

[Research Paper]

## 연소시험에 의한 붕소 화합물 처리 목재의 화재위험성

진 의 · 정영진\*<sup>†</sup>

강원대학교 소방방재연구센터, \*강원대학교 소방방재공학과

### Fire Risk of Wood Treated With Boron Compounds by Combustion Test

Eui Jin · Yeong-Jin Chung\*<sup>†</sup>

Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University

\*Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received May 31, 2018; Revised June 20, 2018; Accepted June 20, 2018)

#### 요 약

붕산과 5붕산암모늄으로 처리한 편백목재 시험편의 연소특성에 관한 실험을 ISO 5660-1 표준에 따른 콘칼로리미터를 이용하여 수행하였다. 그 결과 붕소화합물로 처리한 시험편의 화재성능지수(FPI)는 공시편보다 1.2~2.1배 증가하였고, 화재성장지수(FGI)는 공시편보다 1.6~8.4% 증가하였다. 또한 총연기발생률(TSR)은 공시편보다 9.0~28.3% 낮았다. 이것은 붕소화합물로 처리한 시험편이 난연효과로 탄화층을 생성하기 때문으로 이해된다. 공시편은 418 s에서 가장 높은 CO농도인 0.01112%를 보였으나 붕소화합물로 처리한 시험편은 공시편보다 13.2~37.5% 감소하였다. 따라서 붕소화합물로 처리한 목재는 화재위험성과 위해성이 낮아질 것으로 예상된다.

#### ABSTRACT

Experiments on the combustion characteristics of untreated wood specimens and also treated ones with boric acid and ammonium pentaborate were carried out using a cone calorimeter according to ISO 5660-1 standard. As a result, comparing to untreated specimen, the fire performance index (FPI) of the specimens treated with boron compounds increased by 1.2 to 2.1 times and the fire growth index (FGI) increased by 1.6 to 8.4%. Also, total smoke release rate (TSR) was 9.0 to 28.3% lower than that of the untreated specimen. It is understood that the test specimens treated with the boron compound produces a carbonized layer with a flame retarding effect. The highest CO concentration, 0.01112%, for the untreated specimen was observed at 418 s, but the specimens treated with boron compound decreased 13.2 to 37.5% compared to untreated specimen. Therefore, wood treated with boron compounds is expected to have lower fire hazards and risks.

**Keywords** : Fire performance index (FPI), Fire growth index (FGI), Fire safety, Boric acid (BA), Ammonium pentaborate (APB)

### 1. 서 론

목재는 친환경적이며, 물리·화학적 특성이 우수하기 때문에 일반 가정의 내구재 및 주거용 건축물에 이르기까지 건축물의 내·외장재로 널리 사용되고 있다. 일반적으로 목재는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌의 3 가지 종류의 고분자로 구성된다. 침엽수는 리그닌 25~35%, 셀룰로오스 40~44%, 헤미셀룰로오스 20~32%이며 활엽수는 리그닌 15~25%, 셀룰로오스 40~44%, 헤미셀룰로오스 23~40% 등의 비율로 이루어진다<sup>(1)</sup>. 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 및 리그닌의 열분해 온도는 240~350 °C, 200~260 °C 및 280~

500 °C<sup>(2)</sup>이며, 다른 건축 재료들에 비해 화재 시 열과 연기에 노출되었을 때 연소되기 쉽고 대류열과 복사열로 인해 오랫동안 분해가스를 방출하는 위험성을 안고 있다.

따라서 이와 같은 목재의 단점을 보완하기 위해 다양한 난연처리 방법들이 연구되어 왔다<sup>(3-6)</sup>. 화재 위험성을 감소시키기 위하여, 목재의 난연처리는 인화합물계, 질소화합물계, 붕소화합물계, 실리콘화합물계 등을 단독 또는 혼합하여 목재 및 목질재료에 주입, 도포, 침지 시키는 방법을 이용한다<sup>(7-10)</sup>. 난연제의 사용은 화재위험성을 감소시키는 효과는 있으나 일부 할로겐화합물 난연제는 인체 유해성이 밝혀져 사용이 금지되고 있다. 환경친화적인 난연제의 개

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [yjchung@kangwon.ac.kr](mailto:yjchung@kangwon.ac.kr), TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3119

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

발 방향으로 연구가 진행 중이며 인체에 무해한 난연제의 개발이 시급하다. 또한 기존의 난연제의 효과를 열적특성, 연기특성과 독성가스 유해성으로 재조명할 필요가 있다.

화재에 의한 인적 피해는 1차로 열에 의한 화상중심의 피해가 있으며, 화재시 발생하는 유독가스에 의한 2차 피해가 있다. 연소 성능을 효과적으로 하기위한 핵심 요소는 점화를 지연시키고 연소의 초기 단계에서 열, 연소열 및 연기와 가스 생성을 줄이는 것이다<sup>(11)</sup>. 그러므로 화재위험성은 가연물이 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다<sup>(12)</sup>. 이들 중 건자재의 화재 시 연소 동안 발생하는 열방출률(heat release rate)은 화재 시 대상 물질의 잠재적인 화재 위험성을 나타내기 때문에 가장 중요한 특성이 된다. 연소특성을 측정하기 위하여 많은 기술들이 발전되어 왔는데 그 중의 하나가 콘칼로리미터(cone calorimeter)이다<sup>(13)</sup>. 콘칼로리미터에 의한 열방출률 측정은 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다<sup>(14)</sup>.

난연제로는 많은 부분이 인계화합물 중심으로 연구되어 왔으나 일부 유기인계 구조를 갖는 화합물은 열안정성이나 내구성 면에서 아직 개선의 여지가 많다<sup>(15)</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해 소재와의 친화성이 좋고, 내열성, 효율 높은 감연성을 제공할 목적으로 목재에 침투가 용이한 수용성의 붕소계 화합물을 기보고한 농도와 다르게 사용하였다<sup>(16)</sup>.

본 연구에서는 붕산 및 5붕산암모늄 수용액을 건축물의 내장재로 주로 사용되고 있는 편백목재에 도포한 후 콘칼로리미터를 이용하여 외부 복사열원에 의한 열방출률, 질량감소속도, 총연기방출률 등을 측정하여 화재위험성을 평가하고 난연 목재로서의 초기 화재 시 화재지연 효과가 있는지를 확인하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 목재는 편백나무로서 시중에서 일반 건자재용을 구입한 후 2년 동안 자연 건조 하였다. 화학적 첨가제로서 붕산(순도 99.5%)은 kanto chemical사에서, 5붕산암모늄(순도 99%)는 sigma aldrich사에서 구입하여 사용하였다. 모든 시약은 특급시약을 구입하였고 정제 없이 그대로 사용하였다.

### 2.2 목재시험편의 제조

붕산과 5붕산암모늄을 각각 증류수에 녹여 15 wt% 수용액(BA15, APB15)을 만들었다. 각각의 15 wt% 용액을 1 : 1 비율로 섞어 혼합 용액(BA15/APB15)을 제조하였다. 수용액으로 시험편의 한 면에 붓칠하고 난 뒤 6 h 동안 상온에서 자연 건조시킨 후, 다시 같은 방법으로 2회 더 실시하였

다. 모든 용액은 가열하여 녹인 후 사용하였다. 공시편은 같은 목재를 증류수로 붓칠한 후 위와 같은 방법으로 건조시켜 비교 데이터로 이용하였다.

### 2.3 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법에 의해 dual cone calorimeter (Fire Testing Technology)를 이용하여 열 유속(heat flux) 50 kW/m<sup>2</sup> 조건에서 수행 하였다<sup>(12)</sup>. 사용한 시험편의 두께는 10 mm로서 크기는 100 mm × 100 mm (±2)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 5%에서 향량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감쌌다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 ± 2% 이내, 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m<sup>3</sup>/s로 설정하였다. 시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 배출량 중 분석기로 들어가는 공기 유속을 3.5 L/min이 되도록 일정하게 유지시켰으며 시험편은 충분히 연소가 될 수 있도록 공기 중에 그대로 노출시켰다. 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연기 발생률은 연소 생성물 유동에 따른 빛의 감쇠를 측정하는 것으로 계산하였다. 시험체의 불꽃 발생 유무에 관계없이 연기에 따른 가려짐을 전 시험 기간에 걸쳐 기록하였다. 대기 조건에서 시험체를 연소시켜 감광, 배기가스 유량 및 시험체의 질량 감소율을 측정하였고 감광은 배기 덕트에 있는 연기를 통해 투과되는 빛 세기의 비율로서 측정하였다. 이 비율은 Bouguer 법칙에 따라 감쇠 계수를 계산하는데 사용되었고 시험 결과는 노출된 시험체의 표면적으로 규격화된 연기 발생량 및 연기 발생률로 나타내었다. 연기 발생률은 감쇠 계수와 배기 덕트에서 연기의 체적 유량의 곱으로 계산되며 연기 발생량은 연기 발생률을 고려한 시간대에서의 누적분으로 얻었다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min 간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 3회 실험값을 평균하여 데이터로 이용하였다. 연소 시킨 후 화재 해석에 필요한 인자인 연기 및 유해가스 관련 지수를 구하였다. Figure 1에 콘칼로리미터 장비 사진을 나타내었다.

### 2.4 함수율 측정

함수율은 일정량의 시료를 105 °C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시료의 중량을 4 h 간격으로 더 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식을 이용하여 계산하였다<sup>(17)</sup>.

$$MC (\%) = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

Wm: 함수율을 구하고자하는 시험편의 중량



Figure 1. The photograph of cone calorimeter equipment.

Wd: 건조시킨 후의 절대건조 중량

자연 건조된 편백나무의 함수율은 7.3 wt%였다. 화학첨가제로 처리된 편백나무 시험편의 초기무게는 Table 1에 나타낸 바와 같이 BA15, 1, APB15, 2, 15 wt% 용액으로 혼합된 용액(BA15/APB15), 3에 대하여 각각 39.61 g, 39.05 g, 40.15 g으로 나타났다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 콘칼로리미터 분석

##### 3.1.1 착화 시간(Time to ignition, TTI) 및 화재 성능 지수 (Fire performance index, FPI)

Table 2에 나타낸 바와 같이 열유속 50 kW/m<sup>2</sup>에서 공시편은 6 s 후에 착화했다. 붕소화합물로 처리된 시험편의 착화시간(TTI)은 공시편보다 2~7 s 정도 지연되었고 BA15/APB15는 13 s로 116.7% 더 긴 착화시간을 나타내었다. 본 연구에서는 붕소합물의 내화 효능을 나타내기 위하여 화재성능지수 (FPI)를 검토하였다. 사용된 데이터인 TTI 및 열 방출률의 초기 피크의 최대값은 물질의 화재 위험성을 특성화한다<sup>(18)</sup>.

이는 목재의 FPI 값과 플래시오버의 시간과 상관성이 있으며<sup>(19)</sup>, FPI 값이 증가할수록 화재 안전성 또한 증가된다<sup>(20)</sup>.

Table 1. Specification of Cypress Specimens Painted with 15 wt% Boron Compounds Solutions

Samples (Cypress)	Initial Mass (g)
Uncoated Specimen	38.83
15 wt% Boric Acid (BA4), 1	39.61
15 wt% Ammonium Pentaborate (APB4), 2	39.05
15 wt% Boric acid : 15 wt% Ammonium Pentaborate (BA4/APB4), 3	40.15

Table 2. Fire Performance Index of Cypress Specimens Painted with 15 wt% Boron Compounds Solutions During Cone Calorimeter Test

Materials	TTI (s)	HRR <sub>peak</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	FPI (s·m <sup>2</sup> /kW)
Uncoated	6	210.6	0.0284
BA15	8	213.8	0.0374
APB15	8	228.3	0.0350
BA15/APB15	13	217.5	0.0597

FPI를 구하는 식은 다음과 같다.

$$FPI = \frac{TTI(s)}{HRR_{peak}(kW/m^2)} \quad (2)$$

이 식에서 TTI는 착화시간(s)이고, HRR<sub>peak</sub>는 최대열방출율(kW/m<sup>2</sup>)이다. Table 2에 나타낸 바와 같이 붕소화합물로 처리한 시험편의 FPI는 공시편보다 1.2~2.1배 증가하였다. 이것은 붕소화합물로 처리한 목재의 화재 위험성이 낮아진다는 것을 제시한다.

화재성장지수(FGI)는 HRR<sub>peak</sub>와 HRR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간으로 정의된다. FGI 값이 클수록 HRR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간이 짧아지며, 그 재료의 화재 위험성이 커진다<sup>(21)</sup>. FPI와 FGI는 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으로, 콘칼로리미터 실험에서 재료의 화재 안전성을 파악하는데 종합적인 평가로 볼 수 있다<sup>(22)</sup>.

FGI를 구하는 식은 다음과 같다

$$FGI = \frac{HRR_{peak}(kW/m^2)}{Time\ to\ HRR_{peak}(s)} \quad (3)$$

이 식에서 HRR<sub>peak</sub>는 최대열방출율(kW/m<sup>2</sup>)이고, Time to HRR<sub>peak</sub>는 최대열방출에 도달하는 시간(s)이다. 50 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에서는 Table 3에 나타낸 바와 같이 붕소화합물로 처리된 시험편의 FGI는 공시편 보다 1.6~8.4% 증가하였다. 편백목재의 FGI의 값이 클수록 화재 위험성은 높아지고, 화재 안정성은 낮아지므로 붕소화합물로 처리한 목재의 화재 위험성이 높아졌다는 것은 붕소화합물이 화재성장의 위험성을 개선하지 못한 것으로 이는 최대 HRR값이 연소초기에 나타났기 때문이다.

##### 3.1.2 질량 손실 및 열 방출

**Table 3.** Fire growth index of Cypress Specimens Painted with 15 wt% Boron Compounds Solutions During Cone Calorimeter Test

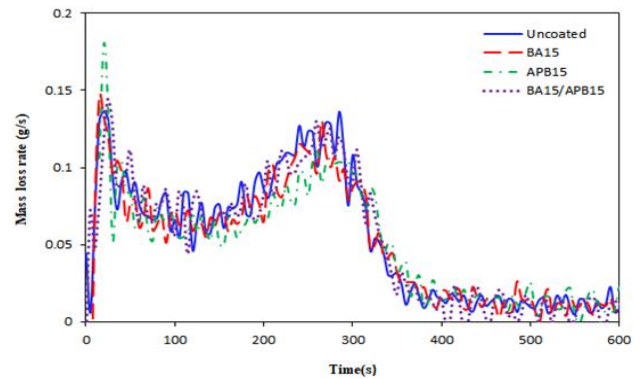
Samples	HRR <sub>peak</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	Time to HRR <sub>peak</sub> (s)	FGI (kW/m <sup>2</sup> ·s)
Uncoated	210.6	25	8.424
BA15	213.8	25	8.552
APB15	228.3	25	9.132
BA15/APB15	217.5	25	8.700

Figure 2에 나타난 바와 같이 질량 손실 속도 곡선의 두 가지 피크는 대략 20 s와 267 s에서 나타났으며 각각 목재의 불꽃연소와 불꽃영역과 일치 한다. 방출 된 가스는 에어로졸, 케톤류, 알데히드류 등의 저 분자량 휘발성 물질, 유기산, 방향족 탄화수소 등으로 구성 된다<sup>(23)</sup>. Figure 2에서 보여준 바와 같이 처리되지 않은 목재와 처리된 목재의 질량 손실률 값이 흩어져서 얻어진 것은 연소맥동으로 인한 것으로 볼 수 있다. 이것은 가연성 가스가 갑자기 방출되고 화재에 더 큰 표면이 노출됨으로써 나타나는 목재 균열의 결과로 이해된다. Figure 3에 시간에 따른 질량 잔류량을 나타내었다. 모든 시편들이 355 s 이내에서 급격히 변화되었으며, 355 s에서 공시편은 75.76%, 붕소화합물로 처리된 시편은 68.15 ~ 73.29%의 질량손실을 보이고 있다. 이는 목재의 가연성으로 인하여 화재초기가 화재위험성이 높다는 것을 알 수 있다. 실험 완료 후 공시편은 99.66% 질량 손실을 보이고 있으나 붕소화합물로 처리한 시편은 93.91 ~ 95.51%의 질량 손실을 보이고 있다. 난연제 효과로 인해 약간의 숯을 얻을 수 있었으며 BA15/ APB15의 숯은 다른 시편과 비교하여 완전히 검은색이 얻어졌다.

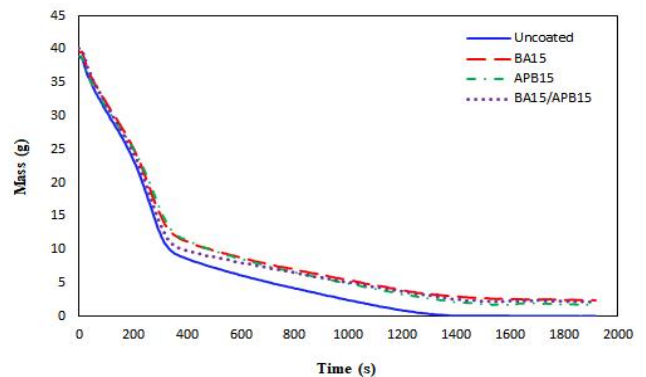
Table 4에 나타난 바와 같이 첨가제로 처리한 시험편의 연소시간(FBT)은 공시편보다 0.3~1.4% 증가되었다. 그러나 BA15/APB15 처리 시험편은 오히려 1.9% 감소하였다. 이는 배합된 난연제가 열분해 시에 유리막을 형성하여 연소 억제 작용 효과를 높여 연소가 정지되는 것으로 이해된다<sup>(24)</sup>.

BA15는 열분해 시에 물을 잃고 300 °C에서 유리상태의 산화붕소를 남기고, APB15는 440.5 °C에서 물과 암모니아를 잃고 유리상태의 산화붕소로 남는다<sup>(25)</sup>. 목재의 열분해로 생성된 자유 라디칼숯을 생성하는 폴리머화 및 열분해 생성물의 방향족화를 수행한다. 또한 BA는 숯 수율을 증가시켜 산소를 제거하기 위한 탈수 반응을 촉진시킬 수 있다<sup>(26)</sup>. 생성된 산화붕소는 숯생성 상의 활성화 에너지를 감소시켜 숯생성이 많아지므로 숯의 무연연소를 지연시킬 수 있다. 이것은 연소 억제 효과를 향상시킨다.

이것은 초기 단계에서 축적된 가연성 열분해물의 연소에 의해 설명될 수 있다. 그리고 표면에 형성된 숯층은 연소가스의 생산을 억제한다<sup>(18)</sup>. Figure 4에 나타난 바와 같이 2차 열분해의 최대 HRR 피크는 숯의 연소로 인해 약 265



**Figure 2.** Mass loss rate curves of cypress specimens painted with 15 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.



**Figure 3.** Mass residual curves of cypress specimens painted with 15 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

~320 s 대에서 발생하였다. BA15/APB15은 50 s에서 190 s 사이의 시험 기간에 HRR 강도가 가장 낮았으며, 붕소화합물로 처리된 시편의 2차 최대 HRR 피크는 공시편과 비교하여 7.7~22.6% 감소되었다. MARHE에 관한 Table 4 및 Figure 5의 경우도 HRR와 유사한 경향을 나타내었다.

기계장치의 노이즈(Noise)에 의한 값의 오차를 최소화할 수 있는 새로운 열방출률 값인 최대평균열방사율(Maximum Average Rate of Heat Emission; MARHE)은 총열방출률을 시간으로 나눈 값이다<sup>(27,28)</sup>. 화재 안전성과 관련하여 MARHE는 실제 규모 조건에서 화재 발생 경향에 대한 좋은 척도로 간주 될 수 있으며, MARHE 값이 높을수록 시편의 위험 수준이 높다는 것을 나타낸다<sup>(29)</sup>. ARHE는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$ARHE(t_n) = \frac{\sum_2^n ((t_n - t_{n-1}) \times \frac{q_n + q_{n-1}}{2})}{t_n - t_0} \quad (4)$$

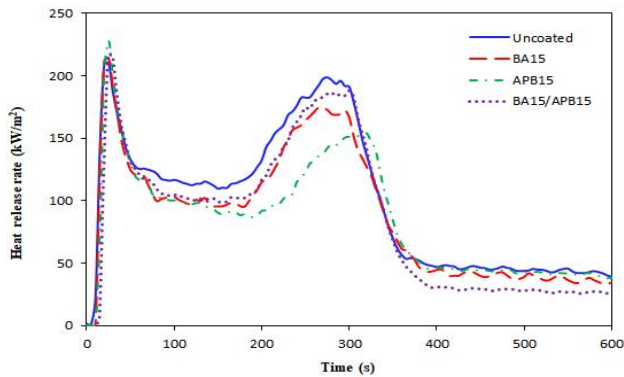
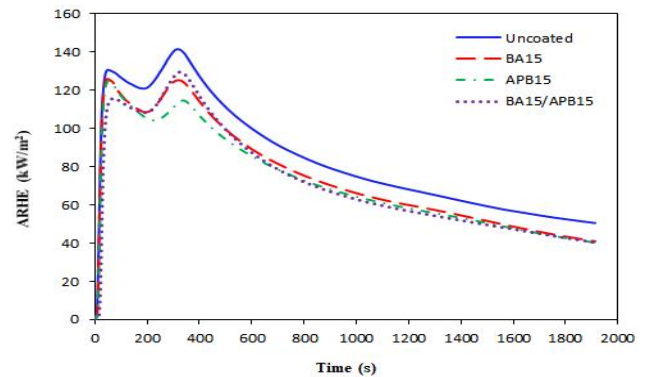
$t_n$ 은 시간이며  $q_n$ 은  $t_n$ 에서의 열방출율이다.

Table 4에서 보듯이 붕소화합물로 처리된 시편의 MARHE는 공시편과 비교하여 5.7~11.6% 감소되었다. 이것으로

**Table 4.** Combustion Properties of Cypress Specimens Painted with 15 wt% Boron Compounds Solutions During Cone Calorimeter Test

Samples (Cypress)	TTI <sup>a</sup> (s)	Mass Lost (g)	HRR <sub>peak</sub> <sup>b</sup> (kW/m <sup>2</sup> ) at Time (s)	MARHE <sup>c</sup> (kW/m <sup>2</sup> )
Uncoated	6	38.7	210.6 at 25	141.6
BA15	8	37.2	213.8 at 25	133.4
APB15	8	37.3	228.3 at 25	125.1
BA15/APB15	13	37.9	217.5 at 25	129.3
Samples (Cypress)	TSR <sup>d</sup> (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	CO (%) at Time (s)	FBT <sup>e</sup> (s)	
Uncoated	453.5	0.01112 at 418	369	
BA15	338.6	0.00965 at 500	370	
APB15	325.0	0.00932 at 530	374	
BA15/APB15	412.7	0.00763 at 418	362	

<sup>a</sup>time to ignition; <sup>b</sup>peak heat release rate; <sup>c</sup>maximum average rate of heat emission; <sup>d</sup>total smoke release; <sup>e</sup>flame burning time

**Figure 4.** Heat release rate curves of cypress specimens painted with 15 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.**Figure 5.** Average rate of heat emission curves of cypress specimens painted with 15 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

화재안전성이 공시편보다 높아졌음을 알 수 있다.

### 3.1.3 탄소 산화물의 연기 생성 및 수율

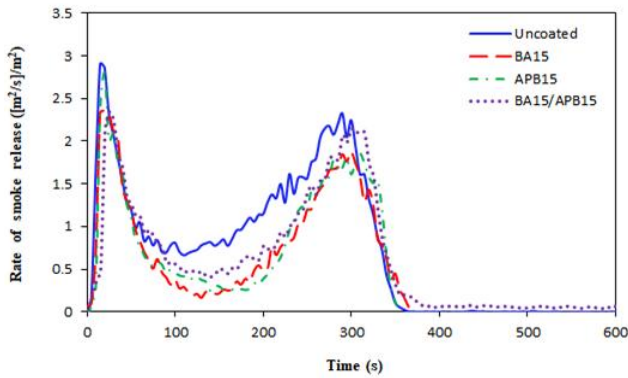
연기는 일반적으로 화재 현장에서 발생하는 공기 및 열분해 산물을 의미한다. 연기는 가스, 고체 입자 및 액체 방울을 포함하며 세계 화재 통계에 따르면 건물 화재로 인한 부상 및 사망은 대개 연기 흡입으로 인해 발생한다. 연기는 연소 중에 생성되며 빛과 상호 작용하여 시야 확보를 어렵게 하며 유해 및 독성 물질을 포함하므로 인체 위험 가능성이 크다. 화재 피해자는 화염에 닿기 전에 연기, 독성 가스 또는 산소 부족에 노출되어 사망한다. 생명체를 위협하는 이러한 조건은 건축물 화재 시 가구 및 관련 구조재와 같은 내용물이 연소될 때 발생하므로 연기거동을 확인하는 것이 중요해진다.

Figure 6에 보여준 바와 같이 처리되지 않은 목재의 연기 방출률(RSR)은 연소 시간과 함께 증가한다. 그리고 약 15 s에서 첫 번째 피크에 빠르게 도달한다. 이 기간 동안 방출되는 연기는 에어로졸과 분해된 헤미셀룰로오스에서 나오

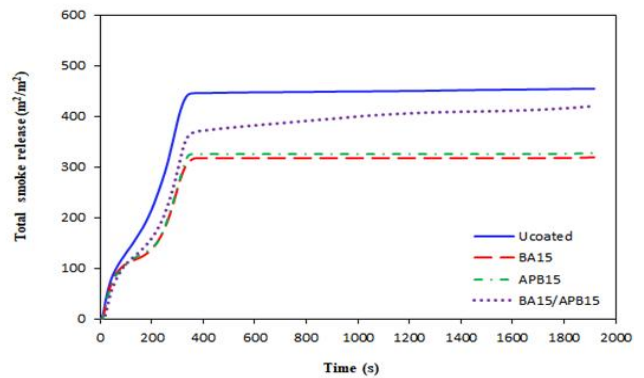
는 가스, 수증기 및 휘발성 목재 추출물로 구성된다. 그다음 두 번째 피크가 불꽃영역에서 숯의 균열에 의해 최대값에 도달된다. 난연제로 처리 한 나무의 2차 RSR은 공시편보다 9.5 ~ 24.8% 감소되었다. 이것은 공시편의 더 빠르고 더 충분한 연소 때문이다.

Figure 7에 나타난 바와 같이 목재 공시편의 총 연기방출율(TSR)은 350 s 부근까지 증가하다가 그 이후의 시간에서는 거의 일정하게 유지되었다. 붕소화합물로 처리된 시험편의 TSR은 처리되지 않은 공시편보다 9.0% ~ 28.3% 낮았다. 공시편의 높은 TSR은 보다 효율적인 연소때문이지만, 붕소화합물로 처리한 시험편은 난연효과로 탄화층을 생성하기 때문으로 이해된다. 그러므로 붕소화합물로 처리된 시험편의 억제된 연기 발생은 화재 시에 연기 위험을 감소시킬 수 있고 공공의 다목적 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

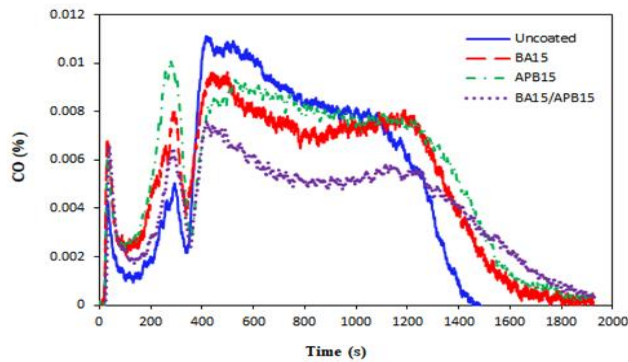
Figure 8에 나타난 바와 같이 공시편은 연소 32 s 후에 일산화탄소를 빠르게 방출하기 시작했으며 294 s, 418 s에



**Figure 6.** Rate of smoke release curves of cypress specimens painted with 15 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.



**Figure 7.** Total Smoke release curves of cypress specimens painted with 15 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.



**Figure 8.** CO (%) of cypress specimens painted with 15 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

서 CO의 농도가 크게 증가했다. 이것은 이미 생성된 고농축의 이산화탄소와 생성된 숯 층의 장벽으로 인해 생기는 목재에 대한 O<sub>2</sub>의 접근이 방해되기 때문으로 이해된다<sup>(30)</sup>. 2차 열분해에서 발생된 최대 피크(약 418 s)는 셀룰로오스/리그닌 분해로 인한 가연성 가스의 생성에 기인한다. CO는 주로 불꽃연소와 백열 연소기간 동안에 생성되었다. 공시편은 418 s에서 가장 높은 농도인 0.01112%를 보였으며 붕소 화합물로 처리한 시험편은 공시편과 비교하여 최대 CO 농도가 13.2~37.5% 감소하였다.

#### 4. 결 론

붕산과 5붕산암모늄으로 처리한 편백나무 시험편의 연소특성에 관한 실험을 ISO 5660-1 표준에 따른 콘칼로리미터를 이용하여 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 붕소화합물로 처리한 시험편의 FPI는 공시편보다 1.2~2.1배 증가하였다. 이것은 붕소화합물로 처리한 목재의 화재 안전성이 높아지는 것으로 이해된다.

2) 붕소화합물로 처리된 시험편의 FGI는 공시편보다 1.6~8.4% 증가하였다. 이것은 붕소화합물로 처리한 목재의 화재 위험성이 높아질 수 있을 것으로 이해된다.

3) 붕소화합물로 처리된 시험편의 TSR은 처리되지 않은 공시편보다 9.0%~28.3% 낮았다. 공시편의 높은 TSR은 보다 효율적인 연소 때문이지만, 붕소화합물로 처리한 시험편의 낮은 TSR은 난연효과로 탄화층을 생성하기 때문으로 이해된다.

4) CO는 주로 불꽃연소와 백열 연소기간 동안에 생성되었다. 공시편은 418 s에서 가장 높은 농도인 0.01112%를 보였으나 붕소화합물로 처리한 시험편은 공시편보다 13.2~37.5% 감소하였다.

따라서 15 wt% 붕소화합물로 처리한 목재는 화재위험성이 낮아졌으며 연기 및 일산화탄소 발생량이 감소됨으로써 화재 위험성이 낮아졌다.

#### 후 기

이 논문은 2016년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2016R1D1A3B03933993).

#### References

1. V. Babrauskas, "Ignition of Wood: A Review of the State of the Art", pp. 71-88 In: Interflam 2001, Interscience Communications Ltd., London, UK, pp. 71-88 (2001).
2. M. Janssens and B. Douglas, "Wood and Wood Products", In: Handbook of Building Materials for Fire Protection, McGraw Hill, New York, USA (2004).
3. R. Kozłowski and M. Hewig, "1st Int Conf. Progress in Flame Retardancy and Flammability Testing", Institute of

- Natural Fibres, Pozman, Poland (1995).
4. R. Stevens, S. E. Daan, R. Bezemer and A. Kranenbarg, "The Structure-Activity Relationship of Retardant Phosphorus Compounds in Wood", *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 91, No. 4, pp. 832-841 (2006).
  5. Y. J. Chung, Y. H. Kim and S. B. Kim, "Flame Retardant Properties of Polyurethane Produced by the Addition of Phosphorous Containing Polyurethane Oligomers (II)", *J. Ind. Chem. Eng.*, Vol. 15, No. 6, pp. 888-893 (2009).
  6. Y. J. Chung, "Flame Retardancy of Veneers Treated by Ammonium Salts", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 18, No. 3, pp. 251-255 (2007).
  7. J. Z. Xu, M. Gao, H. Z. Guo, X. L. Liu, Z. Li, H. Wang, C. M. Tian, J. Z. Xu et al., "Study on the Thermal Degradation of Cellulosic Fiber Treated with Flame Retardants", *J. Fire Sciences*, Vol. 20, No. 3, pp. 227-235 (2002).
  8. O. Grexa and H. Lubke, "Flammability Parameters of Wood Tested on a Cone Calorimeter", *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 74, No. 3, pp. 427-432 (2001).
  9. B. Garba, "Effects of Zine Borate as Flame Retardant Formulation on Some Tropical Woods", *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 64, No. 3, pp. 517-522 (1999).
  10. D. S. Baker, "Wood in Fire, Flame Spread and Flame Retardant Treatments", *Chemistry and Industry (London)*, Vol. 8, No. 14, pp. 485-490 (1981).
  11. E. Mikkola, "Fire Retardants and Product Behaviour in Fire Tests", *Polym. Int.*, Vol. 49, No. 10, pp. 1222-1225 (2000).
  12. ISO 5660-1, "Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method) and Smoke Production Rate (Dynamic Measurement)", Geneva, Switzerland (2015).
  13. V. Babrauskas, "New Technology to reduce Fire Losses and Costs", In S. J. Grayson and D. A. Smith (Eds.), Elsevier Applied Science Publisher, London, UK (1986).
  14. M. M. Hirschler, "Thermal Decomposition and Chemical Composition", *Fire and Polymers*, Chapter 23, pp. 293-306, ACS Symposium Series Vol. 797, American Chemical Society, Washington, DC, USA (2001).
  15. C. H. Lee, C. W. Lee, J. W. Kim, C. K. Suh and K. M. Kim, "Organic Phosphorus-Nitrogen Compounds, Manufacturing Method and Compositions of Flame Retardants containing Organic Phosphorus-Nitrogen Compounds", *Korean Patent 2011-0034978* (2011).
  16. Y. J. Chung and E. Jin, "Combustion Characteristics of Cypress Specimens Painted with Solutions of Boron Compounds", *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 7-12 (2018).
  17. W. T. Simpson, "Wood Handbook-Wood as an Engineering Material", Chapter 12, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1987).
  18. D. C. O. Marney, L. J. Russell and R. Mann, "Fire Performance of Wood (*Pinus Radiata*) Treated with Fire Retardants and a Wood Preservative", *Fire and Materials*, Vol. 32, No. 6, pp. 357-370 (2008).
  19. B. Wang, Q. Tang, N. Hong, L. Song, L. Wang, Y. Shi and Y. Hu, "Effect of Cellulose Acetate Butyrate Microencapsulated Ammonium Polyphosphate on the Flame Retardancy, Mechanical, Electrical, and Thermal Properties of Intumescent Flame-Retardant Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer/Microencapsulated Ammonium Polyphosphate/Polyamide-6 Blends", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 3, No. 9, pp. 3754-3761 (2011).
  20. C. Jiao, X. Chen and J. Zhang, "Synergistic Effects of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with Layered Double Hydroxides in EVA/LDH Composites", *J. Fire Sci*, Vol. 27, No. 5, pp. 465-479 (2009).
  21. L. Liu, J. Hu, J. Zhuo, C. Jiao, X. Chen and S. Li, "Synergistic Flame Retardant Effects between Hollow Glass Microspheres and Magnesium Hydroxide in Ethylene-Vinyl Acetate Composites", *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 104, No. 6, pp. 87-94 (2014).
  22. S. Fang, Y. Hu, L. Song, J. Zhan and Q. He, "Mechanical Properties, Fire Performance and Thermal Stability of Magnesium Hydroxide Sulfate Hydrate Whiskers Flame Retardant Silicone Rubber", *J. Mater. Sci.*, Vol. 43, No. 3, pp. 1057-1062 (2008).
  23. E. Hedberg, A. Kristensson, M. Ohlsson, C. Johansson, P.A. Johansson, E. Swietlicki, V. Vesely, U. Wideqvist, et al. "Chemical and Physical Characterization of Emissions from Birch Wood Combustion in a Wood Stove", *Atmos. Environ.*, Vol. 36, No. 30, pp. 4823-4837 (2002).
  24. M. Jimenez, S. Duquesne and S. Bourbigot, "Intumescent Fire Protective Coating: Toward a better understanding their Mechanism of Action", *Thermochimica Acta*, Vol. 449, No. 1-2, pp. 16-26 (2006).
  25. T. Balakrishnan, G. Bhaqavannarayana and K. Ramamurthi, "Growth, Structural, Optical, Thermal and Mechanical Properties of Ammonium Pentaborate Single Crystal", *Spectrochimica Acta Part A*, Vol. 71, No. 2, pp. 578-583 (2008).
  26. Q. Wang, J. Li and J. E. Winady, "Chemical Mechanism of Fire Retardance of Boric Acid on Wood", *Wood Sci. & Technol.* Vol. 38, No. 5, pp. 375-389 (2004).
  27. J. Gray, G. J. Duggan, S. J. Grayson and S. Kummar, "New Fire Classifications and Fire Test Methods for the European

- Railway Industry”, Interscience Communications Ltd., UK (2015).
28. Association Francaise de Normalisation, “Railway Applications-Fire Protection on Railway Vechicles -Part 2: Requirements for Fire Behavior of Materials and Components”, NF EN 45545-2, La Plaine Saint-Denis, France (2013).
29. J. S. Bermejo, L. G. Rovira and R. Fernandez, “Fire-Retardant Performance of Intumescent Coatings Using Halloysites as a novel Fire-Retardant Additive”, *Jacobs J. Nanomed. Nanotech.*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-9 (2015).
30. R. H. Hurt and J. M. Calo, “Semi-Global Intrinsic Kinetics for Char Combustion Modelling”, *Combust. Flame*, Vol. 125, No. 3, pp 1138-1149 (2001).