Appl. Chem. Eng., Vol. 36, No. 2, April 2025, 216-223
https://doi.org/10.14478/ace.2025.1013

Article

Chung's Equation-XII에 의한 목재의 화재 위험성 예측 및 새로운 화재위험성 등급 평가

정영진*,**,† **· 진의*****

*강원대학교 소방방재학부, **국가안전환경원,
***강원대학교 교양교육원

(2025년 2월 28일 접수, 2025년 3월 19일 수정, 2025년 3월 20일 채택)

Prediction of Fire Risk of Wood by Chung's Equation-XII and New Fire Risk Rating Assessment

Yeong-Jin Chung*,**,† **and Eui Jin*****

**School of Fire and Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea*
***The National Safety Environment Institute, Seoul 05836, Korea*
****Institute of Liberal Education, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea*
(Received February 28, 2025; Revised March 19, 2025; Accepted March 20, 2025)

초 록

Chung's Equation-XII에 의한 목재의 화재 위험성 예측 및 화재위험성 등급을 종합적으로 평가하였다. 시험편은 일본삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송을 선택하여, ISO 5660-1 규격에 의한 콘칼로리미터를 사용하여 시험편에 대한 연소시험을 하였다. 연소 후 Chung's equations-XI에 의한 화재성능지수-XI (FPI-XI)은 0.34~1.26으로 나타났고, 화재성장지수-XI (FGI-XI)은 0.78~2.78로 나타났다. 새로 제안된 화재위험성등급에 의한 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 가문비나무(0.60): 등급 A ≈ polymethylmethacrylate (PMMA) (1): 등급 A < 적송(1.10): 등급 B < 일본삼나무(4.17): 등급 G ≈ 나왕(8.18): 등급 G의 순서로 커졌다. 결론적으로 화재위험성은 수분함량이 적고, COP_{mean}/CO_2P_{mean}이 높은 재료가 화재성능지수-XI이 낮아지고, 누적연기발생시간(ASGT)이 길고 COP_{mean}/CO_2P_{mean}이 낮은 재료가 화재성장지수-XI이 낮아졌다. 즉, 화재성능지수-XI이 높아지고 화재성장지수-XI이 낮아짐에 의해 화재위험성지수-XII는 낮아진다.

Abstract

The fire risk prediction and fire risk rating of wood were comprehensively evaluated using Chung's Equation-XII. The Japanese cedar, spruce, lauan, and red pine were selected as the test specimens. The combustion test on the specimen was performed using a cone calorimeter according to the ISO 5660-1 standard. After combustion, the fire performance index-XI (FPI-XI) by Chung's equations-XI ranged from 0.34 to 1.26, and the fire growth index-XI (FGI-XI) ranged from 0.78 to 2.78. The newly proposed fire risk rankings (FRR) for the calculated Fire Risk Index-XII (FRI-XII) by Chung's equation-XII increased in the following order: spruce (0.60): grade A ≈ polymethylmethacrylate (PMMA) (1): grade A < red pine (1.10): grade B < Japanese cedar (4.17): grade G ≈ laun (8.18): grade G. In conclusion, the materials with low moisture content and high COP_{mean}/CO_2P_{mean} have lower fire performance index-XI, and the materials with long accumulated smoke generation time (ASGT) and low COP_{mean}/CO_2P_{mean} have lower fire growth index-XI. In other words, as the fire performance index-XI increases and the fire growth index-XI decreases, the fire risk index-XII decreases.

Keywords: *Fire risk rating, Chung's equations-XI, Chung's equation-XII, Fire Risk Index-XII, Wood*

1. 서 론

목재와 같은 연소성 물질은 연소 시 발생하는 열 및 연소 가스와 연기로 인해 많은 피해를 입힌다. 특히 화재 발생 시 사망자의 대부분은 연기 흡입으로 인해 발생된다[1]. 따라서 이러한 가연성 목재에 대한 선행 연구의 일환으로서 목재의 열분해 과정은 연소 거동에 영향을 미치는 요소인 열, 화학 및 기계적 반응 간의 복잡한 결합인 것으로 밝혀졌다[2]. 또한 세 가지 다른 유형의 바이오차 입자에 대해, 불

† Corresponding Author: Kangwon National University, School of Fire and Disaster Prevention, Samcheok 25949, Korea;
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 @ 2025 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

균일 반응 속도 동역학, 유동화 및 고정층 연소에서의 층 유체 역학도 평가되었다[3].

열유속의 함수로서, 심층 온도에서 얻은 목재 샘플의 탄화 속도는 Affine의 법칙을 따르는 것으로 밝혀졌고, 탄화 전면 위치에서 계산된 탄화 속도에 대한 연구도 수행되었다[4].

화재 위험성은 건축 자재의 가연성 및 착화성, 열방출률, 화염 확산, 연기의 독성 및 연기 발생을 포함한 연소 특성과 연관된다[5-8]. 연소성 물질의 연소 특성을 시험하기 위한 시험 방법 중 하나인 콘칼로리미터 시험은 국제 표준으로 활용되고 있다[9]. 이 시험법은 산소의 소비 원리로서 대부분의 유기성 재료가 연소 시 산소 1 kg이 소모될 때 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 것을 바탕으로 한다[10].

또한 연기측정도 콘칼로리미터 시험을 이용하여 주어진 공간을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 Beer-bouguer-lambert의 실험을 기본 원리로 한다[10]. 연기는 연소성 물질의 연소 시 재료의 열분해로부터 발생되는 가연성 기체로서, 복사 냉각으로 인해 미연소 그을음은 불완전 연소로 불꽃 연소영역에서 연기로 된다[11]. 또한 목재의 화학적 조성에 따라 열방출률의 차이가 있고, 수분 함량 및 리그닌 함량이 열방출률에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[12], 이것은 목재의 연소특성에 의한 화재위험성을 검토할 필요가 있다.

연소성 물질의 연소특성은 열방출률, 총연기방출률, 연기발생률, 연기인자, 비감쇠면적 등을 포함한다[13-15]. 그러나 이와 같은 연소특성 값은 순간적인 시간의 변화에 대한 단일 값으로 제한된 것으로서 열 및 연기발생에 대한 정량적인 예측과 위험성의 평가를 하기에는 아직 미흡하다.

선행 연구에서는 연기위험성의 예측 및 평가를 하기 위한 모델로서 Chung's equations 1, 2, 3[16] 및 Chung's equations-V, Chung's equation-VI를 보고하였다[17]. 또한 열과 연기를 함께 고려한 화재위험성 평가의 확장성을 위하여 Chung's equations-II, Chung's equations-III, 그리고 Chung's equation-IV를 정립하여 발표하였다[18].

최종적으로 Chung's equation-IV인 화재위험성지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)의 값이 높아질수록 화재위험성이 높았다[18]. 이는 화재위험성 및 화재 안전성을 예측・평가하기 위한 것이다.

또한 화재 시에 발생되는 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[19]. 이 방법들은 화재의 초기 단계를 고려한 화재위험성 평가법이었다. 그러나 연소성 물질의 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 누적연기발생시간(accumulated smoke generation time, ASGT)으로 대체하였다. 이를 위하여 Chung's equations-X, -XI에 따라 화재성능지수-X (fire performance index-X, FPI-X)과 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X), 그리고 화재성능지수-XI (fire performance index-XI, FPI-XI)과 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI)를 정립하였다. 이를 바탕으로 Chung's equation-XII에 따른 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)를 최종적으로 보고하였다[20].

따라서 본 연구에서는 건자재에서 사용빈도가 높은 목재수종 4 개 및 기준 물질로 polymethylmethacrylate (PMMA)를 이용하여 종합적으로 화재위험성지수-XII (FRI-XII) 값을 예측하였고, 이들의 화재위험성을 평가하기 위해 새로운 화재위험성등급(new_fire risk rating, New_ FRR) 기준을 제안하였다. 이러한 등급 기준은 화재설계 및 건축설계 시 화재안전의 기초자료로 적용할 수 있다.

2. 실 험

2.1. 시험 재료 및 준비

본 연구에 사용된 시험편은 건축 자재로 주로 사용되며, 사용빈도가 높은 일본삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송을 사용하였다. 이 목재들은 천연 목재를 엠에이치테크놀로지스사 및 농가에서 구입 하였으며 다른 가공처리 없이 시험편의 두께는 10 mm로 시험 규격에 맞추어 준비하였다. PMMA는 Fire Testing Technology사에서 구입하여 기준 물질로 사용하였다.

2.2. 함수량의 측정

측정할 일정양의 목재 시험편을 건조로에서 온도 105 °C를 유지하면서 장시간 건조하여, 4 h 간격으로 시험 재료의 중량을 항량이 될 때까지 측정하였고, 다음 식(1)에 의해 함수량(moisture content, MC)을 구하였다[21].

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

이 식에서 W_m은 목재 시험편의 중량(g), W_d는 목재를 건조시킨 후 시험편의 절대건조 중량(g)이다.

시험 후 목재의 함수량과 체적밀도는 Table 1에 나타내었다[22].

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

Materials	Scientific name	Classification	Moisture content (%)	Bulk Density (kg/m^3)
Japanese Cedar	*Crytomeria japonica*	Soft wood	8.6	279.1
Spruce	*Picea abies*	Soft wood	10.7	510.9
Lauan	*Pentacme contorta*	Hard wood	8.8	542.5
Red Pine	*Pinus densiflora*	Soft wood	9.9	607.4
PMMA	-	-	-	1180.0

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

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

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

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

2.3. 콘칼로리미터 시험법

연소 특성치를 얻기 위하여 ISO 5660-1의 시험에 의하여 영국의 Fire Testing Technology사의 dual cone calorimeter를 사용하였으며, 실제 화재와 가장 근접하게 모사한 외부 복사열유속(external radiant heat flux) 50 kW/m^2 조건하에서 실시하였다[10]. 시험편 크기는 10 mm (H) × 100 mm (W) × 100 mm ($\pm^0_2$) (L)로 절단하여 사용하였다.

2.4. Chung's equation-XII에 의한 화재위험지수 및 화재위험등급 평가

연소성 물질의 화재위험성을 예측 및 평가하기 위해 적용된 Chung's equation-XII[20]의 방정식은 다음과 같다.

2.4.1. 화재성능지수-X (FPI-X) 및 화재성능지수-XI (FPI-XI)의 정의

FPI-X의 방정식은 식 (2)와 같다.

FPI-X는 FPI-VII의 TTI (s)를 대체한 연소저항시간(CRT, s)을 세 가지 중요한 특성인 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), COP_{mean} (g/s)/CO_2P_{mean} (g/s)의 비를 곱하여 나눈 값으로 정의된다. CRT는 연소성 물질의 연소 시 첫 번째 최대 열방출률(HRR_{1st_peak}) 지점과 두 번째 최대 열방출률(HRR_{2nd_peak}) 지점 사이의 누적 연소시간을 의미한다. 열가소성(액상) 물질은 탄화 또는 고체 물질에서 연소 후 연소 과정과 형태가 다르며 연소 시에는 첫 번째 최대 열방출률(HRR_{1st_peak})만 얻어진다. 따라서 이들의 차이를 최소화하기 위해 HRR_{1st_peak}와 TTI 사이의 연소시간을 선택하여 가장 가까운 인자로 적용하였다. 또한 FPI-XI은 PMMA를 기준 물질로 사용하였으며, 식 (3)에 제시되었다.

FPI-XI은 FPI-VIII의 TTI(s)를 CRT(s)로 대체한 식으로서 FPI-X을 $FPI\text{-}X_{[PMMA]}$로 나눈 값으로 정의된다. FPI-XI이 클수록 화재 안전성이 더 높음을 의미한다.

2.4.2. 화재성장지수-X (FGI-X) 및 화재성장지수-XI (FGI-XI)의 정의

FGI-X의 방정식은 식 (4)와 같이 나타내었다. FGI-X은 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), COP_{mean} (g/s)/CO_2P_{mean}(g/s)의 세 가지 중요한 특성 요소를 곱하여 얻은 값을 ASGT(s)로 나눈 것으로 표현된다. ASGT는 FGI-VII의 Time to SPR_{peak}(s)를 대체한 누적 연기 발생 시간(ASGT)을 의미한다. ASGT는 연소성 물질에 대한 $TSRR_{1st_peak}$와 $TSRR_{2nd_peak}$의 위치 사이의 시간 간격을 의미한다. 특히 비탄화 물질의 연소 패턴은 고체 또는 탄화 물질과 다르기 때문에 가장 가까운 연소 특성인 TTI와 $TSPR_{1st_peak}$ 위치 사이의 간격을 ASGT로 적용했다. 또한, FGI-XI은 PMMA를 기준 물질로 사용하여 정의하였다.

FGI-XI의 방정식은 식 (5)와 같다.

FGI-XI는 FGI-VIII의 $TSPR_{peak}$를 ASGT로 대체한 것으로 FGI-X를 $FGI\text{-}X_{[PMMA]}$로 나눈 값으로 표현된다. FGI-XI의 무차원 지수가 커질수록 화재 위험성이 증가하고, 반대로 화재 안전성이 감소하는 것으로 설명된다.

2.4.3. 화재위험성지수-XII (FRI-XII) 및 화재위험성 등급(FRR)의 정의

FRI-XII는 선행 연구에서 정립된 방정식 FRI-IX[18]에 대응하는 또 다른 방법에 대한 공식이다.

FRI-XII는 방정식 (6)에 제시하였다.

$$FRI-XII=\frac{FGI-XI}{FPI-XI} \quad (6)$$

FRI-XII은 FGI-XI을 FPI-XI로 나눈 값으로 정의된다. 즉, FRI-XII 값이 증가할수록 화재위험이 커지고, 반대로 FRI-XII 값이 감소할수록 화재안전성이 커진다. 이에 따라 화재위험성을 종합적으로 예측하고 평가하여 화재위험 등급을 부여하였다.

또한 최종적으로 화재위험성을 예측하고 평가하기 위해 Table 2의 기준에 따라 FRI-XII 값을 기준으로 FRR을 부여할 수 있다. 이는 FRI-XII 값을 0~12 이상까지 2 단위 간격으로 나누어 연소대상의 화재안전성을 7 등급으로 분류하였다. 이는 실험하여 얻은 여러 data를 분석한 경험적인 값이다[23].

2.4.4. 새로 제안된 화재위험성 등급(FRR)

FRI-XII의 값에 대한 차이가 분명히 존재함에도 불구하고, Table 2에서 보여준 바와 같이 FRR 평가 기준 등급의 간격이 2 단위로서 화재위험성 등급 평가에 대한 변별력이 기대치에 미치지 못하였다. 따라서 이를 개선하기 위하여 FRR 평가 기준을 Table 3과 같이 제안하였다. 즉, FRI-XII를 기준으로 한 화재위험성 등급 간격 중 2 단위 간격을 0.5 단위 간격으로 세분화하여 제시하였다.

Table 2. Criteria for Fire Risk Rating for Fire Risk Index-XII

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 over	G	Very low

Table 3. New Criteria for Fire Risk Rating for Fire Risk Index-XII

FRI-XII	Fire risk rating	Fire safety
1 or less	A	Very high
More than 1 up to 1.5	B	High
More than 1.5 up to 2.0	C	Medium 1
More than 2.0 up to 2.5	D	Medium 2
More than 2.5 up to 3.0	E	Low 1
More than 3.0 up to 3.5	F	Low 2
3.5 over	G	Very low

3. 결과 및 고찰

이 연구에서는 연소성 물질에 대한 화재위험성 예측 및 화재위험성 등급을 판단하기 위하여 열 및 연기 관련 특성값을 산정하였다. PMMA는 선행연구의 데이터를 사용하였으며[24], 연소 특성치로 착화시간(time to ignition, TTI), 열방출률(heat release rate, HRR), 연기발생속도(smoke production rate, SPR), 최대연기발생속도에 도달하는 시간(time to reach smoke production rate, TSPR) 및 일산화탄소와 이산화탄소의 발생속도 등을 검토하였으며 그에 대한 data를 Table 4에 제시하였다. 이 데이터를 사용하여 화재성능지수-X (fire performance index-X, FPI-X)과 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X)을 평가한 후에 PMMA를 기준 물질로 무차원의 화재성능지수-XI (fire performance index-XII, FPI-XI) 및 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI)을 구하였다. 그리고 이들 지수들을 사용하여 화재위험성 지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)를 평가하였다. 이것은 화재위험성 요소로서 유해성 가스인 일산화탄소와 이산화탄소 발생을 포함한 평가방법으로써 선행연구[25]와 비교하여 정밀도와 정확도가 높아진 방법이다. 무차원 지수인 FRI-XII는 화재위험성 예측을 표준화한 종합적인 화재위험성지수로 평가된다.

3.1. 열적 특성 평가

연소성 물질에 대한 연소 시의 착화시간은 재료의 연소성을 예측하는데 매우 중요한 성질이며 착화시간이 길어질수록 재료는 가연성이 억제된다. 가스독성, 연기발생, 에너지 방출속도는 연소 대상물이 연소될 때 재료의 종류, 수분함량, 열 침투성, 열적특성 및 밀도 등에 영향을 받는다. 적절한 양의 공기가 휘발성 연료와 화학양론 농도로 혼합되면 열분해 가스의 산화로 인해 불꽃 연소가 발생된다.

Table 4에 나타낸 바와 같이 착화시간은 일본삼나무 4 s, 가문비나무 9 s, 나왕 10 s, 적송 9 s로 나타났다. 일본삼나무가 가장 빠른 착화시간을 나타내었으며 나왕이 가장 긴 착화시간을 나타내었다. 이는 체적밀도가 적송을 제외하고, 542.5 kg/m^{3}으로 비교적 높기 때문인 것으로 이해된다. 적송은 체적밀도가 607 kg/m^{3}로 가장 높아서 착화시간이 가장 길 것으로 예상되었으나 그러하지 못하였으며, 이는 자체의 높은 휘발성 때문으로 이해된다[26].

목재의 착화시간은 목재의 체적밀도, 열전도도, 연료의 비열, 목재표면의 열손실 유무에 따른 상수 및 착화온도의 제곱에 비례하고, 시험편에 가해지는 열유량(heat flux)의 제곱에 반비례한다[27]. 그러므로 체적밀도가 증가하면 착화시간이 길어지는 것으로 예측된다.

최대열방출률은 화재 강도의 표현으로 가장 중요한 화재특성이다[28-30]. 열방출률이 커질수록 더 많은 연소성 물질의 착화에 의해 연소되므로 화재 규모를 확대시킨다. 화재발생 시 낮은 열방출률을 발생하는 연소성 재료는 화재확산이 늦어지는 효과를 기대할 수 있다[31]. 재료에 대한 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 재료의 표면적당 순간 최고로 방출되는 열량의 크기로 설명된다[32,33]. 열방

Table 4. Combustion Characteristics of the Specimen under 50 kW/m^2 External Radiant Heat Flux after Test

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)
Japanese cedar	4	260	219.89 / 20	150.49 / 280	0.0344
Spruce	9	305	234.71 / 25	201.19 / 330	0.0231
Lauan	10	280	246.84 / 30	277.45 / 310	0.0297
Red pine	9	295	245.57 / 30	248.96 / 325	0.0315
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}
Japanese cedar	15	260	0.0210 / 275	0.0014	0.0223	0.0628
Spruce	20	315	0.0214 / 335	0.0013	0.0333	0.0390
Lauan	25	290	0.0273 / 315	0.0031	0.0315	0.0984
Red pine	25	300	0.0372 / 325	0.0015	0.0410	0.0366
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

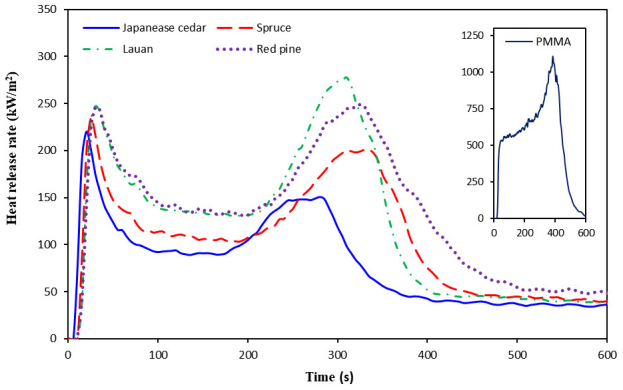


Figure 1. Heat release rate curves of the specimen under 50 kW/m² external radiant heat flux after the test.

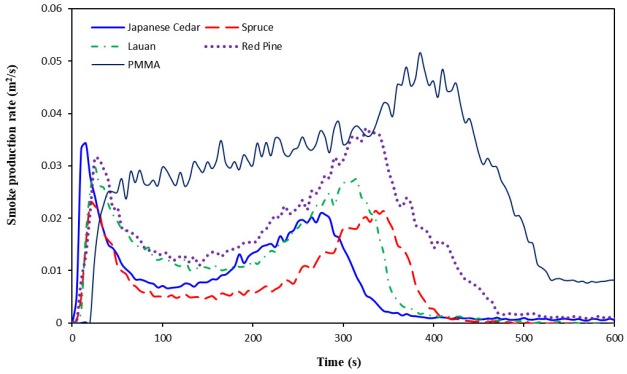


Figure 2. Smoke production rate curves of the specimen under 50 kW/m² external radiant heat flux after the test.

출률이 높은 화염연소는 화재범위를 확장시킨다.

Figure 1은 연소시험에 의한 열방출률 곡선을 나타내었다. 탄화물질을 생성하는 목재 시험편은 2 개의 최대열방출률 값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 열방출률 곡선의 제1차 피크인 HRR_{1st_peak}는 휘발성의 열분해 가스가 외부 불꽃 착화기에 의해 가열 후에 발생된다. 발생된 열은 시험편의 지속적인 열분해가 이어지며 더 많은 휘발성 물질을 방출하게 된다. 그리고 HRR_{1st_peak}의 감소는 열전달이 용이하지 않고 열분해 과정이 지연되는 절연 숯 층이 만들어지기 때문이다.

또한 제2차 열방출률 곡선의 피크인 HRR_{2nd_peak}는 시험편의 연소 및 탄화된 부분의 균열로 인해 더 많은 휘발성 물질이 시험편으로부터 용이하게 방출될 수 있기 때문이다[34]. 이것은 시험편 뒷면 절연층의 후면효과(back effect)에 의하여 열축적이 된 후 많은 열이 동시에 방출되기 때문으로 알려졌다[35]. HRR_{2nd_peak}는 가혹한 연소조건의 화재 성장을 위한 척도로서 이해된다.

Table 3와 Figure 1에 연소 특성과 목재의 열방출 곡선을 나타내었다. 목재의 HRR_{1st_peak}는 일본삼나무 219.89 kW/m², 가문비나무 234.71 kW/m², 적송 245.57 kW/m², 나왕 246.84 kW/m² 순으로 증가하였다. 이들 중 적송과 나왕이 비슷하게 높게 나타났다. HRR_{2nd_peak}는 일본삼나무 150.49 kW/m², 가문비나무 201.19 kW/m², 적송 248.96 kW/m², 나왕 277.45 kW/m²으로 증가하였다. HRR_{2nd_peak}는 나왕이 가장 높았으며 일본삼나무와 비교하여 1.8 배 높았다. 일본삼나무의 HRR_{1st_peak}, HRR_{2nd_peak}이 낮은 이유는 Table 3에 제시된 바와 같이 다른 종에 비해 함수량 및 체적밀도가 낮아 연소속도가 빨라지므로 연소가 용이한 것으로 판단된다.

3.2. 연기발생률 특성 평가

연소 대상물의 화재에 의한 사망 원인은 탄소의 불완전 연소, 산화물을 통한 일산화탄소 발생, 셀룰로오스의 열분해, 질소 수소 기반 화학 물질 발생으로 알려져 있다.

Table 3과 Figure 2에 제시된 바와 같이 SPR_{1st_peak}는 짧은 시간에 급격히 최대값에 도달되는 것으로 나타났다. 연소되는 동안 연기는 가스 및 분해된 헤미셀룰로오스에서 발생된 휘발성 목재 추출물, 에어로졸, 수증기로 구성되는 것으로 알려졌다. SPR_{1st_peak}는 각 수종 간 변별성을 판단하기는 어려우며 0.0231 m²/s~0.0344 m²/s으로 나타났다. 그러나 일본삼나무의 경우 자체 체적밀도가 낮아 SPR_{1st_peak}에 도달되는 시간이 15 s로 가장 빠르므로 초기에 연기위험성이 큰 것으로 예측할 수 있다. 이는 목재의 균열과 화재에 더 많은 표면이 노출되어 발생하는 연소 가스의 갑작스러운 방출의 결과로 이해된다.

이후 두 번째 피크 연기발생속도에 도달하는 시간은 275~335 s였으며 일본삼나무보다 지연되었다. 이는 연소 시 숯이 생성되면서 연소억제 효과가 증가하기 때문으로 이해된다. 시험편의 연소로 형성된 숯은 목재보다 열전도도가 낮아 목재 하부로의 열 침투를 방해한다[36]. 그러므로 최대연기발생률이 감소되거나 또는 최대연기발생률에 도달되는 시간을 지연시키는 결과를 가져온다.

SPR_{2nd_peak}는 모든 시험에 대하여 0.0210 m²/s~0.0372 m²/s로 나타났다. 특히 적송은 SPR_{2nd_peak}가 0.0372 m²/s로 가장 높으므로 유해성이 가장 클 것으로 예상된다. 이는 적송 자체에 휘발성 유기물질을 다량 함유하고 있기 때문으로 예측된다[26].

즉, 함수량에 의한 차별성은 구분하기 어려우나 체적밀도가 높고 낮음에 의하여 최대연기발생속도에 영향을 미치는 것으로 이해된다.

3.3. 연소에 의한 가스 특성 평가

화재의 연소 현상과 독성 가스는 재료의 조성, 온도 및 산소농도, 수분에 질적 양적으로 많은 영향을 받는다. 연소대상 물질의 연소 중에 발생되는 대표적인 유독성 가스는 일산화탄소(carbon monoxide, CO)로 잘 알려져 있다. 일산화탄소(CO)는 목재와 불꽃 사이에서 발생되는 가장 중요한 휘발성물질의 불완전연소 생성물로서 휘발성 물질의 열방출률이 높아짐에 따라 동반된 CO 가스 발생이 증가하는 것으로 이해된다. Table 3 및 Figure 3에 나타낸 시험편 4종의 COP_{mean}은 0.0013~0.0031 g/s로 나타났다. 이는 PMMA (0.0007 g/s)에 비하여 1.9~4.4 배로서 목재가 PMMA보다 불완전연소 물질임을 나타내었다. 이들 중 나왕의 COP_{mean}은 0.0031 g/s로 비교적 높게 나타났다. 이것은 다른 시편에 비하여 목재의 COP_{mean}이 불이 꺼진 후 생성된 숯의 열산화로 인한 CO 발생량이 증가되는 것으로 이해된다.

Table 3 및 Figure 4에 보여준 바와 같이 CO_2P_{mean}은 모든 시험편에 대하여 0.0223~0.0410 g/s였다. 이는 PMMA의 CO_2P_{mean} (0.1243 g/s)에 비하여 3.0~5.6 배 낮았다. 모든 시편은 연연소 시 열방출률 영역에서 CO_2가 생성되었으며 이는 불꽃 연소영역에서 완전연소가 이루어진다는 것으로 이해된다.

Table 3의 CO와 CO_2의 평균발생속도에 대한 목재 시험편의 COP_{mean}/CO_2P_{mean} 비율은 0.0366~0.0984으로서 PMMA와 비교하여 6.5~17.6 배로 높았다. 이는 목재가 PMMA보다 불완전 연소로 인하여 비교적 CO 독성도가 높은 것으로 이해된다.

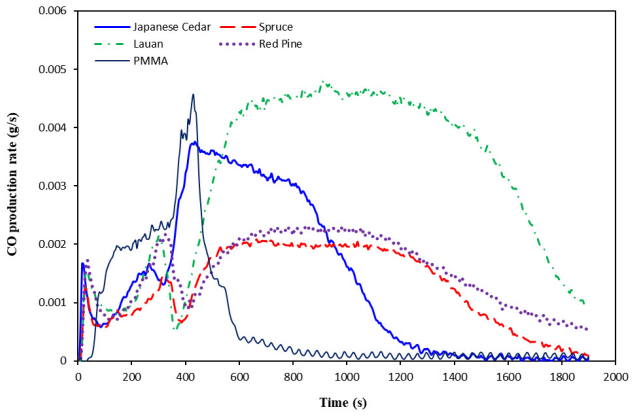


Figure 3. CO production rate (g/s) curves of the specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux after the test.

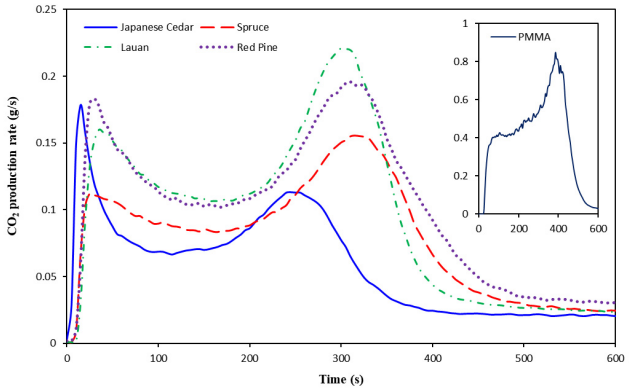


Figure 4. CO_2 production rate (g/s) curves of the specimen under 50 kW/m^2 external radiant heat flux after the test.

3.4. 종합적인 화재위험성 예측 및 등급 평가

HRR의 초기 피크의 정점값 및 TTI는 연소 대상물의 화재위험성 특성을 갖는 것으로 알려졌다[29]. 따라서 선행 연구에서는 연소 대상물의 화재위험성에 대한 예측을 하기 위하여 착화시간 TTI, SPR_{peak} 그리고 PHRR에 대한 3 개의 중요한 특성을 상호 연관 지어 화재성능지수-II (fire performance index-II, FPI-II)를 정립하였다[18]. 그러나 이 방정식들은 화재가 진행되는 동안 발생되는 치명적인 유해 가스인 CO와 CO_2가스의 발생량을 방정식에 포함시키지 않고 평가함으로써 종합적인 예측에 미치지 못하였다. 그러므로 이들을 방정식에 포함시켜 평가할 필요성이 매우 크므로 CO와 CO_2의 평균발생속도비를 포함한 4 개의 중요한 특성을 상호 연관지어 FPI-VII을 정립하여 화재위험성 평가에 적용한 바 있다[19].

선행 연구에서는 또 다른 방법으로 연소성 물질에 대한 TTI에 대응하여 정의한 CRT를 적용하여 식 (2)와 같이 FPI-X 방정식을 정립하였다[20]. CRT는 연소 대상물의 연소 시 각각 HRR_{1st_peak}와 HRR_{2nd_peak} 사이의 간격을 연소저항시간으로 정의하였다. 연소대상 물질은 자체가 지고 있는 의 연소 조건에 따라 연소율의 차이가 다르게 나타난다. 또한 비탄화성(액체성) 물질은 고체성 물질과 다른 연소형태로 연소할 때 HRR_{1st_peak}만 나타낸다. 그러므로 액체성 물질에 대하여 선행 연구에서는 가장 근접한 요소인 TTI와 HRR_{1st_peak} 사이의 간격을 CRT로 정하였다[20,23].

Table 5에 시험편의 FPI-X을 나타내었다. FPI-X은 연소저항시간, 연기, 열방출률 및 CO와 CO_2의 평균발생률비의 상호 관계로서 FPI-X 값은 나왕(388.14 s^2/kW) < 일본 삼나무(547.33 s^2/kW) < 적송(1042.00 s^2/kW) < PMMA (1146.75 s^2/kW) < 가문비나무(1442.42 s^2/kW)의 순서로 증가하였다. 따라서 가문비나무가 화재위험성이 가장 낮았다. 이것은 가문비나무의 수분함량이 비교적 높기 때문으로 이해된다. 반대로 나왕이 화재위험성이 가장 높은 것은 낮은 수분함량과 일본삼나무를 제외한 CRT 값이 작기 때문으로 이해된다.

이에 더하여 모든 연소성 물질의 화재위험성을 표준화하기 위하여 FPI-XI을 정립하였다[21].

Table 5에 연소성 물질의 FPI-X 값을 PMMA를 기준으로 한 FPI-XI 값을 제시하였다. FPI-XI의 값은 나왕(0.34) < 일본삼나무(0.48) < 적송(0.91) < PMMA(1) < 가문비나무(1.26) 의 순서로 증가하였다. 이는 FPI-X 값의 결과와 맥을 같이한다.

또한 선행 연구에서는 연소성 물질의 화재위험성을 예측하기 위해 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), 그리고 $TSPR_{1st_peak}$ (s)의 3 개 중요한 특성 요소와 연관지어 FGI-II를 정립하였다[18]. 그러나 화재가 진행되는 동안 치명적인 CO와 CO_2의 발생을 포함시켜 평가할 필요성이 매우 크므로 CO와 CO_2의 평균발생률비를 포함한 4 개의 중요한 특성 요소와 연관지어 FGI-VII을 정립한 바 있다[19]. 이 식은 선행 연구보다 더욱 정량성과 정밀도를 높이기 위하여 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), $TSPR_{peak}$ (s) 그리고 COP_{mean}/CO_2P_{mean}을 포함시킨 4 개의 중요한 특성 요소를 택하여 화재위험성을 예측하였다.

그러나 선행 연구에서는 또 다른 방법으로 연소성 물질의 $TSPR_{1st_peak}$에 대하여 앞에서 정의한 누적연기발생시간(ASGT)을 대체 요소로 하여 방정식 (4)와 같이 FGI-X을 정립하였다[20].

Table 5에 계산된 FGI-X을 제시하였다. FGI-X은 ASGT (s), SPR_{peak} (m^2/s), PHRR, (kW/m^2), 그리고 COP_{mean}/CO_2P_{mean}의 조합으로 이루어진다. FGI-X 값에 의한 화재위험성은 가문비나무(0.0007 kW/s^2) < PMMA(0.0009 kW/s^2) ≈ 적송(0.0009 kW/s^2) < 일본 삼나무(0.0018 kW/s^2) < 나왕(0.0025 kW/s^2) 의 순서로 증가하였다. 나왕이 화재위험

Table 5. Fire Risk Index-XII (FRI-XII) of Specimens at 50 kW/m^2 External Radiant Heat Flux

Materials	FPI-X (s^2/kW)	FPI-XI	FGI-X (kW/s^2)	FGI-XI	FRI-XII	FRR for FRI-XII
Japanese Cedar	547.33	0.48	0.0018	2.00	4.17	C
Spruce	1442.42	1.26	0.0007	0.78	0.60	A
Lauan	388.14	0.34	0.0025	2.78	8.18	E
Red Pine	1042.00	0.91	0.0009	1.00	1.10	A
PMMA	1146.75	1	0.0009	1	1	A

Table 6. Comparison of the Fire Risk Rating (FRR) and New Fire Risk Rating (N_FRR) of the Samples at an External Radiant Heat Flux of 50 kW/m^2

Materials	FRI-XII	FRR for FRI-XII	New FRR for FRI-XII
Japanese cedar	4.17	C	G
Spruce	0.60	A	A
Lauan	8.18	E	G
Red pine	1.10	A	B
PMMA	1	A	A

성이 가장 높게 나타났다. 이는 활엽수로서 자체의 낮은 수분함량과 침엽수보다 리그닌 성분을 적게 함유하기 때문으로 이해된다[37].

또한 PMMA를 기준 물질로 하여 모든 시험 재료의 화재위험성 예측 및 화재위험성의 표준화를 위한 방정식을 적용하였다. 앞선 연구에서 제시되었던 FGI-VIII[19]과는 방법을 달리하여 FGI-XI을 방정식 (5)와 같이 발표하였다[20].

Table 5에 나타낸 FGI-XI 값은 가문비나무(0.78) < PMMA (1) ≈ 적송(1.00) < 일본삼나무(2.00) < 나왕(2.78)의 순서로 증가하였다.

이는 FGI-X과 FGI-XI이 괘를 같이하는 경향성을 나타내었다. 즉, FPI-XI과 FGI-XI에 의해 화재위험성을 예측한 결과 나왕과 일본삼나무가 공히 가장 높은 화재위험성을 보였으며, 가문비나무가 가장 가장 낮은 물질로 예측되었다.

결과적으로 연소대상 물질들은 FGI-XI 값이 커질수록 화재위험성은 증가하고 화재안전성은 감소함을 예측할 수 있었다. FGI-XI 값은 연소 시험에 의하여 측정된 자료를 사용하여 얻은 값으로, 무차원 계수로서 연소성 재료의 화재안전성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

식 (6)에 제시된 FRI-XII는 FGI-XI을 FPI-XI으로 나눈 값으로 정의하였으며, 화재위험성을 예측하기 위하여 적용될 수 있는 최종적인 평가지수 값으로서 Table 2에 FRR을 제시하였다. 이것은 FRI-XII의 0~12 또는 그 이상의 큰 값을 2 단위 간격으로 하여 연소대상 물질들의 화재안전성을 7등급으로 구분한 화재위험성등급 평가 방법이다.

계산된 FRI-XII와 이를 바탕으로 한 FRR은 가문비나무(0.60 0.59): 등급 A < PMMA(1): 등급 A < 적송(1.10): 등급 A < 일본삼나무(4.17): 등급 C < 나왕(8.18): 등급 E의 순서로 커졌다.

그러나 이들에 대하여 FRI-XII의 값에 대한 차이가 분명히 존재함에도 불구하고, FRR 평가에 대한 변별력이 기대치에 미치지 못하였다. 따라서 이를 개선하기 위하여 본 연구에서는 FRR 평가 기준을 Table 3과 같이 FRI-II 값의 구간 사이를 2 단위에서 0.5 단위로 간격을 세분하여 새로 제안하여 나타내었다.

새로 제안한 FRR의 기준에 대하여 Table 3에 나타내었으며, Table 6에 기존의 기준으로 평가한 FRR과 새로 제안한 기준에 의한 FRR을 나타내었다. New FRR은 가문비나무(0.60): 등급 A ≈ PMMA(1): 등급 A < 적송(1.10): 등급 B < 일본삼나무(4.17): 등급 G ≈ 나왕(8.18): 등급 G의 순서로 커졌다.

종합적으로 화재위험성을 평가한 결과 나왕과 일본 삼나무는 화재위험성이 매우 큰 목재임을 나타내었다. 이와 같이 FPI-X과 FPI-XI이 감소하고, 또한 FGI-X과 FGI-XI이 증가함으로써 FRI-XII 값이 높아졌다. 이것은 화재위험성이 높아진다는 것을 의미한다. 결론적으로 FRI-XII의 값은 연소대상 재료의 화재안전성을 예측 및 화재안전성 등급을 종합적으로 평가하는 데 적용될 수 있다.

4. 결 론

Chung's Equation-XII에 의한 목재의 화재 위험성 예측 및 화재위험성 등급을 종합적으로 평가하였다. 시험편은 건자재인 일본삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송을 선택하여 ISO 5660-1의 규격에 의한 콘칼로리미터 시험법으로 시험하였다. 화재위험성지수-XII (FRI-XII)에 대하여 화재위험성 및 새로 제안된 화재위험성등급(FRR)을 평가하였다.

1) 화재성능지수-XI (FPI-XI)에 의한 화재안전성은 니왕(0.34) < 일본삼나무(0.48) < 적송(0.91) < PMMA (1) < 가문비나무(1.26)의 순서로 증가하였다.

2) 화재성장지수-XI (FGI-XI)에 의한 화재위험성은 가문비나무(0.78) < PMMA (1) ≈ 적송(1.00) < 일본삼나무(2.00) < 나왕(2.78)의 순서로 증가하였다.

3) 새로 제안된 FRR 기준에 의한 FRI-XII은 가문비나무(0.60): 등급 A ≈ PMMA (1): 등급 A < 적송(1.10): 등급 B < 일본삼나무(4.17): 등급 G ≈ 나왕(8.18): 등급 G의 순서로 커졌다. 목재 수종 중 일본삼나무와 나왕은 FRI-XII가 각각 4.17와 8.18로 가장 높았으며, 화재위험성 등급이 G로서 화재위험성이 가장 높은 목재로 나타났다.

결론적으로 화재위험성은 수분함량이 적고, COP_{mean}/CO_2P_{mean}이 높은 재료가 FPI-XI의 값이 낮아지므로 화재위험성이 높아지고, 누적연기발생시간(ASGT)이 길고 COP_{mean}/CO_2P_{mean}이 낮은 재료가 FGI-XI의 값이 낮아지므로 화재위험성이 낮아진다. 즉, FPI-XI이 높아지고 FGI-XI이 낮아짐에 의해 FRI-XII가 낮아진다.

References

1. R. H. White and M. A. Dietenberger, Fire safety of wood construction, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Centennial Edition, 18-1-18-22, Forest Product Laboratory, U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (2010).
2. A. I. Bartlett, R. M. Hadden, and L. A. Bisby, A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction, *Fire Technol.*, **55**, 1-49 (2019).
3. T. Ferreira, J. M. Paiva, and C. Pinho, Comparative analysis of fluidized and fixed beds to obtain data on the char pellet's combustion regime, *Int. J. Energy Clean Environ.*, **21**, 237-268 (2020).
4. L. Terrei, Z. Acem, V. Marchetti, P. Lardet, P. Boulet, and G. Parent, In-depth wood temperature measurement using embedded thin wire thermocouples in cone calorimeter tests, *Int. J. Therm. Sci.*, **162**, 106686-106697 (2021).
5. V. Babrauskas, Effective measurement techniques for heat, smoke and toxic fire gases, *Fire Saf. J.*, **17**, 13-26 (1991).
6. V. Babrauskas and S. J. Grayson, *Heat Release in Fires*, 210-217, Elsevier, London, UK (1992).
7. 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).
8. 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).
9. M. Janssens, Fundamental thermophysical characteristics of wood and their role in enclosure fire growth, PhD Thesis, University of

Gent, Ghent, Belgium (1991).
10. 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), Genever, Switzerland (2015).
11. M. A. Delichatsios, Smoke yields from turbulent buoyant jet flames, *Fire Saf. J.*, **20**, 299-311 (1993).
12. 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 York, USA (1992).
13. M. Delichatsios, B. Paroz, and A. Bhargava, Flammability properties for charring materials, *Fire Saf. J.*, **38**, 219-228 (2003).
14. 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).
15. 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).
16. 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).
17. Y. J. Chung and E. Jin, Risk assessment of smoke generated during combustion for some wood, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 373-380 (2022).
18. 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).
19. 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).
20. 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).
21. W. T. Simpson, Drying and control of moisture content and dimensional change, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Centennial Edition, 1-12, Forest products laboratory U.S.D.A, Forest service, Madison, Wisconsin, USA (2010).
22. Y. J. Chung and E. Jin, Assessment of smoke risk of wood materials, *Int. J. Energy Clean Environ.*, **23**, 109-122 (2022).
23. 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).
24. 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).
25. 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).
26. M. Risholm-Sundman, M. Lundgren, E. Vestine, and P. Herder, Emission of acetic acid and other volatile organic compounds from different species of solid wood, *Holz als Roh- und Werkstoff*, **56**, 125-129 (1998).
27. J. D. Dehaan, *Kirk's Fire Investigation*, 5th ed., 84-112, Pearson, London, England (2002).
28. V. Babrauskas, R. D. Peacock, Heat release rate: the single most important variable in fire hazard, *Fire Saf. J.*, **18**, 255-272 (1992).
29. M. M. Hirschler, Use of heat release rate to predict whether individual furnishings would cause self propagating fires. *Fire Saf. J.*, **32**, 273-296 (1999).
30. M. M. Hirschler, Heat release testing of consumer products, *J. ASTM Int.*, **6**, 1-25 (2009).
31. E. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability. In. Edith A. Turi (ed.). *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Academic Press, New York, USA (1981).
32. V. Babrauskas, Development of the cone calorimeter - A bench-scale, heat release rate apparatus based on oxygen consumption, *Fire Mater.*, **8**, 81-95 (1984).
33. 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).
34. B. Schartel and T. R. Hull, Development of fire-retarded materials—Interpretation of cone calorimeter data, *Fire Mater.*, **31**, 327-354 (2007).
35. 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. J.*, **36**, 391-415 (2001).
36. Q. Wang, J. Li, and J. E. Winandy, Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood, *Wood Science and Technology*, **38**, 375-389 (2004).
37. A. D. Chirico, M. Armanini, P. Chini, P. Cioccolo, F. Provasoli, and G. Audisio, Flame retardants for polypropylene based on lignin, *Polym. Degrad. Stab.*, **79**, 139-145 (2002).

Authors

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

Eui Jin; Ph.D., Senior Rsearcher, Institute of Liberal Education, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea; jin_eui @hanmail.net