

# 붕소 화합물로 처리된 편백목재 시험편의 연소시험에 의한 가스 발생

진 의 · 정영진<sup>\*,†</sup>

강원대학교 소방방재연구센터, \*강원대학교 소방방재공학과  
(2018년 3월 26일 접수, 2018년 4월 12일 심사, 2018년 4월 15일 채택)

## Gas Generation by Burning Test of Cypress Specimens Treated with Boron Compounds

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

Fire Prevention Research Center, Kangwon National University, Gangwon-do 24913, Korea  
\*Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do 25949, Korea  
(Received March 26, 2018; Revised April 12, 2018; Accepted April 15, 2018)

### 초 록

붕산, 5붕산암모늄, 붕산/5붕산암모늄 첨가제로 처리한 편백목재 시험편의 연소가스 발생에 관한 시험을 하였다. 4 wt%의 붕소 화합물 수용액으로 각각 편백목재 시험편에 붓으로 3회 칠하였다. 실온에서 건조시킨 후, 콘칼로리미터 (ISO 5660-1)를 이용하여 연소가스를 분석하였다. 그 결과, 붕소 화합물로 처리한 시험편의 두 번째 최대산소 소모율은 0.1067~0.1246 g/s로서 공시험편보다 5.3~18.9% 감소했다. 붕산, 5붕산암모늄으로 처리한 시험편의 비소화면적은 2.0~19.0% 감소하였다. 그러나, 붕산/5붕산암모늄으로 처리된 경우 비감쇠면적이 공시험편보다 21.2% 증가하였다. 붕소 화합물로 처리한 시험편의 최대일산화탄소 농도는 0~25% 감소되었다. 이것은 직업안전위생관리국(Occupational Safety and Health Administration, OSHA) 허용기준의 1.6~2.2배의 치명적인 독성을 발생하는 것으로 측정되었다. 붕소 화합물은 일산화탄소 감소에는 효과적이었으나 OSHA의 허용기준에는 미치지 못하였다. 붕소화합물은 편백나무의 연소성을 두 번째 최대산소 소모율에 대하여 5.3~18.9%, 최대일산화탄소 발생에 대하여 0~25% 억제하였다.

### Abstract

Cypress woods treated individually with boric acid (BA4), ammonium pentaborate (APB4), or BA4/APB4 additives were examined for combustion gases. Each of the specimens was painted with a 4 wt% solution of boron compounds three times. Dried at room temperature, the combustion gas was analyzed using a cone calorimeter (ISO 5660-1). Consequently, the second maximum oxygen consumption rate of the specimen treated with boron compounds was 0.1067 to 0.1246 g/s, which was 5.3 to 18.9%, respectively lower than that of the blank specimen. The specific extinction area of specimens treated with BA4 and APB4 was also 2.0 to 19.0% lower, respectively. However, treated with BA4/APB4 showed 21.2% higher than that of the blank specimen. The maximum carbon monoxide concentration of the specimens with boron compounds was reduced by 0 to 25%. It was estimated to be 1.6 to 2.2 times higher than the permissible exposure limits by Occupational Safety and Health Administration (OSHA), indicating a fatal toxicity. The boron compounds were effective in reducing carbon monoxide, but didn't meet the OSHA limit. The boron compound inhibited the burning behavior of the cypress wood, which suppressed the second maximum oxygen consumption rate by 5.3 to 18.9% and the maximum carbon monoxide generation by 0 to 25%.

**Keywords:** Boron compounds, Oxygen consumption rate, Specific extinction area, Carbon monoxide, Cone calorimeter

## 1. 서 론

친환경적인 내구재 및 건축재로 널리 사용되는 목재는 화재 시 연소되기 쉬움으로써 화재안전성 측면에서 높은 위험성을 가지고 있다. 따라서 이와 같은 목재의 단점을 보완하기 위해 다양한 난연 처리 방법들이 연구되어 왔다[1-4]. 목재의 난연 처리는 인화합물계, 질소화

합물계, 붕소화합물계, 실리콘화합물계 등을 사용하여 처리하였다 [5-8]. 화재에 의한 피해는 약 75~80%가 연기와 유독가스 등의 흡입과, 또는 산소 결핍에 의한 것으로 조사되었다[9].

특히 일산화탄소는 서서히 퍼지는 유독한 가스로서 인체 내의 헤모글로빈과의 강한 결합으로 적은 양으로도 매우 치명적인 것으로 보고되었다[9]. CO는 carboxyhemoglobin (COHb)을 형성함으로써 저산소증(hypoxia)을 일으키고 oxyhemoglobin의 해리를 일으키는 것으로 알려져 있다[10]. 즉, CO에 대한 노출은 초기 단계인 10~30% COHb의 혈중 농도에서 일시적 두통, 숨가쁨 현상 및 현기증 등의 증상을 일으키며 마지막 단계인 50~80% COHb 농도에서는 실신, 발작, 혼수상태, 심혈관 중독, 호흡실패 및 사망 등의 더욱 심각한 증상을 발생시킨다

† Corresponding Author: Kangwon National University,  
Dept. of Fire Protection Engineering, Gangwon-do 25949, Korea  
Tel: +82-33-540-3121 e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

고 하였다[11].

이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 CO처럼 화재 시 발생하며, 약 3~6%의 CO<sub>2</sub>는 호흡장애의 정도가 점점 증가하고, 또한 CO<sub>2</sub> 농도가 10% 이상이 되면 의식상실이 더욱 급속하게 나타나며 사람들은 대략 2 min 이내에 의식을 잃게 되는 것으로 보고되었다[12]. 또 다른 보고에 의하면 5% 이하의 CO<sub>2</sub>는 CO만큼 유독하지는 않지만 호흡을 자극하여 호흡량을 증가시킨다. 3% 정도의 CO<sub>2</sub>는 분당호흡량 값을 두 배 정도로 상승시키고, 5% 정도의 CO<sub>2</sub>는 세 배가 된다. 이것은 과호흡(hyperventilation)을 일으켜서 다른 유독한 CO 같은 생성물의 흡수를 촉진 시키는 역할을 하게 된다[13].

화재발생 시 산소(O<sub>2</sub>) 농도 저하에 노출된 사람들의 경우 저산소증을 일으키게 되는데, 사람을 대상으로 한 실험에 의하여 노출정도의 단계에 의하면[14], 첫 번째 단계(indifferent phase)는 O<sub>2</sub> 농도 약 14.4~20.9% 사이에 존재하며, 15%의 농도에 근접하면 운동부하(exercise tolerance)의 초기단계의 증상이 나타나는 등의 경미한 영향이 발생한다. 그러나 마지막 단계(critical hypoxia phase)는 O<sub>2</sub> 농도 약 7.8~9.6%로 이해 및 판단력의 붕괴로 인하여 의식불명의 상태로 진입하게 되며, 이어서 호흡이 중단되고 최종적으로 사망에 이르게 된다고 하였다.

따라서 화재시험을 통해 발생하는 유독가스에 대한 정량적 연구가 필요하다. 가연물의 안정성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 이들 중 열방출률은 화재 시에 대상 물질의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다. 열방출률 측정방법 중의 하나가 콘칼로리미터(cone calorimeter)이다[15]. 이것은 실 화재 현상에 대한 가장 근접하게 모사한 방법으로써 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다[16].

건조한 목재의 기본 조성은 탄소(C) 50%, 수소(H) 6%, 산소(O) 44%로 구성되고 그 밖에 소량의 무기화합물과 질소(N)로 구성되어 있다. 일반적으로 나무의 주요 성분은 침엽수가 리그닌 25~35%, 셀룰로오스 40~44%, 헤미셀룰로오스 20~32%이며, 활엽수는 리그닌 15~25%, 셀룰로오스 40~44%, 헤미셀룰로오스 23~40% 등의 비율로 이루어진다[17]. 나무의 열분해와 내화에 대하여, 나무의 조성은 흡수된 물과 휘발성 유분의 손실을 제외하고 약 100 °C에 이를 때까지 온도에 의해 영향을 받지 않는다. 약 175 °C로 온도 증가에 따라 나무의 일부 성분은 분해하기 시작하며 100~200 °C 사이에서는 CO<sub>2</sub>, 무기화합물, 수증기와 같은 비연소성 생성물이 생성된다. 200 °C 이상에서는 셀룰로오스가 분해되고 타르와 가연성 휘발성물질이 생성된다. 셀룰로오스는 240~350 °C, 헤미셀룰로오스는 200~260 °C, 리그닌은 280~500 °C에서 각각 분해된다. 목재가 450 °C 이상으로 가열되면 모든 휘발성 물질은 증발되어 사라지고, 15~20% 정도의 숯(char)이 남는데 이는 리그닌 함량이 많기 때문이다. 숯은 산소가 접근하는 것을 차단하기 때문에 목재의 연소 속도를 감소시킨다[18].

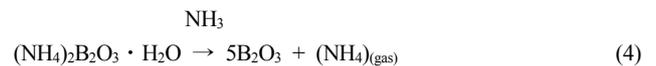
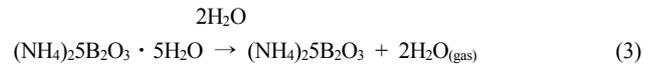
난연제로서 일부 유기인계 구조를 갖는 화합물은 열안정성이나 내구성 면에서 아직 개선의 여지가 많다[16]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 내열성, 소재와의 친화성이 뛰어난 형태의 효율 높은 감연성(smoke suppression properties)을 제공하기 위해, 목재에 침투가 용이한 수용성의 붕소계 화합물을 사용하여 이러한 문제점을 개선하고자 하였다.

붕산(boric acid, BA)은 무색 투명한 조각 모양 6면형의 광택이 있는 결정으로서 가열하면 첫 단계는 열분해에 의한 탈수화에 의해 메타붕산(meataboric acid)으로 된다. 그 다음 메타붕산의 탈수화에 의하여 물을 방출하고 유리 상태의 산화붕소(B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 된다. 이때 140~200 °C의 온도에서 열적으로 안정하며, 300 °C에서는 유리상이 붕괴되기 시

작한다[19].



또한 5붕산암모늄(ammonium pentaborate, APB, NH<sub>4</sub>B<sub>5</sub>O<sub>8</sub> = 1/2 [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>O · 5B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>])은 공기 중에서 안정되지만, 가열하면 440.5 °C에서 물과 암모니아를 잃고 유리 상태의 산화붕소가 남는다. 수용액은 알칼리성 반응을 나타내고, 가열하면 암모니아를 발생한다[20].



실제 화재발생 시 가연물의 연소특성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출률, 화염의 전파 그리고 연기 및 독성가스의 유해성 등이며 이러한 성질을 기준으로 화재위험성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 붕산 및 5붕산암모늄 수용액을 건축물의 내장재로 주로 사용되고 있는 편백목재에 도포처리 후 cone calorimeter를 이용하여 외부 복사열원에 의한 연소특성으로 유해가스 및 연기관련 지수 등을 측정하고 난연 목재로서의 초기 화재 시 화재 위험성을 확인하고자 하였다.

## 2. 실 험

### 2.1. 재료

본 연구에 사용된 목재는 편백나무로서 시중에서 일반 건자재용을 구입한 후 2년 동안 자연 건조하였다. 화학적 첨가제로서 붕산(순도 99.5%)은 Kanto Chemical사에서, 5붕산암모늄(순도 99%)은 Sigma Aldrich사에서 구입하여 사용하였다. 모든 시약은 특급시약을 구입하였고 정제 없이 그대로 사용하였다.

### 2.2. 목재시험편의 제조

붕산과 5붕산암모늄을 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[21].

### 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 수행하였다[22]. 사용한 시험편의 두께는 10 mm로서 크기는 100 mm × 100 mm (±9)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 5%에서 향량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감싼다. 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 단

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

Samples (Cypress)	Initial mass (g)
Untreated specimen	38.83
4 wt% Boric acid (BA4)	38.95
4 wt% Ammonium pentaborate (APB4)	38.95
4 wt% Boric acid : 4 wt% Ammonium pentaborate (BA4/APB4)	39.00

**Table 2. Combustion Properties of Cypress Specimens Painted with 4 wt% Solutions of Boron Compounds During Cone Calorimeter Test**

Samples	<sup>a</sup> O <sub>2</sub> 2nd-peak Consump. (g/s)/ at time (s)	<sup>b</sup> RSR 1st-peak (m <sup>2</sup> /s · m <sup>2</sup> )/ at time (s)	CO <sub>peak</sub> (ppm)/ at time (s)	CO <sub>2</sub> 2nd-peak (ppm)/ at time (s)
Untreated	0.1316/275	2.9036/15	110/423	4553/294
BA4	0.1246/275	2.8181/20	82/658	4377/277
APB4	0.1067/300	3.2579/20	111/862	3969/293
BA4/APB4	0.1081/295	2.9337/25	72/496	3971/296

Samples	<sup>c</sup> SEA (m <sup>2</sup> /kg)	CO/CO <sub>2</sub>	O <sub>2peak</sub> Depletion (%) / at time (s)
Untreated	100.561	0.0241	20.472 / 33
BA4	98.541	0.0187	20.459 / 34
APB4	81.364	0.0280	20.480 / 34
BA4/APB4	121.874	0.0234	20.413 / 34

<sup>a</sup>O<sub>2</sub> 2nd peak consumption rate; <sup>b</sup>Rate of Smoke release; <sup>c</sup>Specific Extinction Area.

열제인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시험 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시험홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 시험의 체적 밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 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.

**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[23].

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

Wm : 함수율을 구하고자 하는 시험편의 중량  
Wd : 건조시킨 후의 절대건조 중량

자연 건조된 편백나무의 함수율은 7.3 wt%이었다. 화학첨가제로 처리된 편백나무 시험편의 초기무게는 Table 1에 나타난 바와 같이 BA4, APB4, 4 wt% 용액으로 혼합된 용액(BA4/APB4)에 대하여 각각 38.95, 38.95, 39.00 g으로 나타났다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 콘칼로리미터 시험**

환기가 양호한 조건에서 콘칼로리미터를 이용하여 수평으로 놓인

시험체를 외부복사열원에 노출시킴으로써 연기관련지수 및 독성가스 유해성을 평가하였다. 산소분석기의 산소농도는 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m<sup>3</sup>/s로 설정하여 연소 조건을 일정하게 유지하였다. 배출량 중 분석기로 들어가는 공기 유속을 3.5 L/min이 되도록 일정하게 유지시켰으며 시험편은 충분히 연소가 될 수 있도록 공기 중에 그대로 노출시켰다.

산소 소모율(O<sub>2</sub> consumption rate)에 대하여 대부분의 가연성 재료들은 연소 시 소비되는 산소에 의해 열량을 방출한다[15]. Figure 1은 시간에 따른 산소 소모율을 나타내었다.

이에 대하여  $\dot{Q}$  (kW)은 다음과 같은 식 (3)으로 주어진다[24].

$$\dot{Q} (HRR) = \dot{m} \cdot \Delta h_c \tag{6}$$

여기서,  $\dot{Q}$  (kW) = HRR,  $\dot{m}$  (kg/s) = MLR,  $\Delta h_c$  (kJ/kg) = EHC로 표시되며, heat release rate (HRR)은 열방출률, mass loss rate (MLR)은 질량감소율, effective heat of combustion (EHC)는 유효연소열을 나타낸다.

Table 2 및 Figure 1에 보여준 바와 같이 붕소 화합물로 처리한 시험편의 두 번째 최대산소 소모율은 0.1067~0.1246 g/s로서 공시험편보다 5.3~18.9% 감소했다. 이것은 산소가 붕소 화합물에 작용하여 질량감소가 이루어지는 것으로서, 연소가 불리한 조건일 때는 산소소모가 적어지는 것을 의미한다.

붕산과 5붕산암모늄은 열분해 시 탈수화 후 유리 상태의 산화붕소 (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 남긴다. 이 유리상은 산소와 열의 확산을 차단하며 화염전단으로부터 또는 화염전단에 연소성 분해생성물의 확산을 차단하기 때문에 산소 소모율이 감소되는 것으로 이해된다[25].

붕소 화합물로 처리된 시험편이나 처리되지 않은 공시험편의 연기방출률(rate of smoke release, RSR)은 연소 시간과 함께 증가한다. Figure 2에 보듯이 첫 번째 피크는 초기에 날카롭게 도달한다. 이 기

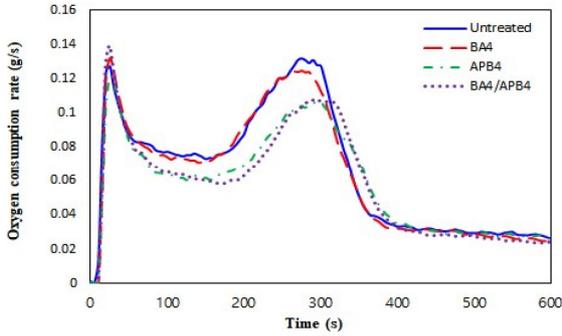


Figure 1. Oxygen (O<sub>2</sub>) consumption rate curves of cypress specimens painted with 4 wt% solutions of boron compounds during cone calorimeter test.

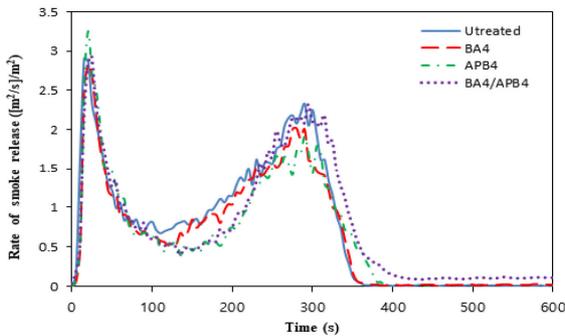


Figure 2. Rate of Smoke release (m<sup>2</sup>/s · m<sup>2</sup>) curves of cypress specimens painted with 4 wt% solutions of boron compounds during cone calorimeter test.

간에 연기는 에어로졸과 분해된 헤미셀룰로오스에서 나오는 가스, 수증기 및 휘발성 목재 추출물로 구성된다. 그 다음 두 번째 피크가 백열기간에 숲의 재연소에 의해 도달된다. 이 피크점의 도달 시간은 첨가제로 처리된 목재 시험편이 공시험편보다 33~67% 지연되었다.

특히 BA4/APB4 시험편은 BA4와 APB4의 시너지 효과에 의한 연소억제 작용으로 두 번째 피크도달시간이 가장 많이 지연되는 것으로 예측된다[26,27]. 두 피크 사이에서는 연기발생 속도 및 연기농도가 감소되는데 이것은 목재의 탄화과정이 일어나기 때문으로 판단된다. Hagen은 목재가 연소하는 동안에 가열온도가 상승되면 증가하는 질량감소속도에 따라 연기발생 및 연기농도가 증가한다고 보고하였다[28]. 그러므로 탄화과정 동안 질량 감소 속도가 작아져 연기 발생 및 연기농도가 감소되는 것으로 이해할 수 있다.

비감쇠면적(specific extinction area, SEA)은 연기생성률(smoke production rate, SPR)을 질량감소율(MLR)로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다. Table 2에 나타난 바와 같이 BA4, APB4로 처리한 경우는 공시험편 보다 2.0~19.0% 감소하였다. 이것은 저발연 작용을 하는 것으로 판단된다. 그러나 BA4/APB4로 처리된 경우, SEA가 21.2% 증가한 것은 이들의 시너지 효과에 의하여 역작용을 하는 것으로 예측된다.

가연성 물질들은 화재 시 불이 꺼질 때까지 다양한 연소유독가스를 발생시킨다. Kimmerle의 연구[29]에 따르면 15% 미만의 O<sub>2</sub> 농도는 사람들에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며, 또 매우 높은 농도의 CO<sub>2</sub>와 낮은 농도 CO일지라도 사람을 질식(asphyxiant effect)시킬 수 있기 때문에 치명적이라고 보고하였다.

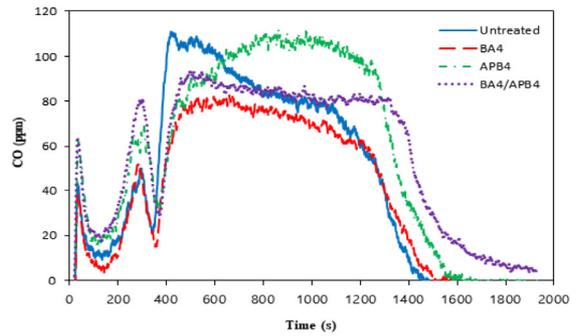


Figure 3. CO concentration (ppm) curves of cypress specimens painted with 4 wt% solutions of boron compounds during cone calorimeter test.

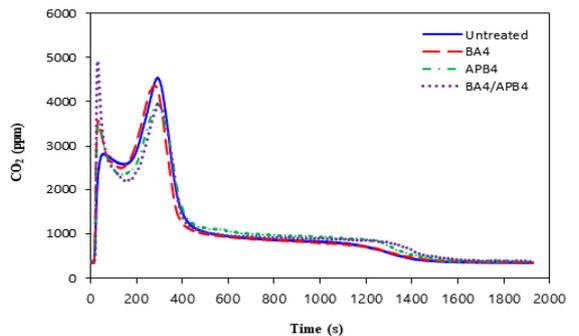


Figure 4. Emission concentration (ppm) curves of CO<sub>2</sub> from cypress specimens painted with 4 wt% solutions of boron compounds during cone calorimeter test.

CO는 화염과 목재 사이에서 휘발성물질의 불완전연소 생성물이다. 따라서 휘발성 물질의 분해속도의 한 측정법인 열방출속도가 증가하는 것은 동반된 CO가스 발생이 증가하는 것으로 설명된다[30]. Table 2 및 Figure 3에 나타난 바와 같이 붕소 화합물 첨가제를 처리한 시험편의 CO<sub>peak</sub> 농도는 496~658 s에서 82~93 ppm으로 공시험편의 CO<sub>peak</sub> 농도(110 ppm, 423 s)에 비교하여 15~25% 낮게 나타났다.

그러나 APB4는 별 차이가 없었다. 이것은 직업안전위생관리국(occupational safety and health administration, OSHA)의 허용기준(permissible exposure limits, PEL)인[31] 50 ppm과 비교하면 1.6~2.2 배의 치명적인 독성을 발생하는 것으로 계산되었다. 편백나무 자체보다 CO 농도가 감소되었으므로 붕소화합물로 인한 연소 억제성은 향상된 것으로 판단된다.

두 번째 CO<sub>2peak</sub> 농도는 Table 2 및 Figure 4에 붕소 화합물 첨가제를 처리한 시험편에 대하여 3,969~4,377 ppm으로서 공시험편의 두 번째 CO<sub>2peak</sub> 농도(4,553 ppm)와 비교하여 3.9~12.8% 낮게 나타났다.

이것은 OSHA의 허용기준(PEL)[32] 5,000 ppm 보다 낮았다. 그러나 CO<sub>2</sub> 자체의 유독성 보다는 호흡을 자극하여 과호흡을 일으킬 소지가 있다. 광산안전위생관리국(mine safety and health administration, MSHA)[33]에 의하면, 이산화탄소는 잠재적 흡입 독성 물질과 단순한 질식을 가져다준다.

CO<sub>2</sub> 농도 커브는 2개의 피크를 보이며 첫 번째 피크는 목재의 가열로부터 착화기간 동안에 일어난다. 그리고 두 번째 피크는 시험편의 모든 표면에 열파(thermal wave)가 시험편의 뒤쪽으로부터 반사됨으로써 시험편의 연소율이 증가하는 후면효과[34]에 의하여 발생한다.

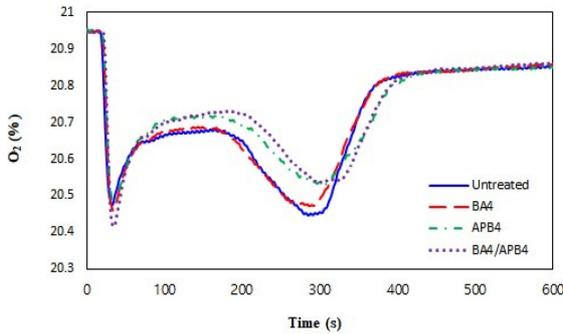


Figure 5. O<sub>2</sub> depletion (%) curves of cypress specimens painted with 4 wt% solutions of boron compounds during cone calorimeter test.

두 피크 사이의 CO<sub>2</sub> 농도는 탄화과정 동안에 걸쳐서 낮아진다. 목재가 연소하는 동안 가열온도가 상승되면 증가하는 질량감소속도에 따라 CO<sub>2</sub> 농도도 증가한다. 이것은 셀룰로오스로 구성된 목재 조직 자체의 산소에 의하여 초기에 CO<sub>2peak</sub> 농도가 높았으나, 시간이 경과함에 따라 시험편의 질량이 감소하므로 CO<sub>2peak</sub> 농도가 낮아지는 것으로 판단된다. Table 2에 CO/CO<sub>2</sub>비를 나타내었다. 각 시험편의 특성에 따라 특별한 차별성은 없으나, 붕소화합물로 처리한 시험편은 공시험편에 비해 0.0163~0.0181의 낮은 값을 가지므로 상대적으로 독성이 낮아지는 것으로 예상된다.

시험편의 최대산소결핍농도는 Table 2 및 Figure 5에 나타내었다. 여기에서 붕소 화합물 첨가제로 처리한 시험편의 최대산소결핍 농도는 20.413~20.480%으로 비교적 높은 수치를 나타내었다. 이것은 무처리한 시험편과 비교하여 특별한 차별성이 없는 것으로서, 사람에게 치명적일 수 있는 수준인 15%[13]보다는 훨씬 높게 측정되었으므로 그로 인한 위험성은 매우 낮았다. 결과적으로 붕소 화합물로 처리한 목재는 부분적으로 연소성이 억제되었다.

#### 4. 결 론

BA4, APB4, BA4/APB4 첨가제로 처리한 편백목재의 연소가스 발생에 관한 실험을 ISO 5660-1 표준에 의한 콘칼로리미터를 이용하여 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 붕소 화합물로 처리한 시험편의 두 번째\_최대산소 소모율은 0.1067~0.1246 g/s로서 공시험편보다 5.3~18.9% 감소했다. 이것은 유리상의 산화붕소가 목재에 피막을 형성하여 산소 소모율이 감소되는 것으로 이해된다.

2) BA4, APB4로 처리한 시험편의 비산화면적은 공시험편보다 2.0~19.0% 감소하였다. 이것은 저발연 작용을 하는 것으로 판단된다. 그러나 BA4/APB4로 처리된 경우, SEA가 21.2% 증가한 것은 이들의 시너지 효과에 의하여 역작용을 하는 것으로 예상된다.

3) 붕소 화합물로 처리한 시험편의 CO<sub>2peak</sub> 농도는 0~25% 감소되었고, OSHA 허용기준(PEL)보다 1.6~2.2배 높은 치명적인 독성을 발생 하는 것으로 측정되었다.

4) 붕소 화합물로 처리한 시험편의 최대산소결핍 농도는 20.413~20.480%로서 비교적 높은 수치를 나타내었다. 이것은 사람에게 치명적일 수 있는 수준인 15%보다 훨씬 높게 측정되었으므로 그로 인한 위험성은 매우 낮았다.

따라서 붕소화합물은 편백나무의 연소성을 두 번째\_최대산소 소모율에 대하여 5.3~18.9%, 최대일산화탄소 발생에 대하여 0~25% 억제

하였다. 그러나 일산화탄소는 편백목재 자체의 생성 농도가 높기 때문에 감소효과에 대한 기대에 미치지 못하였다.

#### 감 사

이 논문은 2016년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2016R1D1A3B03933993) 및 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-620170027).

#### References

- R. Kozłowski and M. Hewig, Progress in flame retardancy and flammability testing, in: *1st Int Conf. Progress in Flame Retardancy and Flammability Testing*, Institute of Natural Fibres, Pozman, Poland (1995).
- R. Stevens, S. E. Daan, R. Bezemer, and A. Kranenbarg, The structure-activity relationship of retardant phosphorus compounds in wood, *Polym. Degrad. Stab.*, **91**, 832-841 (2006).
- 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.*, **15**, 888-893 (2009).
- Y. J. Chung, Flame retardancy of veneers treated by ammonium salts, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **18**, 251-255 (2007).
- P. Zhao, C. Guo, and L. Li, Exploring the effect of melamine pyrophosphate and aluminum hypophosphite on flame retardant wood flour/polypropylene composites, *Constr. Build. Mater.*, **170**, 193-199 (2018).
- J. Jiang, J. Z. Li, J. Hu, and D. Fan, Effect of nitrogen phosphorus flame retardants on thermal degradation of wood, *Constr. Build. Mater.*, **24**, 2633-2637 (2010).
- T. Jiang, X. Feng, Q. Wang, Z. Xiao, F. Wang, and Y. Xie, Fire performance of oak modified with N-methylol resin and methylolated guanylurea phosphate/Boric acid-based fire retardant, *Constr. Build. Mater.*, **72**, 1-6 (2014).
- A. M. Pereyra and C. A. Giudic, Flame-retardant impregnants for woods based on alkaline silicates, *Fire Saf. J.*, **44**, 497-503 (2009).
- R. H. White and M. A. Dietsberger, Fire safety. in: *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Ch.17, USDA, Forest Product Laboratory, Madison, WI, USA (1999).
- A. Ernst and J. D. Zibrak, Carbon monoxide poisoning, *N. Engl. J. Med.*, **339**, 1603-1608 (1998).
- R. Von Burg, Toxicology update, *J. Appl. Toxicol.*, **19**, 379-386 USA (1999).
- B. G. King, High Concentration-short time exposures and toxicity, *J. Ind. Hyg. Toxicol.*, **31**, 365-375 (1949).
- U. C. Luft, Aviation physiology: the effects of altitude in: *Handbook of Physiology*, 1099-1145, American Physiology Society, Washington DC, USA (1965).
- D. A. Purser, A bioassay model for testing the incapacitating effects of exposure to combustion product atmospheres using cynomolgus monkeys, *J. Fire Sci.*, **2**, 20-26 (1984).
- V. Babrauskas, A versatile bench-scale tool for the evaluation of fire properties. In: S. J. Grayson and D. A. Smith (eds.), *New Technology to Reduce Fire Losses and Costs*, pp. 78-87, Elsevier

- Applied Science Publisher, London, UK (1986).
16. M. M. Hirschler, Fire performance of organic polymers, thermal decomposition and chemical composition, *ACS Symp. Ser.*, **797**, 293-306 (2001).
  17. V. Babrauskas, Ignition of wood: A review of the state of the art. In: *Interflam 2001*, 71-88, Interscience Communications Ltd., London, UK (2001).
  18. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability, In: E.A.Turei (ed.), *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Ch. 8, Academic Press, New York, USA (1981).
  19. 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).
  20. M. Jimenez, S. Duquesnsne, and S. Bourbigot, Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding their mechanism of action, *Thermochim. Acta*, **449**, 16-26 (2006).
  21. Y. J. Chung and E. Jin, Cumbustion characteristics of cypress specimens painted with solutions of boron compunds, *Fire Sci. Eng.*, **32**, 7-12 (2018).
  22. T. Balakrishnan, G. Bhagannaryana, and K. Ramamurthi, Growth, structural, optical, thermal and mechanical properties of ammonium pentaborate single crystal, *Spectrochim. Acta A*, **71**, 578-583 (2008).
  23. 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).
  24. W. T. Simpson, Drying and control of moisture content and dimensional changes. In: *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Ch. 12, USDA Forest Product Laboratory, Madison, WI, USA (1987).
  25. V. Babrauskas, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 4th Ed., National Fire Protection Association, MA, USA (2008).
  26. O. Grexa, E. Horvathova, O. Besinova, and P. Lehocky, Flame retardant treated plywood, *Polym. Degrad. Stab.*, **64**, 529-533 (1999).
  27. Q. Wang, J. Li, and J. E. Winady, Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood, *Wood Sci. Technol.*, **38**, 375-389 (2004).
  28. N. K. Saxena and D. R. Gupta, Development and evaluation of fire retardant coatings, *Fire Technol.*, **11**, 329-341 (1990).
  29. M. Hagen, J. Hereid, M. A. Delichtsios, J. Zhang, and D. Bakirtzis, Flammability assesment of fire-retarded nordic spruce wood using thermogravimetric analyses and con calorimetry, *Fire Saf. J.*, **44**, 1053-1069 (2009).
  30. G. Kimmmerle, Aspects and methodology for the evaluation of toxicological parameters during fire exposure, *J. Combust. Toxicol.*, **1**, 4-51 (1974).
  31. A. P. Mourituz, Z. Mathys, and A. G. Gibson, Heat release of polymer composites in fire, *Composites A*, **38**, 1040-1054 (2005).
  32. OSHA, *Carbon Monoxide*, OSHA Fact Sheet, United States National Institute for Occupational Safety and Health, September 14, USA (2009).
  33. OSHA, *Carbon Dioxide*, Toxicological Review of Selected Chemicals, Final Rule on Air Comments Project, OSHA's Comments, January 19, USA (1989).
  34. MSHA, *Carbon Monoxide*, MSHA's Occupational Illness and Injury Prevention Program Topic, U.S. Department of Labor, USA (2015).
  35. M. J. Spearpoint and G. J. Quintiere, Predicting the burning of wood using an integral model, *Combust. Flame*, **123**, 308-325 (2000).