

[Research Paper]

붕소 화합물로 처리된 편백나무 시험편의 연소특성

정영진[†] · 진 의^{*}

강원대학교 소방방재공학과, *강원대학교 소방방재연구센터

Combustion Characteristics of Cypress Specimens Painted with Solutions of Boron Compounds

Yeong-Jin Chung[†] · Eui Jin^{*}

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

*Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University

(Received March 21, 2018; Revised April 2, 2018; Accepted April 2, 2018)

요 약

붕산과 5붕산암모늄으로 처리한 편백나무 시험편의 연소특성에 관한 실험을 ISO 5660-1 표준에 따른 콘칼로리미터를 이용하여 수행하였다. 그 결과 붕산과 5붕산암모늄의 혼합된 투여는 그들의 시너지 효과에 의해 화재성능지수 값을 향상시켰다. 또한 붕소 화합물로 처리한 시험편은 공시편보다 총열방출을 값이 6.1~14.1% 감소되었다. 붕소 화합물로 처리된 시편의 총연기방출율은 연소과정 전반에 걸쳐 감소되었으나 붕산/5붕산암모늄은 예외였다. 일산화탄소 최대농도는 15.8~25.5% 정도 감소하는 경향성이 있었다. 대체적으로 난연제로 처리한 목재는 화재 위험성이 낮아진 것으로 이해된다.

ABSTRACT

The combustion characteristics of cypress wood coated with boric acid (BA) and ammonium pentaborate (APB) were examined using a cone calorimeter according to the ISO 5660-1 standard. As a result, the combined specimens of boric acid and ammonium pentaborate (BA/APB) led to an improved fire performance index due to their synergistic effect. In addition, the total heat release values of the specimen coated with the boron compounds were 6.1~14.1% lower than that of the base specimen. The total smoke release rate (TSR) of the specimens coated with the boron compound decreased throughout the combustion process, except for BA/APB. The maximum concentration of carbon monoxide was reduced by 15.8~25.5%. In general, wood treated with flame retardants has a lower fire hazard.

Keywords : Fire performance index (FPI), Fire safety, Boric acid (BA), Ammonium pentaborate (APB), Total smoke release (TSR)

1. 서 론

목재는 친환경적이며, 물리·화학적 특성이 우수하기 때문에 일반 가정의 내구재 및 주거용 건축물에 이르기까지 건축물의 내·외장재로 널리 사용되고 있다. 그러나 목재는 다른 건축재료들에 비해 화재 시 열과 연기에 노출되었을 때 연소되기 쉬움으로써 화재안전성 측면에서 높은 위험성을 항상 내포하고 있다. 따라서 이와같은 목재의 단점을 보완하기 위해 다양한 난연처리 방법들이 연구되어 왔다⁽¹⁻⁴⁾. 목재의 난연처리는 인화합물계, 질소화합물계, 붕

소화합물계 등을 단독 또는 혼합하여 목재 및 목질재료에 주입, 도포, 침지 등의 방법을 이용한다⁽⁵⁻⁸⁾.

화재발생 시 가연물의 안전성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다⁽⁹⁾. 이들 중 열방출률은 화재 시에 대상 물질의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다. 열방출률을 측정하기 위하여 많은 기술들이 발전되어 왔는데 그 중의 하나가 콘칼로리미터(cone calorimeter)이다⁽¹⁰⁾. 콘칼로리미터에 의한 열방출률 측정은 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되

[†] Corresponding Author, E-Mail: yjchung@kangwon.ac.kr, TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3119

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

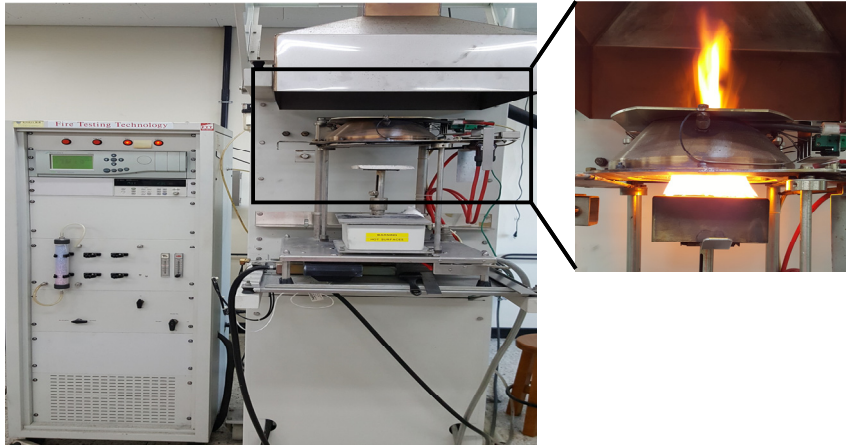


Figure 1. The photograph of cone calorimeter equipment.

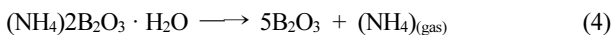
는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다⁽¹¹⁾.

난연제로서 일부 유기인계 구조를 갖는 화합물은 열안정성이나 내구성 면에서 아직 개선의 여지가 많다⁽¹²⁾. 따라서 내열성, 소재와의 친화성이 뛰어난 형태의 효율 높은 감연성을 제공하기 위해, 목재에 침투가 용이한 수용성의 붕소계 화합물을 사용하여 이러한 문제점을 해결할 수 있다고 판단하였다.

붕산(Boric acid)은 무색 투명한 조각 모양 6변형의 광택이 있는 결정으로서 가열하면 첫 단계는 열분해에 의한 탈수화에 의해 메타붕산(Metaboric acid)으로 된다. 그 다음 메타붕산의 탈수화에 의하여 물을 방출하고 유리 상태의 산화붕소(B_2O_3)가 된다. 이 때 $140\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도에서 열적으로 안정하며, $300\text{ }^\circ\text{C}$ 에서는 유리상이 붕괴되기 시작한다⁽¹³⁾.



또한 5붕산암모늄(Ammonium pentaborate, $NH_4B_5O_8 = 1/2 [(NH_4)_2O \cdot 5B_2O_3]$)은 공기 중에서 안정되지만, 가열하면 $440.5\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 물과 암모니아를 잃고 유리 상태의 산화붕소가 남는다. 수용액은 알칼리성 반응을 나타내고, 가열하면 암모니아를 발생한다⁽¹⁴⁾.



본 연구에서는 붕산 및 5붕산암모늄 수용액을 건축물의 내장재로 주로 사용되고 있는 편백목재에 도포한 후 Cone calorimeter를 이용하여 외부 복사열원에 의한 열방출률, 질량 감소속도, 총연기방출을 등을 측정하고 난연 목재로서의 초

기 화재 시 화재지연 효과가 있는지를 확인하고자 하였다.

2. 실험

2.1 재 료

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 오붕산암모늄을 각각 증류수에 녹여 4 wt% 수용액(BA4, APB4)을 만들었다. 각각의 4 wt% 용액을 1 : 1 비율로 섞어 혼합 용액(BA4/APB4)을 제조하였다. 수용액으로 시험편의 한 면에 붓칠하고 난 뒤 6 h 동안 상온에서 자연 건조시킨 후, 다시 같은 방법으로 2회 더 실시하였다. 공시험편은 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^2 조건에서 수행하였다⁽⁹⁾. Figure 1에 콘칼로리미터 장비를 나타내었다. 사용한 시험편의 두께는 10 mm로서 크기는 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} (\pm 0.2)$ 의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 온도 $23 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 에서 향량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감싼다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 $\pm 2\%$ 이내, 산소분석기의 산소농도가 $20.95 \pm 0.01\%$ 가 되도록 교정하고 배출유량을 $0.024 \pm 0.002\text{ m}^3/\text{s}$ 로 설정하였다.

시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를

Table 1. Specification of Cypress Specimens Painted with 4 wt% Boron Compounds Solutions

Samples (Cypress)	Initial Mass (g)
Uncoated Specimen	38.83
4 wt% Boric Acid (BA4), 1	38.95
4 wt% Ammonium Pentaborate (APB4), 2	38.95
4 wt% Boric acid : 4 wt% Ammonium Pentaborate (BA4/APB4), 3	39.00

Table 2. Fire Performance Index of Cypress Specimens Painted with 4 wt% Boron Compounds Solutions During Cone Calorimeter Test

Materials	TTI (s)	HRR _{peak} (kW/m ²)	FPI (s·m ² /kW)
Uncoated	6	210.6	0.0237
BA4	8	207.7	0.0385
APB4	7	190.0	0.0368
BA4/APB4	9	211.7	0.0425

조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편 홀더는 수평방향으로 위치시켰다.

시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 3회 실험값을 평균하여 데이터로 이용하였다. 연소 시킨 후 화재 해석에 필요한 인자인 열방출률 및 연기 관련 지수를 구하였다.

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⁽¹⁵⁾.

$$MC (\%) = \frac{Wm - Wd}{Wd} \times 100 \tag{5}$$

Wm : 함수율을 구하고자하는 시험편의 중량
Wd : 건조시킨 후의 절대건조 중량

자연 건조된 편백나무의 함수율은 7.3 wt%였다. 화학첨가제로 처리된 편백나무 시험편의 초기무게는 Table 1에 나타난 바와 같이 BA4, 1, APB4, 2, 4 wt% 용액으로 혼합된 용액(BA4/APB4), 3에 대하여 각각 38.95 g, 38.95 g, 39.00 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 나타난 바와 같이 열유속 50 kW/m²에서 공시

편은 6 s 후에 착화했다. 난연제로 처리된 시험편의 착화시간(TTI)은 공시편보다 1~3 s 정도 지연되었고 BA4/APB4는 3 s (50%)로 더 긴 착화시간을 나타내었다. 난연제의 내화 효능을 나타내기 위하여 화재성능지수(FPI)를 검토하였다. 사용된 데이터인 TTI 및 열 방출률의 초기 피크의 최대값은 물질의 화재 위험성을 특성화한다⁽¹⁶⁾.

이는 목재의 FPI 값과 플래시오버의 시간과 상관성이 있으며⁽¹⁷⁾, FPI 값이 증가할수록 화재 안전성 또한 증가된다⁽¹⁸⁾.

FPI를 구하는 식은 다음과 같다.

$$FPI = \frac{TTI}{HRR_{peak}} (s \cdot m^2/kW) \tag{6}$$

이 연구에서 공시편의 FPI는 Table 2에 나타난 바와 같이 가장 낮은 FPI 값이었고, 반면에 BA4/APB4의 FPI는 공시편 보다 49% 증가하였다. 그 결과 붕산과 5붕산암모늄의 혼합된 투여는 그들의 시너지 효과에 의해 화재성능지수 값을 향상시켰다. 이것은 난연제로 처리한 목재의 화재 위험성이 낮아질 수 있을 것으로 이해된다.

3.1.2 질량 손실 및 열 방출

Figure 2에 나타난 바와 같이 질량 손실 속도 곡선의 두 가지 피크는 대략 20 s와 285 s에서 나타났으며 각각 목재의 불꽃연소와 백열연소 영역과 일치 한다. 방출된 가스는 에어로졸, 케톤류, 알데히드류 등의 저 분자량 휘발성 물질, 유기산, 방향족 탄화수소 등으로 구성 된다⁽¹⁹⁾.

Figure 2에서 보여준 바와 같이 처리되지 않은 목재와 처리된 목재의 질량 손실률 값이 흩어져서 얻어진 것은 연소매동으로 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 400 s 이내에서 급격한 변화가 나타났으며 공시편은 78% 질량 손실을

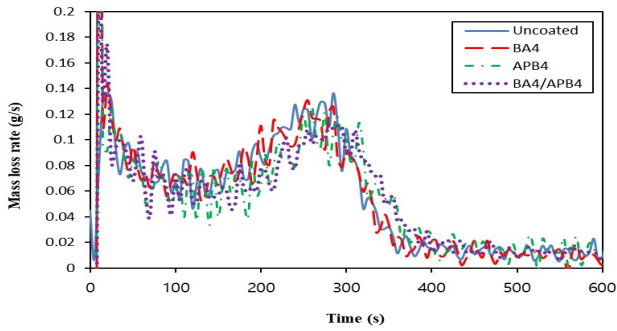


Figure 2. Mass loss rate curves of cypress specimens painted with 4 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

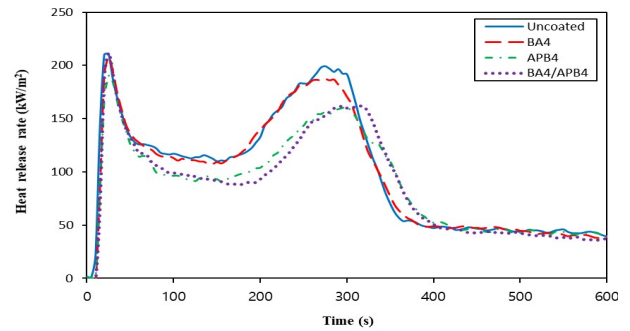


Figure 4. Heat release rate curves of cypress specimens painted with 4 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

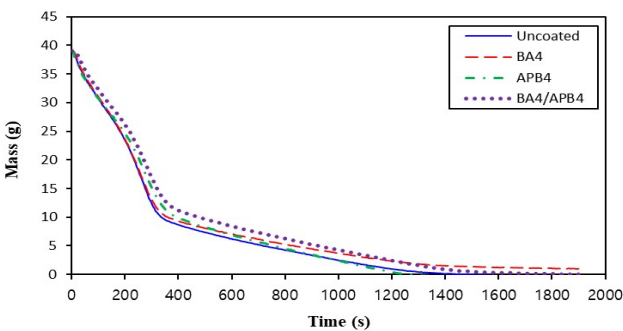


Figure 3. Mass residual curves of cypress specimens painted with 4 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

보이고 있으나 난연처리한 시편은 71.8~76%의 질량 손실을 보이고 있다. 이는 목재의 가연성으로 인하여 화재초기가 화재위험성이 높다는 것을 알 수 있다. Table 3에 나타난 실험 후 남은 잔류량은 BA4가 가장 높게 나타났으며 다른 시편과 비교할 때 연소 시 생성되는 숯이 단단하고 안정한 화합물로 생성되는 것으로 판단된다.

Table 3에 나타난 바와 같이 첨가제로 처리한 시험편의 연소시간(FBT)은 공시편보다 1.1~12.2% 증가되었다. 이는

배합된 난연제가 열분해 시에 유리막을 형성하여 연소 억제작용을 효과적으로 하는 것으로 이해된다⁽¹³⁾.

BA4는 열분해 시에 물을 잃고 300 °C에서 유리상태의 산화붕소를 남기고, APB4는 440.5 °C에서 물과 암모니아를 잃고 유리상태의 산화붕소로 남는다⁽¹⁴⁾. 목재의 열분해로 생성된 자유 라디칼은 더 많은 숯을 생성하는 폴리머화 및 열분해 생성물의 방향족화를 수행한다. 또한 BA는 숯 수율을 증가시켜 산소를 제거하기 위한 탈수 반응을 촉진시킬 수 있다⁽²⁰⁾. 첨가제 산화붕소는 숯생성 상의 활성화 에너지를 감소시킬 수 있고, 숯 생성이 많아지므로 숯의 무염연소를 지연시킬 수 있다. 이것은 연소 억제 효과를 향상시킨다.

숯은 목재보다 열전도율이 낮으므로 숯 밑의 목재에 열이 침투하는 것을 방해한다. Figure 4에서 보여준 바와 같이 초기 20 s 동안 목재의 열 방출 속도(HRR)가 빠르게 증가했지만 이후 경사는 감소했다. 이것은 초기 단계에서 축적된 가연성 열분해물의 연소에 의해 설명될 수 있다.

그리고 표면에 형성된 숯 층은 연소가스의 생산을 억제한다⁽¹⁶⁾. 2차 열분해의 최대 HRR 피크는 숯의 연소로 인해 약 275~295 s 대에서 발생하였다. BA4/APB4은 50 s에서 190 s 사이의 시험 기간에 HRR 강도가 가장 낮았으며 난연제를 혼합한 처리는 HRR의 값에 0.5% 이내로 미미한 영

Table 3. Combustion Properties of Cypress Specimens Painted with 4 wt% Boron Compounds Solutions During Cone Calorimeter Test

Samples (Cypress)	TTI ^a (s)	Mass Residue (g)	HRR _{peak} ^b (kW/m ²)	THR ^c (MJ/m ²)
Uncoated	6	0.023	210.6	91.2
BA4	8	0.894	207.7	85.6
APB4	7	0.026	190.0	81.1
BA4/APB4	9	0.070	211.7	78.3
Samples (Cypress)	PHRR Time (s)	TSR ^d (m ² /m ²)	CO (%)	FBT ^e (s)
Uncoated	25	453.5	0.01112 at 418 s	369
BA4	25	426.5	0.00828 at 658 s	373
APB4	25	395.4	0.01118 at 862 s	397
BA4/APB4	25	557.1	0.00936 at 496 s	414

^atime to ignition; ^bpeak heat release rate; ^ctotal heat release; ^dtotal smoke release; ^eflame burning time

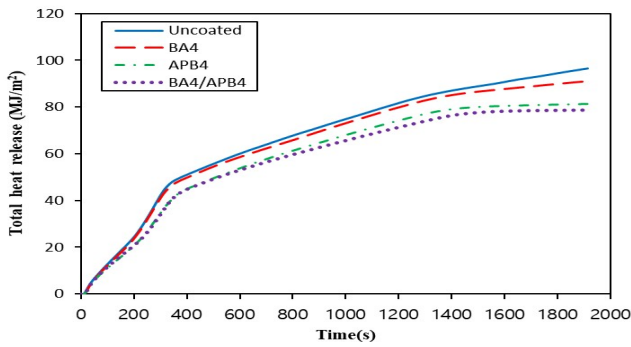


Figure 5. Total heat release curves of cypress specimens painted with 4 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

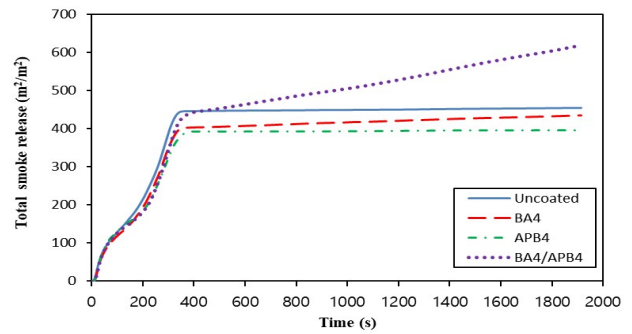


Figure 7. Total Smoke release curves of cypress specimens painted with 4 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

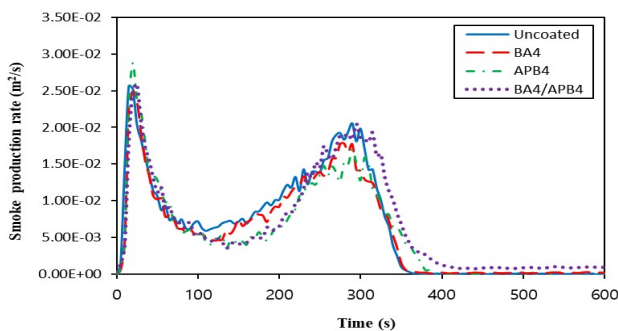


Figure 6. Smoke production rate curves of cypress specimens painted with 4 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

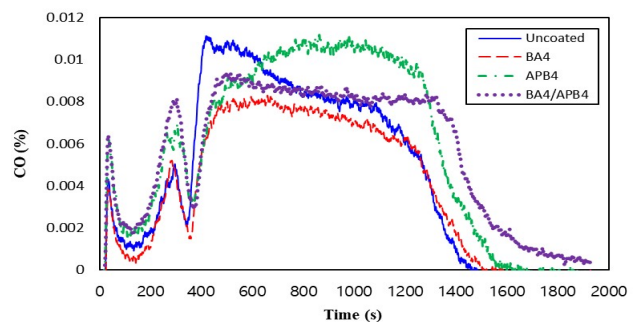


Figure 8. CO (%) of cypress specimens painted with 4 wt% boron compounds solutions during cone calorimeter test.

향을 미쳤다. Figure 5에서 나타낸 바와 같이 총 열방출률 (THR)은 350~370 s 후에 완만한 증가를 보였다. 난연제로 처리한 시험편의 총열방출율은 공시편보다 6.1~14.1% 감소되었고 BA4/APB4 시편을 가장 많이 감소 시켰다. 이것은 탈수과정에서 생성된 물이 가연성 기체 열분해류를 냉각시킬 수 있기 때문으로 판단된다.

3.1.3 탄소 산화물의 연기 생성 및 수율

Figure 6에 보여준 바와 같이 처리되지 않은 목재의 연기 생산 속도(SPR)는 연소 시간과 함께 증가한다. 그리고 약 15 s에서 첫 번째 피크에 빠르게 도달한다. 이 기간 동안 방출되는 연기는 에어로졸과 분해된 헤미셀룰로오스에서 나오는 가스, 수증기 및 휘발성 목재 추출물로 구성된다. 그다음 두 번째 피크가 백열기간에 숯의 균열에 의해 최대 값에 도달된다. 난연제로 처리한 나무의 2차 SPR은 공시편보다 0.5~17.5% 감소되었다. 이것은 공시편의 더 빠르고 더 충분한 연소 때문이다.

Figure 7에 나타낸 바와 같이 목재 공시편의 총 연기방출율(TSR)은 15 s에서 275 s 사이에 선형적으로 증가하고 그런 다음 증가하지 않았다. BA4/APB4로 처리된 시험편은 예외이지만 난연제로 처리된 목재의 TSR은 처리되지 않은 나무보다 6%~12.8% 낮았다. 공시편의 높은 TSR은 보다 효율적인 연소 때문이지만, BA4 및 APB4은 모두에 대

해 탄화의 높은 효능이 난연 효과의 주요 이유일수 있다. 그러므로 BA4 및 APB4의 억제된 연기 발생은 화재 시에 연기 위험을 감소시킬 수 있고 공공의 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 BA4/APB4의 TSR은 22.8% 증가하였다. 이것은 BA4와 APB4의 시너지 효과에 의한 연소 억제 작용으로 예측된다.

Figure 8에 나타낸 바와 같이 공시편은 연소 32 s 후에 일산화탄소를 빠르게 방출하기 시작했으며 294 s, 418 s에서 CO의 농도가 크게 증가했다. 이것은 이미 생성된 고농축의 이산화탄소와 생성된 숯 층의 장벽으로 인해 생기는 목재에 대한 O₂의 접근이 방해되기 때문으로 이해된다⁽²¹⁾. 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 강도(0.01112%)를 보였고 APB4 이 862 s에서 가장 높은 강도(0.01118%)를 보였다. BA4와 BA4/APB4의 CO 농도는 각각 0.00828% (658 s), 0.00936% (496 s)였고 공시편 보다 25.5%, 15.8% 감소되었다.

4. 결 론

붕산과 5붕산암모늄으로 처리한 편백나무 시험편의 연소특성에 관한 실험을 ISO 5660-1 표준에 따른 콘칼로리미

터를 이용하여 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 붕산과 5붕산암모늄의 혼합 투여는 그들의 시너지 효과에 의해 FPI 값을 향상시켰다. 이는 난연제로 처리한 목재의 화재 위험성이 낮아질 수 있을 것으로 이해된다.

(2) 붕소 화합물로 처리한 시험편은 공시편보다 THRR 값이 6.1~14.1% 감소되었다. 이는 배합된 첨가제가 열분해 시에 연소 억제작용을 효과적으로 하여 THRR 값을 낮추는 것으로 이해된다.

(3) 붕소 화합물은 연소과정 전반에 걸쳐 TSR을 감소시켰다. 예외로 BA4/AP4은 반대로 증가하였다.

(4) 연소 초기에 붕소 화합물로 처리한 시험편에 대한 일산화탄소의 증가는 생성된 고농축의 이산화탄소와 생성된 숯층의 장벽으로 인한 목재에 대한 O₂의 접근을 방해하는 것으로 이해된다.

후 기

이 논문은 2016년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A3B03933993)입니다.

References

1. R. Kozłowski and M. Hewig, "1st Int Conf. Progress in Flame Retardancy and Flammability Testing", Institute of Natural Fibres, Poznan, Poland (1995).
2. 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).
3. 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).
4. Y. J. Chung, "Flame Retardancy of Veneers Treated by Ammonium Salts", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 18, No. 3, pp. 251-255 (2007).
5. J. Z. Xu, M. Gao, H. Z. Guo, X. I. Liu, Z. Li. H. Wang and C. M. Tian, "Study on the Thermal Degradation of Cellulosic Fiber Treated with Flame Retardants", *J. Fire Sciences*, Vol. 20, No. 3, pp. 227-235 (2002).
6. 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).
7. 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).
8. D. S. Baker, "Wood in Fire, Flame Spread and Flame Retardant Treatments", *Chemistry and Industry (London)*, Vol. 14, pp. 485-490 (1981).
9. 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 2015.
10. V. Babrauskas, "New Technology to reduce Fire Losses and Costs", eds. S. J. Grayson and D. A. Smith, Elsevier Applied Science Publisher, London, UK. (1986).
11. M. M. Hirschler, "Thermal Decomposition and Chemical Composition", 239, *ACS Symposium Series 797* (2001).
12. 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).
13. 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).
14. 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).
15. W. T. Simps, *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Chapter 12, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, U.S.A. (1987).
16. 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)
17. 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).
18. C. Jiao, X. Chen and J. Zhang, "Synergistic Effects of Fe₂O₃ with Layered Double Hydroxides in EVA/LDH Composites", *J. Fire Sci*, Vol. 27, No. 5, pp. 465-479, 2009.
19. 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. 4823-37 (2002).
20. 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. 375-89 (2004).
21. 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).