Appl. Chem. Eng., Vol. 37, No. 4, August 2026, 435-441
https://doi.org/10.14478/ace.2026.1047

Article

Chung's equation-IX으로부터 화재위험성지수-IX (A, B)를 이용한 가연성 물질의 화재 위험성 예측 및 검토

정영진*,**,† **· 진의*****

*강원대학교 소방방재학부, **국가안전환경원, ***강원대학교 교양교육원
(2026년 6월 15일 접수, 2026년 6월 22일 수정, 2026년 6월 22일 채택)

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

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 June 15, 2026; Revised June 22, 2026; Accepted June 22, 2026)

초 록

가연성 물질의 특성은 화재에 취약한 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 Chung's equation-IX에 의한 화재위험성지수-IX (A) [FRI-IX (A)]와 새롭게 제안된 화재위험성지수-IX (B) [FRI-IX (B)]를 이용하여 가연성 물질의 화재 위험성을 예측 및 평가하였다. 시험편은 적삼목, 전나무, 물푸레나무, 단풍나무, 오동나무, polymethyl methacrylate (PMMA)로 선택하였다. 사례 연구로서, 콘칼로리미터 시험기(ISO-5660-1)를 사용하여 열유속 50 kW에서 연소실험을 수행하였다. 평가 결과, FRI-IX (A)에 의하여 단풍나무(2.70)가 가장 낮았고, 적삼목(387.55)이 가장 높았다. 또한, FRI-IX (B)에 의하여 단풍나무(13.26)가 가장 낮았고, 적삼목(448.50)이 가장 높은 것으로 평가되었다. 즉, FRI-IX (A)에 대하여 착화시간과 체적밀도가 중요한 영향을 미쳤다. 또한 FRI-IX (B)에 대하여 polymethyl methacrylate를 제외한 최대평균열방사율과 비소화면적이 각각 중요한 영향 미친 것으로 이해된다. 결론적으로 FRI-IX (A)와 FRI-IX (B)를 이용한 화재 위험성 평가 방법은 가연성 물질의 화재 안전성을 종합적으로 예측 및 평가하는 유용한 방법으로 적용될 수 있다.

Abstract

Flammable materials have the disadvantage of being vulnerable to fire. In this study, the fire risk of combustible materials was predicted and evaluated using the fire risk index-IX (A), FRI-IX (A), and the newly proposed fire risk index-IX (B), FRI-IX (B), based on Chung's equation-IX. Western red cedar, needle fir, ash, maple, paulownia, and PMMA were selected as test specimens. As a case study, a combustion experiment was conducted at an external heat flux of 50 kW using a cone calorimeter tester (ISO-5660-1). As a result of the evaluation, the maple (2.70) was the lowest and the red cedar (387.55) was the highest according to FRI-IX (A). Furthermore, according to FRI-IX (B), the maple (13.26) was the lowest and the western red cedar (448.50) was the highest. That is, for A, the ignition time and volumetric density had an important influence. Also, for FRI-IX (B), with the exception of PMMA, it is understood that the maximum average rate of heat emission and the extinction area each had an important influence. In conclusion, the fire risk assessment method using FRI-IX (A) and FRI-IX (B) can be applied as a useful method for comprehensively predicting and evaluating the fire safety of combustible materials.

Keywords: *Fire risk index-IX (A), Fire risk index-IX (B), Chung's equation-IX, Fire risk assessment method*

1. 서 론

가연성 물질의 특성은 정도의 차이는 있으나, 화재에 취약한 단점을 가지고 있다. 화재로 인한 인적 피해는 1차로 열에 의한 화상 중심의 피해가 있으며, 유독가스에 의한 2차 피해가 있다. 화재에 의한 희생자 중에서 약 75~80%는 직접적으로 화염에 의한 것보다는 연기, 유독가스, 혹은 산소 부족에 의한 질식으로 보고되었다[1].

가연성 물질의 연소 전단계인 열분해 과정은 연소의 거동에 영향을 미치는 요소인 열, 화학 반응 및 기타 복잡한 결합인 것으로 알려져 있다[2]. 또한, 목재를 포함한 기타 가연성 물질의 연소 특성 및 연소

† 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.

모델을 구축하기 위한 연구도 진행되고 있다[3]. 화재 위험성은 가연성 물질의 가연성의 정도, 착화 특성, 열방출률, 화염 확산 및 확대, 연기의 독성 및 연기 발생 등을 포함한 연소 특성과 연관된다[4-7]. 고체 물질의 열분해 거동은 비탄화(non-charring)와 탄화(charring)의 두 가지 유형으로 나눌 수 있다. 비탄화 물질은 완전히 연소되어 잔류물을 남기지 않으며, 가연성 액체와 유사한 이론을 사용하여 모델링할 수 있다. 반면, 탄화 물질은 연소 시 비교적 상당한 양의 잔류물을 남긴다. 목재와 같은 탄화 물질의 열분해는 화학, 열, 물질 전달의 복잡한 상호작용을 한다.

목재의 복잡한 화학적 및 물리적 구조로 인해 발화 및 연소 특성 또한 복잡하다. 휘발성 물질의 질량 유량이 연료/공기 혼합물의 가연성 하한에 도달하기에 충분하면 착화(piloted ignition)가 일어난다. 이들의 연소 특성을 시험하기 위한 실험 방법들 중에 하나인 콘칼로리미터 시험법은 국제 표준으로 활용되고 있다[8]. 이 시험법은 유기성 가연물이 연소될 때 산소 1 kg이 소모되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 것을 바탕으로 하고 있다[9].

또한 연기는 주어진 공간 조건에서 빛이 투과하는 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 Beer-Bouguer-Lambert의 실험을 기본 원리로 하여 콘칼로리미터 시험법으로 측정하고 있다[9]. 연기는 연소 대상물에 대한 열분해로부터 발생되는 가연성 기체이며, 복사 냉각으로 인한 미연소 그을음은 불완전 연소 형태로 불꽃 연소 영역에서 연기로 된다[10]. 열방출률은 화재나 연소 과정에서 단위 시간당 방출되는 열량으로서 목재의 조성 및 수분 함량, 리그닌 함량이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[11], 따라서 목재의 연소 특성에 근거한 화재 위험성을 콘칼로리미터법을 이용하여 검토할 필요성이 있다.

모든 다양한 화재 유형에 따른 화재 거동은 단순한 화재 시험이 포괄하지 못한다. 그러므로 이들에 대한 대책을 강구하기 위해서는 가연물에 대한 착화 방지 및 억제, 화재 전파 및 확대에 대한 방화장벽 등의 역할이 포함되어야 한다. 이러한 방법들에 대하여 순간적인 시간 변화에 대한 열 및 연기의 특성 값은 단일 값으로서 화재 현상을 기술하기에는 한계가 있다.

이러한 단점을 개선하기 위한 대책의 일환으로 Chung's equations 1, 2, 3[12] 및 Chung's eqution-V, Chung's equation-VI를 연기 위험성 평가 방법으로 정립한 바 있으며[13], 또한 보다 정량적이고 정밀한 방법으로 화재 위험성 평가의 확장성을 구현하기 위해 Chung's equations-II, Chung's equations-III, Chung's equation-IV를 정립하였다[14]. 이러한 선행 연구는 열 및 연기 특성을 고려하여 화재 위험성을 예측 및 평가하는 방법으로 각 지수간의 관계를 확장하여 화재 위험성을 종합적으로 평가하는 방법이다.

그러나 선행 연구에서는 화재 시 발생하는 치명적인 유해 가스인 CO 가스와 CO_2 가스를 화재 위험성 평가 방정식에 포함하지 않고 별도로 평가하여왔다. 따라서 이를 보완하기 위해 선행 연구에서는 Chung's equation-IX에 의한 화재위험성지수-IX (fire risk index-IX, FRI-IX)를 정립한 바 있다. 그리고 계산된 화재위험성지수-IX (FRI-IX)에 따라 화재위험성등급(fire risk rating, FRR)을 구분하였다[15].

본 연구에서는 건자재 및 내장재로 주로 사용되고 있는 적삼목, 전나무, 물푸레나무, 단풍나무와 오동나무를 시험재료로 사용하였다. Table 1, 3에 선행 연구에 의한 데이터들을 참고하여[16], 그리고 Chung's equations-IX에 의한 화재위험성지수-IX (A)[15]와 새로 제안된 화재위험성지수-IX (B)를 가연성 물질의 화재위험성을 종합적으로 비교 검토하였다.

Table 1. The Moisture Content and Volumetric Density of Each Piece of Wood before the Combustion Test

Materials	Classification	Moisture content (%)	Volumetric density (kg/m^3)
Western red cedar	Softwood	9.0	293.98
Needle fir	Softwood	12.3	363.24
Ash	Hardwood	9.3	576.84
Maple	Hardwood	7.5	633.78
Paulownia	Hardwood	7.0	221.86
PMMA	-	-	1180.0

2. 실험 및 방법

2.1. 콘칼로리미터 시험

시험 재료의 체적 밀도와 수분 함량은 Table 1에 나타내었다[16]. 연소 특성에 대한 시험은 ISO 5660-1의 방법에 의하여 Fire Testing Technology CO.의 Dual cone calorimeter를 사용하여, 실제 화재 시와 유사한 50 kW/m^2의 외부 열유속(external heat flux) 조건에서 수행하였다[9]. 사용한 시험편의 두께는 10 mm이고 시편은 100 mm × 100 mm ($\pm^{0}_{2}$) 크기로 하였으며, 연소 실험 후 화재 위험성 예측 및 평가에 필요한 화재 위험성 지수를 구하였다.

2.2. 화재 위험성 평가 방법

평가 방법 (A)는 물리적으로 순간 최대값 기반인 첫 번째 최대연기발생률(1^{st}_peak smoke production rate, SPR_{1st_peak})과 첫 번째 최대열방출률(1^{st}_peak heat release rate, HRR_{1st_peak})을 중요 변수로 선택하였다. 반면, 방법 (B)는 각각 질량 및 시간 평균 기반인 비소화면적(smoke extinction area, SEA)과 최대평균열방사율(maximum average rate of heat emission, MARHE)을 중요인자로 대체하여 적용하였다. 또한 콘 칼로리미터 시험에서 우수한 재현성과 반복성을 나타내는 PMMA를 화재 위험성 지수(Fire Risk Index) 계산을 위한 비교 기준 물질로 사용하였다. 가연성 물질의 화재위험성을 예측 및 평가하기 위하여 사용한 Chung's equation-IX의 방정식은 아래와 같다[15].

2.2.1. 화재성능지수-VII (FPI-VII) 및 화재성장지수-VII (FGI-VII)

FPI-VII (A), FPI-VIII (A)는 방정식 (1)과 (2)와 같다[15].

FPI-VII (A), 식 (1)은 착화시간[time to ignition, TTI (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.

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. 즉, SPR_{peak} (m^2/s)는 화재 초기 또는 연소 과정 중 단위 시간당 발생하는 연기의 양이 가장 높은 수준에 도달했을 때의 수치를 의미한다. 그리고 Table 1의 PHRR (kW/m^2)은 화재 시 재료가 연소하면서 순간적으로 방출하는 최대 열량을 의미하는 것으로서, 이는 재료가 가장 강렬하게 타오를 때의 화재 크기를 나타내며, 화재 성장 속도와 위험성을 평가하는 핵심 지표이다. 이를 본 연구에서는 FPI-VII (A)로 정하였으며, 이것은 물리적으로 순간 최대값에 기반한 평가 방법이다.

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

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

Method (B): SPR_{peak} (m^2/s)를 SEA (m^2/kg)로 대체함. PHRR (kW/m^2)을 MARHE (kW/m^2)로 대체함.

그러나 또 다른 각도로 화재 위험성을 평가할 필요성이 있으므로, 이를 대체하기 위하여 SPR_{peak} (m^2/s)은 가연성 물질의 손실된 단위 질량당 발생하는 연기량을 나타내는 비소화면적[(smoke extinction area, SEA (m^2/kg)]을 적용하였다. SEA는 SPR을 질량손실률[mass loss rate, MLR (g/s)]로 나눈 것으로, 연기 관련 지표로 널리 연구되고 있다[17]. 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 Figure 2의 최대평균열방사율[(maximum average rate of heat emission, MARHE (kW/m^2)]을 적용하고 이를 FPI-VII (B)로 정하였다. 이것은 각각 질량 및 시간 평균에 기반한 평가 방법이다. MARHE은 총열방출률[total heat release, THR (MJ/m^2)]을 시간으로 나눈 값으로 정의된다[18,19].

MARHE는 착화 시점부터 연소 종료까지의 전 구간에서 계산된 시간 평균 열방출율(ARHE)의 최대값을 의미한다. 이는 순간적으로 격렬하게 변동하는 HRR 피크값의 한계를 보완하고, 시간 누적 개념을 도입함으로써 재료의 전반적인 화재 확산 위험성을 보다 안정적이고 객관적으로 평가할 수 있는 지표를 제공한다. 특히 $MARHE_{2nd}$ 값은 실제 화재 성장기 동안의 평균적인 화재 위험도를 대변하는 최대값으로서, 순간적인 화력의 세기보다는 화재가 얼마나 지속적으로 위험을 초래하는가라는 시간적 특성을 반영한다.

FPI-VIII (A)은 PMMA를 기준 물질로 사용하였으며, 식 (2)에 제시되었다. FPI-VIII은 FPI-VII 값을 $FPI-VII_{[PMMA]}$의 값으로 나눈 값으로 정의된다[15]. FPI-VIII이 커질수록 화재 확대로 이어지는 시간이 지연되므로 화재 위험성이 낮아진다. 이 방정식은 무차원으로 모든 소재에 대한 우선순위를 정할 수 있다. 화재 초기 단계의 중요성을 고려하여 SPR과 PHRR의 제1차 최대값을 적용하였다.

2.2.2. 화재성장지수-VII (FGI-VII) 및 화재성장지수-VIII (FGI-VIII)의 정의

방정식 FGI-VII (A), FGI-VIII (A)은 방정식 (3), (4)와 같이 나타내었다[15]. FGI-VII (A), 식 (3)은 SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), COP_{mean} (g/s) / CO_2P_{mean} (g/s)의 세 가지 중요한 연소특성 요소를 곱하여 얻은 값을 제1차 최대연기발생률에 도달하는 시간[time to peak smoke production rate, Time to SPR_{peak} (s)]로 나눈 것으로 나타내었다. 특별히 비탄화 물질의 연소는 고체 또는 탄화성 물질과 패턴이 다르기 때문에 SPR_{1st_peak}의 위치는 한 곳만 존재한다.

또한 FGI-VII (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-VII (B)로 정하였다. 이어서 FGI-VIII (B)은 PMMA를 기준 물질로 사용하였으며, 방정식 (4)와 같이 정의하였다.

FGI-VIII (B)은 FGI-VII (B) 값을 $FGI-VII_{[PMMA]}$ (B)의 값으로 나눈 값으로 정의된다[15]. FGI-VIII (B)이 커질수록 화재 확대로 이어지는 시간이 짧아지므로 화재 위험성이 높아진다. 이 방정식은 무차원으로 모든 소재에 대한 우선순위를 정할 수 있다. 화재 전체 단계의 중요성을 고려하여 가연물의 중량에 기초한 SEA와 MRAHE의 제2차 최대값을 적용하였다.

2.2.3. 화재위험지수-IX (A) [FRI-IX (A)]와 화재위험지수-IX (B) [FRI-IX (B)]에 의한 종합적 화재 위험성 평가

방정식 FRI-IX (A) [15], FRI-IX (B)은 방정식 (5), (6)과 같이 나타내었다. FRI-IX (A), 식 (5)는 FGI-VIII (A)를 FPI-VIII (A)로 나눈 것으로 정의된다[15]. 또한 FRI-IX (B), 식 (6)은 FGI-VIII (B)를 FPI-VIII (B)로 나눈 것으로 정의된다. FRI-IX (A, B)는 FGI-VIII (A, B)에 비례하고 FPI-VIII (A, B)에 반비례한다.

FGI-VIII (A, B) 값이 높을수록 화재 위험성이 높고 반대로 FPI-VIII (A, B) 값이 높을수록 화재 위험성이 낮아짐을 의미한다. 이는 화재가 확대됨에 따라 화재 안정성이 감소하는 것과 같다. FPI-VIII (A, B) 및 FGI-VIII (A, B)은 측정 데이터를 사용하여 계산하여 얻었다. FRI-IX (A, B)은 콘칼로리미터 실험에서 얻은 데이터의 계산에 의한 소재에 대한 화재 위험성의 종합적인 평가로 적용될 수 있다. 즉, Table 2에 보여준 바와 같이 화재 위험성을 등급별로 분류하여 종

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

$$FGI-VIII(A)=\frac{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}(g/s)/CO_2P_{mean}(g/s)}{Time\ to\ SPR_{peak(S)}}\Big/\left[\frac{SPR_{peak}(m^2/s)\cdot PHRR(kW/m^2)\cdot COP_{mean}(g/s)/CO_2P_{mean}(g/s)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)}\right]_{PMMA} \quad (4)$$

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

Table 2. Criteria for Fire Risk Ranking Assessment by Fire Risk Index-IX (A)

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

합적으로 예측 및 평가하였다.

$$FRI-IX(A) = \frac{FGI-VIII(A)}{FPI-VIII(A)} \quad (5)$$

$$FRI-IX(B) = \frac{FGI-VIII(B)}{FPI-VIII(B)} \quad (6)$$

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 포함한4개의 중요한 연소 특성을 연관지어 FPI-IX (A)을 정립하였다. 그리고 화재 위험성 평가에 적용하였다[15].

그러나 이들을 또 다른 방법으로 검증할 필요성이 있으므로, FRI-VII (A)와 관련된 연소 특성 중 핵심 요소인 HRR_{1st_peak}를 MARHE로, 그리고 SPR_{1st_peak}를 대체하여 새로운 방정식 FPI-VII (B)를 제안하였다. Table 3에 선행 연구의 데이터를 참고하였다[16]. 연소 대상 물질은 그 자체의 연소 조건에 따라 연소율의 차이가 다르게 나타난다. 또한 비탄화성 물질은 탄화성 물질과 다르게 연소할 때 HRR_{1st_peak}만 나타낸다.

본 연구에서 Figure 1, 3, 4, 그리고 5와 Table 3에 나타낸 TTI (s), SPR_{peak}(m^2/s), PHRR (kW/m^2), 그리고 COP_{mean} / CO_2P_{mean}과 조합하여 FPI-VII (A)을 계산하였고, Table 4에 제시하였다. FPI-VII (A)의 값은 적삼목(5.87 s^2/kW)가 가장 낮고, 단풍나무(93.35 s^2/kW)가 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 단풍나무가 화재 위험성이 가장 낮은 것으로 이해된다. 이것은 단풍나무가 연소 시에 TTI (16 s)가 가장 길고, COP_{mean} / CO_2P_{mean} (0.0406)가 낮기 때문이다. 단풍나무는 Table 1에 나타낸 바와 같이 가장 낮은 함수량(7.5%)에도 불구하고, 그의 높은 체적밀도(633.78 kg/m^3)의 영향이 큰 것으로 적삼목의 체적밀도(293.98 kg/m^3)와 비교된다. 이는 화재 위험성이 시험편의 체적 밀도에 의존하여 낮아지는 것과 일치한다[20].

그리고 모든 연소성 물질의 화재 위험성을 표준화하기 위하여 식 (2)와 같이 FPI-VIII (A)을 정립하였[15]. 즉, 연소성 물질의 FPI-VII (A)의 값을 PMMA를 기준 물질로 한 FPI-VIII (A) 값을 Table 3에 제시하였다. FPI VIII (A)의 값은 적삼목(0.11)이 가장 낮고, 단풍나무(1.76)가 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 FPI-VII (A) 값의 결과와 맥을 같이 하는 것으로 이해된다.

또한 Figure 1, 3, 4, 그리고 5와 Table 3에 나타낸 $TSPR_{1st_peak}$ (s),

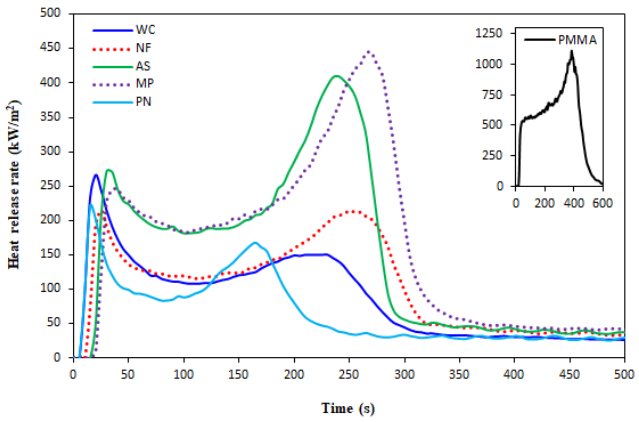


Figure 1. The heat release rate by combustion test at external radiant heat flux of kW/m^2.

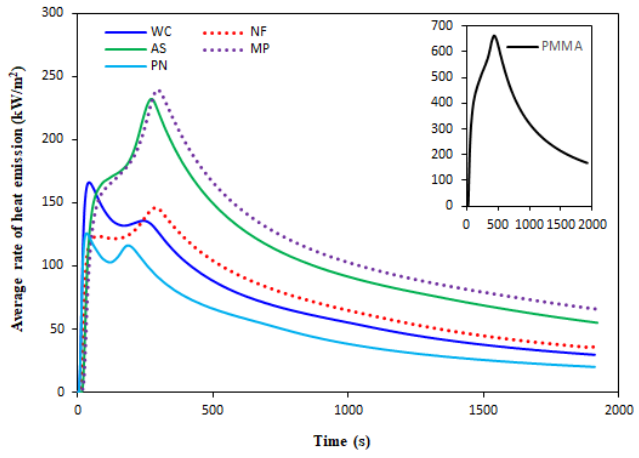


Figure 2. The average rate of heat emission by combustion test at the external radiation heat flux of 50 kW/m^2.

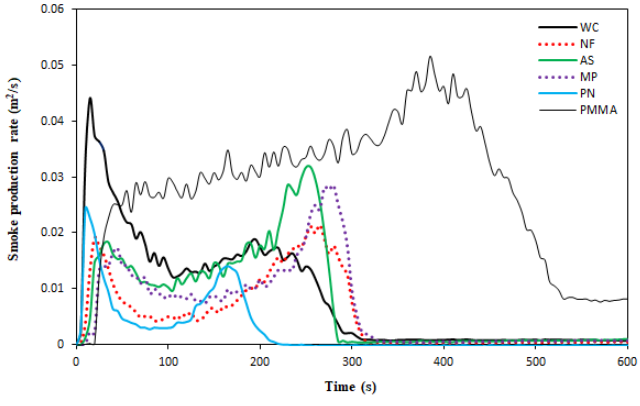


Figure 3. The smoke production rate by combustion test at the external radiant heat flux of 50 kW/m^2.

SPR_{peak} (m^2/s), PHRR (kW/m^2), 그리고 COP_{mean} / CO_2P_{mean}의 네 가지 요소를 조합하여 FGI-VII (A)을 계산하였고, Table 4에 제시하였다[15]. 그리고 모든 시험재료의 기준 물질로 PMMA를 사용하였다.

Table 4에 나타낸 FGI-VII (A) 값은 PMMA (0.0008)를 제외하고 적삼목(0.0341)이 가장 높고, 단풍나무(0.0038)이 가장 낮게 나타났다.

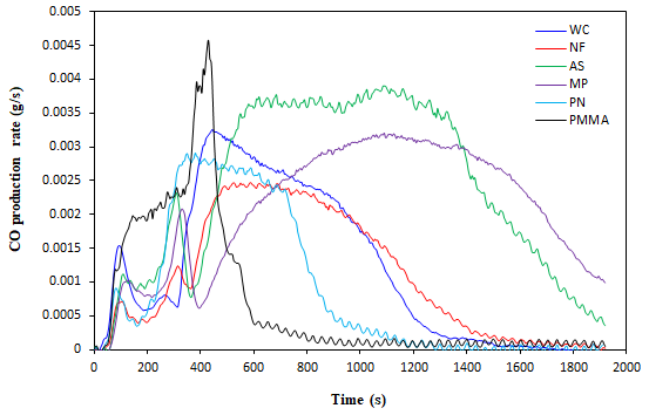


Figure 4. The CO production rate (g/s) by combustion test at the radiation heat flux of 50 kW/m^2.

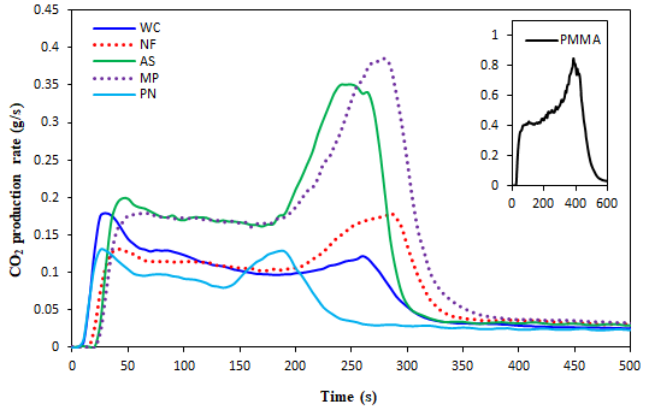


Figure 5. The CO_2 production rate (g/s) curve by combustion test at the radiation heat flux of 50 kW/m^2.

이어서 FGI-VIII (A) 값은 PMMA (1.00)를 제외하고 적삼목(42.63)가 가장 높고, 단풍나무(4.75)이 가장 낮게 나타났다. 이는 FGI-VII (A)과 FGI-VIII (A)이 맥을 같이 하는 것으로 보인다. 즉, 이들을 종합하면 FPI-VIII (A)과 FGI-VIII (A)에 의해 화재 위험성을 예측한 결과 적삼목이 화재 위험성이 가장 높았으며, 단풍나무가 가장 낮은 물질로 예측되었다.

결과적으로 연소 대상 물질들은 FGI-VIII (A) 값이 커질수록 화재 위험성은 증가하고 화재 안전성은 감소함을 예측할 수 있었다. FPI-VIII (A) 및 FGI-VIII (A) 값은 연소 시험에 의하여 측정된 자료를 사용하여 얻어진 무차원 계수로서 연소성 재료의 화재 안전성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

식 (5)에 보여준 FRI-IX (A)은 FGI-VIII (A)을 FPI-VIII (A)으로 나눈 것으로 정의하였으며, 화재 위험성을 예측하기 위하여 적용될 수 있는 최종적인 평가지수로서, Table 2에 FRR을 제시하였다. 이것은 FRI-IX (A)의 5~30 또는 그 이상의 큰 값을 5단위 간격으로 하여 연소 대상 물질들의 화재 안전성을 7등급으로 분류한 화재 위험성 등급 평가 방법이다. 화재위험성 등급은 A~G 등급으로 분류하였으며 이것은 화재안전성 매우 높음(Very high)~매우 낮음(Very low)에 해당한다. 화재위험성 등급이 낮을수록(A등급) 화재안전성은 높아진다(Very high).

Table 4에 화재위험성지수-IX (A)를 이용한 FRR은 적삼목(387.55): G등급(순위 1), 오동나무(128.70): G등급(순위 2), 전나무(8.04): B등급

Table 3. Combustion Characteristics of Wood Specimens at the External Heat flux of 50 kW/m^2

Materials	[a]TTI (s)	[b]HRR_{1st_peak} (kW/m^2) / at time (s)	[c]SPR_{1st_peak} (m^2/s)	[d]MARHE (kW/m^2) / at Time (s)
Western red cedar	3	266.46 / 20	0.0441	135.85 / 245
Needle fir	9	214.96 / 25	0.0191	146.10 / 290
Ash	15	271.93 / 30	0.0183	232.15 / 275
Maple	16	245.51 / 40	0.0172	239.37 / 295
Paulownia	4	201.76 / 20	0.0274	116.29 / 185
PMMA	17	1110.56 / 385	0.0516	662.62 / 435

Materials	[e]$TSPR_{1st_peak}$ (s)	[f]SEA (m^2/kg)	COP_{mean} (g/s) / CO_2P_{mean} (g/s)
Western red cedar	15	185.59	0.0435
Needle fir	20	97.10	0.0361
Ash	35	100.68	0.0504
Maple	45	78.08	0.0406
Paulownia	10	67.48	0.0503
PMMA	385	169.58	0.0056

[a]Time to ignition; [b]1st peak heat release rate; [c]1st peak smoke production rate; [d]maximum average rate of heat emission [e]Time to 1st peak smoke production rate; [f]smoke extinction area

Table 4. Fire Risk Index-IX (A) of Wood Specimens and Ranking

Materials	FPI-VII (A) (s^2/kW)	FGI-VII (A) (kW/s^2)	FPI-VIII (A)	FGI-VIII (A)	FRI-IX (A) (Ranking)
Western red cedar	5.87	0.0341	0.11	42.63	387.55 (1)
Needle fir	60.73	0.0074	1.15	9.25	8.04 (3)
Ash	59.81	0.0072	1.13	9.00	7.96 (4)
Maple	93.35	0.0038	1.76	4.75	2.70 (5)
Paulownia	14.39	0.0278	0.27	34.75	128.70 (2)
PMMA	52.98	0.0008	1.00	1.00	1.00 (6)

Table 5. Fire Risk Index-IX (B) of Wood Specimens and Ranking

Materials	FPI-VII (B) (s・kg/kW)	FGI-VII (B) (kW/s・kg)	FPI-VIII (B)	FGI-VIII (B)	FRI-IX (B) (Ranking)
Western red cedar	0.0027	73.11	0.10	44.85	448.50 (1)
Needle fir	0.0176	25.61	0.65	15.71	24.17 (4)
Ash	0.0127	33.66	0.47	20.65	43.94 (3)
Maple	0.0211	16.86	0.78	10.34	13.26 (5)
Paulownia	0.0101	39.47	0.37	24.21	65.43 (2)
PMMA	0.0270	1.63	1.00	1.00	1.00 (6)

(순위 3), 물푸레나무(7.96): B등급(순위 4), 단풍나무(2.70): A등급(순위 5), PMMA (1.00): A등급(순위 6)으로 나타났다.

또한 FRI-IX (A)의 제1차 최대열방출률(HRR_{1st_peak})을 Figure 2의 최

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
1st_Peak smoke production rate	SPR_{1st_peak}, m^2/s
Smoke extinction area	SEA, m^2/kg
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
Fire risk index-IX (A)	FRI-IX (A)
Fire risk index-IX (B)	FRI-IX (B)

대평균열방사율(MARHE)로 제1차 최대연기발생률(SPR_{peak}, m^2/s)을 비소화면적(SEA, m^2/kg)으로 대체한 FRI-IX (B)는 Table 5에 다음과 같은 순서로 평가되었다: 적삼목(448.50): 순위 1, 오동나무(65.43): 순위 2, 물푸레나무(43.94): 순위 3, 전나무(24.17): 순위 4, 단풍나무(13.26): 순위 5, PMMA(1.00): 순위 6.

평가결과, Table 4와 5에 나타낸 바와 같이 FRI-IX (A)와 FRI-IX (B)는 FRI-IX (B)에 의한 계산상의 수치에 대한 표현은 다르지만, 화재 위험성 순위가 대부분 유사하였다. 즉 이들 중에서 적삼목은 화재 위험성이 매우 높고, PMMA는 가장 낮게 평가되었다. 즉, FRI-IX (A) 값에 대하여 착화시간(TTI)과 체적밀도가 중요한 영향을 미쳤다.

또한 FRI-IX (B) 값에 대하여 PMMA를 제외한 MARHE와 SEA가 각각 중요한 영향을 미친 것으로 이해된다.

따라서 FPI-VII (A, B)과 FPI-VIII (A, B)이 감소하고, 또한 FGI-VII (A, B)과 FGI-VIII (A, B)이 증가함으로써 FRI-IX (A, B)가 높아지는 것으로 이해된다. 이것은 화재 위험성이 높아진다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 화재위험성지수-IX (A, B)가 가연성 재료의 화재 위험성을 예측하고 화재 안전성 등급을 체계적으로 결정하는 데 신뢰할 수 있는 방법을 제공하여 준다.

4. 결 론

본 연구에서는 Chung's equation-IX에 의한 화재위험성지수-IX (A)와 새롭게 제안된 화재위험성지수-IX (B)를 이용하여 가연성 물질의 화재 위험성을 예측 및 평가하였다.

시험편은 적삼목, 전나무, 물푸레나무, 단풍나무, 오동나무, PMMA를 시험편으로 선정하였다. 시험 방법은 콘칼로리미터 시험기(ISO-5660-1)를 사용하였다. 평가 결과 다음과 같았다.

1) FRI-IX (A)에 의한 화재 위험성은 적삼목(387.55): G등급(순위 1), 오동나무(128.70): G등급(순위 2), 전나무(8.04): B등급(순위 3), 물푸레나무(7.96): B등급(순위 4), 단풍나무(2.70): A등급(순위 5), PMMA(1.00): A등급(순위 6)으로 나타났다.

2) FRI-IX (B)에 의한 화재 위험성은 적삼목(448.50): 순위 1, 오동나무(65.43): 순위 2, 물푸레나무(43.94): 순위 3, 전나무(24.17): 순위 4, 단풍나무(13.26): 순위 5, PMMA(1.00): 순위 6으로 나타났다.

3) 즉, FRI-IX (A)값에 대하여 착화시간(TTI)과 체적밀도가 중요한 영향을 미쳤다, 또한 FRI-IX (B) 값에 대하여 PMMA를 제외한 MARHE와 SEA가 각각 중요한 영향을 미친 것으로 이해된다.

4) 결론적으로 서로 평가 관점이 다른 FRI-IX (A)와 FRI-IX (B)를 이용한 화재 위험성 평가 방법은 가연성 물질의 화재 안전성을 종합적으로 예측 및 평가하는 유용한 방법으로 적용될 수 있다.

References

1. R. H. White and M. A. Dietenberger, *Fire Safety of Wood Construction: 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. A. Paavola, D. Sukhomlinov, and S. Hostikka, Modelling charring and burning of supruce and pine woods during pyrolysis, smoldering and flaming, *Fire Technol.*, **59**, 2751-2786 (2023).
4. V. Babrauskas, Effective measurement techniques for heat, smoke and toxic fire gases, *Fire Saf. J.*, **17**, 13-26 (1991).
5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. M. Janssens, *Fundamental Thermophysical Characteristics of Wood and Their Role in Enclosure Fire Growth*, Doctoral Thesis, University of Gent, Ghent, Belgium (1991).
9. 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).
10. M. A. Delichatsios, Smoke yields from turbulent buoyant jet flames, *Fire Saf. J.*, **20**, 299-311 (1993).
11. 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).
12. 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).
13. Y. J. Chung and E. Jin, Risk assessment of smoke generated during combustion for some wood, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 373-380 (2022).
14. 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).
15. 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).
16. Y. J. Chung and E. Jin, Risk Assessment of smoke generated during combution for some wood, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 373-380 (2022).
17. B. A-L. Östman, Smoke and Soot. In: V. Babrauskas, S. J. Grayson (eds.). *Heat Release in Fire*, 236-245, Elsevier Science Publishers, London, UK (1992).

18. 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).
19. Association Francaise de Normalisation, *Railway Applications fire protection on Rail Way Vehicles-Part 2: Requirements for Fire Behavior of Materials and Components*, NF EN45545-2, La Plaine Saint-Denis, France (2013).
20. J. D. Dehaan, *Kirk's Fire Investigation*, 5th ed., 84-112, Pearᵵson, London, England (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 Researcher, Institute of Liberal Education, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea; jin_eui@hanmail.net