

화재 시 가연성 물질의 연기 위험성 평가

정영진[†] · 진의*

강원대학교 소방방재공학과, *강원대학교 소방방재연구센터
(2020년 3월 19일 접수, 2020년 4월 8일 심사, 2020년 4월 10일 채택)

Assessment of Smoke Risk of Combustible Materials in Fire

Yeong-Jin Chung[†] and Eui Jin*

Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok-si, Gangwon-do 25949, Korea
*Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok-si, Gangwon-do 25913, Korea
(Received March 19, 2020; Revised April 8, 2020; Accepted April 10, 2020)

초 록

본 연구는 건자재용 목재의 연기 유해성평가에 대하여 연기성능지수-II (SPI-II), 연기성장지수-II (SGI-II)를 중심으로 조사하였다. 시험편은 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송을 사용하였다. 연기 특성은 시험편 목재에 대하여 콘칼로리미터 (ISO 5660-1) 장비를 이용하여 조사하였다. 연소반응 후 측정된 연기성능지수-II는 적송을 기준으로 1.31~2.15배 증가하였다. 연기성장지수-II에 의한 화재위험성은 가문비나무, 나왕, 삼나무, 적송의 순서로 증가하였다. 연기성장지수-II는 삼나무를 기준으로 1.18~2.55배 증가하였다. 연기성장지수-II에 의한 화재위험성은 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송의 순서로 높아졌다. CO 평균농도는 59~133 ppm이었으며 이 결과는 미국직업안전위생관리국(occupational safety and health administration, OSHA)의 허용기준(permissible exposure limits, PEL)인 50 ppm 보다 높게 나타났다. 결론적으로 적송과 같이 휘발성 유기물질을 다량 함유한 목재는 연기성능지수-II가 낮고, 연기성장지수-II가 높으므로 화재로 인한 연기유해성이 높은 것으로 이해된다.

Abstract

The smoke hazard assessment of building materials focusing on smoke performance index-II (SPI-II) and smoke growth index-II (SGI-II) was investigated. The test species used were Japanese cedar, spruce, lauan, and red pine. The smoke characteristics of wood specimen were investigated using a cone calorimeter (ISO 5660-1). SPI-II was measured after the combustion reaction increased by 1.31~2.15 times based on red pine. The fire risk by SPI-II increased in the order of spruce, lauan, Japanese ceda, and red pine. SGI-II increased by 1.18~2.55 times compared to that of Japanese ceda. The fire risk caused by SGI-II increased in the order of Japanese ceda, spruce, lauan, and red pine. CO_{mean} concentrations were ranged from 58 to 133 ppm, which was higher than permissible exposure limits of the occupational safety and health administration (OSHA), 50 ppm. Therefore, woods such as red pine containing various volatile organic substances, were considered to be highly smoke hazardous due to low SPI-II and high SGI-II.

Keywords: Wood species, Smoke performance index-II (SPI-II), Smoke growth index-II (SGI-II), CO_{mean} concentrations

1. 서 론

목재는 미적인 외관과 우수한 물리·화학적 성질로 인하여 일반 가정주택에서부터 주거용 중형 건축물의 건축 재료로서 주로 널리 사용되고 있다. 그러나 다른 건축 재료들에 비하여 화재에 취약성을 가지고 있다. 목재와 같은 가연물은 연소 시 발생하는 연소가스와 연기에

의한 피해도 많이 발생한다. 특히, 연기는 화재발생 시 인명피해에 있어서 제일 큰 비중을 차지한다[1].

따라서 이들 목재의 가연성에 대한 문제점을 보완하기 위해 국내·외적으로 화재성능을 기반으로 한 법규 등을 제정·시행하고 있으며, 목재의 연소속도를 예측하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다[2].

이에 대한 선행연구를 살펴보면 Grexa은 일인산 암모늄과 붕산으로 난연 처리한 목재에 열과 연기의 특성 중 일부를 선정하여 평가한 바 있다[3]. 그러나 열 특성 중 열방출률로만 평가하는 것은 한계가 있다고 판단된다.

Spearpoint와 Quintiere은 목재에 대해 높은 열유속(heat flux)과 낮은 열유속을 비교하여 콘칼로리미터 실험을 진행하였고, 적분모델을 이용해 임계 열유속을 계산하여 나타냈다[4].

[†] Corresponding Author: Kangwon National University,
Department of Fire Protection Engineering, Samcheok-si, Gangwon-do 25949,
Korea
Tel: +82-33-540-3121 e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

Boonmee와 Quintiere는 콘칼로리미터를 이용하여 나무결 방향 또는 그의 수직방향으로 하여 복사열 속에 노출될 때 수직방향으로 목재의 백열 및 염열착화를 연구하였다[5]. 이론적인 착화 모델은 표면의 숯연소를 포함한 목재의 열분해에 대하여 개발되어졌다.

따라서 다양한 목재 및 가연성 물질의 연소특성과 화재위험 특성 규명에 관한 지속적인 연구가 필요하다고 판단되어 일부 목재 재료를 대상으로 목재의 화재위험 특성을 평가하고자 한다.

화재 시 물질의 열분해로 인해 생성되는 연기량은 빛의 흡수에 의해 측정되고, 그것은 탄소를 포함한 입자, 액체입자(타르), 무기입자, 증기 등을 포함한다. 화재 시 가연성 재료의 비 열적 유해 요소는 연기, 냄새, 부식, 독성 등에 의한 것이다. 이러한 비 열적 유해 요인으로 인한 화재 피해는 화염에 직접 노출되는 것보다 피해자들의 약 75~80%가 산소결핍과 연기 및 독성가스 등의 흡입에 의한 것으로 밝혀졌다[6]. 목재의 연소는 일산화탄소(carbon monoxide, CO), 휘발성 유기 화합물(volatile organic compounds, VOC) 및 다환성 방향족 탄화수소(polycyclic aromatics hydrocarbons, PAH)와 같은 일부 독성 물질이 중요한 독성 배출원으로 알려져 있다. 이들은 모두 불완전 연소로 인한 생성물이고 다환성 방향족 탄화수소는 발암성 화합물로 밝혀진 이후 널리 연구되고 있다. 불완전 연소는 니트로-PAH, 옥시-PAH 및 아자렌과 같은 PAH 유도체도 생성한다[7-9]. 이러한 독성 가스의 배출은 화재 조건과 재료 자체의 열분해에 영향을 받는다.

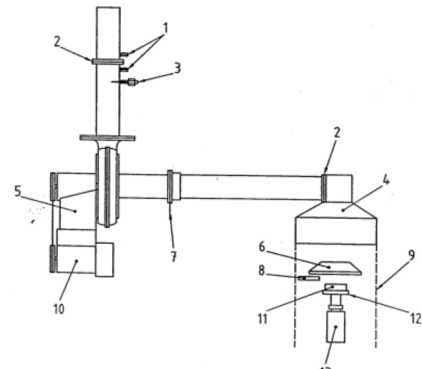
콘칼로리미터를 이용한 연기측정 시험방법은 기본원리가 Beer-Bourguer-Lambert 법칙이다[10]. 화재동안 발생된 연기는 사람의 가시도를 감소시키기 때문에 탈출하는 데에 문제가 있으며 배출된 기체는 부식성이기 때문에 인체에 치명적인 유해한 위험성을 안고 있다. 플래시오버에 도달하는 대부분의 일반적인 화재는 화상의 유무와 무관하게 사람에게 유해한 농도의 일산화탄소를 발생시킨다. 생성된 독성가스 및 연기는 사람에게 매우 치명적이므로 집중적으로 연구할 필요성이 있다. 연기생성을 나타내는 척도로 연기발생률, 총연기방출률, 연기인자, 비감쇠면적 등이 사용되고 있지만[11-13] 이와 같은 방법은 시간이 변화됨에 따른 제한된 방법으로써 연기발생에 대한 정량적인 평가가 미흡하고 연기 유해성 평가를 구현하기에는 아직 충분하지 못한 점이 많다.

저자들은 Chung's equations에 의한 연기성장지수를 이용하여 연기 유해성 평가를 기 보고한 바 있다[14]. 이것은 화재초기 연기유해성을 제시하기 위한 것으로 새로운 세 가지 연기지수를 바탕으로 하여 지수간의 상관관계를 확장시킴으로써 연기등급을 종합적으로 평가하기 위한 기초 자료로 사용하기 위함이다. 그러나 본 연구에서는 더욱 정량적이고 정밀한 연기 유해성 평가의 확장성을 구현하기 위해 새로운 Chung's equations II인 연기성능지수-II (smoke performance index-II, SPI-II), 연기성장지수-II (smoke growth index-II, SGI-II)를 고안하여 적용하고자 한다.

본 연구의 목적은 건자재 및 내장재로 주로 사용되고 있는 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송의 연소특성에 대하여 새로운 연기관련 평가방법인 연기성능지수-II 및 연기성장지수-II를 고안하여 일반 목재 및 가연성 물질의 화재 시 연기위험성을 평가하고자 하였다. 따라서 화재 시에 목재, 플라스틱, 난연 처리된 물질, 섬유 등의 연기발생에 대하여 화재위험성평가 방법으로 이용하고, 화재 시물레이션 데이터의 기초 자료로 활용하고자 한다.

Table 1. The Mean Density and Moisture Content of Each Wood[16]

	Japanese cedar	Spruce	Lauan	Red pine
Moisture content (%)	8.6	10.7	8.8	9.9
Mean density (kg/m ³)	279.1	510.9	542.5	607.4



1. Pressure ports, 2. Orifice plate, 3. Thermocouple, 4. Hood, 5. Blower, 6. Heater, 7. Gas sampling ring probe, 8. Spark plug, 9. Optional screens, 10. Blower motor, 11. Retainer frame and specimen, 12. Specimen holder (located on stack centreline), 13. Weighing device

Figure 1. Schematic diagram of cone calorimeter[10].

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 시험편은 삼나무(Japanese ceda), 가문비나무(Spruce), 나왕(Lauan), 적송(Red pine)의 순수한 목재를 구입하여 두께 10 mm로 별도의 가공처리 없이 시험 규격의 시편 크기에 맞게 사용하였다.

수분함량은 일정량의 시료를 105 °C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시료의 중량을 4 h 간격으로 더 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식을 이용하여 계산하였다[15].

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

Wm: 함수율을 구하고자 하는 목재편의 중량(g)

Wd: 건조시킨 후의 절대건조 중량(g)

목재의 평균밀도와 수분함량은 Table 1에 나타내었다.

2.3. 콘칼로리미터 시험

연소 성질에 대한 시험은 ISO 5660-1의 표준방법에 근거하여 Fire Testing Technology사의 Dual cone calorimeter를 사용하여, 실제 화재 시와 유사한 화재성장기에서 발견되는 열유속인 50 kW/m² 외부 열유속(external heat flux) 조건에서 진행하였다[17]. 사용한 시험편의 두께는 10 mm이고 시편은 100 mm × 100 mm ±₂ 크기의 규격으로 절단하였으며, 연소 반응 후 화재 유해성 평가 분석에 필요한 연기 인자 관련 지수를 구하였다. Figure 1에 콘칼로리미터 개략도를 나타내었으며 Table 2에 콘칼로리미터 시험에 대한 실험조건을 제시하였다.

Table 2. Experimental Conditions for Cone Calorimeter Test

Contents	ISO 5660-1
Sample size (mm)	100 × 100 × 10
External heat flux (kW/m ²)	50
Orientation	Horizontal face upwards
Test time (s)	1,800

Table 3. Combustion Properties of Wood Specimens at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	TTI ^a (s)	SPR _{1st_peak} ^b (m ² /s) at time	SPR _{2nd_peak} ^c (m ² /s)	TSPR _{2nd_peak} ^d (s)	HRR _{1st_peak} ^e (kW/m ²) at time (s)
Japanese ceda	4	0.0344 / 15	0.0210	275	219.89 / 20
Spruce	9	0.0231 / 20	0.0214	335	234.71 / 25
Lauan	10	0.0297 / 25	0.0273	315	246.84 / 30
Red pine	9	0.0315 / 25	0.0372	325	245.57 / 30

Materials	HRR _{2nd_peak} ^f (kW/m ²) at time (s)	CO _{mean} (ppm)	CO _{2mean} (ppm)	CO/CO ₂
Japanese ceda	150.49 / 280	59	993	0.059
Spruce	201.19 / 330	57	1317	0.043
Lauan	277.45 / 310	133	1547	0.086
Red pine	248.96 / 325	67	1626	0.041

^a Time to ignition, ^b 1st_peak smoke production rate, ^c 2nd_peak smoke production rate, ^d Time to 2nd_peak smoke production rate, ^e 1st_peak Heat release rate, ^f 2nd_peak heat release rate.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 건재 목재의 화재위험성을 평가하기 위한 한 부분으로 연기 특성을 중심으로 평가하였다. 연기방출 특성과 관련된 요소로 TTI, HRR, SPI-II, SGI-II 및 일산화탄소 독성농도 등을 측정 후 연기유해성을 평가하였다. 그에 대한 데이터를 Table 3에 제시하였다.

3.1. 열방출률(heat release rate, HRR)

열방출율은 화재의 특성을 제어하고 화재의 발생에 대한 기여도를 나타내며 연소모델링을 하기 위한 중요한 측정값이다. 이것은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기이며, 재료의 연소 위험성을 가장 잘 나타내는 요소이다[18,19]. 시험하는 동안에 측정되는 주 연소특성은 열방출률이다. 건축 재료를 열방출률이 낮은 것으로 사용할 경우 화재발생 시 연소억제 효과를 기대할 수 있다[20]. 열방출 속도가 높은 불꽃연소는 화재영역을 성장시키고 발전시키므로 이것은 화재의 세기를 좌우한다.

Figure 2에 나타난 바와 같이 열방출율은 모든 시편이 착화 시 갑자기 증가하는 현상을 보인 다음 감소하는 경향성을 보인다. 연소되는 기간 동안 2개의 피크가 공통적으로 나타나는데 연소의 첫 단계에서 첫째 피크가 나타나고 불이 꺼지기 전에 두 번째 피크가 나타난다. 첫 번째 피크는 연소 표면 가까운 곳에서 숯이 형성되기 전에 발생한다. 첫 번째 피크 후 중간 부분은 처음 생성된 숯 층이 두께를 통하여 단열층 역할을 하고 단열효과로 인하여 시료가 점차적으로 연소하기 때문에 감소되는 경향성이 관찰되었다. 두 번째 피크는 열적 과동이 뒷면 절연층에 도달할 때 일어나고 이런 후면효과(back effect)로 인하여 열이 축적되어 동시에 많은 열이 방출되기 때문에 나타난다[17,21]. 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기로 물질의 연소 위험성을 가장 잘 나타낼 수 있는 요소이다. 4종류의 목재의 두 번째 최대열방출 특성은 삼나무

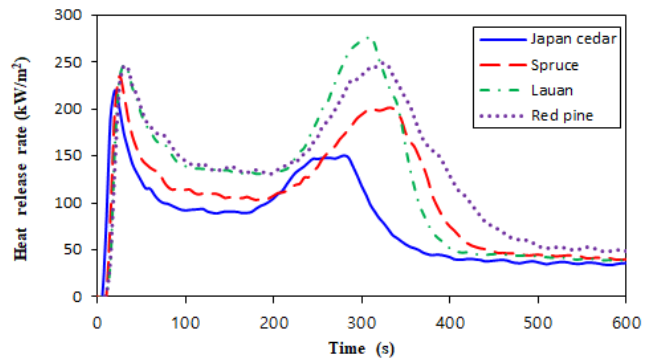


Figure 2. Heat release rate curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

150.49 kW/m², 가문비나무 201.19 kW/m², 적송 248.96 kW/m², 나왕 277.45 kW/m² 순으로 삼나무 기준 33.7~84.4% 높았다. 나왕은 HRR_{2nd_peak} 값이 가장 큰 것으로 나타나 어느 순간 질량감소 속도가 높아 매우 빠르게 타버리고 순간적인 연소 위험성 또한 높다는 것을 알 수 있었다. HRR_{2nd_peak} 값은 평균밀도에 비례하여 증가하는 경향이 있었다.

화재초기의 위험성을 평가하면 HRR_{1st_peak} 영역에도 나왕이 가장 큰 위험성을 보였으며 삼나무가 가장 위험성이 작은 목재로 나타났다. 화염에 휩싸일수록 HRR_{2nd_peak} 영역에서는 평균밀도가 클수록 열축적이 커지므로 화재위험성이 큰 것으로 나타났다.

3.2 연기발생(smoke production)

시간의 변화에 따른 연기생성속도(SPR)는 베기 덕트에서 연기의 체적유량과 감쇠계수와 의 곱으로 계산된다. Figure 3에 나타난 바와 같이 삼나무의 연기 방출 속도는 15와 275 s에서 두 개의 피크가 나타났

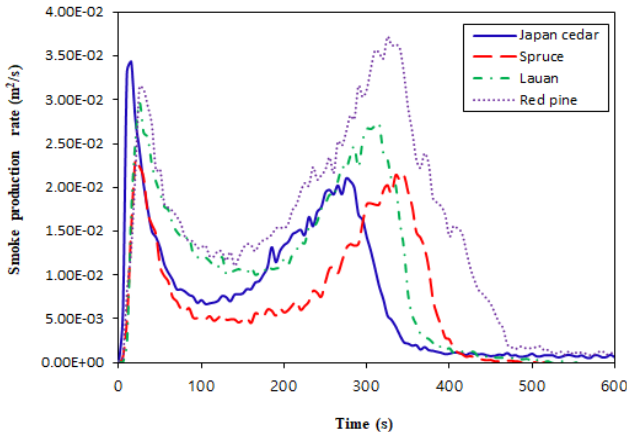


Figure 3. Smoke production rate curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

다. 이는 대부분의 목재의 열분해 부분과 잘 일치한다. 이것은 화재에 더 많은 표면이 노출됨으로써 나타나는 목재의 균열과 연소가스의 갑작스런 방출의 결과이다. 적송의 제2의 연기생성속도(SPR_{2nd_peak})는 0.0372 m²/s로 가장 높게 나타났다. 이것은 적송 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있기 때문으로 이해된다[22]. 삼나무의 제2의 연기생성속도(SPR_{2nd_peak})인 0.0210 m²/s에 비하여 77.1% 높게 나타났다.

이것은 화재초기 시험편의 순간 연기생성속도가 시험편의 체적밀도와 일부 연관이 있는 것으로 이해된다. 이와 관련하여 1차 연기생성속도 도달시간은 15~25 s로 측정되었다. 이어 2차 연기생성속도 도달시간은 275~335 s로서 연기생성속도 도달시간이 지연되었다. 이는 연소 시 숯이 생성됨에 따라 연소억제 효과가 증가되었기 때문이라 판단된다.

시험편의 연소에 의해 형성된 숯은 목재보다 열전도율이 낮기 때문에 목재의 아래쪽 부분에 열침투를 방해한다[21]. 숯이 증가함에 따라 열분해 전단과 열유속에 노출된 목재 표면 사이에서 열적 저항이 증가되므로 연소시간을 지연시키는 결과를 초래한 것으로 판단된다.

사용된 데이터인 착화시간 및 열방출률의 초기 피크의 최대값은 물질의 화재위험성을 특성화한다[14]. 또한 연기위험성도 맥을 같이 하는 것으로 예상된다. 따라서 저자는 가연물의 연기안전성을 예측하기 위하여 연기성능지수(smoke performance index, SPI)를 고안하여 아래의 식(2)로 기 발표하였다[14].

$$SPI = \frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s)} \quad (2)$$

이 식은 연기성능지수를 평가하기 위하여 최대연기발생속도와 착화시간의 2개의 변수를 고려하였다. 목재가 연소될 때의 에너지 방출속도, 연기생성, 가스 독성은 목재의 종류, 수분함량, 밀도, 열적특성 및 열침투성 등에 따라 결정된다. 가연물과 관련하여 연소 성질의 이해를 돕는 다른 중요한 특성은 착화시간이다. 착화시간은 시험편의 열원에 의한 노출로부터 지속적인 불꽃연소가 시작되기 전까지이며 착화시간이 짧을수록 재료는 더욱 가연성임을 나타낸다.

Table 4에 나타난 바와 같이 열유속이 50 kW/m²인 경우, 삼나무 4 s, 가문비나무 9 s, 나왕 10 s, 적송 9 s로서[16] 삼나무가 다른 3종류의 목재보다 훨씬 더 착화시간이 빠르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 가문비나무, 나왕과 적송은 착화시간이 비슷하였으며 삼나무는 4종류

Table 4. Smoke Performance Index-II (SPI-II) of Wood Specimens at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	TTI (s)	SPR _{2nd_peak} (m ² /s)	HRR _{2nd_peak} (kW/m ²)	SPI-II (S ² /kW)
Japanese ceda	4	0.0210	150.49	1.27
Spruce	9	0.0214	201.19	2.09
Lauan	10	0.0273	277.45	1.32
Red pine	9	0.0372	248.96	0.97

의 목재 중 초기 가연성이 높은 것으로 확인되었다. 사용된 각 시험편들의 수분함량의 차이는 0.2~2.1%로서 착화시간에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났으며 목재의 평균밀도가 증가함에 따라 착화시간이 지연되는 경향성을 보였다. 이것은 나무의 착화시간이 그의 표면 열손실의 유무에 따른 상수, 열전도도, 체적밀도, 연료의 비열 및 착화온도 항의 제곱에 비례하며, 시험편에 가해지는 열유속의 제곱에 반비례하는 것으로 설명된다[23].

그러나 이 연구에서는 더욱 정량적이고 정밀도를 높이기 위하여 최대연기발생속도, 착화시간 그리고 최대열방출률인 3개의 변수를 고려하여 연기 유해성 평가를 구현하였다. 그러므로 새로운 제2의 연기성능지수-II (smoke performance index-II, SPI-II) 식(3)을 고안하여 적용하고자 한다.

즉, SPI-II는 TTI를 SPR_{peak} 과 PHRR로 곱하여 나눈 값으로 정의된다. 목재의 화재성능지수(fire performance index, FPI)와 플래시오버의 시간과 상관성이 있으므로[24], FPI 값이 증가할수록 화재안정성이 증가하는 것과 같이[25] 연기안전성 또한 증가하는 것으로 이해된다. SPI-II를 구하는 식은 다음과 같다.

$$SPI-II = \frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)} \quad (3)$$

이 식은 저자의 기 발표된 식(3)보다 더욱 정량적이고 정밀한 표현으로 이해된다. 이 연구에서 연기발생속도의 값은 가장 가혹한 조건으로 제2의 최대연기발생속도(SPR_{2nd_peak}) 값을 적용하였다. 단, 액체성 플라스틱을 포함한 가연물은 연소과정 중 제1의 최대연기발생속도(SPR_{1st_peak})를 적용하고자 한다. 또한 최대열방출률(PHRR, kW/m²)의 경우도 이와 유사하게 액체성 플라스틱을 포함한 가연물은 연소과정 중 제1의 최대열방출률(HRR_{1st_peak}) 값을 적용한다.

Figures 2, 3, Table 4에 나타난 바와 같이 적송의 SPI-II는 가장 낮은 0.97 s²/kW이었고, 반면에 삼나무, 가문비나무, 나왕의 SPI-II는 1.27~2.09 s²/kW으로 적송보다 1.31~2.15배 높았다. SPI-II에 의한 화재위험성은 가문비나무, 나왕, 삼나무, 적송의 순서로 증가하였다. 이것은 적송과 같이 휘발성 유기물질을 함유한 목재는 SPI-II가 낮아지므로 화재위험성이 높다는 것을 의미한다. 또한 열방출에 대해서도 위와 유사한 의미로 제2의 열방출률(HRR_{2nd_peak})을 적용하였다.

또한 저자는 가연물의 연기위험성을 예측할 수 있는 연기성장지수(smoke growth index, SGI) 식(4)를 기 보고한 바 있다[14].

$$SGI = \frac{SPR_{peak} (m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak} (s)} \quad (4)$$

이 식은 연기성장지수를 평가하기 위하여 최대연기발생속도와 최

Table 5. Smoke Growth Index-II (SGI-II) of Wood Specimens at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	SPR _{2nd_peak} (m ² /s)	HRR _{2nd_peak} (kW/m ²)	TSPR _{2nd_peak} (s)	SGI-II (m ² /s ²)
Japanese ceda	0.0210	150.49	275	0.011
Spruce	0.0214	201.19	335	0.013
Lauan	0.0273	277.45	315	0.024
Red pine	0.0372	248.96	325	0.028

대연기발생속도에 도달하는 시간의 2개의 변수를 고려하였다. 그러나 이 연구에서는 더욱 정량적이고 정밀도를 높이기 위하여 최대연기발생속도, 최대연기발생속도에 도달하는 시간 그리고 최대열방출률인 3개의 변수를 고려하여 연기 유해성 평가를 구현하였다. 그러므로 연기 유해성을 평가할 수 있는 새로운 연기성장지수-II (smoke growth index, SG-II) 식(5)를 고안하여 적용하고자 한다.

$$SGI-II = \frac{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)}{Time\ to\ SPR_{peak} (s)} \quad (5)$$

즉, SGI-II는 SPR_{peak}과 PHRR로 곱한 것을 Time to SPR_{peak} (SPR_{peak}에 도달하는 시간)으로 나눈 값으로 정의된다. 따라서 SGI 값이 클수록 SPR_{peak}에 도달하는 시간이 짧아지며, 그 재료의 연기위험성이 커지는 것으로 예측된다. 이는 화재위험성이 커지는 것과 맥을 같이한다[27].

여기에서도 SPI-II의 계산과 같은 방법으로 제2의 최대연기발생속도에 도달하는 시간(TSPR_{2nd_peak})을 적용하였다. 단, SPI-II의 경우와 같이 액체성 플라스틱을 포함한 가연물은 연소과정 중 제1의 최대연기발생속도(SPR_{1st_peak}) 및 이에 도달되는 시간(Time to SPR_{1st_peak})을 적용한다. 또한 최대열방출률(PHRR, kW/m²)의 경우도 이와 유사하게 액체성 플라스틱을 포함한 가연물은 연소과정 중 제1의 최대열방출률(1st_HRR_{peak})을 적용한다.

50 kW/m²의 열유속에서는 Figures 2, 3과 Table 5에 나타난 바와 같이 삼나무의 SGI-II는 0.011 m²/s²으로 가장 낮게 나타났다. 그러나 가문비나무, 나왕, 적송은 삼나무에 비해 1.18~2.55배 높았다. SGI-II에 의한 화재위험성은 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송의 순서로 높아졌다. 특히 적송은 SGI-II가 가장 높은 것으로 나타났으며 SPI-II에서 얻은 결과와 유사한 경향성을 보였다.

따라서 본 연구에서 시험된 목재 및 가연물은 SGI-II의 값이 클수록 화재위험성은 높아지고, 화재안정성은 낮아지는 것을 알 수 있었다. SPI-II와 SGI-II는 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으로, 콘칼로리미터 실험에서 재료의 연기안전성을 파악하는데 종합적인 평가로 볼 수 있다.

3.3. 일산화탄소, 이산화탄소 농도(carbon monoxide, carbon dioxide concentration)

일산화탄소(CO)는 목재와 화염 사이에서 발생하는 휘발성물질의 불완전연소 생성물이다. 휘발성 물질의 열분해속도를 측정하는 하나의 방법인 열방출속도가 높아지는 것은 동반된 CO 가스 생성이 증가하는 것으로 설명 가능하다. Table 3 및 Figure 4에 나타난 시험편 중 나왕의 CO_{mean} 농도는 133 ppm으로 가문비나무의 CO_{mean} 농도인 57 ppm과 비교하여 2.3배 높게 나타났다. 이와 같이 모든 시험편은 미국

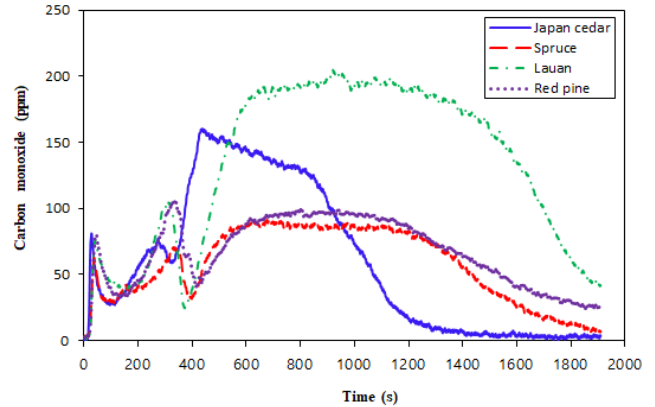


Figure 4. CO concentration (ppm) curves of Wood Specimens at 50 kW/m² external heat flux.

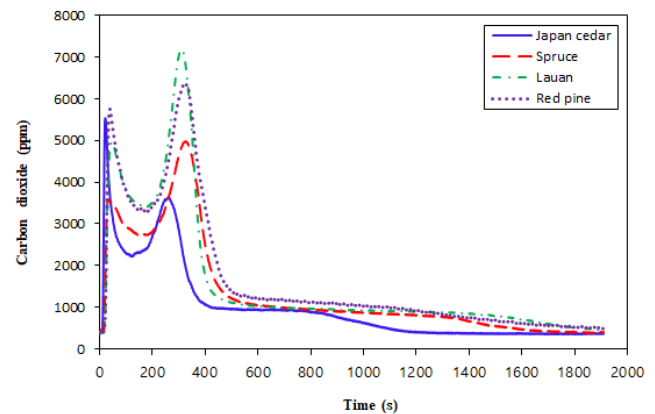


Figure 5. CO₂ concentration (ppm) curves of Wood Specimens at 50 kW/m² external heat flux.

직업안전위생관리국(occupational safety and health administration, OSHA)의 허용기준 (permissible exposure limits, PEL)인[26] 50 ppm과 비교하면 1.04~2.33배의 치명적인 독성을 생성하는 것으로 나타났다.

CO_{2mean} 농도는 Table 3 및 Figure 5에 나타난 바와 같이 모든 시험편에 대하여 993~1,626 ppm이었다. 이것은 불완전연소보다 완전연소가 더 많이 일어나는 것으로 판단된다. 이 결과는 OSHA의 허용기준 (PEL)인[27] 5,000 ppm 보다 낮게 나타났다. 이것은 인체의 호흡을 자극하여 생기는 과호흡을 발생시킬 소지가 적은 것으로 예측된다. 미국광산안전보건청(Mine safety and health administration, MSHA)에 [28] 의하면, 이산화탄소는 단순한 질식을 일으키고 잠재적 흡입 독성 물질이다.

4. 결 론

본 연구에서는 건축용 목재인 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송을 선정하여 연기위험성에 대하여 연기성장지수-II (SPI-II), 연기성장지수-II (SGI-II)를 중심으로 조사하였다.

1) 목재 시험편의 제2의 최대열방출(HRR_{2nd_peak}) 특성은 삼나무 150.49 kW/m², 가문비나무 201.19 kW/m², 적송 248.96 kW/m², 나왕 277.45 kW/m² 순으로서 삼나무 기준 33.7~84.4% 높았다.

2) 적송의 제2의 연기생성속도(SPR_{2nd_peak})은 $0.0372 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가장 높게 나타났으며, 삼나무의 두 번째 연기생성속도(SPR_{2nd_peak})인 $0.0210 \text{ m}^2/\text{s}$ 에 비하여 77.1% 높게 나타났다.

3) 적송의 연기성능지수-II는 가장 낮은 $0.97 \text{ s}^2/\text{kW}$ 이었고, 반면에 삼나무, 나왕, 가문비나무의 연기성능지수-II는 $1.27\sim 2.09 \text{ s}^2/\text{kW}$ 으로 적송보다 1.31~2.15배 높았다. 연기성능지수-II에 의한 화재위험성은 가문비나무, 나왕, 삼나무, 적송의 순서로 증가하였다.

4) 삼나무의 연기성장지수-II는 $0.011 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 으로 시험편 중 가장 낮게 나타났다. 그러나 가문비나무, 나왕, 적송은 삼나무에 비해 1.18~2.55배 높았다. 연기성장지수-II에 의한 화재위험성은 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송의 순서로 높아졌다.

5) 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송의 시험편에 대하여 CO는 57~133 ppm이었다. 이 결과는 OSHA의 허용기준(PEL)인 50 ppm 보다 높게 나타났으며, 이것은 완전연소보다 불완전연소가 더 많이 일어나는 것으로 판단된다.

결론적으로 적송과 같이 휘발성 유기물질을 다량 함유한 목재는 화재성능지수-II가 낮고, 화재성장지수-II가 높으므로 화재로 인한 연기 유해성이 높은 것으로 이해된다.

감 사

이 논문은 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No. NRF-2019R1F1A1059320)입니다.

References

1. T. S. Kim, Y. S. Kim, C. K. Yoon, and Y. J. Chung, *The Guide of Fire Investigation*, 77-98, Kimoonang, Seoul, Korea (2009).
2. H. J. Park, H. Kim, and D. M. Ha, Predicting of fire characteristics of flame retardant treated Douglas fir using an integral model, *J. KOSOS.*, **20**, 98-104 (2005).
3. O. Grexa, Flame retardant treated wood products, *The Proceedings of Wood & Fire Safety(part one)*, 101-110 (2000).
4. M. J. Spearpoint and J. G. Quintiere, Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model - effect of species, grain orientation and heat flux, *Fire Safety J.*, **36**, 391-415 (2001).
5. N. Boonmee and J. G. Quintiere, Glowing ignition of wood: The onset of surface combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*, **30**, 2303-2310 (2005).
6. R. H. White and M. A. DiTenberger, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Ch.17: Fire safety, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1999).
7. G. Shen, S. Tao, S. Wei, Y. Zhang, R. Wang, B. Wang, W. Li, H. Shen, Y. Huang, Y. Chen, H. Chen, Y. Yang, W. Wang, X. Wang, W. Liu, and S. L. Simonich, Emissions of parent, nitro, and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons from residential wood combustion in Rural China, *Environ. Sci. Technol.*, **46**, 8123-8130 (2012).
8. J. Ding, J. Zhong, Y. Yang, B. Li, G. Shen, Y. Su, C. Wang, W. Li, H. Shen, B. Wang, R. Wang, Y. Huang, Y. Zhang, H. Cao, Y. Zhu, S. L. Simonich, and S. Tao, Occurrence and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in a rural chinese home through biomass fuelled cooking, *Environ. Pollution*, **169**, 160-166 (2012).
9. G. Shen, S. Tao, S. Wei, Y. Chen, Y. Zhang, H. Shen, Y. Huang, D. Zhu, C. Yuan, H. Wang, Y. Wang, L. Pei, Y. Liao, Y. Duan, B. Wang, R. Wang, Y. Lv, W. Li, X. Wang, and X. Zheng, Field measurement of emission factors of PM, EC, OC, parent, nitro-, and oxy-polycyclic aromatic hydrocarbons for residential briquette, coal cake, and wood in Rural Shanxi, China, *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 2998-3005 (2013).
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. 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).
12. 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.*, **135**, 123-134 (2019).
13. T. Fateh, T. Rogaume, J. Luche, F. Richard, and F. Jabou, Characterization of the thermal decomposition of two kinds of plywood with a cone calorimeter-FTIR apparatus, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **107**, 87-100 (2014).
14. Y. J. Chung and E. Jin, Smoke generation by burning test of cypress plates treated with boron compounds, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 670-676 (2018).
15. W. T. Simpsco, Drying and control of moisture content and dimensional changes, Chap. 12, *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, 1-21, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1987).
16. T. Y. Yoo, J. S. You, and Y. J. Chung, Combustion properties of construction lumber used in every life, *Fire Sci. Eng.*, **31**, 37-43 (2017).
17. Y. J. Chung, Combustion characteristics of the *Quercus variabilis* and *Zelkova serrata* dried at room temperature, *J. Korean Forest Soc.*, **99**, 96-101 (2010).
18. J. G. Quintiere, Principles of fire behavior, Chap. 5, *Cengage Learning*, Delmar, USA (1998).
19. 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).
20. B. Lee, H. Kim, S. Kim, H. Kim, B. Lee, Y. Deng, Q. Feng, and J. Luo, Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter, *Const. Build. Mater.*, **25**, 7, 3044-3050 (2011).
21. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, Thermal analysis in polymer flammability, Chap. 8. In : *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Academic press, New York, USA (1981).
22. Q. Wang, J. Li, and J. Winandy, Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood, *Wood Sci. Technol.*, **38**, 375-389 (2004).
23. 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 Roh. Werkst.*, **56**, 125-129 (1998).
24. B. Wang, Q. Tang, N. Hong, L. Song, L. Wang, Y. Shi, and Y. Hu,

- Effect of cellulose acetate butyrate microencapsulated ammonium polyphosphate on the flame retardancy, mechanical, electrical, and thermal properties of intumescent flame-retardant ethylene vinyl acetate copolymer/microencapsulated ammonium polyphosphate/polyamide-6 blends, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 3754-3761 (2011).
25. C. Jiao, X. Chen, and J. Zhang, Synergistic effects of Fe_2O_3 with layered double hydroxides in EVA/LDH composites, *J. Fire Sci.*, **27**, 465-479 (2009).
26. OSHA, Carbon monoxide, OSHA fact sheet, United States National Institute for Occupational Safety and Health, September 14, USA (2009).
27. OSHA, Carbon Dioxide, Toxicological review of selected chemicals, final rule on air comments project, OSHA's Comments, January 19, USA (1989).
28. MSHA, Carbon Monoxide, MSHA's Occupational Illness and Injury Prevention Program Topic, U. S. Department of Labor, USA (2015).

Authors

Yeong-Jin Chung; Ph.D, Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea; yjchung@kangwon.ac.kr

Eui Jin; Ph.D, Senior Research Engineer, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 24913, Korea; jin_eui@hanmail.net