

Chung's Equation-XII에 의한 목재 4종의 화재위험성 및 화재위험성 등급 평가 적용

정영진[†] · 진 의*

국가안전환경원, *강원대학교 소방방재연구센터
(2023년 12월 28일 접수, 2024년 1월 11일 수정, 2024년 1월 11일 채택)

Application of Fire Risk and Fire Risk Rating Assessment for Four Species of Wood According to Chung's Equation-XII

Yeong-Jin Chung[†] and Eui Jin*

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

*Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok-city 25913, Korea
(Received December 28, 2023; Revised January 11, 2024; Accepted January 11, 2024)

초 록

Chung's equation-XII에 의하여 4종의 목재에 대한 화재위험성 및 화재안전성을 종합적으로 평가하였다. 시험편은 미국물푸레나무, 버드나무, 들메나무, 산벚나무를 선정하였다. 시험편의 연소특성 시험은 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 사용하였으며, 최종적으로 화재위험성지수-XII (FRI-XII)를 이용하여 화재위험성등급(FRR)을 예측하였다. 예측된 화재성능지수-X (FPI-X)과 화재성장지수-X (FGI-X)은 각각 469.03~1109.73 s²/kW와 0.0009~0.0280 kW/s²로 나타났다. 또한 화재성능지수-XI (FPI-XI)과 화재성장지수-XI (FGI-XI)은 각각 0.41~0.97와 1.11~3.11이었다. 화재위험성 등급인 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 들메나무가 7.60 (화재위험성 등급: D)으로서 가장 높은 화재위험성을 나타내었다. 그리고 Chung's equation-IX인 화재위험성지수-IX (FRI-IX)와 비교하였다. FRI-IX과 FRI-XII에 의한 화재위험성 등급은 버드나무와 들메나무가 공통적으로 높았다. 또한 FRI-XII와 FRI-IX에 의한 결과는 유사한 관계가 이루어졌으며, 각각의 화재안전성등급의 크기는 서로 간 근접하게 일치하였다.

Abstract

The fire risk and fire safety of four types of wood were comprehensively evaluated according to Chung's equation-XII. White ash, willow, fraxinus mandshurica, and sagent cherry trees were selected as test specimens. A cone calorimetry (ISO 5660-1) was used to examine the combustion characteristics of the test piece, and finally, the fire risk rating (FRR) was predicted using the fire risk index-XII (FRI-XII). The predicted fire performance index-X (FPI-X) and fire growth index-X (FGI-X) ranged from 469.03 to 1109.73 s²/kW and 0.0009 to 0.0280 kW/s², respectively. Additionally, the fire performance index-XI (FPI-XI) and fire growth index-XI (FGI-XI) ranged from 0.41 to 0.97 and 1.11 to 3.11, respectively. The fire risk index-XII (FRI-XII), representing a fire risk rating, showed that the fire risk of fraxinus mandshurica tree (FM) was very high at 7.60 (fire risk rating: D). And it was compared with Chung's equation-IX, fire risk index-IX (FRI-IX). The fire risk ratings according to FRI-IX and FRI-XII were generally high for willow and fraxinus mandshurica trees. Additionally, the results of FRI-XII and FRI-IX had a similar relationship, and the size of each fire safety rating closely matched each other.

Keywords: Combustible characteristics, Chung's equations-X, Chung's equations-XI, Chung's equation-XII, Fire risk rating

1. 서 론

연소 대상물의 화재에 대한 확산은 인명안전과 재산보호에 돌이킬 수 없는 큰 재앙을 가져온다[1]. 화재 위험성은 착화성, 열방출률, 화염 확산, 연기발생속도 및 연기독성을 포함한 특정 요소와 관련된다

[2-5]. 연소 특성의 시험은 시험법 중 하나인 콘칼로리미터 시험법을 표준으로 사용하고 있다[6]. 이 시험의 기준은 일반적으로 유기성 고분자 재료가 연소될 때 산소 1 kg의 소모를 기준으로 하여 약 13.1 × 10³ kJ의 열이 방출되는 것으로 하고 있다[7].

또한 연기측정 시험은 일정한 공간을 투과하는 빛에 대한 세기가 거리에 따라 지수 함수로 감소하는 Beer-Bouguer-Lambert의 실험을 바탕으로 하고 있다[7]. 연기는 대상물이 연소될 때 생성되는 연소성 기체로서, 복사 냉각에 의해 아직 타지 않은 그을음을 불완전 연소를 하여 광염 연소영역에서 연기로 탈리된다[8]. 또한 목재는 자체 성분의 화학적 조성에 의해 열방출률이 달라진다. 열방출률은 리그닌 및

[†] Corresponding Author: The National Safety Environment Institute (NSEI)
Seoul 05836, Korea
Tel: +82-33-655-9394 e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

Table 1. The Moisture Content and Bulk Density for Test Specimen

Materials	Scientific name	Classification	Water content (%)	Volume density (kg/m ³)
White ash tree (WA)	<i>Fraxinus americana</i>	Hard wood	8.6	632.93
Willow tree (WL)	<i>Salix babylonica</i>	Hard wood	8.8	352.33
Fraxinus mandshurica tree (FM)	<i>Fraxinus chinensis</i>	Hard wood	9.0	552.63
Sargent cherry tree (SC)	<i>Prunus sargentii</i>	Hard wood	8.5	612.38
PMMA	-	-	-	1180.00

수분 함유량에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다[9,10].

연소특성은 연기발생량, 연기발생률, 연소가스, 비감광면적, 열방출률 등이 포함된다[11-13]. 그러나 이와 같은 특성은 순간의 시간적 변화에 대한 하나의 값에 국한된 것으로서 연기발생 및 열에 대한 정밀성과 정량적인 평가에 의한 위험성을 설명하기에는 부족한 점이 많이 있다.

선행 연구에서는 연기위험성을 예측하기 위한 방안으로 Chung's equations 1, 2, 3[14] 및 Chung's equations-V, Chung's equation-VI를 발표한 바 있다[15]. 또한 연기와 열을 포함한 화재위험성 평가의 확장성을 위해 Chung's equations-II, Chung's equations-III, 그리고 Chung's equation-IV를 정립한 바 있다[16].

총괄적으로 Chung's equation-IV에 의한 화재위험성지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)가 높아질수록 화재위험성이 높아짐을 나타낸다[16]. 이것은 화재위험성 및 화재에 의한 안전성을 예측하기 위한 것이다.

또한 화재가 진행되는 동안 발생하는 유해성 가스인 일산화탄소와 이산화탄소가 매우 중요하기 때문에 이를 포함하여 평가해야 한다. 이를 위해 선행 연구에서는 Chung's equations-VII, Chung's equations-VIII, 그리고 Chung's equation-IX인 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)를 정립하였다. 그리고 화재위험성지수-IX (FRI-IX)를 근거로 하여 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 제시하였다[17]. 이 방법은 화재의 초기 단계에 초점을 맞춘 화재위험성 평가방법이었다. 그러나 연소 대상물의 연소 진행에 따른 화재진행 단계도 중요하므로 이를 반영하여 또 다른 방법을 고안하였다.

즉, 연소의 중요 요소인 착화시간(time to ignition, TTI)에 대응하여 연소저항시간(combustion resistance time, CRT)과 연기발생 관련 제1차 최대연기발생률에 도달되는 시간(time to 1st peak smoke production rate, TSPR_{1st peak})에 대응하는 누적연기발생시간(accumulated smoke generation time, ASGT)을 반영하였다. 따라서 이를 위하여 Chung's equations-X에 의한 화재성능지수-X (fire performance index-X, FPI-X) 및 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X), Chung's equations-XI에 의한 화재성능지수-XI (fire performance index-XI, FPI-XI) 및 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI)을 정립하였고, 이를 근거로 Chung's equation-XII에 의한 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)를 새로이 정립하였다[18].

따라서 본 연구에서는 종합적으로 화재위험성지수-XII (FRI-XII)를 산정하고, FRR을 예측하였다. 그리고 선행연구에서 보고된 화재위험성지수-IX (FRI-IX)에 의한 화재위험성등급(FRR)[19]과 비교하여 이의 관계를 검토하였다.

이 연구에서는 주로 건자재 및 내장재로 사용되며, 사용빈도가 높은 4종의 미국물푸레나무(white ash tree), 버드나무(willow tree), 들메나무(fraxinus mandshurica tree), 산벚나무(sargent cherry tree)를 시험재료로 선택하였다. 그리고 polymethylmethacrylate (PMMA)를 기준

물질로 사용하였다.

2. 실험 및 실험 방법

2.1. 시험재료 준비

시험편은 미국물푸레나무, 버드나무, 들메나무, 산벚나무를 엠에이 치테크놀로지스사 및 농가에서 구입하여 별도의 가공처리 없이 사용하였다. 시험편의 두께는 10 mm로 준비하였다. PMMA는 Fire Testing Technology사에서 구입하여 기준물질로 사용하였다.

2.2. 수분 함유량 측정

목재 시험편의 일정한 양을 온도 105 °C로 유지한 건조오븐에서 긴 시간 건조하였고, 4 h 간격으로 시험편 중량의 변화가 없을 때까지 기다린 후, 식 (1)을 적용하여 수분의 함량(water content, WC)을 산정하였다[20].

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

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

Table 1에 선행연구에서 보고된 목재의 수분함량과 체적밀도에 대한 데이터를 나타내었다[19].

2.3. 건자재의 연소특성 시험

연소시험 규격은 ISO 5660-1으로 영국 Fire Testing Technology사의 dual cone calorimetry를 사용하였다. 외부 복사열유속(external radiant heat flux)은 50 kW/m²로 실화재에 근접한 조건에서 연소시험을 하였다[7]. 시험편은 10 mm (H)의 두께를 가진 재료를 100 mm (W) × 100 mm (±0.2) (L)의 규격으로 준비하였다.

2.4. 화재위험성 지수 및 화재위험성 등급 평가 방법[18]

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

FPI-X은 식 (2)에 나타내었다. FPI-X은 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), 그리고 COP_{mean} (g/s)/CO₂P_{mean} (g/s)의 3개 중요 요소를 곱하여, FPI-VII의 TTI (s)에 대응하여 CRT (s)로 대체한 것을 나눈 값으로 정의된다. CRT는 연소 대상물의 연소 시 제1차 최대열방출률(HRR_{1st peak}) 지점과 제2차 최대열방출률(HRR_{2nd peak}) 지점 사이의 누적된 연소 시간을 의미한다. 연소성 물질은 그 자체의 구성성분 및 연소 조건에 의하여 연소 속도의 차별화가 이루어진다. 그러나 열가소성 물질은 열경화성 물질 또는 탄화물질과 연소패턴이 다르며, 연소 시에 제1차 최대열방출률(HRR_{1st peak})만 나타낸다. 그러므로 이들의

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

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

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

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

차이를 최소화하기 위해서 가장 근접한 요소인 HRR_{1st_peak}와 TTI 사이의 연소시간을 적용하였다.

FPI-XI은 식 (3)에 제시하였다. FPI-XI은 FPI-VIII의 TTI (s)에 대응하여 CRT (s)로 대체한 FPI-X을 FPI-X_[PMMA]으로 나눈 값으로 나타내었다. 이 방정식은 SPR_{peak} 및 PHRR의 값이 화재 초기의 중요한 요소이므로 SPR_{1st_peak}와 HRR_{1st_peak} 값을 선택하였다. 무차원 값으로 얻어지며 여기에서 실제 화재를 상정한 안전치를 고려하여 최대값을 택하였다. 여기에서 FPI-XI 값이 커질수록 화재안전성이 높아진다.

2.4.2. 화재성장지수-X (fire growth index-X, FGI-X)와 화재성장지수-XI (fire growth index-XI, FGI-XI)

FGI-X는 식 (4)에 나타내었다. FGI-X은 3개의 중요 요소인 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), 그리고 COP_{mean} (g/s)/CO₂P_{mean} (g/s)를 곱하여 얻은 값에 대하여, FGI-VII의 Time to SPR_{peak} (s)에 대응하여 대체한 ASGT (s)로 나눈 것으로 정의된다. 누적연기발생시간(accumulated smoke generation time, ASGT)은 연소 대상물이 연소될 때 TSPR_{1st_peak}의 위치와 TSPR_{2nd_peak} 위치와의 간격을 의미한다. 특히, 비탄화 물질은 고체성 물질과 연소형태가 다르기 때문에 이에 가장 가까운 특성인 TTI와 TSPR_{1st_peak} 위치의 간격을 ASGT로 적용하는 방법이다.

FGI-XI은 식 (5)에 나타내었다. FGI-XI은 FGI-VIII의 Time to SPR_{peak} (s)에 대응하여 ASGT (s)로 대체한 FGI-X을 FGI-X_[PMMA]의 값으로 나눈 것으로 정의된다. 따라서 FGI-XI이 커질수록 화재위험성이 커지며, 반대로 화재안전성이 낮아지는 것으로 설명된다. 이 식은 화재 초기의 중요성을 고려하여 SPR_{1st_peak}와 HRR_{1st_peak} 값을 선별하여 적용하였으며, 무차원지수가 얻어진다.

2.4.3. 화재위험성지수-XII (fire risk index-XII, FRI-XII)와 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)

선행 연구에 의해 정립된 FRI-IX[17]의 대체 수단으로 활용하기 위해 다른 방법으로 FRI-XII, 식 (6)을 적용하였다. FRI-XII는 식 (6)에 표현식을 제시하였다.

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

FRI-XII는 FPI-XI으로 FGI-XI을 나눈 것으로 정의하였다. 이는 화

재가 확산될수록 화재안전성이 감소하는 것으로 설명된다[21]. 즉, FRI-XII가 커질수록 화재위험성이 증가하고 이와 반대로 작아질수록 화재위험성이 감소하는 것을 나타내며, 화재위험성과 화재위험성 등급을 종합적으로 예측할 수 있다.

또한 최종적으로 화재위험성을 평가하기 위해 FRI-XII 값을 바탕으로 Table 2와 같이 FRR을 이용하여 화재위험성등급을 평가할 수 있다. 이것은 FRI-XII의 값이 0~12 또는 그 이상의 큰 값을 2단위의 간격으로 하여 연소성 물질들의 화재안전성을 7등급으로 분할한 화재위험성 등급 평가 방법이다. 즉, 매우 높음: A에서부터 최하위 등급인 매우 낮음: G까지 부여하였다. 등급: G의 경우는 연소성 재료로서의 화재 안전을 확보할 수 없는 수준임을 나타내었다[18,23]. 따라서 Table 2의 기준에 따라 화재위험성 등급을 평가하였다. 그리고 이를 비교하고자 선행연구에 의한 FRI-IX 값을 바탕으로 한 FRR의 기준을 Table 3에 제시하였다[17].

Table 2. Criteria of Fire Risk Rating for the 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 or more	G	Very low

Table 3. Criteria of Fire Risk Rating for the Fire Risk Index-IX

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

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 연소성 대상물들의 화재위험성 평가와 화재위험성 등급을 예측하였다. 기준물질로 사용된 PMMA는 선행연구의 데이터를 참고하였으며[23], 연소 성질과 관련된 중요 요소로 연소저항시간(CRT), 연기발생률(smoke production rate, SPR), 열방출률(heat release rate, HRR), CO 가스와 CO₂ 가스의 발생속도 및 누적연기발생시간(ASGT) 등의 특성을 분석하였으며, 그에 대한 데이터를 Table 2에 제시하였다. 이들 데이터를 가지고 화재성장지수-X (FPI-X)과 화재성장지수-X (FGI-X)을 계산하였고, 이를 표준화하기 위해 화재성장지수-XI (FPI-XI)과 화재성장지수-XI (FGI-XI)을 산정하여 적용한 종합적인 화재위험성지수-XII (FRI-XII)와 화재위험성등급(FRR)을 제시하였다.

FRI-XII는 무차원 지수로서 화재위험성을 표준화한 종합적인 화재위험성을 제시하였다. Table 4의 시험편에 대하여 TTI, 열방출속률(heat release rate, HRR), 연기 발생률(smoke production rate, SPR) 및 CO/CO₂ 평균발생속도 비율은 선행 연구에서 보고된 데이터[19]를 참고하였다.

3.1. 열 및 연기 특성 평가

연소성 재료의 착화시간은 연소성 물질의 매우 중요한 특성을 나타낸다. 착화시간은 재료의 종류, 열적특성, 수분 함유량 및 밀도, 그리고 열침투성 등은 가스독성, 에너지 방출속도, 그리고 연기발생에 영향을 준다. 휘발성 연료는 공기와 화학양론 농도의 정의에 의해 적당한 농도로 혼합될 때 열분해 가스의 산화로 인하여 광염 연소가 발생된다.

Table 4에 나타낸 바와 같이 시험편의 착화시간은 5~19 s로 측정되

었다. 버드나무가 8 s로 가장 빠르고, 산벚나무가 19 s로 가장 긴 시간으로 측정되었다. 버드나무의 경우 수분함량은 다른 시험편들과 큰 차이가 없으나, 자체의 낮은 체적밀도(352.33 kg/m³) 때문에 착화시간이 단축된 것으로 판단되며, 산벚나무는 비교적 수분 함량이 높고, 자체의 숲 생성이 용이하여 연소억제 기능이 높은 것으로 이해된다.

목재의 TTI는 목재의 체적밀도, 열전도도, 목재 표면의 열손실 상수, 착화온도와 표면온도 차이의 제곱에 비례하는 것으로 보고되었다. 시험편에 가해지는 복사 열유량(heat flux)의 제곱에 반비례한다[24]. 본 연구에서는 시험편의 체적밀도와 관련하여 직접적으로 설명이 되어질 수 있다. 그러므로 체적밀도가 높다는 것은 착화시간이 지연되는 것으로 이해된다.

화재특성으로서 최대열방출률은 화재 시 커질수록 화재 규모를 확장시키고, 열방출률이 낮은 연소성 재료는 화재확산을 지연시킨다[25]. 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 대상물의 표면에 대해 순간적인 최고의 방출 열량의 크기로 표현된다[26,27].

Figure 1은 시험편의 연소시험에서 시간에 대한 열방출률 특성을 나타내었다. 열방출률 특성의 제1차 특성인 HRR_{1st_peak}는 가열 기간 후 휘발성의 열분해성 가스가 외부 착화열에 의해 발생된다. 축적된 열은 시험편의 지속적인 열분해로 진행되며 더 많은 휘발성 물질을 방출하도록 유도한다. 또한 열방출률 특성의 제2차 특성인 HRR_{2nd_peak}는 시험편의 연소와 탄화 분열로 인하여 시험편으로부터 더 많은 휘발성 물질이 쉽게 방출됨으로써 나타난다[28]. 이는 시험편 뒷면 절연층의 후면효과(back effect)로 열축적이 됨으로써 많은 열이 동시에 방출되기 때문으로 알려져 있다[10]. 이후 휘발성의 물질들이 없어짐에 따라 화염 연소가 소멸되고 열방출률이 감소된다.

Table 4와 Figure 1에 보여준 것과 같이 목재의 HRR_{1st_peak} 특성은

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

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)
White ash tree (WA)	17	260	265.80 / 40	392.60 / 300	0.0248
Willow tree (WL)	8	180	215.06 / 25	320.14 / 205	0.0226
Fraxinus mandshurica tree (FM)	15	215	241.03 / 35	444.60 / 250	0.0257
Sagent Cherry tree (SC)	19	240	214.40 / 40	344.64 / 280	0.0216
PMMA	17	368	1110.56 / 385	-	0.0516

Materials	^f TSP _{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)	COP _{mean} / CO ₂ P _{mean}
White ash tree (WA)	50	265	0.0702 / 315	0.0021	0.0511	0.0410
Willow tree (WL)	20	190	0.0588 / 210	0.0021	0.0300	0.0700
Fraxinus mandshurica tree (FM)	90	165	0.0887 / 255	0.0033	0.0446	0.0740
Sagent Cherry tree (SC)	90	220	0.0648 / 310	0.0023	0.0493	0.0467
PMMA	385	368	-	0.0007	0.1243	0.0056

^a Time to ignition; ^b combustion 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.

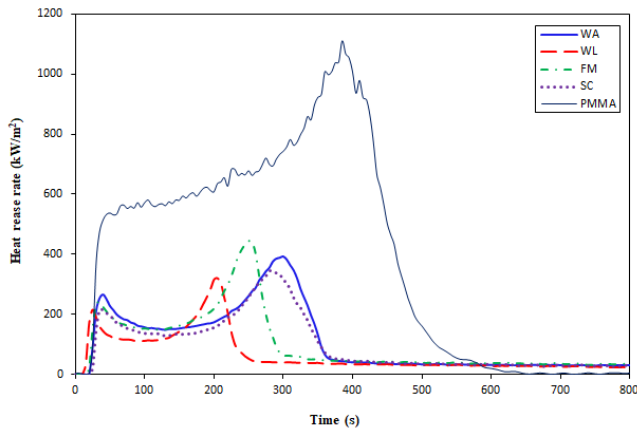


Figure 1. Heat release rate (kW/m^2) for wood and PMMA specimens at an external radiant heat flux of 50 kW/m^2 [19].

4종의 시험편에 대하여 $214.40\sim 265.80 \text{ kW/m}^2$ 로 측정되었다. 특이한 것은 산벚나무가 214.40 kW/m^2 로 가장 낮았다. 이는 산벚나무의 착화 시간이 긴 이유와 일치하는 경향성을 보였다. 이와 별개로 버드나무의 $\text{HRR}_{1\text{st_peak}}$ 가 215.06 kW/m^2 로 낮은 것은 자체의 낮은 체적밀도로 인한 짧은 착화시간(8 s) 때문으로 이해된다. $\text{HRR}_{2\text{nd_peak}}$ 도 앞에서와 유사한 경향성을 보였다. 연소 과정에서 활엽수는 대단히 낮은 정도의 유기물질 및 기타 휘발성 유기물질이 배출되나, 침엽수는 휘발성 테르펜 70~90% 배출 및 기타 유기물질들이 고농도로 배출된다[29]. 그러므로 활엽수종이 침엽수종에 비하여 화재에 잘 견디게 되는 중요한 요소이다. 화재가 발생했을 때 열에 대한 피해보다 연기와 유독 가스가 더 치명적인 것으로 알려져 있다. 화재로 인한 연기 발생은 사람들의 피난 및 탈출을 어렵게 하여 질식 가능성을 높이고 인간의 시야 확보를 어렵게 한다. 또한 연소대상 물질의 구성 성분, 연소조건, 그리고 주변 환경은 연기발생에 많은 영향을 미친다.

Table 4와 Figure 2에 제1의 최대연기발생속도(the first peak smoke release rate, $\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$)를 나타내었다. 이 기간 동안에 발생하는 연기는 분해된 헤미셀룰로오스 및 가스에서 생겨나는 에어로졸, 수증기 그리고 휘발성의 목재 추출물로 이루어진다. $\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$ 는 PMMA를 제외하고 $0.0216 \text{ m}^2/\text{s}\sim 0.0257 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 측정되었다. 특히 산벚나무는 $0.0216 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 낮았으며, 이는 연기 억제성이 가장 우수한 물질로 판단된다. 이것은 전술한 바와 같이 TTI, HRR_{peak} 의 결과도 맥락을 같이한다.

제2의 최대연기발생속도(the second peak smoke release rate, $\text{SPR}_{2\text{nd_peak}}$)도 앞에서 설명한 바와 유사하였다. 그러나 버드나무는 자체의 낮은 체적밀도로 인하여 연소대상의 질량이 조기에 소멸됨에 따라 연기발생속도도 낮아진다.

Figure 2는 최대연기발생률에 도달되는 시간을 고체성 시험편에 대해 두 단계 특성으로 보여준다. $\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$ 는 20~90 s에 나타났으며, $\text{SPR}_{2\text{nd_peak}}$ 는 210~315 s에서 관찰되었다. 이는 목재의 열분해 과정에서 목재 표면에 노출된 열의 양이 증가함에 따라 열에 노출된 목재의 균열이 증가하고 연소 가스가 갑자기 배출되는 것임을 나타낸다. 이러한 최대연기발생률에 도달되는 시간은 재료에 대한 수분의 함량, 체적밀도, 그리고 휘발성 유기물질의 함량과 상호 관계가 있다. 특별히 초기 최대연기발생률에 도달되는 시간으로서 $\text{SPR}_{1\text{st_peak}}$ 에 도달 시간은 버드나무가 각각 20 s로 가장 빠르게 나타났다. 그러므로 버드나무는 연기 위험성이 가장 높은 물질로 판단된다.

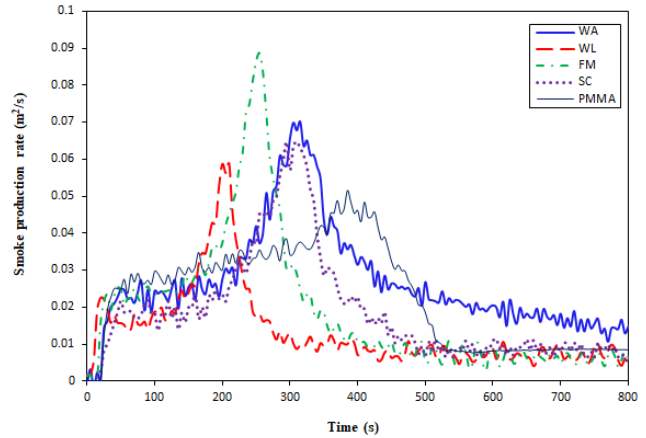


Figure 2. Smoke generation rate (m^3/s) for the test specimen at an external radiant heat flux of 50 kW/m^2 [19].

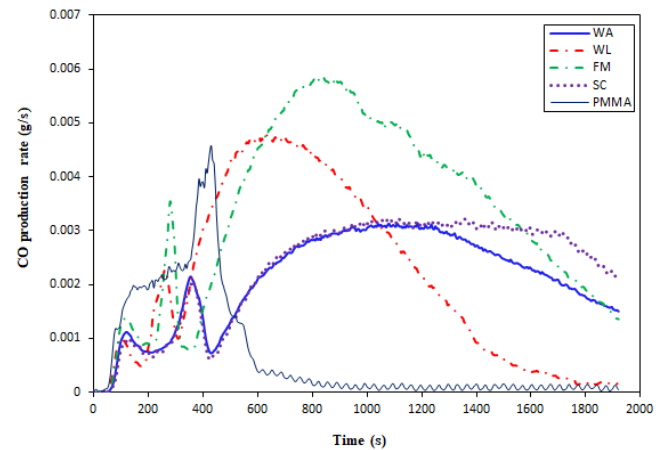


Figure 3. Carbon monoxide (CO) production rate (g/s) for the test specimen at an external radiant heat flux of 50 kW/m^2 [19].

3.2. 연소 가스 특성 평가

연소성 물질의 연소에 의해 발생하는 CO는 대표적인 유독성 가스이며, CO는 시험편의 연소 중 가장 중요한 휘발성물질의 불완전한 연소 생성물이다. 휘발성 물질의 열방출률이 증가되는 것은 수반된 CO 가스 발생이 높아지기 때문이다. Table 4 및 Figure 3에 보여준 시험편 4종의 CO 평균발생속도(mean CO production rate, COP_{mean})는 $0.0021\sim 0.0033 \text{ g/s}$ 로 얻어졌다. 이것은 기준물질로 사용한 PMMA (0.0007 g/s)에 비해 3~4.7배로서 PMMA보다 목재가 불완전연소 물질임을 나타내었다.

Table 4 및 Figure 4에서 CO_2 평균발생속도(mean CO_2 production rate, $\text{CO}_2\text{P}_{\text{mean}}$)는 모든 시험편에 대해 $0.0410\sim 0.0740 \text{ g/s}$ 였다. 이것은 기준 물질로 사용한 PMMA의 $\text{CO}_2\text{P}_{\text{mean}}$ (0.1243 g/s)에 비해 0.24~0.41 배 낮았다. 모든 시험편은 연소 후보다 불꽃 연소될 때의 열방출 영역에서 CO_2 가 생겨났으며 이는 광범 연소 영역에서 완전연소가 이루어진다는 것을 알 수 있었다. Table 4에 나타난 CO와 CO_2 의 평균발생률에 대한 목재 시험편의 $\text{COP}_{\text{mean}}/\text{CO}_2\text{P}_{\text{mean}}$ 비율은 $0.0467\sim 0.0740$ 로서 PMMA와 비교하여 8.3~13.2배로 높았다. 이는 PMMA보다 목재가 불완전 연소를 하며, CO 독성이 매우 높은 것으로 이해된다.

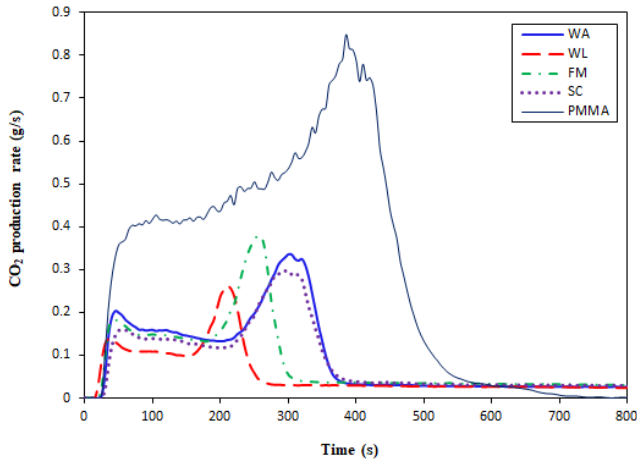


Figure 4. Carbon dioxide (CO₂) production rate (g/s) for the test specimen under an external radiant heat flux of 50 kW/m²[19].

3.3. 화재위험성 지수 및 화재위험성 등급 평가

열방출률의 초기 피크의 정점값 및 착화시간은 연소성 물질의 화재 위험성 특성을 나타낸다[16]. 또한 연기위험성도 맥락을 같이 한다 [15]. 따라서 앞선 연구에서는 연소성 물질의 화재위험성에 대한 예측을 하기 위해 3개의 중요 요소인 착화시간, 최대연기발생속도 그리고 최대열방출률을 상호 연관 지어 화재성능지수-II (fire performance index-II, FPI-II)를 정립하였다[16]. 그러나 이 식들은 화재 발생 시에 치명적인 유해성 가스인 CO와 CO₂ 가스의 발생량을 수식에 포함시키지 않고 별도로 평가함으로써 종합적인 예측이 부족하였다. 그러므로 수식에 반영시켜 평가할 필요성이 매우 크므로 CO와 CO₂의 평균발생속도비를 포함한 4개의 중요 요소를 상호 연관지어 FPI-IX을 정립하여 적용한 바 있다[17].

선행 연구에서는 또 다른 방법으로 연소 특성 중의 하나인 TTI에 대응하여 정의한 CRT를 적용하여 식 (2)와 같이 FPI-X을 발표하였다 [18]. CRT는 연소 대상물의 연소 시 각각 HRR_{1st,peak}와 HRR_{2nd,peak} 위치와의 시간 간격을 연소저항시간으로 정의하였다. 연소성 물질은 자체의 구성성분 및 연소 조건에 따라 연소율의 차이가 다르게 나타난다. 또한 비탄화성 물질은 고체성 물질에 비하여 다른 연소형태로 이루어지며 연소할 때 HRR_{1st,peak}만 나타난다. 그러므로 비탄화성 물질에 대하여 선행 연구에서는 가장 가까이 접한 요소인 TTI와 HRR_{1st,peak} 위치와의 간격을 CRT로 정하였다[17,18].

Table 5에 연소성 재료의 FPI-X을 제시하였다. FPI-X은 연소저항시간, 연기발생속도, 열방출률 및 CO와 CO₂의 평균발생속도비의 상호관계로서 FPI-X 값은 들메나무(469.03 s²/kW) < 버드나무(529.06 s²/kW) < 미국물푸레나무(961.89 s²/kW) < 산벚나무(1109.57 s²/kW) < PMMA(1146.78 s²/kW)의 순서로 증가하였다. 또한 PMMA를 제외한

산벚나무는 화재위험성이 가장 낮게 평가되었다. 이는 TTI가 길고, 자체의 HRR_{1st,peak} 값이 가장 낮기 때문이다.

또한 모든 연소성 대상물의 화재위험성을 표준화 하기 위해 FPI-XI을 새로이 정립하였다[18]. FPI-XI은 FPI-X_[PMMA]으로 FPI-X을 나누는 값으로 나타내었다. 이 방정식은 SPR_{peak} 및 PHRR의 값이 화재 초기의 중요한 요소이므로 SPR_{1st,peak}와 HRR_{1st,peak} 값을 선택하였다. 여기에서 실제 화재를 상정한 안전치를 고려하여 최대값을 선택하였다. 연소성 재료의 화재의 증대와 플래시오버의 시간은 상호 연관성이 있으므로[24], 화재 확산이 증가할수록 화재위험성이 증가하고, 화재안전성이 낮아지는 것과 같이 연기안전성도 낮아지는 것으로 짐작된다. 이는 FPI-XI 값이 작아질수록 화재안전성이 낮아지는 것으로 설명된다.

Table 5에 선행연구의 FPI-VIII과 비교하기 위하여 연소성 물질의 FPI-X 및 FPI-VII 값을 PMMA를 기준으로 한 FPI-XI 및 FPI-VIII 값을 나타내었다. FPI-XI의 값은 들메나무(0.41) < 버드나무(0.46) < 미국물푸레나무(0.84) < 산벚나무(0.97) < PMMA(1)의 순서로 증가하였다. 이는 FPI-X의 결과와 일치하는 경향성을 보였다. 그러나 FPI-XI과 FPI-VIII의 결과 값이 가장 낮은 들메나무와 버드나무의 순위가 서로 자리 이동을 하였다. 이것은 화재의 초기 단계와 중간 단계 간의 연소패턴이 다르기 때문으로 이해된다.

또한 앞선 연구에서는 연소성 물질의 화재위험성을 평가하기 위해 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), 그리고 최대연기발생속도에 다다른 시간[Time to SPR_{peak}, TSPR_{1st,peak} (s)]의 3개 중요 요소와 연관지어 FGI-II를 발표하였다[16]. 그러나 화재가 진행되는 동안 치명적인 CO와 CO₂의 발생을 반영하여 평가할 필요성이 매우 크므로 CO와 CO₂의 평균발생속도비를 포함한 4개의 중요 요소와 연관지어 FGI-VII을 발표한 바 있다[17]. 이 식은 앞선 연구와 견주어 더욱 정량성과 정밀도를 높이기 위해 SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), TSPR_{peak} (s) 그리고 COP_{mean}/CO₂P_{mean}을 반영시킨 4개의 중요 요소를 선정하여 화재위험성 평가를 구현하였다.

그러나 선행 연구에서는 다른 방법으로 연소성 물질의 TSPR_{1st,peak}에 대하여 앞에서 정의한 누적연기발생시간(ASGT)을 대응 요소인자로 활용하여 식 (4)와 같이 FGI-X을 새로 정립하였다[18]. ASGT는 연소 대상물의 연소될 때 TSPR_{1st,peak}에 다다른 위치와 TSPR_{2nd,peak}에 다다른 위치와의 시간 간격을 ASGT로 정의하였다. 특히, 비탄화 물질은 고체성 물질과 연소형태가 다르기 때문에 이에 가장 가까운 요소인 TTI와 TSPR_{1st,peak} 위치와의 간격을 ASGT로 적용하였다.

Table 5에 계산된 FGI-X을 제시하였다. FGI-X은 ASGT (s), SPR_{peak} (m²/s), PHRR (kW/m²), 그리고 COP_{mean}/CO₂P_{mean}의 조합으로 이루어진다. FGI-X 값에 의한 화재위험성은 PMMA (0.0009 kW/s²) < 산벚나무(0.0010 kW/s²) ≈ 미국물푸레나무(0.0010 kW/s²) < 버드나무(0.0018 kW/s²) < 들메나무(0.0028 kW/s²)의 순서로 증가하였다. 이들 중 들메나무는 화재위험성이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 자체의 SPR_{peak}와 CO/CO₂ 평균발생 비율이 높고 ASGT 값이 낮기 때문으

Table 5. 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
White Ash tree (WA)	961.89	0.84	1.19	0.0010	1.11	6.75
Willow tree (WL)	529.10	0.46	0.44	0.0018	2.00	21.25
Frasxinus Mandsurica tree (FM)	469.02	0.41	0.62	0.0028	3.11	6.38
Sagent Cherry tree (SC)	1109.57	0.97	1.66	0.0010	1.11	3.00
PMMA	1146.78	1	1	0.0009	1	1

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

Materials	FPI-XI	FGI-XI	FRI-XII	FRR
White Ash tree (WA)	0.84	1.11	1.32	A
Willow tree (WL)	0.46	2.00	4.35	C
Frasxinus Mandsurica tree (FM)	0.41	3.11	7.59	D
Sagent Cherry tree (SC)	0.97	1.11	1.15	A
PMMA (reference)	1	1	1	A

로 이해된다.

또한 기준시험 물질을 선택하여 모든 대상 시험 재료의 화재위험성 평가 및 화재위험성의 표준화를 위한 방정식을 적용하였다. 앞선 연구에서 제시되었던 FGI-VIII [17]과는 방법을 달리하여 FGI-XI을 식 (5)와 같이 발표하였다[18]. 이는 목재의 화재 증대와 플래시오버의 시간과 상호 연관성이 있으므로[24], 화재 확산이 증가할수록 화재안전성의 감소와 연기안전성은 맥을 같이하는 것으로 이해된다. 따라서 FGI-XI이 커질수록 화재위험성이 커지고 이와 반대로 화재안전성이 낮아지는 것으로 설명된다.

Table 5에 선행연구의 FGI-VIII과 비교하기 위하여 FGI-XI 및 FGI-VIII 나타내었다. FGI-XI 값은 PMMA(1) < 산벚나무(1.11) ≈ 미국물푸레나무(1.11) < 버드나무(2.00) < 들메나무(3.11)의 순서로 증가하였다. 이는 FGI-X과 FGI-XI의 값은 일치하는 경향을 보였다. 즉, FPI-XI과 FGI-XI에 의해 화재위험성을 예상한 결과 산벚나무가 가장 낮은 화재위험성을 보였으며, 들메나무가 가장 위험한 물질로 예측되었다.

결과적으로 연소성 물질들은 FGI-XI이 커질수록 화재위험성이 증가하고 화재안전성은 감소함을 나타내었다. FGI-XI은 연소 시험에 의한 측정된 자료를 사용해 얻은 계산 값으로, 무차원 계수로서 연소성 재료의 화재안전성을 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 FGI-VIII에 의한 평가에서는 버드나무가 가장 화재에 취약한 것으로 나타났다. 이는 버드나무 자체의 체적밀도(352.63 kg/m³)가 가장 낮고, TSPR_{1st, peak} (s)의 짧은 시간을 가장 근접하게 표현해 주었기 때문이다.

식 (6)에 의해 FRI-XII는 FPI-XI으로 FGI-XI을 나눈 것으로 정의하였으며 이는 화재가 확산될수록 화재안전성이 감소하는 것을 의미한다. 즉, FRI-XII가 커질수록 화재위험성이 증가하고 이와 반대로 작아질수록 화재위험성이 감소하는 것을 나타내며, 화재위험성과 화재위험성 등급을 종합적으로 예측할 수 있었다.

또한 화재위험성을 평가하기 위해 활용될 수 있는 최종적인 평가지수 값으로서 FRI-XII 값을 바탕으로 Table 6과 같이 FRR을 제시하였다[18,23]. 즉, FRI-XII의 0~12 또는 그 이상의 큰 값을 2단위 간격으로 하여 각각의 연소성 물질들의 화재안전성에 의한 7등급으로 나누었다. 즉, 매우 높음: A부터 최하위 등급인 G까지 부여하였다. 등급: G의 경우는 건자재로서의 화재안전을 확보할 수 없는 최저 수준으로 정하였다. 따라서 일반적인 연소성 물질들은 Table 4의 기준에 부합할 것으로 판단하였다.

Table 6에서 나타낸 바와 같이 PMMA 시험편을 기준으로 한 지수를 이용하여 계산한 FRI-XII는 PMMA(1): 등급 A < 산벚나무(1.15):

Table 7. Comparison of Fire Risk Rating for FRI-IX and FRI-XII

Materials	FRI-IX	FRR by FRI-IX	FRI-XII	FRR by FRI-XII
White Ash tree (WA)	5.67	B	1.32	A
Willow tree (WL)	48.30	G	4.35	C
Frasxinus Mandsurica tree (FM)	10.28	C	7.59	D
Sagent Cherry tree (SC)	1.81	A	1.15	A
PMMA (reference)	1	A	1	A

등급 A < 미국물푸레나무(1.32): 등급 A < 버드나무(4.35): 등급 C < 들메나무(7.59): 등급 D의 순서로 커졌다. 또한 Table 4는 FRI-IX에 대하여 선행 연구에서 제시된 FRR의 기준을 나타내었다[17]. FRI-IX은 PMMA(1): 등급 A < 산벚나무(1.81): 등급 A < 미국물푸레나무(5.67): 등급 B < 들메나무(10.28): 등급 C < 버드나무(48.30): 등급 G의 순서로 커졌다. 따라서 Table 7에 보여준 바와 같이 FRI-IX와 FRI-XII에 대한 기준을 바탕으로 각각의 화재위험성등급(FRR)을 비교하였다.

이들 결과에서 본 바와 같이 공통적으로 버드나무와 들메나무가 화재위험성이 높은 것으로 나타났다. 또한 FRI-XII와 FRI-IX에 의한 결과는 유사한 관계가 이루어 졌으며, 각각의 화재안전등급의 크기는 서로 간 근접한 경향성을 보였다. 버드나무의 경우 FRI-IX에 의한 화재위험성 등급이 G로 매우 높게 나타났다. 그러나 예외적으로 FRI-XII에 의한 화재위험성 등급은 C로 나타났다. 이는 버드나무의 체적밀도가 매우 낮음으로 초기에 연소과정이 마무리 됨에 따라 연기 및 열관련 측정값이 낮기 때문으로 이해되며, FRI-XII에 의한 방법에서는 이를 구현하는 데에 어려움이 있었다.

4. 결 론

4종의 목재에 대한 연소성 물질들의 화재위험성 및 화재안전성을 평가하기 위하여 Chung's equations-X, Chung's equations-XI, Chung's equation-XII를 적용하였다. 시험편은 미국물푸레나무, 버드나무, 들메나무, 산벚나무를 선정하였다. 시험편의 연소특성 시험은 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 사용하였으며, 최종적으로 화재위험성지수-XII (FRI-XII)를 이용하여 화재위험성과 화재위험성등급(FRR)을 예측하고, 화재위험성지수-IX (FRI-IX)와 비교하였다.

1) 화재성능지수-XI (FPI-XI)의 값은 들메나무(0.41) < 버드나무(0.46) < 미국물푸레나무(0.84) < 산벚나무(0.97) < PMMA(1)의 순서로 증가하였다.

2) 화재성장지수-XI (FGI-XI) 값은 PMMA(1) < 산벚나무(1.11) ≈ 미국물푸레나무(1.11) < 버드나무(2.00) < 들메나무(3.11)의 순서로 증가하였다.

3) 화재위험성지수-XII (FRI-XII)는 PMMA(1): 등급 A < 산벚나무(1.15) 등급 A < 미국물푸레나무(1.32): 등급 A < 버드나무(4.35): 등급 C < 들메나무(7.59): 등급 D의 순서로 커졌다.

4) 결론적으로 FRI-IX과 FRI-XII의 평가에서 공통적으로 버드나무와 들메나무가 화재위험성이 높은 것으로 나타났다. 이것은 자체의 체적밀도, 착화시간, 그리고 열방출률 등이 크게 영향을 미치는 것으

로 이해된다. 또한 FRI-XII와 FRI-IX에 의한 결과는 유사한 관계가 이루어 졌으며, 각각의 화재안전등급의 크기는 서로 간 근접한 경향성을 보였다.

References

1. J. Buzek and E. Gyoöri, 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, *Official J. European Unions*, **L 88**, 5-43 (2011).
2. V. Babrauskas, Effective measurement techniques for heat, smoke and toxic fire gases, *Fire Saf. J.*, **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 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. J.*, **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 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. J.*, **36**, 391-415 (2001).
11. M. Delichatsios, B. Paroz, and A. Bhargava, Flammability properties for charring materials, *Fire Saf. J.*, **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 cy-press 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 materials 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. USDA Forest service, Forest products laboratory, General technical report FPL, GTR-113, 12.1-12.20, Madison, Wisconsin, USA (1999).
21. 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).
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. 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. J. D. Dehaan, *Kirk's Fire Investigation*, 5th ed., 84-112, Pearson, London, England (2002).
25. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability. In: E. A. Turi (eds.). *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, 793-843, Academic Press, New York, USA, (1981).
26. V. Babrauskas, Development of the cone calorimeter - A Bench-scale, heat release rate apparatus based on oxygen consumption, *Fire Mater.*, **8**, 81-95 (1984).
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. Scharrel and T. R. Hull, Development of firer-retarded materials —interpretation of cone calorimeter data, *Fire Mater.*, **31**, 327-354 (2007).
29. 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).

Authors

Yeong-Jin Chung; Ph.D., Chairman, The National Safety Environment Institute (NSEI), 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