

난연처리된 Douglas Fir의 탄화특성에 관한 연구 A Study on Char Characteristics of Fire Retardant Treated Douglas Fir

박형주[†] · 오규형* · 김응식** · 김 홍**

Hyung-Ju Park[†] · Kyu-Hyung Oh* · Eung-Sik Kim** · Hong Kim**

호서대학교 대학원 안전공학과, *호서대학교 소방학과, **호서대학교 안전시스템공학과
(2005. 5. 16. 접수/2005. 6. 18. 채택)

요 약

외부 복사열원(10, 15, 20, 25 및 35 kW/m²)에 노출된 난연처리된 목재의 탄화특성을 측정하기 위해 Douglas fir를 사용하였으며, 목재에 복사열원을 노출시키기 위해 Cone heater를 사용하였다. 시료의 크기는 100 mm×100 mm×50 mm로 Monoammonium phosphate, Sodium borate, Zinc borate를 이용하여 배합된 수용성 난연제에 의해 함침 처리된 목재(F2와 F4)와 비치리된 목재(N)를 사용하였다. 연구 결과, 난연처리된 Douglas fir의 경우 비치리된 목재에 비해 탄화율이 외부 복사열원의 증가와 관계없이 현저히 낮음을 알 수 있었으며, 난연제의 함량 증가에 따라 탄화율이 낮게 나타났다. 비치리된 목재에 있어 연소속도가 상대적으로 큼을 알 수 있으며, 낮은 외부 복사열원에서 보다 높은 복사열원에서 그 차이가 많이 남을 알 수 있다. 또한, 외부 복사열원이 35 kW/m²일 때 평균 탄화속도는 비치리된 목재가 난연처리된 목재에 비해 약 2배 정도 빠름을 알 수 있었다. 탄화율, 연소속도 및 탄화깊이와 속도의 측정결과 본 연구에서 배합된 난연성 수용액은 탄화층에 의한 단열 효과 및 불꽃 억제 효과가 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

We tested the char characteristics of fire retardant treated Douglas fir at each of five constant external irradiance levels (10, 15, 20, 25, and 35 kW/m²). A Cone heater was used to expose the wood specimens to the heat flux. The size of specimens is 100- by 100- by 50- mm and the kinds of specimens are non-treated wood(N) and treated wood(F2 and F4) by water soluble fire retardants. The water-soluble fire retardants were made from mixture of aqueous solutions of monoammonium phosphate, sodium borate and zinc borate, and those are used for immersion of Douglas fir. In result of test, char fraction of fire retardant treated Douglas fir showed a considerably low char fraction than that of non-treated wood irrespective of increase of external heat flux. And char fractions has low levels with increase of fire retardant content. Burning rate of non-treated wood(N) was showed a relatively high burning rate than it of fire retardant treated wood(F2 and F4). And difference of burning rate shown more rapidly in high external irradiance than low external irradiance. When the external heat flux is 35 kW/m², average char rate of non-treated wood is rapidly about twice than fire retardant treated wood. Water-soluble fire retardants mixed in this study find out it has fire suppression and adiabatic effect by char layer from results of char fraction, burning rate, and char depth and rate.

Keywords : Douglas fir, Fire retardant, Cone-heater, Char fraction, Burning rate, Char depth, Char rate, Heat flux

1. 서 론

목재는 천연자원중의 하나로 안락한 느낌과 따뜻한

질감, 음향 등에 대한 반사나 잔향이 작고 물리적 및 기계적 특성 등이 우수하기 때문에 일반 가정주택에서부터 중형 건축물의 가구재, 장식재, 구조재 등으로 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 목재는 다른 건축자재들에 비해 화재안전적인 측면에서 많은 단점들을 가

[†]E-mail: sandelf@naver.com

지고 있는데, 가장 대표적인 것이 화재시 발생하는 대류열과 복사열에 의해 가열되면 연소되기 쉽다는 것이다.¹⁾ 따라서 목재를 건축 재료로 선택하는데 있어 충분한 검토가 필요하다. 이들 목재의 연소성에 대한 문제점을 보완하기 위해 국내외적으로 화재성능을 기반으로 한 법규 등을 제정·시행하고 있으며, 이들 법규와 규정을 만족시키기 위해서는 목재의 화재성능을 개선하여야 하며 주로 사용되는 방법이 난연화 처리이다. 목재의 난연화에 사용되는 난연제는 주로 인화합물계, 질소화합물계, 붕소화합물계 등으로 이들 약제를 단독 또는 혼합하여 목재 및 목질 재료에 주입, 도포, 침지 등의 방법을 이용한다.^{2,3)}

일반적으로 목재의 표면이 외부 복사열원에 노출되면 표면에서 열분해가 일어나고 가연성 가스를 방출하며, 이때 발생한 가연성 가스의 농도가 연료/공기 혼합기의 하한계 범위에 도달하기에 충분하고, 점화원이 존재하면 점화가 발생한다. 목재는 200°C~250°C의 온도 범위에서 변색이 되고 비교적 빠르게 탄화된다.⁴⁾ 그 후 탄화층은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 열분해 면이 미연소 목재의 내부로 이동하면서 점차로 성장하게 된다. 탄화층은 300°C 이상의 온도에서 빠르게 균열이 발생하기 시작하며, 또한 수축과 압력변화가 물질 내에서 발생한다.

목재의 탄화는 열분해와 열 발생의 상호작용에 영향을 받으며 목재의 종류, 밀도, 습기함량, 열 침투성, 열적특성, 난연제 등과 같은 많은 변수들의 함수이다. 따라서 이들 변수에 따라 탄화율, 탄화형태, 탄화깊이 그리고 탄화속도 등에 변화가 있으며 화재의 양상 또한 복잡하게 된다. 목재의 화재안전성에 대한 중요 변수

는 탄화율, 탄화깊이 그리고 탄화속도로 대부분의 유용한 탄화깊이와 탄화속도에 대한 결과는 ASTM E 119, ISO 834 그리고 ASTM E 1354의 방법을 이용하고, 시간-온도 곡선과 연소속도 모델을 이용하여 측정되었다.

목재의 탄화특성에 관한 선행 연구를 고찰해 보면 박형주와 김 흥⁶⁾은 Cone heter의 10~35 kW/m²의 복사열원을 이용하여 4종류의 목재에 대한 실험을 통해 탄화속도를 측정하였으며, Butler⁷⁾는 탄화속도가 20~3,000 kW/m²의 복사열원에 직접적으로 비례한다는 것을 알아냈다. 그리고 Nussbaum⁸⁾은 Cone calorimeter를 이용하여 난연제가 첨가된 목재에 대한 탄화속도를 측정하였으며, Mikkola⁹⁾는 50 kW/m²의 열속에서 다양한 종류의 목재와 25~75 kW/m²의 열속에서 Spruce에 대한 탄화속도를 측정하였다. 또한, Tran과 White¹⁰⁾는 Radiant panel의 복사열원을 이용하여 4종류의 목재에 대한 실험을 통해 탄화속도는 질량감소율과 초기 목재의 밀도와 관계가 깊다는 것을 알아냈으며, Quintiere¹¹⁾와 Spearpoint¹²⁾는 연소속도 Data을 이용한 수학적 적분모델과 시간-온도 곡선을 이용하여 탄화율과 탄화깊이를 측정하였다.

본 연구에서 적용한 탄화율 계산방법은 Schroeder¹³⁾에 의해 제안된 식 (1)을 이용하였으며, 탄화깊이는 Quintiere에 의해 제안된 연소속도를 이용한 수학적 적분모델 식 (4)을 이용하였다. Fig. 2는 Schroeder에 의해 제안된 목재의 탄화에 대한 개념도를 나타낸 것으로 시험 전, 후의 무게와 구조를 측정하고 식 (1)을 이용하여 탄화율을 계산 할 수 있다. 식 (1)에 있어 탄화율을 계산하기 위해서는 목재의 초기밀도($\rho_{vw,i}$)와 시험 후의 밀도($\rho_{vw,f}$)는 변화가 없이 동일하고, 시험 후 탄화층의 형상은 목재의 형상과 같은 사변형이라고 가정한다.

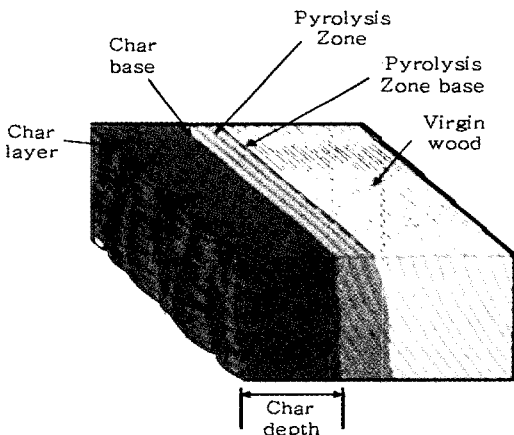


Fig. 1. Normal combustion of wood resulting in progressive formation of char and pyrolysis zones.⁵⁾

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

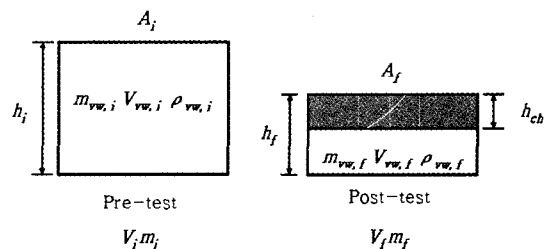


Fig. 2. A schematic of the form of a wood sample of pre-test and post-test.

탄화깊이는 질량감소율과 시험 종료 후 계산된 탄화율을 이용하여 분석할 수 있다. Quintiere에 의해 제안된 열분해 전면에 대한 질량과 에너지의 보존 방정식인 식 (2)에 $f_{ch} \equiv \rho_{ch} / \rho_{vw}$ 를 대입하면 식 (3)이 된다. 다음에 재배열하고, 시간 t 에 대하여 적분하면 식 (4)을 얻을 수 있다.

$$\dot{m}'' = (\rho_{vw} - \rho_{ch}) \frac{d\delta_{ch}}{dt} \quad (2)$$

$$\dot{m}'' = \rho_{vw}(1 - f_{ch}) \frac{d\delta_{ch}}{dt} \quad (3)$$

$$\delta_{ch} = \frac{\dot{m}''}{\rho_{vw}(1 - f_{ch})} t \quad (4)$$

따라서 본 연구에서는 외부 복사열원에 대한 수용성 난연제로 난연 처리된 Douglas fir의 화재 내구성을 평가하고, 화재시 탄화율과 탄화깊이를 이용한 화재강도 평가의 기초 자료로 활용하기 위해 ASTM E 1354의 규격을 만족하는 Cone heater를 제작하여 외부 복사열량을 10~35 kW/m²의 범위 내에서 변화시켜 가면서 외부 복사열량의 크기에 따른 탄화율, 탄화깊이, 탄화속도를 측정하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구에서 사용된 목재는 국내·외적으로 전원주택 및 빌딩 등의 내장 재료로 많이 사용되고 있는 Douglas fir로 100 mm×100 mm×50 mm의 크기로 원목에서 절단한 후, 45°C의 건조기에서 168 h 동안 건조하여 사용하였다. 목재의 난연화 처리는 Table 1에 나타난 것과 같이 Monoammonium phosphate, Sodium borate, Zinc borate를 이용하여 수용액을 배합하고 실온에서 186 h 동안 안정화시킨 수용성 난연제를 사용

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 · 3B 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	4.52
	D-F2	481	4.81
	D-F4	473	4.77

하여 목재를 함침 처리하는 방법을 택하였다. Table 1의 NaOH는 수용액 내에서 Zinc borate의 용해 및 각 수용액의 중화제로 사용하였다. 안정화 된 후 각 수용성 난연제의 pH는 평균 4.8로 약 염기성을 나타내었다. 목재의 난연화 처리는 Table 1의 배합비 중 F2와 F4의 수용성 난연제에 24 h 동안 60°C에서 함침 시킨 후 168 h 동안 55°C의 건조기에서 건조하여 사용하였다. 난연화 처리된 목재와 비처리된 목재의 평균밀도와 수분 함량은 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험장치

2.2.1 Cone heater 및 온도조절장치

일정한 Heat flux(10~35 kW/m²)를 공급하기 위해 ASTM E 1354 6.2항(Conical heater)과 6.3항(Temperature controller)을 만족하는 Cone type의 heater와 온도 조절장치를 제작하여 사용하였다.

2.2.2 Heat flux sensor

Cone heater로부터 방출되는 Heat flux를 측정하기 위해 Medtherm 사의 Digital heat flux meter (Model 5H203-DR1)와 Heat flux sensor(측정범위 : 0~100 kW/m²)를 사용하였다. Heat flux sensor의 위치는 Cone heater의 하부로부터 2.54 cm(1 inch)로 온도조절장치에 의해 Cone heater가 설정온도에 도달 후 30분 이상 연속 측정 하였다. Fig. 3는 본 연구에서 사용된 Cone

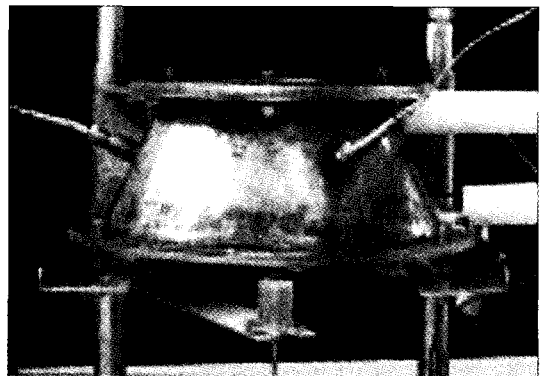


Fig. 3. A photograph of cone heater and heat flux sensor.

heater의 외형과 실험 전 Heat flux를 측정하기 위해 설치된 Heat flux sensor를 나타낸 것이다.

2.2.3 기타 실험장치

목재 표면과 내부의 온도분포는 $\phi 1.0 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 의 K-type의 열전대를 표면과 표면으로부터 4, 12, 24, 40 mm의 위치에 각각 1개씩 목재의 중앙에 삽입하고, 30 분 동안 매 1초 간격으로 주)삼부시스템의 MultiScan/1200TM을 이용하여 측정하였다. 또한, 탄화된 목재 표면은 Digital camera를 이용하여 촬영하였다.

2.3 실험방법

Cone heater 온도 조절장치를 이용하여 설정온도까지 상승시킨 후 설정온도에서 방출되는 복사 열량을 Medtherm 사의 Digital heat flux meter (Model 5H203-DR1)와 Heat flux sensor를 이용하여 측정한다. Cone heater로부터 방출되는 복사열량($10\sim 35 \text{ kW/m}^2$)이 일정해 지면 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 크기의 시료를 Cone heater 하부로부터 25.4 mm(1 inch)의 위치에 놓고 시료 표면과 내부(시료 표면으로부터 4, 12, 24, 40 mm)의 온도변화를 30분 동안 매 1초 간격으로 측정한다. 접히는 Cone heater의 하부와 시료 상부의 중간인 0.5 inch 지점의 시료 끝 부분에 설치된 pilot flame을 이용하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탄화율(char fraction)

건축물의 내장재로 많이 사용되는 Douglas fir의 외부 복사열원에 따른 탄화율을 식 (1)에 의해 계산된 결과는 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다. 외부 복사열원은 $10\sim 35 \text{ kW/m}^2$ 의 범위에서 변화시켰으며, 시료의 종류는 Table 1의 F2와 F4의 조성을 갖는 수용성 난연제에 24 h 동안 60°C 에서 함침시킨 후 168 h 동안 55°C 의 건조기에서 건조한 것과 원목에서 절단 후 45°C 의 건조

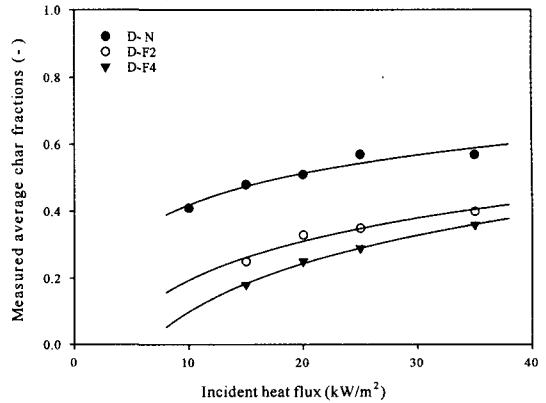


Fig. 4. Measured average char fractions vs incident heat flux for Douglas fir.

기에서 168 h 동안 건조시킨 것을 사용하였다. 외부 복사열원에 노출시킨 시간은 30분이며, 접히는 Cone heater의 하부와 시료 상부의 중간인 0.5 inch 지점의 시료 끝 부분에 설치된 pilot flame을 이용하여 실시하였다.

Table 3과 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 외부 복사열원의 증가와 더불어 탄화율이 증가함을 알 수 있다. 난연처리된 목재의 경우 처리되지 않은 목재에 비해 탄화율이 외부 복사열원의 증가와 관계없이 현저히 낮음을 알 수 있다. 또한, 난연처리된 목재의 경우, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 와 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 의 함량 증가에 따라 탄화율이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 첨가된 난연제의 대표적인 난연화 메카니즘이 숯을 형성하는 물질에 있어 탄화를 촉진시키기 때문에 연소 초기에 탄화층이 형성되고, 이 탄화층에 의해 외부 복사열원과 화염으로부터 발생된 복사열이 목재 내부로의 feedback이 방해되기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3에 있어 외부 복사열원이 10 kW/m^2 일 때 F2와 F4의 조성을 갖는 수용성 난연제로 함침 처리된 시료는 pilot flame에 의해 점화가 되지 않아 탄화율을 표

Table 3. Measured average char fractions and density of samples

Heat flux (kW/m^2)	N(non-treated)		F2(treated)		F4(treated)	
	Density (kg/m^3)	Char fraction (-)	Density (kg/m^3)	Char fraction (-)	Density (kg/m^3)	Char fraction (-)
10	502	0.41	-	-	-	-
15	474	0.48	476	0.25	473	0.18
20	496	0.51	483	0.33	471	0.25
25	467	0.57	486	0.35	479	0.29
35	448	0.57	477	0.40	468	0.36

기하지 않았다. 목재의 연소실험의 결과 점화에 대한 임계 외부 복사열원은 비처리된 목재의 경우 약 7.8 kW/m², F2로 처리된 목재의 경우 약 9.0 kW/m², F4로 처리된 목재의 경우 약 11.1 kW/m²으로 나타났다.

3.2 연소속도(buring rate)

외부 복사열원에 따른 목재의 연소속도를 측정한 결과는 Table 4와 Fig. 5에 나타내었다. 연소속도는 난연처리된 목재와 비처리된 목재를 설정 외부 복사열원에서의 연소 전후의 중량변화를 측정하고 전체 연소시간으로 나눈 값으로 정상상태에서의 연소속도를 의미 하며, 단위는 g/m²s을 사용한다.

측정된 연소속도는 적분모델 식 (4)을 이용하여 탄화깊이를 계산하는데 사용된다. Table 4와 Fig. 5에서 비처리된 목재에 있어 연소속도가 상대적으로 큼을 알 수 있으며, 낮은 외부 복사열원에서 보다 높은 복사열원에서 그 차이가 많이 남을 알 수 있다. 이는 낮은 외부 복사열원에서는 훈소에 의해 연소가 진행되고, 높은 외부 복사열원에서는 착화된 목재의 화염이 지속적

으로 유지되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 난연처리된 목재의 경우에는 연소초기에 화염이 형성되기는 하나 화염이 지속적으로 유지되는 것이 아니라 연소초기에 불이 붙었다가 꺼지면서 훈소에 의한 연소가 진행되기 때문에 상대적으로 연소속도가 낮아진 것으로 판단된다.

Fig. 5는 외부 복사열원과 연소속도와의 관계를 나타낸 것으로 기울기는 목재의 기화열을 계산하는데 기초 자료로 활용할 수 있다, 측정된 기화열은 비처리된 목재의 경우 4.52 kJ/g, F2로 처리된 목재의 경우 8.07 kJ/g, F4로 처리된 목재의 경우 9.85 kJ/g로 난연처리된 목재의 경우에 있어 기화열이 높아짐을 알 수 있다.

3.3 탄화깊이와 속도(char depth and rate)

적분 모델 식 (4)를 이용하여 계산된 외부 복사열원에 따른 탄화깊이는 Fig. 6에 나타내었다. 식 (4)에서, 연소속도는 Table 4의 data를 이용하였으며 밀도는 각 시료의 초기 부피와 중량으로부터 계산하여 사용하였다. 또한 시간 t는 총 연소시간을 기준으로 하여 계산하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 비처리된 목재의 경우에 탄화깊이가 상대적으로 큼을 알 수 있으며, 난연처리된 목재의 경우에 있어서는 난연제 함량의 증가에 따라 탄화깊이가 작아짐을 알 수 있다. 이는 3.1항에 기술한 바와 같이 연소초기 탄화층 형성 이후 탄화층에 의한 단열 효과 및 불꽃 억제 효과에 의해 열전달이 목재 내부로 잘 전달이 되지 않아 탄화 깊이가 낮아진 것으로 판단된다.

Fig. 7은 연소속도와 탄화율을 이용하여 계산된 평균 탄화속도를 나타낸 것으로 비처리된 목재의 경우 외부 복사열원의 증가와 더불어 급격하게 증가함을 알

Table 4. Measured steady mass loss rate of samples

Heat flux (kW/m ²)	Steady mass loss rate (g/m ² s)		
	N(non-treated)	F2(treated)	F4(treated)
10	2.62	-	-
15	3.87	3.43	3.56
20	4.71	4.16	3.91
25	5.65	4.60	4.42
35	6.47	5.27	5.34
50	7.16	6.52	5.50

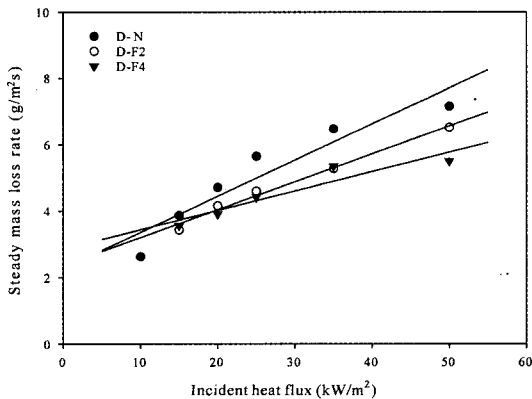


Fig. 5. Measured steady mass loss rate vs incident heat flux for Douglas fir.

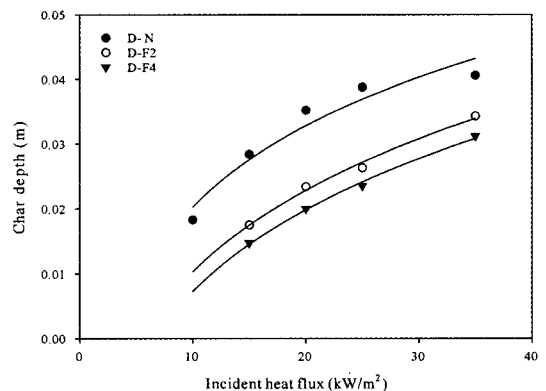


Fig. 6. Calculated Char depth vs incident heat flux for Douglas fir.

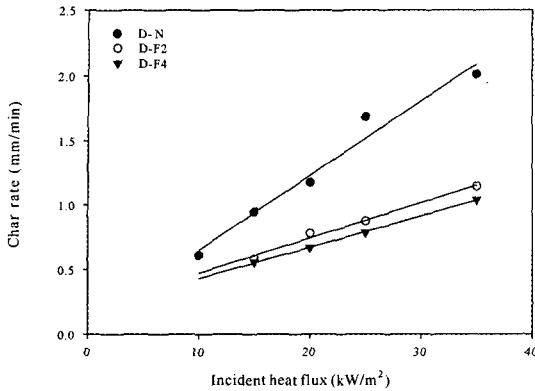


Fig. 7. Calculated Char rate vs incident heat flux for Douglas fir.

수 있다. 외부 복사열원이 35 kW/m²인 경우 비처리된 목재의 평균 탄화속도가 난연처리된 목재에 비해 약 2 배 정도 빠름을 알 수 있다.

4. 결 론

난연성 수용액에 의해 난연처리된 Douglas fir에 대한 외부 복사열원(10~35 kW/m²)의 변화에 따른 탄화특성을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 난연처리된 Douglas fir의 경우 비처리된 목재에 비해 탄화율이 외부 복사열원의 증가와 관계없이 현저히 낮음을 알 수 있었으며, 난연제의 함량 증가에 따라 탄화율이 낮게 나타났다.
- 2) 비처리된 목재에 있어 연소속도가 상대적으로 큼을 알 수 있으며, 낮은 외부 복사열원에서 보다 높은 복사열원에서 그 차이가 많이 남을 알 수 있다.
- 3) 외부 복사열원이 35 kW/m²일 때 평균 탄화속도는 비처리된 목재가 난연처리된 목재에 비해 약 2배 정도 빠름을 알 수 있었다.
- 4) 탄화율, 연소속도 및 탄화깊이와 속도의 측정결과 본 연구에서 배합된 난연성 수용액은 탄화층에 의한 단열 효과 및 불꽃 억제 효과가 있음을 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. S. L. LeVan, "Chemistry of Fire Retardancy", in

- Rowell, R (ed.) The Chemistry of Solid Wood, Washington D.C., American Chemical Society, pp. 531-74(1984).
3. R. Kozlowski and M. Helwig, "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. J. S. Michael, "Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model", NIST GCR 99-775, pp.2-5(1999).
5. John D., Dehaan, "Kirk's Fire Investigation-Fifth Edition", Prentice Hall, ISBN 0-13-060458, pp.84-114(2002).
6. Hyung-Ju Park and Hong Kim, "A Study on Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Incident Radiation Heat Flux", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 18, No. 4, pp.86-92(2004).
7. C. P. Butler, "Notes on Charring Rates in Wood", Fire Research Note No. 896, London: Department of the Environment and Fire Offices' Committee Joint Fire Research Organization(1971).
8. Ralph M. Nussbaum, "The Effect of Low Concentration Fire Retardant Impregnations on Wood Charring Rate and Char Yield", J. of Fire Sciences, Vol. 6, pp.290-307(1988).
9. Esko. Mikkola, "Charring of Wood Based Materials", In: Fire Safety Science. p. Proceedings of the Third International Symposium, London: Elsevier Applied Science. pp.547-556(1991).
10. White, R. H.: and Tran, H. C., "Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Heat Flux", Wood & Fire Safety, 3rd International Scientific Conference The High Tatras, Hotel Patria SLOVAK PEPUBLIC, pp.175-183.
11. Quintiere, J. G., "A Semi-quantitative Model for the Burning Rate of Solid Materials", NISTIR 4840, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD(1992).
12. M. J. Spearpoint and J. G. Quintiere, "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).
13. R. Schroeder, "The Post Fire Analysis of Construction Materials", PhD Thesis to be Published University of California, Berkley.