Appl. Chem. Eng., Vol. 37, No. 3, June 2026, 279-285
https://doi.org/10.14478/ace.2026.1039

Article

Chung's Equation-XII로부터 화재위험성지수-XII (A, B)를 이용한 가연성 물질의 화재 위험성 평가 및 검토

정영진[*,**,†] · **진의**[***]

*강원대학교 소방방재학부, **국가안전환경원, ***강원대학교 교양교육원
(2026년 5월 2일 접수, 2026년 5월 18일 수정, 2026년 5월 19일 채택)

Assessment and Review of Fire Risk of Combustible Materials Using Fire Risk Index-XII (A, B) Based on Chung's Equation-XII

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 May 2, 2026; Revised May 18, 2026; Accepted May 19, 2026)

초 록

가연성 물질의 열분해 과정은 열, 화학적으로 복잡한 결합인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Chung's equation-XII에 의한 화재위험성지수-XII (A)와 새롭게 제안된 화재위험성지수-XII (B)를 이용하여 가연물의 화재위험성을 평가하였다. 사례 연구로서, ISO 5660-1에 의해 콘칼로리미터를 사용하여 목재 시편의 연소 특성을 시험하였다. 외부 열유속은 50 kW/m^{2}로 하였다. 검토 결과, (A)에 의한 화재 위험성 순위는 느티나무(0.00)가 가장 낮았고, 나왕(4.69)이 가장 높았다. 또한 (B)에 의한 순위는 느티나무(0.00)가 가장 낮았고, 나왕(5.142)이 가장 높았다. 즉, 이들은 (A)값에 대하여 순간 최대값 기반의 제1차 최대열방출률과 제1차 최대연기발생속도, 그리고 (B)에 대하여 각각 시간평균 및 질량 기반의 최대평균열방사율과 연기비소화면적이 중요한 영향을 미친 것으로 보인다. 결론적으로 화재위험성지수-XII (A)와 화재위험성지수-XII (B)를 이용한 화재 위험성 평가 방법은 가연성 물질의 화재 안전성을 종합적으로 평가 및 예측하는 유용한 방법으로 적용될 수 있다.

Abstract

The thermal decomposition process of combustible materials is known to be a complex combination of thermal, chemical, and mechanical reactions. In this study, the fire risk of combustible materials was evaluated using both the fire risk index-XII (A) and the newly proposed fire risk index-XII (B) based on Chung's equation-XII. As a case study, the combustion characteristics of five wood species were tested using a cone calorimeter according to ISO 5660-1. The experiment was conducted at an external heat flux of 50 kW/m^2. As a result of the examination, according to (A), the fire risk ranking was lowest for zelkova (0.00) and highest for lauan (4.69). Also, according to (B), the ranking was lowest for zelkova (0.00) and highest for lauan (5.142). In other words, it appears that the first maximum heat release rate and first maximum smoke generation rate based on the instantaneous maximum values had a significant influence on (A), and the time-averaged and mass-based maximum average rate of heat emission and smoke extinction area had a significant influence on (B), respectively. In conclusion, the fire risk index-XII (A) and the newly proposed fire risk index-XII (B) can be applied as a useful method for comprehensively predicting and evaluating the fire safety of combustible materials.

***Keywords**: Fire risk ranking, Chung's equation-XII, Fire risk index-XII (A, B), Fire safety*

1. 서 론

가연성 물질의 열분해는 연소 과정에 영향을 미치는 요소인 열, 화학적 반응 간의 복잡한 결합인 것으로 알려져 있다[1]. 즉, 재료의 화학적 분해 및 특성, 발생 가스의 조성, 숯생성 여부, 열전달 조건에 따라 크게 달라진다. 화재 시 연소가 시작되어 화염이 발생하면 가연물에 열을 재공급하므로써 가연성 중기의 발생을 촉진시킨다. 열분해

† 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 @ 2026 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

과정 중 숯층이 생성되면 열적장벽(thermally barrier)이 만들어져 가연물 내부로의 열전달을 방해하고 가연물과 산소의 접촉을 차단하여 가연성 증기의 생성을 차단한다[2-4]. 목재 가연물의 연소 시에 발생되는 숯의 영향은 가연물의 연소 특성 및 화염전파를 결정짓는다. 열적으로 얇은 조건에서는 복사열이 시편 전체로 빠르게 전달되어 표면과 내부가 거의 동시에 가열 분해되며, 열방출률 커브는 단일 피크를 나타낸다. 그러나 열적으로 두꺼운 조건에서는 표면에서 흡수된 열이 천천히 내부로 전도되어 분해가 층층이 진행되고 숯생성 여부에 따라 2 개의 피크와 같은 복잡한 패턴이 나타난다[2-4].

화재 위험성은 가연물의 가연성 및 착화성, 열방출률, 화염 확산, 연기 독성 및 연기 발생 등의 연소 특성과 연관된다[5-8]. 이들의 연소 특성을 시험하기 위한 시험법 중 콘칼로리미터 시험법은 국제 표준으로 사용되고 있다[9]. 이 방법은 산소의 소비 원리로서 대부분의 유기성 물질이 연소될 때 산소 1 kg이 소모되는 것에 의하여 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 것을 바탕으로 한다[10].

또한 연기측정에 대해서도 주어진 공간을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 Beer-Bouguer-Lambert의 실험을 기본 원리로 한다[10]. 연기는 연소성 물질의 열분해로부터 발생되는 가연성 기체로서, 복사 냉각으로 인하여 미연소 그을음은 불완전 연소 형태로 불꽃 연소영역에서 연기로 된다[11]. 또한 열방출률은 목재의 수분 함량, 리그닌 함량 및 목재의 화학적 조성에 따라 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[12], 그러므로 가연물의 연소특성에 의한 화재 위험성을 근본적으로 검토할 필요가 있다.

단순한 화재 시나리오 또는 화재 시험은 모든 화재 유형과 해당 화재 거동을 포괄하지 못한다. 따라서 이들의 목적을 성취하기 위해서는 지속적인 착화 방지, 화재 전파 제한 또는 방화 장벽 역할이 포함되어야 한다. 이러한 방법들에 대한 열 및 연기 특성 값은 순간적인 시간 변화에 대한 단일 값으로서 화재 현상을 기술하기에는 한계가 있다. 이러한 단점을 개선하기 위한 방안으로 Chung's equations 1, 2, 3[13]과 연기 위험성 평가 방법으로 대표되는 Chung's equations-VI를 정립한 바 있으며[14], 또한 보다 정량적인 방법으로 화재 위험성 평가의 확장성을 실현하기 위해 Chung's equation-IV와 관계된 몇 개의 방정식을 정립하였다[15].

이러한 선행 연구는 화재위험성지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)가 커짐에 따라 화재 위험성이 높아짐으로 평가되었다. 그러나 화재 시 발생하는 유해 가스인 CO 가스와 CO_2 가스를 화재 위험성 평가 방정식의 구성에 포함하지 않고 별도로 평가하여 왔다. 그러나 이를 위하여 선행 연구에서는 Chung's equations-VII, -VIII, Chung's equation-IX을 제안하였다[16]. 또한 또 다른 방법으로 Chung's equations-X, -XI, Chung's equation-XII를 제안하였다[17].

본 연구에서 연소 특성은 선행 연구의 데이터를 사용하였다[18]. 그리고 Chung's equation-XII에 의한 화재위험성지수-XII (A)[17]와 새로 제안된 화재위험성지수-XII (B)를 이용하여 가연성 물질의 화재 위험성을 종합적으로 비교 검토하였다. 기준 물질은 콘칼로리미터의 시험에서 연소 시 대부분 휘발성 물질로 변환되며, 우수한 재현성 및 반복성을 나타내는 polymethyl methacrylate (PMMA)를 사용하였다.

2. 실험 및 방법

2.1. 콘칼로리미터 시험

시험 재료의 체적 밀도와 수분 함량은 Table 1에 나타내었다[19]. 시험편의 연소 시험은 ISO 5660-1의 표준방법에 의해 Fire Testing Technology Co.의 Cone calorimeter를 사용하여, 실제 화재 상황과 유사한 열유속인 50 kW/m^{2}의 외부 열유속 조건에서 진행하였다[10]. 사용한 시험편의 두께는 10 mm이고 시편은 100 mm × 100 mm ($\pm^0_2$) 크기의 규격으로 하였으며, 연소 시험을 통하여 연소 특성치를 얻었다.

Table 1. The Moisture Content and Bulk Density of Each Wood Before Combustion Testing

Materials	Scientific name	Classification	Moisture content (%)	Bulk density (kg/m^3)
Pine rigida (PN)	*Pinus rigida*	Soft wood	10.0	419.0
Lauan (LU)	*Pentacme contorta*	Hard wood	8.8	542.5
Chest nut (CN)	*Castanea sativa*	Hard wood	11.0	634.0
Oak (OK)	*Quercus variavilis*	Hard wood	12.1	976.0
Zelkova (ZV)	*Zelkova serrata*	Hard wood	10.0	655.0
PMMA	-	-	-	1180.0

2.2. 화재 시 화재 위험성 평가 방법

가연성 물질의 화재 위험성을 평가하기 위하여 적용된 Chung's equation-XII의 식은 다음과 같다[17].

2.2.1. 화재성능지수-X (A), FPI-X (A) 및 화재성능지수-XI (A), FRI-XI (A)의 정의

FPI-X (A), FPI-XI (A)는 식 (1) 및 (2)와 같다[17].

$$FPI-X(s^2/kW)(A) = \frac{CRT(s)}{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}(g/s)/(CO_2P_{mean}(g/s)} \quad (1)$$

$$FPI-XI(A) = \frac{\frac{CRT}{SPR_{peak}\cdot PHRR\cdot COP_{mean}/CO_2P_{mean}}}{[\frac{CRT}{SPR_{peak}\cdot PHRR\cdot COP_{mean}/CO_2P_{mean}}]_{PMMA}} \quad (2)$$

CRT: Combustion resistance time

Method B: SPR_{peak} (m^2/s)를 *SEA* (m^2/kg)으로 대체함.

PHRR (kW/m^2)을 *MARHE* (kW/m^2)로 대체함.

FPI-XI (A), 식 (1)은 연소저항시간[combustion resistance time, CRT (s)]을 세 가지 중요한 연소 특성인 최대연기발생률[peak smoke production rate, SPR_{peak} (m^2/s)], 최대열방출률[peak heat release rate, PHRR (kW/m^2)], 그리고 COP_{mean} (g/s) / CO_2P_{mean} (g/s)의 비를 곱하여 나눈 것으로 제시하였다.

CRT(s)는 연소성 물질의 연소 시 첫 번째 최대열방출률(HRR_{1st_peak}) 지점과 두 번째 최대열방출률(HRR_{2nd_peak}) 지점 사이의 누적 연소시간이다. 비탄화성 물질인 PMMA는 탄화성 물질과 연소 과정과 형태가 다르며 연소 시에는 HRR_{1st_peak}만 얻어진다. 따라서 이들의 차이를 최소화하기 위해 HRR_{1st_peak}와 착화시간(time to ignition, TTI) 사이의 연소시간을 선택하였다.

화재 시 연기 발생과 피해의 중요성을 고려하여, 선행 연구에서는 연기 및 열관련 특성으로 SPR_{peak} (m^2/s)와 PHRR (kW/m^2)을 방정식에

포함하였다. 이를 본 연구에서는 FPI-X (A)로 정하였다. 그러나 또 다른 각도로 화재 위험성을 평가할 필요성이 있으므로 SPR_{peak}를 연기비소화면적[(smoke extinction area, SEA (m^2/kg)]으로 대체하여 적용하였다. SEA는 가연성 물질의 손실된 단위 질량당 발생하는 연기량을 나타내는 것으로서, SPR을 질량손실률[mass loss rate, MLR (g/s)]로 나눈 것으로, 연기 관련 지표로 널리 연구되고 있다[20]. 이 값은 단순히 연기가 얼마나 많은 양이 발생되는가보다 재료 자체가 연기를 얼마나 높은 연기밀도로 발생되는가라는 발연효율의 개념이 포함된 값이다.

또한 HRR은 기계장치의 노이즈(noise)에 의한 오차를 발생시킨다. 따라서 이를 최소화 하기 위하여 최대평균열방사율[(maximum average rate of heat emission, MARHE (kW/m^2)]을 적용하고 이를 FPI-X (B)로 정하였다. MARHE은 총열방출률[total heat release rate, THRR (kW/m^2)]을 시간으로 나눈 값으로 정의된다[21,22]. MARHE는 HRR의 상승시점부터 HRR_{peak} 시점까지의 구간에서 발생한 HRR의 평균값으로 시간에 따라 오차값을 보정하여 안정적인 측정값을 제공한다. 이 값은 화재 성장기 동안의 평균적인 열방출률의 최대값으로, 순간적인 화력보다 화재가 얼마나 지속적으로 위험을 초래하는가라는 시간적 개념이 반영된 값이다.

RPI-XI은 PMMA를 기준 물질로 사용하였으며, 식 (2)에 제시되었다.

2.2.2. 화재성장지수-X (A), FGI-X (A) 및 화재성장지수-XI (A), FGI-XI (A)의 정의

방정식 FGI-X (A), FGI-XI (A)은 식 (3), (4)와 같이 나타내었다[17].

$$FGI-X(kW/s^2)(A) = \frac{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}(g/s)/CO_2P_{mean}(g/s)}{ASGT(s)} \quad (3)$$

$$FGI-XI(A) = \frac{\frac{SPR_{peak}\cdot PHRR\cdot COP_{mean}/CO_2P_{mean}}{ASGT}}{\left[\frac{SPR_{peak}\cdot PHRR\cdot COP_{mean}/CO_2P_{mean}}{ASGT}\right]_{PMMA}} \quad (4)$$

ASGT: accumulated smoke generation time

Method B: SPR_{peak} (m^2/s)를 SEA (m^2/kg)으로 대체함.

$PHRR$ (kW/m^2)을 $MARHE$ (kW/m^2)로 대체함.

FGI-X (A), (3)은 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), COP_{mean} (g/s) / CO_2P_{mean} (g/s)의 세 가지 중요한 연소 특성 요소를 곱하여 얻은 값을 누적연기발생시간[accumulated smoke generation time, ASGT (s)]로 나눈 것으로 나타내었다.

ASGT는 가연성 물질에 대한 제1차 최대연기발생률에 도달되는 시간[(1st time to smoke production rate, $TSPR_{1st_peak}$ (s)]과 제2차 최대연기발생률에 도달되는 시간 ($TSRR_{2nd_peak}$, s)의 위치 사이의 시간 간격을 나타낸다. 특별히 비탄화 물질의 연소는 고체 또는 탄화성 물질과 패턴이 다르기 때문에 연소 특성이 가장 근접한 TTI와 $TSPR_{1st_peak}$ 위치 사이의 간격을 ASGT로 적용하였다.

또한 FGI-XI (A)의 SPR_{peak} (m^2/s)는 SEA (m^2/kg)로, PHRR (kw/m^2)는 MARHE (kW/m^2)로 대체하고 이를 FGI-XI (B)로 정하였다.

이어서 FGI-XI (A)은 식 (4)과 같이 정의하였다.

2.2.3. 화재위험성지수-XII 의 정의

식 (5)는 상호 연관하여 화재위험성을 평가하는 종합적인 화재위험성 수식과 일치한다.

$$Fire\ Risk \propto \frac{FGI-XI}{FPI-XI} \text{ or } \frac{FGI-VIII}{FPI-VIII} \text{ or } \frac{FGI-III}{FPI-III} \text{ or } \frac{FGI-II}{FPI-II} \text{ or } \frac{SGI-XI}{SPI-XI} \quad (5)$$

방정식 FRI-XII (A, B)는 식 (6), (7)에 제시하였다[17].

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

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

FRI-XII (A, B)는 FGI-XI (A, B)을 FPI-XI (A, B)로 나눈 값이다. 즉, FRI-XII (A, B) 값이 높아질수록 화재 위험성이 높아지고, 반대로 FRI-XII (A, B) 값이 낮아질수록 화재 안전성이 높아진다. 이것을 근거로 하여 화재 위험성을 종합적으로 평가 및 예측하여 화재 위험성 순위를 분류하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 화재 위험성 평가 방법의 적용

선행 연구에서는 가연성 물질의 화재 위험성에 대한 평가 및 예측을 하기 위하여 TTI, SPR_{peak}, PHRR, 그리고 CO와 CO_2의 평균발생속도비를 포함한 4 개의 중요한 연소 특성을 연관지어 FPI-IX을 정립하였다. 그리고 화재 위험성 평가에 적용하였다[16].

그러나 이들을 또 다른 방법으로 검증할 필요성이 있으므로, FRI-IX과 관련된 연소 특성 중 핵심 요소인 TTI를 CRT를 대체하여 식 (1)과 같이 FPI-X 방정식을 정립하였다[17]. Table 2에 MARHE와 SEA를 제외한 선행 연구의 데이터를 참고하였다[18]. Table 2와 Figure 1에서 제시된 바와 같이 CRT는 연소 대상물의 연소 시 각각 HRR_{1st_peak}와 HRR_{2nd_peak} 사이의 시간 간격을 연소저항시간으로 정의하였다[17]. 연소대상 물질은 그 자체의 연소 조건에 따라 연소율의 차이가 다르게 나타난다.

또한 비탄화성 물질은 탄화성 물질과 다르게 연소할 때 HRR_{1st_peak}만 나타낸다. 그러므로 비탄화성 물질인 PMMA에 대하여 선행 연구에서는 CRT 정의와 가장 근접한 요소인 TTI와 HRR_{1st_peak} 사이의 시간 간격을 CRT로 나타내었다[17].

Table 3에 나타낸 바와 같이 FPI-X은 연소저항시간, 열방출률 (Figure 1), 연기(Figure 3) 및 CO (Figure 4)와 CO_2 (Figure 5)의 평균발생률비의 상호 관계로서, FPI-X (A)의 값은 나왕(511.32 s^2/kW)이 가장 낮고, 느티나무(29801.32 s^2/kW)가 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 느티나무가 화재 위험성이 가장 낮은 것으로 이해된다. 이것은 느티나무가 연소 시에 HRR_{1st_peak} (144.50 kW/m^2)가 가장 낮고, SPR_{1st_peak} (0.0043 m^2/s)이 가장 낮기 때문이다. 이는 화재 위험성이 시험편의 체적밀도에 의존하여 낮아지는 것과는 다른 차원으로 해석될 수 있다. Table 1에 나타낸 바와 같이 굴참나무와 느티나무의 체적밀도는 각각 976.0 kg/m^3, 655.0 kg/m^3이다. 체적밀도가 높은 굴참나

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

Materials	[a]CRT (s)	[b]HRR_{1st_peak} (kW/m^2) at Time (s)	[c]HRR_{2nd_peak} (kW/m^2) at Time (s)	[d]ASGT (s)	[e]MARHE (kW/m^2) / at Time (s)
Pine rigida	295	171.05 / 35	287.19 / 330	230	131.71 / 350
Lauan	280	246.84 / 30	277.45 / 310	290	171.07 / 310
Chest nut	230	178.99 / 60	370.54 / 290	245	164.46 / 390
Oak	310	176.10 / 105	375.76 / 415	325	189.79 / 440
Zelkova	450	144.50 / 65	193.75 / 515	480	68.90 / 610
PMMA	368	1110.56 / 385	-	368	662.61 / 435

Materials	[f]SPR_{1st_peak} (m^2/s) at Time (s)	[g]SPR_{2nd_peak} (m^2/s) at Time (s)	COP_{mean} / CO_2P_{mean}	[h]SEA (m^2/kg)
Pine rigida	0.0124 / 40	0.0232 / 270	0.0322	64.88
Lauan	0.0297 / 25	0.0273 / 315	0.0747	89.34
Chest nut	0.0087 / 35	0.0190 / 280	0.0559	38.00
Oak	0.0041 / 105	0.0122 / 430	0.0548	41.12
Zelkova	0.0025 / 60	0.0043 / 540	0.0418	6.88
PMMA	0.0516 / 385	-	0.0057	169.58

[a]Combustion resistance time; [b]1st peak heat release rate; [c]2nd peak heat release rate; [d]maximum average rate of heat emission; [e]1st peak smoke production rate; [f]accumulated smoke generation time; [g]2nd peak smoke production rate; [h]specific extinction area

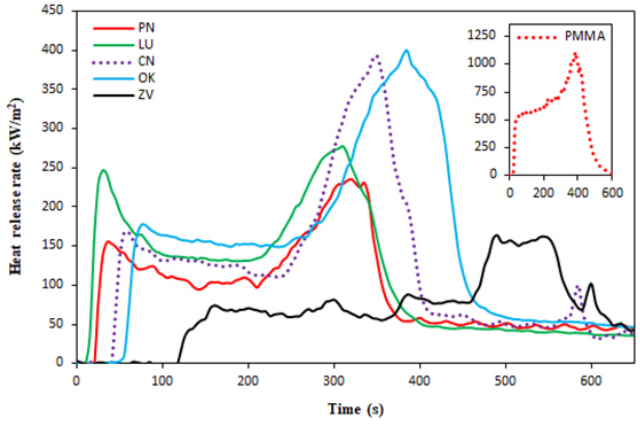


Figure 1. The heat release rate curves under conditions of external radiant heat flux of 50 kW/m^2.

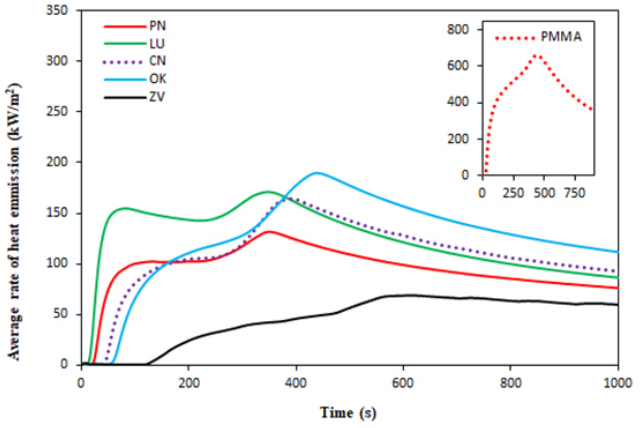


Figure 2. The average rate of heat emission curves under conditions of external radiant heat flux of 50 kW/m^2.

무가 화재성능지수가 높게 나타날 것으로 예측되었으나 느티나무가 가장 높은 것으로 나타났다. 이것은 착화시간보다 두꺼운 층의 숯이 복사열과 산소 접근을 차단함으로써, 시험편의 열전달 기능의 저하 및 연소억제 기능이 우수하기 때문이다. 이는 결과적으로 CRT 값에 의존하는 것으로 이해된다. 이와 반대로 나왕이 화재 위험성이 가장 높은 것으로 나타난 것은 수분 함량(8.8%)이 가장 낮고, CO_{mean}/CO_2P_{mean} (0.0747)가 가장 높기 때문으로 이해된다.

이를 또 Figure 2의 MARHE 및 SEA를 적용한 다른 방법으로 Table 4에 제시된 FPI-X (B)의 값은 나왕(0.25 s·kW/kg)이 가장 낮고, 느티나무(22.72 s·kW/kg)가 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 느티나무가 화재 위험성이 가장 낮은 것으로 이해된다. 이는 FPI-X (A)에 대하여 물리적으로 순간 최대값 기반인 HRR_{1st_peak}와 SPR_{1st_peak}가 중요한 영향을 미친 것 같이, FPI-X (B)에 대하여 각각 시간 평균 및 질량 기반인 MARHE (68.90 kW/m^2)와 SEA(6.88 m^2/kg)가 중요한 영향을 미친 것으로 보인다.

즉, PHRR (kW/s)은 화재 시 재료가 연소하면서 단위 면적당 순간적으로 방출하는 최대 열량을 의미하는 것으로서[10], 이는 재료가 가장 강렬하게 타오를 때의 화재 크기를 나타내며, 화재 성장 속도와 위험성을 평가하는 핵심 지표이다. 그리고 SPR_{peak} (m^2/s)는 화재 초기 또는 연소 과정 중 단위 시간당 발생하는 연기의 양이 가장 높은 수준에 도달했을 때의 수치를 의미한다[10].

또한 SEA는 SPR을 질량손실률[mass loss rate, MLR (g/s)]로 나눈 것이다[20]. 이 값은 단순히 연기가 얼마나 많은 양이 발생되는가보다 재료 자체가 연기를 얼마나 높은 연기밀도로 발생되는가라는 발연효율의 개념이 포함된 값이다. 그리고 MARHE는 THRR (kW/m^2)을 시간으로 나눈 값으로 정의된다[21,22]. MARHE는 HRR의 상승시점부터 HRR_{peak} 시점까지의 구간에서 발생한 HRR의 평균값으로 시간에 따라 오차값을 보정하여 안정적인 측정값을 제공한다.

그리고 모든 연소성 물질의 화재 위험성을 표준화하기 위하여 FPI-XI을 정립하였다[17].

Table 3. Fire Risk Index-XII (A) of Specimens under Conditions of External Radiant Heat Flux of 50 kW/m^2

Materials	FPI-X (s^2/kW)	FPI-XI	FGI-X (kW/s^2)	FGI-XI	FRI-XII
Pine rigida	4319.18	3.83	0.0003	0.33	0.09
Lauan	511.32	0.45	0.0019	2.11	4.69
Chest nut	2640.64	2.34	0.0004	0.44	0.19
Oak	7828.28	6.95	0.0001	0.11	0.02
Zelkova	29801.32	26.45	0.0000	0.00	0.00
PMMA	1126.76	1.00	0.0009	1.00	1.00

Table 4. Fire Risk Index-XII (B) of Specimens under Conditions of External Radiant Heat Flux of 50 kW/m^2

Materials	FPI-X (s·kW/kg)	FPI-XI	FGI-X (kW/kg·s)	FGI-XI	FRI-XII
Pine rigida	1.07	1.88	1.20	0.69	0.37
Lauan	0.25	0.44	3.94	2.26	5.14
Chest nut	0.66	1.16	1.43	0.82	0.71
Oak	0.72	1.26	1.32	0.76	0.60
Zelkova	22.72	39.86	0.04	0.02	0.00
PMMA	0.57	1.00	1.74	1.00	1.00

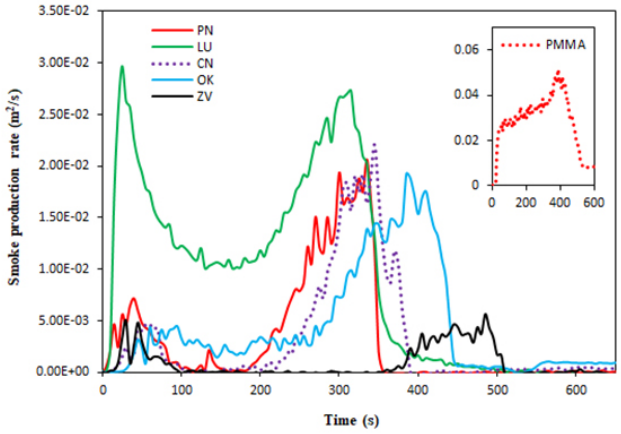


Figure 3. The smoke production rate curves under conditions of external radiant heat flux of 50 kW/m^2.

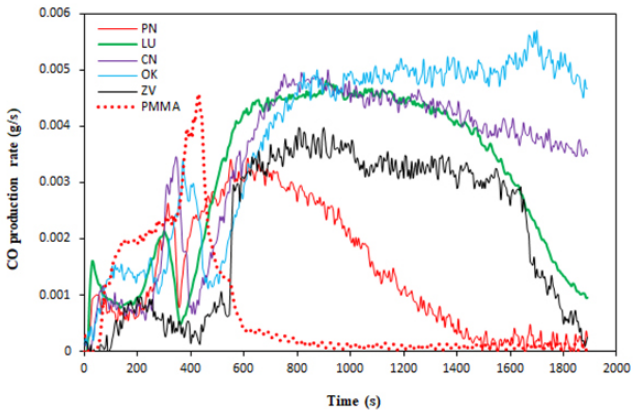


Figure 4. The CO production rates (g/s) of the specimen under conditions of external radiant heat flux of 50 kW/m^2.

Table 3에 나타낸 FPI-XI (A)의 값은 나왕(0.45)이 가장 낮고, 느티나무(26.45)가 가장 높은 것으로 나타났다. FPI-XI (B)의 값은 나왕(0.44)이 가장 낮고, 느티나무(39.86)가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 앞의 FPI-X (A)와 FPI-X (B)의 경우와 맥을 같이 한다.

또한 선행 연구에서는 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), $TSPR_{1st_peak}$ (s), 그리고 CO_2의에 대한 CO의 평균발생률비를 포함한 4 개의 연소특성 요소를 조합하여 FGI-IX을 정립한 바 있다[16].

그러나 FRI-IX과 관련된 연소특성 중 핵심 요소인 가연성 대상물에 대한 $TSPR_{1st_peak}$에 대하여[16], 누적연기발생시간(ASGT)을 대체 요소로 하여 방정식 (5)와 같이 FGI-X을 정립하였다[17]. ASGT는 연소가연물이 연소될 때 각각 $TSPR_{1st_peak}$와 $TSPR_{2nd_peak}$ 사이의 시간 간격을 ASGT로 정의하였다. Table 2와 Fgure 2에 시간에 따른 연기발생률 커브를 나타내었다.

Table 3에 계산된 FGI-X (A)의 값에 의한 화재위험성은 느티나무(0.00 kW/s^2)가 가장 낮고, 나왕(0.0019 kW/s^2)으로 비교적 높게 나타났다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 FPI-X (A)와 유사한 경향성을 보였다.

Table 4에 나타낸 FGI-X (B)의 값에 의한 화재위험성은 느티나무(0.04 kW/kg·s)가 가장 낮고, 나왕(3.94 kW/kg·s)으로 비교적 높게 나타났다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 FPI-X (B)와 유사한 경향성을 보였다. 이어서 PMMA를 기준 물질로 하여 모든 시험 재료의 FGI-XI을 식 (4)와 같이 발표하였다[17]. Table 3에 나타낸 바와 같이 FGI-XI (A)의 값은 느티나무(0.00)가 가장 낮고, 나왕(2.11)이 가장 높은 것으로 평가되었다. 이는 FGI-X (A) 값의 결과에 대하여 순간 최대값 기반의 HRR_{1st_peak}와 SPR_{1st_peak} 값이 중요한 영향을 미친 것으로 이해된다.

또한 Table 4에 나타낸 FGI-XI (B)의 값은 느티나무(0.02)이 가장 낮고, 나왕(2.26)이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 FGI-X (B) 값의 결과에 대하여 각각 시간평균 및 질량 기반의 MARHE와 SEA 값이 가장 중요한 영향을 미친 것으로 이해된다.

Table 5. Comparison of Fire Risk Rankings by Fire Risk index-XII (A) and Fire Risk Index-XII (B) of Test Specimens

Materials	FRI-XII (B)	Ranking by FRI-XII (B)	FRI-XII (A)	Ranking by FRI-XII (A)
Pine rigida	0.37	5	0.09	4
Lauan	5.14	1	4.69	1
Chest nut	0.71	3	0.19	3
Oak	0.60	4	0.02	5
Zelkova	0.00	6	0.00	6
PMMA	1.00	2	1.00	2

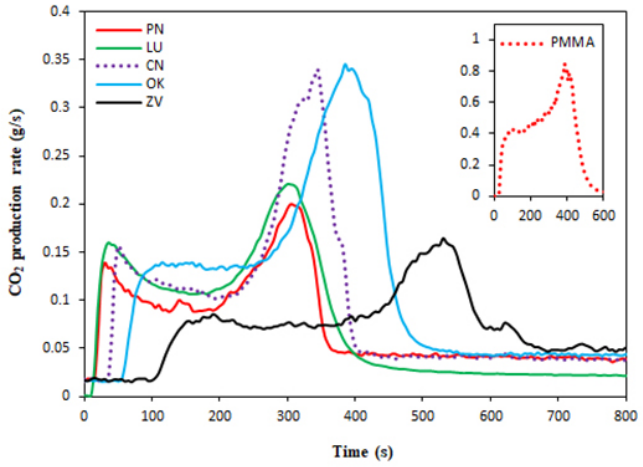


Figure 5. The CO_2 production rates (g/s) of the specimen under conditions of external radiant heat flux of 50 kW/m^2.

Acronym	
Time to ignition	TTI, s
1st_peak heat release rate	HRR_{1st_peak}, PHRR, kW/m^2
Maximum average rate of heat emission	MARHE, kW/m^2
Smoke extinction area	SEA, m^2/kg
Peak smoke production rate	SPR_{peak}, m^2/s
Time to peak smoke production rate	Time to SPR_{peak}, s
Mean carbon monoxide production rate	COP_{mean}, g/s
Mean carbon dioxide production rate	CO_2P_{mean}, g/s
Combustion resistanace time	CRT, s
Accumlated smoke generation time	ASGT, s
Fire risk index-XII (A),	FRI-XII (A)
Fire risk index-XII (B),	FRI-XII (B)

Table 5의 FRI-XII (A)에 의한 순위(Ranking)는 느티나무(0.00): 순위 6 < 굴참나무(0.02): 순위 5 < 리기다소나무(0.09): 순위 4 < 밤나무(0.19): 순위 3 < PMMA (1.00): 순위 2 < 나왕(4.69): 순위 1로 평가되었다. 이들 중에서 나왕이 화재 위험성이 가장 높은 목재로 평가되었다.

또한 Table 5의 FRI-XII (B)에 의한 순위는 느티나무(0.00): 순위 6 < 리기다소나무(0.37; 순위: 5 < 굴참나무(0.60): 순위 4 < 밤나무(0.71): 순위 3 < PMMA (1): 순위 2 < 나왕(5.14): 순위 1로 평가되었다. 이들 중에서 나왕이 화재위험성이 가장 큰 목재로 평가되었다.

결론적으로 화재위험성지수-XII (A)와 새롭게 제안된 화재위험성지수-XII (B)를 이용한 화재 위험성 순위는 각각의 방정식에 적용된 연소특성 요소에 따라 일부 영향을 받으나 가연성 물질의 화재 안전성을 종합적으로 예측 및 평가하는 유용한 방법으로 예측된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Chung's equation's-XII에 의한 화재위험성지수-XII (A)와 새롭게 제안된 화재위험성지수-XII (B)를 이용하여 가연물의 화재위험성을 평가 및 검토하였다. 사례 연구로서, ISO 5660-1에 의해 콘칼로리미터를 사용하여 목재 시편의 연소 특성을 시험하였다. 외부 열유속은 50 kW/m^{2}로 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1) 화재위험성지수-XII (A)에 의한 순위(ranking)는 느티나무(0.00): 순위 6 < 굴참나무(0.02): 순위 5 < 리기다소나무(0.09): 순위 4 < 밤나무(0.19): 순위 3 < PMMA(1.00): 순위 2 < 나왕(4.69): 순위 1로 평가되었다. 이들 중에서 나왕이 화재 위험성이 매우 큰 목재로 평가되었다.

2) 화재위험성지수-XII (B)에 의한 순위는 느티나무(0.00): 순위 6 < 리기다소나무(0.37; 순위: 5 < 굴참나무(0.60): 순위 4 < 밤나무(0.71): 순위 3 < PMMA (1.00): 순위 2 < 나왕(5.14): 순위 1로 평가되었다. 이들 중에서 나왕이 화재위험성이 가장 큰 목재로 평가 되었다.

3) FPI-X (A), -XI (A) 값에 대하여 순간 최대값 기반의 HRR_{1st_peak}와 SPR_{1st_peak}, 그리고 FPI-X (B), -XI (B) 값에 대하여 각각 시간 평균 및 질량 기반의 MARHE, SEA가 각각 중요한 영향 미친 것으로 이해된다.

4) 결론적으로 화재위험성지수-XII (A)와 새롭게 제안된 화재위험성지수-XII (B)를 이용한 화재 위험성 순위는 각각의 방정식에 적용된 연소특성에 따라 일부 영향을 미치나, 가연성 물질의 화재 안전성을 종합적으로 예측 및 평가하는 유용한 방법으로 예측된다.

References

1. 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).
2. K. W. Ragland and C. J. Rutland, Modeling thermally thick pyrolysis of wood, *Biomass Bioenergy*, **22**, 41-53 (2002)
3. G. Yuan, D. Chen, L. Yin, Z. Wang, L. Zhao, and J. Y. Wang, High efficiency chlorine removal from polyvinyl chloride (PVC) pyrolysis with a gas-liquid fluidized bed reactor, *Waste Manag.*, **34**, 1045-1050 (2014).
4. J. Floyd and J. Hodges, An approach for flux and thickness scal-

ing of cone calorimeter data for predicting the pyrolysis of materials, *Fire Technol.*, **61**, 4897-4935 (2025).
5. V. Babrauskas, Effective measurement techniques for heat, smoke and toxic fire gases, *Fire Saf. J.*, **17**, 13-26 (1991).
6. V. Babrauskas, (a) Heat of combution and potential heat. In: V. Babrauskas and S. J. Grayson (eds.). *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. In: 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).
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*, Dotoral's 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), Geneva, 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. 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).
14. Y. J. Chung, E. Jin, and J. S. You, Evaluation of smoke risk and smoke risk rating for combustible substances from fire, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 197-204 (2021).
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. 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).
18. Y. J. Chung and S. W. Jee, Fire risk assessment and review using Chung's equation-XII, *Appl. Chem. Eng.*, **36**, 410-415 (2025).
19, 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).
20. B. A-L. Östman, Smoke and Soot. In: V. Babrauskas and S. J. Grayson (eds.). Heat release in fires, 236-250, Elsevier Science Publishers, London, UK (1992).
21. J. Gray, G. J. Guggan, S. J. Grayson, and S, Kummar, New fire classification and fire test methods for the European railway industry, Interscience Communications Ltd., UK (2015).
22. Association Francaise de Normalisation, *Railway Applications Fire Protection on Rail Way Vehicles-Part 2: Requirements for Fire Beahavior of Materials and Components*, NF EN45545-2, La Plaine Saint-Denis, France (2013).

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 Researcher, Institute of Liberal Education, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea; jin_eui@hanmail.net