

적분모델을 이용한 난연처리된 Douglas fir의 화재특성 예측

박형주[†] · 김 홍 · 하동명^{*}

호서대학교 안전시스템공학과 · ^{*}세명대학교 안전공학과
(2005. 5. 23. 접수 / 2005. 9. 14. 채택)

Predicting of Fire Characteristics of Flame Retardant Treated Douglas fir Using an Integral Model

Hyung-Ju Park[†] · Hong Kim · Dong-Myeong Ha^{*}

Department of Safety System Engineering, Hoseo University
^{*}Department of Safety Engineering, Semyung University
(Received May 23, 2005 / Accepted September 14, 2005)

Abstract : This study experimentally and theoretically examines the fire characteristics of 100- by 100- by 50-mm samples of flame retardant treated Douglas fir. Samples were exposed to a range of incident heat fluxes 10 to 50kW/m². The time to ignition measurements obtained from the cone heater were used to derive characteristic properties of the materials. A one-dimensional integral model has been used to predict the time to ignition, critical heat flux, and ignition temperature of samples. Ignition data and best-fit curves confirm $\dot{q}_i \rightarrow \dot{q}_{cr}$ then $t_{ig} \rightarrow \infty$ and when $\dot{q}_i \gg \dot{q}_{cr}$ then $t_{ig} \rightarrow 0$. And Ignition of flame retardant treated samples occurred not at incident heat flux of bellow 10kW/m². By a one-dimensional integral model, the critical heat flux of each samples was predicted 10.21kW/m², 11.82kW/m², and 14.16kW/m² for the D-N, D-F2, and D-F4, respectively. In ignition temperature of each samples, flame retardant treated samples were measured high about 50°C than non-treated samples. Water-soluble flame retardant used in this study finds out more effect in delay of time to ignition when incident heat flux is low than high.

Key Words : flame retardant, douglas fir, incident heat flux, time to ignition, critical heat flux, ignition temperature, one-dimensional integral model, cone heater

기호설명

T : Temperature [°C]
V : Volume [m³]
c : Specific heat [J/kg · K]
h : Convection heat transfer coefficient [W/m² · K], Hight [m]
q : Heat flux [W/m²]
t : Time [s]
 α : Thermal diffusivity [m²/s]
 $\alpha\beta$: Ratio of convective grain and radiative loss with incident heat flux [-]
k : Thermal conductivity [W/m · K]

ρ : Density [kg/m³]
 σ : Stefan-Boltzmann constant [W/m² · K]
 δ : Depth [m]
 ϵ : Flame emissivity [-]
o : Initial, Ambient
i : Incident, Initial
ig : Ignition
s : Surface, Steady
()" : Per unit area
(') : per unit time

1. 서 론

목재는 미적인 외관과 우수한 물리·화학적 성질을 갖고 있기 때문에 현재 일반 가정주택에서부터

[†]To whom correspondence should be addressed.
sandelf@naver.com

주거용 중형 건축물에 이르기 까지 건축 재료로서 주로 널리 사용되고 있으나 다른 건축 재료들에 비해 화재 안전측면에서 또한 많은 취약성을 가지고 있다. 주요한 취약성 중의 대표적인 것이 목재 자체의 가연성으로 화재시 열과 공기에 노출되었을 때, 연소함으로써 사람에게 많은 문제점을 일으키고 있다¹⁾. 따라서 이들 목재의 가연성에 대한 문제점을 보완하기 위해 국내외적으로 화재성능을 기반으로 한 범규 등을 제정·시행하고 있으며, 목재의 연소속도를 예측하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

목재의 가연성에 대한 문제점을 보완하기 위해 주로 사용되는 방법이 난연제를 이용한 난연화 처리이다. 난연화 처리 방법에는 대표적으로 주입식(가압식, 침지식)과 표면 코팅의 방식이 있으며, 난연 처리된 목재의 경우 점화가 지연되고, 점화 후 열방출속도와 화염전파 속도 등이 감소하는 경향을 나타낸다^{2,3)}.

오늘날 목재의 연소속도를 예측하기 위한 능력은 화재안전공학이 건물설계에 있어 성능기반 접근법 쪽으로 변화함으로써 더욱더 중요시 되고 있다. 현재까지 개발된 대표적인 모델을 고찰해보면, charring 물질에 대한 모델은 Delichatsios⁴⁾, Chen 외⁵⁾, Wichman과 Atreya⁶⁾에 의한 열분해 모델이 있으며, non-charring 물질에 대한 모델은 Chen 외⁵⁾ 등이 있다. 또한, Yuen 외⁷⁾의 젖은 목재의 열분해에 대한 3차원적인 수학적 모델; Parker의⁸⁾ 목재 연소시 열방출율의 예측 모델 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. 본 연구에서 사용된 모델은 Quintiere에⁹⁾ 의해 제안된 적분모델로 탄화과정, 증발, 화염과 열전도 효과를 포함하는 1차원 열분해 모델이다. 또한 이 모델은 적분 방법을 이용하여 예열(preheating)과 기화(gasification) 단계 동안 1차원 불안정한 열전달 방정식을 풀기위해 Quintiere와 Iqbal에¹⁰⁾ 의해 개발되었다.

따라서 본 연구의 목적은 cone heater를 이용하여

난연 처리된 목재에 대한 화재특성(점화시간, 임계 열속, 점화온도 등) 평가와 점화시험을 통해 얻은 data를 적분모델에 적용하여 이들을 비교 평가하기 위한 것이다. 본 연구에서 사용된 난연제는 자체 배합한 수용성 난연제로 목재를 침지 방법으로 난연화 처리하였으며, 난연제의 주성분은 Monoammonium phosphate, Sodium borate, Zinc borate이다. 적분모델에 사용된 수분함량, 열전도도, 밀도, 비열, 열관성, 열확산등과 같은 많은 특성들은 관련문헌의 자료를 참고하거나 시험을 통해 직접 측정된 값을 사용하였다.

2. 이론적 배경

점화에 필요한 적분모델은 외부 복사열원에 기인한 물질 표면의 복사 점화를 가정하여 Quintiere에 의해 개발되었다. Fig. 1은 적분 점화모델의 물리적인 구조를 묘사한 것이다¹¹⁾.

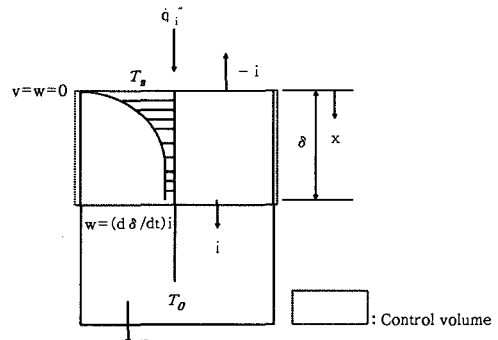


Fig. 1. The physical configuration of the integral model ignition.

이 적분 모델의 가정은 다음과 같다.

- 1) 점화는 표면 온도가 임계온도에 도달했을 때 발생한다.(T_{ig})
- 2) 시료는 점화까지 불활성이다.
- 3) 시료는 무한히 두껍다.

시료가 점화할 때까지의 예열은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 열침투 층의 깊이($\delta(t)$)로써 묘사된다.

시료를 통한 열전달은 주어진 시간(t)에서 순 열흐름(net heat flux)에 의해 침투한다. 이때, 순 열흐름은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{q}''(t) = \alpha \dot{q}''_i - \epsilon \sigma (T_s^4 - T_0^4) - h_c (T_s - T_0) \quad (1)$$

흡수율(absorptivity, α), 방사율(emissivity, ε)는 목재의 표면이 탄화되기 때문에 1이라 가정하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{q}''(t) = \dot{q}''_i - \sigma(T_s^4 - T_0^4) - h_c(T_s - T_0) \quad (2)$$

영역 δ 을 통해 선택된 이차 온도곡선(식 (3))은 다음의 경계조건을 만족한다.

$$T - T_0 = \frac{\dot{q}''(t)\delta}{2k} \left(1 - \frac{x}{\delta}\right) \quad (3)$$

- 1) $x = 0$ 일때, $\dot{q}''(t) = -k \frac{\partial T}{\partial x}$
- 2) $x = \delta$ 일때, $T = T_0$
- 3) $x = \delta$ 일때, $-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0$ 즉, 열손실이 없다.

식 (2)로부터 시간 $t=0$ 일 때, 표면온도가 주위온도 ($T_s = T_0$)라면 $\dot{q}''(0) = \dot{q}''_i$, 시간 $t = t_{ig}$ 일 때, 표면온도가 점화온도($T_s = T_{ig}$)라면 $\dot{q}''(t_{ig}) = \dot{q}''_i - \sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) - h_c(T_{ig} - T_0)$ 가 된다. 이는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}''(t) = \dot{q}''_i (1 - \beta) \quad (4)$$

여기서,

$$\beta \equiv \frac{\sigma(T_s^4 - T_0^4) + h_c(T_s - T_0)}{\dot{q}''_i} \quad (5)$$

$t = t_{ig}$, $T_s = T_{ig}$, $x = 0$ 이면, 식 (3)로부터 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$t_{ig} = \frac{4}{3} k \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{[\dot{q}''(t_{ig})]^2} \quad (6)$$

$t = t_{ig}$, $\beta = \beta_{ig}$, $T = T_{ig}$ 그리고 $\dot{q}''_i \rightarrow \infty$, $\beta_{ig} \rightarrow 0$ 이면 식 (4)와 식 (6)로부터

$$t_{ig} = \frac{2}{3} k \rho c \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{(\dot{q}''_i)^2} \quad (7)$$

점화시간이 증가함으로써 점화에 필요한 임계열

속에 접근하게 된다, 식 (5)로부터 $\beta_{ig} \rightarrow 1$ 이면,

$$1 \approx \frac{\sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) + h_c(T_{ig} - T_0)}{\dot{q}''_i} \quad (8)$$

또는, $t \rightarrow \infty$ 로 접근함으로써 $\dot{q}''_{cr} \equiv \dot{q}''_i$ 가 되므로,

$$\dot{q}''_{cr} = \sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) + h_c(T_{ig} - T_0) \quad (9)$$

그러므로, 식 (5)로부터

$$\beta_{ig} \equiv \frac{\dot{q}''_{cr}}{\dot{q}''_i} \quad (10)$$

3. 실험장치 및 실험방법

3.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 목재는 국내·외적으로 전원 주택 및 빌딩 등의 내장 재료로 많이 사용되고 있는 Douglas fir로 원목에서 100mm×100mm×50mm의 크기로 54개를 절단 후 18개는 45℃의 건조기에서 168h 동안 건조하여 사용하였으며, 36개는 18개씩 배합된 수용성 난연제(F2와 F4)에 침지 처리 후 55℃의 건조기에서 168h 동안 건조하여 사용하였다. 외부 복사열원에 대한 Douglas fir의 점화시간, 임계열속, 점화온도를 측정하기 위해 각 복사열원의 단계별로 난연처리된 목재와 비처리된 목재를 각각 3개씩 사용하였다. 목재의 난연화 처리는 Table 1에 나타낸 것과 같이 Monoammonium phosphate, Sodium borate, Zinc borate를 이용하여 수용액을 배합하고 실온에서 186h 동안 안정화시킨 수용성 난연제를 사용하여 목재를 함침 처리하는 방법을 택하였다. Table 1의 NaOH는 수용액 내에서 Zinc borate의 용해 및 각 수용액의 중화제로 사용하였다. 안정화된 후

Table 1. Compositions of water-soluble flame retardants

	Composition(wt %)			
	F1	F2	F3	F4
Water	94.27	91.36	88.47	85.60
NaOH	0.80	1.20	1.60	2.00
(NH ₄)H ₂ PO ₄	2.30	3.47	4.60	5.76
Na ₂ B ₄ O ₇ · 10H ₂ O	2.53	3.80	5.10	6.37
2ZnO ₃ · B ₂ O ₃ · 3.5H ₂ O	0.10	0.17	0.23	0.27
Total	100	100	100	100

Table 2. The average density and moisture content

Species	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)
Douglas fir	D-N	472
	D-F2	481
	D-F4	473

각 수용성 난연제의 pH는 평균 4.8로 약 염기성을 나타내었다. 목재의 난연화 처리는 Table 1의 배합비 중 F2와 F4의 수용성 난연제에 24h 동안 60°C에서 함침 시킨 후 168h 동안 55°C의 건조기에서 건조하여 사용하였으며, 난연화 처리된 목재와 비처리된 목재의 평균밀도와 수분 함량은 Table 2와 같다.

3.2. 실험장치

3.2.1. Cone heater 및 온도조절장치

일정한 Heat flux(10~50kW/m²)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 $\pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지된다.

3.2.2. Heat flux sensor

Cone heater로부터 방출되는 Heat flux를 측정하기 위해 Medtherm 사의 Digital heat flux meter (Model 5H203-DR1)와 Heat flux sensor(측정범위 : 0~100kW/m²)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. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 cone heater의 외형과 실험 전 Heat flux를 측정하기 위해 설치된 Heat flux sensor를 나타낸 것이다.

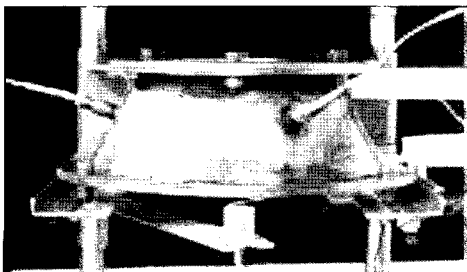


Fig. 2. A photograph of cone heater and heat flux sensor.

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 복사열량(10~50kW/m²)이 일정해 지면 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™을 이용하여 측정하였다. 점화는 cone heater의 하부와 시료 상부의 중간인 0.5inch 지점의 시료 끝 부분에 설치된 pilot flame을 이용하여 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 점화시간(Time to ignition)

외부 복사열원의 변화에 따른 평균 점화시간과 $1/\sqrt{t_{ig}}$ 은 Table 3에 나타내었다. 점화시간은 각 외부 복사열원의 단계에서 pilot flame에 의해 시료의 표면에서 점화가 발생할 때까지의 시간으로 3회의 측정 결과에 대한 평균값을 사용하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 난연제의 함량이 증가할수록 점화시간이 길어진다는 것과 외부 복사열원이 증가 할수록 난연처리된 목재와 비처리된 목재의 평균 점화시간에 있어 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 수용성 난연제는 낮은 외부 복사열원에 있어 점화시간의 지연에 더욱 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 3은 외부 복사열원의 변화와 측정된 평균 점화시간과의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 점화시간은 외부 복사열원이 임계열속에 가까워질수록 무한대(∞)로 접근하고, 외부 복사열원이 임계열속보다 무한히 커질 경우 0으로 접근함을 알 수 있다. 즉, 식 (6)으로부터 $\dot{q}_i'' \rightarrow \dot{q}_{cr}''$ 일 때 $t_{ig} \rightarrow \infty$ 이고, $\dot{q}_i'' \gg \dot{q}_{cr}''$ 일 때 $t_{ig} \rightarrow 0$ 으로 수렴함을 알 수 있다.

수용성 난연제로 처리되지 않은 Douglas fir에 대한 점화시간의 측정 결과, 다른 연구자들의 결과보다 더 빠르게 점화가 되었는데, 이는 시험에 사용된 시료 내에 함유하고 있는 수분함량(약 7~9%), 측정장비, 점화원의 종류 등의 차이에 기인한 것으로 판단된다. F4의 배합비를 갖는 수용성 난연제로 처리된 시료에서는 다른 시료들에 비해 상대적으로

Table 3. Average ignition times for Douglas fir

Heat flux (kW/m ²)	Sample name					
	N		F2		F4	
	Ignition time (s)	1/sqrt(s) (s ^{-1/2})	Ignition time (s)	1/sqrt(s) (s ^{-1/2})	Ignition time (s)	1/sqrt(s) (s ^{-1/2})
50	4.3	0.4806	4.7	0.4627	5.3	0.4331
35	13.3	0.2739	17.3	0.2402	22.3	0.2116
25	35.7	0.1674	36.7	0.1651	40.3	0.1575
20	57.0	0.1325	57.7	0.1317	121.0	0.0909
15	149.7	0.0817	176.7	0.0752	270.0	0.0609
10	547.3	0.0427	-	-	-	-

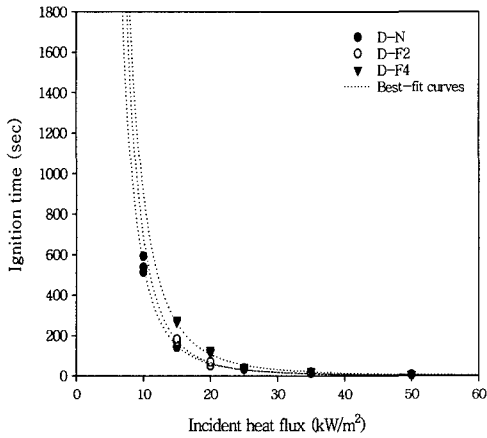


Fig. 3. Ignition time vs incident heat flux for Douglas fir.

긴 점화시간을 나타내었다. 또한, 수용성 난연제로 난연처리된 모든 시료에서는 외부 복사열원이 10 kW/m² 이하일 경우 점화되지 않았다.

4.2. 임계열속(Critical heat flux)

임계열속은 노출된 시료에서 점화가 발생하는데 필요한 최소의 외부 복사열원으로 정의되며, 점화가 발생할 때의 가장 낮은 복사열원과 점화가 발생하지 않는 가장 높은 복사열원의 사이에서 실험적으로 열속을 얻을 수 있다. 또한 각 외부 복사열원에 따른 점화시간의 그래프에서 직선의 절편으로부터 예측할 수 있다. 결국, 본 연구에서는 임계열속을 식 (6)으로부터 유도된 다음 식 (11)과 점화시간으로부터 예측하였다.

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} = \dot{q}''(t_{ig}) \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \kappa \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \quad (11)$$

식 (9)와 $\dot{q}''(t_{ig}) = \dot{q}''_i - \sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) - h_c(T_{ig} - T_0)$ 로부터

$$\dot{q}''(t_{ig}) = \dot{q}''_i - \dot{q}''_{cr} \quad (12)$$

식 (11)에 식 (12)을 대입하여 풀면

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} = (\dot{q}''_i - \dot{q}''_{cr}) \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \kappa \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \quad (13)$$

식 (13)을 일차방적식인 $Y = aX + b$ 의 형태로 나타내면 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} &= \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \kappa \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_c)}} (\dot{q}''_i) \\ &\quad - \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \kappa \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} (\dot{q}''_{cr}) \quad (14) \end{aligned}$$

식 (14)에서

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{\sqrt{t_{ig}}}, a = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \kappa \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_c)}}, \\ X &= \dot{q}''_i, b = - \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \kappa \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} (\dot{q}''_{cr}) \end{aligned}$$

가 된다.

따라서 기울기(a)는 식(15)와 같고, 절편은 식(16)과 같다. 따라서 임계열속은 식(16)로부터 예측할 수 있다.

$$slope = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \kappa \rho c \left[\frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \quad (15)$$

$$intercept = -slope(\dot{q}''_{cr}) \quad (16)$$

Table 4는 각 외부 복사열원에 따른 점화시험을 통해 얻은 임계열속을 나타내었으며, Table 5는 Spear-point에 의해 제안된 0.76에 의해 변경된 모든 외부 복사열원 data를 이용하여 각 시료에 대한 점화에 필요한 최종 임계열속에 대해 나타내었다. Fig. 4는

Table 4. Critical heat fluxes for ignition using all incident heat flux data

Species	Sample name	Critical heat flux for ignition (\dot{q}''_{cr})
Douglas fir	D-N	7.76
	D-F2	8.98
	D-F4	10.76

Table 5. Final critical heat fluxes for ignition using all incident heat flux data

Species	Sample name	Critical heat flux for ignition (\dot{q}''_{cr})
Douglas fir	D-N	10.21
	D-F2	11.82
	D-F4	14.16

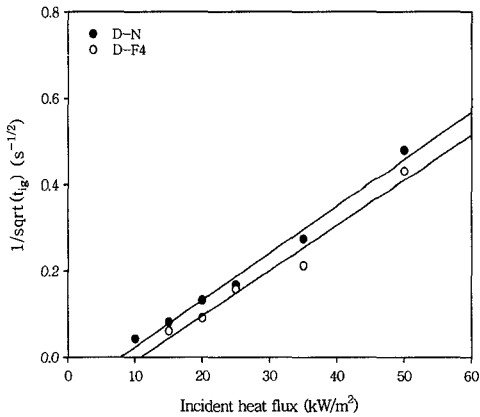


Fig. 4. Comparison of linear regression through the all heat flux points for D-N and D-F4 of Douglas fir.

모든 외부 복사열원을 통한 직선의 회귀선을 갖는 비처리된 시료와 난연처리된 시료에 대한 외부 복사열원의 변화에 따른 $1/\sqrt{t_{ig}}$ 을 나타내었다. Fig. 4에서 각 직선의 절편 즉, 직선과 x축이 만나는 점이 각 시료에 있어서의 임계열속이 된다.

4.3. 점화온도(Ignition temperature)

점화온도는 주어진 외부 복사열원에서 시험 시료의 노출된 표면 위에 위치한 1.0mm의 직경을 갖는 K type의 열전대를 이용하여 점화가 되는 순간의 온도를 측정하였다. 목재의 열분해 특성은 연질 목재의 lignin 함량의 증가와 더불어 높은 온도 쪽으로 이동하게 된다. 이는 연질목재에 대한 평균 점화온도가 일반적으로 경질목재에 대한 평균 점화온도보다 높다는 것에서 알 수 있다. Table 6은 본

Table 6. Measured average ignition temperatures

Species	Sample name	Ignition temperature T_{ig} (°C)	Values quoted in the literature
Douglas fir	D-N	394	384 ⁽¹²⁾ , 350 ⁽¹³⁾
	D-F2	431	-
	D-F4	445	-

연구에서 측정된 평균 점화온도는 인용된 문헌들과 비교하여 나타내었다. 또한, 난연처리된 목재에 있어서 평균 점화온도가 비처리된 목재에 비해 높음을 알 수 있으며, 난연제의 함량이 높은 F4와 비교해서 약 50°C 정도의 차이가 남을 알 수 있다. 이는 난연처리된 목재의 경우 임계열속이 상대적으로 높기 때문에 외부 복사열원에 의한 열축적으로 인한 것으로 판단된다.

5. 결론

난연성 수용액에 의해 난연 처리된 Douglas fir에 대한 외부 복사열원의 변화에 따른 화재특성을 시험하고 적분모델을 이용하여 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 점화시간 측정에 있어 외부 복사열원이 임계열속에 가까워질수록 무한대에 접근하고, 외부 복사열원이 임계열속보다 무한이 커질 경우 0으로 접근함을 알 수 있다.
- 2) 수용성 난연제로 난연처리된 모든 시료에서 외부 복사열원이 10kW/m² 이하에서는 점화가 발생하지 않았다.
- 3) 적분모델을 이용하여 임계열속을 예측한 결과 D-N의 경우 10.21kW/m², D-F2의 경우 11.82kW/m², D-F4의 경우 14.16kW/m²로 나타났다.
- 4) 점화온도 측정결과, 난연처리된 시료들에 있어 비처리된 시료보다 약 50°C 정도 높게 측정되었다.
- 5) 본 연구에서 사용된 수용성 난연제는 낮은 외부 복사열원에 있어 점화시간의 지연에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

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) Quintiere JG., "A semi-quantitative model for the burning rate of solid materials", NISTIR 4840, Gaithersburg, MD, 1992.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Michael J. S., "Predicting th ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an integral model," NIST GCR 99-775, pp. 67~97, 1999.
- 13) Dietenberger M. A., "Ignitability analysis using the cone calorimeter and LIFT apparatus", proceedings of the International Conference on Fire Safety, Columbus, Ohio, USA, Product Safety Corporation, Vol. 22, pp. 189~197, 1996.