Appl. Chem. Eng., Vol. 34, No. 2, April 2023, 144-152
https://doi.org/10.14478/ace.2023.1013

Article

새로운 Chung's equation-IX에 의한 연소성 물질의 화재 위험성 등급 평가

정영진† · 진 의*

강원대학교 소방방재공학과, *강원대학교 소방방재연구센터
(2023년 2월 3일 접수, 2023년 2월 21일 수정, 2023년 2월 21일 채택)

Rating of Fire Risk of Combustible Materials by the New Chung's Equation-IX

Yeong-Jin Chung† and Eui Jin*

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok-city 25949, Korea
**Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok-city 25913, Korea*
(Received February 3, 2023; Revised February 21, 2023; Accepted February 21, 2023)

초 록

연소성 물질의 화재위험성 평가를 하기 위해 Chung's equations-VII, Chung's equations-VIII, 그리고 Chung's equation-IX을 새로 정립하였다. 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)와 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 산정하였다. 시험편은 은행나무, 메타세콰이어, 참죽나무, 피나무, 호두나무를 선택하였다. 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 사용하여 시험편에 대한 연소 특성을 시험하였다. 연소 종료 후 Chung's equations에 의해 산정된 화재성능지수-VII (fire performance index-VII, FPI-VII)는 15.15~182.53 s^2/kW로 나타났고, 화재성장지수-VII (fire growth index-VII, FGI-VII)는 0.0023~0.0165 kW/s^2로 나타났다. Polymethylmethacrylate (PMMA)를 기준으로 한 화재성능지수-VIII (FPI-VIII)는 0.29~3.45로 나타났고, 화재성장지수-VIII (FGI-VIII)는 2.88~20.63로 나타났다. 화재위험성 등급인 화재위험성지수-IX (FRI-IX)는 메타세콰이어가 71.14 (화재위험성등급: G)로 화재위험성이 매우 높은 목재로 나타났다. 그러므로 휘발성 유기 화합물을 다량 함유하고, 체적밀도가 낮은 목재는 FPI-VII와 FPI-VIII가 낮아지고, FGI-VII와 FGI-VIII가 높아짐에 의하여 FRI-IX가 높은 값을 나타내었다.

Abstract

To evaluate the fire risk of combustible materials, Chung's equations VII, VIII, and IX were newly established. The fire risk index-IX (FRI-IX) and fire risk rating (FRR) were calculated. Ginkgo, dawn redwood, toona, lime, walnut, and polymethylmethacrylate (PMMA) were selected as test specimens. The combustion characteristics were evaluated using a cone calorimeter according to ISO 5660-1. After combustion, the fire performance index-VII (FPI-VII) of the specimens, varied between 15.15 and 182.53 s^2/kW, as determined by Chung's equations, and the fire growth index-VII (FGI-VII) varied between 0.0023 and 0.0165 kW/s^2. The fire performance index-VIII (FPI-VIII) based on PMMA varied between 0.29 and 3.45, and the fire growth index-VIII (FGI-VIII) varied between 2.88 and 20.63. The FRI-IX, which is the fire risk rating, showed dawn redwood has a very high fire risk, with FRI-IX values of 71.14 (fire risk rating: G). Therefore, wood with a large amount of volatile organic compounds and a low bulk density showed a high value of FRI-IX by lowering FPI-VII and FPI-VIII and increasing FGI-VII and FGI-VIII.

***Keywords**: Combustible materials, Chung's equations-VII, Chung's equations-VIII, Chung's equation-IX, Fire risk rating (FRR)*

1. 서 론

연소성 물질의 화재 확산은 인명안전과 재산보호에 심각한 피해를 준다[1]. 재료에 대한 화재 위험성은 가연성 및 착화성, 열방출률, 화염 확산, 연기의 독성 및 연기 발생을 포함한 특성 요인과 연관된다[2-5]. 재료의 연소 특성을 시험하기 위한 시험 방법인 콘칼로리미터는 국제 표준에 대한 최선의 선택으로 권장되었다[6]. 이 장치는 개방된 공간에서 실제 화재 현상을 가장 근접하게 표현한 실험방법이다. 이 방법은 대부분의 유기성 재료가 연소 시 산소 1 kg이 소모될 때 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소의 소비 원리를 바탕으로 하고 있다[7].

또한 콘칼로리미터 시험을 이용한 연기측정은 Beer-bouguer-lambert의 실험을 기본 원리로 하며 어떤 공간을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 법칙에 의한다[7]. 연기는 가연물의 연소 시 재료의 열분해로부터 발생되는 가연성 기체로서, 복사냉각으로 인해 연소되지 않은 그을음은 불완전 연소로 불꽃 연소영역에서 연기로 이탈되어 나간다[8]. 또한 목재는 구성하는 화학적 조성에 따라 열방출률이 달라지고, 수분 함량 및 리그닌 함량이 열방출률

† Corresponding Author: Kangwon National University,
Department of Fire Protection Engineering, Samcheok-city 25949, Korea
Tel: +82-33-655-9394 e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2023 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

에 영향을 미치는 것으로 밝혀져 있고[9], 목재의 함유된 수분함량이 화재위험성의 중요한 변수임이 알려져 있다[10]. 이것은 화재에 취약한 목재의 화재위험성을 수종별로 검토할 필요성이 있다.

열 및 연기발생을 나타내는 열방출률, 총연기방출률, 연기발생률, 연기인자, 비감쇠면적 등은 연소특성으로 사용되고 있다[11-13]. 그러나 이와 같은 특성값은 순간적인 시간 변화에 대한 단일 값으로 주어지는 제한된 방법으로서 열 및 연기생성에 대한 정량적인 평가와 위험성을 구현하는 방법으로는 아직 부족한 점이 많다.

선행 연구에서는 연기위험성 평가 방법으로 Chung's equations 1, 2, 3을 정립하였고[14], 이를 더욱 정량적이고 정밀한 방법으로 구현하기 위해 Chung's equations-II, Chung's equations-III, Chung's equation-IV에 의한 화재위험성 평가 방법을 새로 정립하였다[15].

화재위험성은 연기성능지수(smoke performance index, SPI)와 화재성능지수-II, -III [fire performance index-II, -III (FPI-II, FPI-III)]가 낮고 연기성장지수(smoke growth index, SGI)와 화재성장지수-II, -III [fire growth index-II, -III (FGI-II, FGI-III)]가 높을수록 높아진다. 총괄적으로 화재위험성은 화재위험성지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)가 높을수록 높아진다. 이것은 화재초기 화재위험성을 제시하기 위한 것으로 새로운 지수간의 관계를 확장시킴으로써 화재위험성 등급을 종합적으로 평가하기 위한 자료로 사용하기 위함이다. 그러나 선행연구에서는 화재 시 발생되는 대표적인 유해성 가스인 일산화탄소와 이산화탄소를 앞에서 언급한 수식에 포함시키지 않고 별도로 평가하였다.

따라서 본 연구에서는 화재 시 발생되는 치명적인 유해성 가스인 일산화탄소와 이산화탄소를 포함하여 평가하기 위해 Chung's equations-VII인 화재성능지수-VII (fire performance index-VII, FPI-VII), 화재성장지수-VII (fire growth index-VII, FGI-VII)와 Chung's equations-VIII인 화재성능지수-VIII (fire performance index-VIII, FPI-VIII), 화재성장지수-VIII (fire growth index-VIII, FGI-VIII), 그리고 Chung's equation-IX인 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)를 새로이 정립하고, 종합적인 화재위험성지수-IX (FRI-IX) 및 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 평가하여 건축 및 화재설계 데이터의 기초자료로 활용하고자 한다.

이 연구에서는 건자재 및 내장재로 주로 사용되며, 사용빈도가 높은 은행나무(Ginkgo, *Ginkgo biloba*), 메타세콰이어(Dawn redwood, *Metasequoia*), 참죽나무(Toona, *Toona*), 피나무(Lime, *Tilia amurensis*), 호두나무(Walnut, *Juglans regia*)를 수분함량 및 체적밀도를 차별화하여 시험재료로 사용하였다. Polymethylmethacrylate (PMMA)를 기준물질로 사용하여 화재위험성을 무차원지수로 평가함으로써 화재위험성평가 방법으로 이용하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 시험재료 준비

본 연구에 사용된 시험편은 은행나무, 메타세콰이어, 참죽나무, 피나무, 호두나무의 순수한 목재를 엠에이치테크놀로지스사 및 농가에서 구입 하였으며 별도의 가공처리 없이 시험 표준규격에 맞추어 두께는 10 mm로 준비하였다. 기준물질인 PMMA는 검은색으로서 Fire Testing Technology사에서 구입하여 18 mm 두께를 10 mm 크기로 절단하여 사용하였다.

2.2. 수분함량의 측정

일정한 양의 목재 시험편을 건조오븐에서 온도 105 ℃를 유지하면서 장시간 건조하였고, 4 h 간격으로 시험 재료의 중량을 항량이 될 때까지 측정하였고, 다음 식 (1)을 적용하여 수분함량(moisture content, MC)을 산정하였다[16].

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

이 식에서 W_m은 수분함량을 구하고자 하는 목재 시험편의 중량(g), W_d는 건조시킨 후의 시험편의 절대건조 중량(g)이다.

목재의 수분함량과 체적밀도는 Table 1에 나타내었다.

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

Materials	Scientific name	Classification	Moisture content (%)	Bulk density (kg/m^3)
Ginkgo (GK)	*Ginkgo biloba*	Soft wood	9.7	432
Dawn redwood (DRW)	*Metasequoia*	Soft wood	9.6	303
Toona (TN)	*Toona*	Hard wood	9.7	598
Lime (LM)	*Tilia amurensis*	Hard wood	7.0	410
Walnut (WN)	*Juglans regia*	Hard wood	8.9	594
PMMA	-	-	-	1180

2.3. 콘칼로리미터 시험

연소 특성치를 얻기위한 시험은 ISO 5660-1의 규격에 의하여 영국 Fire Testing Technology사의 Dual cone calorimeter 시험 장비를 사용하였으며, 실제 화재와 근접한 화재성장기에서 발견되는 외부 복사열 유속(external radiant heat flux) 50 kW/m^2 조건에서 실시하였다[7]. 시험편 크기는 10 mm (H) 두께를 가진 재료를 100 mm (W) × 100 mm ($\pm^{0}_{2}$) (L)로 절단하여 사용 하였다. Table 2에 콘칼로리미터 시험법에 대한 실험조건을 제시하였다.

Table 2. Experimental Conditions for Cone Calorimeter Test Method

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

3. 결과 및 고찰

이 연구에서는 건축용 내・외장재의 화재위험성 평가 및 등급을 예측하기 위하여 열 및 연기 특성 지수를 산정하였다. 본 연구를 위하여 PMMA에 대하여 선행연구의 데이터를 사용하였으며[17], 연소 특성과 관련된 요소로 착화시간(time to ignition, TTI), 열방출률(heat release rate, HRR), 연기생성속도(smoke production rate, SPR), 최대연기생성속도에 도달하는 시간(time to reach smoke production rate, TSPR) 및 일산화탄소와 이산화탄소의 발생속도 등을 분석하였으며 그에 대한 data를 Table 3에 제시하였다. 이 데이터를 사용하여 화재성능지수-VII (FPI-VII)와 화재성장지수-VII (FGI-VII)를 평가한 후

Table 3. Combustion Characteristics of the Test Specimen under 50 kW/m^2 External Radiant 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)
Ginkgo (GK)	13	219.87 / 30	322.28 / 235	0.0279
Dawn redwood (DRW)	5	208.51 / 20	210.85 / 205	0.0266
Toona (TN)	19	201.17 / 35	275.65 / 315	0.0147
Lime (LM)	9	244.63 / 25	328.75 / 220	0.0212
Walnut (WN)	15	232.98 / 40	264.84 / 300	0.0201
PMMA	17	1110.56 / 385	-	0.0516

Materials	[e]$TSPR_{1st_peak}$ (s)	[f]SPR_{2nd_peak} (m^2/s) at Time (s)	[g]COP_{mean} (g/s)	[h]CO_2P_{mean} (g/s)	COP_{mean} / CO_2P_{mean}
Ginkgo (GK)	30	0.0682 / 245	0.0020	0.0359	0.0557
Dawn redwood (DRW)	20	0.0448 / 210	0.0016	0.0269	0.0595
Toona (TN)	45	0.0535 / 335	0.0016	0.0455	0.0352
Lime (LM)	35	0.0527 / 230	0.0015	0.0343	0.0437
Walnut (WN)	40	0.0391 / 325	0.0024	0.0482	0.0498
PMMA	385	-	0.0007	0.1243	0.0056

[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]mean carbon monoxide production rate; [h]mean carbon dioxide production rate

PMMA를 기준물질로 무차원의 화재등급지수인 FPI-VIII 및 FGI-VIII를 부여하였다. 그리고 이들 지수들을 사용하여 화재위험성지수-IX (FRI-IX)를 평가하였다.

무차원 지수인 화재위험성지수-IX (FRI-IX)는 화재위험성을 표준화한 종합적인 화재위험성지수이다. 콘칼로리미터 시험에서 우수한 재현성 및 반복성을 나타내는 PMMA 시험편을 화재위험성 평가의 표준화를 위한 기준으로 사용하였다. 화재위험성 평가 등급에 대한 데이터는 Table 4, 5, 6, 7에 제시하였다.

3.1. 열적 특성 평가

화재 대상물에 대한 연소 시의 착화시간은 건자재의 연소성을 예측하는데 매우 중요한 성질이며 착화시간이 늦어질수록 재료는 가연성이 억제된다. 가연성 재료가 연소될 때 재료의 종류, 수분함량, 열 침투성, 열적특성 및 밀도 등은 가스독성, 연기생성, 에너지 방출속도에 영향을 미친다. 휘발성 연료는 공기가 적절한 화학양론 농도로 혼합되면 열분해 가스의 산화로 인해 불꽃 연소가 발생한다.

Table 3에 보여준 바와 같이 착화시간은 메타세콰이어 5 s, 피나무 9 s, 은행나무 13 s, 호두나무 15 s, 참죽나무 19 s로 나타났다. 메타세콰이어가 가장 빠른 착화시간을 나타내었으며 참죽나무가 가장 긴 착화시간을 나타내었다. 참죽나무는 다른 종에 비해 체적밀도(598 kg/m^3)가 커서 착화시간이 지연되는 것으로 나타났다. 호두나무와 비교했을 때 체적밀도는 유사하나 수분함량이 높아 착화시간이 지연되는 것으로 판단된다. 메타세콰이어의 경우 약간 높은 수분함량을 가졌지만 다량의 휘발성 유기 화합물의 함량과[18], 가장 낮은 체적밀도(303 kg/m^3) 때문에 착화시간이 단축된 것으로 판단된다.

목재의 착화시간은 목재의 표면에 대한 열손실 유무에 따른 상수, 체적밀도, 열전도도, 연료의 비열 및 착화온도의 제곱에 비례하고, 시험편에 가해지는 열유속(heat flux)의 제곱에 반비례한다[19]. 그러므로 체적밀도가 증가하면 착화시간이 늦어지는 것으로 예측된다.

최대열방출률은 가장 중요한 화재특성이며 화재의 강도에 표현이며 화재 위험에 대한 여러 분석에 의해 알려졌다[20-22]. 열방출률이 커질수록 더 많은 대상 물질이 발화하여 연소되므로 화재 규모를 확장시킨다. 반면에 열방출률이 낮으면 근접한 대상 물질에 착화되지 않고 발화영역에 국한될 수 있다. 화재발생 시 열방출률이 낮은 가연성 재료는 화재확산이 지연되는 효과를 기대할 수 있다[23]. 시험편의 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 시험편의 표면적당 순간 최고로 방출되는 열량의 크기로 표현된다[24,25]. 이는 대상 재료가 가장 많이 연소되는 시점이므로 열방출 속도가 높은 화염연소는 화재범위를 확장시킨다.

Figure 1은 시험에 대한 열방출률 곡선을 나타내었다. 탄화물질을 생성하는 목재 시험편은 최대열방출률 값이 2개를 가지고 있는 것으로 나타났다. 열방출률 곡선의 제1차 피크인 HRR_{1st_peak}는 휘발성의 열분해 가스가 외부 스파크 착화기에 의해 가열 기간 후에 발생한다. 발생된 열은 목재 시험편의 지속적인 열분해가 이어지며 더 많은 휘발성 물질을 방출하게 된다. 그리고 HRR_{1st_peak}의 감소는 열전달이 용이하지 않고 열분해 과정이 지연되는 절연 숯층이 형성되어지기 때문이다. 또한 제2차 열방출률 곡선의 피크인 HRR_{2nd_peak}는 시험편의 연소 및 탄화 균열로 인해 더 많은 휘발성 물질이 시험편으로부터 용이하게 방출될 수 있기 때문에 나타난다[26]. 이것은 시험편 뒷면 절연층의 후면효과(back effect)에 의하여 열이 축적됨으로써 많은 열이 동시에 방출되기 때문에 일어난다[10]. 이후 휘발성 물질이 고갈됨에 따라 화염 연소가 종료되고 열방출률이 안정된 기준선으로 되돌아간다. HRR_{2nd_peak}는 극한 연소 상황으로 화재 성장을 위한 척도로서 인식된다.

Table 3와 Figure 1에 연소 특성과 목재의 열방출 곡선을 나타내었다. 목재의 HRR_{1st_peak} 특성은 참죽나무 201.17 kW/m^2, 메타세콰이어 208.51 kW/m^2, 은행나무 219.87 kW/m^2, 호두나무 232.98 kW/m^2, 피나무 244.63 kW/m^2 순으로 증가하였다. 이들 중 피나무가 가장 높게 나타났으며 참죽나무에 비하여 1.2배 높았다. HRR_{2nd_peak}는 메타세콰이어 210.85 kW/m^2, 호두나무 264.84 kW/m^2, 참죽나무 275.65 kW/m^2, 은행나무 322.28 kW/m^2, 피나무 328.75 kW/m^{2}으로 증가하였다. HRR_{2nd_peak}는 피나무가 가장 높았으며 메타세콰이어와 비교하여 1.6배 높았다.

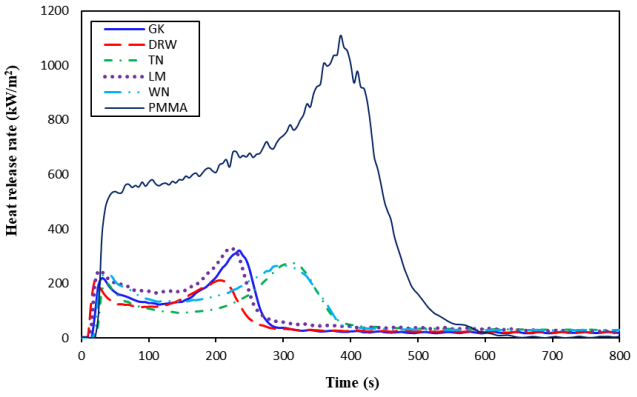


Figure 1. Heat release rate curves of the test specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux.

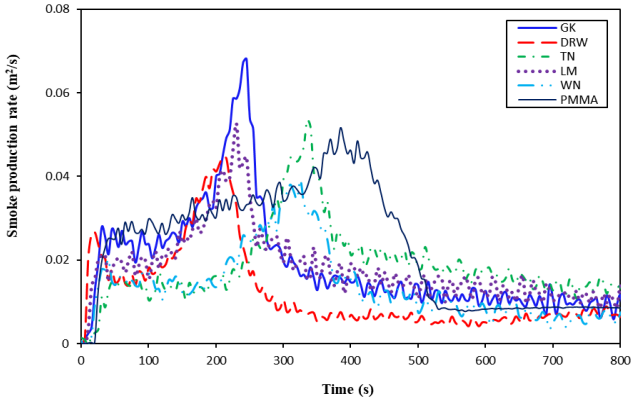


Figure 2. Smoke production rate curves of the specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux.

초기 화재의 열위험성은 HRR_{1st_peak} 영역에서는 피나무가 가장 높았으며 참죽나무가 가장 낮았다. 그러나 화재 초기에 최대열방출률에 도달하는 시간은 메타세콰이어의 HRR_{1st_peak}의 도달시간이 20 s, 피나무 25 s, 은행나무 30 s, 참죽나무 35 s, 호두나무 40 s 순으로 지연된다. 그러나 피나무가 메타세콰이어보다 HRR_{1st_peak} 값이 크므로 초기에 화재의 열위험성이 가장 큰 것으로 판단된다. 열방출률의 감소는 연소 물질의 질량이 감소됨에 따라 가연성 기체의 발생량이 감소하기 때문이다. 침엽수는 열분해 과정에서 주로 저농도의 아세트산 및 헥산알(10~25%)을 방출하고, 휘발성 유기 화합물인 테르펜(70~90%)을 고농도로 방출한다. 그러나 활엽수는 휘발성 테르펜은 포함하지 않으며, 침엽수의 약 50배 정도의 상당히 낮은 휘발성 유기화합물을 배출하며 펜탄알 및 헥산알, 아세트산 및 기타 휘발성 유기 화합물을 포함한다[18]. 이러한 방출되는 구성성분의 차이로 활엽수종이 침엽수종에 비하여 화재에 잘 견디며 참죽나무의 HRR_{1st_peak} 값이 작은 이유는 수분함량과 체적밀도가 높아 연소속도가 늦어지므로 작은 값을 갖는 것으로 판단된다.

또한 피나무는 Table 3에 나타낸 바와 같이 낮은 수분함량과 낮은 체적밀도로 연소 속도가 빨라지므로 초기화재에 취약한 것으로 판단된다.

3.2. 연기생성속도 특성 평가

목재의 화재에 의한 사망 원인은 탄소의 불완전 연소, 셀룰로오스의 열분해, 질소 산화물을 통한 일산화탄소 발생, 수소 기반 화학 물질 발생으로 알려져 있다. 화재에서 연기와 유독 가스에 의한 피해는 열에 대한 피해보다 인명에 더 치명적이다. 화재 시에 연기는 사람들의 탈출 및 피난을 방해하여 질식 확률을 높이고 사람의 시야 확보가 어려워진다. 연기의 발생은 연소대상 물질과 주변 환경에 의하여 영향을 받는다.

Table 3과 Figure 2에 나타난 바와 같이 SPR_{1st_peak}는 짧은 시간에 급격히 최대값에 도달되는 것을 보여준다. 이 기간 동안 연기는 가스 및 분해된 헤미셀룰로오스에서 발생된 휘발성 목재 추출물, 에어로졸, 수증기로 구성된다. SPR_{1st_peak}는 참죽나무 0.0147 m^2/s, 호두나무 0.0201 m^2/s, 피나무 0.0212 m^2/s, 메타세콰이어 0.0266 m^2/s, 은행나무 0.0279 m^2/s 순으로 증가하였다. 은행나무는 참죽나무에 비하여 1.9배 높은 것으로 나타났다. 참죽나무는 수분함량이 높고 체적밀도가 높아 연소 속도가 늦어지므로 초기화재 시험편의 순간 연기생성속도가 낮아지는 것으로 판단된다.

SPR_{2nd_peak}는 호두나무 0.0391 m^2/s, 메타세콰이어 0.0448 m^2/s, 피나무 0.0527 m^2/s, 참죽나무 0.0535 m^2/s, 은행나무 0.0682 m^2/s 순서로 증가하였다. 은행나무는 호두나무에 비하여 1.7배 높았다. 연소에 의해 시험편에 생성된 숯은 화재 시 열 침투성을 감소시키며, 열에 노출된 목재 표면과 열분해 전단 사이에는 열적 저항이 상승된다. 이는 연소 대상물에서 방출되는 휘발성 물질과 산소와의 화학반응을 방해한다. 그러므로 최대연기생성속도가 감소되거나 또는 최대연기생성속도에 도달되는 시간을 지연시키는 결과를 낳는다. 초기화재의 연기유해성을 평가하면 SPR_{1st_peak} 영역에서는 은행나무가 가장 큰 유해성을 보였으며 참죽나무가 가장 낮은 유해성을 보였다.

Figure 2에 보여준 바와 같이 최대연기생성속도에 도달하는 시간은 탄화성 시험편에 대하여 두 단계로 나타났다. 첫 번째 최대연기생성속도(the first peak smoke release rate, SPR_{1st_peak})는 20~45 s에서 나타났으며, 두 번째 최대연기생성속도(the second peak smoke release rate, SPR_{2nd_peak})는 210~335 s에서 나타났다. SPR_{1st_peak}은 휘발성 열분해 가스에 기인하며 SPR_{2nd_peak}는 목재의 열분해 과정에서 목재 표면이 연소가 지속될수록 열이 축적됨에 따라 타지 않고 남아있는 목재가 연소하고 생성된 숯의 재연소로 인한 균열이 증가함에 따라 휘발성 연소가스가 갑자기 방출되는 결과에 기인한다. 이러한 최대연기생성속도에 도달하는 시간은 재료의 수분함량, 휘발성 유기물질의 함량, 그리고 체적밀도와 상관관계가 있으나, 수분함량의 차이에서는 피나무를 제외하고 큰 차이가 없으므로, 휘발성 유기 화합물의 함량이 높고, 체적밀도가 감소함에 따라 최대연기생성속도에 도달하는 시간이 빠른 것을 보여준다. 초기 최대연기생성속도에 도달하는 시간으로서 SPR_{1st_peak}에 도달하는 시간은 메타세콰이어 20 s, 은행나무 30 s, 피나무 35 s, 호두나무 40 s, 참죽나무 45 s 순으로 지연되었으나 최대연기생성속도가 메타세콰이어보다 은행나무가 높으므로 초기화재의 연기유해성이 가장 큰 것으로 예상된다. 그러므로 초기화재의 연기유해성은 SPR_{1st_peak} 영역에서 은행나무가 가장 높은 유해성을 보였으며 참죽나무가 가장 낮은 유해성을 보였다. 침엽수 종이 활엽수 종보다 최대연기생성속도 도달 시간이 빠른 경향성이 관찰되었으며 이것은 목재 자체에 휘발성 유기 화합물을 다량 함유하고 있기 때문으로 판단된다[18].

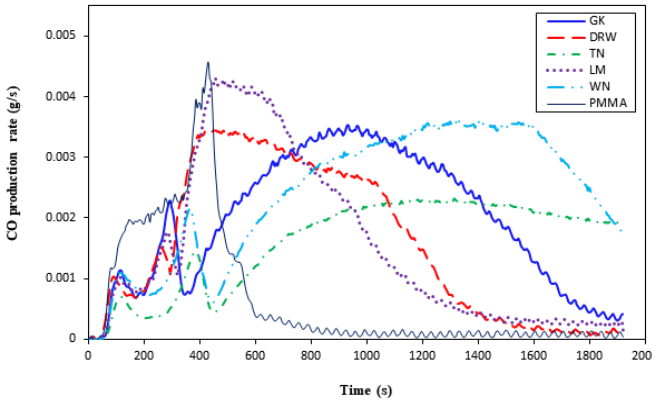


Figure 3. CO production rate (g/s) curves of the test specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux.

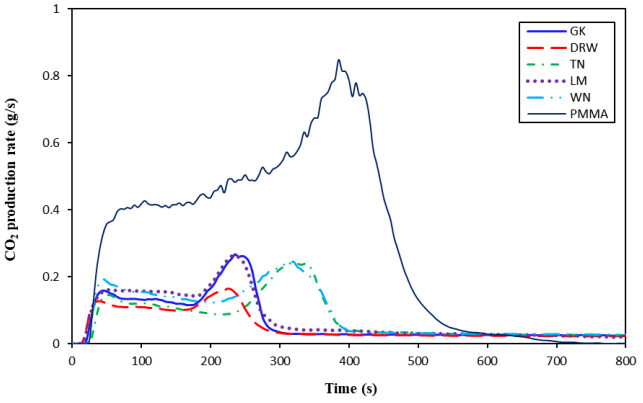


Figure 4. CO_2 production rate (g/s) curves of the test specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux.

3.3. 연소 가스 특성 평가

일반적으로 화재의 연소 현상과 독성 가스는 재료의 조성, 수분, 온도 및 산소농도에 질적 양적으로 많은 영향을 받는다. 가연성 물질의 연소 중에 발생되는 대표적인 유독성 가스는 일산화탄소(carbon monoxide, CO)로 알려졌다. 일산화탄소(CO)는 목재와 불꽃 사이에서 발생되는 가장 중요한 휘발성물질의 불완전연소 생성물이다. 휘발성 물질의 열방출속도가 높아지는 것은 동반된 CO가스 생성이 증가하는 것으로 이해된다. Table 3 및 Figure 3에 나타낸 시험편 5종의 COP_{mean}은 0.0015~0.0024 g/s으로 나타났다. 이는 기준물질인 PMMA (0.0007 g/s)에 비하여 2.1~3.4배로서 목재가 PMMA보다 불완전연소 물질임을 보였다. 이들 중 호두나무의 COP_{mean}은 0.0024 g/s로 비교적 높게 측정되었다. 이것은 다른 시편에 비해 목재의 COP_{mean}이 불이 꺼진 후 생성된 숯의 열산화로 인한 CO 발생량이 증가되는 것으로 판단된다.

Table 3 및 Figure 4에 나타낸 바와 같이 CO_2P_{mean}은 모든 시험편에 대하여 0.0269~0.0482 g/s였다. 이는 기준물질인 PMMA의 CO_2P_{mean} (0.1243 g/s)에 비하여 2.6~4.6배 낮았다. 모든 시편이 연소 후보다 연소 시 열방 영방출률 영역에서 CO_2가 생성되었으며 이는 불꽃 연소 영역에서 완전연소가 이루어진다는 것을 의미한다.

Table 3의 CO와 CO_2의 평균발생속도에 대한 목재 시험편의 COP_{mean}/CO_2P_{mean} 비율은 0.0352~0.0595로서 PMMA와 비교하여 6.3~10.6배로 높았다. 이는 목재가 PMMA보다 불완전 연소하여 비교적 CO 독성도가 높은 것으로 예측된다.

3.4. 종합적인 화재위험성 등급 평가 및 예측

착화시간 및 열방출률의 초기 피크의 최대값은 가연성 물질의 화재위험성을 특성화한다[15]. 또한 연기위험성 같은 경향으로 이해된다. 따라서 선행 연구에서는 가연물의 화재안전성을 예측하기 위하여 화재성능지수-II (FPI-II)를 정립하여 발표하였다[16]. 이 방법은 화재성능지수-II (FPI-II)를 평가하기 위하여 착화시간, 최대연기생성속도 그리고 최대열방출률 의 3개의 변수를 고려하여 화재위험성을 잘 표현해 준다. 그러나 화재 시 발생되는 유해성 가스 중 가장 치명적인 일산화탄소와 이산화탄소의 발생을 포함하여 평가하지 못하므로 이를 개선해야할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비를 포함한 화재성능지수-VII (FPI-VII) 식 (2)를 새로 정립하여 적용하였다.

식 (2)에서 FPI-VII는 TTI (s)를 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), 그리고 COP_{mean} (g/s)/CO_2P_{mean} (g/s)로 나눈 값으로 정의된다.

Table 4에 재료의 FPI-VII 값을 나타내었다. FPI-VII 값은 착화시간, 열, 연기 및 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비 조합으로서 참죽나무가 가장 높은 값으로 나타났다. 이는 모든 재료 중 TTI가 많이 늦어지고 SPR_{1st_peak}, PHRR 값, 그리고 COP_{mean}/CO_2P_{mean}이 가장 낮기 때문으로 판단된다. 메타세콰이어가 화재위험성이 가장 높게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 휘발성 유기 화합물의 함량이 높고, 체적밀도 값이 낮아 TTI가 빠르고, SPR_{1st_peak} 값과 COP_{mean}/CO_2P_{mea}이 높기 때문으로 이해된다. FPI-VII 값에 의한 화재안전성은 메타세콰이

$$FPI-VII = \frac{TTI\,(s)}{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}\,(g/s)/CO_2P_{mean}\,(g/s)} \quad (2)$$

Table 4. Fire Perfomance Index-VIII (FPI-VIII) of Wood Specimens and Plastic at 50 kW/m^2 External Radiant Heat Flux

Materials	TTI (s)	HRR_{1st_peak} (kW/m^2)	SPR_{1st_peak} (m^2/s)	COP_{mean} / CO_2P_{mean}	FPI-VII (s^2/kW)	FPI-VIII
Ginkgo (GK)	13	219.87 / 30	0.0279	0.0557	38.05	0.72
Dawn redwood (DRW)	5	208.51 / 20	0.0266	0.0595	15.15	0.29
Toona (TN)	19	201.17 / 35	0.0147	0.0352	182.53	3.45
Lime (LM)	9	244.63 / 25	0.0212	0.0437	39.71	0.75
Walnut (WN)	15	232.98 / 40	0.0201	0.0498	64.32	1.22
PMMA	17	1110.56 / 385	0.0516	0.0056	52.97	1

어(15.15 s^2/kW) < 은행나무(38.05 s^2/kW) < 피나무(39.71 s^2/kW) < PMMA(52.97) < 호두나무(64.06 s^2/kW) < 참죽나무(182.53 s^2/kW)의 순서로 증가하였다.

또한 모든 재료의 화재위험성을 표준화하기 위하여 PMMA 시험편을 기준한 새로운 방정식을 적용하였다. 표준화 한 FPI-VIII는 다음의 식 (3)과 같다. FPI-VIII는 FPI-VII를 PMMA 기준값인 $FPI\text{-}VII_{[PMMA]}$으로 나눈 값으로 표현된다. 이 방정식은 최대연기생성속도와 최대열방출률의 값은 화재 초기의 중요성 때문에 SPR_{1st_peak}와 HRR_{1st_peak} 값을 선택하여 적용하였다. 최대값을 사용한 것은 실제 화재와 가장 근접한 실험 조건인 외부 복사 열유속 50 kW/m^2에서 화재위험성을 평가하기 위함이다. 가연성 재료의 화재 확대와 플래시오버의 시간은 상호 상관관계가 있으므로[27], 화재 확산이 증가할수록 화재안정성이 감소하는 것처럼[28] 연기안전성도 감소하는 것으로 예상된다. 여기에서 FPI-VIII가 증가할수록 화재위험성은 낮아진다.

FPI-VIII를 구하는 무차원 지수의 표현인 식은 식 (3)과 같다.

Table 4에 재료의 FPI-VIII 값을 나타내었다. 이것은 FPI-VII을 PMMA로 표준화 한 값이므로 FPI-VII과 같은 경향성으로 나타났다. FPI-VIII 값은 참죽나무가 가장 높은 값으로 나타났다. 이는 모든 재료 중 TTI가 많이 지연되고 SPR_{1st_peak}, PHRR 값, 그리고 COP_{mean}/CO_2P_{mean}이 가장 낮기 때문으로 판단된다. 메타세콰이어가 화재위험성이 가장 높게 나타났다. 이것은 전술한 바와 같이 휘발성 유기 화합물의 높은 함량과, 체적밀도가 낮아 TTI가 빠르고, SPR_{1st_peak} 값과 COP_{mean}/CO_2P_{mean} 값이 높기 때문으로 이해된다. FPI-VIII 값에 의한 화재안전성은 메타세콰이어(0.29) < 은행나무(0.72) < 피나무(0.75) < PMMA(1) < 호두나무(1.22) < 참죽나무(3.45)의 순서로 증가하였다.

또한 앞선 연구에서 가연물 대상물의 화재위험성을 예측할 수 있는 화재성장지수-II (FGI-II)를 보고한 바 있다[16]. 이 방법은 연기 특성과 열특성을 포함한 식으로 화재위험성을 잘 표현해준다. 그러나 화재 시 발생되는 유해성 가스 중 가장 치명적인 일산화탄소와 이산화탄소를 포함하지는 못한다. 따라서 이를 개선해야할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 일산화탄소와 이산화탄소의 발생비를 포함한 화재성장지수-VII (FGI-VII) 식 (4)를 새로 정립하여 적용하였다. 여기에서 FGI-VII는 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), 그리고 COP_{mean} (g/s)/CO_2P_{mean} (g/s)를 Time to SPR_{peak}로 나눈 값으로 정의된다. 본 연구에서 연기생성속도의 값은 초기 화재의 중요성을 고려하여 제1의 최대연기생성속도(SPR_{1st_peak}) 값을 채택하였다. 특히, 액체성 플라스틱을 포함한 가연물은 연소과정 중 제1의 최대연기생성속도(SPR_{1st_peak})를 적용하고자 한다.

이 식은 더욱 정밀하고 정량도를 높이기 위하여 최대연기생성속도, 최대연기생성속도에 도달하는 시간, 최대열방출률 그리고 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비를 포함한 4개의 변수를 고려하여 화재위험성 평가를 구현하였다.

Table 5에 재료의 FGI-VII 값을 나타내었다. FGI-VII는 열, 연기, 일산화탄소와 이산화탄소의 발생비 및 최대연기생성속도에 도달하는 시간을 고려한 값으로 메타세콰이어가 가장 높게 나타났다. 이것은 SPR_{1st_peak}과 COP_{mean}/CO_2P_{mean} 값이 높고 최대연기생성속도에 도달하는 시간이 빠르기 때문으로 판단된다. FGI-VII에 의한 화재위험성은 PMMA (0.0008 kW/s^2) < 참죽나무(0.0023 kW/s^2) < 호두나무(0.0059 kW/s^2) < 피나무(0.0065 kW/s^2) < 은행나무(0.0114 kW/s^2) < 메타세콰이어(0.0165 kW/s^2)의 순서로 증가하였다. 화재위험성 평가 지수인 FPI-VII 값과 FGI-VII 값을 이용하여 화재위험성을 평가한 결과 기준 시험 물질인 PMMA를 제외하고 메타세콰이어가 가장 위험하며 참죽나무가 가장 위험성이 낮은 물질로 나타났다. 메타세콰이어는 FPI-VII에서 설명한 바와 유사한 경향성을 나타내고, 참죽나무는 자체의 수분함량과 체적밀도가 높아 연소속도가 지연되므로 화재위험성이 낮아지는 것으로 판단된다. 기준 물질로 사용된 열가소성 물질인 PMMA의 FPI-VII 값은 52.97 s^2/kW로 4개의 변수 중 HRR_{1st_peak} 값이 완전연소 됨에 따라 다른 시험편에 비해 가장 높게 나타났으며, FGI-VII 값은 0.0008 kW/s^2로 4개의 변수 중 최대연기생성속도에 도달하는 시간이 385 s로 가장 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

또한 모든 시험 재료의 화재위험성을 평가하기 위한 방법으로서 화재위험성을 표준화하기 위하여 기준시험 물질에 의한 방정식을 적용하였다. 이와 더불어 선행연구에서 제시된 화재성장지수-III (FGI-III)를 개선하기 위하여 화재성장지수-VIII (FGI-VIII)를 새로 정립하여 적용하였다. 여기에서 FGI-VIII는 FGI-VII를 $FGI\text{-}VII_{[PMMA]}$의 표준 값(PMMA 시험편 기준)으로 나눈 값으로 정의된다. 목재의 화재 확대와

$$FPI-VIII=\frac{\dfrac{TTI\,(s)}{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}\,(g/s)/CO_2P_{mean}\,(g/s)}}{\left[\dfrac{TTI\,(s)}{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP\,(g/s)/CO_2P_{mean}\,(g/s)}\right]_{PMMA}} \tag{3}$$

$$FGI-VII=\frac{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}\,(g/s)/CO_2P_{mean}\,(g/s)}{Time\ to\ SPR_{peak}\,(s)} \tag{4}$$

Table 5. Fire Growth Index-VIII (FGI-VIII) of Wood Specimens and Plastic at 50 kW/m^2 External Radiant Heat Flux

Materials	HRR_{1st_peak} (kW/m^2)	SPR_{1st_peak} (m^2/s)	$TSPR_{1st_peak}$ (s)	COP_{mean} / CO_2P_{mean}	FGI-VII (kW/s^2)	FGI-VIII
Ginkgo (GK)	219.87 / 30	0.0279	30	0.0557	0.0114	14.25
Dawn redwood (DRW)	208.51 / 20	0.0266	20	0.0595	0.0165	20.63
Toona (TN)	201.17 / 35	0.0147	45	0.0352	0.0023	2.88
Lime (LM)	244.63 / 25	0.0212	35	0.0437	0.0065	8.13
Walnut (WN)	232.98 / 40	0.0201	40	0.0498	0.0059	7.38
PMMA	1110.56 / 385	0.0516	385	0.0056	0.0008	1

$$FGI-VIII = \frac{\frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2) \cdot COP_{mean}(g/s) / CO_2P_{mean}(g/s)}{Time\ to\ SPR_{peak(S)}}}{\left[\frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2) \cdot COP_{mean}(g/s) / CO_2P_{mean}(g/s)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)}\right]_{PMMA}} \quad (5)$$

$$Fire\ Risk \propto \frac{FGI-VIII}{FPI-VIII} \text{ or } \frac{FGI-VII}{FPI-VII} \text{ or } \frac{FGI-III}{FPI-III} \text{ or } \frac{FGI-II}{FPI-II} \text{ or } \frac{SGI}{SPI} \quad (6)$$

플래시오버의 시간과 상관성이 있으므로[27], 화재 확대가 증가할수록 연기안정성이 감소하는 것으로 이해된다[28]. 따라서 FGI-VIII값이 커질수록 화재위험성이 커지는 것으로 예측된다.

FGI-VIII를 구하는 무차원 지수의 표현인 식은 식 (5)와 같다. 이 방정식은 무차원 지수로서 화재 초기의 중요성 때문에 최대연기생성속도(SPR_{1st_peak})와 최대열방출률(HRR_{1st_peak})값을 선택하여 적용하였다. FGI-VIII가 증가할수록 화재위험성은 높아짐을 의미한다.

Table 5에 의하면 FGI-VIII는 메타세콰이어가 가장 높게 나타났다. 이것은 SPR_{1st_peak}과 COP_{mean}/CO_2P_{mean} 값이 높고 최대연기생성속도에 도달하는 시간이 빠르기 때문으로 판단된다.

PMMA의 기준물질에 의한 FGI-VIII 값은 PMMA(1) < 참죽나무(2.88) < 호두나무(7.38) < 피나무(8.13) < 은행나무(14.25) < 메타세콰이어(20.63)의 순서로 증가하였다. 이것은 다른 요소의 일부 영향도 있지만 FPI-VII, FPI-VIII과 유사한 경향성을 보였다. 즉, FPI-VIII와 FGI-VIII 값에 의하여 화재위험성을 평가한 결과 참죽나무가 화재위험성이 가장 낮은 물질이었으며 메타세콰이어가 가장 위험한 물질로 예상된다.

따라서 결과적으로 목재 및 플라스틱을 포함한 가연물은 FGI-VIII의 값이 커질수록 화재위험성은 높아지고, 화재안전성은 낮아짐을 알 수 있었다. FPI-VIII와 FGI-VIII는 시험에 의해 측정된 데이터를 활용해 계산하여 얻어지는 값으로, 콘칼로리미터 실험에서 가연성 재료의 화재안전성을 파악하는데 종합적인 평가로 적용될 수 있다. 이것은 화재위험성을 표현하는 식 (6)과 같으며 화재위험성을 평가하는 종합적인 화재위험성 수식과 일치한다.

따라서 화재위험성 등급을 평가하기 위하여 새로운 FPI-VII, FGI-VII, FPI-VIII, FGI-VIII을 정립하였으며 선행연구에 의해 개발된 화재위험성지수-IV (FRI-IV)를 개선하여 FRI-IX를 새로 정립하여 적용하였다. 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)는 FGI-VIII를 FPI-VIII으로 나눈 값으로 정의되며 이는 화재가 확산될수록 화재안정성이 감소하는 것과 같다[27]. 즉, FRI-IX 값이 커질수록 화재위험성이 증가하고 반대로 FRI-IX값이 작아질수록 화재위험성이 감소하는 것으로서, 화재위험성 및 화재위험성등급을 종합적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

FRI-IX를 구하는 식 (7)은 다음과 같다.

$$FRI-IX = \frac{FGI-VIII}{FPI-VIII} \quad (7)$$

또한 화재위험성평가에서 사용될 수 있는 최종적인 수치로서 정밀하고 합리적인 방법으로 화재위험성을 관리하기 위하여 화재위험성지수-IX (FRI-IX)의 결과를 바탕으로 화재위험성등급을 Table 6와 같이 제시하였다. 즉, 화재위험성지수-IX (FRI-IX)의 0~30 초과 값을 5단위 간격으로 각각의 가연성 재료들의 연소특성을 고려한 7등급으로 분류하였으며, 화재안전성을 기준으로 매우 높음: A, 높음: B, 중간 1: C, 중간 2: D, 낮음 1: E, 낮음 2: F, 매우 낮음: G로 정하였다. 즉, 등급 A는 건자재의 화재안전성을 상당한 정도로 담보할 수 있는 보수적인 수준이며, 최하위 등급인 G의 경우 건자재로서의 화재안전을 담보할 수 없는 최저 수준임을 제시하였다. 따라서 대부분의 가연성 물질들은 Table 6의 기준에 부합할 것으로 이해된다.

Table 6. Fire Risk Rating for Fire Risk Index-IX of Test Specimens at 50 kW/m^2 External Radiant Heat Flux

FRI-IX	Fire risk rating	Fire safety
5 or less	A	Very high
More than 5 up to 10	B	High
More than 10 up to 15	C	Medium 1
More than 15 up to 20	D	Medium 2
More than 20 up to 25	E	Low 1
More than 25 up to 30	F	Low 2
Over 30	G	Very low

Table 7에 보여준 바와 같이 화재위험성지수인 FRI-IX에 의한 화재위험성은 메타세콰이어가 가장 높은 것으로 나타났다. PMMA 시험편을 기준물질로 한 값을 이용하여 구한 FRI-IX는 참죽나무(0.83): 등급 A < PMMA(1): 등급 A < 호두나무(6.05): 등급 B < 피나무(10.84): 등급 C < 은행나무(19.79): 등급 D < 메타세콰이어(71.14): 등급 G의 순서로 증가하였다. 화재위험성을 종합적으로 평가한 결과 메타세콰이어는 위험성이 매우 높은 목재임을 예상할 수 있었다.

Table 7. Fire Risk Index-IX (FRI-IX) and Fire Risk Rating (FRR) of Wood Specimens and Plastics at 50 kW/m^2 External Radiant Heat Flux

Materials	FPI-VIII	FGI-VIII	FRI-IX	FRR
Ginkgo (GK)	0.72	14.25	19.79	D
Dawn redwood (DRW)	0.29	20.63	71.14	G
Toona (TN)	3.45	2.88	0.83	A
Lime (LM)	0.75	8.13	10.84	C
alnut (WN)	1.22	7.38	6.05	B
PMMA	1	1	1	A

결론적으로 휘발성 유기물질을 다량 함유하고 수분함량 또는 체적밀도가 낮은 물질은 FPI-VII 값과 FPI-VIII 값이 낮고, 또한 FGI-VII 값과 FGI-VIII 값이 증가함에 따라 FRI-IX의 값이 높아진다. 이것은 화재위험성이 높아짐을 의미한다. FRI-IX 값은 시험된 연소 특성값을 사용하여 얻어지는 값으로서, 가연성 재료의 화재안전성을 판단하는데 총괄적이고도 종합적인 평가로 적용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 화재 시 화재위험성 평가를 표준화하기 위해 Chung's equations-VII, Chung's equations-VIII, 그리고 Chung's equation-IX를 새로 정립하여 적용하였다. 시험편은 건자재인 은행나무, 메타세콰이어, 참죽나무, 피나무, 호두나무를 선택하였고, ISO 5660-1의 규격에 의해 콘칼로리미터(cone calorimeter) 시험법으로 시험하였다. 종합적으로 Chung's equation-IX인 FRI-IX에 의하여 화재위험성 및 화재위험성등급(FRR)을 평가하였다. i) 화재성능지수-VIII (FPI-VIII)에 의한 화재안전성은 메타세콰이어(0.29) < 은행나무(0.72) < 피나무(0.75) < PMMA(1) < 호두나무(1.22) < 참죽나무(3.45)의 순으로 증가하였다. 휘발성 유기 화합물의 함량이 높고, 체적밀도가 낮은 재료가 높은 재료보다 화재위험성이 높은 것으로 나타났다. ii) 화재성장지수-VIII (FGI-VIII)에 의한 화재위험성은 PMMA(1) < 참죽나무(2.88) < 호두나무(7.38) < 피나무(8.13) < 은행나무(14.25) < 메타세콰이어(20.63)의 순으로 증가하였다. 휘발성 유기 화합물의 함량이 높고, 수분함량과 체적밀도가 낮으면 화재성장지수가 높았다. iii) 화재위험성 및 화재위험성등급을 평가하기 위하여 다음과 같은 화재위험성지수-IX식으로 정립하여 평가하였다.

$$Fire\ Risk\ Index-IX(FRI-IX)=\frac{FGI-VIII}{FPI-VIII} \tag{7}$$

iv) 화재위험성지수-IX인 FRI-IX에 의한 화재위험성 등급은 참죽나무(0.83): 등급 A < PMMA(1): 등급 A < 호두나무(6.05): 등급 B < 피나무(10.84): 등급 C < 은행나무(19.79): 등급 D < 메타세콰이어(71.14): 등급 G의 순서로 증가하였다. 화재위험성을 종합적으로 평가한 결과 메타세콰이어는 위험성이 매우 높은 목재임을 알 수 있었다. 그러므로 휘발성 유기 화합물을 다량 함유하고 체적밀도가 낮은 목재는 FPI-VII와 FPI-VIII가 낮아지고, FGI-VII와 FGI-VIII가 높아짐에 의하여 FRI-IX가 높은 값을 나타내었다.

References

1. J. Buzek and E. Gyoőri, Regulation (EU) No 305/2011 of the european parliament and of the council of 9 March 2011, Laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing council directive 89/106/EEC text with EEA relevance, *OJEU*, 5-43 (2011).
2. V. Babrauskas, Effective measurement techniques for heat, smoke and toxic fire gases, *Fire Saf.*, **17**, 13-26 (1991).
3. V. Babrauskas and S. J. Grayson, *Heat Release in Fires*, Elsevier, London, UK, 210-217 (1992).
4. CBUF Report, *Fire safety of upholstered furniture - The final report on the CBUF research programme*, Sundstrom, B., Ed., EUR 16477 EN, European commission, measurements and testing report, Contract No. 3478/1/0/196/11-BCR-DK(30), Interscience Communications, London, UK (1995).
5. M, M. Hirschler, Analysis of and potential correlations between fire tests for electrical cables, and how to use this information for fire hazard assessment, *Fire Technol.*, **33**, 291-315 (1997).
6. M. Janssens, *Fundamental Thermophysical Characteristics of Wood and Their Role in Enclosure Fire Growth*, Doctoral's thesis, University of Gent, Belgium (1991).
7. 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).
8. M. A. Delichatsios, Smoke yields from turbulent buoyant jet flames, *Fire Saf.*, **20**, 299-311 (1993).
9. H. C. Tran, Experimental data on wood materials, In: V. Babrauskas and S. J. Grayson (eds.). *Heat Release in Fires*, 357-372, Elsevier Applied Science, New Yok, USA (1992).
10. M. Spearpoint and J. 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.,* **36**, 391–415 (2001).
11. M. Delichatsios, B. Paroz, and A. Bhargava, Flammability properties for charring materials, *Fire Saf.,* **38**, 219–228 (2003).
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, *Prog. Org. Coat.,* **135**, 123-134 (2019).
14. 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).
15. Y. J. Chung and E. Jin, Rating evaluation of fire risk for combustible materials in case of fire, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 75-82 (2021).
16. W. T. Simpso, Drying and control of moisture content and dimensional changes, In: *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA, 1-21 (1987).
17. Y. J. Chung and E. Jin, Assessment and prediction of fire risk grades of wood species in different storage environments, *Fire Sci. Eng.*, **36**, 83-92 (2022).
18. J. Pohleven, M. D. Burnard, and A. Kutnar, Volatile organic compounds emitted from untreated and thermally modified wood-A review, *Wood Fiber Sci.*, 51, 231-254 (2019).
19. J. D. Dehaan, *Kirk's fire investigation*, 5th ed., 84-112, Pearson, London, England (2002).
20. V. Babrauskas, R. D. Peacock, Heat release rate: the single most important variable in fire hazard, *Fire Saf.,* **18**, 255-272 (1992).
21. M. M. Hirschler, Use of heat release rate to predict whether individual furnishings would cause self propagating fires, *Fire Saf.,* **32**, 273-296 (1999).
22. M. M. Hirschler, Heat release testing of consumer products, *J. ASTM Int.*, **6**, 1-25 (2009).
23. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability, *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Academic Press, New York, USA (1981).
24. J. G. Quintire, Principles of fire behavior, *Delmar Cengage Learning*, New York, USA (1998).
25. 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).
26. B. Schartel and T. R. Hull, Development of fire-retarded materials —Interpretation of cone calorimeter data, *Fire Mater.,* **31**, 327-354 (2007).

27. V. Babrauskas, Development of the cone calorimeter - A bench-scale, heat release rate apparatus based on oxygen consumption, *Fire Mater*., **8**, 81-95 (1984).
28. C. Jiao, X. Chen, and J. Zhang, Synergistic effects of Fe_2O_3 with layered double hydroxides in EVA/LDH composites, *J. Fire Sci.,* **27**, 465-479 (2009).

Authors

Yeong-Jin Chung; Ph.D, Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok-city 25949, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr; yjchungg@hanmail.net

Eui Jin; Ph.D, Senior Researcher, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok-city 25913, Korea; jin_eui@hanmail.net