

바이오매스 연료의 연소 특성 실험

김학덕¹ · 김영대² · 송주현^{1,†}

¹부산대학교 기계공학부, ²부산대학교 대학원 발전연소전공

A Experiment of Combustion Behavior of Biomass Fuels

HAKDEOK KIM¹, YOUNGDAE KIM², JUHUN SONG^{1,†}

¹School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

²Department of Power Generation Combustion Engineering, Graduate School, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

†Corresponding author :
jxs704@pusan.ac.kr

Received 20 July, 2018
Revised 27 August, 2018
Accepted 30 October, 2018

Abstract >> There have been many studies of combustion in the circulating fluidized bed. However, little study is available for combustion of wood pellet together fed with wood chip. The mixed ratio of two fuels is an useful information when thermal power company would receive the Renewable Energy Portfolio Standard (RPS) from government. In this study, the combustion behavior and kinetics of such biomass fuels are evaluated using fluidized bed reactor and thermogravimetric analyzers. The mixing ratio of wood chip relative to wood pellet was varied at different temperatures. The results show that a combustion reactivity changed significantly at the wood chip mixing ratio of 40%, particularly at low temperature condition.

Key words : Biomass(바이오매스), Mixed combustion(혼소), Fluidized bed reactor (유동층반응기), Combustion reactivity(연소반응성), Activation energy (활성화 에너지), Biomass conversion efficiency(바이오매스 전환율)

Nomenclature

Φ : equivalence ratio

V_f : minimum fluidization velocity

ρ_p : particle density [kg/m³]

ρ_f : density of fluid [kg/m³]

g : gravity force [m/sec²]

d_p : particle diameter [m]

μ : viscosity of fluid [N-s/m²]

ϵ : bed porosity

k : reaction rate [1/s]

A : frequency factor[1/s]

E_a : activation energy[J/mol]

R_u : universal gas constant[J/mol·K]

T : temperature[K]

X : carbon conversion

η : biomass conversion ratio

MW : molecular weight of biomass [kg/kmol]

W_{si}	: coal feeding rate at inlet [kg/sec]
Q_t	: air flow rate [m ³ /sec]
x_c	: carbon fraction in biomass
x_{co}, x_{co2}	: mole fraction of CO and CO ₂
p	: pressure [Pa]
t	: time [sec]

Subscripts

n	: number
c	: biomass particle
t	: total

1. 서 론

정부는 2017년 12월 제8차 전력수급기본계획을 발표하면서 미세먼지 및 온실가스 감축을 통한 환경 개선을 목적으로 미세먼지는 30년까지 62% 절감, 온실가스는 30년 BAU 3.22억 톤 대비 26.4% 감축할 계획이다. 정부는 이를 달성하기 위하여 2030년까지 재생에너지 발전량 비중을 20%까지 확대하는 재생에너지 3020 이행계획안을 수립하였다. 이에 따라 500 MW 이상을 보유한 발전사업자는 Renewable Energy Portfolio Standard (RPS) 신·재생에너지공급 의무화제도를 통하여 발전회사의 연간 발전량의 일부를 신·재생으로 공급하도록 의무량을 할당받고 있다. 의무 비율이 2030년 10%에서 18%까지 증가되어 발전회사는 이를 달성하기 위한 신·재생에너지 공급 대책을 시급하게 마련해야 하는 시점에 놓여 있다. 정부의 재생에너지 정책은 태양광과 풍력을 중점적으로 개발하고 원자력과 폐기물이 발생하는 에너지를 축소하는 추세이다. 또한 청정고체연료인 바이오매스 우드펠릿을 수입에 의존하지 않고 국내산 미이용 우드칩으로 일부 대체하는 방향을 적극 권장하고 있다. 태양광 발전은 대용량 부지확보에 어려움이 있으며 풍력발전은 지역민원 및 대관인허가 취득에 최소 3년 이상 소요되어 태양광과 풍력만으로는 2020년 이후 다수의 발전회사들이 RPS 의무량을 달성하기

에는 차질이 예상된다.

따라서 최근 태양광과 풍력으로 충족하지 못하는 RPS 의무량을 수입산 우드펠릿을 사용한 바이오매스 전소 시스템으로 대체하는 추세이다. 기존 석탄 및 석탄-바이오매스 혼소에 비하여 저탄소 및 청정 운전이 가능하고 쉽게 충당 가능한 에너지원으로 국내·외에서 각광받고 있다^{1,2)}. 바이오매스 전소와 재생 가능한 바이오 폐기물에 대한 연소 메커니즘은 다양한 연구자들에 의하여 진행되어 왔다. Demirbas^{3,4)}는 바이오매스의 주요 구성 물질인 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스, 리그닌에 대한 특성을 분석하였으며 산소와 탄소의 연소 반응, 숯 형성 메커니즘 등을 연구하였다. 또한 고정층 고온 노에서 해바라기 껍질, 솔방울, 올리브, 콜자 종자를 연소하여 점화온도와 최고온도를 측정함으로써 바이오매스 연소성이 석탄보다 높은 것을 관찰하였다^{3,4)}.

Li 등⁵⁾은 다양한 바이오매스의 수분 증발, 휘발분 연소, 고정탄소의 연소 반응 등을 관찰하고, Coat-redfern 방법으로 반응에 필요한 활성화 에너지와 반응속도를 도출하였다. 이를 통하여 연료종류에 따라 반응 온도범위 및 반응속도는 상이함을 확인하였다⁵⁾. Nobuyuki 등⁶⁾은 순환유동층보일러내 각종 바이오 폐기물의 안정적인 연소 제어 시스템을 개발하였다. 보일러 내부로 1,000℃ 이하 공기회박 조건에서 우드칩과 건축 폐자재가 3:7 비율로 공급되었다. 이 같은 연료의 공급으로 NO_x와 CO가 억제되고 SO_x가 증가하는 경향을 보였다⁶⁾. 이외 Roy 등⁷⁾은 Droplet type stove 시스템을 구성하여 우드펠릿에 하수 및 생체오물을 5-50%까지 혼소 실험을 수행하였다. 이 연료의 연소효율은 혼소율 10% 이상에서 점차 감소하기 시작하였으며 CO, NO_x, SO₂ 등 생성가스가 상승함을 관찰하여 바이오매스 혼소 가능성을 보고하였다⁷⁾. 국내에서는 대표적으로 산림에서 발생하는 미이용 우드칩이 잠재적인 바이오매스 연료로 고려되고 있으며 정부 또한 이를 사용하여 수입에 의존하는 우드펠릿을 일부 대체하는 방향을 적극 권장하고 있다. 하지만 실질적으로 미이용 우드칩 혼소에 대한 연구는 미비한 것으로 판단된다.

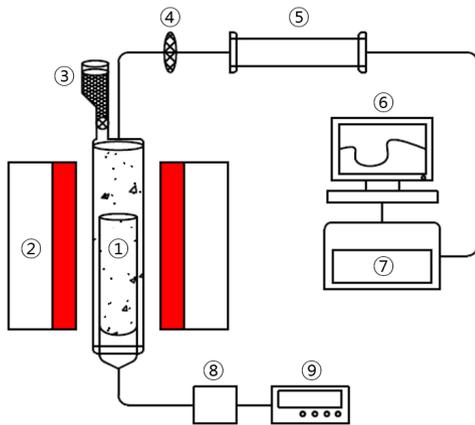


Fig. 1. Schematic of circulating fluidized bed system ① reactor, ② electric furnace, ③ fuel feeder, ④ particle filter, ⑤ cooler, ⑥ data processing PC, ⑦ gas analyzer, ⑧ flow meter, ⑨ flow controller

본 연구는 순환 유동층반응기 모사 시스템을 통하여 기존 발전회사가 사용하는 수입산 우드펠릿과 국내에서 생산되는 미이용 우드칩 질량비율을 변화시켜 가면서 최적의 혼소 데이터를 도출하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

2.1.1 연소 정특성 분석 장치

연소 정특성을 관찰하기 위하여 고정층 상태의 Thermo gravity analysis (TGA)-Derivative thermo-gravimetric (DTG) 장비를 사용하여 일정 분위기 조건하에서 고체연료의 질량 변화를 시간과 온도의 함수로써 기록하여 각 연료의 특성을 분석할 수 있다. 본 연구에 사용된 모델은 TA사의 SDT Q600 model으로 알루미늄과 백금 도가니를 이용하여 최대 200 mg까지 적재할 수 있고 온도 범위는 298-1,773 K까지 일정한 조건으로 승온할 수 있다.

2.1.2 순환유동층반응기

Fig. 1은 바이오매스의 혼소 특성을 측정하기 위

Table 1. Operating conditions of circulating fluidized bed reactor

Variable		Value
Coal particle size	μm	75-150
Bed material particle size	μm	200-300
Biomass feeding rate	g/s	0.05
Air flow rate	g/s	0.615
A/F ratio	-	12.3
Equivalent ratio(Φ)	-	1
Air velocity	m/s	0.159
Minimum fluidized velocity	m/s	0.137

하여 제작된 순환유동층반응기의 개략도를 나타내고 있다. 순환유동층반응기는 크게 온도를 조절하는 제어부와 실제 연소를 가시화 및 측정할 수 있는 반응부로 나뉘어져 있다. 주 반응기 내부는 최대 1,373 K까지 Proportional Integral Derivative (PID) 제어를 이용하여 다양한 패턴으로 온도를 일정하게 승온할 수 있으며, 운전시 고온영역에서 충분히 견딜 수 있는 석영재질로 riser와 downer를 제작하였다. 산화제는 riser의 하단부 노즐을 이용하여 가속 공급되며, 반응기로 토출됨과 동시에 체적이 팽창되어 속도가 감소하여 다시 downer로 유입되어 내부적으로 순환영역을 형성하여 주도록 설계되었다. 추가적으로 반응기 상단부에 batch type의 연료공급 카트리지를 설치하여 최대 1 g/s의 속도로 바이오매스 질량을 공급할 수 있도록 시스템을 제작하였다. Table 1에 보듯이 충물질로는 200-300 μm 범위를 가지는 50 g의 모래를 사용하였다. Riser의 높이와 직경은 0.25 m, 0.05 m이고, downer의 높이와 직경은 0.45 m, 0.085 m로 설계하였다. 이외 Kofloc사의 질량유량계와 디지털 컨트롤 박스를 설치하여 최대 1-20 L까지 일정한 유량으로 산화제를 공급할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 또한 순환유동층반응기 내에서 연료를 혼소하여 생성된 배기가스를 분석하기 위하여 연소영역 이후 샘플 라인을 설치하여 반응시 배출되는 가스성분을 분석하였다. 가스분석기는 비분산적외선(NDIR)과 전기화학식(EC) 방법을 이용하여 CO, NO_x, H₂, O₂, CO₂ 농도를 측정하였다.

2.2 실험 및 분석방법

2.2.1 연소 정특성 분석

국내산 미이용 우드칩으로 운전되는 바이오매스 전소보일러에 대한 적합한 최적 혼소 운전비를 도출하기 위하여 실제 발전소에서 사용되는 연료를 직접 공급하여 실험을 수행하였다. 우선적으로 Table 2와 같이 각 연료의 물성치를 취득하기 위하여 상기 TGA-DTG 장비를 사용하여 ASTM-D5142 방법으로 수분, 휘발분, 고정탄소, 회 함량을 측정하였으며, 원소분석은 Thermo scientific flash EA-2000 organic 장비와 Thermo finningan flash EA-1112 series 분석장비를 이용하여 탄소, 수소, 산소, 질소, 황의 비율을 확인할 수 있었다. 이 원소분석치에는 Cl, K 등의 미네랄성분이 제외되어 있어 원소의 합계가 100%가 되지 않음을 알 수 있다. 이후 두 연료를 고정층에서 우드펠릿을 기준으로 칩을 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 100% 질량비율로 혼합하여 대기압 공기분위기에서 온도 변화에 따른 질량감소와 반응성 분석을 수행하였다. 모든 실험은 공기 100 mL/min 조건하에서 최대 1,273 K까지 10 K/min로 승온하고, 매회 시료는 15±0.2 mg으로 질량을 고정하였으며, 혼소비율에 따른 반응 정도를 관찰하였다.

2.2.1 순환유동층 연소 특성 분석

바이오매스 우드펠릿과 칩을 이용하여 유동층에

Table 2. Properties of wood pellet and wood chip

Sample	Wood pellet	Wood chip
C (%)	45.6	40.9
H (%)	5.6	5.2
O (%)	38.8	39.7
N (%)	1.0	0.4
S (%)	N.D	0.1
Moisture	2.7	20.9
Volatile matter	56.3	47.5
Fixed carbon	25.8	25.9
Ash	15.2	5.7

서 혼소 특성을 관찰하기 위하여 다음과 같은 방법으로 실험을 진행하였다. 우선적으로 순환유동층반응기 내에서 혼소특성을 측정하기 위해서는 반응영역에서 연소 조건을 충족하여 주어야 한다. 이상적인 이론 반응은 산화제가 연료를 완전히 연소시킬 만큼 충분하여야 한다. 일반적으로 당량비(ϕ)를 통하여 연료와 산화제 혼합물의 과농 및 희박을 판단하게 된다. 당량비 조건은 $\phi < 1$ 에서 연료 희박, $\phi > 1$ 연료 과농, $\phi = 1$ 이론 반응 조건으로 구별할 수 있다. 본 연구의 모든 혼소 실험은 식 (1)과 같이 당량비가 1인 이론 반응 상태에서 수행되었다.

$$\phi = \frac{(Air/Fuel)_{stoic}}{(Air/Fuel)} \quad (1)$$

두 연료의 혼소비율은 연소 정특성과 동일한 조건에서 진행되었으며, 반응기 상단부에서 batch type으로 0.05 g/s의 비율로 일정하게 공급하였다. 산화제는 질소 79%, 산소 21% 혼합가스를 사용하였으며, 추가적인 예열 없이 0.615 g/s로 공급하였다. 이 속도는 식 (2)를 사용하여 계산한 최소유동화속도를 초과하여 연료의 유동화가 잘 진행되었다고 판단해 볼 수 있다⁸⁻¹⁰.

$$V_f = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{150\mu} \cdot \frac{\epsilon^3}{1-\epsilon} \quad (2)$$

반응기를 873 K, 973 K, 1,073 K 등 세 가지 다른 온도영역에서 혼소하여 반응성을 측정하였다. 모든 실험은 가스분석기를 사용하여 실시간으로 생성가스의 농도를 검출하였다. 두 연료의 혼소영향을 확인하기 위하여 반응속도상수 및 탄소전환율(X)을 계산하였다. 먼저 반응속도상수는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다^{11,12}.

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

Volume reaction model (VRM)은 불균질 반응인 가스-바이오매스 반응을 균일한 바이오매스 입자 전

체 모델로 단순화하여 온도가 상승함에 따라 반응이 진행할 때 입자의 크기는 변화 없이 밀도만 감소하는 형태로 식 (4)와 같이 나타내었다. 시간에 따른 탄소전환율(X) 곡선을 알고 있으면 식 (4)로부터 반응속도 상수를 구할 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = k(1 - X), -\ln(1 - X) = kt \quad (4)$$

석탄이 연소됨에 따라 온도와 시간 함수로 고체의 탄소가 CO 또는 CO₂ 가스로 변환되게 된다. 이 때 생성된 CO를 이용하여 탄소전환율(X)을 식 (5)를 통하여 계산하였다¹³⁾.

$$X(t_n) = \frac{\sum_{i=0}^n [CO]}{\int_0^{\infty} [CO] \cdot dt} \quad (5)$$

추가적으로 가스분석기를 통하여 측정된 CO와 CO₂ 가스를 이용하여 바이오매스 연소전환율을 구할 수 있다. 이는 연소 반응 이후 생성가스에 기초한 방법으로 연료가 산화제와 연소하여 CO와 CO₂ 가스만 생성한다고 가정하고, 탄소평형방법을 사용하였다. 결과적으로 바이오매스 연소전환율(η)은 식 (6)을 이용하여 도출할 수 있었다¹⁴⁾.

$$\eta = \frac{MW_c}{x_c W_{si}} \cdot (x_{co} + x_{co2}) \cdot \frac{p}{R_u T} \cdot Q_t \quad (6)$$

이외 상세한 순환유동층반응기 운전 조건은 Table 1에 표기하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소 정특성 분석 결과

본 연구는 순환유동층반응기 내에서 바이오매스 연료의 혼소 특성을 관찰하여 연소기 내부의 최적 혼소비를 도출하는 것을 목적으로 우선 고정층 상

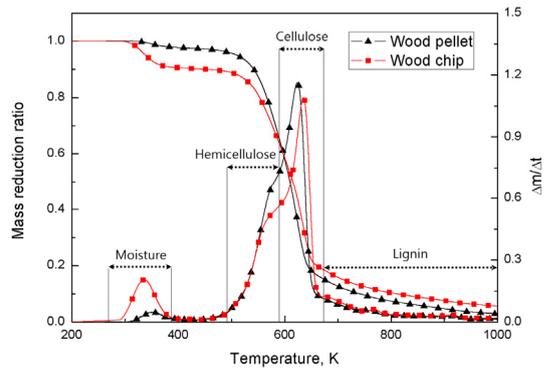


Fig. 2. Pyrolysis results of wood pellet and wood chip in TGA apparatus

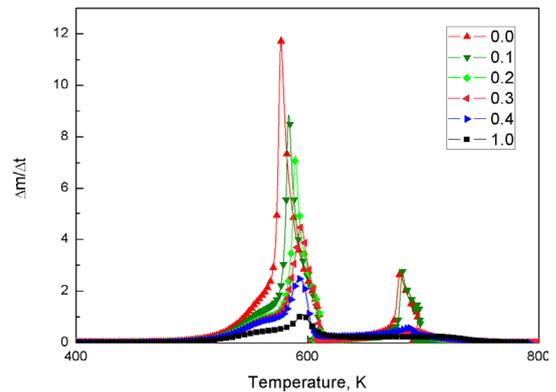


Fig. 3. Effect of different blending ratio on the rate of combustion in TGA

태에서 연료 자체 연소 특성을 분석하고 이를 유동층 상태와 비교하고자 하였다. Fig. 2는 열분해 조건 하에서 온도에 따른 질량분율비율과 미분 열중량분석 결과를 보여주고 있다. 바이오매스의 질량감소 및 반응구간은 특정 온도영역에서 분해되는 것으로 구분할 수 있으며, 초기 273-373 K 영역에서 수분, 493-588 K 영역에서 헤미셀룰로오스, 588-673 K에서 셀룰로오스, 673-1,173 K에서 리그닌이 분해되는 것을 확인하였다^{15,16)}. 우드펠릿은 칩과 비교하여 초기 수분이 적고 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스가 더 높은 것으로 측정되었으며, 두 연료 모두 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스가 분해되는 영역에서 급격한 질량손실이 발생하였다^{17,18)}. Fig. 3은 혼소시 온도 증가

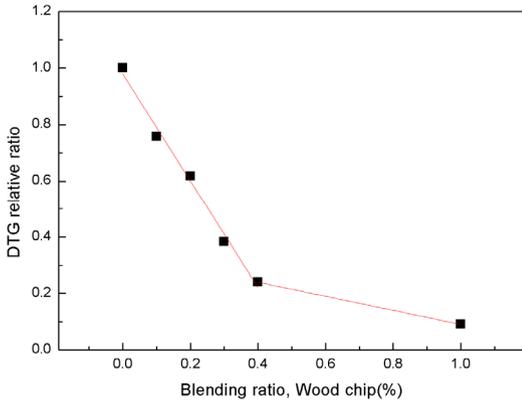


Fig. 4. Variation of DTG peak value as function of blending ratio of wood chip

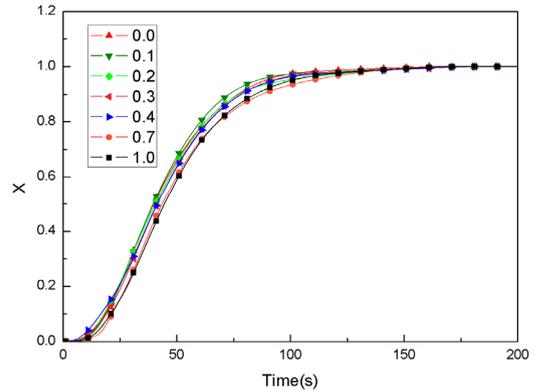


Fig. 6. Variation of temporal carbon conversion with blending ratio at 873 K

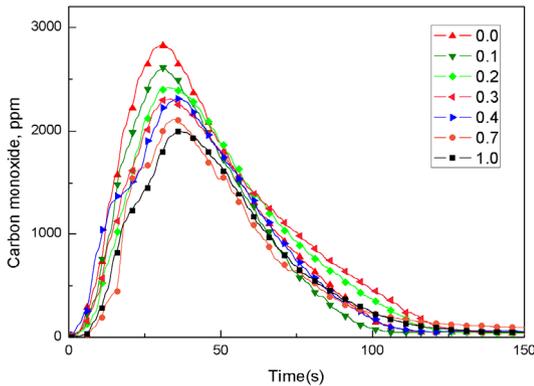


Fig. 5. Variation of CO gas with blending ratio at 873 K

에 따른 미분 열중량 분석 결과를 나타내고 있다. 두 연료의 질량비율은 우드펠릿 기준으로 칩을 혼합하여 변화시켰으며, 혼소비가 증가하면서 순차적으로 최고 반응성 온도영역이 577 K에서 584 K, 589 K, 595 K, 597 K, 599 K로 점차 후반부로 지연되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 우드펠릿과 칩의 반응성 차이에서 기인함을 보여주고 있으며 나중에 순환유동층 실험과 이론해석을 통하여 도출된 반응속도 상수 차이와도 관련이 있다. 또한 각 온도영역에서 나타내는 시간당 질량감소율(반응성)의 peak값을 상대비율 값으로 전환하여 Fig. 4에 나타내었다. 순수 우드펠릿 1.0을 기준으로 칩의 비율이 증가함에 따라 0.75, 0.61, 0.38, 0.23, 0.09까지 감소하며, 혼소비 0.4

를 기준으로 연소 정반응 특성에서 큰 차이가 있음을 확인하였다.

3.2 순환유동층 연소 특성 분석 결과

순환유동층반응기내 일정한 온도 조건에서 혼소하여 CO 가스를 측정하였고, Fig. 5는 873 K에서 측정한 결과를 보여주고 있다. 상대적으로 낮은 온도영역인 873 K에서 CO 가스의 체적분율이 가장 커서, 연소성이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 또한 칩의 혼소비율이 증가함에 따라 반응이 후반부로 지연되는 것을 확인할 수 있었다. 973 K는 873 K와 비교하여 상기 언급한 영향이 점차 완화되어 고온영역인 1,073 K에서 혼소에 따른 CO 가스의 생성지연이 없어짐을 보여주고 있다. 이러한 CO 가스 체적분율 값은 연소되어 발생하는 생성가스를 의미하고 앞서 설명하였듯이 식 (5)를 통하여 Fig. 6과 같이 시간 변화에 따른 탄소전환율(X)로 전환할 수 있다. 873 K에서는 칩의 혼소율이 높아짐에 따라 같은 탄소전환율에 도달하기 위하여 반응시간이 증가되는 경향을 보여주고 있다. 반면 Fig. 7에서 보듯이 점차 고온영역으로 도달하게 될 경우(1,073 K) 같은 탄소전환율에 도달하는데 필요한 반응시간이 같아짐을 관찰하였다. 추가적으로 도출한 시간에 따른 탄소전환율 값을 식 (4)에 적용하여 Fig. 8과 같이 혼소에 따른 연소 반응

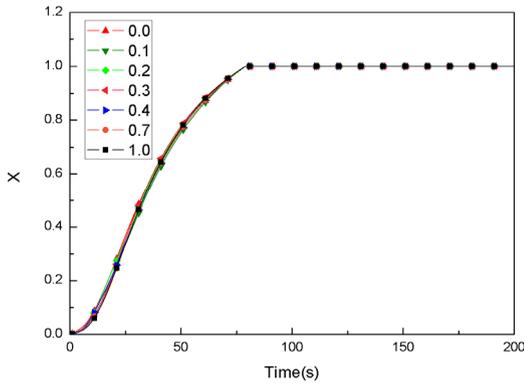


Fig. 7. Variation of temporal carbon conversion with blending ratio at 1,073 K

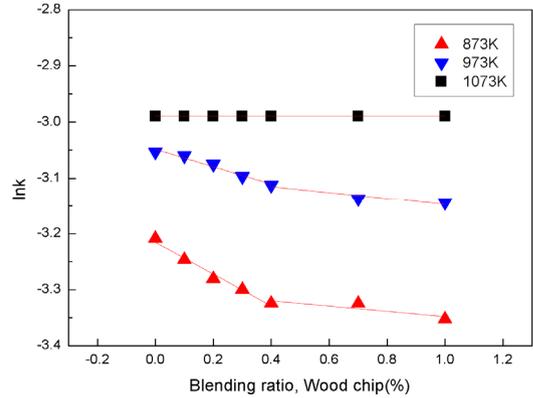


Fig. 9. Effect of blending ratio on the reaction rate constant at three different temperatures

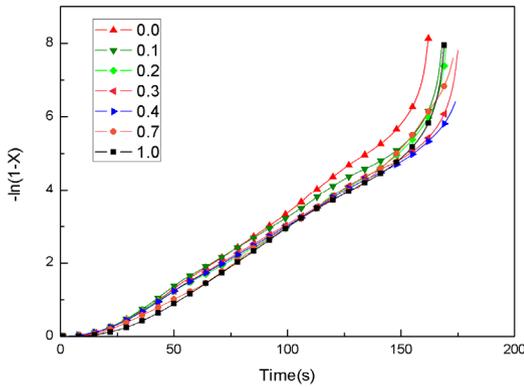


Fig. 8. Variation of reaction rate constant with blending ratio at 873 K

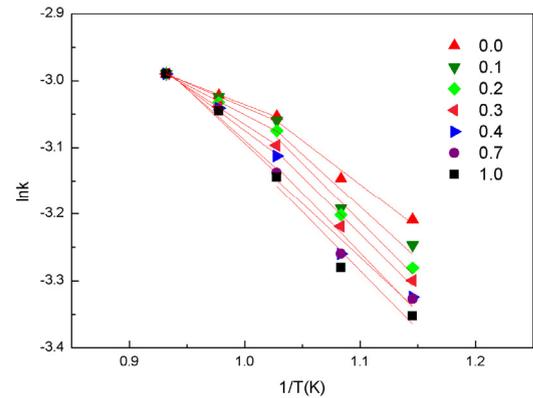


Fig. 10. Variation of reaction rate constant with temperature for different blending ratios

성 차이를 비교하였다. VRM 모델 그래프의 기울기는 반응속도상수(k)를 의미하며, 873 K에서 혼소에 의한 반응속도상수 변화가 크다는 것으로 확인할 수 있다. 각 온도영역에서 혼소비에 따른 반응속도상수 값을 취합하여 Fig. 9와 같이 나타내었다. 873 K와 973 K의 비교적 저온영역에서 반응속도상수는 혼소 비율 40% 이전까지 급격히 감소하고 이후 반응상수 변화가 미비함을 확인할 수 있었다. 또한 우드칩의 혼소율이 10%만 되더라도 반응성이 급격히 줄어 실제 전소 시스템에 적용할 경우 시스템 성능이 크게 저하될 가능성이 있다는 것을 보여준다. 이는 정특성 분석 결과 중 혼소에 따른 DTG 최고값의 상대비율 변화(Fig. 4)와 유사한 경향으로 관찰된다. 반면, 1,073 K의 고온영역에서 혼소비율과는 무관하게 모

든 반응속도상수 값들이 일치함을 확인할 수 있었다. Fig. 10은 반응속도상수를 온도함수의 역수인 아레니우스 식 표기를 통하여 도식화하였으며, 선형 기울기를 도출하여 활성화 에너지를 도출할 수 있다. 우드칩을 혼소함에 따라 특히 저온영역에서 기울기가 커짐으로써 활성화에너지가 높고 연소 반응성이 저하된다고 볼 수 있다. 이는 우드펠릿에 비하여 우드칩의 다량의 수분 영향으로 판단된다. 이 같은 혼소 영향은 고온으로 갈수록 줄어들어도 여전히 확인할 수 있다. 이는 고온영역에서는 확산현상이 지배적으로 작용하여 반응속도의 영향이 작은 반면, 저온영역에서는 우드칩의 혼소에 따른 반응속도 영향이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 이 같은 저온영역

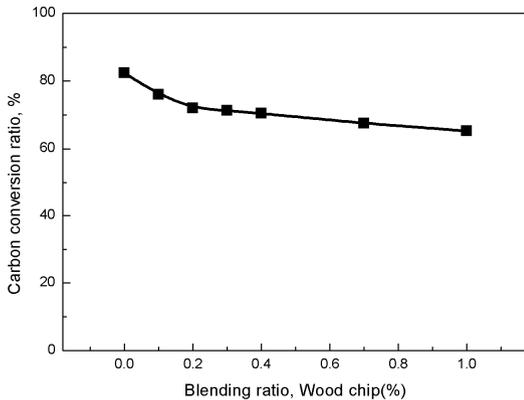


Fig. 11. Effect of blending ratio on biomass conversion ratio (η) at 873 K

(873 K)은 실제 순환유동층 연소로의 온도 범위 (1,023-1,223 K)에 비하며 낮기 때문에 측정된 저온 실험 결과는 바이오매스 전소 시스템의 연소 특성과 상이할 수도 있다.

마지막으로 식 (6)과 같이 생성된 CO와 CO₂ 가스의 값을 사용하여 Fig. 11과 같이 혼소비율에 따른 바이오매스 연소전환율(η)을 계산할 수 있다. 대표적으로 반응성의 차이가 급격한 873 K 온도영역에서 우드칩의 질량비율이 증가할 경우 최고 82%에서 65%까지 바이오매스 전환율이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 앞서 살펴본 연소 반응성 변화와 일치함을 보여주고 있다.

4. 결론

최종적으로 바이오매스 혼소에 대한 결과값들을 정리하여 다음과 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

1) 연소실험에 사용된 두 가지 연료의 물성측정 결과, 우드펠릿과 칩의 원소분석치는 유사하나 우드 칩이 우드 펠릿에 비하여 다량 수분을 함유, 회분과 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스가 소량 함유되어있음을 확인하였다.

2) 정특성 연소 반응 분석 결과는 우드칩의 혼소율이 높아짐에 따라 시간당 질량변화율(반응성)이 40%까지 감소하고 이후 반응성에 미치는 영향이 미

비한 것으로 관찰하였다.

3) 순환유동층반응기 운전시 낮은 온도영역인 873 K에서는 칩의 혼소비가 증가함에 따라 연소성에 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 반면, 혼소비 40% 이상에서는 반응성의 차이가 미비하였다.

4) 고온영역인 1,073 K에서는 혼소에 따른 반응성 변화가 없으나 CO 감소와 반응속도상수 증가를 통하여 최적 운전 조건에 도달하였다고 판단된다.

5) 순환유동층반응기에서 CO, CO₂ 가스를 이용하여 계산한 바이오매스 전환율이 40%를 기점으로 급격하게 변화하는 것을 관찰하였고 이는 정특성과 순환유동층 결과와도 일치함을 확인할 수 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었다.

References

1. R. Saidur, E. A. Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, and S. Mekhilef, 2011, "A review on biomass as a fuel for boilers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 5, 2011, pp. 2262-2289.
2. C. D. Ray, L. Ma, T. Wilson, D. Wilson, L. M. Creery, and J. K. Wiedenbeck, "Biomass boiler conversion potential in the eastern United States", *Renewable Energy*, Vol. 62, 2014, pp. 439-453.
3. A. Demirbas, "Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass", *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, 2000, pp. 633-646.
4. A. Demirbas, "Combustion characteristics of different biomass fuels", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, 2004, pp. 219-230.
5. P. S. Li, Q. Wang, Q. Xu, W. Yu, Y. N. Yue, Z. Liang, X. C. Dong, and S. Hu, "Combustion reaction mechanism of four typical Chinese biomass by TG and DTG", *Aisa-pacific journal of chemical engineering*, Vol. 7, 2012, pp. 209-215.
6. N. Nobuyuki, S. Hiroyuki, and Y. Koji, "CFB Combustion control system for multiple fuels", *JFE Technical Report*, Vol. 16, 2011, pp. 9-15.
7. M. M. Roy, A. Dutta, K. Corscadden, and P. Havard, "Co-combustion of biosolids with wood pellets in a wood pellet stove", *International Journal of Engineering &*

- Technology, Vol. 11, 2011, pp. 7-15.
8. D. Geldart, "Types of gas fluidization", Powder Technology, Vol. 7, No. 5, 1973, pp. 285-292.
 9. D. Kunii and O. Levenspiel, "Fluidization engineering", New York: Wiley, 1969.
 10. T. R. Rao and J. V. R. Bheemarasetti, "Minimum fluidization velocities of mixtures of biomass and sands", Energy, Vol. 26, 2001, pp. 633-644.
 11. P. Parthasarathy, K. S. Narayanan, and L. Arockiam, "Study on kinetic parameters of different biomass samples using thermo-gravimetric analysis", Biomass & Bioenergy, Vol. 58, 2013, pp. 25-66.
 12. Y. T. Kim, D. K. Seo, and J. H. Hwang, "Characteristics of various ranks of coal gasification with CO₂ by gas analysis", J. Korean Soc. Combust, Vol. 15, 2010, pp. 41-49.
 13. L. Gašparovič, Z. Koreňová, and E. Jelemenský, "Kinetic study of wood chips decomposition by TGA", 36th International Conference of SSCHE, Vol. 178, 2009, pp. 1-14.
 14. S. C. Lee, C. W. Kim, M. K. Hwang, M. S. Kim, K. B. Kim, C. H. Jeon, and J. H. Song, "Measurement and analysis of coal conversion efficiency for a coal recirculating fuel cell simulator", Trans. for the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 5, 2012, pp. 503-512.
 15. H. Yang, R. Yan, H. Chen, D.H. Lee, and C. Zheng, "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis", Fuel, Vol. 86, 2007, pp. 1781-1788.
 16. K. Candelier, J. Dibdiakova, G. Volle, and P. Rousset, "Study on chemical oxidation of heat treated lignocellulosic biomass under oxygen exposure by STA-DSC-FTIR analysis", Thermochimica Acta, Vol. 644, 2016, pp. 33-42.
 17. N. Aghamohammadi, N. M. N. Sulaiman, and M. K. Aroua, "Combustion characteristics of biomass in SouthEast Asia", Biomass & Bioenergy, Vol. 35, 2011, pp. 3884-3890.
 18. B. J. Lin and W. H. Chen, "Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating", Energy Research, Vol. 3, 2015, pp. 1-9.