

Chung's Equation-IX과 Chung's Equation-XII의 비교에 의한 목재 4종의 화재위험성 예측 및 화재위험성 등급 평가

유지선* · 정영진**,***,†

*한국건설기술연구원 화재안전연구소, **국가안전환경원, ***강원대학교 소방방재학부
(2024년 4월 2일 접수, 2024년 4월 15일 수정, 2024년 4월 23일 채택)

Fire Risk Prediction and Fire Risk Rating Evaluation of Four Wood Types by Comparing Chung's Equation-IX and Chung's Equation-XII

JiSun You* and Yeong-Jin Chung**,***,†

*Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseong 18544, Korea

**The National Safety Environment Institute (NSEI), Seoul 05836, Korea

***School of Fire and Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheok-city 25949, Korea

(Received April 2, 2024; Revised April 15, 2024; Accepted April 23, 2024)

초 록

4종의 목재에 대한 화재위험성의 예측 및 화재위험성 등급을 평가하기 위해 Chung's equations-IX과 Chung's equation-XII를 이용하였다. 시험편은 녹나무, 산벚나무, 고무나무, 느릅나무를 선정하였다. 연소시험은 ISO 5660-1의 콘칼로리미터 시험법을 이용하였으며, 화재위험성지수-IX (FRI-IX)과 화재위험성지수-XII (FRI-XII)에 대한 화재위험성과 화재위험성등급(FRR)을 비교하였다. 그 결과 화재성능지수-XI (FPI-XI)와 화재성장지수-XI (FGI-XI)은 0.08~11.48와 0.67~111.89로 얻어졌다. 그리고 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 산벚나무(0.45): 등급 A (순위 5) < PMMA(1): 등급 A (순위 4) < 고무나무(1.23): 등급 A (순위 3) < 고무나무(1.56): 등급 A (순위 2) << 녹나무(148.23): 등급 G (순위 1)의 순으로 증가하였다. 또한 화재위험성지수-IX (FRI-IX)는 산벚나무(0): 등급 A (순위 3) ≈ 고무나무(0): 등급 A (순위 3) ≈ 느릅나무(0): 등급 A (순위 3) ≈ PMMA(1): 등급 A (순위 2) << 녹나무(66.67): 등급 G (순위1)의 순이었다. 공통적으로 화재위험성은 녹나무가 가장 높은 것으로 제시되었다. 결론적으로 FRI-IX와 FRI-XII의 기준을 바탕으로 보여준 바와 같이 지수의 표현은 다르나, 가연성 재료의 화재위험성평가에 의한 예측은 유사한 경향성을 제시하였다.

Abstract

Chung's equations-IX and Chung's equation-XII were utilized to predict the fire risk and evaluate fire risk ratings for four types of wood: camphor, cherry, rubber, and elm trees. The combustion tests were conducted using a cone calorimeter test method by ISO 5660-1 standards. The fire risk and fire risk rating (FRR) were compared for Fire Risk Index-IX (FRI-IX) and Fire Risk Index-XII (FRI-XII). The results yielded Fire Performance Index-XI (FPI-XI) ranging from 0.08 to 11.48 and Fire Growth Index-XI (FGI-XI) ranging from 0.67 to 111.89. The Fire Risk Index-XII (FRI-XII), indicating fire risk rating, exhibited an increasing order of cherry (0.45): Grade A (Ranking 5) < PMMA (1): Grade A (Ranking 4) < elm (1.23): Grade A (Ranking 3) < rubber (1.56): Grade A (Ranking 2) << camphor (148.23): Grade G (Ranking 1). Additionally, the fire risk index-IX (FRI-IX) was cherry (0): Grade A (Ranking 3) ≈ rubber (0): Grade A (Ranking 3) ≈ elm tree (0): Grade A (Ranking 3) < PMMA (1): Grade A (Ranking 2) << camphor tree (66.67): Grade G (Ranking 1). In general, camphor was found to have the highest fire risk. In conclusion, although the expression of the index is different as shown based on the standards of FRI-IX and FRI-XII, predictions based on fire risk assessment of combustible materials showed similar trends.

Keywords: Fire risk prediction, Chung's equation-IX, Chung's equation-XII, Fire risk rating (FRR)

† Corresponding Author: The National Safety Environment Institute (NSEI), Seoul 05836, Korea;
Kangwon National University, School of Fire and Disaster Prevention, Samcheok-city 25949, Korea
Tel: +82-33-655-9394 e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

1. 서 론

화재는 인명과 재산의 막대한 피해를 준다[1]. 화재 위험성은 화재 시 발생하는 열과 연기 및 연기독성을 포함한다[2-5]. 이에 대한 대비책을 강구하기 위한 방안으로 연소 대상물의 연소 시험을 통한 연소 특성 자료를 얻어 이를 활용하여 왔다. 연소 특성 시험은 시험법 중의 하나인 콘칼로리미터 시험법을 기준으로 사용한다[6]. 이 시험의 바탕은 유기성 고분자 재료가 연소되어질 때 산소 1 kg의 소모로 인하여 약 13.1×10^3 kJ의 에너지가 발생하는 것을 기준으로 하고 있다[7].

또한 연기측정 시험은 빛이 일정한 공간을 투과하는 데 대한 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소하는 것에 바탕을 둔 Beer-Bouguer-Lambert의 실험을 근거로 하고 있다[8]. 연소 대상물은 연소될 때 연소성 기체를 발생하며, 일부 그을음은 불완전 연소 과정을 통하여 광염 연소영역에서 연기로 탈리된다[8]. 또한 모든 가연성 물질은 자체의 화학적 조성에 의해 열방출률이 달라진다[9,10].

연소특성은 착화시간, 연기발생량, 연기발생률, 연소가스, 비감광면적, 열방출률 등이 포함된다[11-13]. 그러나 이와 같은 특성 값들은 순간적 시간의 변화에 대한 하나의 값에 제한된 것으로서, 열 및 연기발생에 대한 정밀성과 정량적인 평가에 의한 대상물의 화재위험성 및 예측을 설명하기에는 부족한 점이 있다.

선행 연구에서는 연기위험성의 예측 및 평가를 하기 위한 모델로서 Chung's equations 1, 2, 3[14] 및 Chung's equations-V, Chung's equation-VI를 보고하였다[15]. 또한 열과 연기를 함께 고려한 화재위험성 평가의 확장성을 위하여 Chung's equations-II, Chung's equations-III, 그리고 Chung's equation-IV를 정립하여 발표하였다[16].

최종적으로 Chung's equation-IV인 화재위험성지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)의 값이 높아질수록 화재위험성이 높았다[16]. 이는 화재위험성 및 화재 안전성을 예측·평가하기 위한 것이다.

또한 화재 시에 발생하는 일산화탄소와 이산화탄소는 매우 치명적이기 때문에 이를 포함하여 평가해야 할 필요성이 매우 크다. 이를 위해 선행 연구에서는 Chung's equations-VII, Chung's equations-VIII, 그리고 Chung's equation-IX에 따라 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)를 보고하였다. 그리고 계산된 화재위험성지수-IX (FRI-IX)에 의해 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 부여하였다[17]. 이 방법들은 화재의 초기 단계를 고려한 화재위험성 평가법이였다. 그러나 연소 대상물의 연소 진행에 따라 확장된 화재진행 단계 또한 중요하므로 이를 고려하여 또 다른 방법을 제시한 바 있다.

즉, 연소의 중요 요소 중의 하나인 착화시간(time to ignition, TTI)을 대신하여 연소저항시간(combustion resistance time, CRT)으로 대체하였고, 또 연기발생 관련 제1차 최대연기발생률에 도달되는 시간(time to 1st peak smoke production rate, TSPR_{1st_peak})을 대신하여 누적 연기발생시간(accumulated smoke generation time, ASGT)으로 대체하

였다. 이를 위하여 Chung's equations-X에 따라 화재성능지수-X (fire performance index-X, FPI-X)과 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X), 그리고 Chung's equations-XI인 화재성능지수-XI (fire performance index-XI, FPI-XI)와 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI)을 정립하였다. 이를 바탕으로 Chung's equation-XII에 따라 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)를 최종적으로 보고 하였다[18].

따라서 본 연구에서는 종합적으로 화재위험성지수-XII (FRI-XII)를 예측 및 평가하기 위해 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 부여 하였다. 그리고 선행연구에서 기 보고된 화재위험성지수-IX (FRI-IX)에 따른 화재위험성등급(FRR)[19]과 비교하였다.

2. 실험 및 실험 방법

2.1. 시험재료 준비

시험편은 일반적으로 건자재 및 실내 내장재로 사용되며, 사용빈도가 높은 4종의 녹나무(Camphor), 산벚나무(cherry), 고무나무(rubber), 느릅나무(elm)를 엠에이치테크놀로지스사 및 농가에서 구입하여 특별한 가공처리 없이 시험에 사용하였다. 목재 시험편은 수중에 따라 차이는 있지만 기타 다른 재료보다 탄화도가 높기 때문이다. 이는 높을수록 화재안전성을 담보하기 때문이며, 일반적으로 화재하중을 계산하기 위한 기준으로 삼기 때문이다. 시험편의 두께는 10 mm로 준비하였고, PMMA는 Fire Testing Technology Ltd.에서 구매하여 시험하였다.

2.2. 수분 함유량 측정

목재 시험편은 일정 양을 온도 105 °C의 건조오븐에서 매 4 h 마다 시험편 무게 변화가 없을 때까지의 시간 경과된 후, 식 (1)에 의하여 수분의 함량(water content, WC)을 구했다[20].

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

W_m 은 수분의 함량을 구하려는 목재 시험편의 무게(g), W_d 는 시험편을 건조시킨 후의 절대건조 무게(g)이다.

Table 1에 목재의 수분함량과 체적밀도에 대한 데이터를 보여주었다.

2.3. 건자재의 연소특성 시험

연소시험 규격은 ISO 5660-1으로 영국 Fire Testing Technology Ltd.의 Dual cone calorimeter를 사용하였다. 외부 복사열유량(external radiant heat flux)은 실화제 조건인 50 kW/m²에서 연소시험을 실시하였다[7]. 시험편은 두께 10 mm (H)의 재료를 100 mm (W) × 100 mm (± 0.2) (L)의 규격으로 준비하였다.

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

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

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

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

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

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

2.4. Chung’s equation-IX과 Cgung’s equation-XII에 의한 화재위험성 지수 예측 및 화재위험성 등급 평가 방법

연소성 물질들의 화재위험성의 예측 및 평가를 하기 위하여 적용된 Chung’s equations-IX[17]과 Chung’s equation-XII[18]의 방정식을 다음과 같이 제시하였다.

2.4.1. 화재성능지수-VII (fire performance index-VII, FPI-VII)과

화재성능지수-VIII (fire performance index-VIII)의 정의[17]

FPI-VII은 식 (2)와 같다. FPI-VII은 TTI (s)를 분자로 하고, 3종의 중요 요소인 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), COP_{mean} (g/s)/CO₂P_{mean} (g/s)의 비를 곱하여 나눈 것으로 나타내었다.

또한 모든 재료에 대한 화재위험성 평가 및 선택된 기준 물질 (PMMA)을 참고하여 FPI-VIII을 적용하였다. 식 FPI-VIII은 FPI-VII에 대해 FPI-VII_[PMMA]으로 나눈 것으로 정의된다. FPI-VIII을 구하는 무차원 지수의 식은 식 (3)과 같다.

2.4.2. 화재성장지수-VII (fire growth index-VII, FGI-VII)과 화재성장

지수-VIII (fire growth index-VIII, FGI-VIII)의 정의[17]

FGI-VII은 식 (4)에 나타내었다. FGI-VII은 3종의 중요 요소인 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), COP_{mean} (g/s)/CO₂P_{mean} (g/s)의 비를 곱한 값을 Time to SPR_{peak}로 나눈 값이다.

또한 선택된 기준 물질(PMMA)을 참고하여 방정식 FGI-VIII을 정의하였다. FGI-VIII은 FGI-VII을 분자로 하여 FGI-VII_[PMMA]로 나눈 것으로 표현하였다. 따라서 FGI-VIII 값이 클수록 화재위험성이 커진다. FGI-VIII을 계산하는 무차원 지수의 표현인 식 (5)와 같다.

이 방정식의 값은 무차원 지수로서 화재의 초기의 중요성으로 인하여 제1차 최대연기발생률(속도)(SPR_{1st_peak})와 제1차 최대열방출률(HRR_{1st_peak})을 선택하였다. FGI-VIII이 증가할수록 화재위험성은 높아짐을 예측할 수 있다.

2.4.3. 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)와 화재위험성 등급(fire risk rating, FRR)의 정의[17]

FRI-IX는 식 (6)에 표현식을 제시하였다. 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)는 FGI-VIII을 분자로 하여 FPI-VIII으로 나눈 것으로 표현되며, FRI-IX 값이 클수록 화재위험성이 높아지고 반대로 FRI-IX 값이 감소할수록 화재위험성이 낮아지는 것을 의미한다. 이

식은 화재위험성 지수를 계산하여 그 위험성을 예측하고, 화재위험성 등급을 부여하여 종합적으로 판단할 수 있었다. FRI-IX은 식 (6)에 제시하였다.

$$FRI-IX = \frac{FGI-VIII}{FPI-VIII} \tag{6}$$

또한 화재위험성을 예측 및 판단하기 위하여 화재위험성지수-IX (FRI-IX)에 의해 화재위험성등급 기준을 Table 2에 제시하였다. 즉, 계산된 화재위험성지수-IX (FRI-IX)의 0~30 초과된 값에 대해 5단위 간격으로 가연성 재료들의 연소특성을 7등급으로 분류하였다.

Table 2. Criteria for Fire Risk Rating of Calculated Fire Risk Index-IX[17]

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

2.4.4. 화재성능지수-X (fire performance index-X, FPI-X)과 화재성능 지수-XI (fire performance index-XI, FPI-XI)의 정의[18]

FPI-X은 식 (7)과 같다. FPI-X은 FPI-VII의 TTI (s)을 대신하여 대체된 CRT (s)를 3종의 중요 요소인 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), COP_{mean} (g/s)/CO₂P_{mean} (g/s)의 비를 곱하여 나눈 것으로 표현된다. CRT는 연소 대상물의 연소 시 제1차 최대열방출속도(률)(HRR_{1st_peak})의 지점과 제2차 최대열방출률(HRR_{2nd_peak})의 지점 사이의 누적된 연소시간을 의미한다. 열가소성(액체성) 물질은 탄화물질 또는 고체성 물질과 연소 과정 및 연소 후 형태가 다르며, 연소 시에 제1차 최대열방출률(속도)(HRR_{1st_peak})만 얻어진다. 그러므로 이들의 차이를 최소화 하기 위해 가장 근접한 요소로서 HRR_{1st_peak}와 TTI 사이의 연소시간을

$$FPI-X = \frac{CRT(s)}{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2) \cdot COP_{mean}(g/s) / CO_2P_{mean}(g/s)} \quad (7)$$

$$FPI-XI = \frac{CRT(s)}{\left[\frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2) \cdot COP_{mean}(g/s) / CO_2P_{mean}(g/s)}{CRT(s)} \right]^{PMMA}} \quad (8)$$

$$FGI-X = \frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2) \cdot COP_{mean}(g/s) / CO_2P_{mean}(g/s)}{ASGT(s)} \quad (9)$$

$$FGI-XI = \frac{\frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2) \cdot COP_{mean}(g/s) / CO_2P_{mean}(g/s)}{ASGT(s)}}{\left[\frac{SPR_{peak}(m^2/s) \cdot PHRR(kW/m^2) \cdot COP_{mean}(g/s) / CO_2P_{mean}(g/s)}{ASGT(s)} \right]^{PMMA}} \quad (10)$$

택하여 적용하였다.

또한 기준물질 PMMA를 참고하여 방정식 FPI-XI을 이용하였다.

FPI-XI은 식 (8)에 제시하였다.

수식 FPI-XI은 FPI-VIII의 TTI (s)를 대신하여 CRT (s)로 대체한 FPI-X을 FPI-X_[PMMA]을 분모로 하여 나눈 것으로 정의하였다. FPI-XI은 커질수록 화재안전성이 높아짐을 의미한다.

2.4.5. 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X)과 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI)의 정의[18]

FGI-X는 식 (9)와 같다. 수식 FGI-X은 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), COP_{mean} (g/s)/CO₂P_{mean} (g/s)의 중요한 3종의 요소를 곱하여 얻은 값에 대하여, ASGT (s)로 나눈 값으로 표현된다. ASGT (s)는 FGI-VII의 Time to SPR_{peak} (s)을 대신하여 대체된 누적연기발생시간 (accumulated smoke generation time, ASGT)을 지칭한다. ASGT (s)는 연소 대상물이 TSRR_{1st_peak}의 위치와 TSRR_{2nd_peak} 위치에 대한 시간 간격을 의미한다. 특히 비탄화성 물질은 고체성 또는 탄화성 물질과 연소패턴이 다르기 때문에 이에 가장 가까운 연소 특성인 TTI와 TSPR_{1st_peak} 위치 사이의 간격을 ASGT로 적용하였다.

또한 PMMA를 기준으로 하여 방정식 FGI-XI을 정의하였다. FGI-XI은 식 (10)과 같다.

FGI-XI은 FGI-VIII의 Time to SPR_{peak} (s)을 대신하여 ASGT (s)로 대체된 FGI-X을 분자로 하여 FGI-X_[PMMA]로 나눈 것으로 표현된다. 따라서 FGI-XI의 무차원 지수가 커질수록 화재위험성이 높아지며, 반대로 화재안전성이 낮아지는 것으로 설명된다.

2.4.6. 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)와 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)의 정의[18]

앞선 연구에 의해 정립된 수식 FRI-IX[17]에 대응되는 또 다른 방법으로 FRI-XII를 정립하였다. FRI-XII는 식 (11)에 제시하였다.

$$FRI-XII = \frac{FGI-XI}{FPI-XI} \quad (11)$$

식 FRI-XII는 FGI-XI을 분자로 하여 FPI-XI으로 나눈 값으로 정의하였다. FRI-XII의 값이 높아질수록 화재위험성이 증가하고 이와 반대로 낮아질수록 화재위험성이 감소되는 것을 판단할 수 있다. 이에

Table 3. Criteria for Fire Risk Rating of Calculated Fire Risk Index-XII[21]

FRI-XII	Fire Risk Rating	Fire Safety
less than 2	A	Very high
2 to less than 4	B	High
4 to less than 6	C	Medium 1
6 to less than 8	D	Medium 2
8 to less than 10	E	Low 1
10 to less than 12	F	Low 2
12 or more	G	Very low

따라 화재위험성과 화재위험성을 종합적으로 예측 및 평가하고, 화재위험성등급을 부여하였다.

또한 최종적으로 화재위험성을 예측 및 평가하기 위하여 FRI-XII의 값을 바탕으로 Table 3의 기준에 의하여 FRR을 부여할 수 있었다. 이것은 식 FRI-XII가 0~12 또는 그 이상의 값을 2단위의 간격으로 하여 연소 대상물의 화재안전성을 7등급으로 분류하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 연소 대상물에 대한 화재위험성의 예측 및 평가와 화재위험성 등급을 부여하였다. PMMA는 기준물질로서 선행연구의 데이터를 참고하였으며[22], Table 2에 연소 성질과 관련된 중요 요소 등을 제시하였다. 이들 결과를 사용하여 화재성장지수-X (FPI-X) 및 화재성장지수-X (FGI-X)을 구하였고, 이것을 다시 화재성장지수-XI (FPI-XI)과 화재성장지수-XI (FGI-XI)을 근거로 하여 종합적인 화재위험성지수-XII (FRI-XII)에 대한 화재위험성등급(FRR)을 부여하였다.

FRI-XII는 무차원 지수로서 종합적인 화재위험성을 예측하였다. Table 4의 각 시험편에 대한 착화시간(time to ignition, TTI), 열방출률 (heat release rate, HRR), 연기발생률(smoke production rate, SPR), 그리고 CO/CO₂ 평균발생속도비는 기 보고된 자료[19]를 활용하였다.

3.1. 열 및 연기발생의 특성 평가

연소성 재료의 착화시간(TTI)은 연소성 물질의 매우 중요한 특성이

Table 4. Combustion Characteristics of Test Specimens at an External Radiant Heat Flux of 50 kW/m²[18]

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 (CT)	13	235	258.98 / 30	372.22 / 265	0.0304
Cherry (CR)	13	235	209.82 / 30	271.12 / 255	0.0165
Rubber (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 ₂ P _{mean} (g/s)	^k COP _{mean} / CO ₂ P _{mean}
Camphor (CT)	45	245	0.0775 / 290	0.0015	0.0449	0.3341
Cherry (CR)	30	250	0.0490 / 280	0.0016	0.0400	0.0400
Rubber (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

^aTime to ignition; ^bcombustion resistance time; ^c1st_peak heat release rate; ^d2nd_peak heat release rate; ^e1st_peak smoke production rate; ^fTime to 1st_peak smoke production rate; ^gaccumulated smoke generation time; ^h2nd_peak smoke production rate; ⁱmean carbon monoxide production rate; ^jmean carbon dioxide production rate; ^kratio of average carbon monoxide production rate to average carbon dioxide production rate

다. 착화시간은 재료의 종류, 수분 함유량 및 밀도, 열적 특성 등에 영향을 받으며, 또한 열침투성 등은 가스독성, 에너지 방출속도, 연기발생 등에 영향을 미친다.

Table 3의 시험편에 대한 착화시간(time to ignition, TTI)은 PMMA (17 s)를 별개로 하고 12~14 s로 대동소이 하였다. 그러나 기준물질인 PMMA는 시험편의 높은 밀도 차이로 설명 되어질 수 있다. 녹나무 경우에는 그 자체에 연소에 용이한 휘발성 유기물질이 일부기여 하여 수분함량이나 체적밀도의 영향이 미미하다는 것으로 이해된다[18]. TTI는 녹나무가 가장 빠르게(12 s) 측정되었다. 이것은 자체의 가장 낮은 체적밀도(445 kg/m³) 때문인 것으로 이해된다.

일반적으로 목재의 착화시간은 목재의 표면의 열손실의 유무, 열전도도, 체적밀도, 연료의 비열 및 착화온도의 제곱에 비례하고, 시험편에 가해지는 열유량(heat flux)의 제곱에 반비례하는 것으로 알려졌다[23]. 그러므로 체적밀도는 착화시간에 영향을 크게 미치는 것으로 이해된다.

최대열방출률은 가장 중요한 화재특성으로서 화재강도를 나타낸다[3,24,25]. 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 시험편의 표면적당 순간 최고로 방출되는 열량의 크기로 표현되며[26,27], 열방출율이 높은 화염연소는 화재 범위 경계를 크게 확대시킨다.

Figure 1은 시험에 대한 열방출률을 나타내었다. 탄화물질을 생성하는 시험편은 2개의 최대열방출률 값을 나타낸다. HRR_{1st_peak}는 휘발성 열분해 가스가 외부 착화기에 의해 가열 기간 후에 발생하였다. 시험편은 발생된 열에 의해 지속적인 열분해로 더 많은 휘발성 물질을 방출한다. 그리고 HRR_{1st_peak}의 감소는 절연 층이 형성되어 지면서 열 전달을 억제하여 열분해 과정이 지연되기 때문이다. 또한 제2차 HRR_{2nd_peak}는 시험편의 연소와 탄화 균열로 인하여 더 많은 휘발성 물질이 시험편으로부터 쉽게 방출될 수 있기 때문으로 알려졌다[28]. 이는 시험편 뒷면 절연층의 후면효과(back effect)로 인하여 열이 쌓여짐으로써 많은 열이 동시에 방출되기 때문으로 알려졌다[10]. 이후 휘발성 물질이 고갈되어짐에 의해 화염 연소가 종료된다. HRR_{2nd_peak}는 화재 성장을 위한 척도로서 인식된다.

Table 3와 Figure 1에 시험편의 연소 특성과 목재의 열방출을 나타

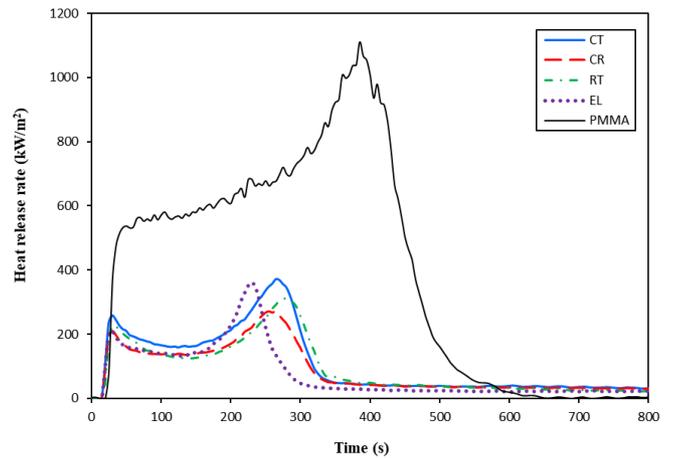


Figure 1. Heat release rate of the test specimen under an external radiant heat flux of 50 kW/m²[18].

내었다. 목재의 HRR_{1st_peak} 특성은 209.82~1110.56 kW/m²로 측정되었다. 이들 중 PMMA를 제외하고 녹나무가 가장 높게 측정 되었으며 빛나무에 비해 1.2배 높았다. HRR_{2nd_peak}의 경우, 271.12~372.22 kW/m²로 측정되었다. 특별히 녹나무가 빛나무와 비교하여 1.4배 높았으며, 화재 초기의 열위험성이 가장 클 것으로 예측된다. 이는 녹나무의 체적밀도의 역할과 비록 활엽수이지만 비교적 낮은 정도의 휘발성 유기물 및 기타 배출이 일부 기여하기 때문으로 이해된다[29]. 열방출률의 감소는 연소 물질의 질량의 감소로 인한 가연성 기체의 발생량이 감소로 설명된다.

3.1. 열적 특성 평가

화재 시에 연기로 인한 피해는 공간 거주자의 탈출 및 피난을 방해하고, 질식 및 사람의 시야 확보에 어려워진다. 연기의 발생은 연소대상 물질과 주변 환경 및 공간 구조에 의하여 영향을 많이 받는다.

Table 3과 Figure 2에 보여준 바와 같이 SPR_{1st_peak}는 빠른 속도로

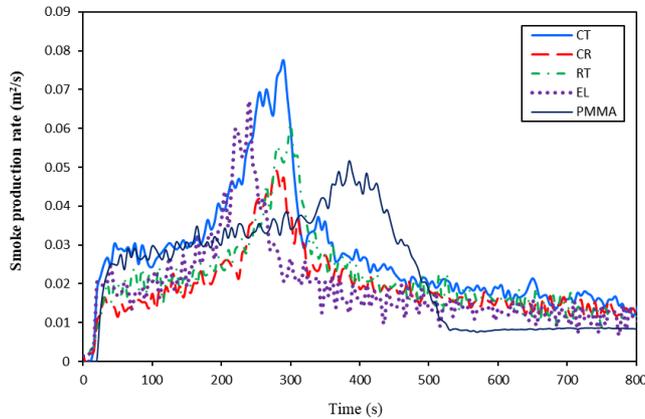


Figure 2. Smoke production rate of the specimen at an external heat flux of 50 kW/m^2 [18].

급격히 최대값에 도달되는 것으로 측정되었다. 가연물의 연소에 의한 연기는 가스 및 분해된 헤미셀룰로오스에서 발생한 휘발성 목재 추출물, 에어로졸, 수증기로 구성되는 것으로 알려졌다.

$\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$ 는 $0.0165\sim 0.0516 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 나타났다. PMMA를 제외하고 녹나무는 벗나무에 비해 1.8배 높은 것으로 측정되었다. 녹나무는 앞서 설명한 바와 같이 체적밀도 및 휘발성 유기물의 일부 기여에 의해[19, 29] $\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$ 가 높은 것으로 이해된다. 또한 $\text{SPR}_{2\text{nd_peak}}$ 는 $\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$ 와 유사한 패턴을 보였다.

Figure 2의 에 최대연기발생속도에 도달되는 시간은 탄화성 또는 고체성 시험편에 대하여 두 단계로 관찰된다. 제1차 최대연기발생률(the first peak smoke release rate, $\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$)은 30~385 s에서 측정되었으며, 제2차 최대연기발생률(the second peak smoke release rate, $\text{SPR}_{2\text{nd_peak}}$)은 240~300 s에서 측정되었다. 이것은 시험편의 열분해 과정에서 시험편의 표면이 더 많이 열에 노출됨으로써 목재 또는 시험편의 균열이 증가하고 갑자기 가스가 방출되는 결과를 나타낸다. PMMA를 제외한 초기 최대연기발생률은 녹나무가 가장 높으므로 노출될 경우 유해성이 인간에게 가장 높게 미칠 것으로 예측되었다.

3.2. 연소 가스 특성 평가

연소 중에 발생하는 일산화탄소(carbon monoxide, CO)는 목재와 불꽃 사이에서 발생하는 가장 중요한 휘발성물질의 불완전연소 생성물로 인간생명에 매우 치명적인 것은 잘 알려져 있다.

Table 3 및 Figure 3의 시험편 4종에 대한 COP_{mean} 은 $0.0014\sim 0.0020 \text{ g/s}$ 로 측정되었다. 이것은 PMMA (0.0007 g/s)에 비해 2.0~2.9배로 목재가 PMMA보다 불완전연소 물질로 예측된다. 이것은 다른 시험편에 비해 불이 꺼진 후 생성된 숯의 열산화(백열상태)로 인하여 CO 발생량이 증가하는 것으로 이해된다.

Table 3 및 Figure 4에 보여준 바와 같이 $\text{CO}_2\text{P}_{\text{mean}}$ 은 측정된 시험편에 대해 $0.0375\sim 0.0449 \text{ g/s}$ 로 측정되었다. 이것은 PMMA의 $\text{CO}_2\text{P}_{\text{mean}}$ (0.1243 g/s)에 비해 2.6~4.6배 감소되었다. 시험편은 연소 후보다 연소 중에 열방 열방출률 영역에서 CO_2 가 발생되었으며, 이것은 불꽃 연소 영역에서 완전연소가 이루어진 것으로 이해된다.

Table 3의 목재 시험편의 $\text{COP}_{\text{mean}}/\text{CO}_2\text{P}_{\text{mean}}$ 비는 $0.0390\sim 0.3341$ 로서 PMMA에 비해 7.0~59.7배 높았다. 이것은 목재 즉 탄화성 물질이 비탄화성인 PMMA보다 불완전 연소하여 비교적 CO의 평균발생속도가 높은 것으로 이해된다.

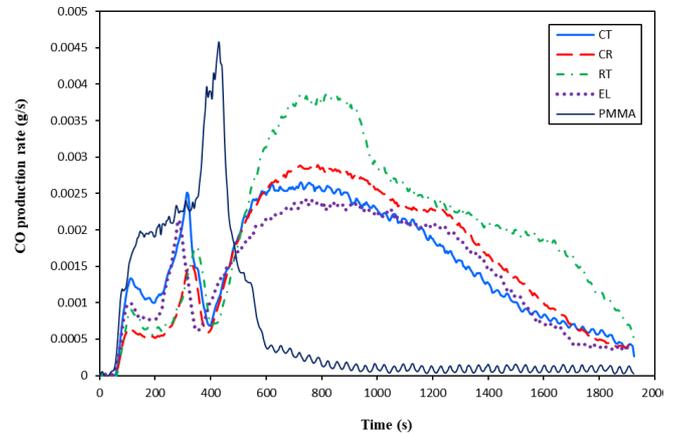


Figure 3. CO production rate (g/s) of the specimen under an external radiant heat flux of 50 kW/m^2 [18].

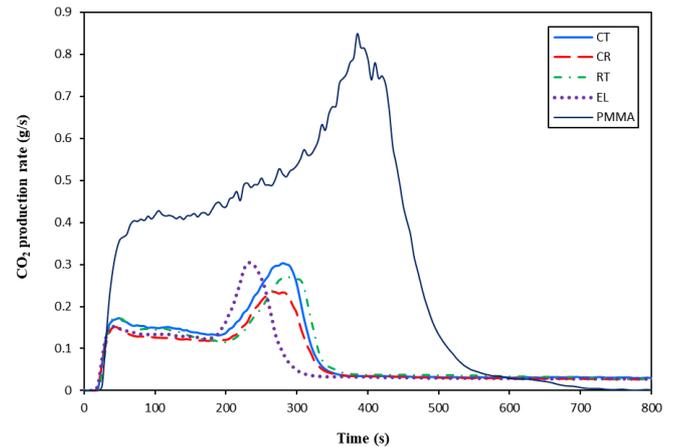


Figure 4. CO_2 production rate (g/s) of the specimen under an external radiant heat flux of 50 kW/m^2 [18].

3.3. 화재위험성 지수 및 화재위험성 등급 평가

열방출률(열방출속도)의 초기 피크값 및 착화시간은 연소 물질의 화재위험성 특성을 나타내며[16], 연기위험성도 같은 맥락으로 설명되어진다[15]. 따라서 앞선 연구에서는 연소의 중요 3요소인 착화시간, 최대연기발생속도, 그리고 최대열방출의 조합에 의해 화재성능지수-II (FPI-II)를 정립하고, 연소성 물질의 화재위험성에 대한 예측하였다[16]. 그러나 화재 발생 시에 발생하는 치명적인 CO와 CO_2 가스의 발생을 개발된 모델 수식에 포함시켜 평가할 당위성이 매우 크므로 CO와 CO_2 의 평균발생속도비를 고려한 4종의 중요 요소를 서로 연관지어 FPI-VII를 정립하여 적용하였다[17].

선행 연구에서 연소특성으로 사용된 TTI는 또 다른 방법으로 TTI를 대신하여 대체된 CRT를 사용하여 식 (2)와 같이 방정식 FPI-X을 정립하여 보고하였다[18]. CRT는 연소 대상물의 연소 시 제1차 열방출률 $\text{HRR}_{1\text{st_peak}}$ 와 제2차 열방출률 $\text{HRR}_{2\text{nd_peak}}$ 위치와의 시간 간격을 연소저항시간으로 정의한 바 있다. 일반적으로 가연성 물질은 자체의 구성성분 및 연소 조건에 의해 연소속도의 차이가 다르게 나타난다. 또한 비탄화성(액체성) 물질은 탄화성 또는 열경화성 물질에 비해 다른 연소형태로 되며, 연소할 때 $\text{HRR}_{1\text{st_peak}}$ 만 얻어진다. 그러므로 비탄화성 물질에 대하여서는 선행 연구에서 정의한 가장 근접한 요소로서 TTI와 $\text{HRR}_{1\text{st_peak}}$ 위치 사이의 간격을 CRT로 활용 하였다[17,18].

Table 5. Results of Fire Performance Index-XI (FPI-XI) and Fire growth Index-XI (FGI-XI) of Selected Wood and Plastic Specimens

Materials	FPI-X (s^2/kW)	FPI-XI	FPI-VIII	FGI-X(kW/s^2)	FGI-XI	FGI-VIII
Camphor (CT)	489.34	0.08	0.09	0.0107	11.89	6.00
Cherry (CR)	1696.98	1.48	1.77	0.0006	0.67	0
Rubber (RT)	979.18	0.85	1.06	0.0012	1.33	0
Elm (EL)	1034.68	0.90	0.98	0.0010	1.11	0
PMMA	1146.75	1	1	0.0009	1	1

Table 5에 시험편의 화재성능지수-X (FPI-X)을 제시 하였다. FPI-X은 연소저항시간, 열, 연기 및 일산화탄소와 이산화탄소의 평균발생속도비 조합으로 이루어졌다. FPI-X에 의한 화재안전성은 녹나무($89.34 s^2/kW$) < 고무나무($979.22 s^2/kW$) < 느릅나무($1034.66 s^2/kW$) < PMMA($1146.78 s^2/kW$) < 산벚나무($1696.75 s^2/kW$)의 순으로 증가하였다. 따라서 녹나무는 화재위험성이 가장 높은 것으로 이해된다.

또한 모든 연소성 대상물의 화재위험성을 무차원지수로 하기 위하여 수식 FPI-XI을 정립하여 보고된 바 있다[18]. FPI-XI은 FPI-X을 분자로 하여 FPI-X_[PMMA]으로 나눈 것으로 표현된다. 이 식은 화재 초기의 중요한 요소이므로 제1차 연기발생을 SPR_{1st_peak} 와 제1차 열방출을 HRR_{1st_peak} 값을 선택하였다. 여기에서 실제 화재를 상정한 안전치의 최대를 고려하였다. 화재 확산이 증대될수록 화재위험성이 커지고, 화재안전성이 감소되는 것과 같이 연기안전성도 낮아지는 것으로 이해된다. 이는 FPI-XI 값이 낮아질수록 화재안전성이 낮아지는 것을 의미한다.

Table 5에 선행연구의 방정식 FPI-VIII과 비교하기 위하여 연소 물질의 FPI-X 및 FPI-VII에 대하여 FPI-XI 및 FPI-VIII을 보여주었다. 즉, FPI-XI의 값은 녹나무(0.08) < 고무나무(0.85) < 느릅나무(0.90) < PMMA(1) < 벚나무(1.48)의 순으로 증가하였다. 따라서 FPI-XI는 FPI-VIII과 FGI-XI은 FGI-VIII과 그 께를 같이 하였다.

또한 앞선 연구에서는 연소물의 화재위험성을 예측 및 평가하기 위하여 3종의 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), 최대연기발생속도에 도달되는 시간[Time to SPR_{peak} , $TSPR_{1st_peak}$ (s)]와 연관지어 화재성장지수-II (FGI-II)가 보고된 바 있다[16]. 그러나 치명적인 CO와 CO₂의 발생을 평가할 당위성이 매우 크므로 CO와 CO₂의 평균발생속도비를 고려한 4종의 중요 요소와 연관지어 방정식 FGI-VII가 보고된 바 있다 [17]. 이 식은 앞선 연구와 구별하여 더욱 정량성과 정밀도를 높이기 위하여 4종의 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), $TSPR_{peak}$ (s), COP_{mean}/CO_2P_{mean} 를 선정하여 화재위험성을 예측 하였다.

그러나 앞선 연구에서는 또 다른 방법으로 연소물의 제1차 총연기 발생속도 $TSPR_{1st_peak}$ 에 대신하여 앞에서 대체된 누적연기발생시간 (ASGT)은 식 (4)와 같이 FGI-X의 수식을 새로 정립하였다[18]. ASGT는 연소 대상물이 연소될 때 제1차 총연기발생율 $TSPR_{1st_peak}$ 에 다다른 위치와 제2차 총연기발생율 $TSPR_{2nd_peak}$ 에 다다른 위치 사이의 시간 간격을 ASGT로 정의한 바 있다. 특히 비탄화 물질은 탄화성 또는 고체성(열경화성) 물질과 연소형태가 다르므로 이에 가장 가까운 요소로서 TTI와 $TSPR_{1st_peak}$ 위치 사이의 간격을 ASGT로 명명하고 적용하였다.

Table 5의 FGI-X 값에 의한 화재위험성은 벚나무($0.0006 kW/s^2$) < PMMA ($0.0009 kW/s^2$) < 느릅나무($0.0010 kW/s^2$) < 고무나무($0.0012 kW/s^2$) < 녹나무($0.0107 kW/s^2$)의 순서로 증가하였다. 이들 중 녹나무가 가장 높은 값으로 제시되었다. 보여준 자료에 따라 PMMA를 제외한 시험편 중 SPR_{1st_peak} , PHRR가 가장 높고, COP_{mean}/CO_2P_{mean} 이 높

Table 6. Calculated Fire Risk Index-XII (FRI-XII) and Fire Risk Rating (FRR) Results for Wood and Plastic Specimens

Materials	FPI-XI	FGI-XI	FRI-XII	FRR
Camphor (CT)	0.08	11.89	148.63	G
Cherry (CR)	1.48	0.67	0.45	A
Rubber (RT)	0.85	1.33	1.56	A
Elm (EL)	0.90	1.11	1.23	A
PMMA	1	1	1	A

기 때문으로 이해된다. 그러므로 화재위험성이 가장 높은 물질은 녹나무로서 앞서 언급했던 휘발성 유기물의 함량과 관련이 높은 것으로 설명된다.

Table 5, 6에 나타난 FGI-XI은 벚나무(0.67) < PMMA(1) < 느릅나무(1.11) < 고무나무(1.33) < 녹나무(11.89)의 순으로 증가하였다. 이것은 FGI-X과 FGI-XI이 그 께를 같이하는 것으로 관찰되었다.

결과적으로 연소성 물질들은 FGI-XI의 값이 클수록 화재위험성이 높아지고 화재안전성이 낮아짐을 나타내었다. FGI-XI은 연소 시험에 의해 얻은 자료를 가지고 계산한 값으로, 무차원 지수로서 연소재료의 화재안전성을 종합적으로 평가하였다.

식 (11)에 의해 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 FGI-XI을 분자로 하여 FPI-XI으로 나눈 것으로 나타내었으며, 이것은 화재가 확산하면 할수록 화재안전성이 감소하는 것을 나타낸다. 즉, FRI-XII의 값이 커질수록 화재위험성이 높아지고 이와 반대로 작아질수록 화재위험성이 낮아지는 것을 나타내며, 화재위험성의 예측과 평가에 의해 화재위험성 등급을 부여하고, 종합적으로 판단할 수 있었다.

또한 화재위험성의 예측 및 평가를 하기 위해 활용될 수 있는 최종적인 평가지수로서 FRI-XII에 의해 Table 6과 같이 FRR을 구하였다.

Table 6, 7에서 나타난 바와 같이 Table 3의 기준에 의한 FRI-XII는 녹나무(0.45): 등급 A (Ranking 5) < PMMA(1): 등급 A (Ranking 4) < 느릅나무(1.23): 등급 A (Ranking 3) < 고무나무(1.56): 등급 A (Ranking 2) < 녹나무(148.23): 등급 G (Ranking 1)의 순으로 증가하였다.

또한 Table 2의 FRI-IX에 대하여 선행 연구에서 제시된 FRR의 기준을 참고하여[17], Table 7에 나타난 FRI-IX은 산벚나무(0): 등급 A (Ranking 3) \approx 고무나무(0): 등급 A (Ranking 3) \approx 느릅나무(3): 등급 A (Ranking 3) \approx PMMA(1): 등급 A (Ranking 2) < 녹나무(66.67): 등급 G (Ranking 1)의 순으로 나타났다. 즉, FRI-IX와 FRI-XII의 결과에 대한 각각의 기준을 바탕으로 보여준 바와 같이 지수의 표현은 다르나 화재위험성등급(FRR)은 유사하였다.

따라서 앞에서 살펴본 바와 같이 공통적으로 화재위험성은 녹나무가 가장 높게 제시되었다. 결론적으로 FRI-IX와 FRI-XII의 기준을 바탕으로 보여준 바와 같이 지수의 표현은 다르나, 가연성 재료의 화재위험성평가에 의한 예측은 유사한 경향성을 제시하였다.

Table 7. Comparison of Fire Risk Ratings for The Respective Results of FRI-IX and FRI-XII

Materials	FRI-IX	Ranking	FRR by FRI-IX	FRI-XII	FRR by FRI-XII	Ranking
Camphor (CT)	66.67	1	G	148.63	G	1
Cherry (CR)	0	3	A	0.45	A	5
Rubber (RT)	0	3	A	1.56	A	2
Elm (EL)	0	3	A	1.23	A	3
PMMA (reference)	1	2	A	1	A	4

4. 결 론

4종의 목재에 대한 가연성 물질의 화재위험성 예측 및 평가와 화재 위험성 등급을 부여하기 위하여 Chung's equations-IX과 Chung's equation-XII를 적용하였다. 시험편은 녹나무(camphor), 산벚나무(cherry), 고무나무(rubber), 느릅나무(elm)를 선택하였다. 연소특성 시험은 ISO 5660-1 규격인 콘칼로리미터 시험법으로 하였으며, 최종적으로 화재위험성지수-IX (FRI-IX)과 화재위험성지수-XII (FRI-XII)에 의하여 화재위험성의 예측 및 평가와 화재위험성등급(FRR)을 비교하였다.

1) 화재성능지수-XI (FPI-XI)은 녹나무(0.08) < 고무나무(0.85) < 느릅나무(0.90) < PMMA(1) < 산벚나무(1.48)의 순으로 증가하였다. 녹나무는 화재위험성이 가장 높게 나타났으며, 이는 자체의 휘발성 유기물의 함량이 일부 기여하여, 3종의 분모 요소가 목재 중 가장 높기 때문으로 이해된다.

2) 화재성장지수-XI (FGI-XI)은 산벚나무(0.67) < PMMA(1) < 느릅나무(1.11) < 고무나무(1.33) < 녹나무(11.89)의 순으로 증가하였다. 이 결과는 FGI-X과 FGI-XI의 값이 일치하는 경향성을 보였다.

3) 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 녹나무(0.45): 등급 A (Ranking 5) < PMMA(1): 등급 A (Ranking 4) < 느릅나무(1.23): 등급 A (Ranking 3) < 고무나무(1.56): 등급 A (Ranking 2) << 녹나무(148.23): 등급 G (Ranking 1)의 순으로 증가하였다.

4) 화재위험성지수-IX (FRI-IX)은 산벚나무(0): 등급 A (Ranking 3) ≈ 고무나무(0): 등급 A (Ranking 3) ≈ 느릅나무(3): 등급 A (Ranking 3) ≈ PMMA(1): 등급 A (Ranking 2) << 녹나무(66.67): 등급 G (Ranking 1)의 순으로 나타났다.

5) 공통적으로 화재위험성은 녹나무가 가장 높은 것으로 제시되었다. 결론적으로 FRI-IX와 FRI-XII의 기준을 바탕으로 보여준 바와 같이 지수의 표현은 다르나, 가연성 재료의 화재위험성평가에 의한 예측은 유사한 경향성을 제시하였다.

References

1. J. Buzek and E. Gyoóri, 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*, 210-217, Elsevier, London, UK (1992).
4. CBUF Report, *Fire Safety of Upholstered Furniture - The Final Report on the CBUF Research Programme*, B. Sundstrom, 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*, PhD Dissertation, 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*, 299-311, Elsevier Applied Science, New York, 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, Risk assessment of smoke generated during combustion for some wood, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 373-380 (2022).
16. 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).
17. Y. J. Chung and E. Jin, Rating of fire risk of combustible materi-

- als by the new Chung's Equation-IX, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 144-152 (2023).
18. Y. J. Chung and E. Jin, Fire risk index and grade evaluation of combustible materials by the new Chung's Equation-XII, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 388-396 (2023).
 19. Y. J. Chung and E. Jin, Evaluation of fire risk rating of building materials by Chung's Equation-IX, *Fire Sci. Eng.*, **37**, 1-11 (2023).
 20. W. T. Simpson, Drying and control of moisture content and dimensional changes. *Wood Handbook Wood as an Engineering Material*, 1-12, Forest products laboratory U.S.D.A, Forest Service, Madison, Wisconsin, USA (1999).
 21. Y. J. Chung and E. Jin, Assessment of the fire risk index and fire risk rating for five wood species according to Chung's Equation-XII, *Fire Sci. Eng.*, **37**, 116-125 (2023).
 22. 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).
 23. J. D. Dehaan, *Kirk's Fire Investigation*, 5th ed., 84-112, Pearson, London, England (2002).
 24. M. M. Hirschler, Use of heat release rate to predict whether Individual furnishings would cause self propagating fires, *Fire Saf.*, **32**, 273-296 (1999).
 25. M. M. Hirschler, Heat release testing of consumer products, *J. ASTM Int.*, **6**, 1-25 (2009).
 26. J. G. Quintire, Principles of fire behavior, *Delmar Cengage Learning*, New York, USA (1998).
 27. 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).
 28. B. Schartel and T. R. Hull, Development of firer-retarded materials —Interpretation of cone calorimeter data, *Fire Mater.*, **31**, 327-354 (2007).
 29. 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).

Authors

JiSun You; Ph.D., Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseong 18544, Korea; yjsmetoo77@naver.com

Yeong-Jin Chung; Ph.D., Chairman, The National Safety Environment Institute (NSEI), Seoul 05836, Korea; Professor Emeritus, School of Fire and Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheok-city 25949, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr