Appl. Chem. Eng., Vol. 34, No. 4, August 2023, 388-396
https://doi.org/10.14478/ace.2023.1042

Article

새로운 Chung's equation−XII에 의한 연소성 물질의 화재위험성지수 및 등급 평가

정영진† · 진 의*

국가안전환경원, *강원대학교 소방방재연구센터
(2023년 4월 16일 접수, 2023년 5월 8일 수정, 2023년 5월 15일 채택)

Fire Risk Index and Grade Evaluation of Combustible Materials by the New Chung's Equation-XII

Yeong-Jin Chung† and Eui Jin*

The National Safety Environment Institute, Seoul 05836, Korea
**Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok-city 25913, Korea*
(Received April 16, 2023; Revised May 8, 2023; Accepted May 15, 2023)

초 록

연소성 물질의 화재위험성 평가를 하기 위하여 Chung's equations-X, Chung's equations-XI, 그리고 Chung's equation-XII를 새로 정립하였다. 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)와 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 산정하였다. 시험편은 녹나무, 벚나무, 고무나무, 느릅나무를 선택하였다. 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 사용하여 시험편에 대한 연소 특성을 시험하였다. Chung's equations에 의해 산정된 화재성능지수-X (fire performance index-X, FPI-X)과 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X)은 각각 893.68~1696.75 s^2/kW와 0.0006~0.0012 kW/s^2로 나타났다. 또한 화재성능지수-XI (fire performance index-XI, FPI-XI)과 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI)은 각각 0.78~1.48과 0.67~1.38으로 나타났다. 화재위험성 등급인 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 녹나무가 1.77(화재위험성등급: C)으로 화재위험성이 매우 높은 목재로 나타났다. 그러므로 휘발성 유기 화합물을 다량 함유하고 있는 연소성 물질은 FPI-X과 FPI-XI이 낮아지고, FGI-X과 FGI-XI이 높아짐에 의하여 FRI-XII가 높은 값을 나타내었다.

Abstract

The evaluation of fire risk for combustible materials was carried out using Chung's equations-X, Chung's equations-XI, and Chung's equation-XII, which were newly established. The fire risk index-XII (FRI-XII) and fire risk rating (FRR) were calculated for specimens including camphor tree, cherry, rubber tree, and elm. The combustion characteristics were determined using a cone calorimeter according to ISO 5660-1. Chung's equations caculated the fire performance index-X (FPI-X) and fire growth index-X (FGI-X) from 893.68 to 1696.75 s^2/kW and from 0.0006 to 0.0012 kW/s^2, respectively. In addition, the fire performance index-XI (FPI-XI) and fire growth index-XI (FGI-XI) varied from 0.78 to 1.48 and from 0.67 to 1.38, respectively. The fire risk index-XII (FRI-XII), which is an indicator of fire risk, showed that camphor tree had a value of 1.77 (fire risk rating: C), indicating a very high fire risk. This suggests that combustible materials with a high cocentration of volatile organic compounds have lower FPI-X and FPI-XI values, higher FGI-X and FGI-XI values, and consequently higher FRI-XII values, indicating an increased fire risk.

***Keywords**: Combustible materials, Chung's equations-X, Chung's equations-XI, Chung's equation-XII, fire risk rating (FRR)*

1. 서 론

연소성 물질의 화재 확산은 인명안전과 재산보호에 심각한 피해를 준다[1]. 연소성 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, 복사

† Corresponding Author: The National Safety Environment Institute
Seoul 05836, 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.

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

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 연기발생에 대한 정량적인 평가와 위험성을 구현하는 방법으로는 아직 부족한 점이 많다.

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

화재위험성은 연기성능지수(smoke performance index, SPI)와 화재성능지수-II (fire performance index-II, FPI-II), -III (fire performance index-III, FPI-III)가 낮고 연기성장지수(smoke growth index, SGI)와 화재성장지수-II (fire growth index-II, FGI-II), -III (fire growth index-III, 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.

또한 화재 시 발생되는 치명적인 유해성 가스인 일산화탄소와 이산화탄소를 포함하여 화재위험성을 평가하기 위해 Chung's equations-VII, Chung's equations-VIII, 그리고 Chung's equation-IX인 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)를 정립하고, 종합적인 화재위험성지수-IX (FRI-IX) 및 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 평가하였다[16].

그러나 본 연구에서는 또 다른 방법으로 가연물의 착화시간(time to ignition, TTI) 대신에 연소저항시간(combution resistance time, CRT)과 제1차 최대연기발생속도에 도달되는 시간(time to 1st_peak smoke production rate, $TSPR_{1st_peak}$) 대신에 누적연기발생시간(accumulated smoke generation time, ASGT)을 포함하여 화재위험성을 평가하기 위해 Chung's equations-X인 화재성능지수-X (fire performance index-X, FPI-X), 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X), Chung's equations-XI인 화재성능지수-XI (fire performance index-XI, FPI-XI), 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI), 그리고 Chung's equation-XII인 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)를 새로이 정립하고, 종합적인 화재위험성지수-XII (FRI-XII) 및 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 평가하여 건축 및 화재설계 데이터의 기초자료로 활용하고자 한다.

이 연구에서는 건자재 및 내장재로 주로 사용되며, 사용빈도가 높은 목재 중 녹나무(camphor tree), 벚나무(cherry), 고무나무(rubber tree), 느릅나무(elm)의 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 녹나무, 벚나무, 고무나무, 느릅나무의 순수한 목재를 엠에이치테크놀로지스사 및 농가에서 구입 하였으며 별도의 가공처리 없이 시험 표준규격에 맞추어 두께는 10 mm로 준비하였다. 기준물질인 PMMA는 검은색으로서 Fire Testing Technology 사에서 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[17].

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

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.

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 (L)로 절단하여 사용 하였다. Table 2에 콘칼로리미터 시험법에 대한 실험조건을 제시하였다.

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

Materials	Scientific name	Classification	Moisture content (%)	Bulk density (kg/m^3)
Camphor Tree (CT)	*Cinnamomum camphora*	Hard wood	9.5	528
Cherry (CR)	*Prunus avium*	Hard wood	8.8	483
Rubber tree (RT)	*Hevea brasiliensis*	Hard wood	8.5	540
Elm (EL)	*Ulmus davidiana var. japonica*	Hard wood	8.7	445
PMMA	-	-	-	1180

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, 연기 및 유해가스의 특성 지수를 산정하였다. 본 연구를 위하여 PMMA에 대하여 선행연구의 데이터를 사용하였으며[18], 연소 특성과 관련된 요소로 연소저항시간(CRT), 열방출률(heat release rate, HRR), 연기발생속도(smoke production rate, SPR), 누적연기발생시간(ASGT) 및 일산화탄소와 이산화탄소의 발생속도 등을 분석하였으며 그에 대한 데이터를 Table 3에 제시하였다. 이 데이터를 사용하여 화재성능지수-X (FPI-X)과 화재성장지수-X (FGI-X)을 계산하고, 이를 표준화 하기 위하여 화재성능지수-XI (FPI-XI)과 화재성장지수-XI (FGI-XI)을 평가한 후 종합적으로 화재위험성지수-XII (FRI-XII) 및 화재위험성등급(FRR)을 부여하였다.

무차원 지수인 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 화재위험성을 표준화한 종합적인 화재위험성지수이다. 콘칼로리미터 시험에서 우수한 재현성 및 반복성을 나타내는 PMMA 시험편을 화재위험성 평가의 표준화를 위한 기준으로 사용하였다.

3.1. 열적 특성 평가

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

Table 3에 보여준 바와 같이 시험편의 착화시간(time to ignition, TTI)은 기준 물질인 PMMA를 제외하고 12~14 s로 특별한 차별성이 없었다. 그러나 PMMA는 17 s로서 시험편의 밀도 차이로 설명될 수 있다. 녹나무의 경우는 수분함량이 비교적 높은 수치임에도 불구하고 TTI에는 특별한 영향을 미치지 않았다. 이것은 그 자체에 연소에 용이한 휘발성 유기물질이 작용한다는 것으로 이해된다[19]. 연소시간에 관계된 연소저항시간(combustion resistance time, CRT)은 느릅나무가 가장 짧은 시간(200 s)으로 측정되었다. 이 또한 시험편의 가장 낮은 체적밀도(445 kg/m^3) 때문으로 이해된다. 본 연구에서 적용한 연소저항시간의 의미는 연소 대상물의 연소 시 제1차 최대열방출률(HRR_{1st_peak})이 발생되는 지점과 제2차 최대열방출률(HRR_{2nd_peak})이 발생되는 지점 사이의 누적된 연소 시간으로 정의하였다. 연소저항시간(CRT)은 재료의 잠재적 연소시간에 대하여 선행연구[15]에 의한 착화시간과 유사한 연소특성을 가지고 있으므로, 이 착화시간을 대체하여 또 다른 방법으로 화재위험성평가를 구현할 수 있다는 것에 착안하였다. 따라서 더욱 화재위험성평가범위를 확장하여 이의 대체 방법으로 새로운 요소를 적용하였다. 가연물은 그 자체의 연소 조건에 의하여 연소속도의 차별화가 이루어진다.

재료의 착화시간은 목재의 표면에 대한 열손실 유무에 따른 상수, 체적밀도, 열전도도, 연료의 비열 및 착화온도의 제곱에 비례하고, 시험편에 가해지는 열유속(heat flux)의 제곱에 반비례한다[20]. 그러므로 체적밀도가 증가하면 착화시간이 늦어지는 것으로 예측된다.

최대열방출률은 가장 중요한 화재특성이며 화재의 강도에 대한 표현이며 화재 위험에 대한 여러 분석에 의해 중요성이 알려졌다[21-23]. 열방출률이 커질수록 더 많은 연소 대상 물질이 발화하여 연소되므로 화재 규모를 확대시킨다. 반면에 열방출률이 낮으면 근접한 대상 물질에 착화되지 않고 발화영역에 국한될 수 있다. 화재발생 시 열방출률이 낮은 가연성 재료는 화재확산이 지연되는 효과를 기대할 수 있다[24]. 시험편의 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 시험편의 표면적당 순간 최고로 방출되는 열량의 크기로 표현된다[25,26]. 이는 연소 대상 재료가 가장 많이 연소되는 시점이므로 열방

Table 3. Combustion Characteristics of the Test Specimen under 50 kW/m^2 External Radiant Heat Flux

Materials	[a]TTI (s)	[b]CRT (s)	[c]HRR_{1st_peak} (kW/m^2) at Time (s)	[d]HRR_{2nd_peak} (kW/m^2) at Time (s)	[e]SPR_{1st_peak} (m^2/s)
Camphor Tree (CT)	13	235	258.98 / 30	372.22 / 265	0.0304
Cherry (CR)	13	235	209.82 / 30	271.12 / 255	0.0165
Rubber tree (RT)	14	245	225.60 / 30	310.40 / 280	0.0238
Elm (EL)	12	200	210.66 / 30	362.46 / 230	0.0246
PMMA	17	368	1110.56 / 385	-	0.0516

Materials	[f]$TSPR_{1st_peak}$(s)	[g]ASGT (s)	[h]SPR_{2nd_peak} (m^2/s) at Time (s)	[i]COP_{mean} (g/s)	[j]CO_2P_{mean} (g/s)	COP_{mean} / CO_2P_{mean}
Camphor Tree (CT)	45	245	0.0775 / 290	0.0015	0.0449	0.0334
Cherry (CR)	30	250	0.0490 / 280	0.0016	0.0400	0.0400
Rubber tree (RT)	85	205	0.0611 / 300	0.0020	0.0429	0.0466
Elm (EL)	40	200	0.0682 / 240	0.0014	0.0375	0.0373
PMMA	385	368	-	0.0007	0.1243	0.0056

[a]Time to ignition; [b]combution resistance time; [c]1st_peak heat release rate; [d]2nd_peak heat release rate; [e]1st_peak smoke production rate;
[f]Time to 1st_peak smoke production rate; [g]accumulated smoke generation time; [h]2nd_peak smoke production rate; [i]mean carbon monoxide production rate;
[j]mean carbon dioxide production rate

출 속도가 높은 화염연소는 화재범위를 확장 시킨다.

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[27]. 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 시험편의 열방출 곡선을 나타내었다. 목재의 HRR_{1st_peak} 특성은 벚나무 209.82 kW/m^2, 느릅나무 210.66 kW/m^2, 고무나무 225.60 kW/m^2, 녹나무 258.98 kW/m^2, PMMA 1110.56 kW/m^2 순으로 증가하였다. 이들 중 목재 중 녹나무가 가장 높게 나타났으며 벚나무에 비하여 1.2배 높았다. HRR_{2nd_peak}의 경우, 벚나무 271.12 kW/m^2, 고무나무 310.40 kW/m^2, 느릅나무 362.46 kW/m^2, 녹나무 372.22 kW/m^2 순으로 증가하였다. 녹나무가 가장 높은 값을 나타내었으며 벚나무와 비교하여 1.4배 높았다. 녹나무가 벚나무보다 HRR_{1st_peak} 값이 크므로 초기에 화재의 열위험성이 가장 큰 것으로 판단된다. 여기에서 HRR_{1st_peak}와 HRR_{2nd_peak}는 유사한 경향성을 나타내었다. 열방출률의 감소는 연소 물질의 질량이 감소됨에 따라 가연성 기체의 발생량이 감소하기 때문이다.

3.2. 연기발생속도 특성 평가

연소성 물질의 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 벚나무 0.0165 m^2/s, 고무나무 0.0238 m^2/s, 느릅나무 0.0246 m^2/s, 녹나무 0.0304 m^2/s, PMMA 0.0516 m^2/s 순으로 증가하였다. 녹나무는 벚나무에 비하여 1.8배 높은 것으로 나타났다. 녹나무는 전술한 바와 같이 다량의 휘발성 유기물의 함량에 의해 SPR_{1st_peak}가 높은 것으로 이해된다[19].

이어서 제2차 최대연기발생률(SPR_{2nd_peak})의 측정 값도 SPR_{1st_peak}와 유사한 경향성을 보였다. 단지 느릅나무는 가장 빠른 245 s에 SPR_{2nd_peak}가 측정되었는데 이것은 그 자체의 함유된 휘발성 유기물질의 영향과 체적밀도가 가장 낮기 때문으로 판단된다. 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. 초기 화재의 연기유해성을 평가하면 SPR_{1st_peak} 영역에서는 녹나무가 가장 큰 유해성을 보였으며 벚나무가 가장 낮은 유해성을 보였다.

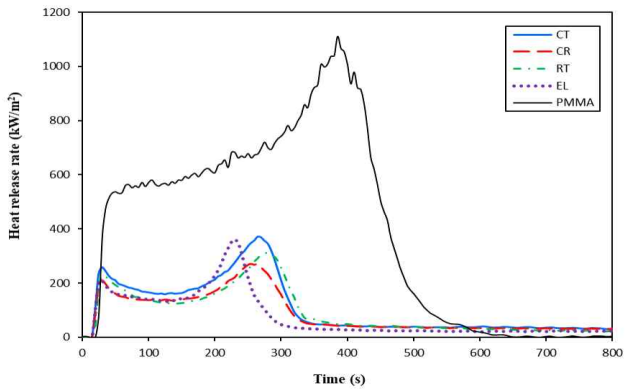


Figure 1. Heat release rate curves of the test specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux.

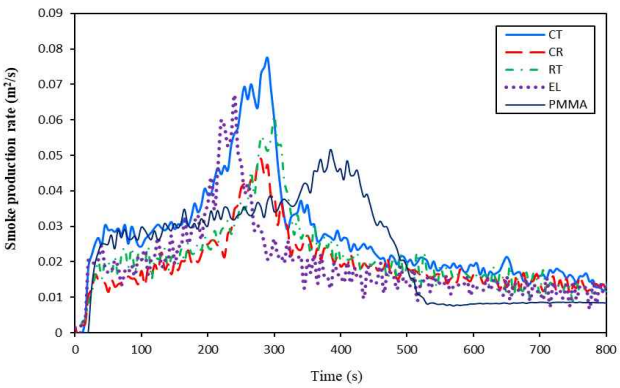


Figure 2. Smoke production rate curves of the test specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux.

Figure 2에 보여준 바와 같이 최대연기발생속도에 도달하는 시간은 탄화성 시험편에 대하여 두 단계로 나타났다. 첫 번째 최대연기발생속도(the first peak smoke release rate, SPR_{1st_peak})는 30~385 s에서 나타났으며, 두 번째 최대연기발생속도(the second peak smoke release rate, SPR_{2nd_peak})는 240~300 s에서 나타났다. SPR_{1st_peak}는 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. 또한 누적연기발생시간(ASGT)은 200~368 s로 측정되었다. 벚나무는 250 s로 목재 중 가장 긴 시간 동안 연기를 발생하였다. 이와 같이 체적밀도가 낮고, HRR_{1st_peak}와 HRR_{2nd_peak}가 낮은 값임에도 긴 시간 연기를 발생하는 것은 그 자체의 난연성이 높다는 것으로 이해된다. 느릅나무는 체적밀도가 낮아 ASGT 값이 짧았다. 본 연구에서 누적연기발생시간(ASGT)은 연소 대상물의 연소 시 제1차 최대연기발생속도($TSPR_{1st_peak}$)에 도달되는 지점과 제2차 최대연기발생속도($TSPR_{2nd_peak}$)에 도달되는 지점 사이의 누적된 연기발생 시간으로 정의하였다. 가연물은 그 자체의 연소 조건에 의하여 연소속도의 차별화가 이루어진다. ASGT는 재료의 잠재적 연기발생시간에 대하여 제1차 최대연기발생속도에

도달되는 시간($TSPR_{1st_peak}$)과 유사한 연소특성을 가지고 있으므로, 선행연구[15]에 의한 이의 $TSPR_{1st_peak}$를 대체하여 또 다른 방법으로 화재위험성평가를 구현할 수 있다는 것에 착안하였다. 따라서 더욱 화재위험성 평가 범위를 확장하여 이의 대체 방법으로 새로운 요소를 적용하였다. 가연물은 그 자체의 연소 조건에 의하여 연소속도의 차별화가 이루어진다.

예외적으로 열가소성 물질은 탄화물질 또는 열경화성 물질과 연소패턴이 다르므로 이를 가장 근접하게 반영하여 TTI와 $TSPR_{1st_peak}$ 지점 사의의 누적된 연기발생시간을 적용하였다. 이러한 ASGT는 수분함량, 휘발성 유기물질의 함량, 그리고 체적밀도와 상관관계가 있으나, 휘발성 유기 화합물의 함량이 높고, 체적밀도가 감소함에 따라 최대연기발생속도에 도달하는 시간이 빠른 것을 보여준다.

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 연소성 불질과 불꽃 사이에서 발생되는 가장 중요한 휘발성물질의 불완전연소 생성물이다. 휘발성 물질의 열방출속도가 높아지는 것은 동반된 CO가스 발생이 증가하는 것으로 이해된다. Table 3 및 Figure 3에 나타낸 시험편 4종의 CO 평균발생속도인 COP_{mean}은 0.0014~0.0020 g/s로 나타났다. 이는 기준물질인 PMMA (0.0007 g/s)에 비하여 2.0~2.9배로서 목재가 PMMA보다 불완전연소 물질임을 보였다. 불이 꺼진 후 관찰된 CO 발생속도는 숯의 열 산화반응 때문으로 판단된다.

Table 3 및 Figure 4에 나타낸 바와 같이 CO_2 평균발생속도인 CO_2P_{mean}은 모든 시험편에 대하여 0.0375~0.0449 g/s였다. 이는 기준물질인 PMMA의 CO_2P_{mean} (0.1243 g/s)에 비하여 2.8~3.5배 낮았다. 모든 시편이 연소 후 보다 연소 시 열방 열방출률 영역에서 CO_2가 발생되었으며 이는 불꽃 연소 영역에서 완전연소가 이루어진다는 것을 의미한다.

Table 3의 CO와 CO_2의 평균발생속도에 대한 목재 시험편의 COP_{mean}/CO_2P_{mean} 비율은 0.0400~0.0334으로서 PMMA와 비교하여 7.0~59.7배로 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 연기위험성도 같은 경향으로 이해된다. 따라서 선행 연구에서는 가연물의 화재안전성을 예측하기 위하여 착화시간, 최대연기발생속도 그리고 최대열방률의 3개의 변수를 조합하여 화재성능지수-II (fire performance index-II, FPI-II)를 정립하여 발표하였다[15]. 그러나 화재 시 발생되는 유해성 가스 중 가장 치명적인 일산화탄소와 이산화탄소의 발생을 포함하여 평가할 필요성이 있어서 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비를 포함한 4개의 변수를 반영하여 화재성능지수-VII (fire performance index-VII, FPI-VII)을 정립하여 적용하였다[16].

그러나 본 연구에서는 또 다른 방법으로 가연물의 착화시간(TTI) 대신에 앞에서 정의한 연소저항시간(combution resistance time, CRT)을 대체 요소로 도입하여 식 (2)와 같이 화재성능지수-X (FPI-X)을 새로이 정립하였다. 연소저항시간은 연소 대상물의 연소 시 제1차 최대열방출률(HRR_{1st_peak}) 지점과 제2차 최대열방출률(HRR_{2nd_peak}) 지점 사

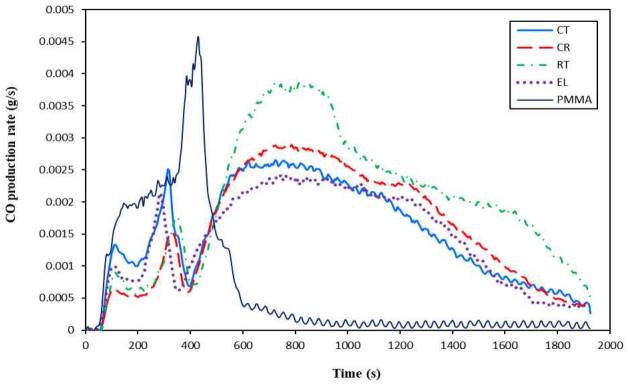


Figure 3. CO production rate (g/s) curves of the test specimen under 50 kW/m² external radiant heat flux.

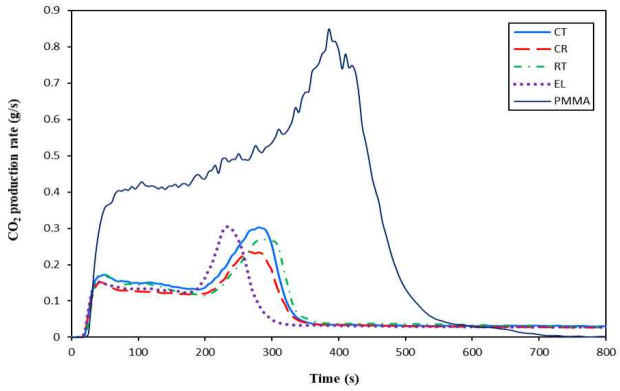


Figure 4. CO_2 production rate (g/s) curves of the test specimen under 50 kW/m² external radiant heat flux.

이의 누적된 연소 시간으로 정의하였다. 가연물은 그 자체의 연소 조건에 의하여 연소속도의 차별화가 이루어진다. 또한 열가소성 물질은 탄화물질 또는 열경화성 물질과 연소패턴이 다르게 연소 시 제1차 최대열방출률(HRR_{1st_peak})만 나타낸다. 그러므로 이를 최적화하기 위해서 가장 근접한 요소인 TTI와 HRR_{1st_peak} 사이의 연소시간을 적용하였다.

식 (2)에서 FPI-X은 CRT (s)를 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), 그리고 COP_{mean} (g/s)/CO_2P_{mean} (g/s)의 3개 변수로 곱하여 나눈 값으로 정의된다.

Table 4에 재료의 화재성능지수-X (FPI-X) 값을 나타내었다. FPI-X 값은 연소저항시간, 열, 연기 및 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비 조합으로서 FPI-X 값에 의한 화재안전성은 녹나무(89.34 s^2/kW) < 고무나무(979.22 s^2/kW) < 느릅나무(1034.66 s^2/kW) < PMMA(1146.78 s^2/kW) << 벚나무(1696.75 s^2/kW)의 순서로 증가하였다. 따라서 녹나무는 화재위험성이 가장 높게 나타났다. 이는 자체의 휘발성 유기 화합물의 함량이 높아 분모 3개의 변수 값이 목재 중 가장 높기 때문으로 판단된다. 벚나무는 화재위험성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 최대열방출률과 최대연기발생속도가 낮기 때문으로 이해된다.

또한 모든 재료의 화재위험성을 표준화 하기 위하여 FPI-XI를 새로이 정립하였다. FPI-XI은 FPI-X을 PMMA 기준값인 $FPI\text{-}X_{[PMMA]}$으로 나눈 값으로 표현된다. 이 방정식은 최대연기발생속도와 최대열방출률의 값이 화재 초기의 중요성 때문에 SPR_{1st_peak}와 HRR_{1st_peak} 값을 선

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

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

Materials	CRT (s)	HRR_{1st_peak} (kW/m^2)	SPR_{1st_peak} (m^2/s)	COP_{mean} / CO_2P_{mean}	FPI-X (s^2/kW)	FPI-XI
Camphor Tree (CT)	235	258.98 / 30	0.0304	0.3341	893.68	0.78
Cherry (CR)	235	209.82 / 30	0.0165	0.0400	1696.75	1.48
Rubber tree (RT)	245	225.60 / 30	0.0238	0.0466	979.22	0.85
Elm (EL)	200	210.66 / 30	0.0246	0.0373	1034.66	0.90
PMMA	368	1110.56 / 385	0.0516	0.0056	1146.78	1

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

$$FGI-X=\frac{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}(g/s)/CO_2P_{mean}(g/s)}{ASGT(s)} \quad (4)$$

택하여 적용하였다. 최대값을 사용한 것은 실제 화재를 상정한 최대 안전치를 고려한 것이다. 가연성 재료의 화재 확대와 플래시오버의 시간은 상호 상관관계가 있으므로[26], 화재 확산이 증가할수록 화재 안전성이 감소하는 것처럼 연기안전성도 감소하는 것으로 예상된다. 여기에서 FPI-XI이 증가할수록 화재위험성은 낮아진다.

FPI-XI을 구하는 무차원 지수의 표현식은 식 (3)과 같다. 이 식은 화재성능지수-VIII (FPI-VIII)의 TTI (s)를 대체하여 CRT (s)를 도입하였다.

Table 4에 재료의 FPI-XI 값을 나타내었다. 이것은 FPI-X 값을 PMMA로 표준화 한 값이다. 화재성능지수-XI (FPI-XI)의 화재안전성은 녹나무(0.78) < 고무나무(0.85) < 느릅나무(0.90) < PMMA(1) << 벚나무(1.48)의 순서로 증가하였다.

또한 선행 연구에서는 가연물의 화재안전성을 예측하기 위하여 최대연기발생속도[SPR_{peak} (m^2/s)], 최대열방출률[PHRR (kW/m^2)], 그리고 최대연기발생속도에 도달되는 시간[Time to SPR_{peak} (s)]의 3개 변수를 고려하여 화재성장지수-II (fire growth index-II, FGI-II)를 정립하였다[15]. 그러나 화재 시 발생되는 유해성 가스 중 가장 치명적인 일산화탄소와 이산화탄소의 발생을 포함하여 평가할 필요성이 있어서 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비를 포함한 4개의 변수를 반영하여 화재성장지수-VII (fire growth index-VII, FGI-VII)을 정립하여 적용하였다[16]. 이 식은 선행연구와 비교하여 더욱 정량성과 정밀도를 높이기 위하여 최대연기발생속도에 도달되는 시간, 최대연기발생속도, 최대열방출률 그리고 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비를 포함한 4개의 변수를 고려하여 화재위험성 평가를 구현하였다.

그러나 본 연구에서는 또 다른 방법으로 가연물의 최대연기발생속도에 도달되는 시간[Time to SPR_{1st_peak}, $TSPR_{1st_peak}$ (s)] 대신에 앞에서 정의한 누적연기발생시간[accumulated smoke generation time, ASGT (s)]을 대체 요소로 활용하여 식 (4)와 같이 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X)을 새로 정립하였다. 가연물은 그 자체의 연소 조건에 의하여 연소속도의 차별화가 이루어진다. 특히, 열가소성 물질은 탄화물질 또는 열경화성 물질과 연소패턴이 다르므로 이를 최적화하여 가장 근접한 요소인 TTI와 $TSPR_{1st_peak}$ 사이의 누적연기발생시간을 적용하였다.

식 (4)에서 FGI-X은 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), 그리고 COP_{mean} (g/s)/CO_2P_{mean} (g/s)의 3개 변수의 곱한 값을 ASGT (s)로 나눈 값으로 정의된다.

Table 5에 재료의 FGI-X 값을 나타내었다. FGI-X 값은 누적연기발생시간[ASGT (s)], 최대열방출률(PHRR, kW/m^2), 최대연기발생속도(SPR_{peak}, m^2/s), 그리고 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비의 조합으로서 녹나무가 가장 높은 값으로 나타났다. 이는 PMMA를 제외한 재료 중 SPR_{1st_peak}, PHRR 값이 가장 높고, 또한 COP_{mean}/CO_2P_{mean}이 높기 때문으로 판단된다. 따라서 녹나무는 화재위험성이 가장 높게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 휘발성 유기 화합물의 함량이 높기 때문으로 이해된다. 벚나무는 화재위험성이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 최대열방출률과 최대연기발생속도가 낮기 때문으로 이해된다. FGI-X 값에 의한 화재위험성은 벚나무(0.0006 kW/s^2) < PMMA (0.0009 kW/s^2) < 느릅나무(0.0010 kW/s^2) < 녹나무(0.0011 kW/s^2) < 고무나무(0.0012 kW/s^2)의 순서로 증가하였다.

또한 모든 시험 재료의 화재위험성을 평가하기 위한 방법으로서 화재위험성을 표준화하기 위하여 기준시험 물질에 의한 방정식을 적용하였다. 이와 더불어 선행연구에서 제시된 화재성장지수-VIII (FGI-VIII)[16]과 또 다른 방법으로 화재성장지수-XI (FGI-XI)을 식 (5)와 같이 새로 정립하여 적용하였다. 여기에서 FGI-XI은 FGI-X을 $FGI-X_{[PMMA]}$의 표준 값(PMMA 시험편 기준)으로 나눈 값으로 정의된다. 이는 목재의 화재 확대와 플래시오버의 시간과 상관성이 있으므로[26], 화재 확대가 증가할수록 연기안전성이 감소하는 것으로 이해된다. 따라서 FGI-XI 값이 커질수록 화재위험성이 커지는 것으로 예측된다.

FGI-XI을 구하는 무차원 지수의 표현인 식은 식 (5)와 같다.

Table 5. Fire Growth Index-XI (FGI-XI) of Wood Specimens and Plastic at 50 kW/m² External Radiant Heat Flux

Materials	HRR_{1st_peak} (kW/m²)	SPR_{1st_peak} (m²/s)	ASGT (s)	COP_{mean} / CO_2P_{mean}	FGI-X (kW/s²)	FGI-XI
Camphor Tree (CT)	258.98 / 30	0.0304	245	0.0334	0.0011	1.38
Cherry (CR)	209.82 / 30	0.0165	250	0.0400	0.0006	0.67
Rubber tree (RT)	225.60 / 30	0.0238	205	0.0466	0.0012	1.33
Elm (EL)	210.66 / 30	0.0246	200	0.0373	0.0010	1.11
PMMA	1110.56 / 385	0.0516	368	0.0056	0.0009	1

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

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

이 방정식은 무차원 지수로서 화재 초기의 중요성 때문에 최대연기발생속도(SPR_{1st_peak})와 최대열방출률(HRR_{1st_peak})값을 선택하여 적용하였다. FGI-XI이 증가할수록 화재위험성은 높아짐을 의미한다.

Table 5에 나타낸 FGI-XI 값은 벚나무(0.67) < PMMA(1) < 느릅나무(1.11) < 고무나무(1.33) < 녹나무(1.38)의 순서로 증가하였다. 이것은 다른 요소의 일부 영향도 있지만 FGI-X, FGI-XI과 유사한 경향성을 보였다. 즉, FPI-XI과 FGI-XI 값에 의하여 화재위험성을 평가한 결과 벚나무가 화재위험성이 가장 낮은 물질이었으며 녹나무가 가장 위험한 물질로 예상된다.

따라서 결과적으로 목재 및 플라스틱을 포함한 가연물은 FGI-XI의 값이 커질수록 화재위험성은 높아지고, 화재안전성은 낮아짐을 알 수 있었다. FGI-XI은 시험에 의해 측정된 데이터를 활용해 계산하여 얻어지는 값으로, 콘칼로리미터 실험에서 가연성 재료의 화재안전성을 파악하는데 종합적인 평가로 적용될 수 있다.

화재위험성은 식 (6)과 같이 연관되며 화재위험성을 평가하는 종합적인 화재위험성 수식과 일치한다.

이를 바탕으로 화재위험성 등급을 평가하기 위하여 새로운 FPI-X, FGI-X, FPI-XI, FGI-XI을 정립하였으며 선행 연구에 의해 개발된 화재위험성지수-IX (FRI-IX)[16]의 대체 수단으로 활용하기 위해 또 다른 방법으로 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)를 식 (7)과 같이 새로 정립하여 적용하였다. FRI-XII는 FGI-XI을 FPI-XI으로 나눈 값으로 정의되며 이는 화재가 확산될수록 화재안전성이 감소하는 것과 같다[26]. 즉, FRI-XII 값이 커질수록 화재위험성이 증가하고 반대로 FRI-XII 값이 작아질수록 화재위험성이 감소하는 것으로서, 화재위험성 및 화재위험성등급을 종합적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

FRI-XII를 구하는 식 (7)은 다음과 같다.

$$FRI-XII = \frac{FGI-XI}{FPI-XI} \quad (7)$$

또한 화재위험성평가에서 사용될 수 있는 최종적인 수치로서 정밀하고 합리적인 방법으로 화재위험성을 관리하기 위하여 화재위험성지수-XII (FRI-XII)의 결과를 바탕으로 화재위험성등급을 Table 6과 같이 제시하였다. 즉, 화재위험성지수-XII (FRI-XII)의 0~12 초과 값을 2단위 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-XII of Test Specimens at 50 kW/m² External Radiant Heat Flux

FRI-XII	Fire risk rating	Fire safety
2 or less	A	Very high
More than 2 up 4	B	High
More than 4 up to 6	C	Medium 1
More than 6 up to 8	D	Medium 2
More than 8 up to 10	E	Low 1
More than 10 up to 12	F	Low 2
Over 12	G	Very low

Table 7에 보여준 바와 같이 화재위험성지수인 FRI-XII에 의한 화재위험성은 녹나무가 가장 높은 것으로 나타났다. PMMA 시험편을 기준물질로 한 값을 이용하여 구한 FRI-XII는 벚나무(0.45): 등급 A ≈ PMMA (1): 등급 A ≈ 느릅나무(1.23): 등급 A ≈ 고무나무(1.56): 등급 A < 녹나무(1.77): 등급 C의 순서로 증가하였다. 화재위험성을 종합적으로 평가한 결과 녹나무는 위험성이 매우 높은 목재임을 예상할 수 있었다.

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

Materials	FPI-XI	FGI-XI	FRI-XII	FRR
Camphor Tree (CT)	0.78	1.38	1.77	C
Cherry (CR)	1.48	0.67	0.45	A
Rubber tree (RT)	0.85	1.33	1.56	A
Elm (EL)	0.90	1.11	1.23	A
PMMA	1	1	1	A

이와 같이 착화시간 및 제1차 최대연기방출에 도달되는 연기발생시간을 대체하여 연소저항시간(CRT) 및 누적연기발생시간(ASGT)을 가연성 재료의 잠재적 연소대응시간과 연기발생누적시간에 대한 구체적인 표현 요소로 정의하고, 이를 가연성 재료의 화재위험성 평가에 적용한 결과, 휘발성 유기물질을 다량 함유하고 최대열방출률(HRR_{peak}), 최대연기발생속도(SPR_{peak}) 및 CO/CO_2의 평균발생비가 높은 물질은 FPI-X 값과 FPI-XI 값이 낮고, 또한 FGI-X 값과 FGI-XI 값이 증가함에 따라 FRI-XII의 값이 높아진다. 이것은 화재위험성이 높아짐을 의미한다. FRI-XII 값은 시험된 연소 특성값을 사용하여 얻어지는 값으로서, 가연성 재료의 화재안전성을 판단하는데 총괄적이고도 종합적인 평가로 적용될 수 있다.

4. 결 론

연소성 물질의 화재위험성 평가를 하기 위해 Chung's equations-X, Chung's equations-XI, 그리고 Chung's equation-XII를 새로 정립하였다. 시험편은 녹나무, 벚나무, 고무나무, 느릅나무를 선택하였다. 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 사용하여 시험편에 대한 연소 특성을 시험하였으며, 최종적으로 Chung's equation-XII인 FRI-XII에 의하여 화재위험성 및 화재위험성등급(FRR)을 평가하였다.

연소 종료 후 Chung's equations에 의해 화재위험성 지수들을 산정하였다.

i) 화재성능지수-XI (FPI-XI)은 녹나무(0.78) < 고무나무(0.85) < 느릅나무(0.90) < PMMA(1) << 벚나무(1.48)의 순서로 증가하였다.

ii) 화재성장지수-XI (FGI-XI) 값은 벚나무(0.67) < PMMA(1) < 느릅나무(1.11) < 고무나무 (1.33) < 녹나무(1,38)의 순서로 증가하였다.

iii) 화재위험성 및 화재위험성등급을 평가하기 위하여 식 (7)과 같이 화재위험성지수-XII (FRI-XII)를 정립하여 평가하였다.

$$Fire\ risk\ Index\text{-}XII\ (FRI\text{-}XII) = \frac{FGI-XI}{FPI-XI} \quad (7)$$

iv) 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 벚나무(0.45): 등급 A ≈ PMMA (1): 등급 A ≈ 느릅나무(1.23): 등급 A ≈ 고무나무(1.56): 등급 A < 녹나무(1.77): 등급 C의 순서로 증가하였다. 화재위험성을 종합적으로 평가한 결과 녹나무는 위험성이 매우 높은 목재임을 예상할 수 있었다.

v) 연소저항시간(CRT) 및 누적연기발생시간(ASGT)은 가연성 재료의 잠재적 연소대응시간과 연기발생누적시간에 대한 구체적인 표현 요소로 정의하고, 이를 가연성 재료의 화재위험성 평가에 적용하였다.

결론적으로 휘발성 유기물질을 다량 함유하고 최대열방출률(HRR_{peak}), 최대연기발생속도(SPR_{peak}) 및 CO/CO_2의 평균발생비가 높은 물질은 FPI-X 값과 FPI-XI 값이 낮아지고, 또한 FGI-X 값과 FGI-XI 값이 증가함에 따라 FRI-XII의 값이 높아진다. 즉, FRI-XII 값은 시험에 의한 연소 특성값을 사용하여 얻어지는 값으로서, 가연성 재료의 화재안전성을 평가 하는데 총괄적이고 종합적인 평가로 적용될 수 있다.

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), Geneve, 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. Y. J. Chung and E. Jin, Rating of fire risk of combustible materials by the new Chung's Equation-IX, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 144-152 (2023).
17. W. T. Simpson, Drying and control of moisture content and dimensional changes. *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material*. USDA Forest service, Forest products laboratory, General technical report FPL, GTR-113, 12.1-12.20, Madison, Wisconsin, USA (1999).
18. 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).
19. N. Hirota and M. Hiroi, The later studies on the camphor tree, on the leaf oil of each practical form and its utilisation, *Perfumery and Essential Oil Record*, **58**, 364-367 (1967).
20. J. D. Dehaan, *Kirk's Fire Investigation*, 5th ed., 84-112, Pearson, London, England (2002).
21. V. Babrauskas, R. D. Peacock, Heat release rate: the single most important variable in fire hazard, *Fire Saf.*, **18**, 255-272 (1992).
22. M. M. Hirschler, Use of heat release rate to predict whether individual furnishings would cause self propagating fires, *Fire Saf.*, **32**, 273-296 (1999).
23. M. M. Hirschler, Heat release testing of consumer products, *J. ASTM Int.*, **6**, 1-25 (2009).
24. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability. In: E. A. Turi (ed.). *Thermal characterization of polymeric materials*, 793-843, Academic Press, New York, USA (1981).
25. V. Babrauskas, Development of the cone calorimeter - A bench-scale, heat release rate apparatus based on oxygen consumption, *Fire Mater.*, **8**, 81-95 (1984).
26. 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).
27. B. Schartel and T. R. Hull, Development of fire-retarded materials －Interpretation of cone calorimeter data, *Fire Mater.*, **31**, 327-354 (2007).

Authors

Yeong-Jin Chung; Ph.D., Chairman, The National Safety Environment Institute, Seoul 05836, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr
Eui Jin; Ph.D., Senior Researcher, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok-city 25913, Korea; jin_eui@hanmail.net