

반응표면분석법을 이용한 유칼립투스의 반탄화 최적조건 탐색*1

김 영 훈*2 · 나 병 일*2 · 이 수 민*3,4 · 이 형 우*2 · 이 재 원*2†

Optimal Condition for Torrefaction of Eucalyptus by Response Surface Methodology*1

Young-Hun Kim*2 · Byeong-Il Na*2 · Soo-Min Lee*3,4 ·
Hyoung-Woo Lee*2 · Jae-Won Lee*2†

요 약

유칼립투스(*Eucalyptus globulus*)의 반탄화 최적조건을 탐색하기 위하여 반응표면분석법을 이용하였다. 반탄화 바이오매스의 탄소함량은 반탄화 정도를 나타내는 severity factor (SF)에 따라 증가하였으며 바이오매스에 포함된 수소와 산소의 함량은 감소하였다. 반탄화 바이오매스의 발열량은 조건에 따라 20.23~21.29 MJ/kg을 나타냈으며 처리 전 바이오매스와 비교하여 1.6~6.9% 에너지함량이 증가한 것으로 나타났다. 바이오매스의 중량감소율은 SF 증가에 따라 증가하였다. 에너지수율에서 반탄화 온도는 중요한 인자로 작용하였으며 상대적으로 반응시간에 대한 영향은 낮았다. 최대 에너지수율은 낮은 SF에서 반탄화를 수행하였을 때 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

The optimal condition for the torrefaction of eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) was investigated by response surface methodology. The carbon content in the torrefied biomass increased with the severity factor (SF), while hydrogen and oxygen contents decreased. The calorific value of

*1 접수 2013년 3월 28일, 채택 2013년 10월 23일

*2 전남대학교 농업생명과학대학 산림자원학부, Department of Forest Products and Technology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Republic of Korea

*3 국립산림과학원 임산공학부 화학미생물과, Division of Wood Chemistry & Microbiology, Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

*4 국제임업연구센터, Forest and Environment Programme Center for International Forestry Research Jalan CIFOR, Situ Gede, Bogor, Barat 16115, Indonesia

† 교신저자(corresponding author) : 이재원(e-mail: ljw43376@chonnam.ac.kr)

torrefied biomass ranged from 20.23 to 21.29 MJ/kg, depending on the torrefaction conditions. This implied that the energy contained in the torrefied biomass increased by 1.6 to 6.9%, when compared with that of the untreated biomass. The weight loss of biomass increased as the SF increased. The Code level of reaction temperature had the highest impact on the energy yield of torrefied biomass, while the effect of Code level of reaction time was considerably low. The highest energy yield was obtained at low SF.

Keywords: torrefaction, eucalyptus, response surface methodology, energy yield

1. 서 론

세계적으로 화석연료 고갈 및 환경문제에 대응하기 위해 다양한 형태의 대체에너지원 개발에 관심이 모아지고 있다. 특히, 목질계 바이오매스는 지구상에 많은 양이 존재하고 있으며, 재생가능하며 탄소중립적 자원이라는 측면에서 화석연료를 대체할 수 있는 에너지원으로 주목받고 있다[1]. 목질계 바이오매스를 고체상 연료로 이용하는 대표적인 형태는 목재펠릿이 있다. 목재펠릿은 바이오매스를 균일한 크기의 입자로 분쇄한 후 높은 압력으로 압축하여 일정한 크기로 성형한 고체상 연료를 말한다[5]. 목재펠릿은 처리하지 않은 바이오매스에 비해 높은 에너지밀도와 균일한 형태를 가지게 되어 저장 및 수송이 용이하며, 운송비용 또한 절감할 수 있다. 또한, 볏짚과 같은 농업부산물을 이용하였을 경우에 비해 시설의 부식이나 부산물 흡착이 적다[3]. 하지만 화석연료에 비해 상대적으로 낮은 에너지밀도와 높은 함수율을 가지고 있으며, 사용하는 원료에 따라 발열량이나 회분 함량이 다르기 때문에 일정한 특성을 유지하기 어렵다. 이러한 단점들을 극복하기 위한 방법으로 반탄화 처리가 소개되고 있다[19,20].

열 전처리 방법 중 하나인 반탄화는 원료의 연소를 방지하기 위해 무산소 또는 질소 환경에서 상대적으로 낮은 온도(200~300°C), 1시간 이내의 시간에서 유지하는 것이 일반적이다[13]. 이러한 열처리 과정 중 바이오매스에 존재하는 수산기가 제거되어 소수성 및 발열량이 향상된다[6]. 소수성의 향상으로 장기간 보관이나 수송에 적합하게 되며, 열에 약한 일부 헤미셀룰로오스가 제거되면서 원료의 분쇄

성을 향상시키게 된다[10].

유칼립투스스는 대표적인 열대 속성수의 하나로, 빠른 성장량과 더불어 높은 토양 적응력을 가지고 있다[14,22]. 일반적으로 펄프재나 농업용 목재 등으로 이용되어 왔는데[4], 최근에는 탄소배출권 및 바이오에너지에 적용하기 위한 조립수종으로 관심이 증가하고 있다[21]. 따라서 본 연구에서는 유칼립투스스를 이용하여 최대 에너지수율을 얻을 수 있는 반탄화 조건을 탐색하기 위해 반응표면분석법을 적용하여 실험하였으며, 반탄화 처리에 따른 물리·화학적 특성의 변화에 대해 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

유칼립투스(*Eucalyptus globulus*)는 (주)그린코리아로부터 칩 형태로 구입하여 사용하였으며, 표준체(9.5, 31.5 mm)를 이용하여 약 10~30 mm의 크기로 분리한 후 상온에서 보관하였다.

2.2. 반탄화 공정

유칼립투스 칩은 $105 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 건조기에서 48시간 이상 건조하여 전건상태를 유지하였으며, 반탄화는 반응기의 가열 및 내부의 시료를 순환시킬 수 있도록 제작된 반탄화 반응기(주)건조기술)에서 수행하였다[8]. 반탄화 조건은 250°C 에서 50분 동안 유지하는 것을 중심조건으로 하여 시간과 온도에 따라 수행하였으며, 중심조건은 3번 반복하였다(Table

Table 1. The 2² factorial design with four axial points and three replicates in the central point matrix employed for two independent variables

Sample No.	Variables		Coded levels		Severity factor (SF)
	Time (min) X_1	Temperature (°C) X_2	Time x_1	Temperature x_2	
1	50	250	0	0	6.12
2	50	250	0	0	6.12
3	50	250	0	0	6.12
4	70	270	1	1	6.85
5	70	230	1	-1	5.67
6	30	270	-1	1	6.48
7	30	230	-1	-1	5.30
8	80	250	1.4	0	6.32
9	50	280	0	1.4	7.00
10	20	250	-1.4	0	5.72
11	50	220	0	-1.4	5.23

1). 각 실험은 전건중량 500 g의 유칼립투스 칩을 반응기에 투입한 후 시료를 교반하며 각 조건에 따라 온도 및 시간을 유지한다. 목표온도 및 시간에 도달한 직후 반응기의 가열을 중단하고 100°C 이하로 냉각시킨 후 시료의 교반을 중지시키고 처리된 시료를 회수하였다. 반탄화 과정 중에는 질소가스를 2 l/min 속도로 반응기 내로 흘려보내 무산소 상태를 유지하였다.

반탄화 조건의 정도는 반응시간과 온도의 영향을 통합하여 단일변수로 나타낼 수 있는 severity factor (SF)를 이용하여 나타내었다[17]. SF의 계산식은 식 (1)과 같다.

$$SF = \log\{t \cdot \exp[(T_H - T_R)/14.75]\} \quad (1)$$

(t : Code level of reaction time, min. T_H : Code level of reaction temperature, °C. T_R : reference temperature, 100°C)

2.3. 바이오매스 입자크기분포 및 분쇄특성

바이오매스의 입자크기분포를 측정하기 위한 표

본시료(약 30 g)를 추출한 후 표준체(9.5, 6.35, 4, 2, 1 mm)를 이용하여 약 5분 동안 흔들어 표준체의 크기에 따라 분리되는 바이오매스의 중량을 측정하여 입자크기분포를 계산하였다.

분쇄특성은 바이오매스 약 10 g의 표본시료를 추출한 후 mixer (JL-540, Hibell, Korea)를 이용하여 1분 동안 분쇄한 후 표준체(1, 0.425, 0.25 mm)를 이용하여 분리한 각각의 중량을 측정하여 계산하였다.

2.4. 바이오매스의 원소분석 및 발열량 측정

바이오매스의 함수율 및 회분 함량은 TAPPI법 [18]에 의해 측정하였으며, 원소분석은 전남대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 원소분석기(Flash 2000 & EA-1110, Thermo Fisher, Italy)에 의해 수행되었다. 발열량은 열량계(6400 Automatic Isoperibol calorimeter, Parr Instrument Inc., Moline, Illinois)를 이용하여 측정하였다. 모든 실험은 3번 반복하여 수행되었으며, 각 결과는 실험의 평균값을 표시하였다.

Table 2. Chemical compositions and elemental analysis of untreated and torrefied biomass at various SF

SF	Moisture content (%)	Ash (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
5.23	218(0.08)	0.33(0.04)	48.36	5.63	25.71	0.03
5.30	1.49(0.03)	0.48(0.05)	48.59	5.74	24.73	0.04
5.67	2.06(0.09)	0.58(0.04)	49.11	5.67	24.73	0.05
5.72	2.00(0.04)	0.42(0.01)	50.42	5.69	24.03	0.03
6.12	1.39(0.05)	0.40(0.06)	51.02	5.60	24.21	0.09
6.32	1.25(0.03)	0.69(0.02)	51.65	5.54	23.55	0.06
6.48	1.07(0.14)	0.60(0.06)	52.05	5.44	23.54	0.09
6.85	1.10(0.06)	0.62(0.01)	54.03	5.46	22.17	0.07
7.00	1.38(0.03)	0.52(0.06)	54.35	5.45	22.02	0.11
Raw material	7.71(0.02)	0.33(0.04)	46.03	5.93	26.50	0.04

2.5. 반응표면분석

유칼립투스에 대한 반탄화의 최적조건을 찾기 위해 반응시간(X_1 , 20~80분)과 반응온도(X_2 , 220~280°C)를 독립변수로 하여 2^2 factorial design으로 실험을 설계하였다. 각 실험 조건에서 얻어지는 중량감소율 및 발열량과 이를 바탕으로 계산된 에너지 수율을 design-expert version 8.0.1 software (Stat-Ease Inc., USA)를 통해 분석하였으며 2차 방정식으로 나타냈다[8].

3. 결과 및 고찰

3.1. 바이오매스의 화학적 특성

바이오매스 화학적 조성은 SF에 따라 Table 2에 나타내었다. 함수율의 경우 처리 전 시료는 7.71%였으며, 반탄화 처리 후에는 대체로 1~2% 내외로 낮은 함수율을 가진 것으로 나타났다. 이것은 전형적인 반탄화 특징으로 반응에 의한 바이오매스 내의 수산기 감소에 따른 결과이다. 회분 함량의 경우 0.33~0.69%로 처리 전 시료와 비교하였을 때, SF가 증가함에 따라 소폭 상승한 것을 볼 수 있는데,

이는 반탄화 과정 중에 목재의 중량감소에 따른 상대적인 증가로 사료된다.

원소분석의 결과 반탄화 처리 전 유칼립투스는 탄소 46.03%, 수소 5.93%, 산소 26.50%, 질소 0.04%로 구성되어 있었으며 처리 후 유칼립투스의 탄소 함량은 48.36~54.35%로 처리 전 시료와 비교하였을 때 SF가 증가할수록 탄소함량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 가장 높은 SF (SF 7: 280°C, 50분)에서 탄소함량은 54.35%로 처리 전과 비교하여 18.08%의 증가율을 나타냈다. 반면, 수소와 산소함량은 각각 5.63~5.44%, 25.71~22.02%로 처리 전 시료와 비교하였을 때 SF가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 목재 칩이나 농업부산물과 같은 바이오매스를 탄화 처리하였을 때 얻어지는 결과들과 유사하게 나타났다[7,16].

원소분석 결과를 이용하여 SF에 따른 원소조성 변화를 van krevelen diagram (atomic H/C ratio versus O/C ratio)을 통해 고체연료와 비교하였다 (Fig. 1). 처리 전 유칼립투스의 경우 H/C ratio = 1.55, O/C ratio = 0.43으로 나타나 일반적인 바이오매스와 유사한 비율을 보였다[9]. 처리 후 유칼립투스의 경우에는 H/C = 1.40~1.20, O/C = 0.4~0.3으로 SF가 증가할수록 감소하여 lignite의 조성에

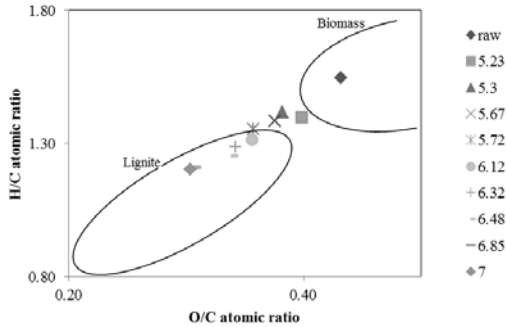


Fig. 1. H/C vs. O/C atomic ratio of untreated and torrefied eucalyptus, depending on torrefaction severity.

가까워지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수소와 산소로 이루어진 H_2O , CO_2 등과 같은 물질들이 반탄화 과정 중에 제거되면서 나타난 현상으로, 이를 통해 바이오매스는 발열량이 증가하여 연료적 특성이 향상된 것을 확인하였다[12,15].

3.2. 바이오매스의 중량감소율 및 발열량 분석

반탄화 처리에 따른 바이오매스의 중량감소율과 발열량을 SF에 따라 나타냈다(Table 3). 전체적인 중량감소율과 발열량은 SF가 증가할수록 높게 나타났다. 중량감소율의 경우 처리 전 유칼립투스라 비교하면, 중심조건인 SF 6.12 (250°C, 60분)를 기준으로 낮은 SF에서는 비교적 증가율이 적은 반면, 높은 SF에서는 그 증가가 두드러지게 나타났다. 이러한 경향은 발열량에서도 동일하게 나타났는데, 이는 반탄화 과정 중 바이오매스에 존재하는 수분 및 휘발성 물질은 제거되고 주요 성분인 셀룰로오스, 리그닌이 남게 되어 그 변화가 크지 않았다[8]. 하지만 250°C 부근에서는 헤미셀룰로오스의 분해가 시작되어 이후의 조건에서는 급격한 중량감소 및 발열량의 변화를 나타냈다. 반탄화 처리 전 유칼립투스의 발열량은 19.91 MJ/kg이며, 처리 후 유칼립투스는 중량감소율 3.86~24.28%, 발열량 20.23~21.29 MJ/kg로 SF가 증가할수록 모두 증가하는 경향을 나타냈

다. 특히, 가장 강한 조건인 SF 7.00 (280°C, 50분)에서는 21.29 MJ/kg으로 가장 높은 발열량을 나타냈다. 하지만 같은 조건에 반탄화를 수행한 다른 바이오매스에 비해 발열량은 크게 증가하지 않았다[8].

목재 뿐 아니라 농업부산물 등과 같은 바이오매스를 이용하여 반탄화를 실시할 경우 발열량이 증가한다는 사실은 기존에 연구에서 이미 밝혀진 바 있다[2,11,12]. 하지만 반탄화를 하는 과정에서 발생하는 바이오매스의 손실은 원료로부터 연료가 가질 수 있는 에너지의 손실을 뜻하므로, 원료의 효율적인 이용 측면에서 부정적이라 할 수 있다. 따라서 반탄화를 통해 얻고자 하는 바이오매스의 연료적 특성 향상을 평가하기 위해서는 이러한 측면 또한 고려해서 에너지수율을 계산하였다. 계산식은 식 (2)와 같다.

$$Energy\ yield(\%) = \left(\frac{m_{torrefied}}{m_{initial}} \right) \times \left(\frac{E_{torrefied}}{E_{initial}} \right) \quad (2)$$

($m_{torrefied}$: dry mass of torrefied eucalyptus,

$m_{initial}$: dry mass of untreated eucalyptus,

$E_{torrefied}$: specific energy content of eucalyptus after torrefaction,

$E_{initial}$: specific energy content of eucalyptus before torrefaction)

에너지수율에 대한 결과는 Table 3에 나타났다. 에너지수율은 97.70~81.80%로 SF가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 반탄화에 따른 발열량의 증가보다 중량감소율의 증가가 급격하게 일어났기 때문이다.

3.3. 바이오매스의 입자크기분포 및 분쇄 특성

고체 바이오매스의 연료적 특성을 향상시키는 방법 중 한 가지는 고밀도화를 통해 펠릿을 생산하는 것이다. 이를 통해 고체 바이오매스는 에너지밀도가 증가하고, 균일한 질과 크기를 가지므로 운반 및 저장 등의 유통과정에 유리한 이점을 가지게 된다. 다만, 이를 위해서는 바이오매스를 균일한 크기의 입

Table 3. Energy values, weight loss, and energy yield of untreated and torrefied biomass at various SF

SF	Energy value (MJ/kg)	Weight loss ^a (%)	Mass yield ^b (%)	Energy yield (%)
5.23	20.23(0.19)	3.86	96.14	97.70
5.30	20.24(0.16)	2.89	97.11	98.72
5.67	20.32(0.15)	7.18	92.82	94.73
5.72	20.33(0.16)	10.76	89.24	91.10
6.12	20.80(0.16)	14.36	85.64	89.46
6.32	20.82(0.12)	15.41	84.59	88.43
6.48	20.81(0.19)	20.56	79.44	83.03
6.85	21.24(0.12)	24.28	75.72	80.75
7.00	21.29(0.15)	23.48	76.52	81.80
Raw material	19.91(0.19)	-	100.00	100.00

a : weight loss (%) = (mass of untreated biomass-mass of torrefied biomass)/mass of untreated biomass*100
 b : mass yield (%) = 100-weight loss of biomass

자로 분쇄하고, 펠릿으로 성형하는 등의 추가적인 공정이 필요하게 된다. 특히 목질계 바이오매스의 경우 균일한 크기로 분쇄하는데 많은 에너지를 필요로 하게 된다.

따라서 반탄화 처리 후 바이오매스의 고밀도화 가능성을 알아보기 위해 입자크기분포와 분쇄특성을 SF에 따라 비교하였다. 반탄화 처리 후 입자크기분포를 분석한 결과는 Fig. 2에 나타냈다. 바이오매스 (10~30 mm)의 약 48~73%가 반탄화에 의해 더 작

은 크기로 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전체적으로 SF가 증가할수록 1 mm 이하의 소입자의 분포가 증가하였다. 처리 전 유칼립투스 및 처리 후 유칼립투스에 대해 분쇄특성을 분석한 결과 (Fig. 3) 처리 전 유칼립투스의 경우 1 mm 이상의 크기에 65.72%가 분포한 반면, 처리 후 유칼립투스의 경우 17~0.64%로 그 분포가 확연히 감소하였다. 이러한 분쇄특성을 바탕으로 분쇄 후 시료의 중량 백분율이 50%가 되는 지점을 표준체계의 치수를 기준

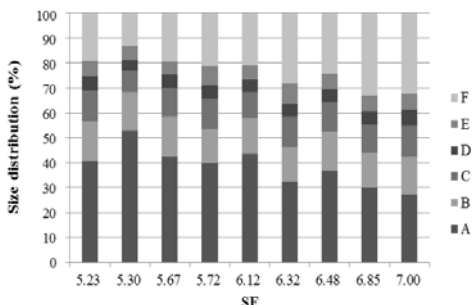


Fig. 2. Size distribution of torrefied biomass at various SF (A : ~9.5, B : 6.35~9.5, C : 4~6.35, D : 2~4, E : 1~2, F : 1 mm~).

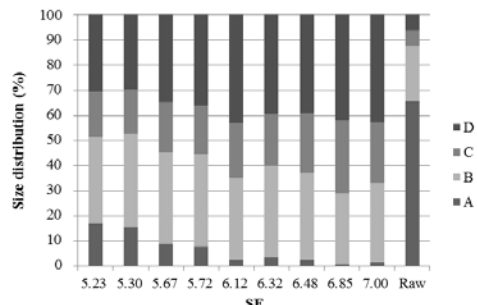


Fig. 3. Size distribution after grindability test of untreated and torrefied biomass at various SF (A : ~9.5, B : 6.35~9.5, C : 4~6.35, D : 2~4, E : 1~2, F : 1 mm~).

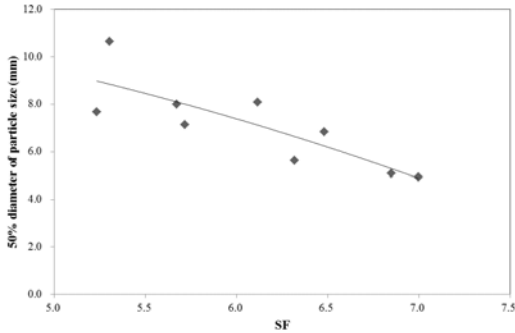


Fig. 4. Profiles of geometric mean particle size of ground torrefied biomass on the torrefaction severity factor.

으로 나타내었다(Fig. 4). 그 결과 SF가 증가할수록 점차 감소하는 경향을 나타냈는데, 이는 반탄화 정도가 강할수록 처리 후 바이오매스의 파쇄가 용이함을 나타내고 있다.

반탄화 과정 중 실시되는 교반이 부분적으로 바이오매스의 물리적 파쇄를 일으키는 것을 입자크기분포로 확인할 수 있었다. 또한, 반탄화 과정에서 열에 약한 헤미셀룰로오스의 일부가 분해되면서 바이오매스의 결합이 느슨해져 분쇄성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 반탄화 처리 후 시료의 바이오매스 고밀도화 펠릿으로 적용하는데 있어 큰 이점으로 작용할 수 있다.

3.4. 반응표면분석

반탄화 과정에서 얻어진 중량감소율, 발열량 그리고 에너지수율을 고려하여 유칼립투스 반탄화의 최적 조건을 탐색하기 위해 반응표면분석을 실시하였다.

발열량에 대한 반응표면분석 결과는 Fig. 5(A)와 같다. 분산분석을 실시한 결과는 Table 4에 나타냈으며 식 (3)을 유도하였다. 이 모델은 99% 신뢰수준에서 유의성이 있는 것으로 나타났으며, 반응온도와 시간의 유의수준은 모두 0에 가깝게 나타났다. 발열량은 반응시간과 반응온도가 증가할수록 더 높은 값을 가졌으며, 반응온도의 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

중량감소율에 대한 반응표면분석 결과는 Fig. 5(B)와 같다. 분산분석을 실시한 결과는 Table 4에 나타냈으며 식 (4)를 유도하였다. 이 모델은 99% 신뢰수준에서 유의성이 있는 것으로 나타났다. 반응시간과 반응온도가 증가할수록 중량감소가 크게 나타났으며, 발열량과 마찬가지로 반응온도에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

발열량과 중량감소율을 모두 고려한 에너지수율에 대한 반응표면분석을 실시한 결과는 Fig. 5(C)와 같다. 분산분석 결과는 Table 4와 같으며 식 (5)를 유도하였다. 이 모델은 99% 신뢰수준에서 유의성이 있는 것으로 나타났다. 에너지수율은 반응온도와 반응시간이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈으며, 반응온도에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

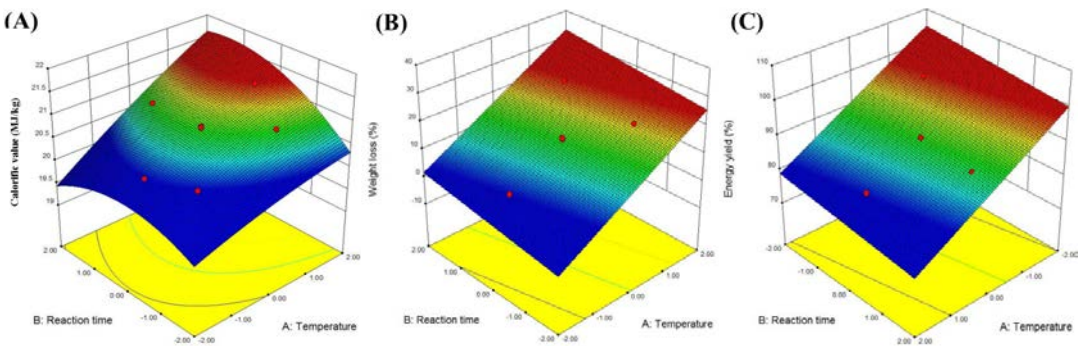


Fig. 5. Response surface and contour plot of temperature vs. Code level of reaction time on the calorific value (A), weight loss (B) and energy yield (C) during torrefaction.

Table 4. Analysis of variance (ANOVA) for the adjusted model for the energy value, weight loss and energy yield of biomass during torrefaction

Source	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F-value	p-value (Prob>F)
Calorific value					
Model	1.41	5.00	0.28	158.89	< 0.0001
Residual	0.01	5.00	0.0018		
Lack of fit	0.0046	3.00	0.0015	0.74	0.6194
Pure error	0.0042	2.00	0.0021		
Corrected total	1.41	10.00			
Temp.	1.12	1.00	1.12	631.34	< 0.0001
Time	0.18	1.00	0.18	102.26	0.0002
TimeTemp.	0.03	1.00	0.03	17.31	0.0088
(Temp.) ²	0.003	1.00	0.003	1.80	0.2373
(Time) ²	0.08	1.00	0.08	43.14	0.0012
Adjusted R-square : 0.9875					
Weight loss					
Model	515.14	2.00	257.57	206.04	< 0.0001
Residual	10.00	8.00	1.25		
Lack of fit	8.53	6.00	1.42	1.93	0.3805
Pure error	1.48	2.00	0.74		
Corrected total	525.14	10.00			
Time	488.54	1.00	488.54	390.81	< 0.0001
Temp.	26.59	1.00	26.59	21.27	0.0017
Adjusted R-square : 0.9762					
Energy yield					
Model	352.61	2.00	176.31	136.34	< 0.0001
Residual	10.34	8.00	1.29		
Lack of fit	8.38	6.00	1.40	1.42	0.4682
Pure error	1.96	2.00	0.98		
Corrected total	362.96	10.00			
Time	340.03	1.00	340.03	262.96	< 0.0001
Temp.	12.58	1.00	12.58	9.73	0.0142
Adjusted R-square : 0.9644					

$$\begin{aligned} \text{Calorificvalue} = & 20.8 + 0.3736x_1 + & (3) \\ & 0.1504x_2 + 0.0875x_1x_2 \\ & - 0.0238x_1^2 - 0.1163x_2^2 \end{aligned}$$

$$\text{Weightloss} = 13.7736 + 7.8146x_1 + 1.8233x_2 \quad (4)$$

$$\text{Energyyield} = 89.5109 - 6.5195x_1 - 1.2540x_2 \quad (5)$$

(X_1 : Code level of reaction temperature, X_2 : Code level of reaction time)

4. 결 론

본 실험에서는 유칼립투스에 대한 반탄화의 물리·화학적 특성변화 및 반탄화 최적조건을 탐색하기 위한 반응표면분석을 실시하였다. 반탄화에 의해 유칼립투스의 발열량 및 분쇄능력이 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과는 반탄화 처리 조건이 강해질수록 더욱더 두드러지게 나타났다. 하지만 중량감소를 또한 증가하기 때문에, 이를 고려한 에너지수율은 반탄화 처리조건이 강해질수록 감소하는 경향을 나타났다. 따라서 유칼립투스를 반탄화 처리하여 이용할 경우에는 낮은 SF에서 처리하는 것이 높은 에너지수율을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. 황병호. 1998.0 목질바이오메스. 선진문화사. pp. 11~12.
2. Pimchuai, A., A. Dutta, and P. Basu. 2010. Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties. *Energy & Fuels* 24(9): 4638~4645.
3. Jenkins, B. M., L. L. Baxter, T. R. Miles, and T. R. Miles. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54: 17~46.
4. Auro, C. A., J. L. Joe, J. S. Peter, S. A. Marcelo, F. Sebastião, M. B. Simone, and L. B. Fernando. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations Original Research Article. *Forest Ecology and Management*. Volume 193. Issues 1-2. 17 May 2004. pp. 167~177.
5. Simes, H. C., C. C. Hassler, and T. H. Bean. 1988. Wood densification, West Virginia Uni. Extension Service. Publication No. 838.
6. Bourgeois, J., M. C. Bartholin, and R. Guyonnet. 1989. Thermal treatment of wood; analysis of the obtained product. *Wood Science and Technology* 23(4): 303~310.
7. Lu, K. M., W. J. Lee, W. H. Chen, S. H. Liu, and T. C. Lin. 2012. Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology* 123: 98~105.
8. Lee, J. W., Y. H. Kim, S. M. Lee, and H. W. Lee. 2012. Optimizing the torrefaction of mixed softwood by response surface methodology for biomass upgrading to high energy density. *Biore-source Technology* 116: 471~476.
9. Jaap, K. and V. V. L. Sjaak. 2008. The Handbook of biomass combustion and co-firing. Earthscan Publications Ltd.
10. Shang, L., J. Ahrenfeldt, J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, and T. Thomsen. 2012. Changes of chemical and mechanical behavior of torrefied wheat straw. *Biomass Bioenergy* 40: 63~70.
11. Phanphanich, M. and S. Mani. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*. 102(2): 1246~1253.
12. Prins, M. J., K. J. Ptasiński, and F. J. J. G. Janssen. 2006. Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77(1): 28~34.
13. Prins, M. J., K. J. Ptasiński, and F. J. J. G. Janssen. 2006. Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77(1): 35~40.
14. Unsal, O., Z. Candan, U. Buyuksari, S. Korkut, Y. S. Chang, and H. M. Yeo. 2011. Effect of Thermal Compression Treatment on the Surface Hardness, Vertical Density Propile and Thickness Swelling of Eucalyptus Wood Boards by Hot-pressing. *Mokchae Konghak* 39(2): 148~166.
15. Bergman, P. C. A., A. R. Boersma, R. W. R. Zwart, and J. H. A. Kiel. 2005. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. Energy research Centre of the Netherlands.

16. Ibrahim, R. H. H., L. I. Darvell, J. M. Jones, and A. Williams. 2012. Physicochemical characterisation of torrefied biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.
17. Lloyd, T. A. and C. E. Wyman. 2005. Combined sugar yields for dilute sulfuric acid pretreatment of corn stover followed by enzymatic hydrolysis of the remaining solids. *Bioresource Technology* 96(18): 1967~1977.
18. TAPPI test method. 1992. TAPPI Press. Atlanta. UAS.
19. Repellin, V., A. Govin, M. Rolland, and R. Guyonnet. 2010. Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln. *Biomass Bioenergy* 34: 602~609.
20. Chen, W. H. and P. C. Kuo. 2011. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicelluloses, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. *Energy* 36: 803~811.
21. Son, Y. M., H. Kim, H. Y. Lee, C. M. Kim, C. S. Kim, J. W. Kim, R. W. Joo, and K. H. Lee. 2010. Stand Yield and Commercial Timber Volume of Eucalyptus Pellita and Acacia Mangium plantations in Indonesia. *Journal of Korean Forest Society* 99(1): 9~15.
22. Lee, Y. K., D. K. Lee, S. Y. Woo, P. S. Park, Y. H. Jang, and E. R. G. Abraham. 2006. Effect of *Acacia* plantations on net photosynthesis, tree species composition, soil enzyme activities, and microclimate on Mt. Makiling. *Photosynthetica* 44(2): 299~308.