

# 일정한 복사열원에 노출된 목재의 탄화속도에 관한 연구

박형주\* · 김 흥

호서대학교 안전시스템공학과 · \*호서대학교 안전공학과 대학원

## 1. 서 론

가구재 · 장식재 · 구조재 등으로 광범위하게 사용되고 있는 목재는 천연자원중의 하나로 최근 안락한 느낌과 따뜻한 질감, 음향 등에 대한 반사나 잔향이 적다는 장점 때문에 일반 건축물 및 가정 내에서 실내 장식용으로 많이 사용되고 있다. 그러나 건축재료로서의 목재는 연소되기 쉬워 방화관리상 충분한 안전성이 고려되어야만 한다.

일반건축물의 내 · 외장용 목재는 외부 열원, 특히 화재시 발생하는 대류열과 복사열에 의해 가열되면 분해가스를 분출하고, 분해가스가 연소함으로써 장기간 타게 되면 목재 심층부까지 연소가 진행된다. 목재의 주성분은 셀룰로오스, 헤미 셀룰로오스, 리그닌으로 구성되며 이들의 비율은 목재의 종류별로 다르게 구성 된다. 일반적으로 목재가 450℃ 이상으로 가열되면 일반적으로 15~20% 정도의 숯을 남기는데 이의 많은 부분이 리그닌 함유량 때문이다. 결과적으로 목재의 종류에 따라 탄화의 형태와 탄화깊이, 탄화속도에 변화가 있으며 화재의 양상 또한 달라진다.

따라서 본 연구에서는 ASTM 1354의 규격을 만족하는 Cone-Heater를 제작하여 외부 복사열량을 10~35kW/m<sup>2</sup>의 범위 내에서 변화시켜 가면서 외부 복사열량의 크기와 목재의 종류에 따른 탄화형태, 탄화속도, 탄화깊이 등을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2-1 실험장치

#### 가. Cone-Heater 및 온도조절장치

목재에 일정한 Heat Flux(10~35kW/m<sup>2</sup>)를 주기위해 ASTM E 1354 6.2항 (Conical Heater)과 6.3항(Temperature Controller)을 만족하는 Cone type의 Heater와 온도 조절장치를 제작하여 사용하였다.

#### 나. 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 ~ 100kW/m<sup>2</sup>)를 사용하였다. Heat Flux Sensor의 위치는 Cone-Heater의 하부로 부터 2.54cm(1 inch)로 온도조절장치에 의해 Cone-Heater가 설정온도에 도달 후

30분 이상 연속 측정 하였다.

다. 기타 실험장치

목재 표면과 내부의 온도분포는  $\phi$  1.0mm×50mm의 K-type의 열전대를 표면과 표면으로부터 4, 12, 24, 40mm의 위치에 각각 1개 씩 목재의 중앙에 설치(삽입) 하고, 30분 동안 매 1초 간격으로 주)삼부시스템의 MultiScan /1200<sup>TM</sup>을 이용하여 측정하였다. 또한, 탄화된 목재 표면은 Digital camera 를 이용하여 촬영 하였다.

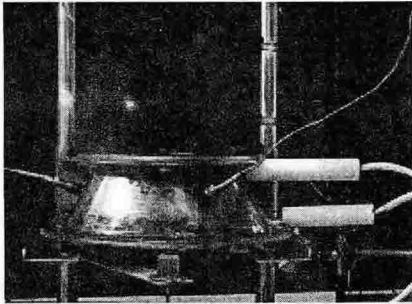


Fig. 1 Cone-Heater and Heat Flux Sensor.

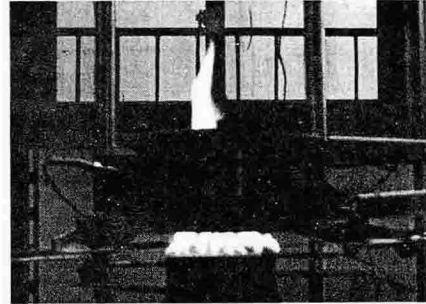


Fig. 2 The shape of flame after ignition.

### 2-2 실험시료

국내외적으로 건축물의 내장 재료로 많이 사용되는 목재인 Redwood, White oak, Douglas fir, Maple 4가지로 시편의 크기는 100mm×100mm×50mm이다. 시료의 개수는 총 100개로 목재별 각각 25개를 사용하였다. 목재의 종류별 밀도, 중량, 수분함량은 Table 1.과 같다.

Table 1. The characteristics of woods used in this study.

목재의 종류	밀도(kg/m <sup>3</sup> )	중량(g)	수분함량(%)
Redwood	343.2	165.6	3.0
White oak	656.1	299.5	3.0
Douglas fir	471.5	222.5	3.0
Maple	510.8	252.5	3.0

### 2-3 실험방법

Cone-Heater 온도 조절장치를 이용하여 설정온도까지 상승 시킨 후 설정온도에서 방출되는 복사 열량을 Medtherm 사의 Digital Heat Flux Meter (Model 5H203-DR1)와 Heat Flux Sensor를 이용하여 측정한다.

Cone-Heater로부터 방출되는 복사 열량(10~35kw/m<sup>2</sup>)이 일정해 지면 100mm

×100mm×50mm 크기의 시료를 Cone-Heater 하부로부터 25.4mm(1 inch)의 위치에 놓고 시료 표면과 내부(시료 표면으로부터 4, 12, 24, 40mm)의 온도변화를 30분 동안 매 1초 간격으로 측정한다. 점화는 Cone-Heater의 하부와 시료 상부의 중간인 0.5 inch 지점의 시료 끝 부분에 설치된 점화봉(pilot flame)을 이용하여 실시하였다.

탄화는 목재 내에 설치(삽입)된 열전대(Thermocouple)의 온도가 300℃에 도달되었을 때 발생한다고 가정하고 탄화속도를 White와 Nordheim(1992)에 의해 제안된 Time-location models(식 (1), (2))를 이용하여 평가하였다.

$$t = m_1 x_c \quad \text{식(1)}$$

$$t = m_2 x_c^a \quad \text{식(2)}$$

여기서,  $t$  : 시료 내부의 온도가 300℃에 도달되는 시간(min)

$x_c$  : 외부 복사열에 노출된 표면으로부터의 거리(mm)

$m_1, m_2, a$  : 상수

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1 탄화형태

외부 복사열원에 의해 목재의 변색은 200~250℃에서 발생하고, 300℃ 이상의 온도에서 탄화가 발생하면서 균열이 발생하기 시작하였다. 균열의 발생형태는 나이테의 수직방향으로 표면위에 나타나고, 이를 통해 열분해 생성물이 방출되는 통로 역할을 하였다. 외부 복사열원의 세기가 커질수록 열분해 속도가 빨라져 균열의 발생 속도가 빨라졌으며, 폭과 깊이 또한 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 연소가 진행됨에 따라 탄화의 형태가 거북이나 악어의 등 모양과 비슷한 형태, 즉 구갑흔을 관찰할 수 있었다.

#### 3-2 탄화속도

시료의 중앙 표면으로부터 4, 12, 24, 40mm 깊이에 설치(삽입)한 열전대로부터 측정한 시간에 따른 온도 곡선을 이용하였으며, 탄화속도를 계산하기 위해 시료 내의 온도가 300℃에 도달하면 탄화가 발생한다고 가정하고 식(1)과 식(2)을 이용하여 탄화속도를 계산하였다. 탄화속도( $\beta$ )의 단위는 mm/min으로  $m_1$ 의 역수로부터 계산할 수 있다. 외부 복사열에 따른 목재의 종류별 평균 탄화속도는 Table 2와 3.에 나타내었다. Table 2.에서 알 수 있듯이 외부 복사열에 따른 탄화속도는 Redwood가 가장 빠르며, Douglas fir가 가장 느리게 나타났다.

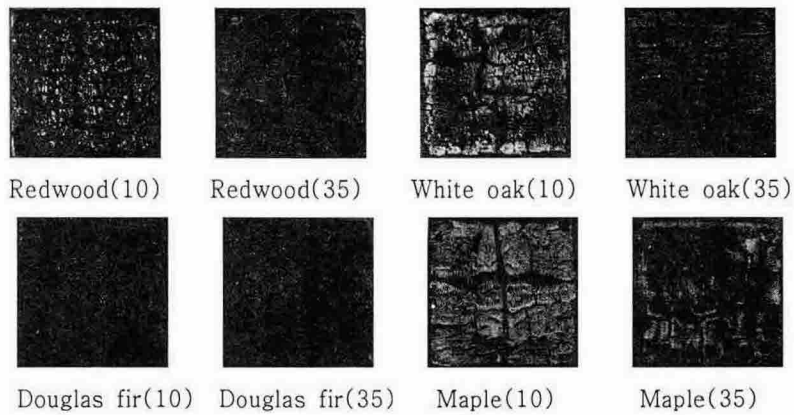


Fig. 3 The char appearance of specimens for nominal heat flux of 10 and 35kW/m².

Fig. 4와 Fig. 5는 외부 복사열에 따른 시간과 탄화깊이와의 관계를 나타낸 것으로 각각 Redwood, Douglas fir 이다. 외부 복사열량이 높아질수록 기울기가 낮아짐을 알 수 있으며, 기울기가 낮은 것일수록 탄화속도가 증가함을 의미한다.

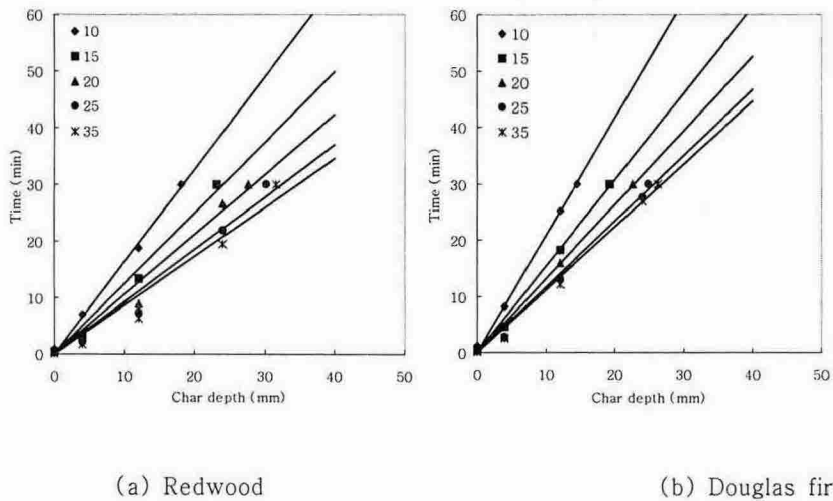


Fig. 4 Trees for 300°C versus distance from exposed surface for nominal heat flux of 10, 15, 20, 25 and 35kW/m². Lines are Equation (1)( $t = m_1 x_c$ ).

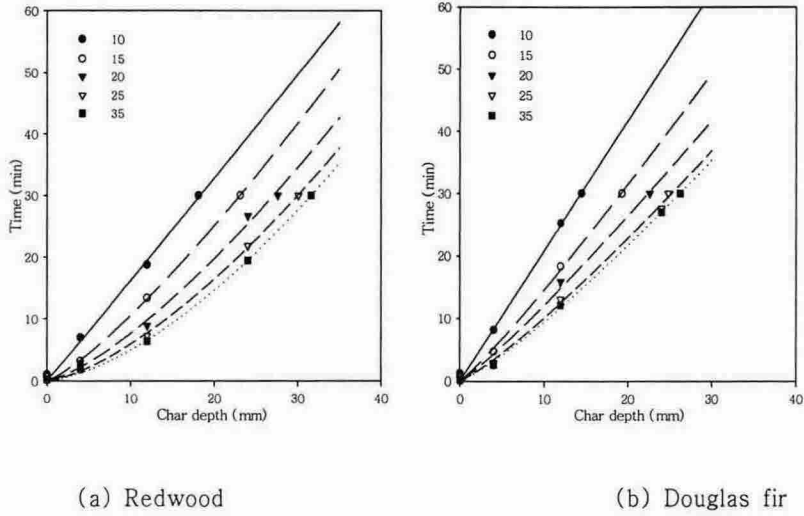


Fig. 5 Trees for 300°C versus distance from exposed surface for nominal heat flux of 10, 15, 20, 25 and 35kW/m<sup>2</sup>. Curves are Equation (2) ( $t = m_2 x_c^a$ ).

Table 2. Parameter estimates for the single parameter model(Eq. (1)) and the two-parameter model(Eq. (2)).

specimens	q(kW/m <sup>2</sup> )	Char Rates		
		$m_1$ of Eq.(1) (min/mm)	$\beta$ (mm/min)	$m_2$ of Eq.(2) (min/mm)
Redwood	10	1.63	0.61	1.54
	15	1.25	0.80	0.59
	20	1.06	0.94	0.32
	25	0.93	1.08	0.20
	35	0.86	1.16	0.13
White oak	10	1.95	0.51	1.89
	15	1.67	0.60	1.13
	20	1.48	0.68	0.82
	25	1.23	0.81	0.41
	35	1.03	0.97	0.13
Douglas fir	10	2.08	0.48	2.06
	15	1.53	0.65	1.11
	20	1.31	0.76	0.89
	25	1.17	0.85	0.66
	35	1.12	0.89	0.58
Maple	10	1.75	0.57	1.50
	15	1.28	0.78	0.92
	20	1.08	0.93	0.56
	25	0.94	1.06	0.43
	35	0.87	1.15	0.30

Table 3. Combined results per nominal heat flux level.

Nominal q (kW/m <sup>2</sup> )	$m_1$ of Eq.(1) (min/mm)	$m_2$ of Eq.(2) (min/mm)		$\beta$ (mm/min)
		$\alpha$	$m_2$	
10	1.85	1.02	1.75	0.54
15	1.43	1.16	0.94	0.71
20	1.23	1.23	0.65	0.83
25	1.07	1.32	0.43	0.95
35	0.97	1.44	0.29	1.04

#### 4. 결 론

일정한 외부복사열원에 노출된 목재의 탄화속도를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일정한 외부 복사열원에 노출된 목재의 탄화는 시간의 선형함수로 간주 될 수 있다.
- 2) 외부 복사열원에 따른 목재의 종류별 탄화속도를 계산할 결과 Redwood가 가장 빠르게 나타나고, Douglas fir가 가장 느리게 나타났다.
- 3) 외부 복사열원이 35kw/m<sup>2</sup>일 때 탄화속도는 10kw/m<sup>2</sup>일 때 보다 약 2배 정도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.
- 4) 식(2)의  $\alpha$ 값은 외부복사열이 10, 15, 20, 25, 35kw/m<sup>2</sup>일 때 각각 1.02, 1.16, 1.23, 1.32, 1.44임을 평가할 수 있었다.

#### 참고문헌

- 1) R. H. White, H. C. Tran, "Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Heat Flux", Wood & Fire Safety, 3rd International Scientific Conference The High Tatras, Hotel Patria SLOVAK REPUBLIC, pp.175-183.
- 2) R. H. White, E. V. Nordheim, "Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure", Fire Technology, Vol.28, No.1, pp.5-30, 1992.
- 3) M. L. Janssens, R. H. White, "Short Communication: Temperature Profiles in Wood Members Exposed to Fire", Fire and Materials, Vol.18, pp.263-265, 1994.
- 4) R. H. White, " Charring Rate of Composite Timber Products", Wood and Fire Safety 2000, pp.353-363, 2000.
- 5) Lizhong Yang, Xiaojun Chen, Xiaodong Zhou, Weicheng Fan, "The pyrolysis and ignition of charring materials under an external heat flux", Combustion and Flame, pp.407-413, 2003.