난연처리된 목재의 연소속도에 관한 연구

박 형 주
호원대학교 소방행정학부
(2007. 10. 4. 접수 / 2007. 12. 5. 채택)

A Study on the Burning Rate of Fire Retardant Treated Wood

Hyung-Ju Park
Division of Fire Service Administration, Howon University
(Received October 4, 2007 / Accepted December 5, 2007)

Abstract : The purpose of this study was to examines the burning rate of fire retardant treated wood in the cone heater with a one-dimensional integral model. The wood samples used in this study were four species. The species of woods are Redwood, White oak, Douglas fir and Maple. Each sample was nominally 50mm thick and 100mm square. Samples were exposed to a range of incident heat fluxes 10 to 35kW/m^2 using the cone heater. A one-dimension integral model has been used to predict burning rate, heat of gasification, flame heat fluxes, charring rate and char depth of samples. As a result measurement of mass loss rate, softwoods(Redwood and Douglas fir) has relatively low value than those for hardwoods(White oak and Maple). Average charring rate of woods in case of fire retardant treatment showed reduction effect of 41.29%, 50.00%, 48.18% and 60.82% for Redwood, Douglas fir, White fir and Maple, respectively. Almost all the predictions from integral model showd faster charring than those measured. Average difference between predictions and experimental data was 16%, 9.5% and 11.8% for N, F1 and F2 respectively. Water-soluble fire retardant used in this study find out more effect in hardwood than softwood from the result of measurement of mass loss rate and average charring rate.
Key Words : fire retardant treated wood, burning rate, charring rate, char fraction, char depth, cone heater

1. 서 론

현재 일반 가정주택에서부터 주거용 및 중형 건축물에 이르기 까지 건축 재료로서 주로 널리 사용되고 있는 목재는 미적인 외관과 우수한 물리·화학적인 성질을 가지고 있으나 다른 건축 재료들에 비해 화재 안전적인 측면에서 많은 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 화재시 가연성물질인 목재는 열과 고온의 공기에 노출되었을 때 연소함으로써 인적피해 뿐만 아니라 목조 건축물의 붕괴 및 도괴의 위험성을 항상 내포하고 있다[1]. 따라서 이와 같은 목재의 문제점을 보완하기 위해 국내외적으로 화재성능을 기반으로 한 법등을 제정·시행하고 있으며 화재시 목재의 연소속도를 예측하기 위해 많은 연구들이 활발히 진행되고, 가연성인 목재의 문제점을 보완하기 위해 난연성 물질을 가입식과 침지식의 주입방법과 코팅의 방식으로 난연화 시키고 있다. 이와 같이 난연화 처리된 목재는 초기 점화지연과 점화 후 열방출속도와 화염전파 속도 등이 감소하는 경향을 나타내고 있다[2,3].

연소속도를 예측하기 위한 능력은 건물설계시 화재안전공학이 성능기반 접근법의 방향으로 변화함으로써 더욱 중요시 되고 있는데, 현재까지 개발된 대표적인 연소속도 관련 모델을 고찰해 보면 다음과 같다. 고체물질의 연소속도에 대한 다양한 모델들은 charring과 non-charring 물질에 대해 개발되어 왔다. Charring 물질에 대해서는 Delichatsios와 de Ris의 charring 물질의 열분해에 대한 분석적 모델[4]과 Chen 외의 charring 물질의 1차원 과도 열분해에 대한 적분모델[5] 그리고 Wichman과 Atreya에 의한 charring 물질의 열분해에 대한 단순모델[6]이 있으며, non-charring 물질에 대한 모델은 Chen 외의 non-charring 물질의 1차원 과도 열분해에 대한 적분모델[5] 등이 있다. 또한, 젖은 목재의 열분해에 대한 3

* To whom correspondence should be addressed.
sandelf@howon.ac.kr

차원적인 수학적 모델을 제시한 Yuen 외[7]와 목재의 연소시 열방출율의 예측 모델을 제시한 Parker[8] 등이 있다. 이들 모델들은 순수한 열전도 모델들을 이용하여 점화와 연소 과정을 단순화 처리한 것에서부터 charring 물질의 열분해에 대한 복잡한 화학적인 동역학을 적용하여 모델화 시킨 것이다. 그러나 대부분의 모델들이 갖는 문제점은 복잡한 계산 코드로 구성되어 있으며, 정확한 예측을 하기 위해서는 상대적으로 수많은 물질의 특성들을 필요로 한다는 것과 일반적인 화재 위험 모델들과의 호환이 어려우며 수많은 물질 특성들에 대한 측정이 어렵다는 것이다[9]. 본 연구에서 사용된 모델은 Quintiere에 의해 처음으로 제안된 적분모델로 charring process, vaporization, flame과 heat conduction effect를 포함하는 1차원 열분해 모델[10]이다. 또한 이 모델은 적분 방법을 이용하여 preheating과 gasification 단계 동안 1차원 불안정한 열전달 방정식을 풀기위해 Quintiere와 Iqbal[11]에 의해 개발되었다.

따라서 본 연구의 목적은 cone heater를 이용하여 난연 처리된 목재에 대한 탄화분율(char fraction), 연소속도(burning rate), 탄화속도와 탄화깊이(charring rate and char depth)를 측정하고 연소속도 모델을 이용하여 평가하기 위한 것이다. 본 연구에서 사용된 난연제는 자체 배합한 수용성 난연제로 목재를 침지 방법으로 난연화 처리하였으며, 난연제의 주성분은 Monoammonium phosphate, Sodium borate, Zinc borate이다. 연소속도 모델에 사용된 밀도, 비열, 열전도도, 탄화깊이, 착화온도, 기화열 등과 같은 많은 특성들은 관련문헌의 자료를 참고하거나 시험을 통해 직접 측정한 값을 사용하였다.

2. 이론적 배경

탄화성 물질(charring material)이 연소할 때, 분해는 Fig. 1에 묘사한 것과 같이 char layer, pyrolysis front, virgin wood의 3개의 영역으로 구분할 수 있다[12,13].

이 열분해 모델의 가정은 다음과 같다.

1) 미연소 목재(virgin wood)는 착화와 분해할 때까지 비활성이다.

2) 고정된 증발온도에서 연료는 가스상의 연료로 분해하고 탄화는 열분해 전면에서 미소하게 발생한다.

3) 탄화물질은 점화 후에 발생하고 분해는 비활성이다.

4) 시료는 무한히 두껍다.

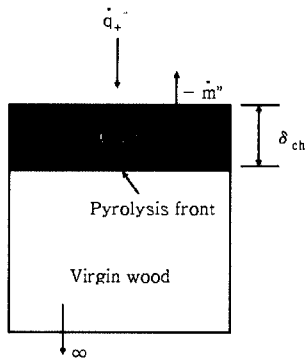

Fig. 1. The physical configuration of the decomposition model.

5) 화염으로부터 발생되는 열 유속은 일정하다.

6) 모든 물질 특성들은 일정하다.

7) 연소할 때 발생된 휘발성가스들은 탄화층 내에서 축적되지 않고 즉시 소모된다.

화염으로부터 방출되는 열 유속은 연료의 질량 공급율의 연소속도와 직접적으로 연결 지을 수 있다. 따라서 착화 전후의 순 표면 열 유속(net surface heat flux)은 식 (1)과 (2) 같이 나타낼 수 있다.

점화 직전의 온도가 $t = t_{ig}^-$일 때,

$$\dot{q}''(t_{ig}^-) = \dot{q}''_- = \dot{q}''_i - \sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) - h_c(T_{ig} - T_0) \qquad (1)$$

점화 직후의 온도가 $t = t_{ig}^+$일 때

$$\dot{q}''(t_{ig}^+) = \dot{q}''_+ = \dot{q}''_{fl} + \dot{q}''_i - \sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) \qquad (2)$$

분해의 3개 영역은 Fig. 2에 묘사한 것과 같이 연소속도 모델의 지배체적(control volume)으로 고려할 수 있다. 각 영역에 대한 질량과 에너지보존 그리고 온도 프로필을 고려한다.

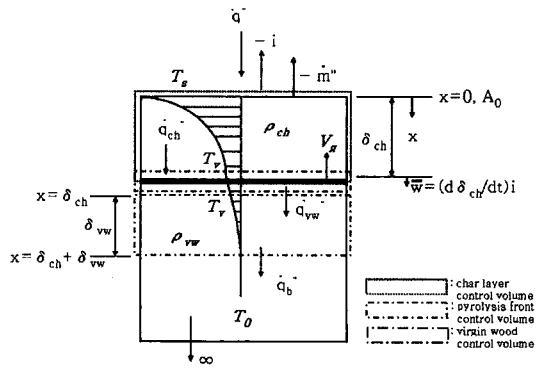

Fig. 2. Burning rate model control volumes.

2.1. 탄화층(char layer)

$$\dot{q}''_{ch} = -(k_{ch}\frac{\partial T}{\partial x})_{x=\delta_{ch}} \tag{3}$$

탄화층에 대한 온도 프로필은 깊이와 비례하는 선형함수라고 가정하고 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

1) $x=0$일 때 $T=T_s$

2) $x=\delta_{ch}$일 때 $T=T_v$

$$\frac{T-T_v}{T_s-T_v}=(1-\frac{x}{\delta_{ch}}) \tag{4}$$

따라서 식 (4)을 미분하여 식 (3)에 대입하면 식 (5)가 되며,

$$\dot{q}''_{ch} = \frac{k_{ch}(T_s-T_v)}{\delta_{ch}} \tag{5}$$

탄화층 지배체적에 대한 질량과 에너지 보존방정식은 식 (6), (7)과 같다.

$$\dot{m}'' = \rho_g c_g \tag{6}$$

$$\dot{q}''_{+}(T_s)-\dot{q}''_{ch} = \rho_{ch}c_{ch}\frac{d}{dt}\int_0^{\delta_{ch}}(T-T_v)dx+\dot{m}''c_g(T_s-T_v) \tag{7}$$

식 (4)을 적분한 후, 식 (5)와 함께 식 (7)에 대입하면 식 (8)이 된다.

$$\dot{q}''_{+}(T_s)-\frac{k_{ch}(T_s-T_v)}{\delta_{ch}} = \frac{\rho_{ch}c_{ch}}{2}\frac{d}{dt}(T_s-T_v)\delta_{ch}+\dot{m}''c_g(T_s-T_v) \tag{8}$$

2.2. 미연소 목재(virgin wood)

$$\dot{q}''_{vw} = -(k_{vw}\frac{\partial T}{\partial x'})_{x'=0} \tag{9}$$

미연소 목재에 대한 온도 프로필은 깊이와 관련된 몇 개의 함수라 가정하고, 다음과 같은 경계조건들을 만족한다.

1) $x'=0$일 때, $T=T_v$

2) $x'=\delta_{vw}$일 때, $T=T_0$

3) $x'=\delta_{vw}$일 때, $\frac{\partial T}{\partial x}=0$

$$\frac{T-T_0}{T_v-T_0}=(1-\frac{x'}{\delta_{vw}})^2 \tag{10}$$

따라서 식 (8)을 미분하여 식 (9)에 대입하면 식 (11)이 되며,

$$\dot{q}''_{vw} = \frac{2k_{vw}(T_v-T_0)}{\delta_{vw}} \tag{11}$$

미연소 목재 지배 체적에 대한 에너지 보존 방정식은 식 (12)와 같다.

$$\dot{q}''_{vw} = \rho_{vw}c_{vw}\frac{d}{dt}\int_0^{\delta_{vw}}[T(x',t)-T_0]dx'+\rho_{vw}c_{vw}\frac{d\delta_{ch}}{dt}(T_v-T_0) \tag{12}$$

미연소 목재에 대한 온도 프로필로부터 시간 t와 x'에서

$$\int_0^{\delta_{vw}}[T(x',t)-T_0]dx'=\frac{(T_v-T_0)}{3}\delta_{vw} \tag{13}$$

식 (9), (13) 그리고 (15)를 식 (13)에 대입하고, $\rho_{vw}c_{vw}(T_v-T_0)$에 의해 나누면 식 (14)가 된다.

$$\frac{1}{3}\frac{d\delta_{vw}}{dt}+\frac{\dot{m}''}{\rho_{vw}(1-f_{ch})}=\frac{2}{\delta_{vw}}\frac{k_{vw}}{\rho_{vw}c_{vw}} \tag{14}$$

2.3. 열분해 전면(pyrolysis front)

열분해 전면 지배체적에 대한 질량과 에너지 보존 방정식은 식 (15), (16)과 같다.

$$\dot{m}'' = (\rho_{vw}-\rho_{ch})\frac{d\delta_{ch}}{dt} \tag{15}$$

$$\dot{q}''_{ch}-\dot{q}''_{vw} = \rho_{vw}\frac{d\delta_{ch}}{dt}[\Delta H_v] \tag{16}$$

$\Delta H_v = h_g(T_v)-h_{vw}(T_v)-\frac{\rho_{ch}}{\rho_{vw}}h_g(T_v)-h_{ch}(T_v)$인

경우, 탄화분율(char fraction) : $f_{ch} \equiv \frac{\rho_{ch}}{\rho_{vw}}$을 식 (15)에 대입하면 식 (17)이 되며,

$$\dot{m}'' = \rho_{vw}(1-f_{ch})\frac{d\delta_{ch}}{dt} \tag{17}$$

식 (11)과 (5)를 식 (16)에 대입하면 식 (18)이 된다.

$$\frac{1}{\Delta H_v}\left(\frac{k_{ch}(T_s-T_v)}{\delta_{ch}} - \frac{2k_{vw}(T_v-T_0)}{\delta_{vw}}\right) = \rho_{vw}\frac{d\delta_{ch}}{dt} \tag{18}$$

식 (17)을 식 (18)에 대입하면 식 (19)가 되며,

$$\frac{\dot{m}''}{(1-f_{ch})}\Delta H_v = \frac{k_{ch}(T_s-T_v)}{\delta_{ch}} - \frac{2k_{vw}(T_v-T_0)}{\delta_{vw}} \tag{19}$$

연속속도 모델의 개발을 위해 식(8)과 (18)를 더한다.

점화 직후의 시간이 $t=t_{ig}^{+}$라고 간주하면 $T_s=T_v=T_{ig}$, $\dot{m}''=\dot{m}''_{ig}$, 그리고 $\delta_{vw}=\delta_{ig}$이 된다.

$$\dot{m}''_{ig} = \frac{(1-f_{ch})}{\Delta H_v}\left[\dot{q}''_{+} - \frac{2k_{vw}(T_{ig}-T_0)}{\delta_{ig}}\right] \tag{20}$$

점화온도 $T_v=T_{ig}$, $\delta_{vw}=\delta_{ig}$, $\dot{q}''_{vw}=\dot{q}''_{-}$라 가정하면 식(11)로 부터

$$\delta_{ig} = \frac{2k_{vw}(T_v-T_0)}{\dot{q}''_{-}} \tag{21}$$

식 (21)을 식 (20)에 대입하면 식 (22)가 되며,

$$\dot{m}''_{ig} = \frac{(1-f_{ch})}{\Delta H_v}\left[\dot{q}''_{+}(T_s) - \dot{q}''_{-}\right] \tag{22}$$

식 (1)과 (2)를 식 (22)에 대입하면 식 (23)이 된다.

$$\dot{m}''_{ig} = \frac{(1-f_{ch})}{\Delta H_v}\left[\dot{q}''_{fl} + h_c(T_{ig}-T_0)\right] \tag{23}$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 목재는 Redwood, White oak, Douglas fir, Maple로 원목에서 100mm × 100mm × 50mm의 크기로 절단 후 45℃의 건조기에서 168h 동안 건조하여 사용하였으며, 배합된 수용성 난연제에 시료를 60℃에서 24h 동안 함침 시킨 후 55℃의 건조기에서 168h 동안 건조하여 사용하였다. 외부 복사열원에 대한 시료의 탄화분율, 연소속도, 탄화속도와 탄화깊이를 측정하기 위해 각 복사열원의 단계별로 난연처리된 목재와 비처리된 목재를 각각 3개씩 사용하였다.

목재의 난연화 처리에 사용된 수용성 난연제는 Table 1에 나타낸 것과 같이 Monoammonium phosphate, Sodium borate, Zinc borate를 이용하여 배합하고 실온에서 186h 동안 안정화시킨 수용성 난연제에 목재를 함침 처리하는 방법을 택하였다. 난연화 처리된 목재와 비처리된 목재의 평균밀도와 수분 함량은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Compositions of water-soluble flame retardants

	Composition(wt %)	
	F1	F2
Water	91.36	85.60
NaOH	1.20	2.00
$(NH_4)H_2PO_4$	3.47	5.76
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	3.80	6.37
$2ZnO_3 \cdot B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$	0.17	0.27
Total	100	100

Table 2. The average density and moisture content

Species		Density(kg/m^3)	Moisture content(%)
Redwood	R-N	343	4.69
	R-F1	351	4.83
	R-F2	357	4.84
White oak	W-N	656	4.45
	W-F1	672	4.62
	W-F2	728	4.65
Douglas fir	D-N	472	4.52
	D-F1	481	4.81
	D-F2	473	4.77
Maple	M-N	511	4.35
	M-F1	513	4.57
	M-F2	516	4.54

Note) R : Redwood, W : White oak, D : Douglas fir, M : Maple, F* : Flame retardant treated

3.2. 실험장치

3.2.1. Cone heater 및 온도조절장치

일정한 Heat flux(10~35kW/m^2)를 공급하기위해

ASTM E 1354 6.2항(Conical heater)과 6.3항(Temperature controller)을 만족하는 cone type의 heater와 온도 조절장치를 제작하여 사용하였다. Cone heater의 온도는 코일내에 위치한 3개의 열전대에 의해 측정되며, 실험하는 동안 시료표면에 대한 일정한 복사열원을 유지하기 위해 코일의 온도는 온도조절장치에 의해 설정온도의 ±2℃로 유지된다.

3.2.2. Heat flux sensor

Cone heater로부터 방출되는 Heat flux을 측정하기 위해 Medtherm 사의 digital heat flux meter(Model 5H203-DR1)와 heat flux sensor(측정범위 : 0~100 kW/m^2)를 사용하였다. heat flux sensor의 위치는 cone heater의 하부로부터 2.54cm(1inch)로 온도조절장치에 의해 cone heater가 설정온도에 도달 후 30분 이상 연속 측정 하였다.

3.3. 실험방법

Cone heater 온도 조절장치를 이용하여 설정온도까지 상승 시킨 후 설정온도에서 방출되는 복사열량을 Medtherm 사의 digital heat flux meter(Model 5H203-DR1)와 heat flux sensor를 이용하여 측정한다. Cone heater로부터 방출되는 복사열량이 일정해지면 100mm × 100mm × 50mm 크기의 시료를 cone heater 하부로부터 25.4mm(1 inch)의 위치에 놓고 시료 표면의 온도변화를 30분 동안 매 1초 간격으로 주)삼부시스템의 MultiScan/1200^{TM}을 이용하여 측정하였다. 점화는 cone heater의 하부와 시료 상부의 중간인 0.5 inch 지점의 시료 끝 부분에 설치된 pilot flame을 이용하여 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1. 탄화분율(char fraction)

적분모델을 이용하여 연소속도를 예측하기 위해서는 탄화분율을 계산하거나 측정하여야 한다. 본 연구에서 각 시료에 대한 탄화분율은 식 (24)[14]을 이용하여 계산하였다. 각 시편에 대한 계산된 평균 밀도와 탄화분율은 Table 3에 나타내었다.

$$f_{ch} = \frac{1}{\rho_{vw}}\left[\frac{m_f - \rho_{vw,i} A_f (h_f - h_{ch})}{A_f h_{ch}}\right] \tag{24}$$

4.2. 연소속도(burning rate)

착화 직후의 순 표면 열 유속에서 주위 온도 분포가 낮기 때문에 이를 무시하면 식 (2)는 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}''_{+} = \dot{q}''_{fl} + \dot{q}''_{i} - \sigma T_s^4 \tag{25}$$

정상상태 연소속도를 갖는 물질의 경우를 고려해 보면, 식 (8)과 식 (19)로 부터

$$\frac{\rho_{ch} c_{ch}}{2}\left[\frac{d}{dt}T_s - \frac{d}{dt}T_v\right]\delta_{ch} + \dot{m}'' c_g (T_s - T_v) + \frac{\dot{m}''}{(1-f_{ch})}[\triangle H_v]$$

$$= \dot{q}''_{+}(T_s) - \frac{2k_{vw}(T_v - T_0)}{\delta_{vw}} \tag{26}$$

이 되며, $T_s = T_v$, $\delta_{vw} = \delta_s$ 그리고 $\dot{m}'' = \dot{m}''_{steady}$이라 가정하면 식 (26)은 식 (27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\dot{m}''_{steady}}{(1-f_{ch})}[\triangle H_v] = \dot{q}''_{+}(T_v) - \frac{2k_{vw}(T_v - T_0)}{\delta_s} \tag{27}$$

Table 3. Measured average char fractions and density of samples

Heat flux (kW/m^2)		Type					
		N		F1		F2	
		Density (kg/m^3)	Char fraction (-)	Density (kg/m^3)	Char fraction (-)	Density (kg/m^3)	Char fraction (-)
R	10	319.6	0.530	-	-	-	-
	15	352.5	0.440	344.1	0.200	369.9	0.260
	20	340.0	0.360	353.5	0.170	363.0	0.240
	25	347.1	0.420	358.7	0.280	354.1	0.290
	35	352.4	0.450	345.6	0.160	340.8	0.290
W	10	617.0	0.530	-	-	-	-
	15	673.7	0.380	659.3	0.180	716.7	0.260
	20	657.5	0.330	659.6	0.270	721.0	0.260
	25	635.3	0.410	673.5	0.270	684.1	0.270
	35	668.5	0.500	711.0	0.310	785.0	0.310
D	10	502.0	0.410	-	-	-	-
	15	473.7	0.480	475.7	0.250	472.7	0.180
	20	495.9	0.510	483.0	0.330	470.7	0.250
	25	467.0	0.570	486.4	0.350	478.7	0.290
	35	448.0	0.570	476.7	0.360	468.3	0.400
M	10	514.6	0.530	-	-	-	-
	15	531.3	0.430	513.5	0.310	517.4	0.240
	20	508.4	0.470	524.9	0.300	523.3	0.320
	25	516.9	0.500	500.8	0.320	524.2	0.290
	35	491.3	0.600	512.4	0.330	491.4	0.370

Note) R : Redwood, W : White oak, D : Douglas fir, M : Maple

식 (27)의 양변에 c_{vw}을 곱하고, $L \equiv \Delta H_v + c_{vw}(T_v - T_0)$이라는 정의로부터 식 (27)은 식 (28)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\dot{m}''_{steady}}{(1-f_{ch})} = \frac{\dot{q}''_{+}(T_v)}{\Delta H_v} - \frac{2k_{vw}L}{\delta_s c_{vw}\Delta H_v} + \frac{2k_{vw}}{\delta_s c_{vw}} \tag{28}$$

식 (28)에서 $\delta_s \equiv \frac{2k_{vw}L}{c_{vw}\dot{q}''_{+}(T_v)}$이고, $T_v = T_s$이라면 정상 질량손실속도는 식 (29)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}''_{steady} = \frac{(1-f_{ch})\dot{q}''_{+}(T_s)}{L} \tag{29}$$

식 (29)와 식 (25)을 결합시키면 식 (30)이 된다.

$$\frac{\dot{m}''_{steady}L}{(1-f_{ch})} = \dot{q}''_{fl} + \dot{q}''_{i} - \sigma T_s^4 \tag{30}$$

입사 열 유속과 정상 질량손실속도의 점들로부터 선형 회귀선을 이용하면, 기울기는 다음의 식 (31)과 같이 표현할 수 있다.

$$slope = \frac{(1-f_{ch})}{L} = \frac{\Delta\dot{m}''_{steady}}{\Delta\dot{q}''_{i}} \tag{31}$$

따라서 기화열은 식 (32)가 된다.

$$L = \frac{(1-f_{ch})}{slope} \tag{32}$$

또한, 가장 적합한 선의 절편에 대한 값 즉, 입사 열 유속이 $\dot{q}''_{i} = 0$이면 식 (30)은 식 (33)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{m}''_{steady} = intercept = \frac{(1-f_{ch})}{L}(\dot{q}''_{fl} - \sigma T_s^4) \tag{33}$$

식 (33)의 재배열을 통해 유도된 식 (34)을 이용하여 화염 열 유속을 계산할 수 있다.

$$\dot{q}''_{fl} = \frac{intercept \quad L}{(1-f_{ch})} + \sigma T_s^4 \tag{34}$$

표면온도 T_s는 점화온도 T_{ig}와 같다라고 가정한다.

Fig. 3~7은 cone heater에서 측정된 각 시료에 대한 입사 열 유속과 측정된 정상 질량손실속도의 그래프를 나타낸 것이다. Table 4와 5는 이들로부터 식 (32)와 식 (34)을 이용하여 계산된 화염 열 유속과 기화열을 나타내었다.

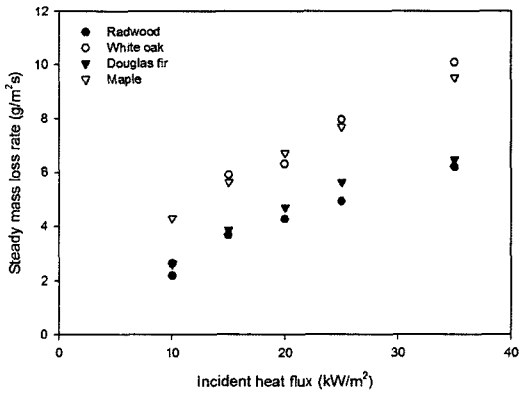

Fig. 3. Steady mass loss rate as a function of incident heat flux for woods.

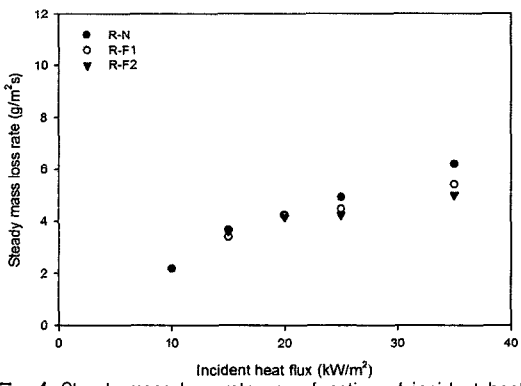

Fig. 4. Steady mass loss rate as a function of incident heat flux for Redwood.

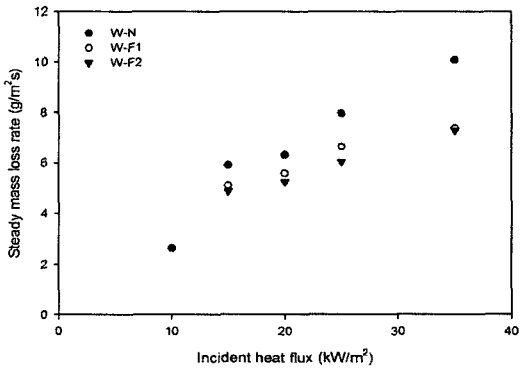

Fig. 5. Steady mass loss rate as a function of incident heat flux for White oak.

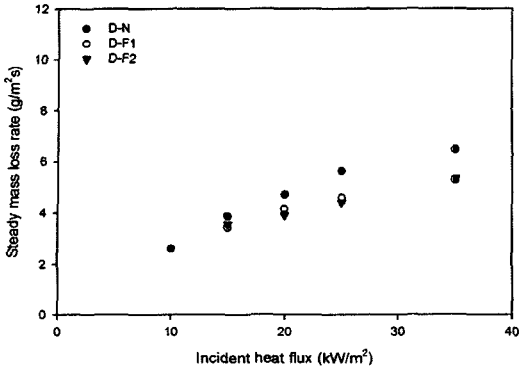

Fig. 6. Steady mass loss rate as a function of incident heat flux for Douglas fir.

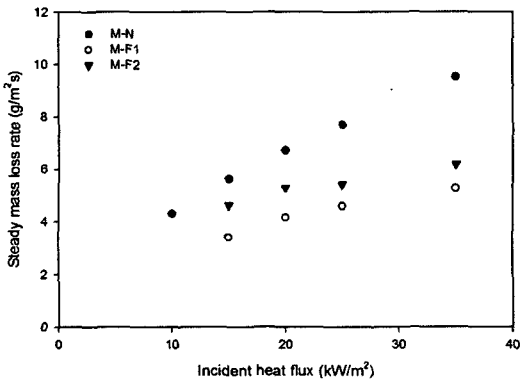

Fig. 7. Steady mass loss rate as a function of incident heat flux for Maple.

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 Redwood, White oak, Douglas fir, Maple의 외부 복사열원에 따른 정상 질량손실 속도를 나타낸 그래프로 복사열원이 증가할수록 질량손실 속도 또한 증가함을 할 수 있었으며, 연질목재인 Redwood와 Douglas fir가 경질목재인 white oak, Maple에 비해 질량손실 속도가 낮음을 알 수 있었다. 이를 통해 연질목재보다 경질 목재에서 연소가 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Calculated flame heat fluxes from steady mass loss rate

Species	Type		
	N	F1	F2
	flame heat flux (kW/m^2)	flame heat flux (kW/m^2)	flame heat flux (kW/m^2)
R	23.85	45.66	45.02
W	9.75	38.69	22.49
D	32.04	42.04	64.00
M	30.55	38.76	49.95

Note) R : Redwood, W : White oak, D : Douglas fir, M : Maple

Table 5. Calculated heats of gasification from steady mass loss rate

Heat flux (kW/m^2)		Type		
		N	F1	F2
		gasification heat (kJ/g)	gasification heat (kJ/g)	gasification heat (kJ/g)
R	15	4.66	10.20	9.34
	20	5.32	10.58	9.59
	25	4.82	9.18	8.96
	35	4.57	10.71	8.96
W	15	1.95	6.79	4.14
	20	2.10	6.04	4.14
	25	1.85	6.04	4.08
	35	1.57	5.63	3.86
D	15	4.78	8.93	4.06
	20	4.50	7.98	12.86
	25	3.95	7.74	12.18
	35	3.95	7.62	10.29
M	15	3.61	8.19	8.68
	20	3.35	8.31	7.77
	25	3.16	8.07	8.11
	35	2.53	7.95	7.20

Note) R : Redwood, W : White oak, D : Douglas fir, M : Maple

Fig. 4~7은 난연처리된 목재와 일반 목재에 대한 외부 복사열원의 변화에 따른 정상 질량손실 속도를 나타낸 그래프로 목재를 난연처리 함으로써 질량손실 속도가 감소하였으며, 연질목재보다는 경질목재에서 질량손실 속도의 감소가 큰 것을 알 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 사용된 수용성 난연 배합은 연질목재보다는 경질목재에서 더 효과적임을 알 수 있다.

4.3. 탄화속도와 탄화깊이(charring rate and char depth)

식 (36)을 이용하여 탄화깊이를 계산하였으며, 각 시험의 종료 후에 측정된 탄화깊이와 비교하였다.

Table 6은 탄화분율과 질량손실속도를 이용하여 계산된 평균 탄화속도를 나타낸 것으로 연질목재인 Redwood와 Douglas fir에서 각각 41.29%와 50.00%, 경질목재인 White oak와 Maple에서 각각 48.18%와 60.82%의 탄화속도의 저감 효과가 나타났다. 따라서 탄화속도에 있어서도 질량손실 속도의 측정결과와 같이 본 연구에서 사용된 수용성 난연 배합은 연질목재보다는 경질목재에서 더 효과적임을 재확인할 수 있었다.

Table 6. Average charring rate calculated using the mass loss rate and char fraction

Species	Type		
	N	F1	F2
	charring rate (mm/min)	charring rate (mm/min)	charring rate (mm/min)
R	1.32	0.76	0.79
W	1.10	0.60	0.54
D	1.29	0.66	0.63
M	1.71	0.60	0.74

식 (36)으로부터 계산된 거의 모든 탄화깊이는 시험 종료 후 측정된 탄화깊이보다 더 큰 것으로 예측되었으며, 예측값과 실측값 사이의 평균 차이는 N의 경우 16%, F1의 경우 9.5%, F2의 경우 11.8%로 나타났다.

5. 결 론

난연성 수용액에 의해 난연 처리된 Redwood, White oak, Douglas fir, Maple에 대한 외부 복사열원의 변화에 따른 탄화분율, 연소속도, 탄화속도와 탄화깊이를 시험하고 연소속도 관련 적분모델을 이용하여 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 질량손실 속도의 측정을 통하여 연질목재인 Redwood와 Douglas fir가 경질목재인 White oak와 Maple에 비해 질량감소 속도가 낮음을 알 수 있었다.

2) 평균 탄화속도의 측정을 통하여 목재를 난연화 처리 할 경우, 연질목재인 Redwood와 Douglas fir에서 각각 41.29%와 50.00%, 경질목재인 White oak와 Maple에서 각각 48.18%와 60.82%의 탄화속도의 저감 효과가 나타났다.

3) 연소속도 관련 적분모델에 입사 열 유속과 측정된 질량손실속도의 그래프로부터 얻은 데이터를 적용하여 화염 열 유속과 기화열을 예측할 수 있었다.

4) 질량손실 속도와 평균 탄화속도를 측정한 결과 본 연구에서 사용된 수용성 난연 배합은 연질목재보다는 경질목재에서 더 효과적임을 알 수 있었다.

5) 적분모델을 이용하여 탄화깊이를 예측한 결과, 예측값과 실측값 사이의 평균 차이는 N의 경우 16%, F1의 경우 9.5%, F2의 경우 11.8%로 나타났다.

감사의 글 : 본 연구는 2007년 호원대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1) Ondrej Grexa, "Flame retardant treated wood products", The proceedings of Wood & Fire Safety (part one), pp. 101~110, 2000.
2) LeVan S. L., "Chemistry of fire retardancy", in Rowell, R(ed.) The chemistry of solid wood, Washington D. C., American Chemical Society, pp. 531~74, 1984.
3) Kozlowski R. and Helwig M., "Progress in flame retardancy and flammability testing", 1st int conf. Progress in Flame Retardancy and Flammability Testing, Poznan, Poland, Institute of Natural Fibres, 1995.
4) Delichatsios MA, de Ris L. "An analytical model for the pyrolysis of charring materials", Factory Mutual Technical Report, 1983.
5) Chen Y, Delichatsios MA, Motevalli V. "Material pyrolysis properties, Part 1 : An integral model for one-dimensional transient pyrolysis of charring and non-charring materials", Combust Sci Technol, Vol. 88, pp. 309~328, 1993.
6) Wichman IS, Atreya A. "A simplified model for the pyrolysis of charring materials", Combust Flame, Vol. 68, pp. 231~247, 1987.
7) Yuen R, Casey R, De Vahl Davis G, Leonardi E, Yeoh GH, Chandrasekaran V, Grebits SJ., "Three dimensional mathematical model for the pyrolysis of wet wood", In : Hasemi Y, deitor. Fire Safety Science. Proceedings Fifth International Symposium, Melbourne, Australia. Boston, MA:Intl Assoc for Fire Safety Science, pp. 189~200, 1997.
8) Parker WJ., "Prediction of the heat release rate of wood", Fire Safety Science - Proceedings of the First International Symposium, pp. 207~216, 1986.
9) Hyung-Ju Park, Hong Kim, Dong-Myeong Ha, "Predicting of Fire Characteristics of Flame Retardant Treated Douglas fir Using an Integral Model", Journal of the KOSOS, Vol. 20, No. 3, pp. 98~104, 2005.
10) Quintiere JG., "A semi-quantitative model for the burning rate of solid materials", NISTIR 4840, Gaithersburg, MD, 1992.
11) Quintiere JG. and Iqbal N., "Approximate integral model for the burning rate of a thermoplastics-like material", Fire Mater, Vol. 18, pp. 89~98, 1994.

12) Hyung-Ju Park, "The Analysis on Combustion Characteristics of Flame Retardant Treated Wood Using an Intergral Model", Hoseo Uni. PhD thesis, pp. 38~44, 2004.
13) Spearpoint M. J., Quintiere J. G., "Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model - effect of species, grain orientation and heat flux", Fire Safety journal, Vol. 36, pp. 391~415, 2001.
14) Hyung-Ju Park, Hyu-Hyung Oh, Eung-Sik Kim, Hong Kim, "A Study on Char Characteristics of Fire Retardant Treated Douglas Fir", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 19, No. 2, pp. 105~110, 2005.