

반탄화 환경변화에 따른 바이오매스의 수분증발에 관한 연구

고건영* · 김만영** · 이창엽** · 김세원**

* 전북대학교 항공우주공학과, ** 한국생산기술연구원

Investigation of Water Evaporation from Biomass with Different Torrefaction Environments

Gun Yung Go*, Man Young Kim**†, Chang Yeop Lee** and Sae Won Kim**

* Dept. of Aerospace Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

** Energy System R&D Group, KITECH

(Received March 12, 2013 ; Revised August 6, 2013 ; Accepted August 6, 2013)

Key Words: Torrefaction(반탄화), Biomass(바이오매스), Moisture Fraction(수분율), Pyrolysis(열분해), Species Reaction Rate(화학종 반응률)

초록: 화석연료의 사용량이 증가함에 따라 전 세계적으로 환경오염문제에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 대한 해결책으로 신재생에너지에 대한 관심이 집중되고 있는 가운데 목질계 바이오매스의 연료화가 그 해결책의 하나로 떠오르고 있다. 따라서 본 연구에서는 목질계 바이오매스의 에너지 효율에 큰 영향을 미치는 수분증발 모델을 제시하고 반탄화 온도, 나무의 수분율, 그리고 바이오매스 종류에 따른 특성을 분석하였다. 그 결과, 반탄화 온도가 상승함에 따라 나무의 온도와 수분율은 빠르게 감소하였다. 그리고 반탄화 온도가 423K 이하인 경우에는 나무 수분율의 변화가 거의 나타나지 않았다. 또한 나무의 초기 수분율이 높을수록 숯(charcoal)이 더 느리게 생성될 뿐만 아니라, 아몬드셸(almond shell)의 경우 가장 많은 숯이 생성되는 것을 확인하였다.

Abstract: Owing to the Increasing use of fossil fuels, worldwide concerns over environmental pollution are increasing. As a solution, ligneous biomass has emerged as a promising alternative fuel in recent times. Therefore, in this study, a moisture evaporation model that largely influences the energy density and efficiency of ligneous biomass is studied using a numerical approach. Furthermore, the thermal characteristics are analyzed in terms of torrefaction temperature and moisture fractions in the wood, and the type of wood species. The results show that the temperature and moisture fractions of wood decrease with an increase in the torrefaction temperature. In particular, when the torrefaction temperature is lower than 423K, there were little changes in the moisture fraction in the wood. Furthermore, it was found that charcoal is produced more slowly as the moisture fraction in the wood increases.

- 기호설명 -

A_0	: 선지수인자	c_w, c_c, c_M	: 나무, 숯, 그리고 수분의 비열
E_0	: 활성화 에너지	h	: 대류 열전달 계수
K_1, K_2, K_3	: 화학종의 반응률	k_{eff}	: 실질적인 열전도도
R	: 기체상수	k_w, k_c	: 나무와 숯의 열전도도
T	: 온도	n	: 기하학적 변수($n=1$ 일 때 실린더, $n=0$ 일 때 슬라브)
T_0	: 챔버 온도	r_{ev}	: 수분증발률
T_f	: 반탄화 온도	r_i	: 화학종의 전환율
		u	: 휘발 속도 및 수증기 속도
		x	: 나무에서의 수분율
		ρ_0	: 초기 밀도

† Corresponding Author, manykim@jbnu.ac.kr

ρ_c	: 숯 밀도
ρ_g	: 휘발 밀도
ρ_v	: 수증기 밀도
ρ_w	: 나무 밀도
Δh_{ev}	: 수분 증발에 의한 열발생
Δh_i	: 화학반응열
Φ	: 보간 인자(interpolation factor)

1. 서론

화석연료의 대대적인 사용으로 인해 발생하는 자연재해 및 환경오염이 심각한 문제로 대두됨에 따라 신재생에너지에 대한 관심이 전 세계적으로 높아지고 있다. 특히 환경문제에 대한 대책으로 바이오매스 에너지의 활용이 대두되고 있다. 하지만 목질계 바이오매스 연료의 경우 낮은 에너지 밀도, 타 연료 대비 경제성 제고 문제, 흡습으로 인한 저장 문제, 부족한 목재 자원 문제, 수종의 특성과 형상에 따른 성형 문제 등의 다양한 문제점들을 가지고 있다. 국외에서는 이와 같은 문제점들을 해결하기 위한 관련 연구가 활발하게 진행 중이다. 특히 유럽 등의 선진국에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 반탄화(torrefaction) 기술을 개발하여 상용화를 추진하고 있다. 반탄화는 열분해 기술의 일종으로 연료의 에너지밀도를 높이고, 성상을 변화시켜 발열량, H/C 비율, O/C 비율 등을 기존 고체 화석 연료에 보다 가까운 형태로 고체 연료화 하는 과정으로써 수분의 제거, 발열량의 증가, 그리고 펠릿성형에 의한 부피감소 등으로 인한 연료로서의 품질향상, 저장성, 그리고 운송비용 절감 등의 이점을 가질 수 있는 기술이다. 하지만 국내의 경우, 반탄화에 대한 연구의 규모가 매우 작으며, 관련된 국내 순수 기술을 보유하지 못하여 선진 기술의 국산화에 초점이 맞춰져 있는 현실이다.

Blasi⁽¹⁻²⁾는 대표적 바이오매스인 나무의 열분해에 관한 수치해석 연구를 수행하기 위해 열분해 현상의 해석에 사용되는 반응 메커니즘을 one step global model, one-stage, multi-reaction model, 그리고 two-stage, semi-global model의 세 가지로 구분하였고, 기존의 열분해 모델에 가변의 고체상 밀도에 따라 분해되는 입자의 수축현상을 적용시킨 모델을 제시하였다. 그리고 Babu and Chaurasia⁽³⁾는 바이오매스(biomass)의 열분해 모델

에 숯(char)의 열전도도와 비열용량의 효과를 추가적으로 고려한 모델을 제시하고 실험결과와 비교하였다.

한편, Prins 등⁽⁴⁾은 나무의 열분해모델을 해석하기 위해 230~300°C의 온도조건에서 반탄화 반응에 대해 헤미셀룰로스 분해, 그리고 셀룰로스 분해의 두 단계로 분류하여 분석하였고, Turner 등⁽⁵⁾은 200~260°C의 온도조건에서 헤미셀룰로스, 셀룰로스 그리고 리그닌의 열분해에 대해 열과 질량전달, 그리고 화학적 메커니즘을 고려하여 전산해석을 수행하였고, 같은 조건의 실험결과와 비교하였다.

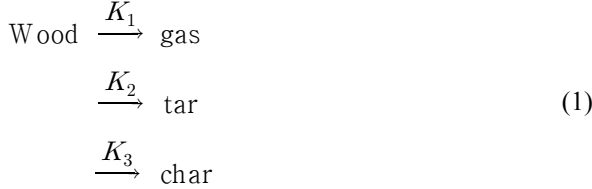
바이오매스의 수치 모사는 매우 복잡하고 화학적 공정으로부터 수학적 모델의 유도과 반응 및 물성 자료 확보의 어려움과 밀접하게 관련되어 있기 때문에 반응 메커니즘의 선택은 매우 중요하다. 본 연구에서는 반탄화 기술과 관련하여 에너지 효율에 큰 영향을 미치는 수분증발을 모델링하기 위해 Blasi⁽¹⁾가 제시한 반응 메커니즘 중에 one-stage, multi-reaction model을 이용하였다. 그리고 중량 감소 모델을 적용한 목재의 중량감소, 그리고 목재의 열분해 해석 모델을 제시하였다. 또한 주위 환경변화에 따른 바이오매스 연료의 변화특성을 분석하기 위하여 반탄화 온도, 나무의 수분율에 따른 특성을 해석하였고 특히, 다양한 바이오매스(즉, Pinus, Oak, Almond shell, Beech) 종류에 따른 숯(charcoal)의 생성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 이론 해석

2.1 One stage, multi-reaction model

물질의 화학 반응과정은 대략 두 단계로 설명될 수 있는데, 이는 초기 분해에 관련된 일차와 이차 반응은 Blasi⁽²⁾가 제시한 열분해 생성물들을 몇 개의 주요 형태들(타르, 가스, 그리고 숯)로 분류하여 준-총괄 속도 메커니즘(semi-global kinetic mechanism)으로 표현하였다. 이 때 (1) 물질과 가스의 체류시간, (2) 챔버 내 가열 온도의 변화, (3) 챔버 내 초기 온도와 압력, (4) 물질의 물리적 성질(수분 함량과 입자의 크기), 그리고 (5) 물질의 화학적 조성 등을 다르게 하여 얻은 실험 결과들로부터 그 경향을 관찰하여 메커니즘을 유도할 수 있다. 물질의 수분증발을 모사하기 위해

본 연구에서는 매우 간단한 반응식을 제시하였다. 목질계 바이오매스의 경우 물질의 열분해는 다음과 같은 반응으로 나타낼 수 있다. 즉,



실제 이러한 방법으로 구해진 화학종의 반응률 값들은 어느 정도의 차이를 가지는데, 이것은 열분해의 복잡한 화학반응, 반응 중 물질 내에서 발생하는 열, 질량, 운동량 전달 현상, 그리고 입자 크기와 승온 속도 등의 차이 때문에 발생하는 현상이다.

본 연구에서는 one stage, multi-reaction model을 사용하였다. 이 때, 단일반응의 형태로 나타낸 고체의 분해 메커니즘을 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- (1) 열과 물질전달 현상은 1차원이다.
- (2) 반탄화를 통한 기하학적 변화는 발생하지 않는다.
- (3) 휘발(volatile)과 수증기는 고체상태에서 열평형 상태이다.
- (4) 기공(pore) 안에서 화학종들의 확산 이동은 무시한다.
- (5) 결합수(bound water)의 이동은 무시한다.
- (6) 수증기의 재응결은 발생하지 않는다.
- (7) 고체 투과성은 압력차를 무시할 수 있을 정도로 높다.
- (8) 가스상에서의 저장된 에너지는 무시한다.

2.2 지배방정식

본 연구에서는 Chan. 등⁽⁶⁾에 의해 제안된 스킴을 사용하여 건조과정에서 열분해와 동시에 발생하는 추가적인 화학반응을 고려하였다. 특히, 반탄화 반응은 가스(K_1), 타르(K_2), 그리고 숯(K_3)의 3가지 반응을 고려하였다. 아레니우스 타입(arrhenius-type) 방정식으로 정의된 증발률은 다음과 같이 표현된다.

$$r_{ev} = x\rho_w A_0 \exp(-E_0/RT) \quad (2)$$

본 연구에 사용한 모델을 해석하기 위해서는 다음과 같은 고체 상태에서의 화학종, 그리고 에너지 보존 방정식을 풀어야 한다.

- Species conservation equations

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -(K_1 + K_2 + K_3)\rho_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} = K_3\rho_w \quad (4)$$

- Gaseous species balance equation

$$\frac{\partial}{r^n \partial r} (r^n \rho_g u) = (K_1 + K_2)\rho_w \quad (5)$$

- Moisture balance equation

$$\frac{\partial (x\rho_w)}{\partial t} = -r_{ev} \quad (6)$$

- Water vapor continuity equation

$$\frac{\partial}{r^n \partial r} (r^n \rho_v u) = r_{ev} \quad (7)$$

- Energy conservation equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(\rho_w c_w + \rho_c c_c + x\rho_w c_M)T] = \\ \frac{\partial}{r^n \partial r} \left(r^n k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} [(\rho_g u c_g + \rho_v u c_v)T] \\ - \sum_{i=1}^3 \Delta h_i r_i - \Delta h_{ev} r_{ev} \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서,

$$\text{Effective conductivity, } k_{eff} = \Phi k_w + (1 - \Phi)k_c \quad (8a)$$

$$\text{Interpolation factor, } \Phi = \frac{\rho_w}{\rho_0} \quad (8b)$$

$$\text{Reaction rates, } K_i = A_i \exp(-E_i/RT) \quad i \leq 1 \leq 3 \quad (8c)$$

$$\text{Conversion rates, } r_i = K_i \rho_w \quad i \leq 1 \leq 3 \quad (8d)$$

에너지 보존 방정식(8)에서, 좌변은 화학종의 가스상과 응축상의 엔탈피 축적을 나타내고, 우변의 첫 번째 항은 전도 열전달, 우변의 두 번째 항은 가스상 화학종의 대류 열전달, 그리고 우변의 세 번째와 네 번째 항은 화학반응에 의한 열 발생을 나타낸다.

해석을 초기조건과 경계조건은 다음과 같다. 즉,

- Initial conditions

$$\begin{aligned} \text{For } t=0, \forall r: T = T_0 \\ \rho_w = \rho_0 \\ \rho_c = 0 \\ u = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

• Boundary conditions

$$\text{For } r=0, \forall t: \begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \\ u = 0 \end{cases} \quad (10)$$

한편, 본 연구에서 사용한 화학반응 데이터(kinetic data)와 물성치⁽⁷⁾는 Table 1에 정리하였고 피너스(pinus), 오크(oak), 아몬드쉘(almond shell), 그리고 비치(beech)에 대한 선지수인자(pre-exponential coefficient)와 활성화 에너지는 Table 2에 정리하였다.^(2,7,8)

Table 1 Kinetic data and properties used in this study⁽⁷⁾

Kinetic data and properties	Unit	Value
Activation energy	kJ/mol	80
Pre-exponential factor	1/s	5.13×10^6
Heat of chemical reaction	kJ/kg	418
Heat for moisture evaporation	kJ/kg	2257
Initial density	kg/m ³	500
Specific heats of wood	kJ/kg·K	1.5
Specific heats of gas		1.1
Specific heats of charcoal		1.1
Heat conductivities of wood	W/m·K	16×10^{-2}
Heat conductivities of charcoal		7.1×10^{-2}

Table 2 Arrhenius law parameters with wood species^(2,7,8)

Wood species	Pre-exponential coefficient[1/s]	Activation energy[kJ/mol]
Pinus	$A_1=1.30 \times 10^8$	$E_1=140.0$
	$A_2=2.00 \times 10^8$	$E_2=133.0$
	$A_3=1.08 \times 10^7$	$E_3=121.0$
Oak	$A_1=1.43 \times 10^4$	$E_1=88.60$
	$A_2=4.12 \times 10^6$	$E_2=112.7$
	$A_3=7.38 \times 10^5$	$E_3=106.5$
Almond shell	$A_1=1.52 \times 10^7$	$E_1=139.2$
	$A_2=5.85 \times 10^6$	$E_2=119.0$
	$A_3=2.98 \times 10^3$	$E_3=73.10$
Beech	$A_1=4.38 \times 10^9$	$E_1=177.0$
	$A_2=1.08 \times 10^8$	$E_2=149.0$
	$A_3=3.27 \times 10^6$	$E_3=125.0$

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 검증

본 연구의 해석방법을 검증하기 위하여 Babu and Chaurasia⁽³⁾와 Jalan and Srivastava⁽⁹⁾의 해석모델, 그리고 Pyle and Zaror⁽¹⁰⁾의 실험결과와 비교하였다. 반탄화 온도는 643K, 나무의 초기밀도는 650kg/m³ 으로 설정하였으며 각 반응에 관련된 물성치들은 Babu and Chaurasia⁽³⁾의 데이터를 참조하였다.

시간에 따른 나무의 온도변화를 Fig. 1에 도시하였다. 시간이 지남에 따라 나무의 온도가 반탄화 온도에 도달하기까지 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 본 연구의 결과는 기존의 다른 연구 결과 및 실험 결과와도 비슷한 경향을 보이고 있다.

3.2 반탄화 온도에 따른 영향

본 연구에서는 반탄화 온도에 따른 영향을 알아보기 위하여 슬라브 모양의 펠릿에 대하여 r-방향에 대한 1차원 해석을 수행하였다.

Fig. 2는 나무(pinus)의 초기온도가 300K이고 반탄화 온도가 423K, 473K, 523K, 그리고 573K이며 나무의 초기 수분율이 15%일 때, 시간에 따른 나무의 온도변화를 보여주고 있다. 처음 약 20초정도까지는 반탄화 온도가 423K, 473K, 523K, 그리고 573K인 경우 모두 나무와 매우 큰 온도차를 가지고 있기 때문에 나무의 온도가 급속도로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 나무의 온도가 증가함에 따라 반탄화 온도와 나무의 온도차가 감소하여 20초 이후에는 나무의 온도가

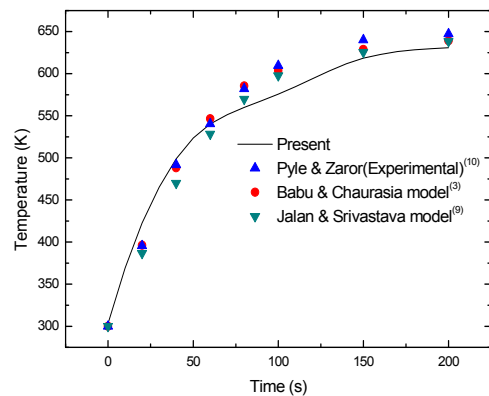


Fig. 1 The temperature changes of wood as function of time

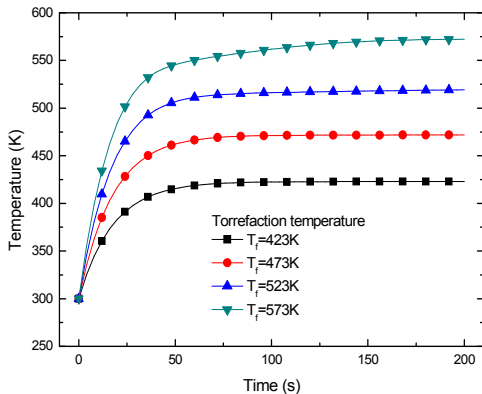


Fig. 2 The temperature changes of wood with torrefaction temperatures

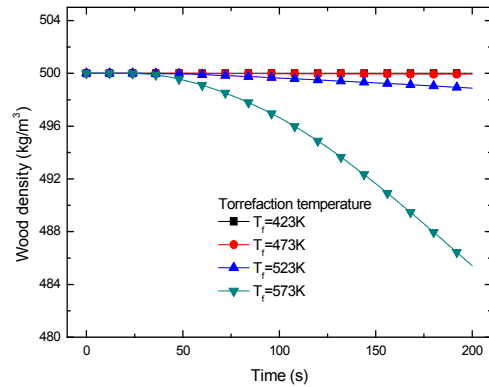


Fig. 4 The wood density changes with torrefaction temperatures

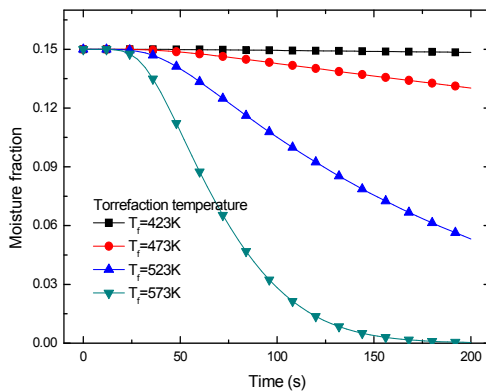


Fig. 3 The moisture fraction changes in the wood with torrefaction temperatures

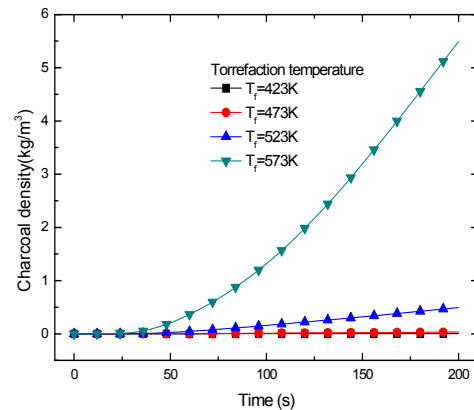


Fig. 5 The charcoal density changes with torrefaction temperatures

상당히 높아지게 되고, 온도가 증가하는 속도는 점점 감소하게 된다. 50초 정도가 지나게 되면 나무의 온도가 반탄화 온도에 거의 도달하여 매우 천천히 온도가 상승하게 되고 100초 이후에는 반탄화 온도와 나무의 온도가 거의 같게 된다.

Fig. 3은 나무(pinus)의 초기온도가 300K이고 반탄화 온도가 423K, 473K, 523K, 그리고 573K이며 나무의 초기 수분율이 15%일 때, 시간에 따른 나무의 수분율의 변화를 보여주고 있다.

반탄화 온도가 423K인 경우에는, Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 나무의 온도가 반탄화 온도인 423K에 도달하게 되지만 나무의 수분율은 변화를 보이지 않는다. 반탄화 온도가 473K인 경우에는 나무의 온도가 473K에 거의 도달함에 따라 50초 이후부터 조금씩 나무의 수분율이 감소하게 되고 200초가 경과된 시점에서 0.13의 수분율을 가지게 된다. 반탄화 온도가 523K인 경우에는 나무의 온도가 빠르게 증가함에 따라 40초 이후부터 나무의 수분율은 감소하게 되고 200초 이후에

는 나무의 수분율이 0.05까지 떨어지게 된다. 반탄화 온도가 573K인 경우에는, Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 나무의 온도가 매우 빠르게 증가하게 된다. 따라서 약 25초 이후부터 나무의 수분율이 감소하기 시작하고 200초 이후에는 나무의 수분율이 0까지 감소하게 된다.

Fig. 4는 나무(pinus)의 초기온도가 300K이고 반탄화 온도가 423K, 473K, 523K, 그리고 573K이며 나무의 초기 수분율이 15%일 때, 시간에 따른 나무의 밀도 변화를 보여주고 있다.

반탄화 온도가 423K, 473K, 523K, 그리고 573K인 경우 모두 약 25초가 경과한 시점까지는 나무의 밀도가 거의 변하지 않는다. 하지만 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 25초 이후에는 나무의 수분율이 변함에 따라 나무의 밀도도 서서히 변하기 시작하게 된다. 반탄화 온도가 423K, 그리고 473K인 경우에는 나무의 온도가 각각 423K, 473K까지 상승하지만 수분율의 변화를 거의 보여주지 않기 때문에 나무의 밀도변화가 거의 나

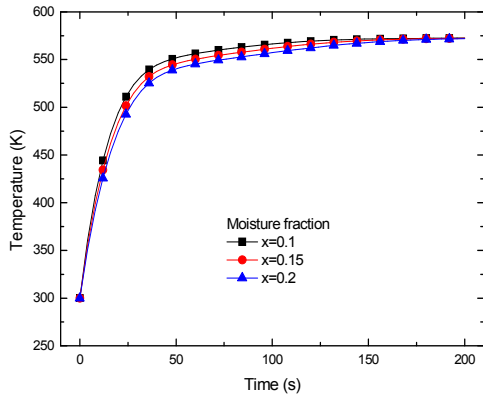


Fig. 6 The temperature changes of wood with moisture in the wood

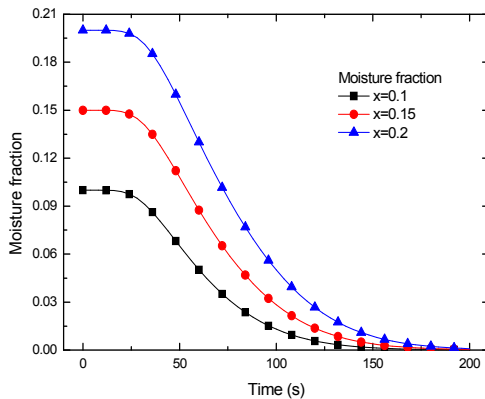


Fig. 7 The moisture fraction changes in the wood with torrefaction time

타나지 않는다. 반탄화 온도가 523K인 경우에는 나무의 밀도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 반탄화 온도가 573K인 경우에는 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 수분율이 매우 크게 감소함에 따라 나무의 밀도 또한 감소하게 된다.

Fig. 5는 나무(pinus)의 초기온도가 300K이고 반탄화 온도가 423K, 473K, 523K, 그리고 573K이며 나무의 초기 수분율이 15%일 때, 시간에 따른 숯의 밀도 변화를 보여주고 있다.

초기에는 챔버 내부에 숯이 존재하지 않기 때문에 모든 경우에서 숯의 밀도는 0이다. 시간이 지남에 따라 높은 반탄화 온도에 의해 열이 전달되어 나무의 온도가 크게 상승하게 되면 나무의 열분해 현상이 발생하게 되고 숯이 생성된다. 반탄화 온도가 423K, 그리고 473K의 경우에는 열분해 현상이 발생할 수 있는 온도까지 상승하지 못하여 숯의 밀도는 200초 이후에도 0이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반탄화 온도가 523K인 경우에는 약 50초 이후부터 상승한 나무의 온도

에 의해 열분해 현상이 발생하게 되고 숯의 밀도가 점점 증가하게 된다. 반탄화 온도가 573K인 경우에는 나무의 온도가 매우 높아짐에 따라 더 빨리 열분해 현상이 발생하여 약 30초 이후부터 숯의 밀도가 증가하게 된다.

3.3 나무의 초기 수분율에 따른 영향

Fig. 6은 나무(pinus)의 초기 온도가 300K이고 반탄화 온도가 573K일 때, 수분율의 변화에 따른 나무의 온도 변화를 보여주고 있다. 이 때, 나무의 초기 수분율에 따른 변화를 살펴보기 위하여 일반적인 펠릿(pellet)의 수분율 범위인 10~20%에서의 변화를 살펴보았다.

나무의 초기 수분율이 각각 10%, 15%, 그리고 20%인 경우, 약 20초 정도까지는 나무의 온도가 급속도로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 나무의 온도가 증가함에 따라 반탄화 온도와 나무의 온도차가 감소하여 20초 이후에는 나무의 온도가 상당히 높아지게 되고, 온도가 증가하는 속도는 점점 감소하게 된다. 이 때, 나무의 온도 변화는 초기 수분율이 낮을수록 더 빠르게 변화하게 된다. 약 130초 정도에는 나무의 수분율이 10%인 경우에 온도가 반탄화 온도인 573K에 도달하게 되고, 나무의 수분율이 15%인 경우에는 150초 정도에 573K에 도달하게 된다. 그리고 나무의 수분율이 20%인 경우에는 170초 정도에 나무의 온도가 반탄화 온도인 573K까지 상승하게 된다.

Fig. 7은 나무(pinus)의 초기 온도가 300K, 반탄화 온도가 573K이고, 초기 수분율이 각각 10%, 15%, 그리고 20%일 때, 시간에 따른 나무의 수분율 변화를 보여주고 있다.

나무의 초기 수분율이 10%, 15%, 그리고 20%인 경우 모두 나무의 온도가 500K에 거의 다다른 25초 전후부터 서서히 감소함을 보이고 있다. 20초 이후에는 나무의 온도가 매우 높아짐에 따라 나무의 수분율이 급격하게 감소하기 시작한다. 시간이 지남에 따라 나무의 초기 수분율이 10%인 경우에는 약 160초 정도에 나무의 수분율이 0%에 도달하게 되고, 나무의 초기 수분율이 15%인 경우에는 약 180초 정도에 수분율이 0%에 도달하게 된다. 그리고 나무의 초기 수분율이 20%인 경우에는 거의 200초의 시간이 경과했을 때 나무의 수분율이 0%까지 감소하게 된다.

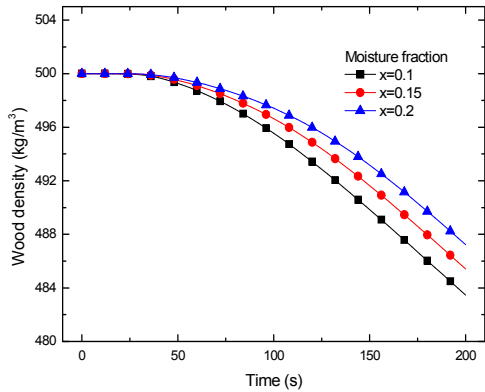


Fig. 8 The wood density changes with moisture in the wood

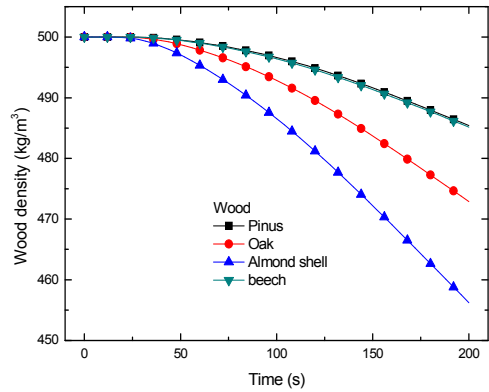


Fig. 10 The wood density changes with wood species

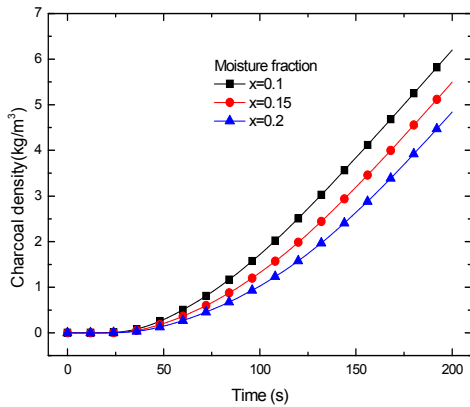


Fig. 9 The charcoal density changes with moisture in the wood

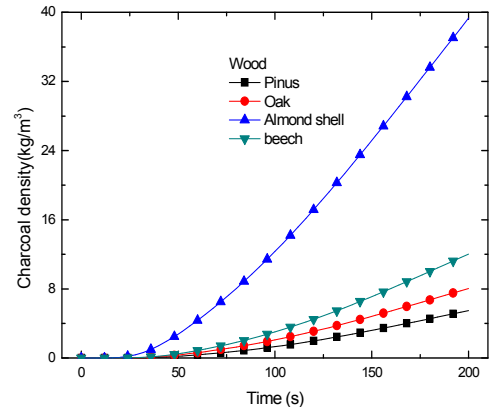


Fig. 11 The charcoal density changes with wood species

Fig. 8은 나무(pinus)의 초기 온도가 300K, 반탄화 온도가 573K이고, 초기 수분율이 각각 10%, 15%, 그리고 20%일 때, 시간에 따른 나무의 밀도 변화를 보여주고 있다.

나무의 초기 수분율이 10%, 15%, 그리고 20%인 경우 모두 나무의 온도가 500K에 거의 다다른 25초 전후부터 서서히 감소함을 보이고 있다. 25초 이후에는 나무의 온도가 매우 높아짐에 따라 나무의 밀도가 서서히 감소하기 시작하는데, 나무의 초기 수분율이 10%일 때, 나무의 초기 수분율이 15%, 그리고 20%인 경우에 비해 더 빠르게 나무의 밀도가 감소함을 보이고 있다. 마찬가지로 나무의 초기 수분율이 15%인 경우에는 나무의 초기 수분율이 20%인 경우보다 더 빠르게 나무의 밀도가 감소함을 보인다. Fig. 9는 나무(pinus)의 초기 온도가 300K, 반탄화 온도가 573K이고, 초기 수분율이 각각 10%, 15%, 그리고 20%일 때, 시간에 따른 숯의 밀도 변화를 보여주고 있다.

나무의 초기 수분율이 10%, 15%, 그리고 20%인 경우 모두 나무의 온도가 거의 500K에 다다른 25초 전후부터 서서히 증가하고 있다. 이때부터, 나무의 높은 온도에 의해 나무의 열분해 현상에 의해 숯이 생성되기 시작한다. 약 25초 이후에는 매우 높은 나무의 온도에 의해 숯의 밀도가 서서히 증가하게 되고, 시간이 경과함에 따라 나무의 초기 수분율이 10%일 때, 나무의 초기 수분율이 15%, 그리고 20%인 경우에 비해 더 빠르게 숯의 밀도가 증가함을 보이고 있다. 마찬가지로 나무의 초기 수분율이 15%인 경우에는 나무의 초기 수분율이 20%인 경우보다 더 빠르게 숯의 밀도가 증가함을 보인다.

3.4 나무 종류에 따른 영향

Fig. 10은 나무의 초기 온도는 300K, 반탄화 온도가 573K, 나무의 초기 수분율이 15%, 그리고 나무종류가 피너스(pinus), 오크(oak), 아몬드셸(almond shell), 그리고 비치(beech)일 때, 시간에

다른 나무의 밀도 변화를 보여주고 있다. 이때, 나무의 종류에 따른 밀도 변화를 확인하기 위하여 나무의 초기 밀도는 500kg/m^3 으로 모두 같게 하였다.

Figs. 2와 4에서 나타낸 피너스의 결과와 같이 다른 종류의 나무들도 25초 전후부터 서서히 나무의 밀도 변화를 보여주고 있다. 이 때 부터, 나무의 높은 온도에 의해 열분해 현상이 발생하게 되어 나무는 각각 타르, 가스, 그리고 숯으로 분해된다. 약 25초 이후에는 매우 높은 나무의 온도에 의해 나무의 밀도가 서서히 감소하게 된다. 아몬드셸과 오크의 경우 매우 많은 밀도 변화를 보여주고 있으므로 많은 양의 가스, 타르, 그리고 숯이 생성될 것이다. 그리고 피너스와 비치는 매우 적은 밀도 변화를 보여주고 있으므로 아몬드셸과 오크에 비해 적은 양의 가스, 타르, 그리고 숯이 생성될 것이다.

Fig. 11은 나무의 초기 온도는 300K, 반탄화 온도가 573K, 나무의 초기 수분율이 15%, 그리고 나무 종류가 피너스, 오크, 아몬드셸, 그리고 비치일 때, 시간에 따른 숯의 밀도 변화를 보여주고 있다.

Figs. 2와 4에 나타낸 피너스의 결과와 같이 다른 종류의 나무들도 25초 전후부터 서서히 숯의 밀도 변화를 보여주고 있다. 이 때 부터, 나무의 높은 온도에 의해 열분해 현상이 발생하게 되어 나무는 각각 타르, 가스, 그리고 숯으로 분해된다. 약 25초 이후에는 매우 높은 나무의 온도에 의해 나무가 분해되어 숯이 생성되고, 따라서 숯의 밀도가 서서히 증가함을 보인다. 시간이 지남에 따라 아몬드셸의 경우에는 매우 많은 양의 숯이 생성됨을 확인할 수 있다. 비치, 오크, 그리고 피너스는 각각 언급한 순서대로 많은 양의 숯이 생성되지만, 아몬드셸에 비해 매우 적은 양의 숯이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 반탄화 기술과 관련하여 에너지 효율에 큰 영향을 미치는 수분증발을 모델링하기 위해 one-stage, multi-reaction model을 이용하였다. 그리고 weight loss kinetics를 적용한 목재의 증량 감소, 그리고 목재의 열분해 해석 모델을 제시하였다. 또한 주위 환경변화에 따른 바이오매스 연료의 변화특성을 분석하기 위하여 반탄화 온도,

수분율, 그리고 바이오매스 종류에 따른 특성을 해석하였고 주요결과는 다음과 같다.

(1) 반탄화 온도가 상승함에 따라 나무의 온도 및 수분율은 각각 빠르게 상승 및 감소한다.

(2) 반탄화 온도가 일정 온도 이하인 경우에는 나무의 수분율이 거의 감소하지 않고, 온도가 매우 높은 경우에는 나무의 밀도가 급격하게 감소한다. 또한, 숯은 반탄화 온도가 매우 높은 경우에 급격히 생성된다.

(3) 나무의 초기 수분율이 낮을수록 나무의 온도 변화가 더 빠르며 수분율은 0%까지 감소한다.

(4) 나무의 초기 수분율이 높을수록 시간이 지남에 따라 나무의 밀도는 더 천천히 감소하며 숯은 더 느리게 생성된다.

(5) 피너스와 비치의 경우, 시간이 지남에 따라 나무의 밀도가 제일 적게 감소한다.

(6) 아몬드셸이 다른 종류에 비해 시간이 지남에 따라 숯이 제일 많이 생성된다.

후 기

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원 및 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업 연구의 지원에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Blasi, C., 1993, "Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-charring Solid Fuels," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, No. 5, pp. 71~104.
- (2) Blasi, C., 1996, "Heat, Momentum and Mass Transport Through a Shrinking Biomass Particle Exposed to Thermal Radiation," *Chemical Engineering Science*, Vol. 51, No. 7, pp. 1121~1132.
- (3) Babu, B. V. and Chaurasia, A. S., 2004, "Pyrolysis of Biomass: Improved Models for Simultaneous Kinetics and Transport of Heat, Mass and Momentum," *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, Nos. 9-10, pp. 1297~1327.
- (4) Prins, M. J., Ptasinski, K. J. and Janssen, F. J.

- J. G., 2006, "Torrefaction of Wood. Part 1: Weight Loss Kinetics," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 77, No. 1, pp. 28~34.
- (5) Turner, I., Rousset, P., Rémond, R. and Perré, P., 2010, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Thermal Treatment of Wood (*Fagus Sylvatica* L.) in the Range 200-260°C," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 4, pp. 715~725.
- (6) Chan, W. C. R., Kelbon, M. and Krieger, B. B., 1985, "Modelling and Experimental Verification of Physical and Chemical Processes During Pyrolysis of a Large Biomass Particle," *Fuel*, Vol. 64, No. 11, pp. 1505~1513.
- (7) Felfli, F. F., Soler, P. B. and Rocha, J. D., 2004, "Mathematical Modelling of Wood and Briquettes Torrefaction," *Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas, Spain, October 19-21.
- (8) Thurner, F. and Mann, U., 1981, "Kinetic Investigation of Wood Pyrolysis," *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 20, No. 3, pp. 482~488.
- (9) Jalan, R. K. and Srivastava, V. K., 1999, "Studies on Pyrolysis of a Single Biomass Cylindrical Pellet-Kinetics and Heat Transfer Effects," *Energy Conversion & Management*, Vol. 40, No. 5, pp. 467~494.
- (10) Pyle, D. L. and Zaror, C. A., 1984, "Heat Transfer and Kinetics in the Low Temperature Pyrolysis of Solids," *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, No. 1, pp. 147~158.