

[Research Paper]

## 생활 주변에서 사용되는 건축용 목재의 연소성

우태영 · 유지선 · 정영진\*<sup>†</sup>

강원대학교 방재전문대학원, \*강원대학교 소방방재공학과

### Combustion Properties of Construction Lumber Used in Everyday Life

Tae-young Woo · Jisun You · Yeong-jin Chung\*<sup>†</sup>

Professional Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, Gangwon-do 25913, Korea

\*Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University, Gangwon-do 24549, Korea

(Received February 27, 2017; Revised March 15, 2017; Accepted March 22, 2017)

#### 요 약

이 연구에서는 4종의 삼나무, 스프러스, 나왕, 레드파인 시험편을 콘칼로리미터(Cone calorimeter, ISO 5660-1, 2)와 연기밀도시험기(ASTM E 662)를 이용하여 연소성을 시험하였다. 그 결과, 삼나무가 착화시간이 가장 빨랐고 평균열방출율(HRR<sub>mean</sub>)이 58.52 kW/m<sup>2</sup>으로 가장 낮게 나타났다. 그리고 레드파인의 평균열방출율(HRR<sub>mean</sub>)이 71.75 kW/m<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타났다. CO 발생량에서는 나왕과 삼나무가 가장 많이 발생하였고, 반대로 CO<sub>2</sub> 발생량에서는 레드파인과 스프러스가 가장 많이 발생하였다. 동적방법에서의 총연기방출율은 레드파인이 연기가 가장 많이 발생하였고, 스프러스가 가장 적게 발생하였다. 정적방법에서의 연기밀도는 레드파인이 혼소(Non-flaming) 방식과 불꽃(Flaming) 방식에서 가장 높았다. 나왕은 혼소(Non-flaming) 방식에서 2번째로 연기가 많이 발생한 데 반하여 불꽃(Flaming) 방식에서는 가장 적게 발생한 것을 알 수 있었다. 열방출율 측면에서 화재위험성은 4가지 시험편 중 레드파인이 가장 높았다. 연기발생 관점으로 보아도 동적인 방식과 정적인 방식 모두 레드파인이 화재 위험성이 가장 높은 재료였다.

#### ABSTRACT

The combustion characteristics of four kinds of wood specimens, such as Japan cedar, spruce, lauan, and red pine, were tested using the standards of Cone calorimeter (ISO 5660-1, 2) and smoke density tester (ASTM E 662). Japan cedar caught fire the quickest but the mean heat release rate was the lowest, 58.52 kW/m<sup>2</sup>. The mean heat release rate of red pine appeared to be the highest, 71.75 kW/m<sup>2</sup>. The lauan and Japan cedar generated relatively large amounts of carbon monoxide while the red pine and the spruce generated relatively large amounts of carbon dioxide. The red pine generated large amounts of smoke and the spruce generated the least amounts of smoke than the other samples. The total smoke release rate in the dynamic method was the highest in red pine and the lowest in spruce. The smoke density of red pine in the static method was highest in the non-flaming and flaming methods. In the non-flaming method, the smoke density of lauan was the second highest, whereas the flaming method was the least. In terms of the heat release rate, the fire risk from red pine was highest among the four test specimens. From the viewpoint of smoke generation, red pine was the most dangerous material in both dynamic and static methods.

**Keywords :** Cone Calorimeter (ISO 5660-1,2), Combustion Properties, Smoke, Smoke Density Tester (ASTM E 662)

#### 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. 또한 우리가 보존해야 할 문화재나 목조 주택은 거의 목재로 이루어진 건축물이므로 화재에 취약하다는 단점이 있다. 화재로 인한 문

화재의 손실은 막대한 문화유산의 손실로 이어지므로 목재에 대한 연구는 계속되어야 한다고 판단된다. 그리고 가연물의 연소 시 발생하는 연소가스와 연기에 의한 피해도 많이 발생한다. 특히, 연기는 화재발생 시 인명피해에 있어서 제일 큰 비중을 차지한다<sup>(1)</sup>.

지난 2005년 3월 5일 강원도 낙산사가 화염에 휩싸였고, 2008년 2월 10일에는 국보 1호 승례문이 흰 연기와 함께 불탔다. 그리고 2009년 12월 20일 여수 향일암의 대웅전이

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: yjchung@kangwon.ac.kr, TEL: +82-33-540-3121, FAX: +82-33-540-3129

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

**Table 1.** The Volume Density and Moisture Content of Each Lumber

Physical Properties	Japan Cedar	Spruce	Lauan	Red Pine
Moisture Content (%)	8.6	10.7	8.8	9.9
Volume Density (kg/m <sup>3</sup> )	279.1	510.9	542.5	607.4

화재로 전소되었다. 이처럼 최근 문화재 화재가 끊이지 않았다<sup>(2)</sup>. 또한 허술한 건물관리와 비합법적인 시설 등에서 화재사고는 빈번히 발생하여 무고한 인명 및 막대한 재산 손실을 가져다주고 있다.

2014년 11월 15일 오후 9시 45분경 전남 담양군 대덕면 매산리 펜션 바비큐장에서 화재가 발생해 고기를 구워 먹던 나주의 한 대학교 동아리 대학생과 졸업생 등 5명이 숨지고 5명이 부상을 당했다<sup>(3)</sup>.

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<sup>(4)</sup>.

이에 대한 선행연구를 살펴보면 Grexa<sup>(5)</sup>은 일인산 암모늄과 붕산으로 난연처리한 목재에 열과 연기의 특성 중 일부를 선정하여 평가한 바 있다. 그러나 열 특성 중 열방출률로만 평가하는 것은 한계가 있다고 판단된다.

Spearpoint와 Quintiere<sup>(6)</sup>은 열유속(heat flux)를 25 kW/m<sup>2</sup>, 35 kW/m<sup>2</sup>, 50 kW/m<sup>2</sup> 그리고 75 kW/m<sup>2</sup>로 변화하여 4 종류의 목재(미송, red wood, 북가시나무, 단풍나무)를 선정하여 높은 열유속과 낮은 열유속을 비교하여 콘칼로리미터 실험을 진행하였고, 적분모델을 이용해 임계 열유속을 계산하여 나타냈다.

Boonmee와 Quintiere<sup>(7)</sup>는 콘칼로리미터를 이용하여 나무결 방향 또는 그의 수직방향으로 하여 복사 열속에 노출될 때 수직방향으로 목재의 백열 및 연열착화를 연구하였다. 이론적인 착화 모델은 표면의 숯연소를 포함한 나무의 열분해에 대하여 개발되어졌다.

따라서 다양한 목재의 연소특성과 화재위험 특성 규명에 관한 연구는 끊임없이 이어져야 한다고 판단하여 일부 목재 재료 중 침엽수를 대상으로 목재의 화재위험 특성을 평가하고자 한다.

본 연구의 목적은 생활 주변에서 사용빈도가 높은 목재 중 삼나무, 스프러스, 나왕, 레드파인의 연소특성을 열방출율, 연기관련지수 및 연기밀도 등을 중심으로 분석하여 건축구조 재료의 화재 위험성을 평가하고자 하였다. 그리고 화재 시뮬레이션 데이터의 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 시험편은 스프러스, 나왕, 레드파인, 삼나무의 순수한 목재를 구입하여 두께 10 mm로 별도의

가공처리 없이 시험 규격의 시편 크기에 맞게 사용하였다. 수분함량은 일정량의 시험편을 105 °C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시험편의 중량을 4 h 간격으로 더 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였다<sup>(8)</sup>.

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

이 식에서 W<sub>m</sub>은 함수율을 구하고자 하는 목재편의 중량(g)이고, W<sub>d</sub>는 건조시킨 후의 절대건조 중량(g)이다. 목재의 수분함량과 체적밀도는 Table 1에 나타내었다. 모든 시편의 수분함량은 8.6~10.7% 범위였으며, 체적 밀도는 삼나무가 279.1 kg/m<sup>3</sup>으로 가장 낮았고 그 외의 시편들은 510.9~607.4 kg/m<sup>3</sup>였다.

### 2.2 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1<sup>(9)</sup>, ISO 5660-2<sup>(10)</sup>의 방법에 의해 Dual Cone Calorimeter (Fire Testing Technology)를 이용하여 열유속 25, 35, 50 kW/m<sup>2</sup> 조건에서 수행하였다<sup>(8)</sup>. 사용한 시험편의 두께는 10 mm로서 크기는 100 mm × 100 mm의 규격으로 제작하였으며, 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 m<sup>3</sup>/s로 설정하였다.

시험편은 단열재인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편 홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2분간의 데이터 수집시간을 부여하였다.

본 연구에서 선정된 시험편은 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m<sup>2</sup> 복사 열 유속에 수습 분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열 및 연기 관련 지수를 구하였다.

### 2.3 연기밀도 시험

연기밀도 실험은 광원과 광량감지기 사이에 연기가 통

**Table 2.** The Change of the Time to Ignition Depending on External Heat Flux

External heat flux (kW/m <sup>2</sup> )	Japan Cedar	Spruce	Lauan	Red Pine
25	35	46	54	55
35	11	20	25	21
50	4	9	10	9

과하는 공간을 두어 연기에 의해서 차단되는 광 투과율을 측정하는 것으로 ASTM E 662 규격에 의해 밀봉된 챔버 안에 시편을 수직으로 세워 실험을 수행하였다. 시편은 75 mm×75 mm의 크기로 두께 10 mm로 절단하여 사용하였다. 실험 방식은 25 kW/m<sup>2</sup>의 복사열이 되도록 열유량계를 이용하여 조정한 후 불꽃(Flaming) 방식과 혼소(Non-flaming) 방식으로 수행하였고, 연기밀도는 수직으로 설치된 광학장치에 통과된 빛의 강도를 측정하여 연기농도가 환산되었다<sup>(11)</sup>. 따라서 연기밀도(Density of smoke, Ds)는 시편의 연소 시 발생하는 연기의 양을 빛의 투과율 변화를 이용하여 측정한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 콘칼로리미터 시험

목재가 연소될 때의 에너지 방출속도, 연기생성, 가스 독성은 목재의 종류, 밀도, 수분함량, 열침투성 및 열적특성에 따라 결정된다<sup>(12-14)</sup>. 가연물과 관련하여 연소 특성의 이해를 돕는 다른 중요한 성질은 착화시간(time to ignition, TTI)이다. 착화시간은 시험편의 열원에 의한 노출로부터 지속적인 불꽃연소가 시작되기 전까지를 나타낸다. Table 2에 보여준 바와 같이 50 kW/m<sup>2</sup>의 열유속 하에서 착화시간은 스프리스 9 s, 나왕 10 s, 레드파인 9 s, 삼나무 4 s로서 삼나무가 다른 3 종류의 목재보다 훨씬 더 착화시간이 빠르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 목재의 수분함량과 연관지어 설명될 수 있으나, Table 1에 나타난 바와 같이 각 수종간의 수분함량 측정값이 큰 차이가 없으므로 착화시간과 관련지어 설명하는 것은 무의미하다. 그러나 외부열유속이 높아지면 착화시간도 짧아지는 것으로 보아 시편이 받는 열량이 높아지는 것으로 판단된다.

착화시간은 두꺼운 재료(통상 L > 2 mm)에서는 다음 식(2)로부터 구할 수 있다<sup>(15)</sup>.

$$t_{ig} = C(k\rho c) \left[ \frac{(T_{ig} - T_s)}{\dot{q}''} \right]^2 \tag{2}$$

이 식에서 C는 상수이며 재료의 물성과는 무관하나 열유속에 따라 가변적인 값이다. 표면 열손실이 없는 이상적인 경우는 0.785이며 표면 열손실이 있는 경우는 0.667을 사용한다. 여기에서는 C 값을  $\pi/4$ 를 취하였다. k는 재료의 열전도율(W/m·K),  $\rho$ 는 재료의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), c는 재료의 비열(J/kg·K)이며 Ts는 초기온도(실온), Tig는 점화온도(°C 혹은 K)이다.  $\dot{q}''$ 는 열유속(W/m<sup>2</sup>)이고 ( )는 단위면적당, (·)는 단위시간당을 의미한다. 식(2)에서 C의 변화는 중요하지 않는데 이는 k $\rho$ c와 Tig 값이 정확도 면에 더 큰 영향을 주기 때문이다. 일반적으로,  $\rho$ 의 증가만큼 k가 증가하고, k와 c도 온도와 함께 증가한다. 이 식에서 상수 k $\rho$ c는 평균온도에서의 값이므로 보통의 실내온도 조건보다 높다. Table 2에 나타난 바와 같이 착화시간은 목재의 체적밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향성을 보였다. 예외로 레드파인은 반드시 밀도에 의존하지는 않는 것으로 관찰되었는데, 그것은 그 자체의 휘발성 물질을 함유하고 있기 때문으로 예측된다<sup>(16)</sup>.

시험하는 동안에 측정되는 주 연소특성은 열방출률이다. 이것은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기로 표현되며, 재료의 연소 위험성을 가장 잘 나타낼 수가 있는 요소이다<sup>(15,17)</sup>. 또한 연소모델링을 위한 중요한 측정값이다. 열방출률이 낮은 건축재료를 사용할 경우 화재발생시 연소억제 효과를 기대할 수 있다<sup>(18)</sup>.

Table 3에 나타난 바와 같이 50 kW/m<sup>2</sup>의 외부 열유속에서 시험편의 평균열방출률(mean heat release rate, HRR<sub>mean</sub>)은 삼나무 58.52 kW/m<sup>2</sup>, 스프리스 66.61 kW/m<sup>2</sup>, 나왕 67.54 kW/m<sup>2</sup>, 레드파인 71.75 kW/m<sup>2</sup> 순서로 증가하는 것으로 나타났다. 삼나무의 평균열방출율이 가장 낮게 나타난 것은 삼나무의 체적밀도가 낮기 때문으로 설명될 수 있다.

**Table 3.** The Combustion Properties of Lumber at 50 kW/m<sup>2</sup> External Heat Flux

Materials	<sup>a</sup> HRR <sub>mean</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	CO <sub>mean</sub> yield (kg/kg)	CO <sub>2mean</sub> yield (kg/kg)	<sup>b</sup> TSR (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Japan Cedar	58.52	0.0824	1.4202	550.97
Spruce	66.61	0.0526	1.4309	525.24
Lauan	67.54	0.0876	1.3175	665.47
Red pine	71.75	0.0479	1.4521	1044.61

<sup>a</sup>mean heat release rate; <sup>b</sup>total smoke release rate

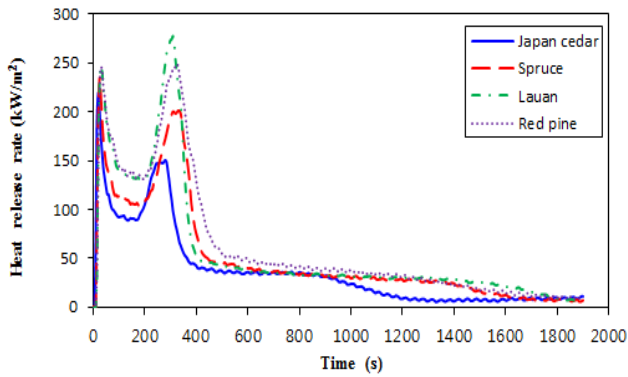


Figure 1. Heat release rate curves of lumber at 50 kW/m<sup>2</sup> external heat flux.

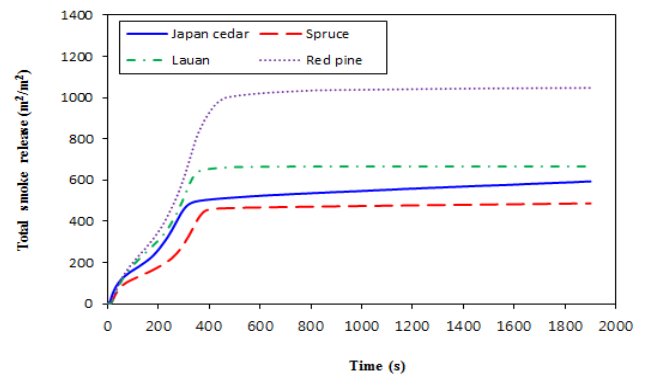


Figure 2. Total smoke release curves of lumber at 50 kW/m<sup>2</sup> external heat flux.

Figure 1에는 시간에 따른 열방출을 곡선을 나타내었다. Figure 1에서 보는 바와 같이 4 종류 시험편의 열방출율은 2개의 피크가 나타나는데 첫 번째 피크는 표면근처에 탄화층이 형성되기 전에 발생한다. HRR의 중간 부분은 초기 탄화층을 형성 한 후 점차적으로 두께를 통한 시험편의 연소에 기인한 것이다. 탄화층이 형성됨으로써 열방출율이 감소하다가 탄화층 표면에 흡수된 열유속이 탄화층을 미세하게 균열시키기 시작하면 탄화층 구조가 붕괴됨으로써 HRR이 다시 증가하기 시작한다. 두 번째 봉우리는 아직 타지 않고 남아있는 시험편의 뒷면까지 열이 전달되어 열분해 됨으로써 나타나는 피크이다<sup>(13)</sup>. 곡선의 끝은 열분해 구성 요소가 고갈 된 후에 나타나는 무연 연소이다. 1st-최대 열방출율은 219.89~246.84 kW/m<sup>2</sup> 로 삼나무가 가장 낮았으며 2nd-최대열방출율은 150.49~277.45 kW/m<sup>2</sup>로 삼나무가 가장 낮은 것으로 나타났다. 삼나무와 스프러스는 1st-최대열방출율이 2nd-최대열방출보다 각각 1.5배, 1.2배 높았으며 이는 화재 초기가 더 위험함을 나타낸다. 그러나 나왕은 2nd-최대열방출율이 1st-최대열방출을 보다 1.1배 높아 큰 차이는 아니지만 다른 경향을 보였다.

CO는 화재 발생 시에는 항상 존재하며 인간에게 노출 시 정신상태의 혼란을 일으키고 의식을 잃게 만드는 치명적인 가스이다. 심할 경우에는 화재로 인한 CO가스 흡입으로 죽음에 이르게 하기도 한다. Ernst와 Zibrak<sup>(19)</sup>는 CO가 Carboxyhemoglobin (COHb)을 형성함으로써 Hypoxia(저산소증)을 일으키고 Oxyhemoglobin의 해리를 일으킨다고 하였다. 또한, SFPE<sup>(20)</sup>에 의하면 “Hemoglobin의 CO에 대한 친화도는 매우 커서, COHb의 형태로 존재하는 Hemoglobin의 비율이 CO가 흡입됨에 따라서 점진적으로 계속 증가한다.”고 한다. Toxicology Update에 의하면 1단계의 10~30% COHb 혈중 농도를 일으키는 CO에 대한 노출은 고동치는 일시적 두통, 숨가쁨 현상 및 현기증 등의 증상을 일으킨다. 2단계 30~50% COHb 혈중 농도는 심각한 두통, 나약함, 현기증, 메스꺼움, 구토, 실신, 심박 급속증 등의 증상을 야기한다. 마지막으로 심각한 3단계의 50~80% COHb 농

도는 실신, 발작, 혼수상태, 심혈관 증독, 호흡실패 및 사망 등의 더욱 심각한 증상을 발생시킨다<sup>(21)</sup>. CO<sub>mean</sub> 발생량은 Table 3에 나타난 바와 같이 레드파인 0.0479 kg/kg, 스프러스 0.0526 kg/kg, 삼나무 0.0824 kg/kg, 나왕 0.0876 kg/kg 순으로 증가하였다.

CO<sub>2</sub>는 CO처럼 화재 시 항상 발생하며, Purser<sup>(22)</sup>는 5% 이하의 CO<sub>2</sub>가 CO만큼 유독하지는 아닐지라도 호흡을 자극해 호흡량을 증가시킨다고 하였다. 한편, King의 연구에 따르면 대략 3~6%의 CO<sub>2</sub>는 호흡장애의 정도가 점점 증가하고, 대략 5~6%의 CO<sub>2</sub>는 호흡장애의 정도가 심각해지면서 두통과 구토를 수반하며 호흡 실패 및 증상불편감 증세가 나타난다. 6% 정도의 CO<sub>2</sub>에서 사람들은 20분 이상 견디기 힘들게 된다. 7~10%의 CO<sub>2</sub>는 현기증, 졸림, 의식상실의 심각한 호흡상태에서 복합적으로 나타난다. CO<sub>2</sub> 농도가 10% 이상이 되면 의식상실이 더욱 급속하게 나타나며 사람들은 대략 2분 이내에 의식을 잃게 된다<sup>(23)</sup>.

CO<sub>2mean</sub> 발생량은 Table 3에서 보는 바와 같이 나왕 1.3175 kg/kg, 삼나무 1.4202 kg/kg, 스프러스 1.4309 kg/kg, 레드파인 1.4521 kg/kg 순으로 얻어졌다.

CO<sub>mean</sub> 발생량은 레드파인 < 스프러스 < 삼나무 < 나왕이며, CO<sub>2mean</sub> 발생량은 나왕 < 삼나무 < 스프러스 < 레드파인으로 서로 다르게 나타났다. CO는 나왕과 삼나무가 가장 많이 발생하여 4가지 목재 중 독성도가 높은 것으로 나타났다, 반대로 CO<sub>2</sub>는 레드파인과 스프러스가 가장 많이 발생하였다.

Table 3에 나타난 바와 같이 총연기방출률(TSR)은 스프러스 525.24 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, 삼나무 550.97 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, 나왕 665.47 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, 레드파인 1044.61 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> 순으로 높았다. 스프러스가 총연기방출률이 가장 작았으며 레드파인이 가장 높은 값으로 나타났고 스프러스 보다 2배 높게 얻어졌다.

Figure 2에는 시간에 따른 총연기방출률을 보인다. 삼나무는 325 s까지 486.42 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로, 스프러스는 375 s까지 442.57 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로, 나왕은 360 s까지 643.13 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로, 레드파인은 460 s까지 997.57 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로 급격히 증가하였다. 그러나

**Table 4.** The Smoke Density Measurements at 25 kW/m<sup>2</sup> Radiant Heat in Flaming Mode

Materials	Thickness (mm)	Flaming Mode			
		D <sub>s</sub> (1.5 min)	D <sub>s</sub> (4 min)	D <sub>s</sub> (10 min)	D <sub>m</sub>
Japan Cedar	10	3.55	34.38	208.93	220.91
Spruce	10	2.14	18.45	127.56	153.55
Lauan	10	0.32	22.48	103.28	132.37
Red Pine	10	0.50	21.55	87.39	266.81

D<sub>m</sub> : maximum specific optical density

**Table 5.** The Smoke Density Measurements at 25 kW/m<sup>2</sup> Radiant Heat in Non-Flaming Mode

Materials	Thickness (mm)	Non-Flaming Mode			
		D <sub>s</sub> (1.5 min)	D <sub>s</sub> (4 min)	D <sub>s</sub> (10 min)	D <sub>m</sub>
Japan Cedar	10	8.18	48.71	367.23	384.99
Spruce	10	4.03	58.22	367.40	371.37
Lauan	10	1.12	23.09	463.56	646.16
Red pine	10	3.15	31.70	409.16	737.51

D<sub>m</sub> : maximum specific optical density

최대 증가 시간 이후부터는 총연기방출율 증가 값은 완만하게 유지되며 많은 차이를 보이지 않았다.

### 3.2 연기밀도 시험

연소에 있어서는 불꽃을 동반하는 경우와 그렇지 않은 경우가 있으며 두 가지 경우에 발생하는 연기는 서로 다른 형태를 갖는다. 화재발생 초기의 연기밀도를 알아보기 위하여 시험 시작 후 1.5분, 4분, 10분 연기밀도 데이터와 시험동안 발생한 연기의 최대값인 최대연기밀도(D<sub>m</sub>) 등 정적 연기밀도 측정 결과 값들을 중점적으로 분석하였다.

Table 4에 의하면 불꽃(Flaming) 방식에서의 연기밀도는 4종의 목재에 대하여 매우 유사한 패턴을 얻을 수 있었다. 시험이 시작한 후 1.5분이 경과했을 때 연기밀도는 나왕 0.32, 레드파인 0.50, 스프러스 2.14, 삼나무 3.55 순으로 증가하였고, 4분이 경과했을 때는 스프러스 18.45, 레드파인 21.55, 나왕 22.48, 삼나무 34.38 순으로 나타났다. 마지막 10분이 지났을 경우에는 레드파인 87.39, 나왕 103.28, 스프러스 127.56, 삼나무 208.93로 연기 밀도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 목재는 1.5~4분 사이의 연기밀도는 8.6~70.3배 증가하였고 나왕이 가장 많이 증가하였다. 4~10분 사이의 연기밀도는 4.1~6.9배 증가하였고 스프러스가 가장 많이 증가하였다. 시간 구간별 연기 증가량은 목재마다 다르지만 이는 목재가 연소하는 동안에 가열온도가 상승되면 증가하는 질량감소속도에 따라 연기발생 및 연기농도가 증가한다는 것으로 설명된다<sup>(24)</sup>.

Table 4에 불꽃(Flaming) 방식에서의 최대연기밀도(D<sub>m</sub>)를 나타내었다. 나왕 132.37, 스프러스 153.55, 삼나무

220.91, 레드파인 266.81 순으로 나타났으며 10분 이후부터 레드파인이 연기가 가장 많이 발생하고, 나왕은 연기가 가장 적게 발생한다는 것을 알 수 있었다.

Table 5에 나타난 바와 같이 혼소(Non-flaming) 방식에서의 연기밀도는 불꽃(Flaming) 방식보다 비교적 불규칙적인 패턴으로 발생했다. 시험이 시작한 후 1.5분이 경과했을 때 나왕 1.12, 레드파인 3.15, 스프러스 4.03, 삼나무 8.18 순으로 증가하였다. 4분이 경과했을 때는 나왕 23.09, 레드파인 31.70, 삼나무 48.71, 스프러스 58.22로 나타났다. 그리고 10분이 경과했을 때는 삼나무와 스프러스는 각각 367.23, 367.40로 연기밀도가 거의 같게 나타났으며, 레드파인 409.16, 나왕 463.56순으로 증가하였다. 이처럼 혼소(Non-flaming) 방식에서는 1.5~4분 사이의 연기밀도는 6~20.6배 증가하였고 나왕이 가장 많이 증가하였다. 4~10분 사이의 연기밀도는 6.3~20.1배 증가하였고 나왕이 가장 많이 증가하였다. 4분이 지나서 연기가 많이 발생되기 시작하고, 4분~10분 사이에 연기가 많이 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 5에 의하면 혼소(Non-flaming) 방식에서의 최대연기밀도(D<sub>m</sub>)는 스프러스 371.37, 삼나무 384.99, 나왕 646.16, 레드파인 737.51 순으로 증가하였다. 10분 이후부터 레드파인이 연기가 가장 많이 발생하고 스프러스가 가장 적게 발생한다는 것을 알 수 있었다.

레드파인의 연기밀도는 혼소(Non-flaming) 방식과 불꽃(Flaming) 방식에서 가장 높았으며, 나왕은 혼소(Non-flaming) 방식에서 2번째로 연기가 많이 발생한 데 반하여 불꽃(Flaming) 방식에서는 가장 적게 발생한 것을 알 수 있었다. 화재 시 연기로 인한 위험성을 가장 많이 내포하고 있는

목재는 레드파인으로 판단된다. 그리고 사용한 시험편의 연기밀도는 대체적으로 불꽃(Flaming) 방식보다는 혼소(Non-flaming) 방식에서 연기의 양이 더 많이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 4 종의 삼나무, 스프러스, 나왕, 레드파인을 선정하여 연소특성을 열방출율, 연기관련지수 및 연기밀도 등을 중심으로 분석하였다. 콘칼로리미터(Cone calorimeter, ISO 5660-1,2)와 연기밀도시험기(ASTM E 662)를 이용하여 화재 위험성이 높은 재료를 선별하였으며 그 결과는 다음과 같았다.

(1)  $HRR_{mean}$  값은 58.52~71.75 kW/m<sup>2</sup> 범위였으며 삼나무가 가장 낮고 레드파인이 가장 높았다. 재료의 체적밀도가 증가함에 따라 상승하는 경향이 있었다.

(2)  $CO_{mean}$  발생량은 레드파인, 스프러스, 삼나무, 나왕 순으로 증가하였으며  $CO_{2mean}$  발생량은 레드파인, 스프러스, 삼나무, 나왕 순으로 많이 발생하였다. 화재 시 독성도가 가장 높은 재료는 나왕으로 판단된다.

(3) 동적인 방법으로 측정된 총연기방출률(TSR)은 525.24~1044.61 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> 범위였으며 스프러스, 삼나무, 나왕, 레드파인 순으로 증가하였다. 화재 시 연기로 인한 위험성이 가장 큰 재료는 레드파인 이었다.

(4) 정적인 방법으로 최대연기밀도( $D_m$ )를 측정한 결과 불꽃(Flaming) 방식에서는 132.37~266.81 범위였으며, 나왕, 스프러스, 삼나무, 레드파인 순으로 증가하였다. 혼소(Non-flaming) 방식에서는 371.37~737.51 범위였으며 스프러스, 삼나무, 나왕, 레드파인 순으로 증가하였다. 레드파인의 최대연기밀도( $D_m$ )는 혼소(Non-flaming) 방식과 불꽃(Flaming) 방식에서 모두 가장 높았으며, 나왕은 혼소(Non-flaming) 방식에서 2번째로 연기가 많이 발생한 데 반하여 불꽃(Flaming) 방식에서는 가장 적게 발생한다는 것을 알 수 있었다. 사용한 목재의 대부분은 불꽃(Flaming) 방식보다 혼소(Non-flaming) 방식에서 연기의 양이 더 많이 발생한다는 것을 알 수 있었다. 화재 시 연기로 인한 위험성이 가장 큰 재료는 레드파인 이었다.

#### 후 기

본 연구과제는 “2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구 조성비로 연구하였음(관리번호-620160033).”

#### References

1. T. S. Kim, Y. S. Kim, C. K. Yoon and Y. J. Chung, “The Guide of Fire Investigation”, Kimoondang, pp. 77-98 (2009).
2. Policy News Portal Division of the National Communication

- in Ministry of Culture, Spots and Tourism, “To Prevent Fire Disaster as Sungnyemun Gate and Naksansa Temple”, (2012).
3. News 1, The Court was Said “Pension Fire Accident of the Damyang has been Responsible for the Jeollanam-do too”, (2016).
4. H. J. Park, H. Kim and D. M. Ha, “Predicting of Fire Characteristics of Flame Retardant Treated Douglas fir Using an Integral Model”, Journal of the KOSOS, Vol. 20, No. 3, (2005).
5. O. Grexa, “Flame Retardant Treated Wood Products”, The Proceedings of Wood & Fire Safety(part one), pp. 101-110 (2000).
6. 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 Journal, Vol. 36, pp. 391-415 (2001).
7. N. Boonmee and J. G. Quintiere, “Glowing Ignition of Wood: The Onset of Surface Combustion”, Proceedings of the Combustion Institute 30, pp. 2303-2310 (2005).
8. W. T. Simpsco, “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, U.S.A. pp. 1-21 (1987).
9. ISO 5660-1, “Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 1: Heat Release Rate(Cone Calorimeter Method)”, Geneva (2002).
10. ISO 5660-2, “Reaction-to-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate-Part 2: Smoke Production Rate Heat (Dynamic Measurement)”, Geneva (2002).
11. ASTM E 662, “Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials”, ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A. (2009).
12. M. J. Spearpoint, “Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter using an Integral Model”, NIST GCR 99-775, U.S.A., pp. 30-46, (1999).
13. 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, U.S.A. (1981).
14. J. D. DeHaan, “Kirks’s Fire Investigation”, 5th Edition, Prentice Hall. pp. 84-112 (2002).
15. J. G. Quintiere, “Principles of Fire Behavior”, Chap. 5, Cengage Learning, Delmar, U.S.A. (1998).
16. M. Risholm-Sundman, M. Lundgren, E. Vesten and P. Herder, “Emissions of Acetic Acid and Other Volatile Organic Compounds from Different Species of Solid Wood”,

- Holzalas Rohund Werktoff, Vol. 56, No. 2, pp. 125-129 (1998).
17. M. Delichatsios, B. Paroz and A. Bhargava, "Flammability Properties for Charring Materials", Fire Safety Journal, Vol. 38, No. 3, pp. 219-228 (2003).
  18. V. Babrauskas, "Development of Cone Calorimeter-A Bench-Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption", Fire and Materials, Vol. 8, No. 2, pp. 81-95 (1984).
  19. A. Ernst and J. D. Zibrak, "Carbon Monoxide Poisoning", N Engl J Med, Vol. 339, No. 22, pp. 1603-1608 (1998).
  20. C. L. Beyler, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", Section 2, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, pp. 114-115 (2008).
  21. R. V. Burg, "Toxicology Update", Journal of Applied Toxicology, Vol. 19, No. 5, pp. 379-386 (1999).
  22. D. A. Purser, "A Bioassay Model Fortesting the Incapacitating Effects of Exposure to Combustion Product Atmospheres Using Cynomolgus Monkeys", Journal of Fire Sciences, Vol.2, No.1, pp. 20-26 (1984).
  23. B. G. King, "High Concentration-short Time Exposures and Toxicity", Journal of Industrial Hygiene and Toxicology, Vol. 31, No. 6, pp. 365-375 (1949).
  24. S. Ishihara, "Smoke and Toxic Gases Produced During Fire", Wood Rsearch and Technical Notes, Vol. 16, No. 5, pp. 49-62 (1981).