

탄화공정에서의 우분 반응속도 평가

김재경 · 이민석 · *이승희

경기대학교 공과대학 환경에너지공학과

Evaluation on Reaction Kinetics of Cow Manure in Carbonization Process

Jae-Kyung Kim, Min-Seok Lee and *Seung-Whee Rhee

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Kyonggi University

요 약

우분의 기본 특성과 우분 탄화물의 특성에 대한 검토를 통해 탄화도, 전환율, 반응속도 및 활성화 에너지에 대하여 고찰하였다. 우분 시료 자체의 저위발열량은 272 kcal/kg로 낮게 나타나 연료로써의 개질이 필요하므로 탄화공정을 이용하여 탄화물의 발열량을 4,300 kcal/kg 이상인 연료로 전환 하였다. 전환율은 반응초기인 10분까지 급격히 증가하였으며, 온도가 증가함에 따라 높게 나타났다. 우분 탄화공정에서의 반응속도는 1차식으로 나타내었으며, 빈도인자(A)는 $1.34 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$, 활성화 에너지는 5,196.4 cal/mol로 평가되었다. 반응속도 상수는 250°C일 때 0.0679 min^{-1} , 400°C일 때 0.2107 min^{-1} 로 온도가 증가함에 따라 반응속도도 증가하는 것으로 나타났다. 우분 탄화에서의 반응속도에 대한 평가한 결과, 탄화공정의 최적조건은 탄화온도 350°C, 탄화시간 20분으로 나타났다.

주제어 : 반응속도, 우분, 탄화공정, 전환율, 활성화 에너지

Abstract

Through the study of the basic characteristics of cow manure and the characteristics of carbonization residue, carbonization degree, conversion rate, kinetic reactions, and activation energy for cow manure were examined. Since the heating value of cow manure was very low, it was converted to carbonization residue as a fuel with heating value of 4,300 kcal/kg by carbonization processes. Conversion rate was increased rapidly up to 10 minutes of the initial reaction stage and was increased with increasing temperature. The carbonization of cow manure could be described by the 1st order reaction. Frequency factor(A) of reaction rate for cow manure was evaluated to be $1.34 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$, the activation energy was estimated to be 5,196.4 cal/mol. As carbonization temperature increased from 250°C to 400°C, the kinetic reaction was increased from 0.2107 min^{-1} to 0.0679 min^{-1} . From the result of the carbonization for cow manure, it can be determined that the optimal conditions of the carbonization process were 20 minutes in carbonization time and 350°C for carbonization temperature.

Key words : Reaction Kinetics, Cow Manure, Carbonization, Conversion, Activation Energy

· Received : October 1, 2014 · Revised : October 23, 2014 · Accepted : November 12, 2014

*Corresponding Author : Seung-Whee Rhee (E-mail : swrhee@kgu.ac.kr)

Environmental Engineering, Kyonggi University, 94-6 Iui-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 443-760, Korea
Tel : +82-31-249-9736 / Fax : +82-31-258-1165

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내에서 신재생에너지 보급률은 2011년 기준으로 OECD국가 중 평균인 8.2%보다 매우 낮은 0.7%로 나타났다¹며 최하위로 평가되었다. 이에 따라 국내에서는 2012년 1월 1일부터 500 MW 이상의 발전설비용량을 보유한 발전사업자에게 총 발전량의 일정비율을 신재생 에너지로 생산하여 의무적으로 공급하도록 하는 RPS (Renewable Portfolio Standard) 제도를 시행하고 있다¹. 또한, 2006년 ‘폐기물 배출에 의한 해양오염 방지에 관한 국제협약’이 발효되고, ‘2012년부터 가축분뇨 및 하수오의 해양투기 전면 금지’가 발효됨에 따라 가축분뇨에 대한 육상처리가 급속히 대두되기 시작하였다²⁻⁴.

현재 가축분뇨는 대부분 퇴비화나 혐기성 소화로 처리되고 있으며 혐기성 소화의 경우 가축에 사용되어진 화학항생제 등으로 인해 미생물의 역할이 원활하지 않을 수 있어 발생가스가 감소할 가능성이 높다. 또한 근래에 가축에 발생하였던 구제역, 조류독감 등 가축전염병에 의해 심각한 환경문제를 도출시킬 수 있으므로 이를 예방하기 위하여 멸균이 필요한 실정이다. 이에 따라 가축분뇨는 멸균 및 에너지원으로 사용할 수 있는 탄화공정의 도입이 필요하고 탄화공정에 대한 여러 연구가 진행되는 것이 바람직하다. 그리고 탄화물에 대한 탄화도와 탄화속도 분석을 위하여 탄화공정에서의 반응속도에 대한 고찰이 필요한 실정이다⁵. 열적 탄화는 시료의 급속 가열이 어려울 뿐만 아니라 외부의 열원으로부터 반응물이 가열되기 때문에 결국 반응속도가 느려지게 되는 문제점이 있어 이에 대한 검토가 필요하다^{6,7}.

열적 탄화에서 반응속도에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으며 그에 대한 예로 Bilbao 등은 이차반응을 무시하고 독립적 반응, 물질전달 및 확산 등을 가정하여 일차반응을 통한 열분해 반응속도 식을 제안하였으며 톱밥과 섬유소를 원료로 사용하였다^{8,9}. Sharma 등은 생성속도를 일차반응으로 나타내는 식을 주장하였으며 과일과 다당류를 원료로 사용하였다¹⁰. Baker는 담배를 원료로 사용하여 탄화 시 승온속도에 따른 CO와 CO₂를 일차반응으로 표현하여 반응속도를 나타내어 구하였으며 Hajaligol 등은 원료로 섬유소, 목질소와 sweet gum 등을 사용하여 일차반응이라는 가정하에 승온속도를 빠르게 하여 반응속도를 구하였으며 Suuberg 등은 일차반응에서 승온 속도 및 분위기 가스 등이 반응속도에 미치는 영향을 평가하였다¹¹⁻¹³. 이러한 연구들은 공통적으로 일차반응식을 이용하여 탄화의 반응속

도를 평가 하였으며 Arrhenius식에 의한 반응속도 상수에 대하여 검토하였다.

본 연구에서는 가축분뇨인 우분에 대한 탄화반응속도를 일차반응식과 Arrhenius식에 의해 평가하고자 하였다. 탄화공정에 의해 생성된 탄화물을 통해 원소분석, 발열량, 탄화도를 파악하였으며 열중량 분석기를 통해 TGA 및 DTG곡선을 분석하였다¹⁵. 탄화 시 반응속도는 탄화 공정에서 탄화시간과 탄화온도에 따른 전환율을 검토 하였으며 시간과 관계로부터 나타나는 선을 중심으로 선형화하여 반응속도 상수를 구하였다¹⁶. 그리고 반응속도는 원료물질의 탄화 정도를 나타내므로 이를 통하여 탄화물의 탄화도를 평가하였다.

2. 이론적 고찰

폐기물에서의 분해를 위한 반응속도는 온도와 물질의 농도에 의존하며, 일반적으로 탄화공정에서의 가축분뇨는 탄화물로 전환되는 전환율에 의해 영향을 많이 받을 수 있다. Hajaligol, Suuberg 등은 유기성 폐기물의 탄화반응에 관한 연구에서 반응속도를 일차반응식에 의해 연구하였고, Alves 등은 탄화반응을 탄화공정 중 초기 상태 시료에 영향을 주지 않는 비가역 단일 일차반응으로 나타내었다. 본 연구에서도 우분의 탄화공정에 대한 반응속도는 일차반응식을 사용하였으며, 일차반응식을 전환율로 나타내면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다¹⁶.

$$\frac{dX}{dt} = k(1-X) \quad (1)$$

식 (1)을 적분하여 정리하면 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$-\ln[(1-X)/(1-X_0)] = kt \quad (2)$$

여기서, 전환율 $X = 1 - W_t/W_0$, 초기전환율 $X_0 = 1 - W_0/W_i$, W_t 는 시간 t 에서 시료의 질량, W_0 는 시료를 탄화온도까지 승온시켰을 때의 질량, W_i 는 시료의 초기질량, k 는 반응속도 상수를 의미한다.

식 (2)에 의하여 $-\ln[(1-X)/(1-X_0)]$ 와 t 와의 관계로부터 나타나는 선을 중심으로 선형화하여 속도상수를 구할 수 있으며 속도상수는 반응속도의 온도 의존성에 대한 Arrhenius 법칙에 따라 식 (3)으로 표현된다.

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (3)$$

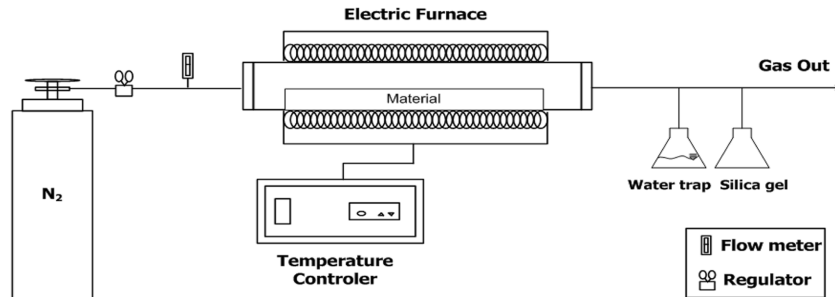


Fig. 1. A schematic diagram of carbonization apparatus for cow manure.

여기서, A 는 빈도인자, E_a 는 활성화에너지를 나타내며 식 (3)에 자연대수를 취하여 정리하면 다음과 같다. 식 (3)을 식 (1)에 대입하여 대수를 취하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\ln k = \ln A \left(-\frac{E_a}{R \cdot T} \right) \quad (4)$$

여기서 활성화 에너지의 단위는 cal/mol이고 빈도인자의 단위는 min^{-1} 이며, R 은 기체상수로서 1.9872 cal/mol·K이며, T 는 절대온도 (K)를 나타낸다.

3. 실험 장치와 방법

본 연구에서 우분은 충청북도 J지에서 채취한 우분 분뇨를 사용하였으며, 시료는 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 24시간 이상 건조한 후 $220 \mu\text{m}$ 이하의 크기로 전처리하여 체를 통과한 시료를 사용하였다. 탄화를 위한 실험 장치는 탄화작용이 나타나는 석영관에 유량계를 이용하여 100 mL/min의 N_2 가스를 주입하여 무산소 상태로 유지하여 실험하였다. 탄화를 시키기 위한 시료는 로 내의 석영관 중심에 고정시켰으며 온도조절기를 이용하여 탄화온도는 $250^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 로 하여 실험을 실시하였고, 탄화시간은 5 ~ 60분까지 실험을 실시하였다^{17,18)}.

우분 시료의 탄화온도와 시간에 따른 원소분석은 원소분석기 Elemental Analyzer(EA 1110)를 사용하여 구성성분의 함량을 분석하였으며 원소분석 결과로부터 탄화도(C/H mole ratio)를 도출하였다. 염소함량의 분석은 원자흡수분광 광도법(Advanced Metrom (Switzerland))을 통해 함유량을 측정하였다. 발열량은 Bomb Calorimeter(Parr, 6100, USA)를 사용하여 측정하였으며 우분의 열적특성은 열중량분석기(Thermal Analyzer, STA S-1500)를 이용하였다¹⁹⁻²¹⁾.

4. 결과 및 고찰

4.1. 우분의 기초 특성 검토 및 평가

우분의 기본 특성을 평가하기 위하여 삼성분, 원소분석 그리고 발열량을 분석하였으며 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 우분의 삼성분 분석 결과에서 습윤기준 우분의 수분함량은 72.01%로 약간 높았으며 가연분은 27.99%로 분석되었다. 건조기준으로 우분의 가연분은 77.78%로 비교적 높았고 회분은 22.1%로 나타났다. 원소함량에 대해서는 탄소가 36.57%로 가장 높은 비율을 나타내었고 산소 33.62%, 수소 3.29%, 질소 2.71%로 나타났다. 측정발열량은 수분 보정하여 고위 발열량으로 나타냈으며, 저위발열량은 고위발열량에서 수분의 열량을 보정하여 나타냈다. 우분 시료에 대한 고위발열량과 저위발열량은 각각 753 kcal/kg과 272 kcal/kg으로 나타났다. 돈분 시료와 비교하여 고위발열량과 저위발열량은 낮게 나타나 돈분보다 개질이 더 필요한 것으로 평가되었다¹⁶⁾.

Table 1. Elementary analysis of cow manure

Type		Dry basis	Wet basis	
Elementary Analysis [%]	Combustible matter	C	36.57	10.24
		H	3.29	0.92
		O	33.62	9.41
		N	2.71	0.76
		S	1.59	0.44
	Ash	22.22	6.22	
Moisture	0.00	72.01		
High Heating Value (H_h) [kcal/kg]		753		
Low Heating Value (H_l) [kcal/kg]		272		

4.2. 우분의 TGA 및 DTG 분석

우분의 열적 특성은 열중량분석기(Thermogravimetry Analysis)를 사용하여 분석하였으며 TGA 및 DTG를 통해 분석결과는 Fig. 2에 나타내었다. 우분 시료는 105 ± 5°C에서 24시간 건조 후 10°C/min의 승온속도로 20°C ~ 800°C의 온도범위에서 열적 특성을 분석하였다. Fig. 2에서 TGA곡선은 200°C에서 우분 원료의 중량이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며 350°C부근에서 총 중량의 약 30%로 나타났으며 이후 800°C까지 서서히 감소하여 총 중량이 약 22%까지 감소하였고 이는 탄화 시 평가된 회분과 유사한 수치인 것으로 나타났다. 이에 따라 우분 시료는 회분을 제외한 나머지 성분이 제거되어 나타난 수치로 평가되었다. 또한, TGA분석에서 우분 시료는 중량이 급격히 감소한 것으로 나타난 250°C에서 400°C가 탄화에 적합한 것으로 판단되었다. DTG곡선의 분석결과는 Fig. 2에 나타낸 바와 같으며 발열반응은 초기에서 약 250°C까지 나타났으며 250°C ~ 300°C에서 발열반응에서 흡열반응으로 전환되었고 300°C 이상에서 흡열반응으로 나타났다. 따라서 DTG 곡선을 통한 우분의 탄화반응은 흡열 반응이 적합하므로 300°C이상에서 실시하는 것이 적합한 것으로 판단되었다. 이러한 결과를 돈분 시료와 비교 검토하면

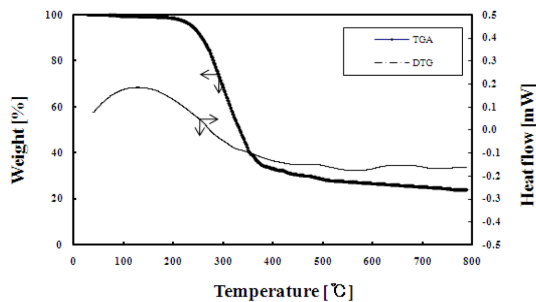


Fig. 2. TGA and DTG curves of cow manure.

TGA 및 DTG의 결과에 의해 중량감소와 발열반응, 흡열반응 시기가 거의 유사하게 나타났다¹⁶⁾.

4.3. 우분 탄화물의 열적 특성

우분 시료를 탄화하여 생성되는 탄화물 특성에 미치는 탄화온도와 시간의 영향을 검토하였다. 또한, 탄화온도는 300°C로 고정하여 시간에 따른 열적특성을 평가하였으며, 탄화시간은 20분으로 고정하여 온도를 조절하여 실험을 수행하였다. 이는 실험을 통해 나타난 결과를 판단하여 최적 온도와 시간을 고정하였다. 탄화온도에 따른 우분 탄화물의 원소분석 결과는 Table 2에 나타낸 바와 같고, 탄화물에서의 탄소는 구성 원소에서 가장 높은 성분 비율을 나타내었으며 200°C에서 400°C까지 중 300°C일 때 46.04%로 가장 높게 나타났다. 수소와 산소의 구성성분비는 탄화온도가 올라감에 따라 낮아지는 것으로 나타났으며 질소는 1.42%에서 2.37%까지 증가하는 것으로 나타났다. 염소는 모든 탄화온도와 시간에서 약 0.01%로 나타났으며, 이는 탄화반응 동안 SO_x로 휘발되는 것으로 판단되었다. 회분은 탄화 온도가 증가함에 따라 33.01%에서 42.02%까지 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 우분시료의 탄화는 300°C ~ 400°C에서 실시하는 것이 적합하다고 판단되어 탄화시간 변화에 따른 실험은 기준 온도를 300°C로 고정하여 실험을 실시하였다.

탄화시간은 10 ~ 40분으로 설정하였으며 초기에는 5분 간격으로 탄화를 실시하였고 20분 이후에는 10분 간격으로 탄화를 진행하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이 탄화물의 주성분인 탄소는 탄화시간이 20분일 때 46.04%로 가장 높게 나타났다. 우분 탄화물의 발열량은 200°C일 때 3,985 kcal/kg에서 300°C일 때 4,366 kcal/kg로 온도가 올라갈수록 발열량도 증가하는 것으로 나타났으며, 10분일 때 3,855 kcal/kg에서 20분일 때 4,366 kcal/kg로 시간이 증가할수록 발열량도 증가하는

Table 2. Element analysis of the residue with carbonization temperature

Carbonization temperature (°C)	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]	Ash [%]	Low heating value (kcal/kg)
200	42.82	3.64	18.19	1.42	0.91	0.01	33.01	3,985
250	43.92	3.51	14.63	1.61	0.63	0.01	35.69	4,120
300	46.04	3.17	10.93	1.99	0.41	0.01	37.45	4,366
350	44.51	3.03	10.96	1.26	0.35	0.01	39.88	4,238
400	43.88	2.92	9.67	1.37	0.13	0.01	42.02	4,176

Table 3. Element analysis of the residue with carbonization time

Carbonization time (min)	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]	Ash [%]	Low heating value (kcal/kg)
10	42.35	3.69	17.02	1.66	0.82	0.01	34.45	3,855
15	43.18	3.61	15.06	1.74	0.66	0.01	35.74	4,174
20	46.04	3.17	10.93	1.99	0.41	0.01	37.45	4,366
30	44.75	2.99	10.65	1.97	0.34	0.01	39.29	4,253
40	44.66	2.49	9.29	1.92	0.28	0.01	41.35	4,207

Table 4. Elementary analysis and C/H mole ratio of the residue of cow manure

Temperature (°C)	C[%]	H[%]	O[%]	N[%]	S[%]	ash[%]	C/H (mole ratio)
200	42.82	3.64	18.19	1.42	0.91	33.01	0.98
250	43.92	3.51	14.63	1.61	0.63	35.69	1.04
300	46.04	3.17	10.93	1.99	0.41	37.45	1.21
350	44.51	3.03	10.96	1.26	0.35	39.88	1.22
400	43.88	2.92	9.67	1.37	0.13	42.02	1.25

것으로 나타났다. 하지만, 발열량은 300°C 이후와 20분에는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 탄화공정에서 탄화온도와 시간에 따른 원소분석의 조건은 온도가 300°C이고 탄화시간은 20분으로 설정하는 것이 반응에 적합한 것으로 판단되었다. 우분 탄화물을 돈분 탄화물과 비교평가한 결과, 탄소 함량은 같은 온도와 시간에서의 돈분 탄화물보다 낮게 나타났으며 수소는 돈분과 유사 것으로 평가되었으며¹⁶⁾, 탄화물의 발열량은 돈분보다 낮게 나타나고 있다³⁾.

우분시료 탄화 시 탄화도 평가는 탄소와 수소의 몰비를 이용하여 평가하였다. 우분 시료는 온도에 따른 원소분석을 통해 나타난 탄소와 수소의 무게 비율을 이용하여 C/H mole ratio를 나타내었다. 탄소는 200°C에서 300°C까지 증가하는 것으로 나타났으며 300°C 이후 감소하는 것으로 나타났다. 수소는 200°C에서 400°C까지 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 탄소는 300°C일 때 46.04%로 가장 높게 나타났으며 수소는 400°C에서 2.92%로 가장 낮게 나타났다. 탄화도는 Table 4에 나타난 바와 같이 200°C에서 0.98로 나타났고 400°C에서 1.25로 나타나 온도가 증가함에 따라 탄화도 역시 증가하는 것으로 평가되었다. 이에 따른 우분의 탄화도 값은 탄소 함량이 낮기 때문에 돈분의 탄화도 보다 더 낮은 것으로 평가하였다¹⁶⁾. 또한, 우분시료의 탄소와 수소 함량은 탄화물의 탄소와 수소 함량보다 낮아 탄화공정에 의한 에너지 향상이 현실적으로 이루어진 것으로 나타났다. 따라서, 탄화공정에서 우분

시료는 온도가 증가함에 따라 탄화도가 증가하여 높은 온도에서 탄화공정을 수행할수록 연료로서의 가치가 높은 것으로 평가되었다.

4.4. 탄화 공정에서의 반응속도 평가

우분 탄화시 반응속도는 전환율을 통해 도출하였으며 시간에 따른 전환율 그래프는 Fig. 3에 나타내었다. 전환율은 반응초기인 10분까지 급격히 증가하였으며 이후 일정해지는 것으로 나타났다. 또한, 전환율은 온도가 증가함에 따라 높게 나타났으며 400°C일 때 가장 높은 전환율을 나타내었다. 우분의 반응속도는 Arrhenius의 식을 이용하여 도출하여 평가하였으며 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서는 250°C에서 400°C의 온도 조건을 설정하여 우분의 탄화 반응속도를 평가하였다. 전환율 그래프의 곡선의 기울기는 반응물의 분해정도를 나타내

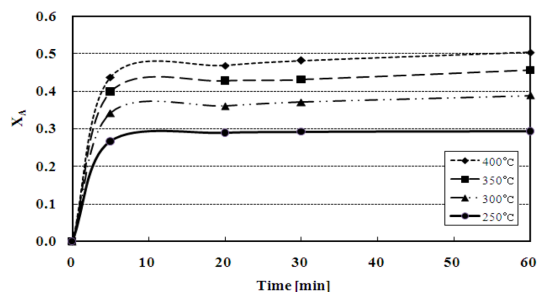
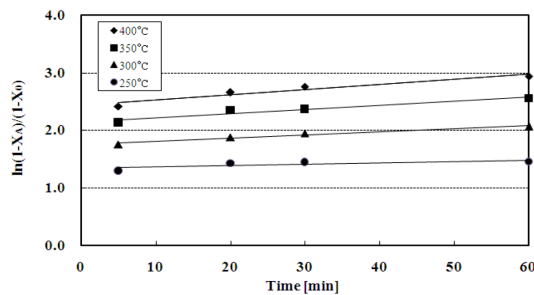
**Fig. 3.** The conversion of cow manure with carbonization.

Table 5. Kinetic constant and parameters on carbonization process of cow manure

Temperature (°C)	Frequency factor (A, min ⁻¹)	Kinetic constant (k, min ⁻¹)	Activation energy (Ea, cal/mol)
250	1.34×10 ⁻²	0.0679	5,196.4
300		0.1209	
350		0.1602	
400		0.2107	

**Fig. 4.** Kinetic constant of the residue with carbonization temperature.

며 각 온도별로 하나의 기울기로 나타났으며 Fig. 4에 나타내었다. 이를 토대로 분석하였을 때 우분 탄화시 반응은 하나의 반응으로 진행되는 것으로 판단되었다. 반응 속도상수는 $-\ln[(1-X)/(1-X_0)]$ 와 t 의 기울기를 토대로 구하였으며 식 (4)를 이용하여 빈도인자와 활성화에너지를 도출하였다. 빈도인자(A)는 탄화온도 250°C에서 400°C까지 $1.34 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ 로 나타나 이전 연구에서 수행한 돈분 탄화 시 빈도 인자와 유사한 것으로 판단되었다¹⁶⁾. 우분에 대한 반응속도 상수(k)는 250°C일 때 0.0679 min^{-1} 으로 나타났으며 400°C일 때 0.2107 min^{-1} 으로 온도가 증가함에 따라 반응속도도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 우분에 대한 활성화 에너지는 5,196.4 cal/mol로 평가되었으며, 이는 20분, 300°C일 때의 발열량과 유사한 것으로 나타났다.

5. 결 론

우분의 탄화공정에 대한 탄화도와 전환율을 통해 반응속도에 대한 고찰을 하였으며, 우분의 기본 특성과 우분 탄화물의 특성인 탄화도, 전환율, 활성화 에너지, 그리고 반응속도에 대해 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 우분 시료에 대한 원소 분석결과, 탄소가 36.57%로 비교적 높으나 우분 시료 자체의 저위발열량은 272 kcal/kg로 매우 낮게 나타나 연료로써의 개질이 필요하다.

2. TGA분석에서 우분 중량은 250°C ~ 400°C에서 급격히 감소하였으며, DTG곡선의 분석결과에서 300°C이후 흡열반응이 나타나 우분의 탄화반응은 300°C이후가 적합하였다.

3. 우분 탄화도는 200°C에서 0.98, 400°C에서 1.25로 나타나, 온도가 증가할수록 탄화도도 증가하는 것으로 평가되었다.

4. 우분의 탄화도, 활성화에너지, 전환율, 그리고 반응속도에 대한 평가한 결과, 탄화공정의 최적조건은 탄화온도 300°C, 탄화시간 20분으로 나타났다.

5. 우분의 탄화공정에 대한 1차 반응속도 상수(k)에서 빈도인자(A)는 $1.34 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ 로 나타났으며 활성화에너지는 5,196.4cal/mol로 평가되었다. 반응속도 상수는 250°C일 때 0.0679 min^{-1} , 400°C일 때 0.2107 min^{-1} 로 온도가 증가함에 따라 반응속도도 증가하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 SL공사의 환경에너지대학원 인재양성 프로그램에서 지원받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

1. Korea energy management corporation, 2013 : *The annual mandatory quotas of the regulated power providers under the RPS*.
2. Kang, T. J., Jeon, D. M., Jeon, Y. S., Kang, S. H., Lee, S. H., Kim, S. D., Kim, H. T., 2010 : *A Study on Drying Kinetics of Low Rank Coal(Indonesia-IBC) through the Fixed-Bed Reactor Experiments*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 19(6), pp. 43-50.
3. Lee, M. S., Kim, J. K., Rhee, S. W., 2014 : *Comparison to characteristics of carbonization residue from cow and chicken manure*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, In Press.

4. Rhee, S. W., 2009 : *An energy characteristics of carbonization residue produced from sewage sludge cake*, Korea Chem. Eng. Res., 47(2) pp. 230-236.
5. White, J. E., Catallo, W. J., Legendre, B. L., 2011 : *Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 91(1), pp. 1-33.
6. Yao, F., Wu, Q., Lei, Y., Guo, W., Xu, Y., 2008 : *Thermal decomposition kinetics of natural fibers: Activation energy with dynamic thermogravimetric analysis*, Polymer Degradation and Stability, 93(1), pp. 90-98.
7. Rhee, S. W., 2012 : *A study on the reaction kinetics of sewage sludge in carbonization process*, Journal of Korea society of waste management, 29(3), pp. 86-92.
8. Bilbao, R., Arauzo, J. and Millera, A., 1990 : *Kinetics of weight loss by thermal decomposition of different lignocellulosic Materials*. Relation between the results obtained from isothermal and dynamic experiments, Thermochemica acta, 165(1), pp. 103-112.
9. Bilbao, R., Arauzo, J. and Millera, A., 1995 : *Kinetics and modeling of gas formation in the thermal decomposition of powdery cellulose and pine sawdust*, Ind. Eng. Chem. Res., 34(3), pp. 786-793.
10. Sharma, R. K., Wooten, J. B, Baliga, V. L, Hajaligol, M. R., 2001 : *Characterization of chars from biomass-derived materials: pectin chars*, Fuel, 80(12), pp. 1,825-1,836.
11. Baker, R. R., 1979 : *Kinetic mechanism of the thermal decomposition of tobacco*, Thermochemica Acta, 28(1), pp. 45-57.
12. Hajaligol, M., Howard, J. B. and Peters, W. A., 2002 : *Product compositions and kinetics for rapid pyrolysis of cellulose*, Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 21(3), pp. 457-465.
13. Suuberg, E. Aarna, J., 1998 : *A study of the reaction order of the NO-carbon gasification reaction*, Symposium (International) on Combustion, 27(2), pp. 3,061-3,068.
14. Rhee, S. W., Park, H. S., 2010 : *An effect of sewage sludge content on energy characteristics of carbonization residue of waste biomass*, Journal of Korea society of waste management, 27(7), pp. 617-624.
15. Lee, M. S., Kim, J. K., Rhee, S. W., 2014 : *Characteristics of carbonization residue from chicken manure*, Journal of Korea society of waste management, 31(1), pp. 105-112.
16. Kim, J. K., Lee, M. S., Rhee, S. W., 2014 : *Examination on reaction kinetics of pig manure in carbonization process*, Journal of Korea society of waste management, 31(2), pp. 184-190.
17. Rhee, S. W., Cho, Y. H., 2008 : *A study on characteristics of carbonization residue produced from woody biomass*, Journal of Korea society of waste management, 25(6), pp. 533-539.
18. Rhee, S. W., Choi, H. H., 2009 : *Energy characteristics of carbonization residue produced from food waste*, Journal of Korea society of waste management, 26(1), pp. 36-43.
19. Rhee, S. W., Choi, H. H., Park, H. S., 2011 : *A study on energy characteristics of carbonization residue produced from rice husk*, Journal of Korea society of waste management, 28(3), pp. 303-310
20. Rhee, S. W., Park, H. S., 2010 : *Effect of mixing ratio of woody waste and food waste on the characteristics of carbonization residue*, Journal of Material Cycles and Waste Management, 12(3), pp. 220-226.
21. Lee, M. S., Kim, J. K., Rhee, S. W., 2014 : *Characteristics of carbonization residue from chicken manure*, Journal of Korea society of waste management, 31(1), pp. 105-112.

김 재 경



- 현재 경기대학교 환경에너지공학과 석사과정

이 승 희



- 현재 경기대학교 환경에너지공학과 교수
- 현재 한국자원리사이클링학회 정회원

이 민 석



- 현재 경기대학교 환경에너지공학과 석사과정
-