

일정한 복사열원에 노출된 목재의 탄화속도에 관한 연구 A Study on Charring Rate of Wood Exposed to a Constant Incident Radiation Heat Flux

박형주[†] · 김 흥*

Hyung-Ju Park[†] · Hong Kim*

호서대학교 대학원 안전공학과, *호서대학교 안전시스템공학과
(2004. 10. 29. 접수/2004. 12. 20. 채택)

요 약

일정한 외부 복사열원(10, 15, 20, 25, and 35 kW/m²)에 노출된 목재의 탄화속도를 측정하기 위해 목재의 종류별로 5개의 시료를 사용하였으며, 목재에 복사열원을 노출시키기 위해 Cone heater를 사용하였다. 시료의 크기는 100 mm×100 mm×50 mm로 Redwood, White oak, Douglas fir, Maple의 4종류의 목재를 사용하였다. 연구결과, 일정한 외부 복사열원에 노출된 목재의 탄화는 시간의 선형함수로 간주 될 수 있다. 일정한 외부 복사열원에 따른 목재의 종류별 탄화속도를 계산할 결과 Redwood가 가장 빠르게 나타나고, Douglas fir가 가장 느리게 나타났으며, 복사열원이 35 kW/m²일 때 탄화속도는 10 kW/m²일 때 보다 약 2배 정도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 식 (2)의 α 값은 외부복사열이 10, 15, 20, 25, 35 kW/m²일 때 각각 1.02, 1.16, 1.23, 1.32, 1.44임을 평가할 수 있었다.

ABSTRACT

We tested five specimens of each species at each of five constant external heat flux levels (10, 15, 20, 25, and 35 kW/m²). A Cone heater was used to expose the wood specimens to the heat flux. The 100-by 100-by 50-mm specimens were of four species: Redwood, White oak, Douglas fir, Maple. In result of test, charring of wood exposed to a constant external heat flux can be considered a linear with function of time. As compared with the charring rates Redwood is most rapidly, but on the other hand Douglas fir is most slowly. When the external heat flux is 35 kW/m², the charring rate is rapidly about twice then 10 kW/m². Using the Equation (2), the estimates for α were 1.02, 1.16, 1.23, 1.32, and 1.44 for the 10, 15, 20, 25, and 35 kW/m² constant external exposure levels, respectively.

Keywords : Wood, Charring rate, Cone-heater, Redwood, White oak, Douglas fir, Maple

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 복사열

에 의해 가열되면 분해가스를 방출하고, 분해가스가 연소함으로써 장기간 타게 되면 목재 심층부까지 연소가 진행된다.

목재의 주성분은 Cellulose, Hemicellulose, Lignin으로 구성되며 이들의 중량 %는 목재의 종류별로 Table 1과 같이 다르게 구성된다. 또한, 각 주성분의 열분해 온도는 Cellulose가 240°C~350°C, Hemicellulose가 200°C~260°C, 그리고 Lignin이 280°C~500°C로 일반적으로 목재가 450°C 이상으로 가열되면 15~20% 정도의 슛을 남기는데 이는 리그닌 함유량이 많기 때문이다. 또한, 목재의 탄화속도는 목재의 열분해와 열 발생의 상호작용에 영향을 받으며, 이들은 목재의 종류,

[†]E-mail: sandelf@naver.com

Table 1. The chemical composition of dry wood in weight percent

Polymer	Type	
	Hardwood	Softwood
Cellulose	40 - 44	40 - 44
Hemicellulose	23 - 40	20 - 32
Lignin	18 - 25	25 - 35

밀도, 습기함량, 열 침투성, 열적특성과 같은 많은 변수들의 함수이다. 결과적으로 목재의 종류에 따라 탄화의 형태와 탄화깊이, 탄화속도 등이 다르며 화재의 양상 또한 다양하다.¹⁻³⁾

목재의 화재 내구성에 대한 중요 변수는 탄화속도로 유용한 탄화속도에 대한 대부분의 결과는 ASTM E119와 ISO 834의 시간-온도 곡선을 이용하여 측정되었다. 목재의 탄화에 관한 선행 연구를 고찰해 보면 Butler⁴⁾는 탄화속도가 20~3,000 kW/m²의 입사 열속에 직접적으로 비례한다는 것을 알아냈으며, Nussbaum⁵⁾는 Cone calorimeter를 이용하여 난연제가 첨가된 목재에 대한 탄화속도를, Mikkola⁶⁾는 50 kW/m²의 열속에서 다양한 종류의 목재와 25~75 kW/m²의 열속에서 Spruce에 대한 탄화속도를 측정하였다.

목재의 탄화는 시료내에 삽입된 열전대의 온도가 300°C 또는 288°C에 도달되었을 때 발생한다고 가정하고 탄화속도를 White와 Nordheim에 의해 제안된 Time-Location Models(식 (1), (2))를 이용하여 평가할 수 있다.⁷⁻¹⁰⁾

$$t = m_1 x_c \tag{1}$$

$$t = m_2 x_c^a \tag{2}$$

여기서, t: 시료 내부의 온도가 300°C에 도달되는 시간 (min)
 x_c: 외부 복사열에 노출된 표면으로부터의 거리 (mm)
 m₁, m₂, a: 상수

본 연구에서는 외부 복사열에 대한 목재의 화재 내구성을 평가하고, 화재시 탄화된 목재의 탄화 심도를 이용한 화재강도 평가의 기초자료로 활용하기 위해 ASTM 1354의 규격을 만족하는 Cone heater를 제작하여 외부 복사열량을 10~35 kW/m²의 범위 내에서 조절하면서 외부 복사열량의 크기와 목재의 종류에 따른 탄화형태, 탄화속도, 탄화깊이를 구하였다.

Table 2. The properties of woods used in this study

Species	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)
Redwood	343	4.69
White oak	656	4.45
Douglas fir	472	4.52
Maple	511	4.35

2. 실험

2.1 실험재료

국내·외적으로 건축물의 내장 재료로 많이 사용되는 목재인 Redwood, White oak, Douglas fir, Maple를 100 mm×100 mm×50 mm의 크기로 원목에서 절단한 후 45°C의 항온조에서 일주일 동안 건조한 후 사용하였다. 시료의 개수는 총 100개로 목재의 종류별로 각각 25개를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 목재의 종류별 평균밀도와 수분함량은 Table 2와 같다.

2.2 실험장치

2.2.1 Cone heater 및 온도조절장치

목재에 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 Medtherm사의 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(1inch)로 온도조절장치에 의해 Cone heater가 설정온도에 도달 후 30분 이상 연속 측정 하였다.

2.2.3 기타 실험장치

목재 표면과 내부의 온도분포는 φ1.0 mm×50 mm의 K-type의 열전대를 표면과 표면으로부터 4, 12, 24, 40 mm의 위치에 각각 1개씩 목재의 중앙에 삽입하고, 30분 동안 매 1초 간격으로 주·삼부시스템의 MultiScan/1200™을 이용하여 측정하였다. 또한, 탄화된 목재 표면은 Digital camera를 이용하여 촬영 하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 Cone heater의 외형과 실험전 Heat flux를 측정하기 위해 설치된 Heat flux sensor를 나타낸 것이며, Fig. 2는 외부 복사열원에 의해 목재가 점화되었을 때의 화염형상을 나타낸 것이다.

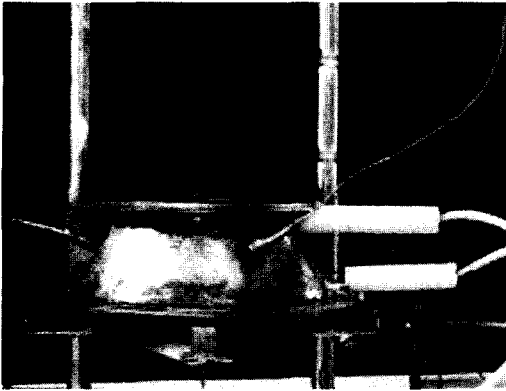


Fig. 1. Photograph of cone heater and heat flux sensor.

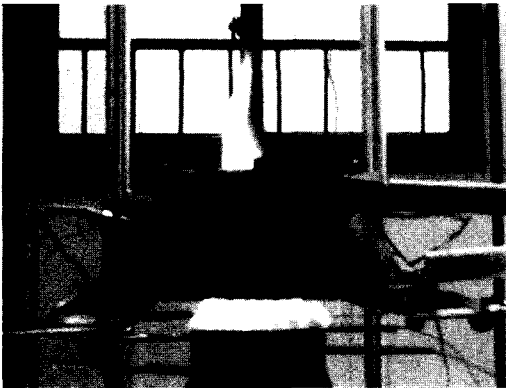


Fig. 2. Photograph of ignition flame by cone heater.

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(10~35 kW/m²) 이 일정해 지면 100 mm×100 mm×50 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. 점화는 Cone heater의 하부와 시료 상부의 중간인 0.5 inch 지점의 시료 끝 부분에 설치된 Pilot flame을 이용하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 탄화형태

외부 복사열원에 의한 목재의 변색은 200~250°C에서 발생하고, 300°C 이상의 온도에서 탄화가 발생하면서 균열이 발생하기 시작하였다. 균열의 발생형태는 나이테의 수직방향으로 표면위에 나타나고, 이를 통해 열분해 생성물이 방출되는 통로 역할을 하였다.

Fig. 3은 10 kW/m²과 35 kW/m²의 외부 복사열원에 노출된 목재의 종류별 탄화 형태를 나타낸 것으로 연질인 Redwood와 Douglas fir가 경질인 White oak와 Maple에 비해 균열의 발생 형태가 더욱 뚜렷하며, 균

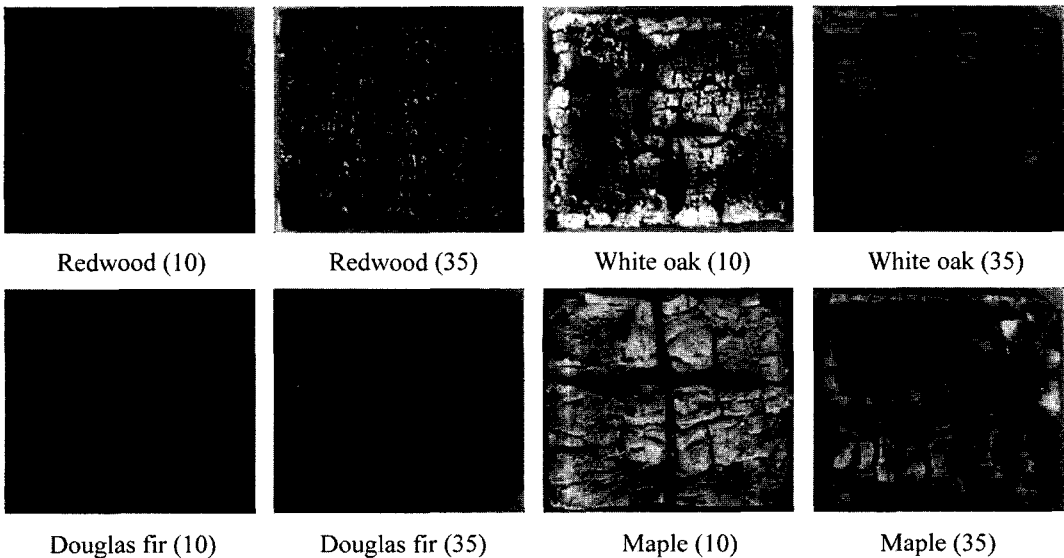


Fig. 3. The char appearance of specimens for nominal heat flux of 10 and 35 kW/m².

열의 깊이와 폭이 더 크을 알 수 있었다. 또한, 외부 복사열원의 세기가 커질수록 열분해 속도와 균열의 발생 속도가 빨라졌으며, 폭과 깊이가 또한 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 연소가 진행됨에 따라 탄화의 형태가 거북이나 악어의 등 모양과 비슷한 형태, 즉 구 갑흔을 관찰할 수 있었다.

3.2 탄화속도

시료의 중앙 표면으로부터 4, 12, 24, 40 mm 깊이에 삽입한 열전대로부터 측정된 시간에 따른 온도 곡선을 이용 하였으며, 탄화속도를 계산하기 위해 시료내의 온

도가 300°C에 도달하면 탄화가 발생한다고 가정하고 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 탄화속도를 계산하였다. 탄화속도(β)의 단위는 mm/min으로 기울기인 m_1 의 역수로부터 계산할 수 있다.

Fig. 4의 (a)~(d)는 White와 Nordheim에 의해 제안된 Time-Location Models중 식 (1)을 이용하여 외부 복사열의 강도에 따른 탄화깊이를 나타낸 것으로 그래프의 기울기가 낮을수록 탄화속도가 빠르게 진행됨을 의미한다. 목재를 35 kW/m² 외부복사열에서 30분 동안 연소시켰을 때 평균 탄화깊이는 Redwood가 31.6 mm로 가장 크게 나타났으며, Douglas fir가 26.2 mm로 가장

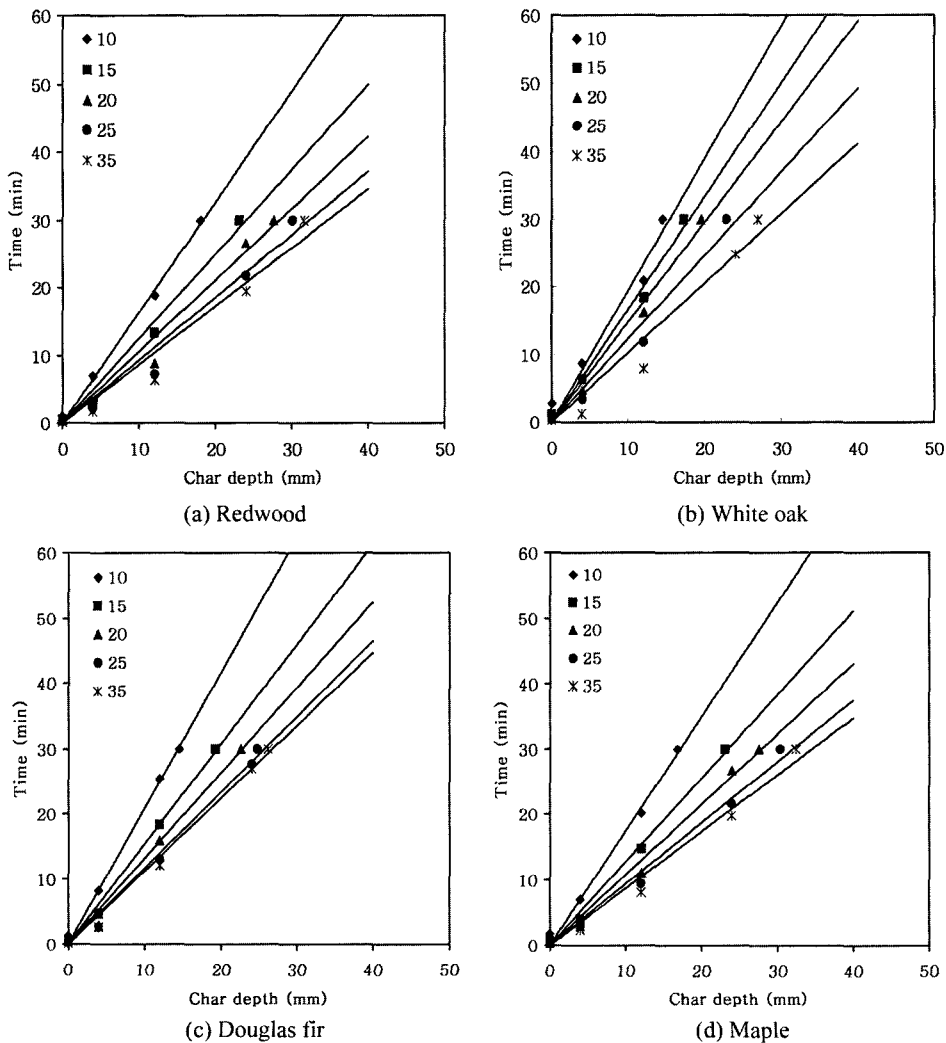


Fig. 4. Trees for 300°C versus distance from exposed surface for nominal heat flux of 10, 15, 20, 25 and 35 kW/m². Lines are Equation (1)($t = m_1x_c$).

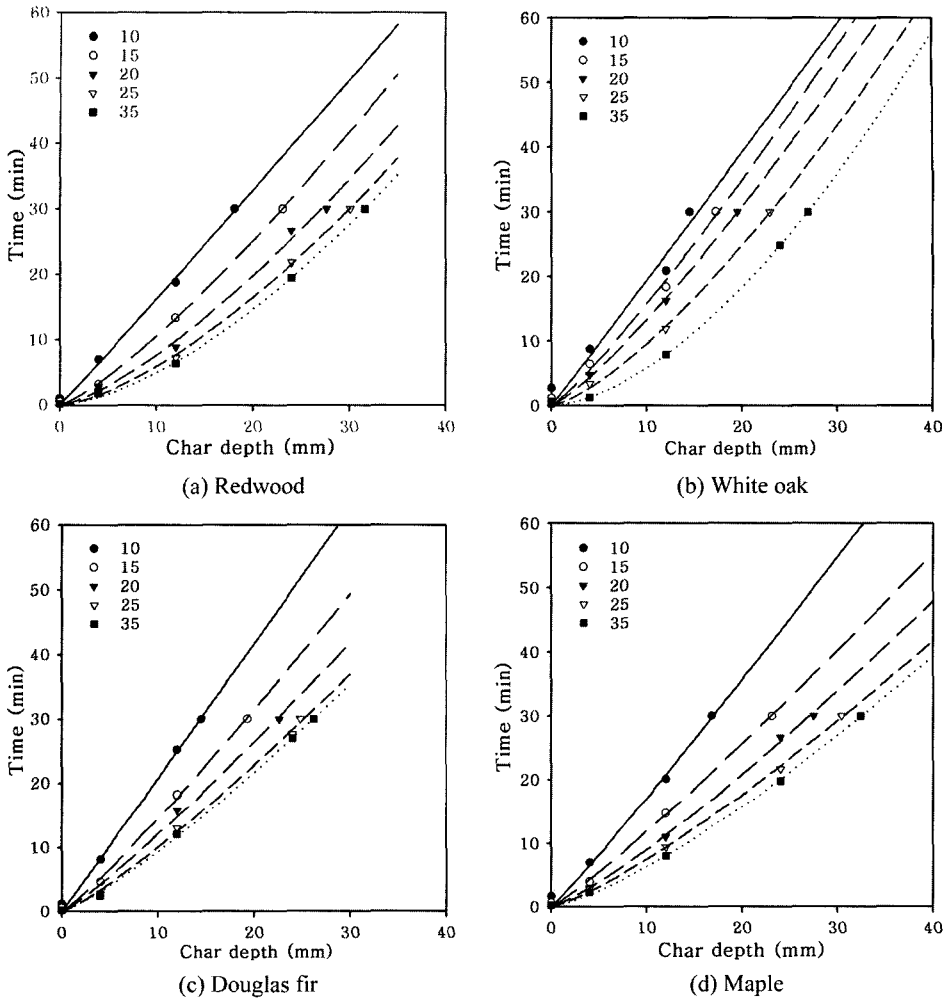


Fig. 5. Trees for 300°C versus distance from exposed surface for nominal heat flux of 10, 15, 20, 25 and 35 kW/m². Curves are Equation (2) ($t = m_2 x_c^{\alpha}$).

낮게 나타났다.

Fig. 5의 (a)-(d)는 White와 Nordheim에 의해 제안된 Time-Location Models 중 식 (2)을 이용하여 외부 복사열의 강도에 따른 탄화깊이를 나타낸 것으로 복사열의 강도가 증가할수록 α 값이 증가함을 알 수 있었다. 이는 목재의 탄화가 선형에서 비선형으로 증가함을 나타낸다.

Table 3은 Time-Location Models을 이용하여 측정된 결과를 나타낸 것으로 각 그래프의 기울기를 기준으로 평균 탄화속도를 구한 결과, 외부 복사열량에 따른 탄화깊이에서와 같이 Redwood가 1.16 mm/min로 가장 크게 나타났으며, Douglas fir가 0.89 mm/min으로 가장 낮게 나타났다.

Table 4는 실험에 사용된 4종류의 목재에 대한 m_1 , m_2 , β , α 의 평균을 나타낸 것으로 목재의 종류에 관계 없이 외부 복사열의 증가에 따라 탄화속도가 증가함을 알 수 있으며, 식 (2)의 α 값을 계산한 결과 10, 15, 20, 25, 35에서 각각 1.02, 1.16, 1.23, 1.32, 1.44임을 알 수 있었다. 이는 Pine, Red oak Basswood, Redwood를 이용한 Robert H. White와 Hao C. Tran⁷⁾의 연구에서 측정된 외부복사열 15, 25, 35, 50 kW/m²일 때 1.01, 1.19, 1.34, 1.43에 비해 높게 나타났는데, 그 원인은 본 연구에서 사용된 목재의 수분함량(약 4%)과 Robert H. White와 Hao C. Tran의 연구에서 사용된 목재의 수분함량(8~9%)의 차이에서 기인된 것으로 판단된다.

Table 3. Parameter estimation for the single parameter model (Eq. (1)) and the two-parameter model (Eq. (2)).

Specimens	Incident heat flux (q) (kW/m ²)	Char Rates			
		m ₁ of Eq.(1) (min/mm)	β (mm/min)	Eq.(2) (min/mm)	
				α	m ₂
Redwood	10	1.63	0.61	1.02	1.54
	15	1.25	0.80	1.25	0.59
	20	1.06	0.94	1.37	0.32
	25	0.93	1.08	1.48	0.20
	35	0.86	1.16	1.57	0.13
White oak	10	1.95	0.51	1.01	1.89
	15	1.67	0.60	1.15	1.13
	20	1.48	0.68	1.21	0.82
	25	1.23	0.81	1.37	0.41
	35	1.03	0.97	1.66	0.13
Douglas fir	10	2.08	0.48	1.00	2.06
	15	1.53	0.65	1.12	1.11
	20	1.31	0.76	1.13	0.89
	25	1.17	0.85	1.18	0.66
	35	1.12	0.89	1.21	0.58
Maple	10	1.75	0.57	1.06	1.50
	15	1.28	0.78	1.11	0.92
	20	1.08	0.93	1.20	0.56
	25	0.94	1.06	1.24	0.43
	35	0.87	1.15	1.32	0.30

Table 4. Combined results per nominal heat flux level

Nominal q (kW/m ²)	m ₁ of Eq.(1) (min/mm)	m ₂ of Eq.(2) (min/mm)		β (mm/min)
		α	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 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일정한 외부 복사열원에 노출된 목재의 탄화는 시간의 선형함수로 간주될 수 있다.

2) 외부 복사열원에 따른 목재의 종류별 탄화속도를 계산할 결과 Redwood가 가장 빠르게 나타나고, Douglas fir가 가장 느리게 나타났다.

3) 외부 복사열원이 35 kW/m²일 때 탄화속도는 10 kW/m²일 때 보다 약 2배 정도 빠르게 진행됨을 알 수 있었다.

4) 식 (2)의 α값은 외부복사열이 10, 15, 20, 25, 35 kW/m²일 때 각각 1.02, 1.16, 1.23, 1.32, 1.44임을 평가할 수 있었다.

참고문헌

1. J. D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", Fifth Edition, Prentice Hall, pp.84-112(2002).
2. J. S. Michael, "Predicting th Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model", NIST GCR 99-775, pp30-46(1999).
3. Lizhong Yang, Xiaojun Chen, Xiaodong Zhou, and Weicheng Fan, "The Pyrolysis and Ignition of Char-

- ring Materials under an External Heat Flux”, Combustion and Flame, pp407-413(2003).
4. 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).
 5. Ralph M. Nussbaum, “The Effect of Low Concentration Fire Retardant Impregnations on Wood Charring Rate and Char Yield”, J. of Fire Sciences, Vol. 6, pp290-307(1988).
 6. Esko. Mikkola, “Charring of Wood Based Materials”, In: Fire Safety Science. p. Proceedings of the Third International Symposium, London: Elsevier Applied Science. pp547-556(1991).
 7. R. H. White and E. V. Nordheim, “Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure”, Fire Technology, Vol. 28, No. 1, pp5-30(1992).
 8. M. L. Janssens and R. H. White, “Short Communication: Temperature Profiles in Wood Members Exposed to Fire”, Fire and Materials, Vol. 18, pp263-265(1994).
 9. R. H. White and 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, pp175-183.
 10. R. H. White, “Charring Rate of Composite Timber Products”, Wood and Fire Safety 2000, pp353-363(2000).