

화재로부터 연소성 물질에 대한 연기위험성 및 연기위험성 등급 평가

정영진[†] · 진 의* · 유지선*

강원대학교 소방방재공학과, *강원대학교 소방방재연구센터
(2021년 3월 9일 접수, 2021년 3월 26일 수정, 2021년 3월 26일 채택)

Evaluation of Smoke Risk and Smoke Risk Rating for Combustible Substances from Fire

Yeong-Jin Chung[†], Eui Jin* and Ji Sun You*

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea
*Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea
(Received March 9, 2021; Revised March 26, 2021; Accepted March 26, 2021)

초 록

본 연구는 건축용 자재인 목재 및 플라스틱의 연기 위험성 평가에 대하여 새로 고안된 연기성능지수-V (smoke performance index-V, SPI-V), 연기성장지수-V (smoke growth index-V, SGI-V), 연기위험성지수-VI (smoke risk index-VI, SRI-VI)를 중심으로 조사하였다. 시험편은 가문비나무, 나왕, polymethylmethacrylate (PMMA), polycarbonate (PC)를 사용하였다. 연기 특성은 콘칼로리미터(ISO 5660-1) 장비를 사용하여 시험편에 대하여 측정하였다. 연소반응 후 측정된 연기성능지수-V는 PMMA를 기준으로 1.0~3.4로 나타났다. 연기성장지수-V에 의한 연기위험성은 PC, 가문비나무, 나왕과 PMMA 순서로 증가하였다. 나왕과 PMMA는 유사한 값으로 나타났다. 연기성장지수-V는 PMMA를 기준으로 1.0~9.2로 나타났다. 연기성장지수-V에 의한 연기위험성은 PMMA, PC, 가문비나무, 나왕의 순서로 증가하였다. 모든 시험편의 CO 피크 발생속도는 0.0021~0.0067 g/s로 측정되었다. 결론적으로 연소가 용이한 물질은 연기성능지수-V가 낮고, 연기성장지수-V가 높기 때문에 화재로 인한 연기위험성이 높은 것으로 이해된다. 이는 총괄적으로 연기위험성지수-VI로 정리된다.

Abstract

This study investigated the smoke risk assessment of woods and plastics for construction materials, focusing on the smoke performance index-V (SPI-V), smoke growth index-V (SGI-V), and smoke risk index-VI (SRI-VI) according to a newly designed methodology. Spruce, Lauan, polymethylmethacrylate (PMMA), and polycarbonate (PC) were used for test pieces. Smoke characteristics of the materials were measured using a cone calorimeter (ISO 5660-1) equipment. The smoke performance index-V calculated after the combustion reaction was found to be 1.0 to 3.4 based on PMMA. Smoke risk by smoke performance index-V was increased in the order of PC, Spruce, Lauan and PMMA. Lauan and PMMA showed similar values. The smoke growth index-V was found to be 1.0 to 9.2 based on PMMA. Smoke risk by smoke growth index-V increased in the order of PMMA, PC, Spruce, and Lauan. CO_{peak} production rates of all specimens were measured between 0.0021 to 0.0067 g/s. In conclusion, materials with a low smoke performance index-V and a high smoke growth index-V cause a high smoke risk from fire. Therefore, it is understood that the smoke risk from fire is high. It is collectively summarized by the smoke risk index-VI.

Keywords: Wood, Plastic, Smoke performance index-V (SPI-V), Smoke growth index-V (SGI-V), Smoke risk index-V (SRI-VI)

1. 서 론

목재 및 유기 고분자 물질을 포함한 가연성 물질은 연소 시 발생하는 연기와 연소가스에 의해 많은 피해가 발생한다[1].

따라서 이들의 가연성에 대한 문제점을 보완하기 위해 국내·외적으로 화재성능을 기반으로 한 법규 등을 제정·시행하고 있으며, 목재 및 가연성 물질의 연소속도를 예측하기 위한 연구들이 지속적으로 활발히 진행되고 있다[2,3].

일반적으로 물질이 쉽게 발화하고 화염으로 빠르게 타는 경향을 나타내는 가연성은 화재 위험의 한 지표이다. 연소 중 물질의 거동은 많은 화학적 및 물리적 현상을 포함하기 때문에 다소 복잡하다. 더욱이, 재료는 대부분 여러 구성 요소로 구성되며 각 구성 요소(고분자, 강화유기 또는 무기 섬유, 유기 또는 무기질, 불활성 또는 반응성 난연제,

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

기타 다양한 첨가제 등)는 열 분해되는 자체 속도가 다르다. 그러므로 열분해 속도는 주로 재료 자체의 열 안정성에 따라 달라진다. 열분해 생성물인 가스 및 휘발성 액체는 약한(< 1 kJ/kg) 2차 화학 결합으로 서로 결합된 작은 분자이다. 이러한 휘발성 화합물은 쉽게 발화되고 빠르게 연소되는 공기와 함께 가연성 혼합물을 자발적으로 형성한다 [4-6].

따라서 다양한 가연성 재료의 연소성과 화재위험성 규명에 관하여 집중적인 연구의 필요성 판단되어 목재 및 플라스틱 재료 중 일부분을 대상으로 화재위험 특성을 평가하고자 한다.

화재 시 물질의 열분해로 인해 발생하는 연기량은 빛의 흡수에 의해 측정되고, 그것은 탄소를 포함한 입자, 액체입자(타르), 무기입자, 증기 등을 포함한다. 화재 시 가연성 재료의 비열적 유해 요소는 연기, 냄새, 부식, 독성 등에 의한 것이다. 이러한 비열적 유해 요인으로 인한 화재 피해는 화염에 직접 노출되는 것보다 피해자들의 약 75~80%가 산소결핍과 연기 및 독성가스 등의 흡입에 의한 것으로 밝혀졌다[7]. 열분해로 인해 발생하는 독성 가스는 생성되는 물질의 연기 종류에 따라 복잡해지며, 플레쉬오버에 도달하는 화재는 일반적으로 화상의 유무와 관계없이 인체에 위험한 수준의 일산화탄소를 생성한다. 목재 및 일반 가연물의 연소는 일산화탄소(carbon monoxide, CO), 휘발성 유기 화합물(volatile organic compounds, VOC) 및 다환성 방향족 탄화수소(polycyclic aromatics hydrocarbons, PAH)와 같은 일부 독성 물질이 중요한 독성 배출원으로 알려져 있다. 이들은 모두 불완전 연소로 인한 생성물이고 다환성 방향족 탄화수소는 발암성 화합물로 밝혀진 이후 널리 연구되고 있다. 불완전 연소는 니트로-PAH, 옥시-PAH 및 아자렌과 같은 PAH 유도체도 생성한다[8-10]. 이러한 독성 가스의 배출은 화재 조건과 재료 자체의 열분해에 영향을 받는다.

실제 화재 발생 시 재료에 대한 화재유해성은 착화성, 가연성, 그것이 탈 때 방출되는 열의 양, 열방출률, 화염의 전파, 연기의 생성 그리고 연기의 독성도등을 포함하는 요인들의 조합에 의해서 결정된다. 화재로부터 발생된 연기는 사람의 가시도를 감소시키므로 탈출하는 데 어려움이 있고 안전요원의 구조를 방해하기 때문에 화재 시 심각한 문제가 된다. 가시성을 감소시키는 요인은 실제 화재에서 얼마나 많은 재료가 태워지는지 그리고 연소된 단위 재료 당 얼마나 많은 연기가 방출되는지의 두 가지 요소가 결합된 결과로 나타난다. 그리고 발생된 기체는 부식성이기 때문에 인체에 치명적인 유해성을 가지고 있으므로 화재 시 생성되는 유독가스에 대한 정량적 연구가 필요하다.

이를 위한 연기발생에 대한 연기측정 시험방법은 Beer-Bouguer-Lambert의 법칙을 기본 원리로 한 콘칼로리미터를 이용한다. 이것은 일반적으로 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 법칙이다[11]. 이 시험 방법은 연기발생을 나타내는 척도로 연기발생률, 총연기방출률, 연기인자, 비감쇠면적 등이 사용되고 있지만 [12-14] 이와 같은 방법은 시간이 변화됨에 따른 제한된 방법으로 연기발생에 대한 정량적인 평가가 미흡하고 연기위험성 평가를 구현하기에는 아직 충분하지 못한 점이 많다.

선행 연구에서는 콘칼로리미터에 의한 시험자료를 바탕으로 연기 위험성을 평가하기 위하여 Chung's equations 1~3을 정립하였고[15], 또 Chung's equations-II를 정립하였다[16]. 이를 정리하면 연기위험성은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\text{Smoke risk} \propto \frac{\text{SGI}-\text{II}}{\text{SPI}-\text{II}} \text{ or } \frac{\text{SGI}}{\text{SPI}} \quad (1)$$

Table 1. Bulk Density and Moisture Content of Each Wood[18]

Materials	Moisture content (%)	Bulk density (kg/m ³)
Spruce	10.7	510.9
Lauan	8.8	542.5

연기위험성은 연기성능지수(smoke performance index, SPI)가 낮을수록 연기성장지수(smoke growth index, SGI)가 높을수록 높아진다. 이것은 화재초기 연기위험성을 제시하기 위한 것으로 새로운 연기시간의 상관관계를 확장시킴으로써 연기 등급을 종합적으로 평가하기 위한 기초 자료로 사용하기 위한 것이다. 따라서 본 연구에서는 또 다른 Chung's equations-V인 연기성능지수-V (smoke performance index-V, SPI-V), 연기성장지수-V (smoke growth index-V, SGI-V)와 Chung's equation-VI인 연기위험성지수(smoke risk index-VI, SRI-VI)를 새로 고안하여 종합적인 연기위험성 및 연기위험성 등급을 평가하였다. 연기위험성의 우선순위를 기준물질을 이용하여 등급화 함으로써 가연성 물질에 대한 무차원의 신규한 평가 측정지수 및 정량적 등급 평가지표를 제공하고 이를 이용하여 화재위험성을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 주로 건자재 및 내장재로 주로 사용되며, 사용빈도가 높은 침엽수 중 가문비나무와 활엽수 중 나왕을 선별하였고, 열가소성 수지 중 비탄화 고분자인 polymethyl methacrylate (PMMA)와 탄화고분자인 polycarbonate (PC)를 선별하여 시험재료로 사용하였다. 이를 바탕으로 화재 시에 목재, 플라스틱, 난연 처리된 물질, 섬유 등의 모든 가연성 물질의 연기발생에 대하여 연기위험성을 등급화 하고자 하였다. 본 연구의 목적은 PMMA를 기준물질로 사용하여 연기위험성을 무차원지수로 평가함으로써 화재위험성평가 방법으로 이용하고, 이를 확장하여 화재설계 및 화재 시뮬레이션 데이터의 기초자료로 활용하기 위함이다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 시험편은 가문비나무(Spruce)와 나왕(Lauan)의 순수한 목재를 구입하여 두께 10 mm로 별도의 가공처리 없이 시험 규격의 시편 크기에 맞게 사용하였다.

수분함량은 일정량의 시료를 105 °C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시료의 중량을 4 h 간격으로 더 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식 (2)을 이용하여 계산하였다[17].

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

W_m 은 함수율을 구하고자 하는 목재편의 중량(g)이고, W_d 는 건조시킨 후의 절대건조 중량(g)이다.

목재의 체적밀도와 수분함량은 Table 1에 나타내었다.

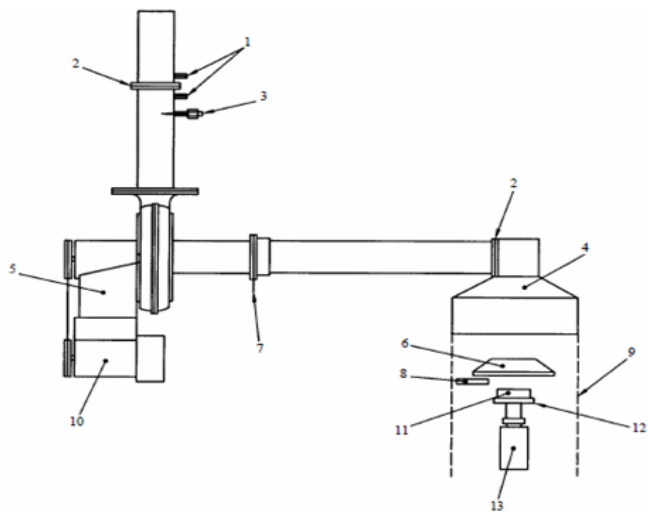
또한 플라스틱으로 PMMA는 기준물질로 사용하기 위하여 영국의 Fire Testing Technology사로부터 검은색으로 구입하였으며, PC는 아크릴케가사에서 구입하여 가공 없이 그대로 사용하였다. 폴리머 시편에는 충전제와 첨가제가 포함되지 않았다. 각 플라스틱의 물성은 Table 2에 나타내었다[19,20].

Table 2. The Physical Characteristics of Each Plastics

Materials	Glass transition temp. (T_g) (°C)	Density range (kg/m ³)
PMMA	114	1180
PC	150	1200~1220

Table 3. 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



1. Pressure ports, 2. Orifice plate, 3. Thermocouple, 4. Hood, 5. Blower, 6. Heater, 7. Gas sampling ring probe, 8. Spark plug, 9. Optional screens, 10. Blower motor, 11. Retainer frame and specimen, 12. Specimen holder (located on stack centreline), 13. Weighing device
Figure 1. Schematic diagram of cone calorimeter[11].

2.2. 콘칼로리미터 시험

연소 성질에 대한 시험은 ISO 5660-1의 표준방법에 근거하여 Fire Testing Technology사의 Dual cone calorimeter를 사용하여, 실제 화재 시와 유사한 화재성장기에서 발견되는 50 kW/m² 외부 열 유속(external heat flux)조건에서 진행 하였다[21]. 사용한 시험편의 두께는 10 mm이고 시험편은 100 mm × 100 mm (±9) 크기의 규격으로 절단하였으며, 연소 반응 후 화재위험성 평가 분석에 필요한 연기 인자 관련 지수를 구하였다. PC는 화재 시 부풀어 오르는 물질의 고유 성질로 인하여 그리드(grid)를 사용하였으며, 그 외 시험편은 그리드를 사용하지 않았다. Figure 1에 콘칼로리미터 개략도를 나타내었으며 Table 3에 콘칼로리미터 시험에 대한 실험조건을 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 건자재 목재 및 플라스틱류의 화재위험성을 평가하기 위한 한 부분으로 연기 특성을 중심으로 평가하였다. 이것은 기준 물질을 이용하여 연기위험성을 등급화시킴으로써 가연성 물질에 대

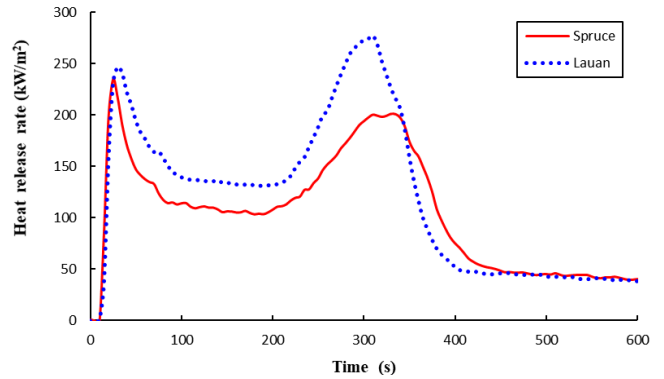


Figure 2. Heat release rate curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

한 정량적인 등급지표를 제공할 수 있다. 연기방출 특성과 관련된 요소로 착화시간(time to ignition, TTI), 열방출률(heat release rate, HRR), 연기생성속도(smoke production rate, SPR) 및 최대연기생성속도에 도달하는 시간(time to reach peak smoke release rate, TSPR)을 측정 한 후 연기성능지수(SPI)와 연기성장지수(SGI)를 평가한 후 PMMA를 기준물질로 무차원의 연기등급지수인 SPI-V 및 SGI-V를 계산하였다. 콘칼로리미터 시험은 PMMA의 우수한 반복성 및 재현성 때문에 이것을 기준물질로 사용한다. 따라서 본 연구에서는 PMMA를 사용하여 각각 물질의 연기위험성 및 연기위험성 등급을 평가하였다. 그에 대한 데이터를 Tables 4~8에 제시하였다.

3.1. 열방출률(heat release rate, HRR)

열방출률은 화재의 특성을 제어하고 화재의 발생에 대한 기여도를 나타내며 연소모델링을 하기 위한 중요한 측정값이다. 이것은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이며, 재료의 연소 위험성을 가장 잘 나타내는 요소이다[22,23]. 콘칼로리미터 시험법은 순 연소열량이 연소에 필요한 산소의 양에 비례한다는 점을 기초로 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다. 열방출률이 커질수록 산소 소비량이 증가하여 화재위험성은 높아지므로 이를 바탕으로 연소모델링이 가능해진다. 건축 재료를 열방출률이 낮은 것으로 사용할 경우 화재발생시 연소억제 효과를 기대할 수 있다[24]. 열방출률이 높은 불꽃연소는 화재영역을 성장시키고 발전시키므로 이것은 화재의 세기를 좌우한다.

Figure 2에 나타난 바와 같이 열방출률은 모든 시험편이 착화 시 갑자기 증가하였으며 그 후 감소하는 경향성을 보였다. 목재가 연소되는 기간 동안 2개의 피크가 공통적으로 관찰되었으며, 연소의 첫 단계에서 1차 피크가 나타나고 불이 꺼지기 전에 2차 피크가 나타난다. 1차 피크는 가연물의 연소 표면 가까운 곳에서 숯이 형성되기 전에 발생한다. 1차 피크와 2차 피크 사이는 처음 생성된 숯 층이 단열층 역할을 하고 단열효과로 인하여 시료가 점차적으로 연소하기 때문에 감소되는 경향성이 관찰되었다. 2차 피크는 열적 파동이 뒷면 절연층에 도달할 때 일어나고 이런 후면효과(back effect)로 인하여 열이 축적되어 많은 열이 동시에 방출되기 때문에 나타난다[21,25]. 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기로 물질의 화재 위험성을 가장 잘 나타낼 수 있는 요소이다. 목재의 1차 최대열방출률(HRR_{1st peak}) 특성은 가문비나무 234.71 kW/m², 나왕 246.84 kW/m²으로 나타났다. 이어서 나왕의 2차 최대열방출률

Table 4. Combustion Properties of Wood Specimens at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	^a TTI (s)	^b HRR _{1st_peak} (kW/m ²) / at time (s)	^c HRR _{2nd_peak} (kW/m ²) / at time (s)	^d SPR _{1st_peak} (m ² /s)
Spruce	9	234.71 / 25	201.19 / 330	0.0231
Lauan	10	246.84 / 30	277.45 / 310	0.0297
Materials	^e TSPR _{1st_peak} (s)	^f SPR _{2nd_peak} (m ² /s) / at time (s)	^c CO _{peak} (g/s) / at time (s)	^h CO _{2peak} (g/s) / at time (s)
Spruce	20	0.0214 / 335	0.0021 / 665	0.1556 / 315
Lauan	25	0.0273 / 315	0.0048 / 910	0.2207 / 300

^a Time to ignition, ^b 1st_peak heat release rate, ^c 2nd_peak heat release rate, ^d 1st_peak smoke production rate, ^e Time to 1st_peak smoke production rate, ^f 2nd_peak smoke production rate, ^g peak carbon monoxide production rate (g/s), ^h peak carbon dioxide production rate (g/s).

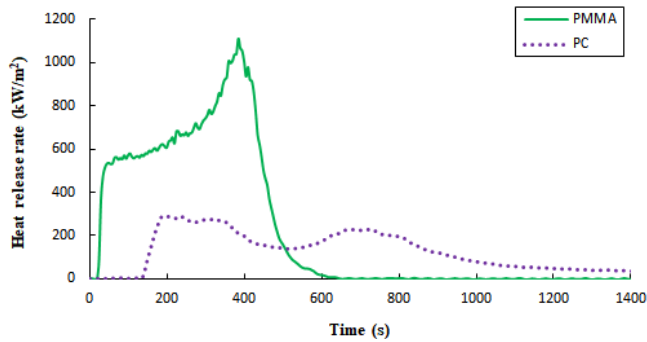


Figure 3. Heat release rate curves of plastic specimens at 50 kW/m² external heat flux.

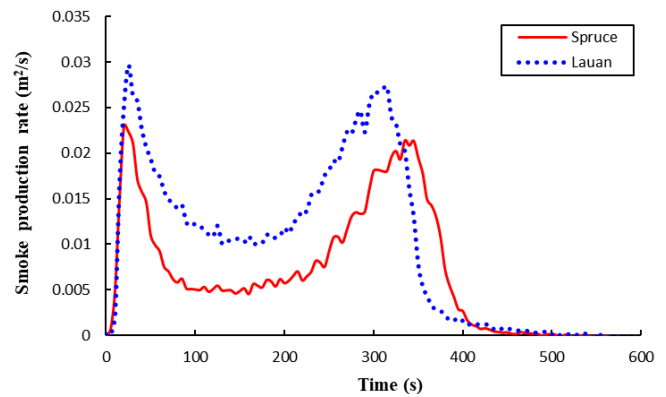


Figure 4. Smoke production rate curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

(HRR_{2nd_peak})이 가문비나무보다 높게 나타난 것은 체적밀도가 클수록 열 축적이 커지 때문인 것으로 예측된다.

또한 Figure 3에 보인 바와 같이 액체 연소 거동을 보인 PMMA의 HRR_{1st_peak} 값은 1110.56 kW/m²으로 PC와 비교하여 높게 나타났다. 이는 연소 시 휘발성이 높기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 PC의 경우 탄화 고분자(charring polymer)이므로 탄화하여 단열층을 생성함에 따라 열을 차단하는 효과가 있어 289.13 kW/m²으로 낮게 나타났다. 이것은 비탄화(non-charring) 시편은 완전히 타버리지만 탄화(charring) 시편은 비교적 잔여물을 생성한다는 보고와 일치한다[25]. 그리고 초기화재 열방출률은 비탄화 고분자(non-charring polymer)가 탄화 고분자(charring polymer)보다 더 높게 나타므로 비탄화 고분자가 탄화 고분자보다 화재 위험성이 더 큰 것으로 나타났다[10].

3.2. 연기발생률(smoke production rate, SPR)

시간의 변화에 따른 연기발생률(SPR)은 배기 덕트에서 연기의 체적유량과 감쇠계수와와 곱으로 계산된다. Figure 3에 나타난 바와 같이 가문비나무의 연기발생률은 20과 335 s에서 두 개의 피크가 나타났다. 이는 일반적인 목재의 열분해 부분과 잘 일치한다. 이것은 화재 시 가연물의 더 많은 표면이 노출됨으로써 나타나는 목재의 균열과 연소가스의 갑작스런 방출의 결과이다. Table 4와 Figure 4에 나타난 바와 같이 가문비나무와 나왕의 1차 최대 연기발생률(SPR_{1st_peak})은 각각 0.0231과 0.0297 m²/s로 나타났다. 또한 가문비나무와 나왕의 2차 최대 연기발생률(SPR_{2nd_peak})은 각각 0.0214와 0.0273 m²/s 나타났다. 이것은 침엽수인 가문비나무가 활엽수인 나왕보다 높은 리그닌 함량과 낮은 셀룰로오스를 가지고 있기 때문이다[26]. 리그닌의 방향족 화학 구조는 900 °C에서 35~38%에 달하는 높은 숯을 만들어 낼 수 있다 [27]. 그러나 화재초기 시험편의 순간 연기생성속도는 시험편의 체적 밀도 및 휘발성과 일부 연관이 있는 것으로 이해된다. 따라서 목재에

대한 1차 최대 연기발생률 도달시간은 가문비나무 20 s, 나왕 25 s로 측정되었다. 이것은 침엽수 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있기 때문으로 이해된다[28]. 이어 2차 최대 연기발생률 도달 시간은 가문비나무 335 s, 나왕 315 s로 나타났으며 2차 최대 연기발생률 도달 시간이 지연되었다. 이는 연소 시 숯이 생성됨에 따라 연소억제 효과가 증가되었기 때문이라 판단된다.

시험편의 연소에 의해 형성된 숯은 목재보다 열전도율이 낮기 때문에 목재의 아래쪽 부분에 열침투를 방해한다[25]. 숯이 증가함에 따라 열분해 전단과 열유속에 노출된 목재 표면 사이에서 열적 저항이 증가되므로 연소시간을 지연시키는 결과를 초래한 것으로 판단된다.

Table 5와 Figure 5에 나타난 바와 같이 플라스틱의 1차 최대 연기 발생률(SPR_{1st_peak})은 PMMA가 0.0516 m²/s, PC가 0.1189 m²/s로 나타났으며 PC가 PMMA와 비교하여 2.3배 높았다. 또한 비탄화 플라스틱인 PMMA는 최대연기발생률이 385 s에서 나타났으며 PC는 285와 660 s에서 관찰되었다. 이것은 플라스틱의 열분해 영역과 일치하며 PC가 2개의 피크를 가지는 것은 착화 후 탄화물이 생성되었기 때문이다. PC가 화재초기 연기위험성이 높음을 의미하며 가연성 가스가 많이 생성됨을 의미한다.

착화시간 및 열방출률의 초기 피크의 최대값은 물질의 화재위험성을 특성화한다[15]. 또한 연기위험성도 맥을 같이 하는 것으로 예상된다. 따라서 선행 연구에서는 가연물의 연기안전성을 예측하기 위하여 연기성능지수(SPI)를 정립하여 아래의 식 (3)으로 발표하였다[15].

$$SPI = \frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s)} \tag{3}$$

Table 5. Combustion Properties of Plastic Specimens at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	^a TTI (s)	^b HRR _{1st_peak} (kW/m ²) / at time (s)	^c SPR _{1st_peak} (m ² /s)
PMMA	17	1110.56 / 385	0.0516
PC	135	289.13 / 190	0.1189
Materials	^d TSPR _{1st_peak} (s)	^e CO _{2peak} (g/s) / at time (s)	^f CO _{2peak} (g/s) / at time (s)
PMMA	385	0.0046 / 430	0.8484 / 385
PC	285	0.0067 / 200	0.2101 / 230

^a Time to ignition, ^b 1st_peak heat release rate, ^c 1st_peak smoke production rate, ^d Time to 1st_peak smoke production rate, ^e peak carbon monoxide production rate (g/s), ^f peak carbon dioxide production rate (g/s).

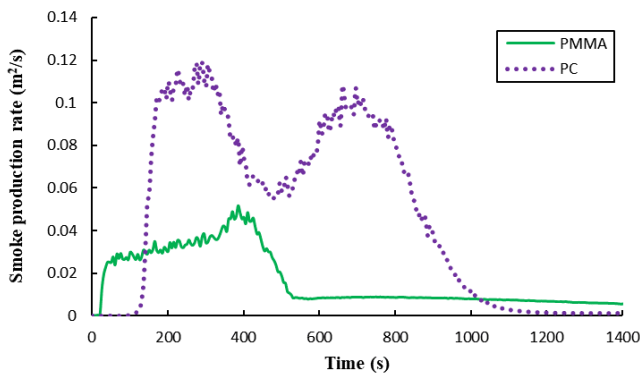


Figure 5. Smoke production rate curves of plastic specimens at 50 kW/m² external heat flux.

이 식은 연기성능지수를 평가하기 위하여 착화시간(TTI), 최대연기 발생률(SPR_{peak})의 변수를 고려하였다. 목재가 연소될 때의 에너지 방출속도, 연기생성, 가스 독성은 목재의 종류, 수분함량, 밀도, 열적특성 및 열침투성 등에 따라 결정된다. 가연물과 관련하여 연소 성질의 이해를 돕는 다른 중요한 특성은 착화시간이다. 착화시간은 시험편의 열원에 의한 노출로부터 지속적인 불꽃연소가 시작되기 전까지이며 착화시간이 짧을수록 재료는 더욱 가연성임을 나타낸다.

Table 4에 나타난 바와 같이 열유속이 50 kW/m²인 경우, 착화시간은 가문비나무 9 s, 나왕 10 s로서[18] 특별한 차별성이 없었다. 사용된 목재 시편들의 수분함량의 차이는 1.9%이었으나 착화 시간에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났으며 또한 목재의 체적밀도도 특별한 영향을 미치지 못하였다.

Table 5에 나타난 바와 같이 PMMA의 착화시간은 17 s, PC는 135 s로 나타났다. PC는 밀도 및 열적 안정성이 PMMA보다 높아 초기 화재 연소성이 낮은 것으로 판단된다.

그리고 새로운 제2의 연기성능지수-V (SPI-V) 식 (4)를 고안하여 적용하고자 한다. 즉, SPI-V는 SPI를 SPI_[PMMA] 표준 값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의된다. 목재의 화재 확대와 플래시오버의 시간과 상관성이 있으므로[29], 화재 확대가 증가할수록 화재안정성이 감소하는 것과 같이[30] 연기안정성 또한 감소하는 것으로 이해된다. SPI-V를 구하는 식 (4)는 다음과 같다.

Table 6. Smoke Performance Index-V (SPI-V) of Wood Specimens and Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	TTI (s)	SPR _{1st_peak} (m ² /s)	SPI (s ² /m ²)	SPI-V
Spruce	9	0.0231	390	1.2
Lauan	10	0.0297	337	1.0
PMMA	17	0.0516	329	1.0
PC	135	0.1189	1135	3.4

$$SPI-V = \frac{TTI (s)}{\left[\frac{SPR_{peak} (m^2/s)}{SPR_{peak} (m^2/s)} \right]_{PMMA}} \quad (4)$$

이 식은 무차원 지수로 나타낸다. 이 연구에서 연기발생률의 값은 초기 화재의 중요성을 고려하여 1차 최대 연기발생률(SPR_{1st_peak}) 값을 적용하였다. 특히, 액체성 플라스틱을 포함한 가연물은 연소과정 중 1차 최대 연기발생률(SPR_{1st_peak})을 적용하고자 한다.

Table 6에 재료의 SPI 및 SPI-V 값을 제시하였다. SPI는 착화시간 및 연기가 조합된 값으로 PC가 가장 높게 나타났다. 이것은 모든 재료 중 PC의 착화시간이 매우 긴 시간 지연되기 때문으로 판단된다. PMMA를 기준물질로 한 연기등급지수인 SPI-V는 PMMA (1.0) = Lauan (1.0) < Spruce (1.2) < PC (3.4)의 순서로 증가하였다. 이것은 PMMA와 같이 휘발성 유기물질을 함유한 플라스틱은 SPI-V가 매우 낮아지기 때문에 화재위험성이 높다는 것을 의미한다.

SPI와 SPI-V에 의한 연기위험성 평가 결과 PC가 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

또한 선행 연구에서 가연물의 연기위험성을 예측할 수 있는 연기성장지수(SGI)인 식 (5)를 보고한 바 있다[15].

$$SGI = \frac{SPR_{peak} (m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak} (s)} \quad (5)$$

이 식은 최대연기발생률(SPR_{peak})과 최대연기발생률에 도달하는 시간(Time to SPR_{peak})을 고려하여 연기 위험성 평가를 구현하였다.

그리고 새로운 제2의 연기성장지수-V (SGI-V) 식 (6)을 고안하여 적용하고자 한다. 즉, SGI-V는 SGI를 SGI_[PMMA]의 표준 값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의된다. 가연물의 화재 확대와 플래시오버의 시간과 상관성이 있으므로[29], 화재 확대가 증가할수록 화재안정성이 감소하는 것과 같이[28] 연기안정성 또한 감소하는 것으로 이해된다. 따라서 SGI-V 값이 클수록 연기위험성이 커지는 것으로 예측된다. 이는 화재위험성이 커지는 것과 맥을 같이한다[30].

SGI-V를 구하는 무차원 지수의 표현인 식 (6)은 다음과 같다.

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

이 연구에서 연기발생률의 값은 초기 화재의 중요성을 고려하여 1차 최대 연기발생률(SPR_{1st_peak}) 값을 적용하였다. 특히, 액체성 플라스

Table 7. Smoke Growth Index-V (SGI-V) of Wood Specimens and Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	SPR _{1st_peak} (m ² /s)	TSPR _{1st_peak} (s)	SGI (m ² /s ²)	SGI-V
Spruce	0.0231	20	0.00116	8.9
Lauan	0.0297	25	0.00119	9.2
PMMA	0.0516	385	0.00013	1.0
PC	0.1189	285	0.00042	3.2

Table 8. Smoke Risk Index-VI (SRI-VI) of Wood Specimens and Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	SPI-V	SGI-V	SRI-VI
Spruce	1.2	8.9	7.4
Lauan	1.0	9.2	9.2
PMMA	1.0	1.0	1.0
PC	3.5	3.2	0.9

틱을 포함한 가연물은 연소과정 중 1차 최대연기발생률(SPR_{1st_peak})을 적용하고자 한다.

Table 7에 나타난 바와 같이 SGI-V에 의한 연기위험성은 나왕이 가장 높은 것으로 나타났다. 이것은 연소속도가 빨라짐에 따라 SPR_{1st_peak} 값이 높아지고 TSPR_{1st_peak} 값이 낮아지기 때문으로 판단된다. PMMA를 기준물질로 한 연기등급지수인 SGI-V는 PMMA (1.0) < PC (3.2) < Spruce (8.9) < Lauan (9.2)의 순서로 증가하였다. 특히 PMMA는 SGI-V가 가장 낮은 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 시험된 목재 및 플라스틱을 포함한 가연성 물질은 SGI-V의 값이 클수록 연기위험성 및 화재위험성은 높아지고, 연기안정성 및 화재안정성은 낮아지는 것을 알 수 있었다. SPI-V와 SGI-V는 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으로, 콘칼로리미터 실험에서 재료의 연기안정성을 파악하는데 종합적인 평가로 적용될 수 있다. 이를 다시 정리하면 연기위험성은 식 (7)과 같은 상관관계가 된다. 이것은 연기등급을 평가하는 연기등급 수식과 일치한다.

$$\text{Smoke risk} \propto \frac{\text{SGI-V}}{\text{SPI-V}} \text{ or } \frac{\text{SGI-II}}{\text{SPI-II}} \text{ or } \frac{\text{SGI}}{\text{SPI}} \quad (7)$$

따라서 새로운 연기위험성지수-VI (SRI-VI) 식 (8)을 고안하여 적용하고자 한다.

SRI-VI를 구하는 식 (8)은 다음과 같다.

$$\text{SRI-VI} = \frac{\text{SGI-V}}{\text{SPI-V}} \quad (8)$$

즉, SRI-VI는 SGI-V를 SPI-V로 나눈 값으로 정의된다. 이는 화재확대가 증가 할수록 화재안정성이 감소하는 것과 같이[30] 연기안정성 또한 감소하는 것으로 이해된다. 따라서 SRI-VI 값이 클수록 연기위험성이 커지고 반대로 SRI-VI 값이 작아질수록 연기위험성이 감소하는 것으로서 연기위험성 및 연기등급을 종합적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

Table 8에 나타난 바와 같이 SRI-VI에 의한 연기위험성은 나왕이 가장 높은 것으로 나타났다. PMMA를 기준물질로 한 연기위험성지수

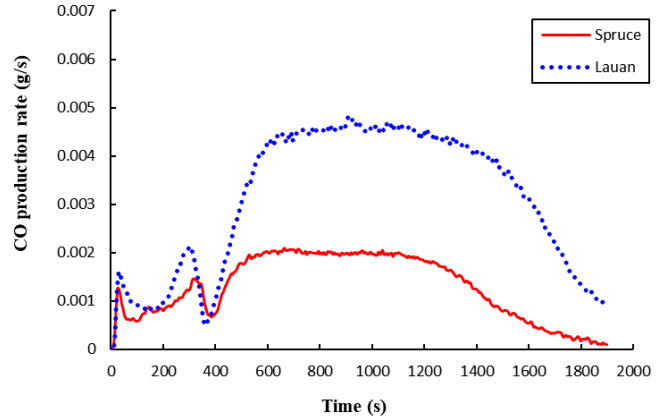


Figure 6. CO production rate (g/s) curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

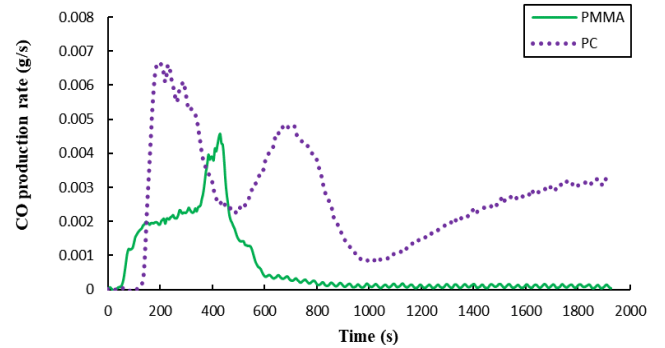


Figure 7. CO production rate (g/s) curves of plastic specimens at 50 kW/m² external heat flux.

인 SRI-VI는 PC (0.9) < PMMA (1.0) < Spruce (7.6) < Lauan (9.0)의 순서로 증가하였다. 특히 PC는 SRI-VI가 가장 낮은 것으로 나타났으며 SPI-V, SGI-V에서도 연기위험성이 비교적 낮게 나타났다. 결론적으로 SRI-VI에 의한 연기위험성 평가 결과 PC가 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

3.3. 일산화탄소, 이산화탄소 발생속도(carbon monoxide, carbon dioxide production rate)

일산화탄소(CO)는 목재와 플라스틱을 포함한 가연물과 화염 사이에서 발생하는 휘발성물질의 불완전연소 생성물이다. 휘발성 물질의 열분해속도를 측정하는 하나의 방법인 열방출속도가 높아지는 것은 동반된 CO 가스 생성이 증가하는 것으로 설명 가능하다. Table 4, Figure 6 및 Table 5, Figure 7에 나타난 모든 시험편의 CO_{peak} 발생속도는 0.0021~0.0067 g/s로 측정되었으며, 선행연구와 비교한 결과 재료의 구성성분, 두께 및 외부 열유속의 조건이 달라 정량적인 값은 비교하기 어려웠으나 CO 발생패턴은 유사한 것으로 나타났다[31,32].

CO_{2peak} 발생속도는 Table 4, Figure 8 및 Table 5, Figure 9에 나타난 바와 같이 모든 시험편에 대하여 0.1556~0.8484 g/s였다. PMMA가 다른 시험편과 비교하여 불완전연소보다 완전연소가 더 많이 일어나는 것으로 판단된다. 미국광산보건안전청(Mine Safety and Health Administration, MSHA)에[33] 의하면, 이산화탄소는 단순한 질식을 일으키고 잠재적 흡입 독성 물질이다.

Figures 6~9에 나타난 바와 같이 목재의 CO, CO₂ 패턴과 플라스틱

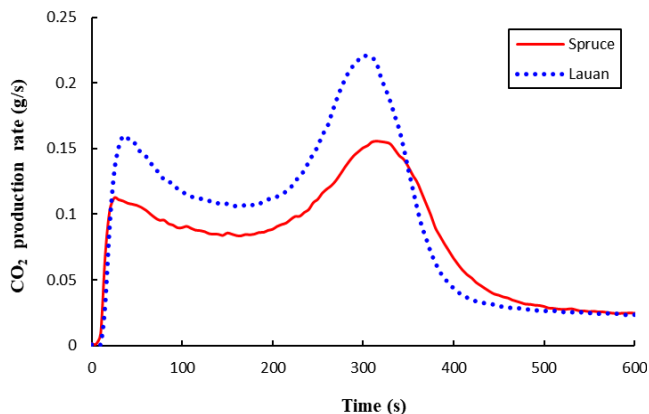


Figure 8. CO₂ production rate (g/s) curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

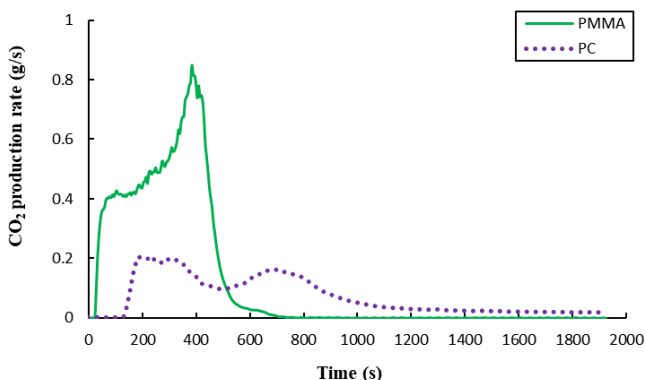


Figure 9. CO₂ production rate (g/s) curves of plastic specimens at 50 kW/m² external heat flux.

의 CO, CO₂ 패턴은 각각 다르게 나타났다. CO의 생성은 불완전 연소의 결과물이며, 가연물의 조성에 따라 다르게 나타난다. 이것은 연소 시 생성된 표면 탄화층에 의해 산소의 접촉이 제한되기 때문에 오랜 시간에 걸쳐 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 CO₂는 완전연소로 인하여 열방출 영역과 유사한 영역에서 생성됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 목재로서 가문비나무와 나왕 및 플라스틱으로는 PMMA와 PC를 선정하고, Chung's equations-V인 연기성장지수-V (SPI-V), 연기성장지수-V (SGI-V)와 Chung's equation-VI인 연기위험성지수-VI (SRI-VI)를 새로 고안하여 연기위험성 및 연기위험성 등급 평가에 적용하였다.

1) SPI-V에 의한 연기등급지수인 연기성장지수-V는 PMMA (1.0) = Lauan (1.0) < Spruce (1.2) < PC (3.4)의 순서로 증가하였다. 이것은 PMMA와 같이 휘발성 유기물질을 함유한 플라스틱은 SPI-V가 매우 낮아지므로 화재위험성이 높다는 것을 의미한다.

2) SGI-V에 의한 연기등급지수인 연기성장지수-V는 PMMA (1.0) < PC (3.2) < Spruce (8.9) < Lauan (9.2)의 순서로 증가하였다. 특히 PC는 SGI-V가 비교적 낮은 것으로 나타났으며 SPI-V에서 얻은 결과와 유사한 경향성을 보였다.

3) 모든 시험편의 CO_{peak} 발생속도는 0.0021~0.0067 g/s으로 측정되

었으며, CO_{2peak} 발생속도는 0.1556~0.8484 g/s였다.

4) 연기위험성 및 연기위험성 등급은 다음과 같은 연기위험성지수-VI 식으로 정립하여 평가하였다.

$$\text{Smoke risk index-VI (SRI-VI)} = \frac{\text{SGI-V}}{\text{SPI-V}} \quad (8)$$

연기위험성 등급지수인 SRI-VI는 PC (0.9) < PMMA (1.0) < Spruce (7.4) < Lauan (9.2)의 순서로 증가하였다. SRI-VI에 의한 연기위험성 평가 결과 PC가 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

따라서 연소성이 용이한 유기물질은 연기성장지수-V가 낮고, 연기성장지수-V가 매우 높으므로 화재로 인한 연기위험성이 높은 것으로 나타났다.

감 사

이 논문은 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No. NRF-2019R1F1A1059320)입니다.

References

1. T. S. Kim, Y. S. Kim, C. K. Yoon, and Y. J. Chung, *The Guide of Fire Investigation*, 77-98, Kimoondang, Seoul, Korea (2009).
2. H. J. Park, H. Kim, and D. M. Ha, Predicting of fire characteristics of flame retardant treated Douglas fir using an integral model, *J. KOSOS.*, **20**, 98-104 (2005).
3. O. Grexa, Flame retardant treated wood products, *The Proceedings of Wood & Fire Safety (part one)*, 101-110 (2000).
4. H. Vahabi, B. K. Kandola and M. R. Saeb, Flame retardancy index for thermoplastic composites, *Polymers*, **11**, 407-417 (2019).
5. R. Sonnier, A. Viretto, L. Dumazert, B. Gallard. A method to study the two-step decomposition of binary blends in cone calorimeter, *Combustion and Flame*, **169**, 1-10 (2016).
6. R. E. Lyon and M. L. Janssens, Polymer Flammability, The National technical information service (NTIS), U.S. Department of Commerce, Washington DC, USA (2005).
7. R. H. White and M. A. Dietsberger, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Ch.17: Fire safety, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1999).
8. G. Shen, S. Tao, S. Wei, Y. Zhang, R. Wang, B. Wang, W. Li, H. Shen, Y. Huang, Y. Chen, H. Chen, Y. Yang, W. Wang, X. Wang, W. Liu, and S. L. M. Simonich, Emissions of parent, nitro, and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons from residential wood combustion in Rural China, *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 8123-8130 (2012).
9. J. Ding, J. Zhong, Y. Yang, B. Li, G. Shen, Y. Su, C. Wang, W. Li, H. Shen, B. Wang, R. Wang, Y. Huang, Y. Zhang, H. Cao, Y. Zhu, S. L. M. Simonich, and S. Tao, Occurrence and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in a rural chinese home through biomass fuelled cooking, *Environ. Pollution*, **169**, 160-166 (2012).
10. L. Shi and M. Y. L. Chew, Fire behaviors of polymers under auto-ignition conditions in a cone calorimeter, *Fire Saf. J.*, **61**, 243-253 (2013).

11. 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).
12. 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).
13. 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, *Progress in Organic Coatings*, **135**, 123-134 (2019).
14. 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).
15. 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).
16. Y. J. Chung and E. Jin, Assessment of smoke risk of combustible materials in fire, *Appl. Chem. Eng.*, **31**, 277-283 (2020).
17. W. T. Simps, 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).
18. T. Y. Woo, J. S. You, and Y. J. Chung, Combustion properties of construction lumber used in every life, *Fire Sci. Eng.*, **31**, 37-43 (2017).
19. D. J. Silva and H. Wiebeck, Predicting LDPE/HDPE blend composition by CARS-PLS regression and confocal Raman spectroscopy, *Polímeros*, **29**, 1-7 (2019).
20. Y. Liu, B. Fan, A. L. Hamon, D. He, and J. Bai, Thickness effect on the tensile and dynamic mechanical properties of graphene nano-platelets reinforced polymer nanocomposites, *HAL*, **2**, 21-27 (2020).
21. Y. J. Chung, Combustion characteristics of the *Quercus varialis* and *Zelkova serrata* dried at room temperature, *J. Kor. Forest Soc.*, **99**, 96-101 (2010).
22. J. G. Quintire, Principles of fire behavior, Chap. 5, *Cengage Learning*, Delmar, USA (1998)
23. Y. J. Chung, Comparison of combustion properties of native wood species used for fire pots in Korea, *J. Ind. Eng. Chem.*, **16**, 15-19 (2010).
24. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability, Chap. 8. In : *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Academic press, New York, USA (1981).
25. 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 Safety J.*, **36**, 391-415 (2001).
26. V. Babraskas, *Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Interflam 2001*, 71-88, Interscience Communications Ltd., London (2001).
27. A. D. Chirco, M. Armanini, P. Chini, G. Cioccho, F. Provasoli, and G. Audiso, Flame retardants for polypropylene based on lignin, *Polym. Degrad. Stabil.*, **79**, 139-145 (2002).
28. J. D. Dehaan, *Kirk's Fire Investigation* (Fifth Ed.), 84-112, Pearson, London, England (2002).
29. V. Babrauskas, Development of the cone calorimeter - A bench - scale, heat release rate apparatus based on oxygen consumption, *Fire and Mater.*, **8**, 81-95 (1984).
30. C. Jiao, X. Chen, and J. Zhang, Synergistic effects of Fe₂O₃ with layered double hydroxides in EVA/LDH composites, *J. Fire Sci.*, **27**, 465-479 (2009).
31. T. Fateh, T. Rogaume, J. Luche, F. Richard, and F. Jabouille, Characterization of the thermal decomposition of two kinds of plywood with a cone calorimeter - FTIR apparatus, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **107**, 87-100 (2014).
32. J. Luche, T. Rogaume, F. Richard, and E. Guillaume, Characterization of thermal properties and analysis of combustion behavior of PMMA in a cone calorimeter, *Fire Saf. J.*, **46**, 451-461 (2011).
33. MSHA, Carbon Monoxide, MSHA's Occupational Illness and Injury Prevention Program Topic, U. S. Department of Labor, USA (2015).

Authors

Yeong-Jin Chung; Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr

Eui Jin; Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea; jin_eui@hanmail.net

Ji Sun You; Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea; jsyou@kangwon.ac.kr