

화재 발생 시 목재 수종의 화재위험성 등급 평가

진 의 · 정영진*.[†]

강원대학교 소방방재연구센터, *강원대학교 소방방재공학과
(2021년 5월 30일 접수, 2021년 6월 17일 수정, 2021년 6월 18일 채택)

Assessment of Fire Risk Rating for Wood Species in Fire Event

Eui Jin and Yeong-Jin Chung*.[†]

Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea

*Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25949, Korea

(Received May 30, 2021; Revised June 17, 2021; Accepted June 18, 2021)

초 록

본 연구는 건자재용 목재의 화재위험성 및 화재위험성 등급을 평가하기 위하여 Chung's equations-III, -IV에 의한 화재 성능지수-III (FPI-III), 화재성장지수-III (FGI-III), 화재위험성지수-IV (FRI-IV)를 중심으로 조사하였다. 시험편은 적삼목, 전나무, 물푸레나무, 단풍나무를 사용하였다. 화재 특성은 시험편에 대하여 콘칼로리미터(ISO 5660-1) 장비를 이용하여 조사하였다. 연소반응 후 측정된 FPI-III는 polymethylmethacrylate (PMMA) 기준으로 0.86~12.77로 나타났다. FGI-III는 PMMA를 기준으로 0.63~5.26으로 나타났다. 화재위험성 등급 지수인 FRI-IV에 의한 화재 등급은 0.05~6.12였으며 적삼목이 단풍나무와 비교하여 122.4배 높았다. FRI-IV에 의한 화재위험성 등급은 단풍나무, 물푸레나무, 전나무, PMMA, 적삼목 순서로 증가하였다. 모든 시편의 CO 피크농도는 103~162 ppm으로 측정되었으며 미국직업안전위생관리국(occupational safety and health administration)의 허용기준(permissible exposure limits)인 50 ppm보다 2.1~3.2배 높게 나타났다. 적삼목과 같이 체적밀도가 작고 휘발성 유기물질을 다량 함유한 소재는 FPI-III가 낮고 FGI-III가 높으므로 화재위험성 등급이 높은 것으로 나타났다.

Abstract

In order to evaluate the fire risk and fire risk rating of wood for construction materials, this study focused on fire performance index-III (FPI-III), fire growth index-III (FGI-III), and fire risk index-IV (FRI-IV) according to Chung's equations-III and -IV. Western red cedar, needle fir, ash, and maple were used as the specimens. The fire characteristics were investigated using a cone calorimeter (ISO 5660-1) equipment on the specimen. The FPI-III measured after the combustion reaction was 0.86 to 12.77 based on polymethylmethacrylate (PMMA). The FGI-III was found to be 0.63 to 5.26 based on PMMA. The fire rating according to the FRI-IV, which is the fire rating index, was 0.05 to 6.12, and the western red cedar was 122.4 times higher than that of the maple. The fire risk rating according to the FRI-IV increased in the order of maple, ash, needle fir, PMMA and western red cedar. The CO peak concentration of all specimens was measured as 103 to 162 ppm, and it was 2.1 to 3.2 times higher than 50 ppm, the permissible exposure limits of the US occupational safety and health administration. Materials such as western red cedar, which have a low bulk density and contain a large amount of volatile organic substances, have a low FPI-III and a high FGI-III, so they have a high fire risk rating.

Keywords: Wood, Fire performance index-III, Fire growth index-III, Fire risk index-IV, Fire risk rating

1. 서 론

목재는 재활용성이 좋고 환경오염에 대한 기여도가 낮기 때문에 매우 효율성이 높은 소재이다. 그러나 다른 건축 자재보다 가연성이 높

기 때문에 화재 안전 측면에서 많은 취약성이 있다.

목재의 열분해와 내화에 대하여, 목재의 조성은 흡수된 물과 휘발성 유분의 손실을 제외하고 약 100 °C에 이를 때까지 온도에 의해 영향을 받지 않는다. 약 175 °C로 온도 증가에 따라 목재의 일부 성분은 분해하기 시작하며 100~200 °C 사이에서는 CO₂, 무기화합물, 수증기와 같은 비연소성 생성물이 생성된다. 200 °C 이상에서는 셀룰로오스가 분해되고 타르와 가연성 휘발성물질이 생성된다. 셀룰로오스는 240~350 °C, 헤미셀룰로오스는 200~260 °C, 리그닌은 280~500 °C에서 각각 분해된다. 리그닌의 열적 안정성은 고도로 가교된 구조와 분자량

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

이 크기 때문이다. 온도가 높아지면 모든 휘발성 물질은 증발되어 사라지고 15~20% 정도의 숯(char)이 남는데 이는 리그닌 함유량이 많기 때문이다. 숯은 산소가 접근하는 것을 차단하기 때문에 목재의 연소 속도를 감소시킨다[1].

목재의 열분해특성은 시차열분석(differential thermal analysis, DTA) 곡선에서 얻어진 큰 발열피크는 셀룰로오스의 탈수와 불꽃 연소에 기인하고 350 °C 이상의 온도에서는 탈수와 탄화반응이 계속되지만 더 느리게 진행된다. 고온에서 얻어진 DTA의 발열곡선은 셀룰로오스와 리그닌으로부터 형성된 탄화물의 연소와 관련된다[2,3].

또한 콘칼로리미터를 이용하여 목재가 나무결의 수직 방향 또는 나무결 방향으로 방사 열유속(heat flux)에 노출될 때 목재의 백열 및 불꽃 열착화가 연구되었으며, 이론적인 착화 모델은 표면의 숯 연소를 포함한 나무의 열분해에 대하여 연구되었다[4].

Spearpoint와 Quintiere는 목재의 착화에 대하여 임계 열유속과 열관성은 입사 열유속에 대한 $t_{ign}^{-1/2}$ (t_{ign} 는 착화 시간)의 그래프에서 얻을 수 있음을 보고하였다[5]. 그리고 Delichatsios 등은 큰 열량계 테스트를 이용하여 고분자 재료의 착화 및 열분해 특성에 대해 개발된 방법론을 확장하여 탄화물질의 가연성 특성을 연구하였다[6]. 이어서 Fateh와 Li 등은 중밀도 섬유판의 화염 열유속과 같이 두 종류의 합판의 열분해, 발화성 및 가연성 매개 변수와 가스 배출량에 대하여 연구하였다[7,8]. 또한 소재의 소화를 연구하기 위해 수직 방향의 이중 슬라이딩 큰 열량계를 이용하여 외부 열유속을 높은 값에서 낮은 값으로 빠르게 전환하여 시편의 소멸로 이어지는 열유속에 대하여 연구가 진행되고 있다[9]. 화재안전 측면에서 목재의 가연성을 감소시키기 위한 방법 중에는 목재에 난연제를 처리하는 방법이 있다. 일부 연구 중 최근 목재에 적합한 난연제를 적용하여 시멘트 결합 목재 기반 제품(cement-bonded wood-based products, CBPB)의 난연성을 향상시키는 데 중점을 둔 연구가 보고된 바도 있다[10].

가연물의 화재위험성은 가연물이 화재조건에 노출 되었을 때 가연물의 연소 성능을 효과적으로 평가할 수 있는 핵심요인 착화성, 열방출률, 화염의 전파 그리고 연기 및 독성가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 열방출률은 화재 시 대상 물질의 잠재 위험성을 나타내므로 매우 중요하다. 열방출률을 측정하기 위한 많은 기술들이 발전되었으며 콘 칼로리미터(cone calorimeter)가 그 중의 한 방법이다[11]. 이것은 실 화재 현상을 가장 근접하게 모사한 방법이며 대부분의 유기재료가 연소 시 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 기본으로 하고 있다. 외부열유속은 화재 시나리오의 스펙트럼을 제공하며, 0에서 100 kW/m² 사이에서 변화할 수 있고 화재성장기에서 발견되는 열유속은 35 혹은 50 kW/m²가 가장 폭넓게 사용된다.

화재 시 발생하는 연기는 화염에 의해 발생되어 떠다니는 기체의 흐름으로 더 이상의 화학반응 없이 지속적으로 공기와 혼합되는 물질이다. 이것은 불꽃 연소 시 숯을 생성하는 다환성 방향족 탄화수소를 형성하는 목재의 열분해보로부터 생성되는 가연성 기체이고, 복사 냉각으로 인해 타지 않은 숯은 불완전 연소하는 불꽃 연소영역에서 연기로 빠져나간다[12]. 콘칼로리미터를 이용한 연기측정 시험방법은 Beer-bouguer-lambert의 법칙이 기본 원리이며 일반적으로 투과하는 빛의 세기가 거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 법칙이다[11]. 연기 발생률, 총연기방출률, 비감쇠면적, 연기인자 등이 연기발생을 나타내는 인자로 사용되고 있지만[6,13,14] 이와 같은 방법은 시간 변화에 따른 제한된 방법으로써 충분히 연기발생에 대한 위해성과 정량적인 평가를 구현하기에는 아직 미흡한 점이 많다.

이를 개선한 방법으로 두 개 이상의 변수를 상호 연관시키는 화재위험성을 평가하는 방법이 제안되었다. 이것은 세 가지 화재 인자를 기반으로 화재 지수 간의 상관관계를 확장하여 전체 화재위험성 등급을 평가하기 위한 기초로 사용하기 위한 것이다.

이를 기반으로 한 화재위험성 평가 방법은 열과 연기를 포함한 수식을 사용하여 구현할 수 있으며 Chung's equations-III를 이용하여 화재위험성을 표준화할 수 있다. 또한 Chung's equation-IV인 화재위험성 지수-IV를 사용하면 화재위험성 등급을 분류할 수 있다. 기준물질을 이용하여 화재위험성의 우선순위를 평가함으로써 무차원 평가의 측정 지표와 가연성 물질에 대한 정량적 평가 지수를 제공할 수 있으며 이를 이용하여 화재위험성 및 화재위험성 등급 평가가 가능해진다[15].

본 연구에서는 건자재 및 내장재로 주로 사용되고 있는 적삼목(*Thuja plicata*, western red cedar), 전나무(*Abies holophylla*, needle fir), 물푸레나무(*Fraxinus rhynchophylla*, ash), 단풍나무(*Acer palmatum*, maple)를 시험재료로 사용하였다. 그리고 Chung's equations-II에 의한 화재성능지수-II (fire performance index-II, FPI-II)와 화재성장지수-II (fire growth index-II, FGI-II)를 평가하였다. 또한 표준물질을 이용하여 Chung's equations-III, -IV에 의한 화재성능지수-III (fire performance index-III, FPI-III)와 화재성장지수-III (fire growth index-III, FGI-III)에 대하여 화재위험성을 표준화하고 화재위험성지수-IV (fire risk index-IV, FRI-IV)를 사용하여 화재위험성을 등급화 함으로써 초기 화재에 대한 화재위험성을 등급화 하는데 목적이 있다. 이 방법은 모든 가연성 물질 및 난연성 물질에도 적용 가능하며, 이를 확장하여 화재 설계 및 화재 시뮬레이션 데이터의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 시험편은 서양적삼목(western red cedar), 전나무(needle fir), 물푸레나무(ash) 및 단풍나무(maple)의 순수한 목재를 엠에이치테크놀로지사에서 구입하여 두께 10 mm로 별도의 가공처리 없이 시험 규격의 시편 크기에 맞게 사용하였다. 표준물질인 PMMA는 Fire Testing Technology사에서 18 mm 검은색을 구입한 후 두께 10 mm로 절단하여 사용하였다.

2.2. 수분함량

수분함량(moistur content, MC)은 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[16].

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

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

목재의 체적밀도와 수분함량은 Table 1에 나타내었다.

2.3. 콘칼로리미터 시험

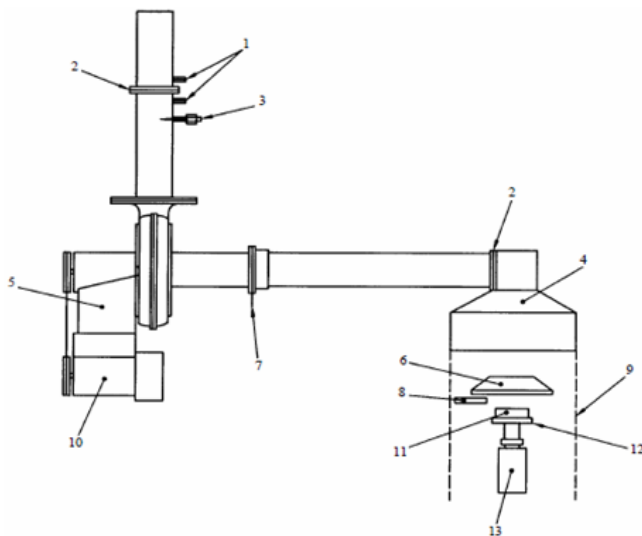
연소 성질에 대한 시험은 ISO 5660-1의 표준방법에 근거하여 Fire Testing Technology사의 Dual cone calorimeter를 사용하여, 실제 화재 시와 유사한 화재성장기에서 발견되는 열유속인 50 kW/m² 외부 열유속(external heat flux) 조건에서 진행하였다[13]. 사용한 시험편의 두께는

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

Materials	Classification	Moisture content (%)	Bulk 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

Table 2. Experimental Conditions for Cone Calorimeter Test

Contents	ISO 5660-1
Sample size (mm ³)	100 × 100 × 10
External heat flux (kW/m ²)	50
Orientation	Horizontal face upwards
Test time (s)	1800



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[11].

10 mm이고 시편은 100 mm × 100 mm (±?) 크기의 규격으로 절단하였으며, 연소 반응 후 화재위험성 평가 분석에 필요한 화재 인자 관련 지수를 구하였다. Figure 1에 콘칼로리미터 개략도를 나타내었으며 Table 2에 콘칼로리미터 시험에 대한 실험조건을 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 건재 목재의 화재위험성을 평가하기 위한 한 부분으로 열 및 연기 특성을 중심으로 평가하였다. 화재 특성과 관련된 요소로 착화시간(time to ignition, TTI), 열방출률(heat release rate, HRR), 연기생성속도(smoke production rate, SPR) 및 최대연기생성속도에 도달하는 시간 (time to reach peak smoke release rate, TSPR)을 측정 후 FPI-II와 FGI-II를 평가하였다.

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

Materials	^a TTI (s)	^b HRR _{1st_peak} (kW/m ²)/ at time (s)	^c HRR _{2nd_peak} (kW/m ²)/ at time (s)	^d SPR _{1st_peak} (m ² /s)
Western red cedar	3	266.46 / 20	150.54 / 230	0.0441
Needle fir	9	214.96 / 25	214.23 / 250	0.0191
Ash	15	271.93 / 30	410.02 / 240	0.0183
Maple	16	245.51 / 40	443.97 / 270	0.0172
PMMA	17	1110.56 / 385	-	0.0516

Materials	^e TSPR _{1st_peak} (s)	^f SPR _{2nd_peak} (m ² /s)/ at time (s)	^g CO _{peak} (ppm)/ at time (s)	^h CO _{2_2nd_peak} (ppm)/ at time (s)
Western red cedar	15	0.0189 / 195	141 / 461	3778 / 271
Needle fir	20	0.0211 / 225	103 / 595	5357 / 295
Ash	35	0.0318 / 255	162 / 1100	11358 / 255
Maple	45	0.0282 / 270	132 / 1130	12753 / 280
PMMA	385	-	-	-

^a Time to ignition, ^b 1st_peak heat release rate, ^c 2nd_peak heat release rate, ^d 1st_peak smoke production rate, ^e Time to 1st_peak smoke production rate, ^f 2nd_peak smoke production rate, ^g peak carbon monoxide concentration (ppm), ^h peak carbon dioxide concentration (ppm).

그리고 PMMA를 기준물질로 무차원의 FPI-III와 FGI-III를 평가하였다. 또한 무차원의 화재위험성 등급지수인 FRI-IV를 도출하여 화재위험성을 표준화함으로써 가연성 소재들을 등급화 하였다. 콘칼로리미터 시험은 PMMA의 우수한 반복성 및 재현성 때문에 이것을 기준물질로 사용한다. 목재의 연소 특성에 대한 데이터를 Table 3에 제시하였다.

3.1. 착화시간과 열방출률

목재가 연소될 때 목재의 종류, 수분함량, 밀도, 열적특성 및 열 침투성 등은 에너지 방출속도, 연기생성, 가스 독성에 영향을 미친다. 연소 시 착화시간은 ISO 5660-1 규격에 따르면 10초 이상 시료의 표면 위 혹은 표면에 화염이 존재하는 시간으로 정의된다. 건축자재의 가연성을 평가하는데 매우 중요한 변수이며 착화시간이 짧을수록 소재는 더욱 가연성을 의미한다. 적절한 휘발성 연료-공기 농도에 도달하면 열분해 가스의 산화로 인해 화염 연소가 발생한다.

Table 3에 제시된 바와 같이 적삼목 3 s, 전나무 9 s, 물푸레나무 15 s, 단풍나무 16 s로 나타났다. 적삼목이 가장 빠른 착화 시간을 가졌으며 물푸레나무와 단풍나무는 유사한 착화시간을 나타내었다. 전나무는 적삼목에 비해 수분함량과 체적밀도가 커 착화시간이 증가하는 것으로 나타났다. 4종의 목재는 체적밀도가 증가함에 따라 착화시간이 지연되는 경향성을 보였다. 이것은 목재의 착화시간이 그의 표면 열 손실의 유무에 따른 상수, 열전도도, 체적밀도, 연료의 비열 및 착화온도 향의 제공에 비례하며, 시험편에 가해지는 열유속의 제공에 반비례하는 것으로 설명할 수 있다[17]. 그러나 물푸레나무는 단풍나무보다 수분함량이 커 체적밀도에 대한 영향도 있지만 수분함량에 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 목재는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌의 세 가지 주요 요소로 구성된다. 착화순서는 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스, 리그닌 순서로 증가한다[18]. 활엽수에 비해 침엽수는

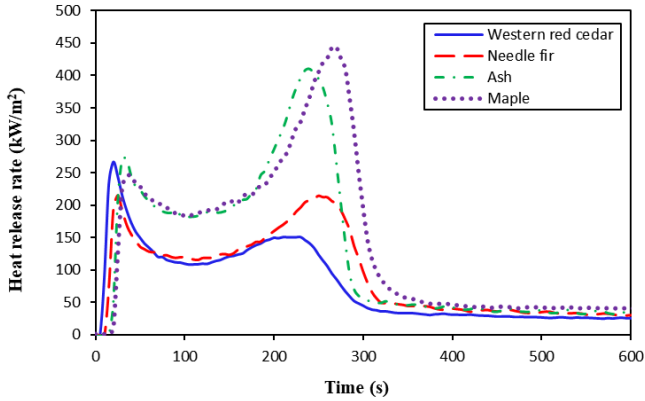


Figure 2. Heat release rate curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

헤미셀룰로오스가 적고 리그닌 성분이 많아 착화시간이 더 높을 것으로 예측되었으나 체적밀도가 작아 착화시간이 빠르게 나타났다.

열방출률은 소재의 연소모델링을 하기 위한 측정값이며 화재의 특성을 제어하고 화재 거동을 결정하는 가장 중요한 매개 변수이다. 이것은 화재가 열에너지를 방출하는 강도에 대한 정보를 제공한다. 특히 소재에 대한 화재 거동의 초기 단계는 건물 화재 안전의 여러 측면에서 중요하다. 열방출률이 낮은 건축소재를 사용할 경우 화재발생시 연소억제 효과를 기대할 수 있다[1]. 최대열방출률(peak heat release rate, HRR_{peak})은 시편의 표면적당 순간적으로 발생하는 열량의 크기로[19,20] 소재가 가장 강하게 연소되는 지점이므로 열방출 속도가 높은 불꽃연소는 화재영역을 발전시키고 성장시킨다. 그러므로 화재의 세기 및 화재 연쇄 효과를 평가하는데 있어 중요하다.

Figure 2는 착화 직후 급격한 최대값을 나타내는 목재에 대한 열방출률 곡선을 보여준다. 모든 시편이 두 개의 최대값을 가지고 있는 것으로 나타났다. 제1차 최대열방출률(HRR_{1st peak})은 열방출률이 초기에 급속히 증가함에 따라 나타났고 제2차 최대열방출률(HRR_{2nd peak})은 화재의 끝부분에서 나타났다. 제1차 최대열방출률은 숯 층이 형성되기 전 목재의 열분해로 생성되는 휘발성 가스의 초기 방출에 기인하여 발생하였다. 연소에 의해 생성된 열은 목재의 열분해를 유지하여 더 많은 휘발성 물질을 방출한다. 그 후, 열분해 전면(pyrolysis front)이 안쪽으로 이동함에 따라 숯 층이 점차적으로 쌓이게 된다. 숯의 형성은 목재의 열분해에 상당한 영향을 미치며 소재가 숯인 고체로 남아있으면 목재의 분해가 느려진다. 생성된 숯 층은 노출된 표면과 열분해 전면 사이에 단열층 역할을 하고 단열 효과를 증가시켜 제1차 최대값 이후에 열 방출률을 지속적으로 감소시킨다. 제2차 최대열방출률은 일정한 열 충격 하에서 숯 층이 갈라지고 파손되어 시편을 통과하는 두 번째 열분해 전면을 초래하기 때문에 나타난다[21]. 이것은 열적 파동이 뒷면 절연층에 도달할 때 일어나고 이런 후면효과(back effect)로 인하여 열이 축적되어 동시에 많은 열이 방출되기 때문에 나타난다[5]. 휘발성 물질이 고갈되면 화재 연소가 종료되었고 HRR은 안정된 기준선으로 돌아가는 것이 관찰되었다. 제2차 최대열방출률은 화재 성장을 위한 척도로 간주될 뿐만 아니라 형성된 숯 잔류물의 품질과 안정성을 설명하는 값으로 훨씬 더 많이 고려된다.

Table 3과 Figure 2에 목재의 열방출 곡선과 연소 특성을 제시하였다. 목재의 제1차 최대열방출 특성은 전나무 214.96 kW/m², 단풍나무 245.51 kW/m², 적삼목 266.46 kW/m², 물푸레나무 271.93 kW/m²로 나타났다. 물푸레나무가 가장 높게 나타났으며 전나무와 비교하여 1.3배

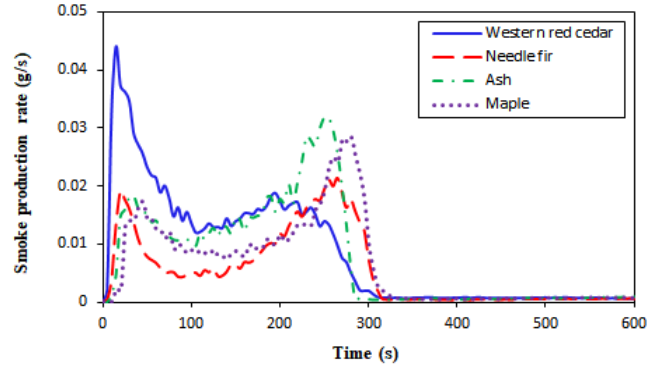


Figure 3. Smoke production rate curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

높았다. 제2차 최대열방출률은 적삼목 150.54 kW/m², 전나무 214.23 kW/m², 물푸레나무 410.02 kW/m², 단풍나무 443.97 kW/m²로 나타났다. 단풍나무가 가장 높았으며 적삼목과 비교하여 2.9배 높았다. 제2차 최대열방출률의 증가는 체적밀도가 클수록 열축적이 커지기 때문으로 예측되며 생성된 숯 구조의 불안정성에 기인하는 것으로 판단된다.

화재초기의 열유해성을 평가하면 제1차 최대열방출 영역에서는 물푸레나무가 가장 큰 유해성을 보였으며 전나무가 가장 유해성이 작은 목재로 나타났다. 화염에 휩싸일수록 제2차 최대열방출 영역에서 모든 목재는 체적밀도가 클수록 열축적이 커지므로 열유해성이 큰 것으로 나타났다. 그러나 화재 초기 최대열방출률에 도달하는 시간을 고려할 때 적삼목이 높은 열을 방출하며 제1차 최대열방출 도달시간이 20 s로 빨리 도달하므로 화재초기 열유해성이 가장 크고 단풍나무는 도달시간이 지연되어 상대적으로 덜 유해한 것으로 판단된다. 열방출률의 감소는 질량감소율의 감소에 의한 것이며 가연성 기체 생성이 감소하기 때문으로 판단된다. 침엽수는 주로 고농도의 휘발성 유기 화합물인 테르펜을 방출(70~90%)하고 낮은 농도의 핵산알 및 아세트산(10~25%)으로 구성된 물질을 방출한다. 그러나 활엽수에서 발생하는 휘발성 유기화합물의 배출량은 침엽수의 약 50배 정도로 상당히 낮고 핵산알 및 펜탄알, 아세트산 및 목재 분해 과정에서 형성된 기타 휘발성 유기 화합물을 포함하지만 휘발성 테르펜은 포함하지 않는다[22].

그러므로 적삼목과 전나무가 체적밀도가 낮고 휘발성 유기화합물을 많이 포함하여 빠른 시간 내에 제1차 최대열방출에 도달하므로 초기 화재에 취약한 것으로 판단된다.

3.2. 연기발생속도

연기는 거의 모든 화재에서 발생하며 생명에 중대한 위협을 초래한다. 목재와 관련된 화재로 인한 생명 손실의 주요 원인은 셀룰로오스의 열분해, 탄소의 부분 산화, 질소 산화물 및 수소 기반 화학 물질을 통한 일산화탄소 생성인 것으로 보인다. 화재초기의 높은 연기발생은 빛의 흡수와 산란으로 인해 가시성을 감소시키고 자극 및 무력화 효과를 통해 비상탈출을 위협한다. 연기 생성은 연소 물질에 따라 다르지만 화재 유형[화염(flaming) or 연기(smoldering)] 및 산소 공급과 같은 외부 요인도 중요하다.

시간의 변화에 따른 연기생성속도는 배기 덕트에서 연기의 체적유량과 감쇠계수와의 곱으로 계산된다. Figure 3에 나타난 바와 같이 연기방출은 모든 시편에서 두 단계로 나타났다. 제1차 연기생성속도는 15~45 s에서 나타났으며 제2차 연기생성속도는 195~275 s에서 나타났다. 이는 대부분의 목재의 열분해 영역과 잘 일치한다. 이것은 화재

Table 4. Fire Indices-II, III and Fire Risk Index-IV of Wood Specimens at 50 kW/m² External Heat Flux

Materials	FPI-II (s ² /kW)	FGI-II (kW/s ²)	FPI-III	FGI-III	FRI-IV
Western red cedar	0.26	0.78	0.86	5.26	6.12
Needle fir	2.19	0.21	7.39	1.38	0.19
Ash	3.01	0.14	10.16	0.96	0.09
Maple	3.79	0.09	12.77	0.63	0.05
PMMA	0.30	0.15	1.00	1.00	1.00

에 더 많은 표면이 노출됨으로써 목재가 균열되고 연소가스가 갑자기 방출되는 결과로 나타난다. 이러한 도달 시간은 체적밀도와 상관성이 있었으며 체적밀도가 클수록 최대연기생성속도에 도달하는 시간이 지연되는 것으로 나타났다.

Table 3과 Figure 3에 나타난바와 같이 제1차 최대연기생성속도 (SPR_{1st_peak})는 초기에 급격하게 도달한다. 이 기간 동안 연기는 가스, 수증기 및 에어로졸 및 분해된 헤미셀룰로오스에서 추출한 휘발성 목재 추출물로 구성된다. 제1차 최대연기생성속도는 단풍나무 0.0172 m²/s, 물푸레나무 0.0183 m²/s, 전나무 0.0191 m²/s, 적삼목 0.0441 m²/s 순으로 증가하였다. 적삼목은 단풍나무에 비하여 2.6배 높은 것으로 나타났다. 이것은 적삼목의 체적밀도가 낮기 때문에 상대적으로 초기 연소가 용이하여 열방출량이 높은 것과 일치하며, 화재초기 시험편의 순간 연기생성속도도 이와 유사한 경향성을 나타낸다.

제2차 최대연기생성속도(SPR_{2nd_peak})는 적삼목 0.0189 m²/s, 전나무 0.0211 m²/s, 단풍나무 0.0282 m²/s, 물푸레나무 0.0318 m²/s 순으로 증가하였다. 물푸레나무는 적삼목과 비교하여 1.7배 높은 것으로 나타났다. 시험편의 연소에 의해 생성된 숯은 목재보다 열전도율이 낮기 때문에 열침투성을 감소시킨다. 숯이 증가함에 따라 열분해 전단과 열유속에 노출된 목재 표면 사이에서 열적 저항이 증가되고, 이것은 연료에서 방출되는 휘발성 물질과 산소와의 상호작용을 억제하는 물질 수송 장벽으로 작용된다. 그러므로 최대연기생성속도가 감소되거나 연소시간을 지연시키는 결과를 초래한 것으로 판단된다.

화재초기의 연기유해성을 평가하면 제1차 최대연기생성속도 영역에서는 적삼목이 가장 큰 유해성을 보였으며 단풍나무가 가장 유해성이 작은 목재로 나타났다. 체적밀도가 작을수록 초기 연기유해성이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 화재 초기 연기생성속도에 도달하는 시간을 고려할 때 적삼목이 연기발생량이 가장 많으며 제1차 최대연기생성속도에 도달하는 시간이 15 s로 빨리 도달하므로 화재초기 연기유해성 가장 큰 것으로 판단된다.

3.3. 화재위험성 등급 평가

화재위험성 평가 방법인 화재성능지수-II (FPI-II) 및 화재성장지수-II (FGI-II)를 이용하면 가연성 소재의 화재위험성을 평가할 수 있다. 화재성능지수-II (FPI-II)는 아래의 식(2)와 같다[15].

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

이 식은 화재성능지수-II를 평가하기 위하여 착화시간, 최대연기발생속도 그리고 최대열방출률의 3개의 변수를 고려하였다. 3개의 변수를 사용함으로써 화재위험성을 종합적으로 판단할 수 있다. TTI는 가연성 소재의 화재 취약성을 설명할 수 있는 중요한 요소이며 착화시간이 짧을수록 재료는 더욱 가연성임을 나타낸다. 최대연기생성속

도인 SPR_{peak}는 화재초기의 위험성을 평가하기 위하여 SPR_{1st_peak}를 사용하였으며 최대열방출률인 PHRR (peak heat release rate)은 화재초기의 위험성을 평가하기 위하여 HRR_{1st_peak}를 사용하였다. 착화시간 및 열방출률의 초기 피크의 최대값은 물질의 화재위험성을 특성화하며[15], 최대값을 사용한 것은 실험 조건인 외부 열유속 50 kW/m²에서 성장기 화재에서의 가장 위험한 상태인 화재위험성을 평가하기 위함이다. 목재의 화재 확대와 플래시오버의 시간과 상관성이 있으므로 [23], 화재 확대가 증가할수록 화재안정성이 감소하는 것과 같이[24] 연기안정성 또한 감소하는 것으로 판단된다. 그러므로 FPI-II가 증가할수록 화재위험성은 낮아진다.

화재성장지수-II (FGI-II)는 아래 식(3)과 같다[15].

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

이 식은 FGI-II를 평가하기 위하여 최대연기발생속도, 최대열방출률 그리고 최대연기발생속도에 도달하는 시간인 3개의 변수를 고려하였다. 3개의 변수를 사용함으로써 화재위험성을 종합적으로 판단할 수 있다. 최대연기생성속도인 SPR_{peak}는 화재초기의 위험성을 평가하기 위하여 SPR_{1st_peak}를 사용하였으며 최대열방출률인 PHRR (peak heat release rate)은 화재초기의 위험성을 평가하기 위하여 HRR_{1st_peak}를 사용하였다. 제1차 최대연기생성속도에 도달하는 시간(time to SPR_{1st_peak})은 빠를수록 화재위험성이 커지므로 FGI-II가 증가할수록 화재위험성은 높아진다.

Table 4에 재료의 FPI-II 값을 제시하였다. FPI-II는 착화시간, 열 및 연기가 조합된 값으로 단풍나무가 가장 높게 나타났다. 이것은 열방출률을 고정시키면 모든 소재 중 TTI가 가장 많이 지연되고 SPR_{1st_peak}가 가장 낮기 때문으로 판단된다.

FPI-II에 의한 화재위험성은 단풍나무(3.79) < 물푸레나무 (3.01) < 전나무(2.19) < PMMA (0.30) < 적삼목(0.26) 순으로 증가하였다.

Table 4에 재료의 FGI-II 값을 제시하였다. FGI-II는 열, 연기 및 최대연기생성속도에 도달하는 시간이 조합된 값으로 적삼목이 가장 높게 나타났다. 열방출률을 고정시키면 모든 소재 중 TTI가 가장 빠르고 SPR_{1st_peak}가 가장 높기 때문으로 판단된다.

FGI-II에 의한 화재위험성은 단풍나무(0.09) < 물푸레나무(0.14) < PMMA (0.15) < 전나무(0.21) < 적삼목(0.78) 순으로 증가하였다.

화재위험성 평가 지수인 FPI-II와 FGI-II에 의한 화재위험성 평가 결과 적삼목이 가장 위험하며 단풍나무가 가장 안전한 물질로 나타났다.

모든 소재에 적합한 화재위험성을 평가하기 위한 접근 방법으로 화재위험성을 표준화하기 위하여 기준물질을 이용한 확장된 식을 사용하였다.

표준화 한 화재성능지수-III (FPI-III)는 아래의 식(4)와 같다[15].

$$FPI-III = \frac{\frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)}}{\left[\frac{TTI (s)}{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)} \right]_{PMMA}} \quad (4)$$

FPI-III는 FPI-II를 FPI-II[PMMA]의 표준 값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의된다. 이 식은 무차원 지수이다. 최대연기생성속도와 최대열방출률의 값은 초기 화재의 중요성을 고려하여 SPR_{1st_peak} 와 HRR_{1st_peak} 값을 적용하였다. FPI-III가 증가할수록 화재위험성은 낮아진다.

표준화 한 화재성장지수-III (FGI-III)는 아래의 식(5)와 같다[15].

$$FGI-III = \frac{\frac{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)}{Time\ to\ SPR_{peak} (s)}}{\left[\frac{SPR_{peak} (m^2/s) \cdot PHRR (kW/m^2)}{Time\ to\ SPR_{peak} (s)} \right]_{PMMA}} \quad (5)$$

FGI-III는 FGI-II를 FGI-II[PMMA]의 표준 값(PMMA 기준)으로 나눈 값으로 정의된다. 이 식은 무차원 지수이다. 최대연기생성속도와 최대열방출률의 값은 초기 화재의 중요성을 고려하여 SPR_{1st_peak} 와 HRR_{1st_peak} 값을 적용하였다. FGI-III가 증가할수록 화재위험성은 높아진다.

Table 4에 나타난 바와 같이 FPI-III는 단풍나무가 가장 높게 나타났다. 이것은 모든 소재 중 TTI가 가장 많이 지연되고 SPR_{1st_peak} 가 가장 낮기 때문으로 판단된다. PMMA를 기준물질로 한 화재 등급지수인 FPI-III는 적삼목(0.86) < PMMA (1.00) < 전나무(7.39) < 물푸레나무(10.16) < 단풍나무(12.77)의 순서로 증가하였다. 이것은 체적밀도가 높은 소재가 체적밀도가 작은 소재보다 화재위험성이 낮은 것으로 판단된다. FPI-II와 FPI-III에 의 화재위험성 평가 결과 단풍나무가 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

Table 4에 나타난 바와 같이 FGI-III는 적삼목이 가장 높게 나타났다. 이것은 모든 소재 중 SPR_{1st_peak} 가 가장 높고 SPR_{1st_peak} 에 도달하는 시간이 가장 빠르기 때문으로 판단된다. PMMA를 기준물질로 한 화재 등급지수인 FGI-III에 의한 화재위험성은 단풍나무(0.63) < 물푸레나무(0.96) < PMMA (1.00) < 전나무(1.38) < 적삼목(5.26) 순으로 증가하였다. 이것은 FPI-III와 같이 FGI-III도 체적밀도가 높은 소재가 체적밀도가 작은 소재보다 화재위험성이 낮은 것으로 판단된다. FGI-II와 FGI-III에 의 화재위험성 평가 결과 단풍나무가 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

FPI-III와 FGI-III는 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으로, 콘칼로리미터 실험에서 소재의 화재안전성을 파악하는데 종합적인 평가로 적용될 수 있다.

화재 등급을 평가할 수 있는 화재위험성지수-IV (FRI-IV)는 아래 식(6)과 같다.

$$FRI-IV = \frac{FGI-III}{FPI-III} \quad (6)$$

FRI-IV는 FGI-III를 FPI-III으로 나눈 값으로 정의된다. 이는 화재 확대가 증가할수록 화재안전성이 감소하는 것과 같다. 따라서 FRI-IV 값이 클수록 화재위험성이 커지고 반대로 FRI-IV 값이 작아질수록 화재위험성이 감소하는 것으로서 이 식은 화재위험성 및 화재 등급을 종합적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

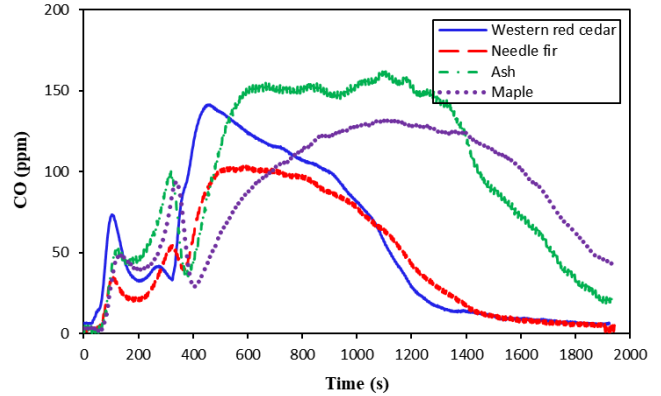


Figure 4. CO concentration (ppm) curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

Table 4에 나타난 바와 같이 화재 등급지수인 FRI-IV에 의한 화재 위험성은 적삼목이 가장 높은 것으로 나타났다. PMMA를 기준물질로 화재위험성을 표준화한 값을 이용하여 구현한 FRI-IV는 단풍나무(0.05) < 물푸레나무(0.09) < 전나무(0.19) < PMMA (1.00) < 적삼목(6.12) 순으로 증가하였다. 화재위험성을 종합적으로 평가한 결과 화재성장지수보다 화재성능지수의 순위와 일치하는 것으로 나타났으며 적삼목은 단풍나무와 비교하여 122.4배 높았다. 특히 단풍나무가 FRI-IV가 가장 낮은 것으로 나타났으며 FPI-III, FGI-III에서도 화재위험성이 가장 낮게 나타난 것과 일치하였다. FRI-IV에 의한 화재위험성 등급 평가 결과 단풍나무가 가장 안전한 물질임을 알 수 있었다.

3.4. 일산화탄소, 이산화탄소 농도

화재 유출 독성에 대한 연구는 연료 화학과 복잡한 화재 과정의 조건이 모두 중요한 영향을 미치는 다 분야 영역이다. 모든 화재는 고유한 것으로 간주될 수 있지만 연소 행동과 독성 생성량은 몇 가지 요인에 가장 크게 좌우되는데 재료의 조성, 온도 및 산소농도가 가장 중요하다. 화재 중독의 주요 원인은 목재가 연소되면서 나오는 유독성 연소생성물인 일산화탄소(CO)이다. CO는 화염과 목재 사이의 휘발성 물질의 불완전 연소 생성물이다. 플래시오버에 도달하는 대부분의 일반적인 화재는 화상 유무에 관계없이 위험한 수준의 일산화탄소를 생성한다. 화재 시 생성되는 독성 가스인 일산화탄소는 천천히 퍼져 인체의 헤모글로빈과 강한 결합을 형성한다[25]. 일산화탄소는 카르복시 헤모글로빈(COHB)을 형성함으로써 저산소증과 옥시헤모글로빈의 해리를 일으키는 것으로 알려져 있다[26]. 또한 1단계의 10~30% COHB 혈중 농도를 일으키는 CO에 대한 노출은 고동치는 일시적 두통, 숨 가쁨 현상 및 현기증 등의 증상을 일으킨다. 2단계 중간정도의 30~50% COHB 혈중 농도는 심각한 두통, 나약함, 현기증, 메스꺼움, 구토, 실신, 심박 급속증 등의 증상을 야기한다. 마지막으로 심각한 3단계의 50~80% COHB 농도는 실신, 발작, 혼수상태, 심혈관 중독, 호흡실폐 및 사망 등의 더욱 심각한 증상을 발생시킨다. 0~10% COHB는 무증상이다[27].

Figure 4에서 보는 바와 같이 모든 목재는 불꽃이 꺼진 후 CO 생산량이 감소되고 잔광 단계(afterglow phase)가 시작되면서 다시 증가하기 시작한다. 잔광단계에서 강렬한 열산화(thermo-oxidation)로 인하여 물푸레나무가 모든 목재 중 CO 배출 농도가 가장 높았다. 500 °C 이상의 온도에서는 휘발성 생성물이 종료되며 숯이 산화되어 CO, CO₂, H₂O를 생성한다. 단풍나무가 2000 s 이상에서도 CO 배출 농도가 높

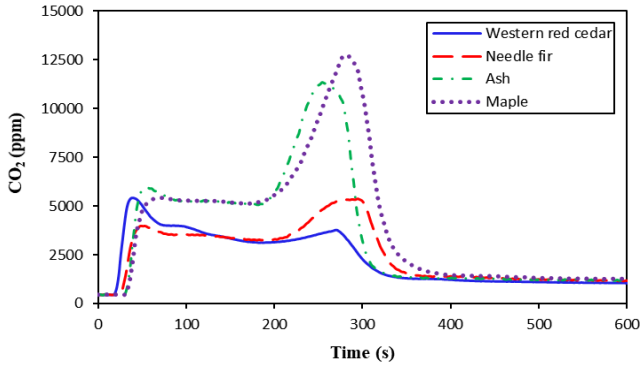


Figure 5. CO₂ concentration (ppm) curves of wood specimens at 50 kW/m² external heat flux.

은 것은 다른 목재에 비해 열 산화 시작 시간이 늦어졌고 화염 후 생성된 숯이 다른 목재에 비해 단단하고 숯의 양이 많아 열 산화의 지속 시간이 지연되는 것으로 판단된다.

Table 3과 Figure 4에 나타난 모든 시험편의 CO_{peak} 농도는 103~162 ppm으로 측정되었으며, 이 농도는 미국직업안전위생관리국(Occupational safety and health administration, OSHA)의 허용기준(permissible exposure limits, PEL)인[28] 50 ppm (최대 10% COHb)과 비교하면 2.1~3.2배의 높은 독성을 생성하는 것으로 나타났다. 전나무가 CO 배출량이 가장 낮은 목재로 나타났다. 화재에 따라 CO의 수치는 50 ppm 이상에서 수천 ppm까지 다양할 수 있으며, 이는 몇 시간 노출 후 약간의 신경학적 손상을 일으킬 수 있으며 혹은 몇 분 노출 후 치명적일 수 있다.

일산화탄소와 마찬가지로 이산화탄소(CO₂)는 화재 시 생성된다. 이산화탄소 농도가 5% 미만이면 이산화탄소만큼 독성은 없지만 호흡을 자극하고 사람의 호흡량을 증가시킨다. CO₂ 농도가 약 3%이면 분당 호흡률이 2배, 약 5%이면 3배가 된다. 이러한 결과는 과호흡을 유발하여 일산화탄소와 같은 다른 독성 가스의 흡수를 촉진하는 데 중요한 역할을 한다[29].

Figure 5에 나타난 바와 같이 CO₂ 농도 곡선은 두 개의 피크로 나타났으며 제1차 피크는 목재 가열로 인한 휘발성 기체의 발생 동안 발생한다. 탄화 과정에서는 두 피크 사이의 CO₂ 농도가 낮아진다. 제2차 피크는 후면 효과에 기인하며, 시편 뒷면에서 시편의 모든 표면에 열파를 반사하여 시편의 연소 속도를 증가시킨다. 목재를 태우는 동안 가열 온도가 상승하면 질량 손실률이 증가함에 따라 CO₂ 농도가 증가한다. CO_{2 peak} 농도는 Table 3과 Figure 5에 나타난 바와 같이 적삼목은 3,778 ppm이었으며 그 외 시험편은 5,357~12,753 ppm이었다. 적삼목을 제외하고 OSHA의 허용기준(PEL)인[30] 5000 ppm보다 1.1~2.6배 높게 나타났다. 15,000 ppm이면 일부사람들에게 가벼운 호흡자극이 있는데 그 농도 미만이므로 CO₂에 대하여 대부분 안전한 것으로 보인다.

Table 3의 CO와 CO₂ 농도를 사용하여 CO/CO₂ 비율을 계산한 결과, 적삼목 0.037, 전나무 0.019, 물푸레나무 0.014, 단풍나무 0.010이었다. 단풍나무와 비교하여 그 외 목재는 1.4~3.7배로 높았다. 단풍나무는 불완전 연소보다 완전연소가 우세한 것으로 판단되며 적삼목은 불완전 연소가 우세하여 CO 독성도가 높은 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 건자재용으로 사용빈도가 높은 적삼목, 전나무, 물푸

레나무, 단풍나무를 선정하여 Chung's equations-II인 FPI-II와 FGI-II, Chung's equations-III인 FPI-III와 FGI-III, Chung's equation-IV인 FRI-IV를 사용하여 화재위험성 및 화재위험성 등급을 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) FPI-II, FPI-III에 의한 화재위험성은 단풍나무 < 물푸레나무 < 전나무 < PMMA < 적삼목 순으로 증가하였다. 체적밀도가 높은 소재가 체적밀도가 작은 소재보다 화재위험성이 낮은 것으로 판단된다. 휘발성 유기화합물을 작게 포함하고 있는 활엽수가 화재성능지수가 높아지므로 화재위험성이 낮다는 것을 의미한다.

2) FGI-II, FGI-III에 의한 화재위험성은 단풍나무(0.63) < 물푸레나무(0.96) < PMMA(1.00) < 전나무(1.38) < 적삼목(5.26) 순으로 증가하였다. 체적밀도가 낮은 소재가 체적밀도가 높은 소재보다 화재위험성이 높은 것으로 판단된다. 휘발성 유기화합물을 많이 포함하고 있는 침엽수가 화재성장지수들이 높아지므로 화재위험성이 높다는 것을 의미한다.

3) 모든 시험편의 CO_{peak} 농도는 103~162 ppm으로 측정되었으며, 미국직업안전위생관리국(OSHA)의 허용기준(PEL)인 50 ppm과 비교하면 2.1~3.2배의 매우 높은 독성을 생성하는 것으로 나타났다.

4) 화재위험성지수인 FRI-IV에 의한 화재위험성 등급은 단풍나무(0.05) < 물푸레나무(0.09) < 전나무(0.19) < PMMA (1.00) < 적삼목(6.12) 순으로 증가하였다. 화재위험성을 종합적으로 평가한 결과 화재성장지수보다 화재성능지수의 순위와 일치하는 것으로 나타났으며 적삼목은 단풍나무와 비교하여 122.4배 높았다.

결론적으로 체적밀도가 작은 적삼목이 휘발성 유기물질을 다량 함유하고 있고 FPI-II와 FPI-III가 낮고, FGI-II와 FGI-III가 매우 높으므로 화재로 인한 화재위험성이 가장 높은 것으로 이해된다. 화재위험성등급인 FRI-IV가 6.12로 수종 중 가장 높았다.

감 사

이 논문은 2018년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비 연구(No. 620180015) 및 일부 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No. NRF-2019-R1F1A1059320)입니다.

References

1. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, *Thermal Analysis in Polymer Flammability*, Chap. 8, Thermal characterization of polymeric materials, Academic Press, New York, USA (1981).
2. M. Gao, K. Zhu, and Y. J. Sun, Thermal degradation of wood treated with amino resins and amino resins modified with phosphate in nitrogen, *J. Fire Sci.*, **22**, 505-515 (2004).
3. M. Gao, C. Y. Sun, and K. Zhu, Thermal degradation of wood treated with guanidine compounds in air: Flammability study, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **75**, 221-232 (2004).
4. N. Boonmee and J. G. Quintiere, Glowing ignition of wood: the on set of surface combustion, *Proc. Combust. Inst.*, **30**, 2303-2310 (2005).
5. M. Spearpoint and J. Quintiere, Predicting the piloted ignition of wood in the cone calorimeter using an integral model-effect of species, grain orientation and heat flux, *Fire Saf. J.*, **36**, 391-415 (2001).
6. M. Delichatsios, B. Paroz, and A. Bhargava, Flammability proper-

- ties for charring materials, *Fire Saf. J.*, **38**, 219-228 (2003).
7. T. Fateh, T. Rogaume, J. Luche, F. Richard, and F. Jabouille, Characterization of the thermal decomposition of two kinds of plywood with a cone calorimeter-FTIR apparatus, *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **107**, 87-100 (2014).
 8. K. Li, D. Pau, J. Wang, and J. Ji, Modelling pyrolysis of charring materials: determining flame heat flux using bench-scale experiments of medium density fibreboard (MDF), *Chem. Eng. Sci.*, **123**, 39-48 (2015).
 9. L. Terrei, Z. Acem, P. Lardet, P. Boulet, and G. Parent, Study of wood self-extinguishment with a double sliding cone calorimeter, *Fire Saf. J.*, **122**, 103316 (2021).
 10. F. Z. Brahmia, K. Zsolt, P. G. Horváth, and T. L. Alpár, Comparative study on fire retardancy of various wood species treated with PEG 400, phosphorus, and boron compounds for use in cement-bonded wood-based products, *Surf. Interfaces*, **21**, 100736-100747 (2020).
 11. 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).
 12. M. A. Delichatsios, Smoke yields from turbulent buoyant jet flames, *Fire Saf. J.*, **20**, 299-311 (1993).
 13. 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).
 14. L. Yan, Z. Xu, and N. Deng, Effects of polyethylene glycol borate on the flame retardancy and smoke suppression properties of transparent fire-retardant coatings applied on wood substrates, *Prog. Org. Coat.*, **135**, 123-134 (2019).
 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. W. T. Simpso, *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, 1-21 (1987).
 17. J. D. Dehaan, *Kirk's Fire Investigation (Fifth Ed.)*, 84-112, Pearson, London, England (2002).
 18. M. A. Buchanan, The ignition temperature of certain pulps and other wood components, *TAPPI*, **35**, 209-211 (1952).
 19. J. G. Quintire, *Principles of Fire Behavior, Chap. 5, Cengage Learning*, Delmar, USA (1998)
 20. 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).
 21. B. Schartel and T. R. Hull, Development of fire-retarded materials-Interpretation of cone calorimeter data, *Fire Mater.*, **31**, 327-354 (2007).
 22. J. Pohleven, M. D. Burnard, and A. Kutnar, Volatile organic compounds emitted from untreated and thermally modified wood-a review, *Wood Fiber Sci.*, **51**, 231-254 (2019).
 23. V. Babrauskas, Development of the cone calorimeter - A bench-scale, heat release rate apparatus based on oxygen consumption, *Fire Mater.*, **8**, 81-95 (1984).
 24. C. Jiao, X. Chen, and J. Zhang, Synergistic effects of Fe₂O₃ with layered double hydroxides in EVA/LDH composites, *J. Fire Sci.*, **27**, 465-479 (2009).
 25. R. H. White and M. A. Dietsberger, *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Ch.17: Fire Safety*, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, USA (1999).
 26. A. Ernst and J. D. Zibrak, Carbon monoxide poisoning, *N. Engl. J. Med.*, **339**, 1603-1608 (1998).
 27. R. V. Burg, Toxicology update, *J. Appl. Toxicol.*, **19**, 379-386 (1999).
 28. OSHA, *Carbon Monoxide, OSHA Fact Sheet*, United States National Institute for Occupational Safety and Health, September 14, USA (2009).
 29. U. C. Luft, *Aviation Physiology: the Effects of Altitude in Handbook of Physiology*, 1099-1145, American Physiology Society, Washington DC, USA (1965).
 30. OSHA, *Carbon Dioxide, Toxicological Review of Selected Chemicals*, Final rule on air comments project, OSHA's Comments, January 19 (1989).

Authors

Eui Jin; Ph. D., Senior Researcher, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea; jin_eui@hanmail.net

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