 것이고, 그림 2는 우분을 수분의 변화가 없을 때까지 완전히 건조시켰을 때의 고위발열량을 나타낸 것이다. 휘발분의 경우 중량비율로 56.6~68.7%로 나타났으며, 회분은 5.7~23.2%로 나타났고, 고정탄소는 9.7~17.6%로 나타났다. 우분을 수분의 변화가 없을 때까지 완전히 건조하여 측정할 발열량은 1,626~4,333kcal/kg으로 나타났으며, 평균 발열량은 약 3,500kcal/kg 이었다. 축분고형연료 허용 기준이 저위발열량 3,000kcal/kg 이상, 회분 30% 이하임을 감안하면 우분의 경우 고품연료로서 활용가능성이 큰 것으로 나타났다. 하지만 그림 2에서 보는 바와 같이 많은 샘플에서

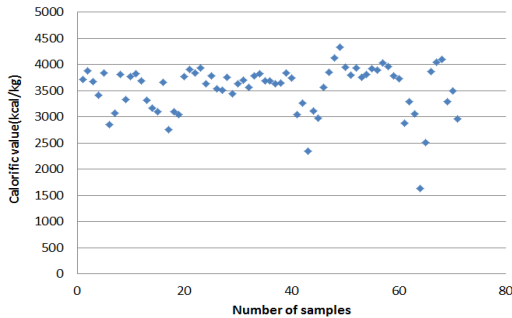


Fig. 2. Calorific value of dried cattle manure

Table 2. Volatile content, ash content, fixed carbon and calorific value of cattle feedlot manure

	Volatile (%)	Ash (%)	Fixed carbon (%)	Calorific value (kcal/kg)
Maximum	68,70	23,20	17,60	4333,00
Minimum	56,60	5,70	9,70	1626,00
Average	63,30	11,33	14,38	3538,07
Standard deviation	3,92	5,44	2,69	458,73

발열량이 3,500kcal/kg 이하로 나타났다. 이와 같이 발열량이 낮게 나타난 샘플을 분석해 본 결과 주로 우상 바닥에 흙 등 이물질이 혼입된 것, 혐기소화과정을 통해 유기물이 분해되어 가스화 이용된 것, 퇴비화 과정에서 질석 등 무기물을 투입한 것 등에서 발열량이 낮게 나타났다. 따라서 우분을 고품연료화 하기 위해서는 우상의 깔개 재료로 톱밥, 왕겨 등 유기물을 적극 활용하고 흙 등 비 가연성 물질의 유입을 최소화 하는 것이 중요할 것으로 판단되었다. 또한 혐기소화 과정을 통해 메탄가스화 하고난 잔재물은 고품연료로서의 활용가치가 매우 낮기 때문에 퇴비 등으로 활용하는 것이 좋을 것으로 사료되었다.

3.3 우분의 원소 특성

표 3은 우분의 원소분석 결과를 나타낸 것으로 탄소 35.72~45.68%, 수소 4.62~5.58%, 산소 29.48~50.43%, 질소 0.86~2.53%, 황 0.14~1.12%, 염소 0.09~1.76%로 나타났다. 표 3에서 보는 바와 같이 우분에 함유된 원소는 대부분 탄소와 산소인 것으로 나타났다.

3.4 우분의 열적 감량 특성

그림 3은 우분의 온도에 따른 연소 프로파일의 일례를 나타낸 것이다. 소의 경우 대부분 볏짚, 건초 등의 조사료와 옥수수 등의 곡물 사료를 주식으로 한다. 그렇기 때문에 배설물의 경우도 섭취 이용하고 남은 미소화 영양분으로 판단되고, 대부분이 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌 등 유기물질로 이루어져 있다. TGA 그래프를 보면 상온에서 약 950℃ 까지 온도를 올리면서 열적 감량을 분석한 결과 류 등이 분석한 목질계 바이오매스의 열적 감량과 유사한 반응이 일어나는 것으로 나타났다.^[8] 연소 프로파일은 250~280℃에서 탈휘발화 반응이 시작되어 400℃ 구간에

Table 3. Element of cattle feedlot manure (unit : %)

	C	H	O	N	S	Cl
Maximum	45,68	5,58	50,43	2,53	1,12	1,76
Minimum	35,72	4,62	29,48	0,86	0,14	0,09
Average	43,31	5,33	43,42	1,49	0,36	0,67
Standard deviation	2,89	0,30	5,87	0,53	0,31	0,45

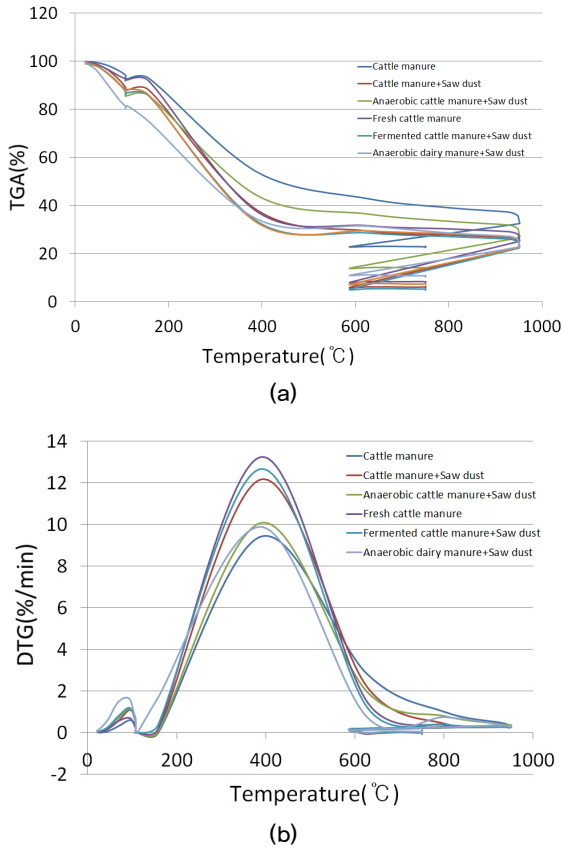


Fig. 3. Combustion profiles of cattle manure using TGA analysis; (a) TGA and (b) DTG thermogram

서 가장 활발한 연소반응을 보이며 600°C 부근에서 고정탄소의 산화반응이 종료되는 것으로 나타났다. 그림 3(a)의 연소프로파일에서 950°C까지 온도가 상승했다가 온도가 600°C까지 떨어지면서 무게감량이 발생하는 것은 온도가 상승하면서 연소되는 과정에서 미 연소되었던 유기물이 재분해되는 과정에서 발생하는 것으로 사료된다. DTG 그래프의 경우도 250~550°C 사이에서 무게감량 변화가 큰 것으로 나타났으며, 400°C 전후에서 가장 큰 무게감량 변화가 발생하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 한(육)우 사육시 발생하는 축분을 퇴비화 방법이 아닌 고형 연료로써의 활용가능성을 모색하기 위하여 우분의 함수율, 회분, 가연성 휘발분, 발열량, 열적 감량 및 원소 등을 분석하였다. 분석결과 대부분 목질계 바이

오매스의 발열량 약 4,000~4,500kcal/kg에는 미치지 못하는 것으로 나타났다. 하지만 우분을 건조기에서 수분의 변화가 없을 때까지 완전히 건조시켜 수분을 배제한 상태에서 측정한 결과 발열량이 평균 3,538kcal/kg, 회분은 11.3%로 나타나 축분고형연료의 품질 기준인 저위발열량 3,000kcal/kg 이상, 회분함량 30% 이하에는 적합한 것으로 나타나 에너지 이용 가능성이 큰 것으로 판단되었다. 분석결과 발열량이 높게 나타난 것은 주로 우분, 우분+톱밥, 우분+왕겨의 경우였고, 발열량이 낮게 나타난 것은 원료에 흙 등 이물질이 혼입된 것, 혐기소화 과정을 거친 것, 퇴비화 할 때 질석 등 무기물을 혼입한 것 등으로 나타났다.

또한 C, H, O, N, S, Cl 등의 원소를 분석한 결과 탄소 35.72~45.68%, 산소 29.48~50.43%로 대부분이 가연성 물질로 이루어진 것으로 분석되었다. 하지만 농가현장에서 수집한 한(육)우 고형분의 함수율이 많은 경우 80%를 상회하여 연소를 통한 에너지원으로 활용하기 위해서는 수분함수율을 축분고형연료 함수율 기준인 20% 이하로 낮추어야 하기 때문에 수분을 증발시키기 위한 건조비용 소요가 클 것으로 판단되었다. 따라서 한(육)우 고형분을 에너지원으로 활용하기 위해서는 가능한 한 외부의 비용 투입 없이 농가현장에서 수분을 최대한 낮출 수 있도록 하는 것이 중요한 과제가 될 것으로 판단된다. 또한 유류 온풍난방기, 목질계 펠릿 온풍난방기, 한(육)우 고형연료 온풍난방기 등에서 연소할 때 발생하는 연소가스 분석을 통해 대기 중으로 배출되는 오염물질 함량이 동등한 수준이거나 기존 이용되는 것에 비해 한(육)우 고형연료 연소시 발생하는 오염물질 함량이 낮다면 농가현장에서 우분 고형연료가 활발하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호 PJ010948022016)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

References

[1] 농림축산식품부, 2015, “농림축산식품 주요통계”, 농림축

산식품부.

- [2] 김성중, 이제학, 2013, “축산폐기물의 고품연료화 가능성에 관한 연구”, *J. of KORRA*, 21(2), 53~57.
- [3] 손영목, 김형만, 김무근, 2000, “축분 혼합 고품연료의 연소성에 관한 실험적 연구”, *한국연소학회*, 93~104.
- [4] 이귀현, 2010, “우분 성형 고품연료의 열 및 물리화학적 특성”, *바이오시스템공학*, 35(1), 64~68.
- [5] Sweeten, J. M., Korenberg, J., Lepori, W. A., Annamalai, K. and Parnell, C. B., 1986, “Combustion of Cattle Feedlot Manure for Energy Production”, *Energy in Agriculture*, 5, 55~72.
- [6] 강연구, 강금춘, 김종구, 김영화, 장재경, 유영선, 2011, “농림부산물을 이용한 펠릿의 열적 특성”, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(2), 61~65.
- [7] 구재희, 오세천, 2012, “바이오매스와 폐기물 고품연료의 연소특성”, *Appl. Chem. Eng.*, 23(5), 456~461.
- [8] 류정석, 김기석, 박수진, 2011, “열병합 발전소용 목질계 바이오매스의 연소 특성에 관한 연구”, *Appl. Chem. Eng.*, 22(3), 296~300.
- [9] 이원준, 2012, “바이오매스 종류에 따른 연료성상 및 연소 특성에 관한 비교 연구”, *한국폐기물자원학회지*, 29(4), 421~430.
- [10] 이준표, 박순철, 2016, “바이오매스 자원의 지리 및 기술적 잠재량”, *신재생에너지*, 12(S2), 53~58.
- [11] 노남선, 조상민, 소진영, 김광호, 김유미, 김현구, 강용혁, 2016, “국내 폐기물 에너지의 잠재량 분석(1)”, *신재생에너지*, 12(S2), 59~64.
- [12] Adekiigbe, A., 2012, “Determination of Heating Value of Five Economic Trees Residue as a Fuel for Biomass Heating System”, *Nature and Science*, 10(10), 26~29.