

방염처리 육송의 연소특성 연구 A Study on Combustion Characteristics of Flame Retardant Treated Pinus Densiflora

최정민[†] · 노호성 · 진영화

Jung-Min Choi[†] · Ho-Seung Ro · Young-Hwa Jin

한국화재보험협회 부설 방재시험연구원
(2011. 3. 21. 접수/2011. 6. 10. 채택)

요 약

본 논문에서는 한옥 부재로 사용되는 육송을 대상으로 도포법과 상압함침법의 방염처리 방법을 적용하여 각 연소특성을 평가하였다. 도포 처리는 시험체 표면에 2~3회 붓칠한 후 24 h 건조하는 것을 3회 반복하였고, 상압함침 처리는 시험체를 약제 속에 72 h 동안 함침시켜 처리하였다. 연소특성 평가방법으로는 백켈버어너를 사용한 방염성능 시험, 콘칼로리미터를 사용한 열방출률 시험방법을 적용하였다. 시험 결과 방염성능에 있어서 두 가지 방법으로 처리한 시험체는 모두 현재 합판에 대한 성능기준을 만족하였으며, 상압함침 처리보다는 도포 처리한 시험체의 방염성능이 더 우수하게 나타났다. 열방출률 시험 결과로는 착화까지의 시간, 최대열방출률, 질량감소율, 총방출열량 등의 지수에서 상압함침 처리보다는 도포 처리한 시험체가 더 높은 성능을 보였다.

ABSTRACT

The combustion characteristic was evaluated for Pinus densiflora, used as a building material in Hanok, which were treated with two different flame retardant method. The specimen was brushed with flame retardant liquid two or three times and then let the specimen dehydrated during 24 h for spreaded treating. And the other specimen was soaked in the liquid for 72 h. The test methods were inflammability test using meker burner and heat release rate test using cone calorimeter. As a result for the tests, flame retardant treated specimens met the requirements of the inflammability and the spreaded treated method was more efficient than immersed method. The spreaded treated specimen had lower combustive properties than immersed specimen in TTI (time to ignition), PHRR (peak heat release rate), MLR (mass loss rate) and THR (total heat release).

Key words : Flame retardant, Combustion characteristics, Flame retardant treated wood, Heat release rate

1. 서 론

소방방재청에서 발표한 통계자료에 의하면 1996년부터 2005년까지 10년 동안 우리나라에서 보고된 화재 사건 중 가장 빈번히 화재가 일어난 장소는 바로 아파트와 주택에서 일어난 화재였다.¹⁾ 이는 NFPA(Nation Fire Protection Association)에서 발표한 2009년 미국의 화재통계의 결과와도 동일한 양상을 보인다.²⁾

이는 우리가 일상을 생활하는 공간이 화재에 취약하다는 사실을 보여주는 것이며 동시에 불조심에 대한

주의가 필요함은 물론, 화재가 발생하더라도 주거공간을 구성하는 재료의 화재안정성을 높여야 하는 필요성을 보여준다.

최근 다시 친환경성과 전통문화, 전원생활에 대한 관심 등의 이유로 주목을 받고 있는데, 한옥이 이 시대의 주요한 건축방식과 문화로 자리 잡기 위해서는 여러 측면에서 변화와 개발이 필요하며 그 중의 하나가 화재안전에 관한 부분이다.

한옥은 그 부재의 대부분이 목재로 되어 있으며, 목재는 본래 연소성이 강하고 주로 오랜 시간에 걸쳐 건조된 상태에 있으므로 복사열과 대류열에 의해 가열되면 매우 빠른 속도로 화염이 전파되기 때문에³⁾ 일반

[†] E-mail: jmchoi@kfpa.or.kr

소방기구로도 진화가 어려운 상태이다. 더구나 현재 그 수요가 급증하고 있는 주거용 한옥은 어떤 형태를 띠던 간에 생활가전과 조명 등을 위한 전기설비, 난방을 위한 가스기름 보일러 설비, 입식부엌에서의 취사를 위한 설비 등을 갖추고 있어 화재의 위험성이 상존하고 있다고 할 수 있다.

이러한 주거공간의 화재안전성을 높이기 위해서는 여러 가지 화재공학적 방법이 있는데 대표적으로 재료 자체의 난연성을 높이는 방법, 감지기와 같은 화재경보설비를 갖추는 방법 그리고 스프링클러와 같은 화재진압 혹은 억제설비를 갖추는 방법 등이 있으며 이들 방법은 화재의 성장을 지연시켜 탈출가능시간을 늘리거나, 최소한 소방대가 출동할 때까지 화재를 억제하는 각각의 목적에 맞게 적용되고 있다.

일반적으로 화재 시 화재의 성장 단계는 제1성장기 - 제2성장기 - 최성기 - 감쇠기의 과정을 거치며, 이때 주거인이 피난 할 수 있는 시점은 급격한 연소의 확대가 일어나는 플래시오버 이전까지이며, 이 시간은 화재하중, 개구부의 크기, 환기 조건 등 여러 변수의 영향을 받지만 가연물이 불연재료일 경우 7~8분, 준불연재료일 경우 5~6분, 목재와 같은 가연재료일 경우 3~4분에 불과하다고 알려져 있다.⁴⁾ 목재를 포함한 일반 가연재료의 방염화는 초기 화재 발화원에 대한 저항성을 부여하며, 방염 및 난연화는 제2성장기의 플래시오버 시점을 지연시키는 탁월한 효과를 가지고 있음이 일반적으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 여러 방법 가운데 한옥 부재의 방염화난연화를 통해 초기 화재에서의 저항성을 향상시키는 방안을 염두에 두고, 우리나라 소나무 중 많이 사용되고 있는 육송을 대상으로 목재에 처리 가능한 수용성 방염제로 처리하여 그 연소특성을 평가해 보았다. 목재의 방염 또는 난연처리는 그 방법에 따라 장단점이 있으나, 상압 조건에서 쉽게 처리할 수 있는 도포법과 상압함침법을 선택하였다. 사용한 약제는 질소계와 인계 화합물이 일정 비율로 배합된 약제로 인체에 무해하고 유독가스가 거의 발생하지 않는다.

연소특성을 평가하기 위한 시험으로는 현재 우리나라에서 소방법에 의한 방염성능시험방법과 건축법에

의해 건축물 내장재에 적용되고 있는 열방출률시험을 실시하였으며, 각 해당 기준을 Table 1에 나타내었다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

일반적으로 한옥의 부재로 많이 사용되고 있는 육송으로, 상술한 방염성능시험과 열방출률시험을 위해 각 시험기준^{5,8)}에 맞는 시험체 크기에 따라 각 1개 썩의 목재를 준비하여 건조기에서 45 °C의 환경에서 건조하였으며, 목재용 함수율 측정기를 사용하여 8.0%의 함수율이 얻어질 때까지 건조를 지속한 후 방염 약제 처리를 하였다. 사용한 목재 수분계는 목재의 전기식 성질을 사용한 Kett사의 MT-8S를 사용하였으며 ±0.5 %의 측정정도를 가지고 있다. 전기식 수분 측정방법은 ISO 4770에 의하여 실시하였으며, 이 방법은 일반적으로 7%에서 28%까지의 측정범위 내에서 2% 이내의 오차를 가진다.⁶⁾

비교를 위한 시험체는 증류수를 이용하여 도포법을 적용하였다. 시험을 위한 시험체에는 준비한 방염제 처리를 하였다. 도포법의 경우 시험체 표면이 충분히 젖을 때까지 붓을 이용해 약제를 2~3회 바른 다음 온도 23 °C 및 상대습도 50 % 환경에서 24 h 건조 후 다시 약제를 바르는 방법으로 3회 반복하였고, 함침법의 경우 온도 23 °C 및 상대습도 50 %의 환경에서 시험체가 충분히 잠길 정도의 용기 내에서 72 h 동안 함침시켰다. 처리가 끝난 도포 처리 시험체와 함침 처리 시험체는 모두 55 °C의 항온조에서 168 h 동안 건조하여 사용하였다. 각 시험에 대한 시험체의 크기 및 약제 처리 전의 길보기 밀도 평균은 Table 2와 같다. 처리 후 목재는 후각 확인 결과 냄새는 없었으나 목재 표면의 색은 옅은 황색을 띠었다.

2.2 수용성 방염제

방염제는 시중에서 판매되고 있는 제품을 그대로 사용하였으며, 본래 조성 외에 추가로 물에 의한 희석은 하지 않았다. 해당 약제의 공개된 조성은 Table 3에 나타내었다.

Table 1. Test Name and Test Methods

Test Name	Test Method
Inflammability Test	Notification No. 2009-31 of NEMA
Heat Release Test	KS F ISO 5660-1 Heat Release Rate Test

Table 2. Dimension of Specimens and Density

Test Name	Dimension (mm)	Density (kg/m ³)
Inflammability Test	189 × 291 × 13	510.9
Heat Release Test	98 × 101 × 50	542.1

Table 3. Compositions of Water-soluble Flame Retardant

Components	Composition (wt%)
Ammophos	20
Alkylphosphinic acids	15
Carbide	5
Phosphoric acids	3
Functional additives	0.3
Water	56.7

2.3 방염성시험방법

목재의 방염성능시험은 소방방재청고시 제2009-31호 (2009.8.24) “방염성능의 기준”에서 정한 시험방법을 적용하였다.⁵⁾ 사용한 시험편의 크기는 190 mm × 290 mm의 규격과는 약 ±1 mm의 오차가 있었으며, 시험 조건은 상대습도 48 %, 주변온도 20 °C 조건을 유지하였다. 버어너는 맥켈버너를 사용하고 불꽃의 길이를 65 mm로 조정하였다. 불꽃의 선단이 시험체 중앙 하단에 접하도록 버어너를 설치하고 2 min간 접염을 유지한 후 종료하였다. 시험체의 잔염시간, 잔신시간, 탄화길이, 탄화면적을 측정하였다.

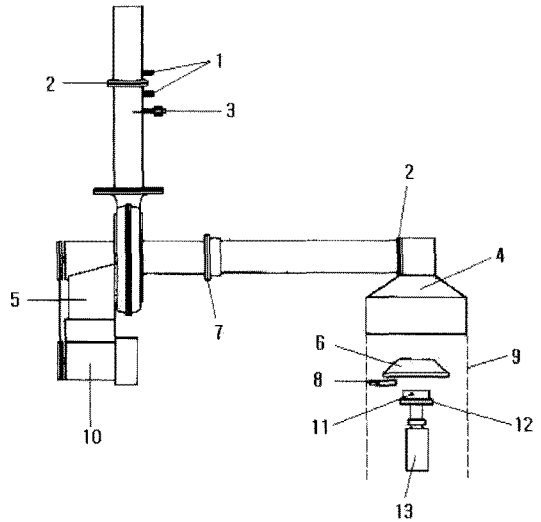
2.4 열방출률시험방법

열방출률 시험의 시험조건은 KS F ISO 5660-1에 의하여 실시하였다. 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다.⁸⁾ 열방출률은 선정된 실험체를 콘칼로리미터시험기를 이용하여 콘히터의 복사열을 50 + 0.5 kW/m², 배출유량을 0.024 + 0.002 m³/s로 설정하고 유지시켰으며, 복사열에 노출된 시험체가 착화되어 연소될 때의 열방출률은 연소 생성물 가스가 덕트를 통과하면서 측정된 산소의 농도와 유속으로부터 유도된 산소 소비량을 측정하여 계산되었다.⁸⁾ 시험체와 시험체 홀더를 질량측정 장치 위에 놓고 복사열 차단 장치를 제거하여시험을 시작, 10분간 가열하여 최대열방출률과 총방출열량 및 착화시간을 데이터 수집 장치로 자동측정 하였다. 이 때 산출되는 열방출률의 계산식은 아래 식(1)과 같다.

$$\dot{q}(t) = (\Delta h_c / r_0) (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_c}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \quad (1)$$

여기서

- \dot{q} : 열방출률, kW
- h_c : 순연소열, kJg⁻¹



- 1 압력포트
- 2 오리피스판
- 3 열전대(굴뚝 중앙에 위치)
- 4 후드
- 5 송풍기
- 6 히터
- 7 가스 샘플링 환형 검침기
- 8 절화장치
- 9 추가적인 스크린
- 10 송풍기 모터
- 11 고정틀과 시편
- 12 시편홀더
- 13 질량측정 장치

Figure 1. Schematic apparatus of cone calorimeter.

- r_0 : 양론적 산소/연료 질량비
- C : 오리피스 유량계 교정상수, m^{1/2} · g^{1/2} · k^{1/2}
- ΔP : 오리피스미터 압력차, Pa
- T_e : 오리피스미터내에서 가스 절대온도, K
- $X_{O_2}^0$: 산소분석기 눈금의 초기값
- X_{O_2} : 산소분석기 실측값

3. 결과 및 토의

3.1 방염성능

방염성능의 시험방법에 의한 결과는 Table 4에 나타내었다.

시험 결과, 증류수로 처리한 시험체에 비하여 2가지 처리방법을 적용한 방염처리 시험체의 방염성능이 양호한 것으로 나왔으나, 일반적으로 사용되는 목재 표면 코팅 방식 방염도료의 성능보다는 떨어지는 것으로 보인다.¹⁰⁾ 방염처리법에 의한 차이에 있어서는 상업화 침보다 도포법으로 처리한 시험체가 상대적으로 더 우수한 성능을 보이는 것으로 나타났다. 각 시험체의 시험 직전 함수율을 측정하지 못하여 수치적으로 확인할

Table 4. Result of Inflammability Test

Measured Item	Water Treated	Retardant treated		Criteria
		Immersed Specimen	Spreaded Specimen	
Afterflame (s)	7.2	0	0	≤ 10
Afterglow (s)	11.4	0	0	≤ 30
Charred Length (cm)	15.7	10.5	9.3	≤ 20
Charred Area (cm ²)	88.7	47.5	39.7	≤ 50

수는 없었으나 방염 처리 과정 상, 24 h 간격으로 도포와 건조를 반복한 시험체는 마지막 도포 시점부터 55 °C 항온조에서 168 h 건조를 시작하는 시점까지 24 h 동안의 상온 건조 과정을 거쳤으므로, 55 °C 항온조 건조 시작 직전까지 약제에 담겨 있던 함침 처리 시험체에 비하여 함수율이 낮았을 것이라고 생각된다. 그럼에도 도포 처리 시험체가 상대적으로 양호한 결과를 보였으며, 따라서 본 시험에 사용한 방염 약제는 함침 처리보다는 도포 처리에 적합한 특성을 지녔다고 판단된다.

3.2 열방출률 및 착화특성

재료의 연소특성은 많은 변수에 의해 의존하는데, 목재의 경우 수중 및 밀도, 함수율, 목질에 대한 가열면의 방향 등이 그것이다.⁹⁾ 주요 시험결과를 Table 5에 나타

Table 5. Result of Heat Release Test

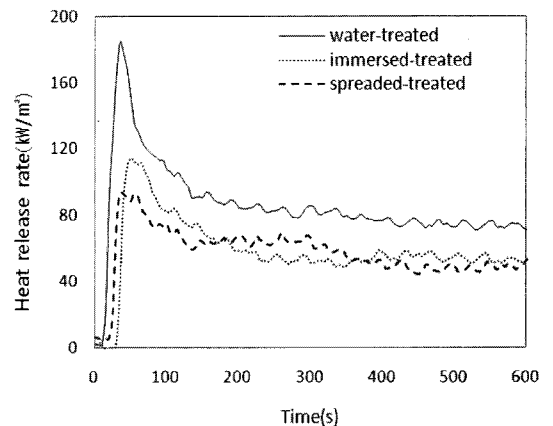
Measured Item	Water Treated	Retardant Treated	
		Immersed Specimen	Spreaded Specimen
Time to Ignition (s)	11	18	22
Max. Heat Release Rate (kW/m ²)	184.7	129.4	93.7
Total Heat Release (MJ/m ²)	51.8	42.9	34.5
Mean Heat Release Rate (kW/m ²)	88.4	73.9	59.96
Specific Extinction Area (m ² /kg)	34.12	30.28	21.65
Mass Loss (g)	42.1	33.9	28.4
CO Yield (kg/kg)	0.0089	0.0186	0.0158
CO ₂ Yield (kg/kg)	1.39	1.30	1.50

내었다. 열방출률(heat release rate, HRR)은 재료의 연소 특성을 대표하는 지수이며, 착화시간(time to ignition, TTI)과 착화가 일어나기까지의 시간은 방염 미처리 시험체가 11 s로 가장 짧았고, 상압함침 처리한 시험체 18 s, 도포 처리한 시험체 22 s의 순으로 길게 나타났다. 동종의 목재, 동일한 난연제 및 동일한 두께의 시험체 조건이므로 착화시간은 난연약제의 처리방법에 따른 난연 효과와 깊은 관련이 있는데, 본 결과로 보아 처리시간이 같게 주어진다면, 목재를 약제에 장시간 담그는 방법보다는 도포 후 건조를 반복하는 방법이 초기 착화시간의 지연에 있어서 난연성능을 더욱 향상시킴을 알 수 있었다.

최대열방출률은 난연 미처리 시험체는 184.7 kW/m², 상압함침 처리 시험체는 129.4 kW/m², 도포 처리 시험체는 93.7 kW/m²로 나타나 도포 처리한 시험체의 열방출률 성능이 가장 우수하게 나타났다. 이는 10분간 방출된 총 열량 항목에서도 동일한 양상을 보이며, 순서대로 51.8 MJ/m², 42.9 MJ/m², 34.5 MJ/m²로 나타났다. 시험체별 시간에 따른 열방출률을 Figure 2에 나타내었다.

Figure 2에 따르면, 미처리 시험체는 약 35 s 전후까지 열방출률이 급격히 증가하는 모습을 보이며, 난연 처리 시험체는 그보다 낮은 수준에서 최고치에 도달한 후 점진 감소한다. 도포 처리 시험체는 약 35 s 전후에서 감소세로 접어들지만, 상압함침 처리 시험체는 약 50 s까지 계속해서 증가한 후 감소하기 시작한다. 난연 약제가 목재 내부로 침투함에 있어서 목재를 72 h 동안 지속적으로 담그는 방법에 비하여, 같은 72 h이라는 시간 동안 표면에 도포 후 24 h 건조하는 것을 3회 반복하는 방법이 연소 지연 효과 면에서도 상대적으로 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

비소화면적(specific extinction area, SEA_{mean})은 재료

**Figure 2.** Heat release rate of the specimens.

의 발연량과 관련된 지수로, 미처리한 시험체의 $SEA_{mean}(34.12 \text{ m}^2/\text{kg})$ 가 함침 처리 시험체의 $SEA_{mean}(30.28 \text{ m}^2/\text{kg})$ 와 도포 처리 시험체의 $SEA_{mean}(21.65 \text{ m}^2/\text{kg})$ 보다 높았다. 미처리 시험체의 경우 착화 이후 열방출률이 급격히 증가하는 등 연소가 빠르게 진행되어 상대적으로 발연량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 도포 처리 시험체의 발연량이 가장 작은 것은 각 지수 상에서 상압함침 처리 시험체보다 상대적으로 더 낮은 연소 정도를 보였기 때문이라고 생각된다.

Figure 3은 각 시험체의 시간에 따른 질량의 변화를 나타내었으며, 도포법을 적용하여 처리한 시험체에서 연소가 가장 적게 진행되었음을 알 수 있었다.

재료의 연소 양상은 CO_2 와 CO 가스의 발생률(g/s)의 추이에서도 확인할 수 있다.¹⁰⁾ Figure 4는 CO 가스

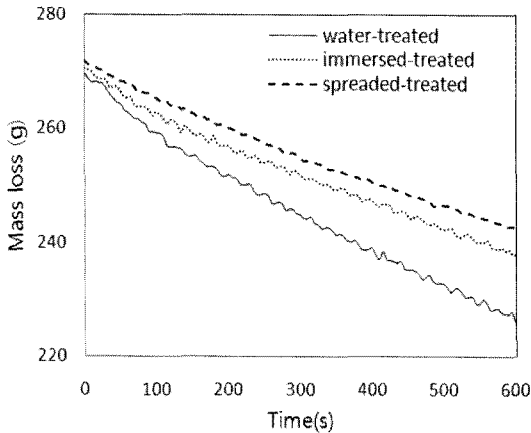


Figure 3. Mass of specimens during the test.

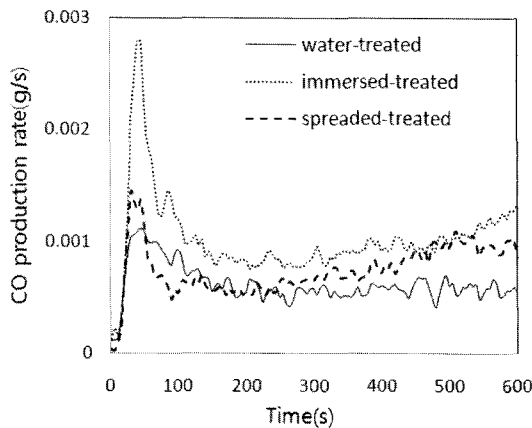


Figure 4. CO production rate curves of the specimens at 50 kW/m^2 radiant heat flux.

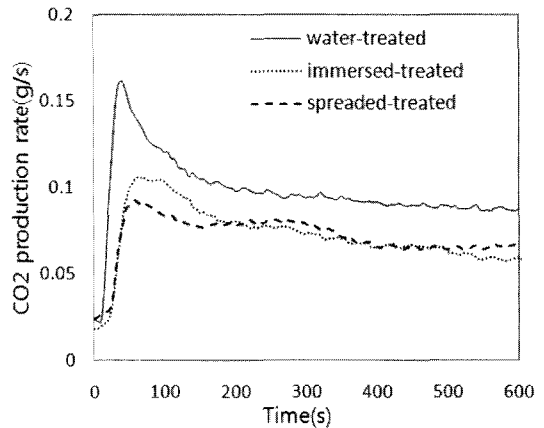


Figure 5. CO_2 production rate curves of the specimens at 50 kW/m^2 radiant heat flux.

의 발생률을, Figure 5는 CO_2 가스의 발생률을 나타내었다. CO 의 생성은 목재 표면 탄화층에 의해 산소의 접촉이 제한되기 때문에 발생한다고 보여지는데, 미처리 시험체의 경우 약 45 s 전후에서 최대 발생률을 보인 후 감소하다 일정한 수준을 유지하는 반면, 상압함침 처리 시험체는 약 40 s 전후에서, 도포 처리 시험체는 약 30 s 전후에서 최대치를 보인 후 감소하다 약 200 s 전후에서부터 다시 점진 증가하는 추세를 보인다.

Figure 5에서의 CO_2 가스 발생률은 연소의 진행 정도와 관련이 높은 모습을 보이는데, 이는 Figure 2의 그래프 경향과 흡사한 양상으로 보인다. CO 가스와 CO_2 가스의 발생량(kg/kg)에 감소한 질량을 곱하면 실제 발생한 가스의 양이 계산되는데, CO 가스 발생량은 두 가지 방염 처리 시험체의 경우가 미처리 시험체에 비하여 높았으나, CO_2 가스의 경우에는 미처리 시험체에 비하여 낮은 값을 보였다. CO/CO_2 의 비는 연기 노출독성과 관련되는데 미처리 시험체 0.0064, 상압함침 처리 시험체 0.0143, 도포 처리 시험체 0.0105로 방염 처리한 시험체의 연기 노출독성이 상대적으로 높게 나타났다. 동일한 복사열에 노출되었을 때, 연소의 정도는 방염 처리 시험체가 낮게 나타나지만 그 때 발생하는 연기의 노출독성에서는 미처리 시험체가 오히려 더 나은 결과를 보임을 알 수 있었다. 연소가스의 독성에 대한 정성정량적인 분석은 GC/MS 혹은 FT-IR을 이용한 추가적인 연구의 필요성을 남긴다.

4. 결 론

육송에 대하여 수용성 방염 약제를 상압함침법과 도

포법의 두 가지 방법으로 처리하여 방염성능시험과 열 방출률시험을 실시하였으며, 그 연소 특성을 증류수로 처리한 시험체와 비교 분석하였다.

1) 동일 방염 약제에 대해 두 가지 다른 처리방법을 적용한 시험체는 모두 목재에 대한 방염성능기준을 만족하였으며, 도포법을 적용한 시험체가 더욱 우수한 방염성능을 나타냈다. 이는 해당 방염 약제가 함침 처리보다는 도포 처리에 더욱 적합한 특성을 가지고 있기 때문이라고 판단된다.

2) 최대열방출률은 미처리 시험체, 상압함침 처리 시험체, 도포 처리 시험체에 대하여 각각 184.7 kW/m^2 , 129.4 kW/m^2 , 93.7 kW/m^2 로 나타났다. 이는 방염 처리에 의한 연소억제 효과를 나타내는 것이며, 본 방염 약제에 대해서는 72 h 함침보다는 동일 시간 동안이라면 표면 도포와 건조를 반복하는 것이 더욱 효과적이라고 판단된다.

3) 50 kW/m^2 의 복사열에 노출되어 착화까지의 시간은 미처리 시험체의 경우 8 s, 상압함침 처리 시험체 11s, 도포 처리에 의한 시험체 22 s로서 전술한 연소억제 효과로 설명되어 진다.

4) CO/CO_2 의 값은 미처리 시험체 0.0064, 상압함침 처리 시험체 0.0143, 도포 처리 시험체 0.0105로 미처리 시험체에 비하여 방염 처리한 시험체의 연기 노출 독성이 상대적으로 높게 나타났다.

5) 비소화면적으로 평가한 시험체의 발연양은 미처리 시험체 $34.12 \text{ m}^2/\text{kg}$, 함침 처리 시험체 $30.28 \text{ m}^2/\text{kg}$, 도포 처리 시험체 $21.65 \text{ m}^2/\text{kg}$ 로 방염 처리에 의해 발연양이 감소하였으며, 함침 처리보다는 도포 처리 방법이 발연에 의한 유해성이 낮게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(10첨단도시 B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 최근 10년간 화재통계 현황, 소방방재청, pp.55-56 (2005).
- Michael J. Karter, Jr., "Fire loss in the United States during 2009", NFPA, p.1(2010).
- E. Baysal, M. Altinok, M. Colak, S.K. Ozaki, and H. Toker, "Fire Resistance of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) Treated with Borates and Natural Extractives", *Bioresour. Technol.*, Vol.98, pp.1101-1105(2007).
- 하동명, "건축 내장재의 Flashover 시간 및 열방출량 예측에 관한 연구", *한국화재소방학회 논문지*, Vol.18, No.3(2004).
- 소방방재청고시 제2009-31호(2009.8), "방염성능의 기준", pp.2-4(2009).
- ISO 4770, "Sawn timber - Determination of the Average Moisture Content of a Lot"(1981).
- M. Hirschler, "Thermal Decomposition and Chemical Composition", pp.239-300, *American Chemical Society Symposium Series 797*(2001).
- ISO 5660-1, "Reaction-to-Fire Tests Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)" (2002).
- M.J. Spearpoint, "Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model", pp.30-46. *NIST GCR 99-7E75*, U.S.A.(1999).
- T.R. Hull and K.T. Paul, "Bench-scale Assessment of Combustion Toxicity-A Critical Analysis of Current Protocols", *Fire Safety Journal*, Vol.42, pp.340-365(2007).
- 오규형, 김황진, 이성은, "방염 처리에 따른 화재지연 효과 연구", *한국화재소방학회 논문지*, Vol.23, No.2, pp.111-116(2009).
- 박형주, 오규형, 김응식, 김홍, "난연처리된 Douglas Fir의 탄화특성에 관한 연구", *한국화재소방학회 논문지*, Vol.19, No.2, pp.105-110(2005).
- 신백우, 송영호, 이동호, 정국삼, "합성목재의 연소특성에 관한 연구", *한국화재소방학회 논문지*, Vol.24, No.6, pp.120-125(2010).
- 정영진, 진의, "실온에서 건조된 리기다 소나무와 밤나무의 연소특성", Vol.24, No.3, pp.86-92(2010).
- 김인범, 현성호, "방염처리된 단청목재의 방염성능 및 유독성에 관한 연구", *한국화재소방학회 논문지*, Vol.23, No.5, pp.66-71(2009).