

화재에 노출된 제재목의 탄화속도에 대한 실험적 연구 An Experimental Study on the Charring Rate of Solid Sawn Timber Exposed to Fire

여인환 · 박경훈 · 조경숙 · 민병렬 · 윤명오*†

In-Hwan Yeo · Kyung-Hoon Park · Kyung-Suk Cho · Byung-Yeol Min · Myung-O Yoon*†

한국건설기술연구원, *서울시립대학교
(2011. 3. 30. 접수/2011. 6. 10. 채택)

요 약

이 연구에서는 목구조건축의 화재안전 성능설계기법 개발에 선행하여 목재의 연소특성 자료를 확보하고자 목재의 탄화속도를 측정하였다. 400 × 400 mm 단면 북미산 미송을 대상으로 목재 두께와 목리방향에 따른 가열실험결과를 요약하면 다음과 같다. 1) 동일단면에서 목재의 두께가 늘어날수록 탄화속도는 점차 감소하는 것으로 나타났다. 일정 두께 이상의 탄화층은 단열층의 역할을 하여 목재연소를 지연시키는 것으로 판단된다. 2) 목재 두께(20, 40, 80, 120 mm)를 달리하면서 최대 1시간까지 표준화재에 노출시켜 목재 깊이(10, 20, 30, 40 mm)별 탄화속도를 비교해본 결과 화재노출면으로부터 30 mm 깊이까지는 탄화속도가 증가하나 40 mm에서는 탄화속도가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 단열층으로서 역할을 할 수 있는 탄화층의 최소두께는 적어도 30 mm 이상인 것으로 판단된다. 3) 목재 가열면이 목리방향(방사단면)인 경우보다 목리직각방향(횡단면)인 경우 탄화속도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 화재에 노출되면서 목재조직의 수축으로 인한 갈라짐과 터짐 등으로 인해 생긴 틈새로 목재 내부로의 열 유입이 더 잘 일어나기 때문으로 판단된다.

ABSTRACT

In this study, we have measured the charring rate of solid sawn timber as a preceding step for develop performance based fire safety design method of wood framed building structures. The follows are the summary of fire test results carried out with 400 × 400 mm cross-section Douglas-fir in varied of thickness and grain directions. 1) When the timber thickness increase under same dimension, the charring rate decreases gradually. It is seemed the charring layer up on a thickness roles as a insulation, gives combustion delaying time to specimen. 2) The charring rates measured at different depths (10, 20, 30, 40 mm) in timber which varying thickness (20, 40, 80, 120 mm) when exposed maximum 1 hour standard fire increase by 30 mm depth, but decrease at 40 mm. It is seemed the minimum charr layer should be 30 mm for having role of insulation. 3) The charring rate of cross section surface (direction of perpendicular to grain) was more high than that of grain direction. It can be explained by the cracks and gaps from greater charr contraction made more heat flux incident into timber.

Key words : Timber, Fire resistance, Charring rate, Combustion characteristic

1. 서 론

정부의 저탄소 녹색성장 정책과 맞물려 한옥을 비롯해 친환경 목조건축 활성화에 대한 기대가 점차 커지고 있는 추세이다.

2005년 목조건축물의 규모 제한이 완화되면서 최근 국내에서도 4층 규모의 목조주택이 선보이는 등 다층형 목조공동주택 시장의 확대를 비롯해 향후 친환경 목조주택의 수요가 증가될 것으로 예상되고 있다. 그러나 이러한 추세에 반해 목조건축 활성화에 필요한 국내의 제도적 기반은 아직 취약한 편이며, 특히 화재 안전 관련분야는 거의 검토되지 못한 것이 사실이다.

*E-mail: yoonmo@empal.com

현재 국내에는 건축구조설계기준에 따라 목조건축물의 지붕 최고 높이는 18 m, 순목조 부분의 처마높이는 15 m까지 허용하고 있어 층고를 3 m로 가정하였을 때 최고 5층까지 시공이 가능하다.¹⁾ 건축물의 규모가 커지게 되면 안전 확보 측면에서 구조검토와 화재에 대한 대책이 필요하게 된다. 이중 내화대책은 건축물 화재 시 피난시간의 확보와 붕괴 방지를 위한 중요한 항목으로 다루어지는데 아직까지 목조 건축물에 대한 법적 내화구조 사양은 정해져 있지 않으며, 한국건설기술연구원에서 관련 법규정에 따라 개별적으로 인정한 구조만 있는 실정이다. 2011년 3월 1일 현재 내화구조 인정현황은 구조용 집성재 5개구조, 제재목 3개구조이다.²⁾

앞으로 목조건축이 더욱 활성화 됨에 따라 보다 다양한 용도와 규모로 확대되어 갈 것으로 보이며, 이를 위해서는 지금까지 제대로 조명되지 못했던 관련 제도 개선과 기술개발이 필요하다고 사료된다. 이러한 점에서 목구조 내화표준 수립, 접합부 성능 요소기술 개발, 내화설계기술개발이 요구되며, 처마/외벽부위의 방화구조 성능 확보, 목재의 난연화 등의 기술개발도 필요하다고 하겠다. 목조건축의 내화설계에 있어 주요선진국의 경우 기둥, 보, 바닥, 벽체 등 주요 부재요소별로 성능이 정립된 표준설계방식과 함께 성능설계방식을 병용하고 있다. 국내도 이와 같은 제도적 기반을 갖고는 있으나, 아직 구체적인 설계지침이 정해져 있지 않아 실질적 활용은 이루어지지 않고 있다.

목재는 화재노출 시간에 따라 비교적 일정한 탄화속도를 보이며, 탄화층 아랫부분은 목재 고유의 특성을 그대로 유지하는 특성이 있어 강재나 콘크리트와는 다른 화재거동을 보인다. 따라서 중요한 수종(樹種)의 탄화속도측정결과를 수집하면 내화구조 표준화를 위한 자료로 활용 가능하며, 성능적 내화설계를 위한 자료로도 활용할 수 있다. 국내의 내화설계기술개발은 강구조, 콘크리트구조를 위주로 줄곧 전개되어왔으며, 관련 데이터베이스의 구축과 제도운영의 실현이 조만간 이루어 질 것으로 보고 있는 반면 목구조건축에 대해서는 거의 연구된 바가 없는 실정이다. 목조건축물의 내화구조 표준화와 내화설계 기술개발을 위해서는 목재의 탄화속도 예측을 위한 자료의 수집과 설계방법의 기술적·제도적 정립이 요구된다.

이 연구에서는 구조용 목재로 많이 사용되는 북미산 미송을 대상으로 목재의 크기와 섬유방향을 변수로 한 탄화특성을 비교하였다. 구조용으로 많이 사용되는 침엽수는 2005년 이후부터 수입량이 크게 증가하여 2010년도에는 전체 수입목재의 83.6%를 차지하고 있으며, 이중 전나무, 가문비나무, 미송의 수입량은 전체 침엽수의

약 12% 비중을 차지하고 있다.³⁾ 제재목의 탄화특성자료는 국내 목구조건축의 내화구조 표준 및 성능설계수립을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 목재의 탄화속도 실험

2.1 목재의 탄화 특성

일반적으로 목조건축물은 화재 시 플래시오버 도달 시간 및 최성기에 도달하는 시간이 일반건축물에 비해 빠르기 때문에 목조건축물은 화재에 매우 취약한 것으로 인식되고 있으나 목재는 철의 350배, 알루미늄의 1000배 정도 열전도도가 낮은 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 건축용으로 목재를 많이 사용하고 있는 해외의 경우 목조건축물은 콘크리트 혹은 철골조 건축물보다 화재노출 후 구조체의 재사용면에 있어 더 유리한 것으로 인식되고 있으며, 목재 고유의 열전달특성 및 연소특성에 따라 공학적인 설계기술이 보급되어 활용되고 있다.⁵⁾

목재의 연소속도는 목재의 크기, 수종, 함수율 등에 지배되는데 작은 단면, 저밀도 수종, 갈라진 틈이 있는 단면은 각각 그 반대의 경우보다 연소가 쉽다.⁶⁾ 한편 목재의 탄화가 진행되는 과정에서 탄화층 부근이 수축하게 되며 목재의 단면은 원래보다 줄어들게 되는데 단면수축 과정에서 발생한 틈을 통해 가연성 가스가 목재 표면으로 이동하면서 연소가 더욱 가속된다.⁷⁾ 따라서 목재의 단면이 작은 경우 탄화속도도 증가하게 된다.

목재는 세포의 배열과 연륜(年輪)에 따라 이방성(異方性)을 갖는데 크게 나무줄기방향인 목리방향(grain direction or parallel to grain), 목리수직방향(perpendicular to grain), 연륜에 대해 접선이 되는 방향인 접선방향

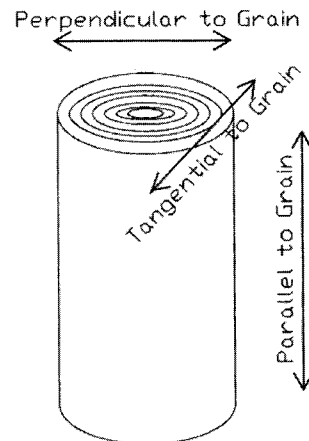


Figure 1. Anisotropy of wood.

(tangential to grain)의 3가지 방향성을 갖게 된다(Figure 1).

곧 방향성은 목재의 가공방법에 따라 구현되는 것이고 건조과정에서 변형, 갈라짐 특성을 달리하는 등 서로 다른 물리적 특성을 갖게 한다.⁸⁾ 가공목재의 방향성은 탄화속도에도 영향을 미치는데 목리방향(목재축방향)에서의 열전도성과 가스 삼투성이 더 높은 것으로 나타난다.⁹⁻¹¹⁾

2.2 실험조건

화재에 노출된 목재는 열분해의 결과로 탄화층에서는 목재 고유의 구조적 특성을 상실하게 되지만 탄화층 안쪽의 비손상면은 상온상태 고유의 특성을 그대로 유지하므로 이러한 특성을 활용한 구조설계가 가능하게 된다. 이에 본 연구에서는 화재에 노출된 목재의 두께에 따른 탄화속도를 측정하고 목재의 연소특성을 고찰하였다. 실험체는 400(W) × 400 mm(L) 크기의 목재를 목재의 두께와 화재노출면 목리방향을 실험변수로 하여 일방향 비제하 화재실험을 실시하였다(Table 1). 화재실험에 앞서 실험목재의 함수율을 측정한 결과 평균 약 11%의 함수율을 보이는 것으로 나타났다. 실험에 사용된 북미산 미송(Douglas-fir)의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

목재의 탄화속도를 측정하기 위해 Figure 2(a)와 같이 실험체의 가열 반대면 쪽에 가열면으로부터 10 mm

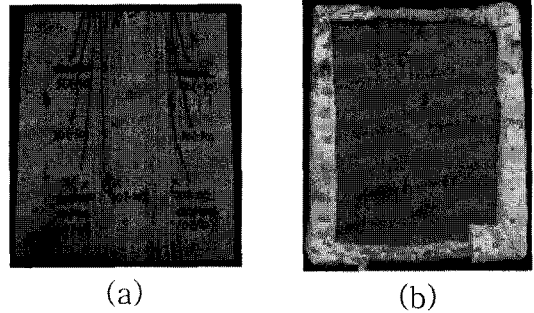


Figure 2. Test specimen.

깊이별로 K-Type의 시즈열전대(sheathed thermocouple)를 설치하여 시간에 따른 목재의 내부온도를 측정하였다.

실험체 두께별 열전대 측정위치는 Table 3과 같다. 실험 중 실험체 주변부 연소와 이로 인한 간섭을 최소화하기 위해서 실험체의 가열면을 제외한 나머지 면들을 고온용 섬유내화재로 단열처리 하였다(Figure 2(b)).

2.3 시간-가열 온도곡선

목재의 탄화속도를 측정하기 위해 사용된 시간-가열 온도곡선은 KS F 2257-1(건축부재의 내화시험방법-일반요구사항)¹²⁾에 따라 식(1)과 같이 산정하였으며 국내 목구조 내화성능 기준에 규정되어 있는 60분 가열실험을 실시하였다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \tag{1}$$

where T = The Furnace Temperature (°C)

t = Time (min)

2.4 가열로

내화실험은 Figure 3과 같이 소규모 실험체의 일면 가열이 가능하도록 제작된 다목적 소형가열로에서 실

Table 1. Design of Charring Rate Test

Variable Factor	Parameter
Thickness (mm)	20, 40, 80, 120
Direction of Wood (heating surface)	Perpendicular to grain, Parallel to grain

Table 2. Physical Properties of Wood⁹⁾

Common Name	Douglas-fir
Density (kg/m ³)	0.45
Modulus of rupture, air dry (KPa)	88,000
Modulus of elasticity, air dry (MPa)	13,600

Table 3. Location of Themocouples

Thickness of Specimen (mm)	Location of Thermocouples (fire side depth, mm)
20	10
40	10, 20, 30
80	10, 20, 30, 40
120	10, 20, 30, 40, 60

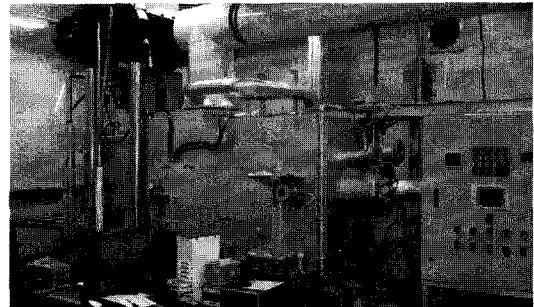


Figure 3. Furnace equipment.



Figure 4. Specimen before and during the test.

시하였다. 이 가열로는 다양한 화재시나리오 구현을 위해 화재강도 조절이 가능하고, 최대 1350 °C 내의 다양한 화재조건을 구현할 수 있다.

가열로의 온도 오차범위 및 시험환경 등은 KS F 2257-1의 요구사항에 적합하도록 하였다. Figure 4는 실험체 설치 및 실험 중 목재연소장면이다.

3. 실험결과

3.1 목리방향에 따른 시간-내부온도

3.1.1 목리직각면(횡단면)

Figure 5는 목리직각면(횡단면)을 화재에 노출시킨

경우로서 목재 두께의 증가와 목재 내부 깊이별 온도 측정 결과를 보여주고 있다. 화재에 노출된 목재 표면에 가장 가까운 10 mm 지점에서는 100 °C에서의 온도 상승 지연효과가 거의 없었으며, 120 mm 두께 목재에서만 약 5분간 온도상승이 지연되는 것을 볼 수 있다.

20 mm 깊이에서는 목재두께 40 mm, 80 mm에서 3~5 분, 목재두께 120 mm에서 7분 정도 온도상승 지연효과가 관찰되었고, 30 mm 깊이에서는 10~15분 내외, 40 mm 깊이에서는 약 15분 정도 온도상승이 지연되었다. 전반적으로 목재의 깊이가 깊어질수록, 각 측정 깊이별로 목재의 두께가 두꺼울수록 100 °C에서의 내부 온도 상승 지연시간이 늘어나는 것으로 관찰되었다.

한편 가열면으로부터 비교적 얇은 깊이에서는 300 °C 도달 시간을 전후해 목재두께별 온도상승이 역전되는 현상이 관찰되는데 이는 가열면인 목재 횡단면의 갈라진 틈새를 통한 열의 침투가 원인인 것으로 사료된다. 이상의 결과를 통해 목재의 두께는 탄화속도에 직접적인 영향을 미치는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

목재 내부의 온도상승이 100 °C 부근에서 지연되는 현상은 목재 내부의 수분이 기화되기 위해 열에너지를 필요로 하기 때문이다. 본 실험은 실험체 깊이별로 1 개씩의 열전대를 설치해 측정한 온도값을 근거로 목재

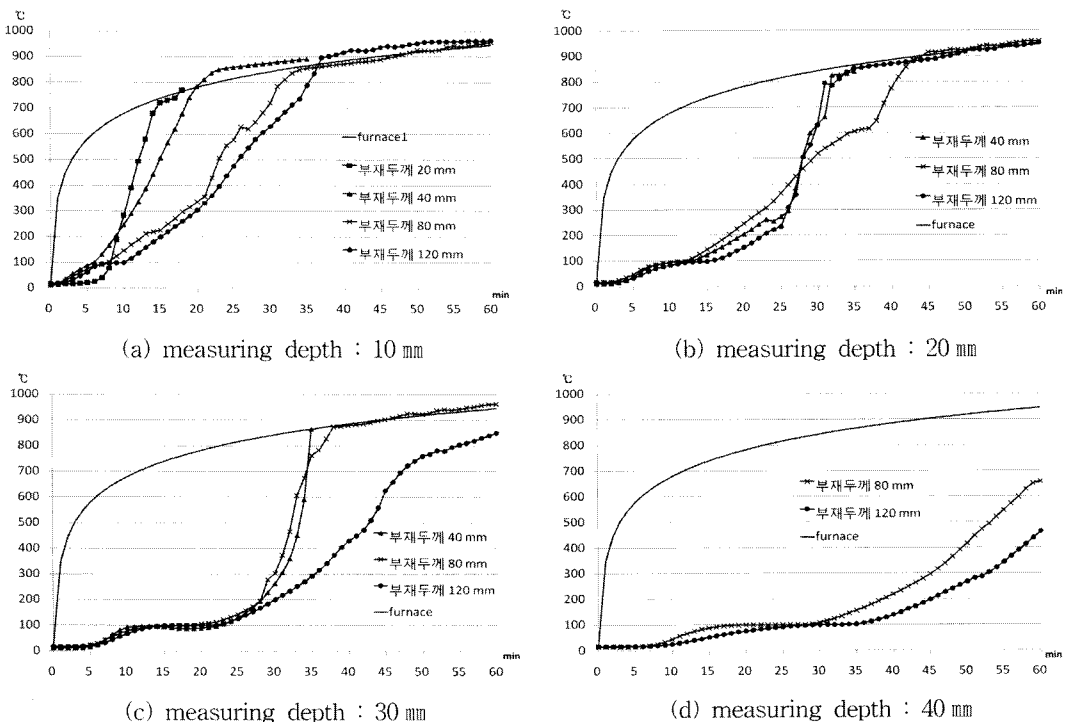


Figure 5. Inner temperature of specimen (perpendicular to grain).

의 탄화속도를 추정하였기 때문에 목재 내부에 있을 수 있는 갈라짐이나 틈새 등의 영향을 받았을 것으로 판단된다.

3.1.2 목리방향면(방사단면)

Figure 6은 목리방향면(방사단면)을 화재에 노출시킨 경우로서 목재 두께의 증가와 목재 내부 깊이별 온도 측정 결과를 보여주고 있다. 목리직각면을 화재에 노출시킨 경우와 마찬가지로 목재의 깊이가 깊어질수록, 각 측정 깊이별로 목재의 두께가 두꺼울수록 100 °C에서의 내부 온도 상승 지연시간이 늘어나는 것으로 관찰되었다. 목재 두께가 두꺼워질수록 100 °C대에서의 온도지연시간 증가가 보다 뚜렷하게 나타났다.

한편 이 경우는 모든 측정깊이에서 300 °C 도달 시간을 전후해 목재두께별 온도상승이 역전되는 현상이 관찰되지 않았는데 이는 가열면인 방사단면에 갈라진 틈새나 흠이 없거나 적어 이를 통한 국부적 열 침투현상이 발생하지 않았기 때문으로 사료된다.

3.2 실험인자에 따른 탄화속도 비교

목리방향형 1시간 가열실험을 실시하여 고온에 노출

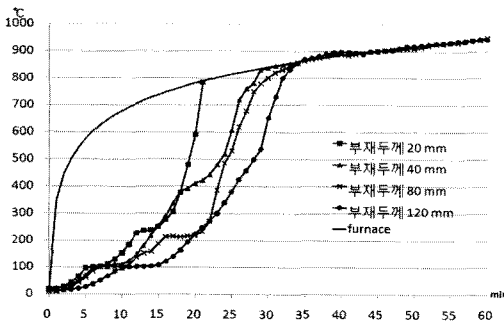
Table 4. Results of Charring Rate (mm/min)

Direction of Wood	Thickness of Specimen (mm)	Depth of Inner Specimen (mm)			
		10	20	30	40
Pa*	20	1.0	-	-	-
Pe**		0.59	-	-	-
Pa	40	0.83	0.77	0.97	-
Pe		0.59	0.83	0.88	-
Pa	80	0.56	0.87	1.00	0.89
Pe		0.45	0.67	0.81	0.74
Pa	120	0.50	0.77	0.83	0.75
Pe		0.43	0.51	0.71	0.61

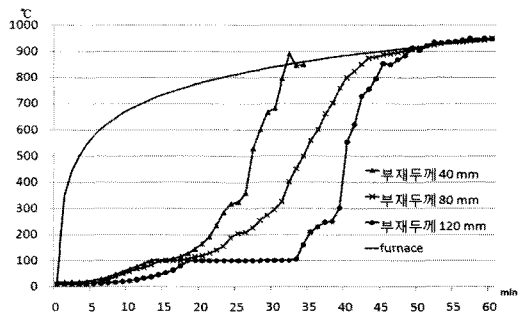
*Pa: Parallel.

**Pe: Perpendicular.

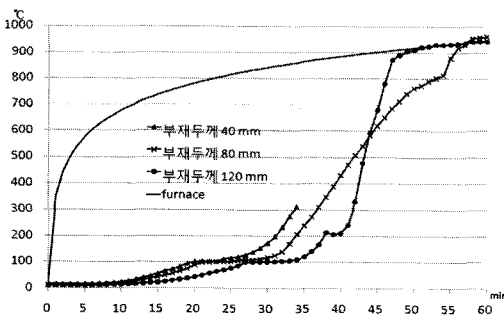
된 목재의 내부온도가 300 °C에 도달하는 시간을 측정 한 결과 Table 4와 같이 탄화속도를 정리하였다. 미국 Wood Handbook¹³⁾의 약식계산법에 의한 북미산 미송의 탄화속도가 0.625 mm/min인 것과 비교했을 때 40 mm 깊이에서 300 °C에 도달한 시간을 기준으로 탄화속도



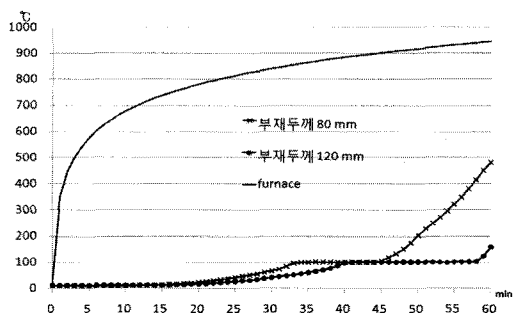
(a) measuring depth : 10 mm



(b) measuring depth : 20 mm



(c) measuring depth : 30 mm

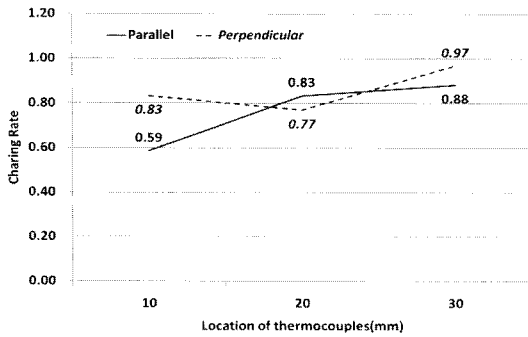


(d) measuring depth : 40 mm

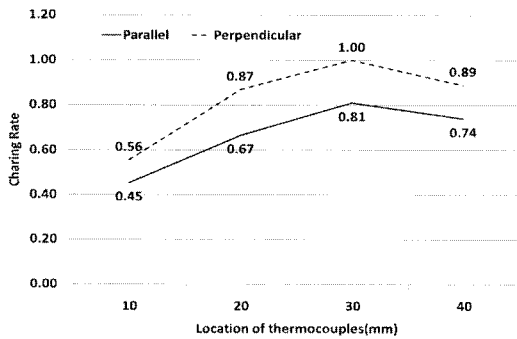
Figure 6. Inner temperature of specimen (parallel to grain).

를 살펴보면 목재두께 80 mm와 120 mm에서 각각 0.89 mm/min와 0.75 mm/min(이상 횡단면), 0.74 mm/min와 0.61 mm/min(이상 방사단면)로 나타났다. 방사단면의 경우 미국의 기준과 비교해 80 mm와 120 mm 목재에서 각각 118.4%와 97.6% 수준의 탄화속도를 보이고 있다. 이로써 동일수종에서 목재의 두께가 두꺼울수록 탄화속도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

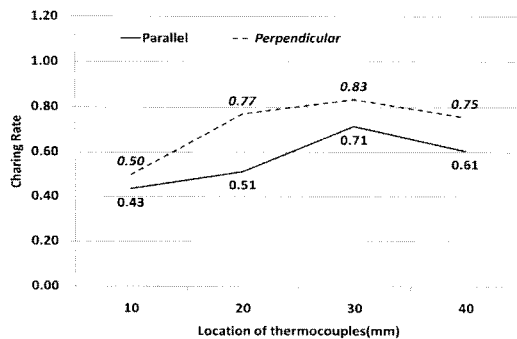
Figure 7은 목재두께와 목재 내부 온도측정위치 및 목리방향별 탄화속도 변화 추이를 비교한 것이다. (a)



(a) Specimen Thickness : 40 mm



(b) Specimen Thickness : 80 mm



(c) Specimen Thickness : 120 mm

Figure 7. Comparison of the charring rate depending on heating side.

에서 (c)의 그래프는 목재 두께가 두꺼울수록 탄화속도가 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 목재 두께와 탄화속도와의 상관성에 대해서는 보다 많은 실험을 통해 규명 가능할 것으로 사료된다.

목재 깊이별 탄화속도를 보면 전반적으로 화재 노출면으로부터 30 mm까지는 탄화속도가 증가하다가 40 mm부터는 탄화속도가 감소하는 것으로 나타났다. 목재의 단면이 커질수록 탄화속도는 점차 감소하는 것으로 판단되는데 이는 탄화층이 연소에 필요한 충분한 산소를 포함하고 있지 않아 활발한 연소가 진행되지 않고 일정 두께 이상의 단열층을 형성하게 되며, 결국 일정 시간동안 목재의 탄화를 지연시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

한편 목리방향에 따른 부재의 탄화속도를 살펴보면 횡단면 목재의 탄화속도가 방사단면 보다 높은 것으로 나타났다. 방사단면 대비 횡단면 가열시의 탄화속도는 40 mm 깊이에서 120.3%(두께 80 mm)와 123.0%(두께 120 mm)로 높은 것으로 관찰되었다. Figure 7(a)에서는 방사단면 측정깊이 20 mm에서 탄화속도가 낮게 측정되었는데 이는 측정지점 부위에 밀도가 높은 용이 등이 있어 영향을 미친 것으로 추정된다.

4. 결 론

최근 지속가능한 개발에 대한 관심의 고조와 함께 목구조 건축물에 대한 관심과 수요도 급격히 증가하고 있다. 이러한 사회적 관점에 변화와 대조적으로 목조 건축물의 화재안전성에 대한 정책수립 및 연구현황은 미흡한 수준이다. 본 연구에서는 주요 목재부재의 화재안전성 확보를 위한 성능설계기법 개발에 선행되어야 하는 목재의 연소특성 자료를 확보하고자 400 × 400 mm 단면의 목재의 탄화속도를 측정하였다. 북미산 미송 목재의 두께(20, 40, 80, 120 mm)와 목리방향에 따른 실험결과 연소특성을 요약하면 다음과 같다.

1) 목재의 두께가 늘어날수록 화재노출면으로부터 동일 깊이에서의 탄화속도가 감소하였으며, 목재의 두께가 탄화속도에 영향을 미치는 직접적 요인인 것으로 나타났다. 목재 두께의 증가와 탄화속도 간의 상관성에 대해서는 보다 많은 실험을 통해 규명될 수 있을 것으로 생각된다.

2) 방사단면의 경우 미국의 약식 기준과 비교해 두께 80 mm와 120 mm에서 각각 118.4%와 97.6% 수준의 탄화속도를 보여 목재의 두께가 두꺼울수록 탄화속도가 줄어드는 것을 확인하였다.

3) 목재 두께별(20, 40, 80, 120 mm)로 1시간까지 화

재에 노출시켜 목재 깊이(10, 20, 30, 40 mm)에 따른 탄화속도를 비교해본 결과 화재노출면으로부터 30 mm 깊이까지는 탄화속도가 증가하나 40 mm 이상에서는 탄화속도가 감소하는 것으로 나타났다. 일정 두께 이상의 탄화층은 단열층의 역할을 하여 목재 연소를 지연시키는 역할을 하는데, 표준화재에 1시간 노출된 경우 단열층으로서 역할을 할 수 있는 탄화층의 최소두께는 적어도 30 mm 이상인 것으로 판단된다.

4) 목재 가열면이 목리방향(방사단면)인 경우보다 목리직각방향(횡단면)인 경우 탄화속도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 화재에 노출되면서 목재조직의 수축으로 인한 갈라짐과 터짐 등으로 인해 생긴 틈새로 열이 목재 내부로 유입되기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부와 한국건설교통기술평가원의 지원하에 수행되는 국가 R&D사업인 “한옥기술개발” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. “국토해양부고시 제2005-81호(건축구조설계기준)”, 국토해양부(2005).
2. <http://www.kict.re.kr>.
3. 농업전망 2011 농업·농촌과 농식품산업: 새로운 시장과 기회, 한국농촌경제연구원, pp.938-955(2011).
4. 임업연구원, “국산재를 이용한 건축부재 개발 최종연구보고서”, 농림부, pp.105-159(2003).
5. 여인환, 윤명오, 윤정배, “표준화재에 노출된 중량목재의 연소특성”, 대한건축학회 논문집(구조계), Vol.25, No.2, pp.123-132(2009).
6. Jack Porteous & Abby Kermani, “Structural Timber Design to Eurocode 5”, Blackwell Publishing, pp.46-48(2007).
7. D. Drysdale, “An Introduction to Fire Dynamics, Second Edition”, John Wiley & Sons, Chichester, UK(1998).
8. 김현중 외 공역, “목재공학개론”, 선진문화사(2004).
9. Kathinka Leikanger Friquin, “Material Properties and External Factors Influencing the Charring Rate of Solid Wood and Glue-laminated Timber”, Fire and Materials(2010).
10. M.G. Grønli, “A Theoretical and Experimental Study of the Thermal Degradation of Biomass”, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway(1996).
11. R. Jonsson and O. Peterson, “Timber Structure and Fire - A Review of the Existing State of Knowledge and Research Requirements”, Document D3:1985, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden(1958).
12. “KS F 2257-1(건축부재의 내화시험방법-일반요구사항)”, 기술표준원(2005).
13. R.H. White and M.A. Dietsberger, “Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Chapter 17”, Tech. Rep., Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, Madison, Wisconsin, pp.6-12(1999).