

암모늄염으로 도포시킨 베니어판의 연소 시에 발생하는 연소가스 평가

진의 · 정영진*[†]

강원대학교 소방방재연구센터, *강원대학교 소방방재공학과

Evaluation of Combustion gas during Fire Tests of Veneers Coated with Ammonium Salts

Eui Jin · Yeong-Jin Chung*[†]

Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Gangwon-do 24913, Korea

*Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do 24549, Korea

(Received August 17, 2016; Revised September 6, 2016; Accepted September 9, 2016)

요 약

이 연구에서는 4종의 암모늄염으로 도포된 베니어 시험편의 연소 특성을 시험하였다. 20 wt%의 암모늄염 수용액으로 각각 베니어 시험편에 3회 붓으로 도포하여 실온에서 건조시킨 후, 콘칼로리미터(ISO 5660-1, 2)를 사용하여 연소특성을 조사하였다. 그 결과, 모노암모늄 포스페이트(MAPP)와 디암모늄 포스페이트(DAPP)로 처리한 시험편은 순수한 베니어 시험편에 비해 평균열방출율(HRR_{mean})이 각각 6.7%, 10.0% 낮았다. 반면에 MAPP는 최대 일산화탄소발생속도(CO_{peak} production rate)가 순수한 베니어 시험편에 비해 15.7% 높았고 DAPP는 8.2% 낮았다. 황산암모늄(AMSF)으로 도포된 베니어 시험편의 최대 연기발생속도(SPR_{peak})는 순수한 베니어 시험편에 비해 9.6% 낮았고 DAPP로 처리된 시험편은 33.3% 낮았다. 또한 DAPP는 최대 연기비감쇠면적(SEA_{peak})에 다다른 시간이 순수한 베니어 시험편에 비해 38.4% 지연되었다. 그러므로 DAPP는 베니어의 연소성질을 억제시키고 연기발생을 감소시키는 경향이 나타났다.

ABSTRACT

This study tested the combustion characteristics of veneer specimens coated with four kinds of ammonium salts. Each veneer specimen was coated three times with 20 wt.% ammonium salt solutions at room temperature. After drying, the combustion characteristics of the specimens coated with chemicals, were investigated using the cone calorimeter (ISO 5660-1, 2). The specimens coated with monoammonium phosphate (MAPP) and, diammonium phosphate (DMPP) showed a 6.7% and, 10.0%, lower mean heat release rate (HRR_{mean}), respectively, than that of the uncoated specimen. On the other hand, the specimens coated with MAPP showed a 15.7% higher CO_{peak} production rate and the specimens coated with DAPP showed by 8.2% lower rate than that of the uncoated specimen. The veneer coated with ammonium sulfate (AMSF) and DAPP showed a 9.6% and 33.3% lower the peak smoke production rate (SPR_{peak}) than that of the uncoated specimen. In addition, the time to the peak smoke extinction area (SEA_{peak}) was delayed by 38.4% in the specimens coated with DAPP than the uncoated specimen. Therefore, DAPP inhibited the combustion properties of the veneer and showed a tendency to reduce smoke production.

Keywords : Ammonium salts, Veneer, CO_{peak} production rate, Peak smoke production rate (SPR_{peak})

1. 서 론

인간 생활수준의 향상과 함께 다양한 목질 재료들은 가구, 전자재, 내장재 등에 친환경적으로 널리 사용되고 있으나, 언제나 화재의 위험성을 내포하고 있다⁽¹⁾. 따라서 목질재료의 난연성을 증진시키려고 하는 연구는 꾸준히 수행되어 왔으며, 대부분 난연제(flame retardant agent)를 이용하여 목질재료의 난연성을 향상시키고 있다⁽²⁾. 최근 난

연제에 대한 연구는 단순히 난연 효과만 보는 것이 아니라 저유해성, 저발연성, 저부식성, 그리고 내열성을 모두 만족시키는 쪽으로 관심이 모아지고 있으며, 이러한 것으로 인해 주로 사용되어오던 할로겐 계통의 난연제 중 특히 브롬 계통의 난연제가 유해성 문제 때문에 규제 대상이 되고 있다^(3,4). 한편, 다양한 목질재료중 베니어판은 가볍고 작업성이 수월하다. 그러나 현재에는 베니어판의 사용에 따른 난연성이 중요시되고 있으므로 친환경적인 첨가형 난연제

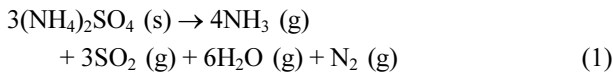
[†]Corresponding Author, E-Mail: yjchung@kangwon.ac.kr
TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3119

ISSN: 1738-7167
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2016.30.5.093>

의 사용에 따른 다양한 연구가 필수적으로 요구된다.

목재의 연소특성에 관한 연구는 Chung⁽⁵⁾가 50 kW/m²의 heat flux하에서 일부 목재의 성질에 따른 대한 연소특성을 시험하였다. Quintiere⁽⁶⁾와 Spearpoint⁽⁷⁾는 연소속도 Data를 이용한 수학적 적분모델과 시간온도 곡선을 이용하여 탄화율과 탄화길이를 측정하는 바 있다. Brenden⁽⁸⁾은 Douglas-fir 합판에 무기염을 처리하였고 연소 시에 발생하는 연기를 측정하여 염들이 연기에 미치는 영향을 검토하였다.

일반적으로 목재와 합판에 사용되는 난연제는 인, 질소, 할로겐원소, 보론 등이 포함된다. 본 연구에서 사용된 난연제는 암모늄염계인 ammonium chloride (AMCR, NH₄Cl), ammonium sulfate (AMSF, (NH₄)₂SO₄), monoammonium phosphate (MAPP, NH₄H₂PO₄), diammonium phosphate (DAPP, (NH₄)₂HPO₄)를 선택하였다. 염화암모늄은 220~445 °C의 열분해 과정에서 암모니아(NH₃)와 염화수소(HCl)로 흡열반응을 한다⁽⁹⁾. 또한 황산암모늄은 200~500 °C의 흡열반응으로 열분해한다⁽¹⁰⁾.



그리고 인을 포함하는 첨가제는 연소시 열분해되어 H₃PO₄를 생성하여 탈수탄화 작용에 의하여 고체 숯을 생성한다. 이 숯은 열의 확산과 산소를 차단하고, 화염전단으로부터 또는 화염전단에 발생하는 열분해 생성물의 확산을 차단한다⁽¹¹⁾. 또한 H₃PO₄는 열분해 되어 PO 라디칼을 생성하며 연소 시 연쇄반응을 일으키는 OH라디칼 혹은 H라디칼을 안정화시킨다^(12,13). 이러한 성질을 가지고 있는 무기염들을 선택하여 연소 시 화학반응으로 인한 화재의 확산을 감소시키고자 한다.

화재발생 시 목질재료의 안전성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출율, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다^(14,15). 특히 화재에 의한 연기 관련 지수는 화염의 전파 및 연소가스의 독성에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 연기지수 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로서 인식되고 있다.

따라서 본 연구에서는 목질재료의 화재 안전성을 증진시키기 위하여 목질재료의 특성상 난연성을 첨가하는 방법을 선택하였고, 콘칼로리미터(ISO 5660-1,2)를 이용하여 연소특성을 측정하는 후 적용된 재료별 연기 및 CO, CO₂ 가스 독성 농도를 고찰하였다.

2. 실험

2.1 재료

실험은 기보고된⁽¹⁶⁾ 바와 같이 실시하였다. 즉, 베니어판은 성장기업주식회사(부산소재)에서 구입한 두께 3 mm, 비중 0.50~0.54, 함수율 13.0 wt%의 10.2 × 10.2 cm 크기로 자른 다음 sand paper로 연마하여 10.0 × 10.0 × 0.3 cm

의 규격으로 조제하여 함수율 10 wt% 상태로 준비하였다.

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

$$\text{MC} (\%) = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

W_m: 함수율을 구하고자하는 시험편의 중량

W_d: 건조시킨 후의 절대건조 중량

본 연구에 사용한 monoammonium phosphate, diammonium phosphate, ammonium sulfate는 Samchun Pure Chemical Co., LTD에서 extra pure급을 구입하여 그대로 사용하였고, ammonium chloride는 Showa Chemical INC.에서 구입하여 정제 없이 사용하였다. 무기시약제들은 각각 필요한 농도를 20 wt%로 동일하게 유지하였다.

2.2 베니어판의 표면 도포처리

미리 소정의 규격으로 준비된 베니어판을 100~105 °C의 건조기 속에서 2 min간 전처리하고, 농도 20 wt%의 암모늄 수용액을 베니어판의 한쪽 면에 붓을 사용하여 도포하였다. 2일 동안 공기 중에 방치하여 수분을 실온에서 증발시킨 후, 100~105 °C의 건조기 속에서 3~4 min 동안 도포면을 완전히 건조시켰다.

2.3 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1⁽¹⁸⁾, ISO 5660-2⁽¹⁹⁾의 방법에 의해 듀얼 콘칼로리미터(dual cone calorimeter, Fire Testing Technology)를 사용하여 열유속(heat flux) 50 kW/m² 조건에서 수행 하였다. 이용한 시험편의 두께는 3 mm로서 크기는 100 mm × 100 mm (± $\frac{1}{2}$)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 온도(23 ± 2) °C, 상대습도(50 ± 5) % 함수율이 될 때까지 유지하였다

알루미늄 호일의 반짝이는 면을 시편 쪽으로 하여 비노출면을 감싼다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 ± 2% 이내, 산소분석기의 산소농도가 (20.95 ± 0.01) %가 되도록 교정하고 배출유량을 (0.024 ± 0.002) m³/s로 설정하였다.

단열재인 저밀도 유리섬유를 사용하여 시험편의 높낮이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 차단하기 위하

Table 1. Spread Amount of Ammonium Salts (Solid Content Base g/cm²)

Chemicals (20 wt%)	Spread amount	Remark
AMCR [NH ₄ Cl]	5.80 × 10 ⁻³	No top coating
AMSF [(NH ₄) ₂ SO ₄]	5.80 × 10 ⁻³	
MAPP [NH ₄ H ₂ PO ₄]	5.80 × 10 ⁻³	
DAPP [(NH ₄) ₂ HPO ₄]	5.80 × 10 ⁻³	

여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰으며 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소 시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 시점으로부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

본 연구에서 선정된 시험편은 콘칼로리미터에 수평으로 놓고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m² 외부 열 유속에 30 min 동안 노출시켜 연기관련지수 및 CO, CO₂ 연소 가스를 분석하였다.

본 실험의 연기측정 시험법은 공기의 흐름이 있는 상태로써 대부분 시편을 외기에 노출시킨 상태에서 연소를 실시하므로 실제 화재와 유사한 특성을 조사할 수 있다는 장점이 있다. 연기 발생률의 측정 원리는 감쇠 계수 k로서 다음과 같이 정의된다⁽²⁰⁾.

$$k = \ln(I_0/I) L^{-1} \quad (3)$$

여기에서 I는 감쇠된 빛 세기, I₀는 연기가 없을 때의 빛의 세기, L은 배기가 덕트를 횡단하는 광로의 길이를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 콘칼로리미터 시험

열방출율(heat release rate, HRR)은 시료 표면적당 발생하는 순간적인 열량의 크기며, 재료의 화재위험성을 나타낼 수 있는 요소이다. 열방출율이 적은 재료를 사용할 경우 화재 발생 시 연소억제 효과를 기대할 수 있다. 이에 대하여 \dot{Q} (HRR)은 다음과 같은 관계식으로 주어진다⁽²¹⁾.

$$\dot{Q} (\text{HRR}) = \dot{m} \cdot \Delta h_c \quad (4)$$

여기에서 \dot{Q} (kW)는 열방출율(HRR), \dot{m} (kg/s)는 질량 감소율(MLR)이고 Δh_c (kJ/kg)는 유효 연소열(EHC)로 표시된다.

Table 2의 HRR_{mean}은 암모늄염 첨가제 MAPP (96.08 kW/m²), DAPP (100.04 kW/m²)로 처리한 시험편이 순수 베니어 시험편과 비교하여 6.3~10.0%의 낮은 값으로 측정되었다. 이들은 열분해 시에 숯을 생성하여 열의 확산과 산소를 차단하고, 화염전단으로부터 또는 화염전단에 열분해 생성물의 확산을 차단하기 때문으로 판단된다⁽¹¹⁻¹³⁾. 그러나 AMCR, AMSF로 처리한 시험편은 무처리한 베니어 시험편의 열방출율 값과 비슷하거나 오히려 더 높았다. 이것은 이들의 열분해 시에 그 자체가 흡열작용을 하지만^(9,10) 시험편의 열방출율 값을 낮추는 데에는 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

CO는 화염과 목재사이에서 가연성 물질의 불완전연소의 반응생성물이다. Table 2 와 Figure 1에 나타낸 바와 같이 AMSF로 도포된 시험편에서 CO_{mean} 발생속도는 0.00225 g/s으로서 순수 베니어 시험편의 CO_{mean} 발생속도(0.00241 g/s)에 비교하여 6.6% 낮게 나타났다. 이것은 시험편의 무기물 함량에 의한 연소억제 효과로 인해 연기발생이 감소되는 것과 같은 맥락으로 이해된다⁽²²⁻²⁴⁾.

또한 암모늄염으로 도포된 시험편의 CO_{peak} 발생속도는 0.005797~0.005964 g/s으로서 순수한 베니어 시험편(0.006387 g/s)에 비하여 6.6~9.2% 낮은 값을 나타내었다. 그러나 MAPP로 처리한 시험편은 예외적으로 15.7% (0.007389 g/s) 정도 높았다. 이것은 목재에 대한 흡수성

Table 2. Combustion Properties of Veneer Specimens Coated with 20 wt% Ammonium Salt Solutions at 50 kW/m² External Heat Flux

Samples	HRR ^a _{mean} (kW/m ²)	CO _{mean} (g/s)	CO _{peak} (g/s)	CO _{2mean} (g/s)	CO _{2peak} (g/s)
Veneer	106.80	0.00241	0.006387	0.07192	0.1918
AMCR	106.15	0.00234	0.005964	0.07058	0.1851
AMSF	111.18	0.00225	0.005797	0.07303	0.1804
MAPP	96.08	0.00276	0.007389	0.06506	0.2007
DAPP	100.04	0.00246	0.005866	0.06151	0.1516
Samples	CO _{peak} (ppm) at time (s)	CO _{2peak} (ppm) at time (s)	SPR ^b _{peak} (m ² /s) at time (s)	SEA ^c _{peak} (m ² /kg) at time (s)	
Veneer	137 / 73	3123 / 67	0.1568 / 60	2341.34 / 65	
AMCR	125 / 80	2970 / 69	0.1614 / 70	2251.59 / 75	
AMSF	122 / 78	2653 / 70	0.1417 / 65	1653.86 / 75	
MAPP	150 / 79	3090 / 72	0.1601 / 65	2395.43 / 15	
DAPP	115 / 80	2259 / 69	0.1141 / 65 0.1045 / 75	2368.99 / 90	

^aMean heat release rate; ^bpeak smoke production rate; ^cpeak smoke extinction area.

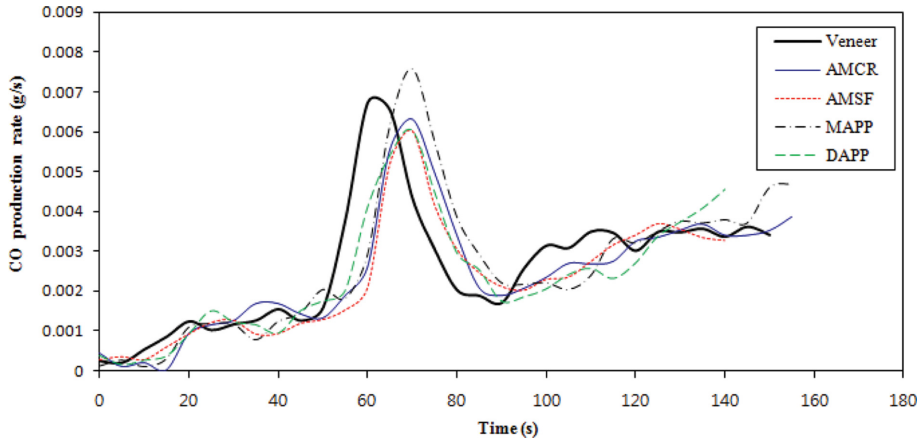


Figure 1. CO production rate curves of veneer specimens coated with 20 wt% ammonium salt solutions at 50 kW/m² external heat flux.

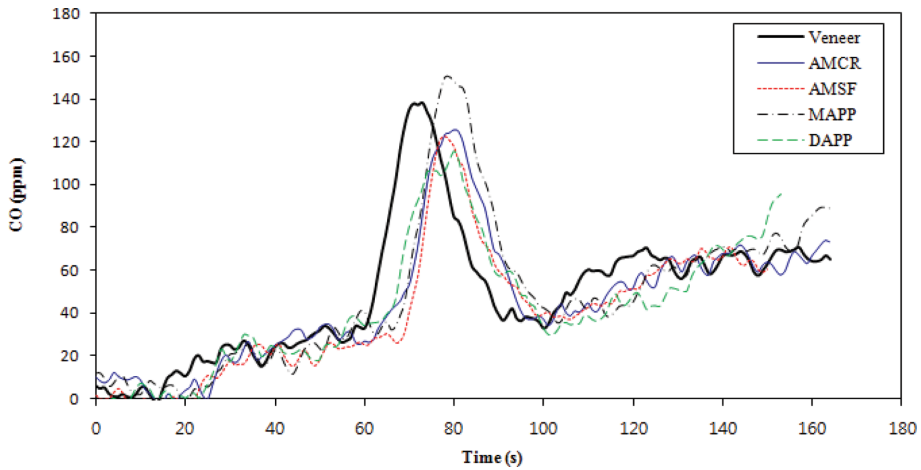


Figure 2. CO concentration (ppm) curves of veneer specimens coated with 20 wt% ammonium salt solutions at 50 kW/m² external heat flux.

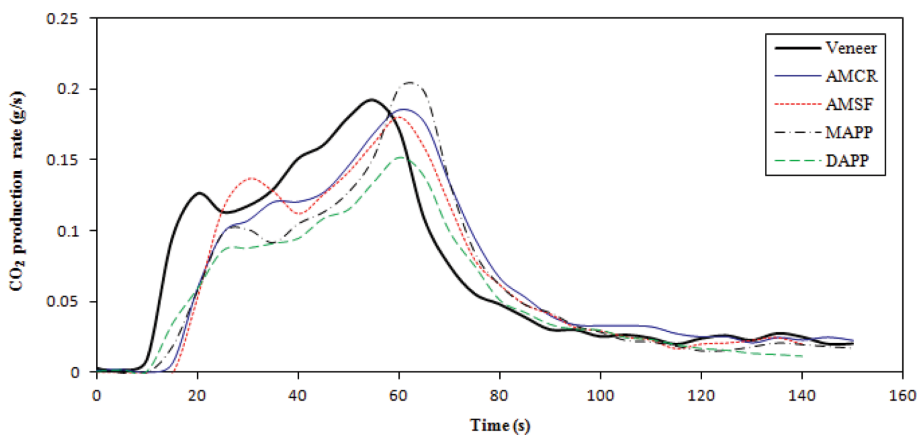


Figure 3. CO₂ production rate curves of veneer specimens coated with 20 wt% ammonium salt solutions at 50 kW/m² external heat flux.

및 자체의 난연성이 강하여 불완전 연소효과를 나타내는 것으로 이해된다. 이것은 Table 2 및 Figure 2에 보여준 바와 같이 최대 150 ppm으로 측정되었다. 즉, OSHA의 허

용기준(PEL) 50 ppm⁽²⁵⁾의 3배에 달하는 심각한 독성을 발생하는 것으로 예상된다.

CO_{2mean} 발생속도는 Table 2 및 Figure 3에 보여준 바와

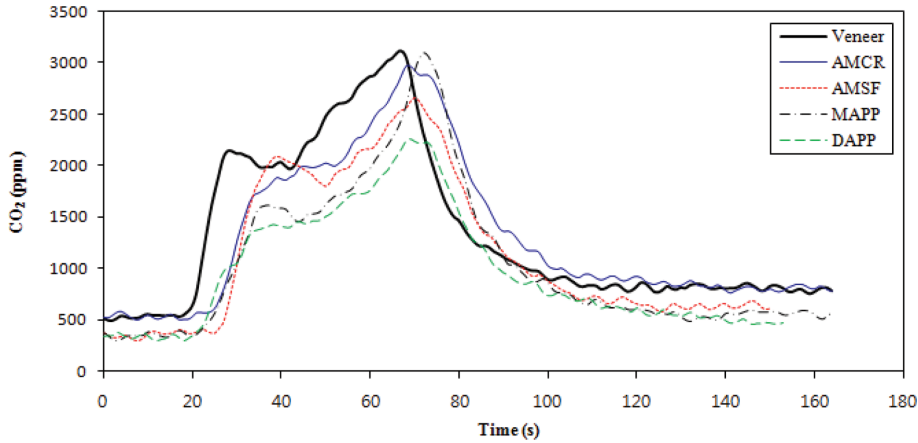


Figure 4. CO₂ concentration (ppm) curves of veneer specimens coated with 20 wt% ammonium salt solutions at 50 kW/m² external heat flux.

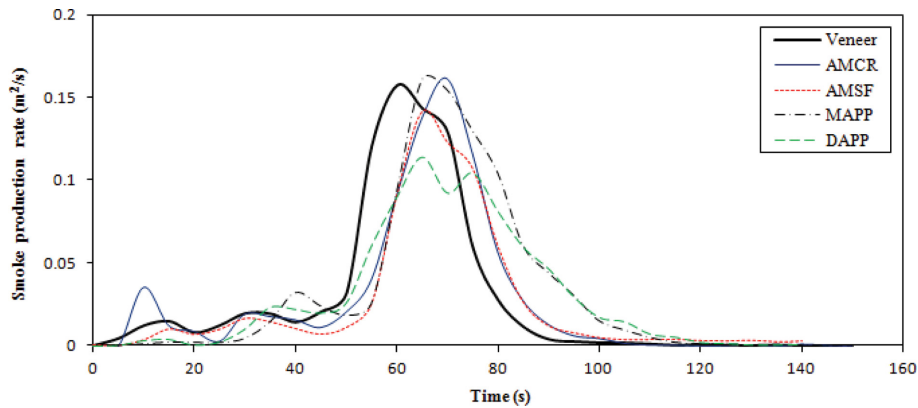


Figure 5. SPR curves of veneer specimens coated with 20 wt% ammonium salt solutions at 50 kW/m² external heat flux.

같이 순수 베니어 시험편에 비하여 화학첨가제로 도포한 특별한 차이가 없으나, DAPP로 처리한 시험편은 14.5%로 매우 낮게 차별화된다. 또한 CO_{2peak} 발생속도는 21.0%로 낮았다. 따라서 DAPP로 도포된 시험편은 다른 시험편보다 연소 억제성이 매우 높은 것으로 판단된다.

또한 CO_{2peak} (ppm) 농도는 Table 2 및 Figure 4에 보여준 바와 같이 모든 시험편에 대하여 2259~3090 ppm으로 측정되었다. 이것은 OSHA의 허용기준(PEL) 5000 ppm⁽²⁶⁾에는 미치지 못하였다. 그러나 CO₂ 자체의 유독성 보다는 호흡을 자극하여 과호흡을 일으킬 소지가 있다. MSHA⁽²⁷⁾에 의하면 이산화탄소는 잠재적 흡입독성 물질과 단순한 질식을 가져다준다. 그것은 대기로부터 폐를 통하여 인체에 들어가서 혈액에 분배한 다음에 산-염기 불균형 또는 산성 혈액증을 일으킬 수 있다.

연기는 액체입자(타르), 증기, 무기입자, 탄소를 포함한 입자들로 구성되고, 연소열과 더불어 건물화재에 있어서 심각한 위험 요인이 된다. 나무에서의 연기는 불꽃 연소에서 형성되고 열분해로부터 생성된 가연성 가스는 불꽃 영역 내에 숯을 생성하는 다환성 방향족 탄화수소로 구성된

다. 그리고 타지 않은 숯은 불꽃 영역으로부터 불완전연소를 만드는 연기로 되어 방출된다.

Figure 5는 시간에 따른 연기발생 속도(smoke production rate, SPR)를 나타내었다. SPR은 감쇠계수와 배기덕트에서 연기의 체적유량의 곱으로 계산된다. SPR 커브는 2개의 피이크를 갖는다. 첫 번째 피이크는 목재의 가열로부터 착화기간 동안에 일어난다. 그리고 두 번째 피이크는 시험편의 모든 표면에 열파(thermal wave)가 시험편의 뒤쪽에서 반사됨으로써 시험편의 연소속도가 증가하는 후면효과(back effect)⁽⁷⁾에 의하여 발생한다. 두 피이크 사이의 연기 발생 속도 및 연기 농도는 탄화과정 동안에 걸쳐서 낮아진다. Ishihara는 목재와 합판이 연소하는 동안에 가열온도가 상승되면 증가하는 질량감소속도에 따라 연기발생 및 연기농도가 증가한다고 보고하였다⁽²⁸⁾.

최대 연기발생속도에 대하여 Table 2에 나타난 바와 같이 AMSF로 처리한 시험편의 최대 연기발생속도 0.1417 m²/s로 무처리한 시험편의 최대 연기발생속도에 비하여 9.6% 낮았다. 이것은 연소 시 감연작용을 하는 것으로 이해된다.^(22,23)

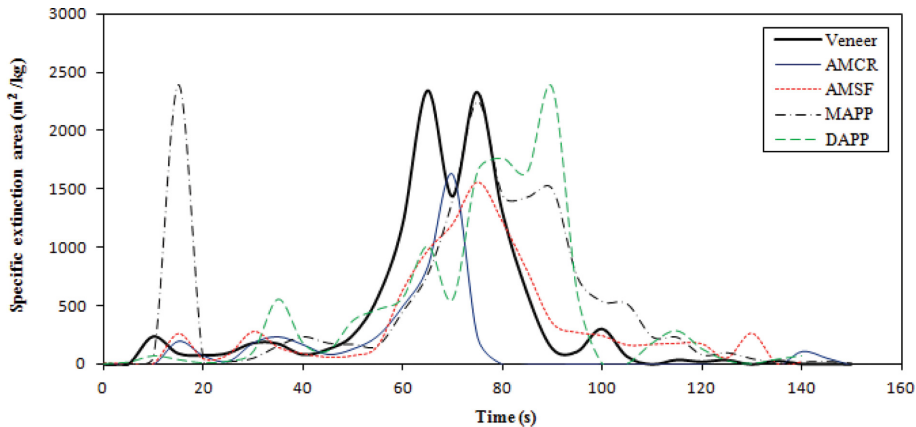


Figure 6. SEA curves of veneer specimens coated with 20 wt% ammonium salt solutions at 50 kW/m² external heat flux.

그러나 MAPP로 도포한 시험편의 최대 연기발생속도는 순수 베니어 시험편에 비하여 2.1% 증가하였다. 이것은 큰 차별성은 없지만 난연효과는 우수하나 연기 억제성은 매우 빈약한 것으로 판단된다.

특히 DAPP로 처리한 시험편에 대하여는 65 s, 75 s의 두 번의 최대 연기발생속도를 나타내었으며 각각 27.2%, 33.3% 낮아졌다. 이것은 시험편의 표면에 숯의 생성이 용이함으로 인한 back effect가 우세한 것으로 판단된다. 또한 MAPP와 비교하면 암모늄 이온의 수가 증가할 경우 연기 억제성이 증가하는 것으로 판단된다.

비소화면적(specific extinction area, SEA)은 연기방출율(smoke production rate, SPR)을 질량감소율(mass loss rate, MLR)로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다. Table 2 및 Figure 6에 나타난 바와 같이 AMCR과 AMSF로 처리한 경우는 난연효과가 존재함에도 불구하고 각각 2251.59 m²/kg (at 75 s), 1653.86 m²/kg (at 75 s)으로서 무처리한 베니어판의 비소화면적 2341.34 m²/kg (at 65 s)보다 적었다. 이것은 각각 3.8%, 29.4% 적었으며 저발연 작용을 하는 것으로 판단된다. 연기발생속도와 비교할 때 AMCR의 최대 비소화면적이 작아진 것은 질량감소율이 크기 때문으로 판단된다.

MAPP로 처리한 베니어판의 최대 비소화면적은 15 s에서 2395.43 m²/kg으로서 무처리한 베니어판의 값인 65 s에서 2341.34 m²/kg에 비하여 차별성은 특별하지 않다. 그러나 최대 비소화면적 발생 시간은 65 s에서 15 s로 76.9% 빨라졌다. 이것은 연기억제에는 매우 불리한 것으로 판단된다.

또한 DAPP로 처리한 시험편의 경우, 최대 비소화면적은 2368.99 m²/kg으로 측정 되었으며 무처리한 베니어판과 비교하여 차별성은 없었다. 그러나 최대 비소화면적 발생 시간은 90 s로 무처리한 시험편보다 38.4% 지연되었으며 최대 연기발생속도 시간인 65 s보다 38.4% 지연되었다. 그러므로 DAPP로 처리된 시험편은 난연성과 연기억제성이 우수한 것으로 판단된다.

4. 결 론

4종의 암모늄염으로 도포한 베니어 시험편의 연소특성에 관한 실험을 ISO 5660-1, 2 표준에 의한 콘칼로리미터를 이용하여 수행하였으며, 결론은 다음과 같다.

1) MAPP, DAPP으로 도포한 시험편의 열방출율은 순수 베니어 시험편과 비교하여 6.7% (96.08 kW/m²), 10.0% (100.04 kW/m²)의 낮은 값으로 나타내었다. 이들은 열분해 시에 숯을 생성하여 열의 확산과 산소를 차단하고, 화염전단으로부터 또는 화염전단에 연소성 분해생성물의 확산을 차단하기 때문으로 판단된다.

2) MAPP으로 처리한 시험편의 최대 일산화탄소발생속도는 순수 베니어판보다 예외적으로 15.7% 정도 높았다. 또한 최대 일산화탄소생성농도(ppm)는 150 ppm으로 이것은 베니어판에 대한 연소 억제성이 강하여 불완전 연소효과를 나타내는 것으로서 OSHA 허용기준의 3배에 달하는 것으로 이해된다.

3) AMSF으로 처리한 시험편의 최대 연기발생속도는 무처리한 시험편의 최대 연기발생속도에 비하여 9.6% (0.1417 m²/s)로 낮았고 DAPP로 처리한 시험편에 대해서는 33.3% 낮았다. 이것은 연소 시 감연 작용을 하는 것으로 이해된다.

4) 최대 비소화면적은 DAPP로 도포한 시험편의 경우, 순수 베니어판과 비교하여 2368.99 m²/kg으로 측정 되었으며, 최대 비소화면적 발생시간은 38.4% 지연되었다. 이것은 난연성과 연기 억제성이 우수한 것으로 이해된다.

References

1. M. S. Mahr, T. Hubert, M. Sabel, B. Schartel, H. Bahr and H. Militz, "Fire Retardancy of Sol-gel Derived Titania Wood-inorganic Composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 47, No. 19, pp. 6849-6861 (2012).
2. S. L. LeVan and J. E. Winandy, "Effect of Fire Retar-

- dant Treatments on Wood Strenth: A Review”, *Wood and Fiber Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 113-131 (1990).
3. I. S. Goldstein and W. A. Dreher, “Non-Hygroscopic Fire Retardant Treatment for Wood”, *Froe. Prod. J.*, Vol. 11, No. 5, pp. 235-237 (1961).
 4. R. Kozłowski and M. Hewig, “1st Int Conf. Progress in Flame Retardancy and Flammability Testing”, *Institute of Natural Fibres*, Pozman, Poland (1995).
 5. Y. J. Chung, “Comparison of Combustion Properties of Native Wood Species Used for Fire Pots in Korea”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 16, pp. 15-19 (2010).
 6. J. G. Quintiere, “A Semi-quantitative Model for the Burning Rate of Solid Materials”, NISTIR 4840, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, M.D., U.S.A. (1992).
 7. M. J. Spearpoint and G. J. Quintiere, “Predicting the Burning of Wood Using an Integral Model”, *Combustion and Flame*, Vol. 123, pp. 308-325 (2000).
 8. J. J. Brenden, “How Wine Inorganic Salts Affected Smoke Yield From Douglas-five Plywood”, P · B., U.S. Forest Service, Reseach Paper FPL-249, p. 13 (1975).
 9. H. Bala, Y. Guo, X. Zhao, J. Zhao, W. Fu, X. Ding, Y. Jiang, K. Yu, X. Lv and Z. Wang, “Controlling the Particle Size of Nanocrystalline Titania Via a Thermal Dissociation of Substraes with Ammonium Chloride”, *Materials Letters*, Vol. 60, pp. 494-498 (2006).
 10. S. Mohamed, E. M. Merwe, W. Altermann and F. J. Doucet, “Process Development for Elemental Recovery from PGM Tailings by Thermochemical Treatment: Preliminary Major Element Extraction Studies Using Ammonium Sulfate as Extracting Agent”, *Waste Management*, Vol. 50, pp. 334-345 (2016).
 11. O. Grexa, E. Horvathova, O. Besinova and P. Lehocky, “Falme Retardant Treated Plyood”, *Polym. Degrad. Stab.*, Vol. 64, No. 3, pp. 529-533 (1999).
 12. S. Liodakis, D. Vorisis and I. P. Agiovlaitis, “Testing the Retardancy Effect of Various inorganic Chemicals on Smoldering Combustion of Pinus Halepensisneedles”, *Thermochim. Acta*, Vol. 444, pp. 157-165 (2006). DOI:10.1016/j.tca.2006.03.010.
 13. F. Samyn, S. Bourbigot, S. Duquesne and R. Delobel, “Effect of Zinc Borate on the Thermal Degradation of Ammonium Polyphosphate”, *Thermochim. Acta*, Vol. 456, pp. 134-144 (2007). DOI:10.1016/j.tca.2007.02.006.
 14. 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).
 15. M. M. Hirschler, “Thermal Decomposition and Chemical Composition”, 239, ACS Symposium Series 797 (2001).
 16. Y. J. Chung, “Flame Retardancy of Veneers Treated by Ammonium Salts”, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 18, No. 3, pp. 251-255 (2007).
 17. W. T. Simpso, “Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes”, Chap. 12, *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, U.S.A. pp. 1-21 (1987).
 18. ISO 5660-1, Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, “Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)”, Geneva (2002).
 19. ISO 5660-2, Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 2: Smoke Production Rate Heat (Dynamic Measurement), Geneva (2002).
 20. R. S. Berns, “Billmeyer and Saltszman’s Principles of Color Technology”, Wiley Intersciences, New York, U.S.A. (2000).
 21. V. Babrauskas, “Heat Release Rate, Section 3”, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fourth ed., National Fire Protection Association, Massachusetts, U.S.A. (2008).
 22. M. M. Hirscher, “Reduction of Smoke Formation from and Flammability of Thermoplastic polymers by Metal Oxides”, *Polymer*, Vol. 25, pp. 405-411 (1984).
 23. J. Zhang, D. D. Jiang and C. A. Wilkie, “Thermal and Flame Properties of Polyethylene and Polypropylene Nanocomposites Based on an Oligomerically-modified Clay”, *Polm. Degrad. Stab.*, Vol. 91, pp. 298-304 (2006).
 24. Y. J. Chung, H. M. Lim, E. Jin and J. K. Oh, “Combustion-retardation Properties of Low Density Polyethylene and Etylene Vinyl Acetate Mixtures with Magnesium Hydroxide”, *Appl. Chem. Eng.*, Vol. 22, No. 4, pp. 439-443 (2011).
 25. OSHA, “Carbon Monoxide”, OSHA Fact Sheet, United States National Institute for Occupational Safety and Health, September 14 (2009).
 26. OSHA, “Carbon Dioxide”, Toxicological Review of Selected Chemicals, Final Rule on Air Comments Project, OSHA’s Comments, January 19 (1989).
 27. MSHA, “Carbon Monoxide”, MSHA’s Occupational Illness and Injury Prevention Program Topic, U.S. Department of Labor (2015).
 28. S. Ishihara, “Smoke and Toxic Gases Produced During Fire”, *Wood Research and Technical Notes*, Vol. 16, No. 5, pp. 49-62 (1981).