

일부 목재의 연소 시 발생하는 연기의 위험성 평가

정영진^{*,**,†} · 진 의^{***}

*강원대학교 소방방재공학과, **^(사)한국보건안전환경협회, ***강원대학교 소방방재연구센터
(2022년 6월 14일 접수, 2022년 7월 3일 수정, 2022년 7월 3일 채택)

Risk Assessment of Smoke Generated During Combustion for Some Wood

Yeong-Jin Chung^{*,**,†} and Eui Jin^{***}

^{*}Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea

^{**}The Korean Association for Health, Safety and Environment, Seoul 05836, Korea

^{***}Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 24913, Korea

(Received June 14, 2022; Revised July 3, 2022; Accepted July 3, 2022)

초 록

본 연구에서는 화재 시 연기안전 등급 평가를 표준화하기 위해 Chung's equations 1, 2와 3을 확장하여 Chung's equations-V인 연기성능지수-V와 연기성장지수-V를 산정하였다. 5종류의 목재를 선별하여 ISO 5660-1의 규격에 의한 콘칼로리미터(cone calorimeter)법으로 연기지수들을 측정하였다. Chung's equation-VI에 따라 연기위험성지수-VI에 의한 연기위험성을 등급화 하였다. 연기위험성지수-VI는 PMMA(1) \approx 단풍나무(1.01) < 물푸레나무(1.57) < 전나무(4.98) < 오동나무(46.15) < 적삼목(106.26)의 순서로 증가하였다. 단풍나무, 물푸레나무의 연기위험성이 가장 낮고, 오동나무, 적삼목이 가장 높은 것으로 예측되었다. 시험편 5종의 일산화탄소 평균생성속도는 0.0009~0.0024 g/s으로 나타났으며, 이들 목재는 기준 물질인 polymethyl methacrylate보다 불완전연소 물질임을 나타내었다. 선정된 목재들의 연기특성은 체적밀도가 높을수록 연기성능지수-V (SPI-V)이 증가하였고, 연기위험성지수-VI (SRI-VI)가 감소하였다.

Abstract

In this study, Chung's equations 1, 2, and 3 were extended to standardize smoke safety rating evaluation in case of fire, and Chung's equations-V, smoke performance index-V, and smoke growth index-V were calculated. Five types of wood were selected and their smoke indices were measured using the cone calorimeter method according to ISO 5660-1. The smoke risk was graded by the smoke risk index-VI according to Chung's equation-VI. Smoke risk index-VI increased in the order of PMMA (1) \approx maple (1.01) < ash (1.57) < needle fir (4.98) < paulownia (46.15) < western red cedar (106.26). It was predicted that maple and ash had the lowest smoke risk, and paulownia and western red cedar had the highest. The five samples' CO mean production rate (COP_{mean}) was 0.0009~0.0024 g/s, indicating that these woods were incompletely burned than the polymethyl methacrylate (PMMA) reference material. Regarding the smoke properties of the chosen woods, the smoke performance index-V (SPI-V) increased as the bulk density increased, and the smoke risk index-VI (SRI-VI) decreased.

Keywords: Combustion, Chung's equations, Smoke performance index-V (SPI-V), Smoke growth index-V (SGI-V), Smoke risk index-VI (SRI-VI)

1. 서 론

연소 대상물의 비 열적 위험 요소는 냄새, 연기, 독성, 부식 등에 의한 것이다. 연소 및 화재로 인한 비 열적 위험 요인에 의한 피해는 피해자의 약 75~80%가 독성가스 및 연기 등의 흡입과 산소결핍에 의한 것으로 화염에 직접 노출되는 것보다 높은 것으로 밝혀졌다[1]. 유익한 독성 물질은 CO, HCN 및 산성 가스 또는 자극성 가스이다. 이러

한 독성 가스의 방출은 화재 조건 및 재료 자체의 열분해에 영향을 받는다[2]. 또한 일반적으로 대부분의 화재는 화상의 유무와 관계없이 인체에 유해한 수준의 일산화탄소를 발생시킨다. 생성된 독성가스 및 연기는 인체에 치명적인 영향을 미치므로 연구할 필요성이 있다.

연소 시 생성되는 연기는 화염에 의해 발생된 떠다니는 기체의 흐름으로 더 이상의 화학반응이 일어나지 않고 지속적으로 공기와 혼합되는 물질이다. 이것은 불꽃 연소 시 숲을 생성하는 다 환성 방향족 탄화수소를 형성하는 목재의 열분해로부터 발생하는 가연성 기체이고, 불완전 연소하는 불꽃 연소영역에서 복사 냉각으로 인해 타지 않은 숲은 연기로 된다[3].

Beer-Bourguier-Lambert의 법칙은 연기측정 시험방법의 기본 원리이

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

다. 이것은 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 법칙이다[4]. 현재 총연기방출률, 연기발생률, 연기인자, 비감쇠면적 등이 연기생성을 나타내는 척도로 사용되고 있지만[5-7] 이와 같은 방법은 시간 변화에 따른 제한된 방법으로써 연기생성에 대한 유해성과 연기위험성에 대한 정량적인 평가를 충분히 구현하기에는 아직 미흡한 점이 많다. 이에 따른 개선 방법으로 선행 연구에서는 2개의 변수에 대한 상관관계를 나타내는 식을 개발함으로써 새로운 연기위험성 평가 방법을 제시한 바 있다[8]. 그러나 본 연구는 기존의 연구를 세 가지 연기지수를 바탕으로 지수 간의 상관관계를 확장시킴으로써 종합적인 연기등급을 정량적으로 평가하기 위한 기초 자료를 제공한다[9].

화재 시 생성되는 일산화탄소는 서서히 퍼지는 유독한 기체로서 인체 내의 헤모글로빈과 강한 결합을 함으로써 적은 양으로도 인체에 매우 치명적인 독성가스이다[1]. 일산화탄소는 헤모글로빈과 carboxy-hemoglobin (COHb)을 형성함으로써 저산소증(hypoxia)을 일으키고 oxyhemoglobin의 해리를 촉진시키는 것으로 알려져 있다[10]. CO에 대한 노출 수준은 초기 단계인 10~30% COHb의 혈중 농도에서 숨 가쁨 현상, 현기증 및 일시적 두통 등의 증상을 야기하며, 50~80% COHb 농도에서는 발작, 심혈관 중독, 실신, 혼수상태, 호흡실패 및 사망 등의 더욱 심각한 증상을 야기한다[11].

이산화탄소(CO₂)는 일산화탄소처럼 화재 시 발생하는 가스이며, 이산화탄소의 농도가 5% 이하인 경우 일산화탄소만큼 유독하지는 않지만 호흡을 자극하여 사람의 호흡량을 증가시킨다. 이러한 결과는 과호흡(hyperventilation)을 일으킴으로써 일산화탄소와 같은 다른 유독한 독성 가스의 흡수를 촉진 시키는데 중요한 역할을 한다[12]. 이산화탄소는 고농축 농도에서는 1분 이내에 순간적으로 의식을 잃으며 호흡 정지를 야기하는 것으로 밝혀졌다[13]. 5% 초과 농도인 고농축에서는 호흡성 산증(respiratory acidosis)과 탄산과잉증(hypercapnia)이 발생한다. 심한 산증은 아세틸콜린에스테라아제에 의한 아세틸콜린의 가수 분해를 방해함으로써 호흡과 순환을 저해하는 부교감 신경의 활동 효과를 증가시킨다.

따라서 화재시험을 통하여 화재 시 생성되는 유독가스에 대한 정량적 연구가 필요하다. 화재조건에 노출되었을 때 가연성 재료의 화재 위험성은 연소 성능을 평가할 수 있는 핵심요인으로서 화재의 전파, 착화성, 열방출률 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 열방출률은 화재 시 대상 재료의 잠재적인 화재 위험성을 나타내므로 매우 중요하다. 열방출률 및 연기 발생을 측정하기 위한 많은 기술들이 발전되었으며 콘칼로리미터(cone calorimeter) 시험법이 그 중의 한 방법이다[14]. 이것은 실 화재 현상을 가장 근접하게 모사한 방법이며 대부분의 유기재료가 연소 시 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 기본으로 하고 있다[15].

본 연구에서는 화재 건축설계에 적용 가능한 data base를 구축하기 위하여 내·외장재 및 전자재료 주로 사용되고 있으며, 사용빈도가 높은 목재 중 적삼목(western red cedar), 전나무(needle fir), 물푸레나무(ash), 단풍나무(maple), 오동나무(paulownia)를 선정하여 ISO 5660-1의 규격[4]에 의해 콘칼로리미터 장비를 사용하여 외부 열유속에 의한 연소특성으로서 연기 및 열 관련 값 등을 측정하였다.

측정된 데이터는 Chung's equations 1 (smoke performance index, SPI), Chung's equations 2 (smoke growth index, SGI)와 Chung's equations 3 (smoke intensity, SI)[8]에 의한 연기 관련 지수간의 관계를 확장하여 연기위험성 등급을 종합적으로 평가하기 위한 방법의 기초 자료로 사용하였다. 이것을 바탕으로 한 화재 시 연기위험성 평가를 표준화하기 위한 방법으로 기준물질(polymethyl methacrylate, PMMA)을 사용하였고 Chung's equations-V (smoke performance in-

dex-V, SPI-V와 smoke growth index-V, SGI-V)와 Chung's equation-VI (smoke risk index-VI, SRI-VI)[9]을 이용하여 가연성 재료에 대한 종합적인 연기위험성 등급을 예측하였다.

2. 실험 및 방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 목재 시험편은 적삼목(*Thuja plicata*, western red cedar), 전나무(*Abies holophylla*, needle fir), 물푸레나무(*Fraxinus excelsor*, ash), 단풍나무(*Acer palmatum thunb*, maple), 오동나무(*Paulownia coreana*, paulownia)의 순수한 목재를 구입하여 두께 10 mm로 별도의 가공처리 없이 시험 규격의 시편 크기에 맞게 사용하였다.

목재의 수분함량 측정법은 일정량의 시료를 105 °C의 건조기에서 일정하게 온도를 유지하며 장시간 건조시키고, 더 이상 중량 변화가 없을 때까지 저울을 이용하여 무게를 측정하고 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였다[16].

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

W_m은 함수율을 구하고자 하는 목재 시험편의 중량(g)이고, W_d는 건조시킨 후의 절대건조 중량(g)이다. 목재 시편에 대한 수분함량 및 체적밀도는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The Moisture Content and Bulk Density of Each Wood

Materials	Scientific name	Classification	Moisture content (%)	Bulk density (kg/m ³)
Western red cedar (WC)	<i>Thuja plicata</i>	Soft wood	9.0	293.98
Needle fir (NF)	<i>Abies holophylla</i>	Soft wood	12.3	363.24
Ash (AS)	<i>Fraxinus excelsor</i>	Hard wood	9.3	576.84
Maple (MP)	<i>Acer palmatum thunb</i>	Hard wood	7.5	633.78
Paulownia (PN)	<i>Paulownia coreana</i>	Hard wood	7.0	221.86
PMMA	-	-	-	1180.0

또한 Table 2의 기준물질로 사용한 PMMA는 영국의 Fire Testing Technology사에서 검은색을 구입하였고[17,18] 이물질들을 특별한 가공 없이 제거하였고 시험 규격의 시편 크기에 알맞게 절단하여 사용하였다. 특히 PMMA는 우수한 재현성 및 반복성 때문에 기준물질로 사용하였고 선행연구와 동일한 데이터를 사용하였다[19].

2.2. 콘칼로리미터 시험

화재 특성에 대한 시험은 ISO 5660-1의 규격에 근거하여 영국 Fire Testing Technology사의 dual cone calorimeter 장비를 사용하였으며, 실제 화재와 근접한 화재성장기에서 발견되는 50 kW/m²의 외부 열유속(external heat flux) 조건하에서 수행하였다[4]. 사용한 시험편의 크기는 100 mm (W) × 100 mm(±0.5) (L) × 10 mm (H)의 규격으로 절단하였고, 연소 후 연기위험성 평가에 대한 연기 인자 관련 지수를 구하

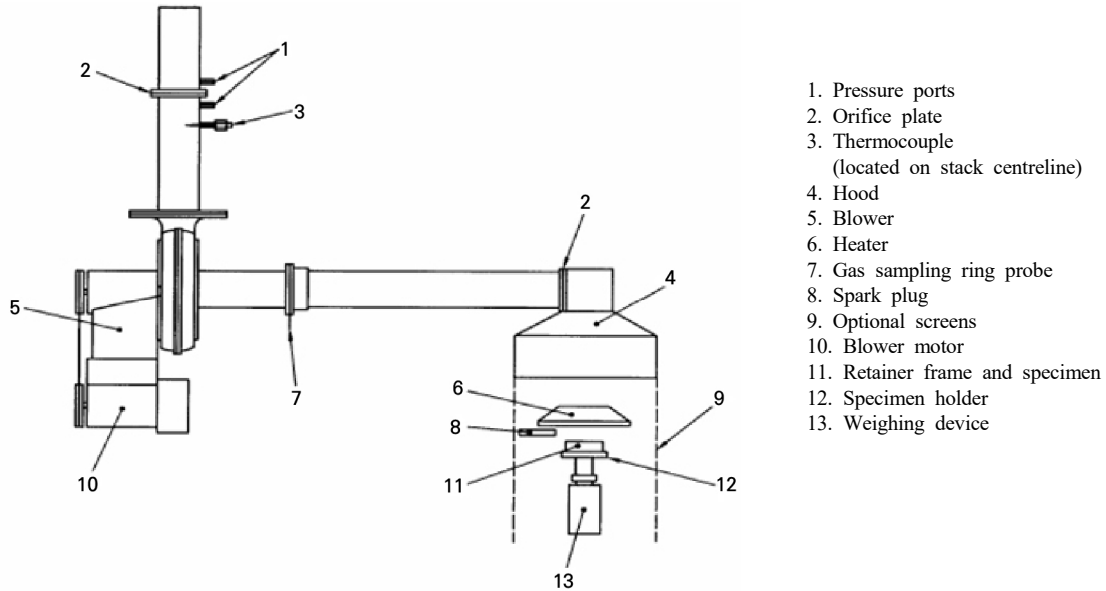


Figure 1. Schematic diagram of cone calorimeter[4].

였다. 시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 에서 항량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감쌌다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 $\pm 2\%$ 이내, 산소분석기의 산소농도가 $20.95 \pm 0.01\%$ 가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m³/s로 설정하였다.

CO, CO₂ 가스는 가스 분석기를 이용하여 농도를 측정하였다. 시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시험편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시험편은 수평방향으로 위치시켰다. 시험편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 장비에서 콘히터 부분은 외부열유속을 유지하였고, 장착된 스파크 점화기는 시험편을 점화시킬 때 사용하였다. 또한 장착된 저울을 사용하여 연소되는 시험편의 질량을 측정하였다. 콘칼로리미터 개략도를 Figure 1에 나타내었으며 콘칼로리미터 시험에 대한 실험조건을 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Experimental Conditions for Cone Calorimeter Test

Contents	ISO 5660-1
Sample size (mm ³)	100 × 100 × 10
External heat flux (kW/m ²)	50
Orientation	Horizontal face upwards
Test time (s)	1800

3. 결과 및 고찰

3.1. 열적 특성에 의한 평가

열방출률(heat release rate, HRR), 연기발생률(smoke production rate, SPR) 및 착화시간(time to ignition, TTI)은 물질의 연소성을 평가하는 중요한 매개변수이다[20]. Table 3에 목재 시험편의 TTI 등 연소성을

제시하였다[21]. 여기에서 maple의 TTI는 16 s로서 western red cedar의 3 s에 비해 5.3배 지연되어 나타났다. 이것은 Table 1에 제시한 바와 같이 maple의 체적밀도가 633.78 kg/m³으로서 western red cedar의 체적밀도(293.98 kg/m³)보다 높기 때문으로 보인다.

Table 3. Combustibility of Wood Specimens at an External Heat Flux of 50 kW/m²

Materials	^a TTI (s)	^b HRR _{1st_peak} (kW/m ²) at time (s)	^c MARHE _{peak} (kW/m ²)	^d SPR _{1st_peak} (m ² /s)
Western red cedar	3	266.46 / 20	166.21	0.0441
Needle fir	9	214.96 / 25	146.27	0.0191
Ash	15	271.93 / 30	232.25	0.0183
Maple	16	245.51 / 40	239.49	0.0172
Paulownia	4	201.70 / 20	125.82	0.0274
PMMA	17	1110.56 / 385	662.94	0.0516

Materials	^e TSPR _{1st_peak} (s)	^f SEA (m ² /kg)	^g COP _{mean} (g/s)	^h CO ₂ P _{mean} (g/s)
Western red cedar	15	185.59	0.0012	0.0276
Needle fir	20	97.10	0.0011	0.0305
Ash	35	100.68	0.0024	0.0476
Maple	45	78.08	0.0021	0.0517
Paulownia	10	67.48	0.0009	0.0179
PMMA	385	169.58	0.0007	0.1232

^a Time to ignition; ^b 1st peak heat release rate; ^c maximum average rate of heat emission; ^d 1st peak smoke production rate; ^e Time to reach 1st peak smoke production rate; ^f specific extinction area; ^g mean carbon monoxide production rate (g/s); ^h mean carbon dioxide production rate (g/s)

목재와 같이 숲을 형성하는 물질의 열분해는 열과 질량의 변화를 동반하는 복잡한 화학작용이다. 목재의 내화 및 열분해에서 목재의 조성은 휘발성 유분의 손실과 흡수된 물의 손실을 제외하고 약 100

°C에 도달할 때까지 온도에 의한 영향은 거의 없다. 약 175 °C로 온도가 증가함에 따라 목재의 일부 성분의 분해가 시작된다. 100~200 °C 사이에서는 CO₂, 무기화합물, 수증기와 같은 비연소성 생성물이 생성되며, 200 °C 이상에서는 셀룰로오스가 분해되고 타르와 가연성 휘발성 물질이 생성된다. 셀룰로오스는 240~350 °C, 헤미셀룰로오스는 200~260 °C, 리그닌은 280~500 °C에서 각각 분해된다. 리그닌이 다른 물질에 비해 열적 안정성이 높은 이유는 분자량이 크고 구조적으로 고도로 가교되어 있기 때문이다. 온도가 높아지면 모든 휘발성 물질은 증발되어 사라지고 15~20% 정도의 숯(char)이 남는데 이는 리그닌 함유량이 많기 때문이다[22].

화재 거동을 결정하는 매개 변수 중 가장 중요한 것은 HRR이다 [23]. Figure 2과 Table 3에 외부 열유속 50 kW/m²에서 측정된 시험편의 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})을 나타냈다. 목재 시험편의 경우 HRR은 착화된 후 빠르게 증가하였으며, 연소 과정에서 두 개의 피크가 공통적으로 나타났다. 연소 초기에 1차 피크가 관찰되었고, 불이 꺼지기 전에 2차 피크가 관찰되었다. 1차 피크와 2차 피크 사이의 영역은 숯이 생성되는 구간으로, 숯의 두께가 두껍게 생성됨에 따라 숯이 단열층 역할을 하므로 HRR의 그래프가 감소되는 것이 관찰되었다. 1차 피크는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌의 열분해로 나타나며, 2차 피크는 생성된 숯이 재 연소되면서 방출되는 가연성 기체와 열적 과동이 시편 뒷면의 절연층까지 도달해서 생기는 후면효과(back effect) 때문에 열이 축적되어 타지 않고 남아있는 목재가 열축적으로 인해 숯이 갈라지면서 다시 연소되는 과정으로 인해 발생하는 것으로 판단된다[24].

Figure 2에 나타난 바와 같이 maple의 전체 연소 기간은 319 s로 western red cedar의 연소 기간인 299 s보다 더 길고, 완만하며 점진적으로 상승하는 것으로 나타났다. 목재의 제1차 최대열방출률(HRR_{1st_peak})은 western red cedar가 266.46 kW/m²로 나타났으며 paulownia는 가장 낮은 201.70 kW/m²로 나타났다. western red cedar의 경우 체적 밀도가 낮고 휘발성 유기화합물을 많이 포함하고 있으므로 다른 목재에 비해 1차 최대열방출률이 높게 나타났으며 paulownia는 체적 밀도가 낮고 또 활엽수로서 자체 휘발성 유기물을 함유하지 않기 때문에 제1차 최대열방출률이 낮게 나타난 것으로 이해된다.

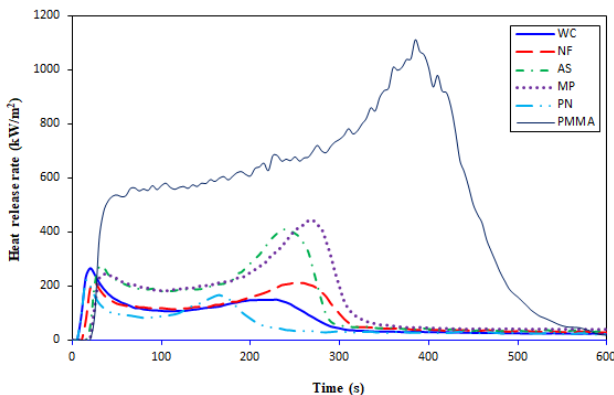


Figure 2. The heat release rate curves of specimens at an external heat flux of 50 kW/m².

또한 ash와 maple의 경우 각각 271.93 kW/m², 245.51 kW/m²으로 비교적 높았다. 이것은 ash와 maple의 특성상 체적밀도가 높아 착화 시간이 지연된 후 목재의 열분해로 인하여 가연성 기체의 발생량이

많아지므로 1차 최대열방출률이 증가하는 것으로 판단된다. 그리고 비교적 두꺼운 숯층을 형성하여 단열층 역할을 함으로써 HRR의 그래프가 감소되는 것으로 판단된다[22].

액체 연소 거동을 보인 기준물질인 PMMA의 HRR_{1st_peak} 값은 1110.56 kW/m²으로 다른 시험편에 비해 매우 높게 나타났다. 이는 PMMA가 비탄화 물질이므로 연소 시 재료의 휘발성이 높기 때문인 것으로 판단된다.

3.2. 연기위험성 평가

HRR과 함께 유독가스 및 연기의 발생은 화재위험성을 평가하는 데 중요한 역할을 한다. 이에 연기위험성을 평가하기 위한 값으로 시간의 변화에 따른 초기 최대연기발생률(1st_peak smoke production rate, SPR_{1st_peak})은 매우 중요한 인자이다. Figure 3과 Table 3에 나타난 바와 같이 western red cedar와 paulownia는 각각 0.0441 m²/s, 0.0274 m²/s로 다른 시험편보다 높게 나타났다. 이것은 western red cedar가 침엽수로서 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있어 연소속도가 높아 착화시간이 3 s로 짧고 또 연기발생률이 증가하기 때문으로 이해된다. 그리고 paulownia는 Table 1에서 보여준 바와 같이 낮은 수분 함량과 낮은 체적밀도(221.86 kg/m³) 때문인 것으로 이해된다. 그리고 PMMA는 액체 연소거동으로 인하여 휘발성이 높기 때문에 SPR_{1st_peak} 값이 큰 것으로 판단되며 HRR 그래프와 비슷한 양상을 보였다.

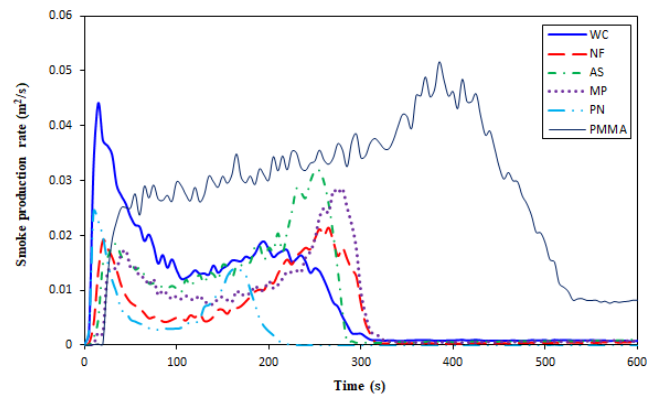


Figure 3. Smoke production rate curves of specimens at an external heat flux of 50 kW/m².

본 연구에서는 재료의 연기위험성을 예측하기 위한 방법으로 연기 성능지수(smoke performance, SPI)는 다음 식 (2)를 적용하였다[8].

$$SPI = \frac{TTI(s)}{SPR_{peak}(m^2/s)} \tag{2}$$

이 식은 연기성능지수를 평가하기 위해서 TTI와 SPR_{peak}의 인자를 고려하였다. TTI는 가연성 기체와 연기의 발생을 의미하며, SPR_{peak}는 SPR_{1st_peak}로서 시간의 변화에 따른 제1차 최대 연기 발생률을 의미한다. TTI와 SPR_{1st_peak} 값을 측정함으로써 화재초기의 연기위험성을 예측할 수 있다. 화재의 확산속도는 재료의 플래시오버에 도달하는 시간과 관계가 있으며, 화재확산 속도가 낮을수록, 플래시오버에 도달하는 시간이 늦어진다. 이것은 연기성능지수와 같은 맥락이며, 연기성능지수가 높으면 연기위험이 낮아져 화재위험이 낮다는 것을 알 수 있다.

Table 4에 보여진 바와 같이 maple의 TTI가 16 s로 가장 지연되었

고, SPI 값도 930.23 s²/m²으로 가장 높게 나타났고, western red cedar는 68.03 s²/m²으로 가장 낮게 나타났다. 이것은 western red cedar가 낮은 체적밀도로 인해 연소속도가 빠르고 연기생성량이 증가함으로써 연기안전성이 매우 낮은 것으로 평가된다.

Table 4. Smoke Performance Index (SPI) of Wood Specimens at an External Heat Flux of 50 kW/m²

Materials	^a TTI (s)	SPR _{1st_peak} (m ² /s)	SPI (s ² /m ²)
Western red cedar	3	0.0441	68.03
Needle fir	9	0.0191	471.20
Ash	15	0.0183	819.67
Maple	16	0.0172	930.23
Paulownia	4	0.0274	145.99
PMMA	17	0.0516	329.46

또한 가연성 재료의 연기위험성을 예측하기 위한 방법으로 연기성장지수(smoke growth index, SGI)는 다음 식 (3)을 적용하였다[8].

$$SGI = \frac{SPR_{peak} (m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak} (s)} \quad (3)$$

이 식은 SPR_{peak}과 최대연기발생률에 도달하는 시간(time to reach peak smoke production rate, Time to SPR_{peak})을 측정하여 화재초기의 연기위험성 평가를 구현하였다. 이 SGI는 SPR_{1st_peak}를 최대연기발생률에 도달하는 시간의 초기 최대값으로 나눈 값으로서 화재 시 연기 성장을 예측할 수 있다. 화재 시 최대열방출률에 도달하는 시간은 화재성장과 관계가 있다. 따라서 재료의 최대열방출률에 도달하는 시간이 짧을수록 화재위험성이 높아진다. 이것은 연기성장 지수와 같은 맥락이며, 연기성장지수가 높으면 연기위험이 높아져 화재위험이 높다는 것을 알 수 있다.

Table 5에 나타낸 바와 같이 ash와 maple이 각각 0.0005 m²/s², 0.0004 m²/s²으로 가장 낮게 나타났으며 western red cedar와 paulownia의 경우 각각 0.0029 m²/s², 0.0027 m²/s²으로 가장 높게 나타났다. 연기성장지수가 높은 이유는 이들이 휘발성 유기물질을 다량 함유하고 있거나 낮은 체적밀도를 갖고 있기 때문으로 이해되며 연기위험성이 높은 것으로 평가된다.

Table 5. Smoke Growth Index (SGI) of Wood Specimens at an External Heat Flux of 50 kW/m²

Materials	SPR _{1st_peak} (m ² /s)	Time to SPR _{1st_peak} (s)	SGI (m ² /s ²)
Western red cedar	0.0441	15	0.0029
Needle fir	0.0191	20	0.0010
Ash	0.0183	35	0.0005
Maple	0.0172	45	0.0004
Paulownia	0.0274	10	0.0027
PMMA	0.0516	385	0.0001

또한 비감쇠면적(specific extinction area, SEA)은 연기발생률(smoke production rate, SPR)을 질량감소율(mass loss rate, MLR)로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다[4]. Table 3에 나타낸 바와 같이 western red cedar는 SEA가 185.59 m²/kg으로서 가장 크고, paulownia가 67.48 m²/kg로 가장 작았다. 이것은 화재 시 체적밀도가 적고 연기발생률 대비 질량감소율이 큰 paulownia가 western red cedar보다 2.8배 저발연 작용을 하는 것으로 판단된다.

또 전체 규모의 화재 조건에서 생성될 수 있는 연기의 잠재적 양을 추정하기 위한 방법으로 연기지수인 연기강도(smoke intensity, SI)를 적용하였다. SI는 연소초기 ISO 5660-1의 열방출 특성 시험에서 얻어진 비감쇠면적(specific extinction are, SEA)과 최대평균열방사율(maximum average rate of heat emission, MARHE)의 곱으로 계산된 인자로서, 실물화재 시험에서 생성될 수 있는 연기의 화재성향을 예측할 수 있는 중요한 데이터이다. SI를 구하는 식은 다음 식 (4)와 같다[8].

$$SI = MARHE (kW/m^2) \cdot SEA (m^2/kg) \quad (4)$$

평균열방사율(average rate of heat emission, ARHE)은 총열방출률을 시간으로 나눈 값으로 정의되고 최대값인 MARHE는 실제 화재 상황에서 화재 발생 경향을 보여주는 좋은 척도로 간주되고 있다 [25,26].

Table 6에 나타낸 SEA와 MARHE를 곱하여 구한 SI는 western red cedar가 30.85 MW/kg으로 가장 높게 나타났으므로 실물 화재 시험에서 연기위험성이 가장 높을 것으로 예측된다. 그러나 paulownia 시험편의 SI가 8.16 MW/kg로서 낮은 값으로 계산된 것은 자체의 체적밀도가 적고 숯 생성이 용이한 구조를 가지고 있어 단열층 역할을 함으로써 MARHE 값이 작아지고 또한 연기발생률 대비 질량손실률이 커 SEA 값이 작아지기 때문으로 판단된다.

Table 6. Smoke Intensity (SI) of Wood Specimens at an External Heat Flux of 50 kW/m²

Materials	MARHE (kW/m ²)	SEA (m ² /kg)	SI (MW/kg)
Western red cedar	166.21	185.59	30.85
Needle fir	146.27	97.10	14.20
Ash	232.25	100.68	23.38
Maple	239.49	78.08	18.70
Paulownia	125.82	67.48	8.49
PMMA	662.94	169.58	112.42

그리고 화재 시 연기위험성 평가를 표준화하기 위한 방법으로 기준 물질을 사용하여 연기성능지수-V (smoke performance index-V, SPI-V)를 사용하여 계산하였다. 계산한 식은 다음 식 (5)와 같다. 즉, SPI-V는 SPI를 SPI_[PMMA] 기준값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의된다 [9]. SPI-V 값이 클수록 연기위험성이 작아지는 것으로 예측된다.

$$SPI-V = \frac{\frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s)}}{\left[\frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s)} \right]_{PMMA}} \quad (5)$$

이 식은 무차원이다. 이 연구에서 연기발생률의 값은 화재초기의 중요성을 고려하여 SPR_{1st_peak} 값을 적용하였다. 특히, 용융되는 플라스틱의 경우에는 SPR_{1st_peak} 를 적용한다.

Table 7에 제시한 바와 같이 PMMA를 기준물질로 한 연기등급지수인 SPI-V은 western red cedar (0.21) < paulownia (0.44) < PMMA (1) < needle fir (1.43) < ash (2.49) < maple (2.82)의 순서로 증가하였다.

Table 7. Smoke Risk Index-VI (SRI-VI) of Wood Specimens at an External Heat Flux of 50 kW/m²

Materials	SPI-V	SGI-V	SRI-VI
Western red cedar	0.21	21.94	106.26
Needle fir	1.43	7.13	4.98
Ash	2.49	3.90	1.57
Maple	2.82	2.85	1.01
Paulownia	0.44	20.44	46.15
PMMA	1	1	1

이것은 western red cedar와 같이 침엽수 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있기 때문에 SPI-V가 낮아져서 연기 위험성이 높고, paulownia는 자체의 낮은 수분함량과 낮은 체적밀도 때문에 연기성장지수가 낮아 연기위험성이 높은 것으로 판단된다. 특히 TTI가 시험 결과에 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 그리고 SPI와 SPI-V에 의한 연기위험성 평가 결과 maple이 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

그리고 연기성장지수-V (smoke growth index-V, SGI-V)는 SGI를 $SGI_{[PMMA]}$ 의 기준값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의되며, 이것은 다음 식 (6)과 같다[9]. SGI-V 값이 클수록 연기 위험성이 커지는 것으로 예측된다.

$$SGI-V = \frac{\frac{SPR_{peak}(m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)}}{\left[\frac{SPR_{peak}(m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)}\right]_{PMMA}} \quad (6)$$

Table 7에 나타난 바와 같이 SGI-V에 의한 연기위험성은 paulownia (20.44)와 western red cedar (21.94)로 가장 높은 것으로 나타났다. 이것은 연소 속도가 빨라짐에 따라 SPR_{peak} 값이 증가하고, SPR_{peak} 에 도달하는 시간이 짧아지는 것을 의미한다.

PMMA를 기준물질로 한 연기등급지수인 SGI-V는 PMMA (1) < maple (2.85) < ash (3.90) < needle fir (7.13) < paulownia (20.44) < western red cedar (21.94)의 순서로 증가하였다.

paulownia와 western red cedar는 체적밀도가 낮으므로 연소가 용이하여 $TSPR_{1st_peak}$ 값이 빠르게 도달하고 그것으로 인하여 SPR_{1st_peak} 값이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 western red cedar의 다량의 휘발성 유기화합물과 paulownia의 낮은 수분함량도 SGI-V를 높이는 것으로 판단된다.

SPI-V와 SGI-V는 콘칼로리미터로 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으로, 연기위험성을 더욱 정밀하고 정량적이게 평가하기 위하여 Chung's equations-VI에 의한 연기위험성지수-VI (smoke risk index-VI, SRI-VI) 식 (7)을 적용하였다[9].

$$SRI-VI = \frac{SGI-V}{SPI-V} \quad (7)$$

각 (5), (6), (7) 식을 계산하여 Table 7에 제시하였다. SRI-VI는 SGI-V를 SPI-V로 나눈 값으로 정의되며, SGI-V 값이 클수록 연기 위험성이 증가하고, SPI-V 값이 작을수록 연기위험성이 증가한다. 이것은 연기위험성 및 연기등급을 종합적으로 판단할 수 있는 것으로 예측된다.

PMMA를 기준물질로 한 연기위험성 등급지수인 SRI-VI는 PMMA (1) ≈ maple (1.01) < ash (1.57) < needle fir (4.98) < paulownia (46.15) < western red cedar (106.26)의 순서로 증가하였다. 체적밀도가 높은 maple과 ash는 다른 시편과 비교하여 TTI가 지연되었으며 SPR_{1st_peak} 이 낮고 SPR_{1st_peak} 에 도달하는 시간이 지연되었다. 따라서 연기위험성은 maple과 ash가 가장 낮고, western red cedar와 paulownia가 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 paulownia의 경우 전술한 바와 같이 화재강도(SI)가 8.16으로 5개의 시험편 중 가장 낮게 나타났다. 이것은 낮은 체적밀도와 낮은 함수량에도 불구하고 2개의 변수에 의한 연기위험성평가의 한계를 보여주었다. 그러나 3개의 변수를 사용하여 상호 관계에 의한 연기위험성지수-VI (SRI-VI)은 이의 한계를 반영하여 이를 높은 연기위험성으로 평가하였다. 결론적으로 연기위험성평가를 위한 SRI-VI의 완결성을 확인하였다. 그러므로 체적밀도가 높은 목재가 연기안전성이 우수한 것으로 판단된다.

3.3. 연소생성물 특성 평가

일산화탄소(CO)는 목재와 불꽃 사이에서 발생하는 휘발성물질의 불완전연소 생성물이다. 휘발성 물질의 열분해속도를 측정하는 하나의 방법인 열방출속도가 높아지는 것은 동반된 CO가스 생성이 증가하는 것으로 설명될 수 있다. Table 3 및 Figure 4에 나타난 시험편 5종의 COP_{mean} 생성속도는 0.0009~0.0024 g/s으로 나타났다. 이는 기준물질인 PMMA (0.0007 g/s)와 비교하여 1.3~3.4배 높아 목재가 PMMA보다 불완전연소 물질임을 보였다. 이들 중 ash와 maple의 COP_{mean} 생성속도는 각각 0.0024g/s, 0.0021 g/s로 비교적 높게 측정되었다. 이것은 목재의 COP_{mean} 생성속도가 불이 꺼진 후 다른 시편에 비해 생성된 숯의 열산화로 인한 CO 발생량이 증가되는 것으로 판단된다.

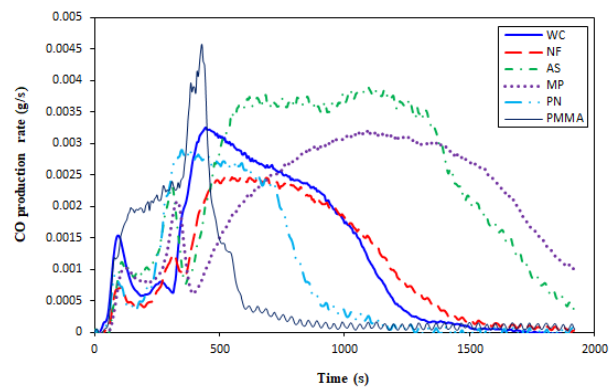


Figure 4. CO production rate (g/s) curves of specimens at an external heat flux of 50 kW/m².

Table 3 및 Figure 5에 나타낸 바와 같이 CO_2P_{mean} 생성속도는 모든 시험편에 대하여 0.0179~0.0517 g/s였다. 이는 기준물질인 PMMA의 CO_2P_{mean} (0.1232 g/s)와 비교하여 2.4~6.9배 낮았다. 모든 시험편이 연소 후 보다 연소 시 HRR 영역에서 CO_2 가 생성되었으며 이는 불꽃 연소 영역에서 CO_2P 이 빠르다는 것을 의미한다.

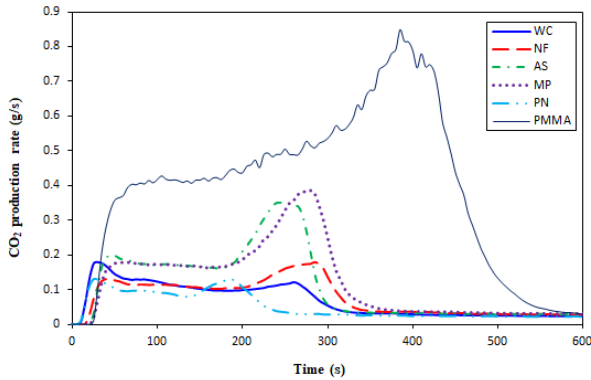


Figure 5. CO_2 production rate (g/s) curves of specimens at an external heat flux of 50 kW/m^2 .

4. 결 론

본 연구에서는 화재 시 연기안전 등급 평가를 표준화하기 위해 Chung's equations 1, 2와 3을 확장하여 Chung's equations-V인 연기 성능지수-V와 연기성장지수-V를 산정하였다. 이를 위하여 5종류의 목재를 선별하여 ISO 5660-1의 규격에 의한 콘칼로리미터(cone calorimeter)법으로 시험하였다. 또한 총괄적으로 Chung's equation-VI에 따라 연기위험성지수-VI에 의한 연기위험성을 등급 평가하였다.

- 1) 연기강도(SI)는 western red cedar가 30.85 MW/kg 으로 가장 높게 나타났으므로 실물 화재 시험에서 연기위험성이 가장 높을 것으로 예측된다. 그러나 paulownia 시험편의 SI는 8.16 MW/kg 로서 낮은 값은 자체의 체적밀도가 적기 때문이다.
- 2) 연기성능지수-V (SPI-V)는 western red cedar (0.21) < paulownia (0.44) < PMMA (1) < needle fir (1.43) < ash (2.49) < maple (2.82)의 순서로 증가하였다. 이것은 western red cedar와 같이 침엽수 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있기 때문에 SPI-V가 낮아져서 연기 위험성이 높고, paulownia는 자체의 낮은 수분 함량과 낮은 체적밀도 때문에 연기성능지수가 낮은 것으로 나타났다.
- 3) 연기성장지수-V (SGI-V)는 PMMA (1) < maple (2.85) < ash (3.90) < needle fir (7.13) < paulownia (20.44) < western red cedar (21.94)의 순서로 증가하였다. maple과 ash가 연기위험성이 가장 낮고, western red cedar와 paulownia가 가장 높은 것으로 나타났다. 체적밀도가 높은 목재가 연기안전성이 우수한 것으로 나타났다.
- 4) 연기위험성지수-VI (SRI-VI)는 PMMA (1) \approx maple (1.01) < ash (1.57) < needle fir (4.98) < paulownia (46.15) < western red cedar (106.26)의 순서로 증가하였다. maple과 ash가 연기위험성이 가장 낮고, western red cedar와 paulownia가 가장 높은 것으로 나타났다. 체적밀도가 높은 목재가 연기안전성이 우수한 것으로

나타났다.

- 5) 시험편 5종의 COP_{mean} 생성속도는 0.0009~0.0024 g/s으로 나타났으며, 이들 목재는 기준 물질인 PMMA보다 불완전연소 물질임을 나타내었다.

본 연구에서 사용한 체적밀도 $221\sim 633 \text{ kg/m}^3$, 수분함량 7.0~12.3% 범위의 목재 5종의 경우, 체적밀도가 높을수록 연기성능지수-V (SPI-V)이 증가하고, 연기위험성지수-VI (SRI-VI)이 감소하였다.

References

1. R. H. White and M. A. Diemberger, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Ch. 17: Fire safety*, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1999).
2. D. A. Purser, Toxic assessment of combustion products. In: P. J. DiNenno et al. (eds.), *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third ed.*, 83-171, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA (2002).
3. M. A. Delichatsios, Smoke yields from turbulent buoyant jet flames, *Fire Saf. J.*, **20**, 299-311 (1993).
4. 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).
5. B. Tawiah, B. Yu, R. K. K. Yuen, Y. Hu, R. Wei, J. H. Xin, and B. Fei, Highly efficient flame retardant and smoke suppression mechanism of boron modified graphene oxide/poly(lactic acid) nanocomposites, *Carbon*, **150**, 8-20 (2019).
6. L. Yan, Z. Xu, and N. Deng, Effects of polyethylene glycol borate on the flame retardancy and smoke suppression properties of transparent fire-retardant coatings applied on wood substrates, *Prog. Org. Coat.*, **135**, 123-134 (2019).
7. T. Fateh, T. Rogaume, J. Luche, F. Richard, and F. Jabou, Characterization of the thermal decomposition of two kinds of plywood with a cone calorimeter - FTIR apparatus, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **107**, 87-100 (2014).
8. Y. J. Chung and E. Jin, Smoke generation by burning test of cypress plates treated with boron compounds, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 670-676 (2018).
9. Y. J. Chung, E. Jin, and J. S. You, Evaluation of smoke risk and smoke risk rating for combustible substances from Fire, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 197-204 (2021).
10. A. Ernst and J. D. Zibrak, Carbon monoxide poisoning, *N. Engl. J. Med.*, **339**, 1603-1608 (1998).
11. R. Von Burg, Toxicology update, *J. Appl. Toxicol.*, **19**, 379-386 (1999).
12. U. C. Luft, *Aviation Physiology: The Effects of Altitude in Handbook of Physiology*, 1099-1145, American Physiology Society, Washington DC, USA (1965).
13. N. Ikeda, H. Takahashi, K. Umetsu and T. Suzuki, The course of respiration and circulation in death by carbon dioxide poisoning, *Forensic Sci. Int.*, **41**, 93-99 (1989).
14. V. Babrauskas, The cone calorimeter-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*,

- 78-87, Elsevier Applied Science Publisher, London, UK (1986).
15. M. M. Hirschler, Fire performance of organic polymers, thermal decomposition and chemical composition, *ACS Symp. Ser.*, **797**, 293-306 (2001).
 16. W. T. Simpsco, Drying and control of moisture content and dimensional changes, Chap. 12, *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, 1-21, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1987).
 17. J. Greener, G. Pearson and M. Cakmak, *Roll-to-Roll Manufacturing: Process Elements and Recent Advances*, John Wiley & Sons, Inc., NJ, USA (2018).
 18. Y. H. Hui, E. Castil-Perez, L. M. Cunha, I. Guerrero-Legarreta, H. H. Liang, Y. M. Lo, D. L. Marshall, W. K. Nip, et al., *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering, Volume 3*, CRC press, NW, USA (2006).
 19. J. S. You and Y. J. Chung, Rating evaluation of fire risk associated with plastics, *Fire Sci. Eng.*, **35**, 9-15 (2021).
 20. L. Yimin, B. Yao, and J. Qin, Preliminary burning tests on PVC fires with water mist, *Polym. Test.*, **24**, 583-587 (2005).
 21. E. Jin and Y. J. Chung, Assessment of fire risk rating of wood species in fire event, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 423-430 (2021).
 22. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability, Chap. 8. In: E. A. Turi (ed.) *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Elsevier, New York, USA (1981).
 23. L. Tsantaridis, *Reaction to Fire Performance of Wood and Other Building Products*, PhD Dissertation, KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2003).
 24. M. J. Spearpoint and J. G. Quintiere, Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model - effect of species, grain orientation and heat flux, *Fire Saf. J.*, **36**, 391-415 (2001).
 25. 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).
 26. 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. Nanotechnol.*, **1**, 1-9 (2015).

Authors

Yeong-Jin Chung; Ph.D., Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr
 Eui Jin; Ph.D., Senior Research Engineer, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 24913, Korea; jin_eui@hanmail.net