[Research Paper]

일부 목재와 플라스틱류의 연소 시 연기 위험성 등급 예측

유지선 · 정영진^{*†}

강원대학교 소방방재연구센터, *강원대학교 소방방재공학과

Prediction of Smoke Risk Ratings in the Combustion of Some Wood and Plastics

JiSun You · Yeong-Jin Chung^{*†}

Researcher, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National Univ.,

*Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National Univ.

(Received July 21, 2021; Revised August 22, 2021; Accepted August 23, 2021)

요 약

본 연구에서는 잣나무(*pinus koraiensis*, nut pine)와 갈참나무(*quercus aliena*, white oak) 그리고 폴리에틸렌(polyethylene, PE)과 폴리메타크릴산메틸(polymethyl methacrylate, PMMA)를 선정하여 ISO 5660-1의 기준에 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)를 이용하여 측정하였다. 측정된 값으로 Chung's equations 1 (연기성능지수, SPI), Chung's equations 2 (연기성장지수, SGI)에 의한 연기 위험성을 예측하고자 하였고, 이를 확장하여 화재 시 연기 위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질(PMMA)을 사용하여 Chung's equations-V (연기성능지수-V, SPI-V와 연기성장지수-V, SGI-V)와 Chung's equation-VI (연기위험성지수-VI, SRI-VI)에 의한 연기 위험성을 등급화하여 평가하였다. SPI-V는 nut pine 0.73으로 가장 낮았고, PE가 37.22로 가장 높았다. SGI-V에서도 PE가 0.03으로 가장 적게 나타나 연기가 가장 적게 발생하는 물질이고, nut pine이 10.00으로 가장 높게 나타나 다량의 연기가 발생하는 것으로 예측된다. SRI-VI는 PE (0.00) < PMMA (1.00) < white oak (1.44) << nut pine (13.70)의 순서로 나타났다. 따라서 PE의 연기 위험성이 가장 낮고, nut pine의 연기 위험성이 가장 높은 것으로 판단하였다. 또한 목재의 연소가 플라스틱류보다 불완전한 형태로 이루어짐을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, *pinus koraiensis* (nut pine) and *quercus aliena* (white oak) and polyethylene (PE) and polymethyl methacrylate (PMMA) were selected. And it was measured with a cone calorimeter in accordance with ISO 5660-1. With the measured values, it was intended to comprehensively predict the risk of smoke by Chung's equations 1 (smoke performance index, SPI) and Chung's equations 2 (smoke growth index, SGI). To standardize fire hazard assessment in case of fire by extending this, standard materials (PMMA) were used to classify the smoke risk by the Chung's equations-V (smoke performance index-V, SPI-V and smoke growth index-V, SGI-V) and Chung's equation-VI (smoke risk index-VI, SRI-VI) to evaluate it. The SPI-V was the lowest with nut pine of 0.73 and the highest PE was the highest with 37.22. In the SGI-V, PE was the material that produced the least smoke with the least amount of 0.03. Nut pine is expected to generate a large amount of smoke with the highest at 10.00. SRI-VI, it appeared in the order of PE (0.00) < PMMA (1.00) < white oak (1.44) << nut pine (13.70). Therefore, it was judged that PE had the lowest smoke risk and nut pine had the highest. In addition, it was found that the combustion of wood was done in an incomplete form than that of plastics.

Keywords : Combustion, Chung's equations, Smoke performance index-V (SPI-V), Smoke growth index-V (SGI-V), Smoke risk index-VI (SRI-VI)

1. 서 론

목재는 세계에서 가장 일반적이고 유연한 건축 자재 중

하나이다. 이것은 대부분 바닥, 벽지 그리고 가구를 구성하는 가연성 물질이다. 또 플라스틱은 현대 건축 산업에서 빼려고 해도 뗄 수 없는 중요한 부분이다. 플라스틱은 건물

[†] Corresponding Author, TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3119, E-Mail: yjchung@kangwon.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

내외부의 구조적 용도부터 비구조적 용도로 다양하게 쓰이고 있다.

이처럼 목재와 플라스틱의 사용률이 높아짐에 따라 화재 위험성도 높아진다. 목재는 연소 시 사상자와 재산 손실 모두에 영향을 미치는 열, 연기와 독성가스를 생산한다. 그리고 높은 온도, 거대한 열방출률(heat release rate, HRR) 그리고 빠른 화재 성장을 수반하는 유기 고분자 물질의 연소는 많은 양의 연기와 독성 가스를 생성한다⁽¹⁾.

목재 및 셀룰로오스 물질의 열분해로 인한 독성은 매우 다양한 유형의 목재로 인한 연기 때문에 복잡하다⁽²⁾. 플라스틱의 경우 고분자 사슬과 첨가제 사이의 물리적 및 화학적 상호 작용의 복잡성은 복합재의 화재 거동에 대한 예측을 어렵게 만든다⁽³⁾. 이처럼 목재와 플라스틱의 화재 거동을 예측하는 데 어려움이 많다.

실제로 목재 및 유기 고분자 물질을 포함한 가연성 물질은 연소 시 발생하는 연기와 연소가스에 의해 많은 피해가 발생하고 있다⁽⁴⁾. 화재의 가혹도를 평가하는 요인은 착화성, 열방출률, 화염의 전파성, 연기의 발생량 및 독성도 그리고 연소생성물의 발생량 등을 종합하여 평가한다.

특히, 화재 시 생성되는 연기와 독성가스로 인한 인명피해가 가장 큰 비중을 차지한다⁽⁵⁾. 화재 시 가연물의 비열적 위험 요소는 연기, 냄새, 부식, 독성 등에 의한 것이다. 이러한 비열적 위험 요인으로 인한 화재 피해는 피해자의 약 75~80%가 화염에 직접 노출되는 피해보다 산소결핍과 연기 및 독성 가스 등의 흡입에 의한 것으로 보고된 바 있다⁽⁶⁾. 그리고 독성가스의 정량적 방출은 재료 자체의 열분해뿐만 아니라 화재 조건에도 영향을 받는다⁽⁷⁾.

목재는 화학 성분이 다르면 HRR이 달라지고, 리그닌 함량이 높을수록 HRR이 감소하고 수분 함량이 높을수록 HRR이 크게 감소되는 것으로 보고된 바 있다⁽⁸⁾. 그리고 목재에서 온도 및 노출 시간이 증가함에 따라 리그닌과 탄소의 양도 증가하여 온도가 가장 중요한 요인으로 작용한다고 한 바도 있다⁽⁹⁾.

또 모든 목재 재료에 대해 점화 후 HRR이 제 1차 최대치가 나타나고 소진되기 전에 제 2차 최대치가 나타난다고 한 바도 있다⁽¹⁰⁾. Alén 등⁽¹¹⁾은 목재의 열분해는 두 가지 주요 부분 중 하나는 탄수화물(셀룰로오스와 헤미셀룰로오스), 다른 하나는 리그닌 물질에 의해 지배된다고 보고하였다.

그리고 Sonnier 등⁽¹²⁾은 연소하는 동안 물질의 거동은 많은 화학적 및 물리적 현상을 포함하기 때문에 다소 복잡함을 보고하였다. 게다가 물질은 대부분 여러 구성 요소로 구성되어 각 구성 요소(폴리머, 유기나 무기물, 불활성이나 반응하는 내연제)는 자체 속도에 따라 열분해 되며, 구성 요소의 열분해 속도는 주로 자체의 열 안정성에 달려 있다고 보고한 바 있다.

따라서 가연물의 화재 위험성은 화재 조건에 노출되었을 때 착화성, HRR, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 이들 중 가연물의 중요한 화재성질

은 연소하는 동안에 발생하는 HRR을 측정하는 것이다. HRR은 화재 시에 가연물의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다. HRR을 측정하는 방법들이 많이 발전되어 왔지만 그 중 하나인 콘칼로리미터가 있다⁽¹³⁾. 콘칼로리미터 시험 결과는 전체 실내 화재의 결과와 상관관계가 있는 것으로 나타났다^(14,15). 그리고 연기에 대한 연기 측정 시험방법은 Beer-Bouguer-Lambert의 법칙인 연소생성물을 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소함을 기본 원리로 한다⁽¹⁶⁾. 콘칼로리미터는 연기발생속도, 총연기 방출률, 비감쇠면적 등을 측정하여 평가하고 있지만, 각 인자들의 특성에 대한 평가로만 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 화재 건축설계에 적용시키기 위한 data base화를 위하여 주로 건자재 및 내장재로 주로 사용되며, 사용빈도가 높은 목재 중 잣나무(*pinus koraiensis*, nut pine)와 갈참나무(*quercus aliena*, white oak), 플라스틱 중 폴리에틸렌(polyethylene, PE)과 폴리메타크릴산메틸(polymethyl methacrylate, PMMA)를 선정하여 ISO 5660-1의 기준⁽¹⁶⁾에 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)를 이용하여 외부 복사열원에 의한 연소특성으로 열 및 연기 관련 값 등을 측정하였다.

측정된 값으로 Chung's equations 1 (smoke performance index, SPI)과 Chung's equations 2 (smoke growth index, SGI)⁽¹⁷⁾에 의한 연기 지수간의 관계를 확장하여 연기 등급을 종합적으로 평가하기 위한 기초 자료로 사용하였다. 이를 확장하여 화재 시 연기 위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질(PMMA)을 사용하여 기보고된 Chung's equations-V(smoke performance index-V, SPI-V와 smoke growth index-V, SGI-V)와 Chung's equation-VI (smoke risk index-VI, SRI-VI)⁽¹⁸⁾에 의한 종합적인 연기 위험성 등급을 평가하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 재료

본 연구에 사용된 시험편은 잣나무(*pinus koraiensis*, nut pine)와 갈참나무(*quercus aliena*, white oak)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 중량 변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였다⁽¹⁹⁾.

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

W_m 은 함수율을 구하고자 하는 목재편의 중량 (g)이고, W_d 는 건조시킨 후의 절대건조 중량 (g) 이다.

목재의 체적밀도와 수분함량은 Table 1에 나타내었다.

또한 Table 2의 PMMA는 기준물질로 사용하기 위하

Table 1. Bulk Density and Moisture Content of Each Wood

Materials	Moisture content (%)	Bulk density (kg/m ³)
Nut pine	10.5	427.8
White oak	11.0	680.9

Table 2. The Characteristic of Each Plastics

Specimens	Glass Transition Temp. (T _g) (°C)	Density range (g/cm ³)
PMMA	114	1.18
PE	-30	1.52

여 영국의 Fire Testing Technology사로부터 검은색으로 구입하였으며, PE는 아크릴최가에서 구입하여^(20,21) 특별한 가공 없이 이물질들을 제거하고 시험 규격의 시편 크기에 맞게 그대로 사용하였다. 폴리머 시편에 충전제와 첨가제가 포함되지 않았다. 특히 PMMA는 우수한 반복성 및 재현성 때문에 기준물질로 사용하여 선행연구와 동일한 데이터를 사용하였다⁽²²⁾.

2.2 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법⁽¹⁶⁾에 의해 dual cone calorimeter (fire testing technology)를 이용하여 열유속(heat flux) 50 kW/m² 조건에서 수행하였다. 사용한 시험편의 두께는 10 mm로서 100 mm × 100 mm (±2) 크기의 규격으로 제작하였으며, 이들의 연소특성을 비교하기 위하여 기준물질로 PMMA의 시험편을 사용하였다.

시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 5%에서 함량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감싼다. 시험에 앞서 콘히터의 열량이 설정값 ± 2% 이내, 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m³/s로 설정하였다.

시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 시편의 체적밀도는 시험하

기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min 간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열적 특성 평가

착화시간(time to ignition, TTI), 열방출률(heat release rate, HRR) 및 연기발생률(smoke production rate, SPR)은 난연성을 평가하는 중요한 매개변수이다⁽²³⁾. TTI는 Table 3에 나타났다. Nut pine이 6 s로 white oak의 16 s에 비해 빠르게 나타났다. 이것은 Table 1에 나타난 바와 같이 white oak의 체적밀도가 680.9 kg/m³으로 높기 때문으로 보인다. 그리고 oak와 pine이 같은 수분 함량을 가진 경우, nut pine보다 착화되기가 더 어렵다고 보고된 바 있다⁽²⁴⁾.

화재 거동을 결정하는 가장 중요한 매개변수는 HRR이다⁽²⁵⁾. 50 kW/m²의 외부 열원에서 시험한 시험편의 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})을 Figure 1과 Table 3에 나타났다. 목재의 경우 착화된 후 HRR은 갑자기 증가하였으며, 연소 과정에서 두 번의 피크가 공통적으로 관찰되었다. 연소 초기에 1차 피크가 발생하였고, 불이 꺼지기 전에 2차 피크가 발생하였다. 1차 피크와 2차 피크 사이의 구간은 숯이 생성되는 과정으로, 이 숯의 두께가 두꺼워짐에 따라 단열층 역할을 하기 때문에 HRR의 그래프가 감소되었다. 그러나 열적 파동이 뒷면 절연층까지 도달하고, 이런 후면효과(back effect)로 인해 열이 축적되어 많은 열이 동시에 방출되기 때문에 2차 피크가 발생하게 된다⁽¹⁵⁾.

Figure 1에 나타난 바와 같이 white oak의 전체 연소 기간은 nut pine의 연소 기간보다 더 길고, 완만하고 점진적으로 상승하는 것으로 관찰되었다. 목재의 1차 최대열방출률(HRR_{1st_peak}) 특성은 nut pine 218.65 kW/m², white oak 222.99 kW/m²으로 나타났다. 그 다음으로 white oak의 체적밀도가 크기 때문에 열축적이 더 잘 이루어져 white oak의 2차 최대열방출률(HRR_{2nd_peak})이 272.25 kW/m²으로 더 높게 나타난 것으로 이해된다.

그리고 Figure 1과 Table 4에 나타난 바와 같이 액체 연소

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

Specimens	aTTI (s)	bHRR _{1st_peak} (kW/m ²) /at time (s)	cHRR _{2nd_peak} (kW/m ²) /at time (s)	
Nut pine	6	218.65/25	211.88/265	
White oak	16	222.99/40	272.25/350	
Specimens	^d SPR _{1st_peak} (m ² /s) /at time (s)	^e SPR _{2nd_peak} (m ² /s) /at time (s)	^f CO _{peak} (g/s) /at time (s)	^g CO _{2peak} (g/s) /at time (s)
Nut pine	0.020/20	0.020/280	0.0023/730	0.174/270
White oak	0.014/35	0.015/375	0.0035/765	0.236/350

^atime to ignition; ^b1st_peak heat release rate; ^c2nd_peak heat release rate; ^d1st_peak smoke production rate; ^e2nd_peak smoke production rate; ^fpeak carbon monoxide production rate; ^gpeak carbon dioxide production rate

Figure 1. The heat release rate curves of specimens at 50 kW/m² external heat flux.

Table 4. Combustion Properties of Plastic Specimens at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	^a TTI (s)	^b HRR _{peak} (kW/m ²)/at time (s)	^c SPR _{peak} (m ² /s)/at time (s)
PMMA	26	1154.72/400	0.063/440
PE	46	422.32/715	0.003/750
Specimens	^d CO _{peak} (g/s) /at time (s)		^e CO _{2peak} (g/s) /at time (s)
PMMA	0.0051/400		0.918/400
PE	0.0017/1005		0.371/715

^atime to ignition; ^bpeak heat release rate; ^cpeak smoke production rate; ^dpeak carbon monoxide production rate; ^epeak carbon dioxide production rate

Figure 2. Smoke production rate curves of specimens at 50 kW/m² external heat flux.

거동을 보인 PMMA의 HRR_{1st_peak} 값은 1154.72 kW/m²으로 PE에 비해 높게 나타났다. 이는 연소 시 휘발성이 높기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 PE의 T_g는 -30 °C로 상당히 낮기 때문에 불리한 연소 조건으로 HRR의 그래프가 PMMA에 비해 완만한 곡선으로 나타났다. 이것은 300~500 °C에서 열화되고⁽²⁶⁾, 가연성이며 높은 연소열을 특징으로 하고 연소 성향이 낮다고 보고된 바와 일치하였다⁽²⁷⁾. 그리고 연

소 후 잔여물이 남아있지 않았다.

3.2 연기 위험성 평가

HRR과 함께 연기 및 유독가스의 발생은 화재 위험성을 이해하는 데 중요한 역할을 한다. 이에 연기 위험성을 평가하는 데 있어 시간의 변화에 따른 SPR 값은 중요한 요소이다. Figure 2와 Table 5에 나타난 바와 같이 nut pine은 0.020

Table 5. Smoke Performance Index-V (SPI-V) of Wood Specimens and Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	TTI (s)	SPR _{peak} (m ² /s)	SPI (s ² /m ²)	SPI-V
Nut pine	6	0.020	300	0.73
White oak	16	0.014	1,142	2.77
PMMA	26	0.063	412	1.00
PE	46	0.003	15,333	37.22

m²/s로 white oak의 0.015 m²/s 보다 더 높게 발생하였다. 이것은 침엽수인 nut pine이 활엽수인 white oak보다 높은 리그닌 함량과 낮은 셀룰로오스를 가지고 있으며, 침엽수 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있기 때문으로 이해된다.

Figure 2와 Table 4에 나타난 바와 같이 플라스틱의 최대 연기발생률(peak smoke production rate, SPR_{peak})이 PMMA는 0.063 m²/s로 나타났다. 특히 PE에 대해서는 TTI는 가장 길고(46 s), 최대연기발생속도는 시험 시작 후 가장 늦은 시간인 750 s에 이르러 가장 낮은 수치인 0.003 m²/s로 측정되었다. 이는 PE가 순수한 지방족 화합물 구조 단위를 함유하는 폴리머로 공기 중에서 연소할 때 상대적으로 연소가 불리하므로 연기를 적게 발생시킨다고 보고된 바와 같은 경향성을 보였다. 그리고 800~950 °C에서 연소에 포함된 산물은 알킬 벤젠, 탄화수소, 알켄, 비페닐 그리고 다핵방향족 탄화수소가 있다⁽²⁸⁾. 그리고 PMMA는 액체 연소거동으로 인해 휘발성이 높기 때문에 HRR 그래프와 비슷한 양상을 보였으며, 시편이 모두 다 타버린 후 연기가 거의 발생되지 않았다.

TTI, HRR 및 SPR은 난연성을 평가하는 중요한 매개변수이다⁽²³⁾. 이에 가연물의 연기안전성을 예측하기 위하여 연기성능지수(smoke performance, SPI) 식은 다음 식 (2)를 적용하였다⁽¹⁷⁾.

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

이 식은 연기성능지수를 평가하기 위하여 TTI와 SPR_{peak}의 인자를 고려하였다. TTI는 연기와 가연성 가스의 발생을 의미하며, SPR_{peak}는 시간의 변화에 따른 최대 연기 발생량을 의미한다. TTI와 SPR의 초기 피크의 최대값으로 연기 위험성을 예측할 수 있다. Table 5에 나타난 바와 같이 PE의 TTI가 46 s로 가장 지연되었고, 값도 0.003으로 가장 적게 나타나 SPI 값이 가장 우수했다. 문헌에 따르면 LDPE의 탄소 함량은 86%라고 보고된 바 있다⁽²⁹⁾. 반면 Nut pine은 낮은 체적밀도 및 자체 다량의 휘발성을 함유하므로 TTI가 6 s로 가장 빠르게 나타났다. TTI가 상당한 영향을 미친 것으로 판단된다. 이처럼 TTI와 SPR_{peak}의 관계를 고려하였기 때문에 연기 위험성을 더욱 정량적이고 정밀하게 평가할 수 있었다.

그리고 화재 시 연기 위험성 평가를 표준화하기 위하여 기준물질을 사용하여 연기성능지수-V (SPI-V)를 사용하여 계산하였다. 계산한 식은 다음 식 (3)과 같다. 기준물질은 PMMA로 선정하였는데, 이것은 콘칼로리미터 시험에서 PMMA의 우수한 반복성 및 재현성이 우수하기 때문이다. 즉, SPI-V는 SPI를 SPI_[PMMA] 기준값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의된다⁽¹⁸⁾.

$$SPI-V = \frac{\frac{TTI(s)}{SPR_{peak}(m^2/s)}}{\left[\frac{TTI(s)}{SPR_{peak}(m^2/s)}\right]_{PMMA}} \quad (3)$$

이 식은 무차원 지수로 나타낸다. 이 연구에서 연기발생률의 값은 초기 화재의 가속도를 고려하여 1차 최대연기발생률(SPR_{1st_peak}) 값을 적용하였다. 특히, 용융되는 플라스틱은 1차 최대연기발생률(SPR_{1st_peak})를 적용하고자 한다.

Table 5에 나타난 바와 같이 PMMA를 기준물질로 한 연기등급지수인 SPI-V는 nut pine(0.73) < PMMA(1.0) < white oak(2.77) < PE(37.22)의 순서로 증가하였다. 이것은 PMMA와 같이 휘발성 유기물질을 함유한 용융되는 플라스틱은 SPI-V가 낮아지기 때문에 연기 위험성이 높고, nut pine은 침엽수 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있다는 것을 의미한다. 특히 TTI가 상당한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 그리고 SPI와 SPI-V에 의한 연기 위험성 평가 결과 PE가 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

또한 가연물의 연기위험성을 예측할 수 있는 연기성장지수(smoke growth index, SGI)인 식 (4)를 적용하였다⁽¹⁷⁾.

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

이 식은 SPR_{peak}과 최대연기발생률에 도달하는 시간(time to peak smoke production rate, Time to SPR_{peak})을 고려하여 연기 위험성 평가를 구현하였다. 이 SGI는 SPR_{peak}에 대하여 최대연기발생률에 도달하는 시간의 초기 최대값으로 나눈 것으로서 화재 시 연기성장을 예측할 수 있다. 즉, Table 6에 나타난 바와 같이 PE가 0.0000으로 가장 낮게 나타났으며 nut pine의 경우 0.0010으로 가장 높게 나타났다. 이는 nut pine이 유기성 휘발물질을 다량 함유하고 있기 때문으

Table 6. Smoke Growth Index-V (SGI-V) of Wood Specimens and Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	SPR _{peak} (m ² /s)	Time to SPR _{peak} (s)	SGI (m ² /s ²)	SGI-V
Nut pine	0.020	20	0.0010	10.00
White oak	0.014	35	0.0004	4.00
PMMA	0.063	440	0.0001	1.00
PE	0.003	750	0.0000	0.00

Table 7. Smoke Risk Index-VI (SRI-VI) of Wood Specimens and Plastics at 50 kW/m² External Heat Flux

Specimens	SPI-V	SGI-V	SRI-VI
Nut pine	0.73	10.00	13.70
White oak	2.77	4.00	1.44
PMMA	1.00	1.00	1.00
PE	37.22	0.00	0.00

로 이해된다.

그리고 연기성장지수-V (SGI-V)는 SGI를 SGI_[PMMA]의 기준값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의되며, 이것은 다음 식 (5)와 같다⁽¹⁸⁾. SGI-V 값이 클수록 연기 위험성이 커지는 것으로 예측된다.

$$SGI-V = \frac{\frac{SPR_{peak}(m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)}}{\left[\frac{SPR_{peak}(m^2/s)}{Time\ to\ SPR_{peak}(s)}\right]_{PMMA}} \quad (5)$$

Table 6에 나타난 바와 같이 SGI-V에 의한 연기 위험성은 nut pine이 가장 높은 것으로 나타났다. 이것은 연소 속도가 빨라짐에 따라 SPR_{peak} 값이 높아지고, Time to SPR_{peak} 값이 가장 초기에 연기가 발생한 것으로 판단된다. PMMA를 기준물질로 한 연기등급지수인 SGI-V는 PE(0.00) < PMMA(1.00) < white oak(4.00) < nut pine(10.00)의 순서로 증가하였다. 특히 PE는 기준물질인 PMMA에 비해 SGI-V가 가장 낮은 것으로 나타났다.

SPI-V와 SGI-V는 콘칼로리미터로 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으로, 연기 위험성을 더욱 정량적이고 정밀하게 평가할 수 있었다. 이를 다시 정리하면, Chung's equations-VI에 의한 연기위험성지수-VI (SRI-VI)는 다음 식 (6)과 같다⁽¹⁸⁾.

$$SRI-VI = \frac{SGI-V}{SPT-V} \quad (6)$$

각 (3), (5)~(6) 식을 계산하여 Table 7에 정리하였다. SRI-VI는 SGI-V를 SPI-V로 나눈 값으로 정의되며, SGI-V 값이 클수록 연기 위험성이 커지고, SPI-V 값이 작을수록 연기 위험성이 감소한다. 이것은 연기 위험성 및 연기 등급

을 종합적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

SRI-VI에 의한 연기 위험성은 nut pine이 가장 높은 것으로 나타났다. PMMA를 기준물질로 한 연기위험성지수인 SRI-VI는 PE(0.00) < PMMA(1.00) < white oak(1.44) < nut pine(13.70)의 순서로 증가하였다. 따라서 PE가 화재 위험성이 가장 낮고, nut pine이 가장 높은 것으로 판단하였다.

3.3 연소생성물 특성 평가

연기는 연소 억제제가 있거나, 산소 농도가 낮거나, 연소 구역에서 불충분한 반응 시간이나 온도가 있는 조건일 때 발생하는 것으로, 완전한 연소 생성물(CO₂, H₂O, 산성가스)과 불완전한 연소 생성물(그을음, CO, 불완전한 산화된 연료가스)이라고 하였다⁽³⁰⁾.

일산화탄소(carbon monoxide, CO)는 서서히 퍼지는 유독한 가스로 인체 내의 헤모글로빈과의 강한 결합성으로 작은 양으로도 매우 치명적이다⁽⁶⁾. Figure 3과 Tables 3~4에 나타난 시험편의 CO_{peak} 생성속도는 0.0017~0.02 g/s로 측정되었으며, 플라스틱보다 목재에서 더 높게 나타났다. 또한 PMMA와 PE는 연소 후 시편이 남아 있지 않았다. 이는 목재가 플라스틱보다 불완전 형태의 연소성을 가짐을 알 수 있었다.

화재 시 CO와 마찬가지로 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂)도 항상 발생하며, 불꽃 연소 시 CO₂가 생성되며, CO의 산화 반응이 가속화되면서 더 많은 양이 CO₂로 변환된다⁽³¹⁾. CO_{2peak} 발생속도는 Figure 4와 Tables 3~4에 나타난 시험편의 CO_{2peak} 생성속도는 0.174~0.918 g/s로 측정되었으며, PMMA와 PE가 완전연소가 더 용이한 것으로 판단된다. 그리고 CO_{2peak} 생성속도의 그래프는 HRR 그래프와 유사한 경향성을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 목재 중 잣나무(*pinus koraiensis*, nut pine)

Figure 3. CO production rate (g/s) curves of specimens at 50 kW/m² external heat flux.

Figure 4. CO₂ production rate (g/s) curves of specimens at 50 kW/m² external heat flux.

와 갈참나무(*quercus aliena*, white oak), 플라스틱 중 폴리에틸렌(polyethylene, PE)과 폴리메타크릴산메틸(polymethyl methacrylate, PMMA)를 선정하여 ISO 5660-1의 기준에 따라 콘칼로리미터(cone calorimeter)로 측정하여 Chung's equations 1, 2를 계산하고, 이를 확장하여 Chung's equations-V와 Chung's equation-VI에 의한 연기 위험성을 등급 평가하였다.

1) 열적 특성을 평가한 결과, white oak의 최대열방출률(HRR_{peak})은 272.25 kW/m²으로 nut pine의 211.88 kW/m²보다 높게 나타났다. 이것은 white oak의 체적밀도가 비교적 높기 때문으로 이해된다. 그리고 PMMA의 최대열방출률(HRR_{peak})은 1154.72 kW/m²으로 나타났는데, 이는 연소 시 PE보다 휘발성이 높기 때문인 것으로 판단된다.

2) 연기 위험성 평가를 표준화하기 위하여 연기성능지수-V(SPI-V)는 nut pine(0.73) < PMMA(1.0) < white oak(2.77) < PE(37.22)의 순서로 증가하였다. 이것은 PMMA와 같이 휘발성 유기물질을 함유한 용융되는 플라스틱은 SPI-V가 낮아지기 때문에 연기 위험성이 높고, nut pine은 침엽수 자체에 휘발성 유기물을 다량 함유하고 있기 때문으로 이해된다. 또한 SPI-V가 가장 높은 PE는 T_g가 낮으므로 연소 조

건이 불리하기 때문으로 설명 되어진다.

3) 연기성장지수-V(SGI-V)는 PE(0.00) < PMMA(1.00) < white oak(4.00) < nut pine(10.00)의 순서로 증가하였다. 특히 PE는 기준물질인 PMMA에 비해 SGI-V가 가장 낮은 것으로 나타났다. 이것은 SPI-V와 유사한 경향성을 나타내었다.

4) 연기위험성지수-VI(SRI-IV)는 PE(0.00) < PMMA(1.00) < white oak(1.44) << nut pine(13.70)의 순서로 나타났다. PE의 연기 위험성이 가장 낮고, nut pine의 연기 위험성이 가장 높은 것으로 판단하였다.

5) 시험편의 CO_{peak} 생성속도는 0.0017~0.02 g/s로 측정되었으며, 플라스틱보다 목재에서 더 높게 나타났다. 이는 목재가 플라스틱보다 불완전 연소 평태로 이루어짐을 알 수 있었다.

References

1. T. Zhang, X. Zhou and L. Yang, "Experimental Study of Fire Hazards of Thermal-Insulation Material in Diesel Locomotive: Aluminum-Polyurethane", Materials, Vol. 9,

- No. 3, pp. 1-17 (2016). <https://doi.org/10.3390/ma9030168>
2. D. Tsatsoulas, H. N. Phylaktou and G. Andrews, "Thermal Behaviour And Toxic Emissions of Various Timbers In Cone Calorimeter Tests", Disaster Management and Human Health Risk, WIP Press, Southampton, pp. 181-194 (2009). <https://doi.org/10.2495/DMAN090181>
3. H. Vahabi, B. K. Kandola and M. R. Saeb, "Flame Retardancy Index for Thermoplastic Composites", Polymers, Vol. 11, No. 3, pp. 1-10 (2019). <https://doi.org/10.3390/polym11030407>
4. T. S. Kim, Y. S. Kim, C. K. Yoon and Y. J. Chung, "The Guide of Fire Investigation", Kimoondang, Seoul, Korea, pp. 77-98 (2009).
5. W. P. Sung, J. C. M. Kao and R. Chen, "Frontiers of Energy and Environmental Engineering", 2012 International Conference on Frontiers of Energy and Environment Engineering, CRC press, NW, U.S.A (2012).
6. R. H. White and M. A. Dietenberger, "Wood as and Engineering Material, Ch. 17: Fire Safety", Wood Handbook, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1999).
7. D. A. Purser, "Toxic assessment of combustion products", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, pp. 83-171 (2002).
8. H. C. Tran, "Experimental Data on Wood Materials", In Heat Release in Fires, Edited by V. Babrauskas and S. J. Grayson, Elsevier Applied Science, pp. 357-372 (1992).
9. J. Bourgois, M. C. Bartholin, R. Guyonnet, "Thermal treatment of wood: Analysis of the obtained product", Wood Sci. Technol., Vol. 23, pp. 303-310 (1989).
10. M. J. Sprearpoint and J. G. Quintiere, "Predicting the burning of wood using an integral model", Combustion and flame, Vol. 123, pp. 308-324 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(00\)00162-0](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(00)00162-0)
11. R. Alén, E. Kuoppala, P. Oesch, "Formation of the main degradation compound groups from wood and its components during pyrolysis", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 36, pp. 137-148 (1996). [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(96\)00932-1](https://doi.org/10.1016/0165-2370(96)00932-1)
12. R. Sonnier, A. Viretto, L. Dumazert, B. Gallard, "A method to study the two-step decomposition of binary blends in cone calorimeter", Combustion and Flame, Vol. 169, pp. 1-10 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.04.016>
13. D. Marquis, E. Guillaume, D. Lesenechal, "Accuracy (Trueness and Precision) of Conecalorimeter Tests with and without a Vitiated Air Enclosure", Procedia Engineering, Vol. 62, pp. 103-119 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.048>
14. O. Grexa and H. Lubke, "Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter", Polym. Degrad. Stab., Vol. 74, No. 3, pp. 427-432 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00181-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00181-1)
15. 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. Saf. J., Vol. 36, No. 4, pp. 391-415 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00055-2](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00055-2)
16. 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), Generver, Switzerland (2015).
17. Y. J. Chung and E. Jin, "Smoke generation by burning test of cypress plates treated with boron compounds", Appl. Chem. Eng., Vol. 29, pp. 670-676 (2018). <https://doi.org/10.14478/ace.2018.1076>
18. 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., Vol. 32, No. 2, pp. 197-204 (2021). <https://doi.org/10.14478/ace.2020.1103>
19. W. T. Simpo, "Drying and control of moisture content and dimensional changes", Chap. 12, Wood Handbook-wood as an Engineering Material, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA, pp. 1-21 (1987).
20. J. Greener, G. Pearson and M. Cakmak, "Roll-to-roll manufacturing: Process elements and recent advances", John Wiley & Sons, Inc., NJ, USA (2018).
21. Y. H. Hui, E. Castll-Perez, L. M. Cunha, I. Guerrero-Legarreta, H. H. Liang, Y. M. Lo, D. L. Marshall, W. K. Nip et al., "Handbook of food science, technology, and engineering", CRC press, NW, USA (2006).
22. J. S. You and Y. J. Chung, "Rating Evaluation of Fire Risk Associated with Plastics", Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 9-15 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.576d03dd>
23. L. Yimin, B. Yao, J. Qin, "Preliminary burning tests on PVC fires with water mist", Polym. Test., Vol. 24, No. 5, pp. 583-587 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.02.010>
24. Y. Tian, "A Study of Charring Behavior of Woods Based on Internal Temperature and CT-Scan Measurements", Ph.D thesis, Case Western Reserve University (2019).
25. L. Tsantaridis, "Reaction to fire performance of wood and other building products", Ph.D thesis, KTH- Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2003).

26. M. Sabet, H. Soleimani and S. Hosseini, "Thermal stability and flame-retardant characteristic of irradiated LDPE and composites", *Bulletin of Materials Science*, Vol. 43, No. 38, pp. 1-8 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12034-019-2021-Z>
27. W. W. Focke, H. J. Kruger, W. Mhike, A. Taute, A. Roberson and O. Ofosu, "Polyethylene flame retarded with expandable graphite and a novel intumescent additive", *Journal of Applied Polymer Science*, 131, No. 13, pp. 1-8 (2014). <https://doi.org/10.1002/app.40493/pdf>
28. R. Font, I. Aracil, A. Fullana and J. A. Conesa, "Semivolatile and volatile compounds in combustion of polyethylene", *Chemosphere*, Vol. 57, pp. 615-627 (2004).
29. C. Wrobel and T. Reinhardt, "Review of potential air emissions from burning polyethylene plastic sheeting with piled forest debris", Technical Report, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station (2003).
30. The National Technical Information Service (NTIS), "Polymer Flammability", Washington DC, USA (2005).
31. OSHA, "Carbon Monoxide", OSHA fact sheet, United States National Institute for Occupational Safety and Health, USA (2009).