

[Research Paper]

## 건축용 목재의 열 유해성 평가에 대한 연구

우태영 · 진 의\* · 정영진\*\*†

미래설계엔지니어링(주) 전무, \*강원대학교 소방방재연구센터 선임연구원, \*\*강원대학교 소방방재공학과 교수

## A Study on the Heat Hazard Assessment of Building Wood

Tae-Young Woo · Eui Jin\* · Yeong-Jin Chung\*\*†

Managing Director, Mirae Equipment Eng. Co. Ltd., \*Senior Research Engineer, Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, \*\*Professor, Dept. of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

(Received August 8, 2018; Revised August 28, 2018; Accepted August 29, 2018)

### 요 약

본 연구는 건축용 목재의 화재위험성에 대하여 열방출 특성을 중심으로 조사하였다. 열방출 성질은 cone calorimeter (ISO 5660-1)를 이용하여 측정하였으며 4종의 목재를 사용하였다. 외부 열유속 25 kW/m<sup>2</sup>에서 연소시킨 후 측정된 착화시간은 35 s부터 55 s까지였다. 나왕(lauan)과 적송의 착화 시간은 각각 54 s, 55 s로 가장 지연된 값으로 얻어졌다. 최대열방출율은 156.87~235.1 kW/m<sup>2</sup>였고 화재초기의 위험성은 가문비나무가 가장 높았다. 삼나무의 평균유효연소열은 19.1 MJ/kg였고 시료들 중에서 가장 높게 나타났다. 화재성능지수(FPI)에 의한 목재의 화재위험성은 나왕(0.2468 s·m<sup>2</sup>/kW) < 적송(0.2339 s·m<sup>2</sup>/kW) < 가문비나무(0.2308 s·m<sup>2</sup>/kW) < 삼나무(0.2231 s·m<sup>2</sup>/kW) 순으로 높았고 화재성장지수(FGI)에 의한 목재의 화재위험성은 나왕(0.5088 kW/m<sup>2</sup>·s) < 적송(0.511 kW/m<sup>2</sup>·s) < 삼나무 (2.8522 kW/m<sup>2</sup>·s) < 가문비나무(3.0662 kW/m<sup>2</sup>·s) 순으로 높았다. 그러므로 목재의 열방출 특성에 대한 화재위험성은 가문비나무와 삼나무가 높은 것으로 나타났다.

### ABSTRACT

This study was carried out with respect to the heat release rate (HRR) properties of building wood. Heat release characteristics were measured using a cone calorimeter (ISO 5660-1) with four kinds of wood. The time to ignition measured after the combustion in 25 kW/m<sup>2</sup> external heat flux was 35 to 55 s. Time to ignition of both lauan and red pine was marked with the most delayed value in each of 54 s, 55 s. The maximum heat release rate (HRR<sub>peak</sub>) was 156.87~235.1 kW/m<sup>2</sup>, and the risk of early fire was highest in spruce. Total heat release of red pine was obtained in the highest value with 114.2 MJ/m<sup>2</sup>. The mean effective heat of combustion of Japanese cedar was 19.1 MJ/kg and the highest among the samples. Fire risk of wood by FPI was orderly increased from lauan (0.2468 s·m<sup>2</sup>/kW), red pine (0.2339 s·m<sup>2</sup>/kW), spruce (0.2308 s·m<sup>2</sup>/kW) to Japanese cedar (0.2231 s·m<sup>2</sup>/kW). Fire risk of wood by FGI get increased from lauan (0.5088 kW/m<sup>2</sup>·s), red pine (0.5111 kW/m<sup>2</sup>·s), Japanese cedar (2.8522 kW/m<sup>2</sup>·s) to spruce (3.0662 kW/m<sup>2</sup>·s). Therefore, the risk of fire on the heat release characteristics of woods were found that spruce and Japanese cedar showed the high value compared with the other specimens.

**Keywords** : Fire risk assesment, Heat release rate (HRR), Total heat release (THR), Fire performance index (FPI), Fire growth index (FGI)

### 1. 서 론

목재는 우수한 소재 특성 및 높은 환경 효과로 인해 건축 산업 및 가구 제조 분야에 널리 응용되고 있다. 천연 산

림 자원이 전 세계적으로 크게 감소하고 있지만 목재는 재 활용이 가능하고 환경오염이 낮으므로 효과적인 사용 가능성이 높다. 그러나 다른 건축 재료들에 비해 가연성이 크므로 화재 안전측면에서 많은 취약성을 가지고 있다.

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

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

간단한 화학분석은 침엽수와 활엽수 사이에서 성분을 구별 할 수 있지만 이 기법은 각 종의 다양성과 종 사이의 유사성 때문에 각각의 목재를 확인하기 위해 사용하기에는 적합하지 않다. 목재의 열적 특성은 다른 건축 재료와 비교 하였을 때 콘크리트의 약 10배, 철의 약 500배의 단열 성능을 가지고 있으며 마감재 및 구조재로 사용 시 우수한 단열 성능을 가지고 있다<sup>(1,2)</sup>. 목재의 열분해 및 연소의 거동은 착화가 중간 열유속에서 백열로부터 불꽃연소로 진행하며, 증대된 열유속에 의해 직접 불꽃연소로 발생된다. 이것은 발연 착화에 따른 최소 열유속에 대하여 중요한 정보를 제공한다<sup>(3,4)</sup>.

시차열분석(Differential thermal analysis, DTA)은 시료를 일정한 속도로 가열 혹은 냉각시켰을 때 기준물질과 시료와의 온도 차이를 읽어 이를 열량의 변화로 환산하는 실험 방법이다. 온도차가 생기는 것은 시료에 발열 혹은 흡열 반응이 일어나고 이것은 화학반응이 일어났다는 것을 의미하며 이러한 원리를 이용하여 목재의 열분해특성을 측정할 수 있다. 시차열분석 곡선에서 얻어진 큰 발열피크는 셀룰로오스의 탈수와 불꽃 연소에 기인하고 350 °C 이상의 온도에서는 탈수와 탄화반응이 계속되지만 더 느리게 진행된다. 또한 고온에서 얻어진 시차열분석의 발열곡선은 셀룰로오스와 리그닌으로부터 형성된 탄화물의 연소와 관련된다<sup>(5,6)</sup>. 목재에 있어서 수분함량의 특성은 수분 함량이 높은 목재는 쉽게 타지 않으며, 수분함량이 에너지 발생과 관계되는 중요한 인자가 된다<sup>(7)</sup>. 또한 목재에 대한 임계열유속(Critical heat flux)은 외부 열유속을 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 콘칼로리미터 실험을 통하여 측정하면 착화시간과의 상관성을 적분 모델을 이용하여 계산이 가능하다<sup>(8)</sup>. Boonmee와 Quintiere는 콘칼로리미터를 이용하여 나무결의 수직 방향 또는 나무결 방향으로 하여 방사 열유속(Heat flux)에 노출될 때 나무의 백열 및 불꽃 열 착화를 연구했다. 이론적인 착화 모델은 표면의 숯 연소를 포함한 나무의 열분해에 대하여 연구되었다<sup>(9)</sup>. Naumann등은 목재-플라스틱 복합체를 포함하는 연구에서 목재-폴리 프로필렌 복합재(50 : 30%)에 15 wt%의 팽창 흑연과 5%는 활석을 혼합하였다. 암모늄 폴리 포스페이트로 처리한 동일한 복합체와 비교한 결과 숯 잔유물이 증가되었고 최대열방출률과 총열방출량을 감소되었다. 숯 잔유물의 증가는 팽창흑연이 목질 복합재의 잔류물에 팽창된 흑연 층을 추가 하여 기저 물질이 완전 연소를 방해하기 때문이라고 보고하였다<sup>(10)</sup>. Martinka등은 가연성 액체인 Ethyl tert-butyl ether (ETBE)의 화재 위험을 열방출율(Heat release rate), 비질량감소율(Specific mass loss rate) 및 CO 생산량 값을 기준으로 평가했다<sup>(11)</sup>.

국내에서는 화재위험성 대한 문제점을 보완하기 위해 화재예방, 소방시설설치·유지 및 안전관리에 관한 법률 제 9조의 3에 의하면 가연물의 종류 및 양을 고려하여 설계하고, 「소방시설 등의 성능위주 설계 방법 및 기준」에 의하여

성능위주 설계를 하고 있다.

화재에 취약한 목재의 화재안전성을 높이기 위한 방법으로 난연처리 방법이 많이 연구되고 있으며, 목재의 난연 처리는 인화합물계, 질소화합물계, 붕소화합물계, 실리코화합물계 등을 단독 또는 혼합하여 사용하는 방법들이 연구되어 왔다<sup>(12-15)</sup>. 난연제를 첨가하면 목재의 숯 수율이 증가하는 반면, 숯의 속도는 일반적으로 변하지 않는다. 침엽수의 전형적인 탄화 속도는 구조 부재 및 조립품의 내화 등급을 결정하기 위한 표준 시험 방법을 사용하여 구하면 .6 mm/min 정도다. 그러나 탄화속도가 밀도, 숯 층의 두께, 수분 함량, 산소 농도 및 외부 열 유속과 같은 중요한 요소들에 의존한다고 보고되었다<sup>(16,17)</sup>.

열방출률을 측정하기 위하여 많은 기술들이 발전되어왔는데 그 중의 하나가 콘칼로리미터(Cone calorimeter)이다<sup>(18)</sup>. 콘칼로리미터에 의한 열방출률 측정은 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소 소비 원리를 바탕으로 하고 있다. 외부열유속은 화재 시나리오의 스펙트럼을 제공하며, 0에서 100 kW/m<sup>2</sup> 사이에서 변화할 수 있고 화재성장기에서 발견되는 열유속은 35 혹은 50 kW/m<sup>2</sup>가 가장 폭넓게 사용된다. 더 높은 열유속은 더 좋은 재현성, 명확하게 정의 된 착화 및 더 짧은 측정 시간을 포함하지만, 더 활성화된 화재에 해당한다. 더 낮은 열유속은 화재예방 목표에 더 잘 부합된다.

현대 건축은 기술과 재료의 발달로 날로 대형화되고 복잡화되고 있다. 많은 사람이 실내에 있게 되면서 화재 또한 대형화 되고 인명과 재산 피해가 증가하고 있다. 화재는 어느 곳에서든지 잠재하고 있으며 일어날 것이라면 화재위험성을 줄일 수 있고 연기발생량이 적으며 인체에 해로운 가스 발생량이 작은 쪽으로 연구가 심화되어야 할 것이다. 화재에 취약한 건축용으로 사용되는 목재들을 대체할 수 없다면 재료의 화재취약성을 개선하는 방법으로 연구가 진행되어야 한다. 난연제를 처리하는 방법도 있었지만 미리 계획되어야 할 연구는 각각의 목재에 대한 화재위험성을 평가하는 것이다. 연소특성으로부터 화재위험성을 평가하여 data를 미리 확보함으로써 화재를 완화시키거나 예방하는 것이 우선되어야 한다고 판단된다. 이러한 데이터(data)의 확보는 건축 가연물 자재의 화재위험성 데이터베이스(data base)를 정립할 수 있으며 건축물 화재위험성 예방 기술을 확보하는데 기초 자료로 활용할 수 있다고 판단된다.

본 연구는 건축용으로 사용빈도가 높은 목재 중 삼나무(*Cryptomeria japonica*, Japanese cedar), 가문비나무(*Picea jezoensis*, Spruce), 나왕(*Shorea negrosensis foxw*, Lauan), 적송(*Pinus resinosa*, Red pine)을 선정하여 열방출률을 중심으로 연소특성을 분석하였다. 화재강도를 25 kW/m<sup>2</sup>를 적용시켜 화재예방에 대한 화재위험성 평가로 차별화 시켰으며, 화재성능지수와 화재성장지수를 평가함으로써 다양한 형태의 화재위험성에 대비한 기초 자료를 제공하는 것을 주요 핵심으로 하였다.

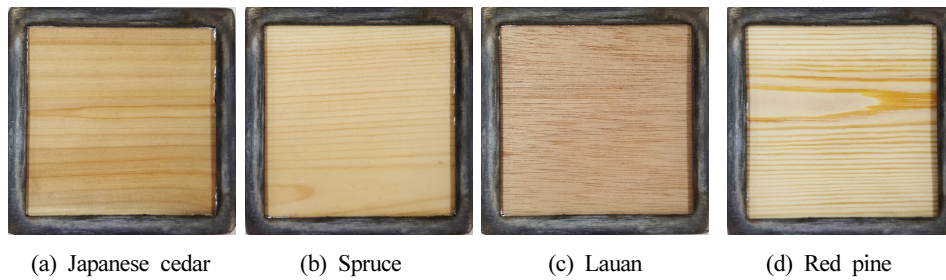


Figure 1. The photographs of specimens before experiment.

Table 1. The Moisture Content and Density of each Woods used at 25 kW/m<sup>2</sup> External Heat Flux

Properties	Japanese Cedar	Spruce	Lauan	Red Pine
Class	Softwood	Softwood	Hardwood	Softwood
moisture Content (%)	8.6	10.7	8.8	9.9
Density (kg/m <sup>3</sup> )	279.1	510.9	542.5	607.4

## 2. 실험

### 2.1 재료

삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송의 시편은 순수한 수입 목재를 구입하였고 두께 10 mm로 절단하였으며 용이가 없는 시편으로 선별하여 사용하였다. Figure 1에 실험 전 시편의 사진을 나타내었다.

### 2.2 함수율 측정

시험목재의 수분함량은 105 °C의 건조기에서 건조시키고 시험목재의 중량을 4 h 간격으로 측정하여 항량이 될 때까지 측정하고 식 (1)을 이용하여 계산하였다<sup>(19)</sup>.

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

이 식에서  $W_m$ 은 함수율을 구하고자 하는 목재의 중량이며,  $W_d$ 는 건조시킨 후의 절대건조 중량이다. 목재의 평균 밀도와 수분함량을 Table 1에 제시하였다. 목재의 수분함량은 8.6~10.7% 범위에 있었으며 가문비나무가 가장 많은 수분을 함유하였다. 목재의 밀도는 적송이 607.4 kg/m<sup>3</sup>으로 시험 목재 중 가장 치밀한 목재 조직을 가지고 있는 것으로 나타났다.

### 2.3 콘칼로리미터 시험

연소특성 시험은 ISO 5660-1의 방법에 의해 Dual cone calorimeter (Fire testing technology)를 이용하여 열 유속 (Heat flux) 25 kW/m<sup>2</sup> 조건에서 수행 하였다<sup>(18)</sup>. 사용한 시험편의 두께는 10 mm로서 크기는 100 mm × 100 mm (±%)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 온도 23 ± 2 °C, 상대습도 50 ± 5%에서 항량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비호출면을 감쌌다. 시험에 앞서 콘히터의 열량

이 설정값 ± 2% 이내, 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002 m<sup>3</sup>/s로 설정하였다. 시험편은 단열체인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 배출량 중 분석기로 들어가는 공기 유속을 3.5 L/min이 되도록 일정하게 유지시켰으며 시험편은 충분히 연소가 될 수 있도록 공기 중에 그대로 노출시켰다. 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다. 연소시험은 실험 시작 후 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 3회 실험값을 평균하여 데이터로 이용하였고, 신뢰수준 95%에서 반복오차 한계(repeatability, r)와 재현 오차 한계(Reproducibility, R) 값이 계산되었다. 연소 시킨 후 화재 해석에 필요한 열방출 특성을 분석하였다. Figure 2에 콘칼로리미터 장비 사진을 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 목재의 화재위험성 평가를 하기 위한 한 부분으로 열방출 특성을 중심으로 평가하였다. 열방출 특성 관련 요소로 착화시간(Time to ignition, TTI), 질량감소율 (Mass loss rate, MLR), 열방출률(Heat release rate, HRR), 총 열방출량(Total heat released, THR), 유효연소열(Effective heat of combustion, EHC), 화재성능지수(Fire performance index, FPI), 화재성장지수(Fire growth index, FGI) 등을 측정 후 평가하였다<sup>(20)</sup>.

Table 2에는 콘칼로리미터 실험 후 타고 남은 잔여물의 양을 표시하였다. 가문비나무가 16.7%로 잔여량이 가장 많았으며 나머지 3종류의 목재는 10% 이내의 값을 얻을 수



Figure 2. The photograph of cone calorimeter equipment.

Table 2. The Residual Amount of each Woods after Burning by 25 kW/m<sup>2</sup> External Heat Flux

Specimens	Initial Mass (g)	Mass Lost (g)	Residual Amount (%)
Japanese Cedar	30.3	29.2	3.6
Spruce	43.2	36.7	16.7
Lauan	57.9	54.9	5.2
Red Pine	56.1	52.4	6.6

있었다. 수분함량이 높을수록 잔여량의 양이 많아지는 것으로 측정되었다. Table 3에 연소 특성 중 열방출 특성과 관련된 데이터(data)를 나타내었다.

### 3.1 착화 시간(Time to Ignition, TTI)

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 전 까지이며 착화시간이 짧을수록 재료는 더욱 가연성을 나타낸다.

Table 3에 나타낸 바와 같이 열유속이 25 kW/m<sup>2</sup>인 경우, 삼나무 35 s, 가문비나무 46 s, 나왕 54 s, 적송 55 s 로서 삼나무가 다른 3종류의 목재보다 훨씬 더 착화시간이 빠르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 나왕과 적송은 착화시간이 비슷하였으며 4종류의 목재 중 가연성이 낮은 것으로 확인되었다. 사용된 각 시편들의 수분함량의 차이는 0.2~2.1%로서 착화시간에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 목재의 평균밀도가 증가함에 따라 착화시간이 지연되는 경향성을 보였다. 이것은 식(2)에 의하면 나무의 착화

시간이 그의 표면 열손실의 유무에 따른 상수, 열전도도, 체적밀도, 연료의 비열 및 착화온도 항의 제곱에 비례하며, 시험편에 가해지는 열유속의 제곱에 반비례하는 것으로 설명된다<sup>(21)</sup>.

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

$t_{ig}$  (s) : 착화시간, C : 상수(표면 열손실의 유무에 따라 다름, k (kW/m<sup>2</sup>°C) : 열전도도, ρ (kg/m<sup>3</sup>) : 연료의 밀도, c (kg/kg°C) : 연료의 비열, T<sub>ig</sub> (°C) : 착화온도, q (kW/m<sup>2</sup>) : 열유속, T<sub>s</sub> (°C) : 불꽃으로부터 직접 영향이 미치지 않는 불꽃 앞쪽 연료의 온도

### 3.2 질량감소율(Mass loss rate, MLR)

가연물과 관련하여 연소 특성의 이해를 돕는 중요한 또 하나의 성질은 질량감소율(MLR)이다. 질량감소율은 화재 거동에 대하여 추가적인 정보를 제공해준다. 이것은 일정한 열유속 하에서 샘플의 열분해, 휘발 및 연소의 수준을 나타내며 열방출율, 비감쇠면적, CO 생산량 과 밀접하게 관련되어있다. 질량감소율이 클수록 화염이 확산될 가능성

**Table 3.** The Heat Characteristics of the Wood Species at 25 kW/m<sup>2</sup> External Heat Flux

Samples	<sup>a</sup> TTI (s)	1st- <sup>b</sup> MLR <sub>peak</sub> (g/s)/ at Time (s)	2nd-MLR <sub>peak</sub> (g/s)/ at Time (s)	
Japanese Cedar	35	0.092/55	0.093/335	
Spruce	46	0.155/60	0.131/400	
Lauan	54	0.129/75	0.167/400	
Red Pine	55	0.116/70	0.153/425	
Samples	1st- <sup>c</sup> HRR <sub>peak</sub> (kW/m <sup>2</sup> )/at Time	2nd- <sup>c</sup> HRR <sub>peak</sub> (kW/m <sup>2</sup> )/at Time	<sup>f</sup> THRR (MJ/m <sup>2</sup> )	<sup>g</sup> EHC (MJ/kg)
Japanese Cedar	156.87/55	106.31/355	63.3	19.1
Spruce	199.30/65	146.46/450	68.8	16.2
Lauan	182.56/80	218.8/430	95.8	15.5
Red Pine	178.63/80	235.1/460	114.2	17.7

<sup>a</sup>Time to Ignition; <sup>b</sup>Mean Mass Loss Rate; <sup>c</sup>Peak Mass Loss Rate; <sup>d</sup>Mean Heat Release Rate; <sup>e</sup>Peak Heat Release Rate; <sup>f</sup>Total Heat Release Rate; <sup>g</sup>Effective Heat of Combustion

이 높다는 것을 나타낸다. 4종류의 목재에 대한 시간에 따른 질량 감소율은 Figure 3과 Table 3에 나타내었다. Figure 3에서 보듯이 시료가 점화 될 때 질량감소율은 급격하게 증가하고 점차적으로 감소하다가 2차 열분해 영역에서 다시 증가하는 경향성을 보였다. 일정시간 후에는 거의 제로 속도에 가깝게 일정하게 유지되었다. 최대질량감소율(MLR<sub>peak</sub>)은 삼나무, 적송, 가문비나무, 나왕 순으로 증가하였으며 나왕이 삼나무 보다 1.8배 높은 순간 화재 확산 위험성을 가지고 있었다.

MLR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간은 가문비나무, 삼나무, 나왕, 적송의 순서로 증가하였다. 적송이 425 s로 모든 목재 중에서 가장 느리게 도달하였으며 가문비나무가 60 s로 가장 빠르게 도달하는 것으로 나타났다. 가문비나무를 제외한 모든 목재는 평균밀도가 크면 MLR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간이 지연되는 경향성이 있는 것으로 나타났다. 연소 지연 효과는 적송이 가문비나무 보다 7배 정도 높은 것으로 나타났다. 4종의 목재 중 가문비나무는 열에 취약하여 가연성 물질로 빨리 분해되고 MLR<sub>peak</sub> 도달시간이 가장 빠르므로 초기화재 시 가장 위험한 목재임을 알 수 있다.

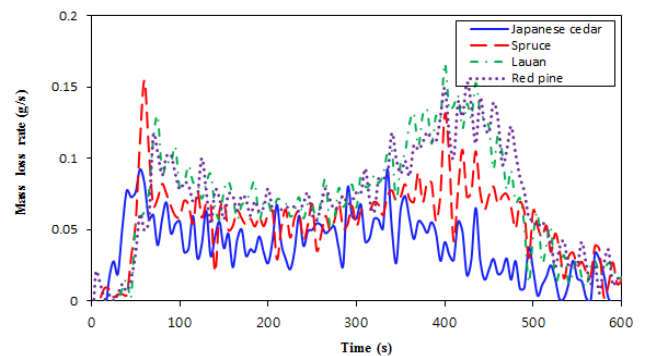
MLR ( $\dot{m}$ )은 식(3)와 같은 관계식으로 주어진다<sup>(22)</sup>.

$$\dot{Q} \text{ (HRR)} = \dot{m} \cdot \Delta h_c \text{ 또는 } \dot{m} = \dot{Q} \text{ (HRR)} / \Delta h_c \quad (3)$$

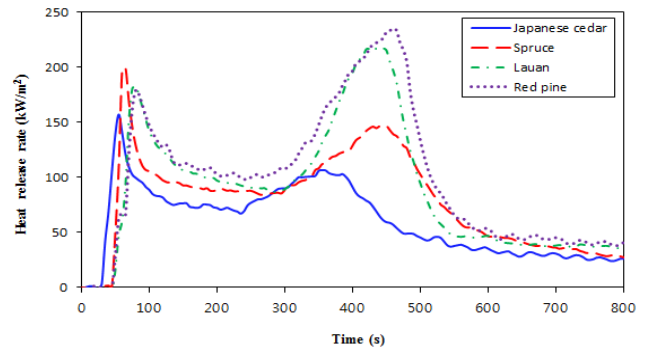
여기에서  $\dot{Q}$  (kW) 는 열방출률(HRR)이며,  $\dot{m}$  (kg/s)는 질량 감소율(MLR),  $\Delta h_c$  (kJ/kg)는 유효연소열(EHC)로 표시된다. 질량감소율은 열방출률을 유효연소열로 나눈 값으로 표시된다.

### 3.3 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 요소이



**Figure 3.** Mass loss rate curves at 25 kW/m<sup>2</sup> external heat flux.



**Figure 4.** Heat release rate curves at 25 kW/m<sup>2</sup> external heat flux.

다<sup>(23,24)</sup>. 시험하는 동안에 측정되는 주 연소특성은 열방출률이다. 건축 재료를 열방출률이 낮은 것으로 사용할 경우 화재발생시 연소억제 효과를 기대할 수 있다<sup>(25)</sup>. 열방출 속도가 높은 불꽃연소는 화재영역을 성장시키고 발전시키므로 이것은 화재의 세기를 좌우한다.

Figure 4에 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 불

이 꺼지기 전에 두 번째 피크가 나타난다. 첫 번째 피크는 연소 표면 가까운 곳에서 숯이 형성되기 전에 발생한다. 첫 번째 피크후 중간 부분은 처음 생성된 숯 층이 두께를 통하여 단열층 역할을 하고 단열효과로 인하여 시료가 점차적으로 연소하기 때문에 감소되는 경향성이 관찰되었다. 두 번째 피크는 열적 파동이 뒷면 절연층에 도달할 때 일어나고 이런 후면효과(back effect)로 인하여 열이 축적되어 동시에 많은 열이 방출되기 때문에 나타난다<sup>(26,27)</sup>. 최대열 방출률(Peak heat release rate,  $HRR_{peak}$ )은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기로 물질의 연소 위험성을 가장 잘 나타낼 수 있는 요소이다. 4 종류의 목재의 최대열방출 특성은 삼나무 156.87  $kW/m^2$ , 가문비나무 199.3  $kW/m^2$ , 나왕 218.8  $kW/m^2$ , 적송 235.1  $kW/m^2$  순으로 증가하였다. 적송은  $HRR_{peak}$  값이 가장 큰 것으로 나타나 어느 순간 질량감소 속도가 높아 매우 빠르게 타버리고 순간적인 연소 위험성 또한 높다는 것을 알 수 있었다.  $HRR_{peak}$  값은 평균밀도에 비례하여 증가하는 경향성이 있었다.

삼나무의  $HRR_{peak}$  값이 가장 낮게 나타난 것은 평균밀도가 작고 질량감소율이 작기 때문으로 판단된다. 이러한 경향성은 식(3)에 의하면 질량감소속도가 클수록  $HRR$  값이 커지는 것과 일치한다.  $HRR_{peak}$  도달시간은 삼나무와 가문비나무가 55 s와 65 s로 1차 열분해 영역에서 나타났으며 나왕과 적송은 430 s와 460 s로 2차 열분해 구간에서 관찰할 수 있었다. 삼나무를 제외하고는 모두  $MLR_{peak}$  영역에서  $HRR_{peak}$  영역이 관찰되었다. 삼나무의  $MLR_{peak}$  값은 2차 열분해 영역에서 관찰되었고 1차 열분해 값과 0.0006 g/s 차이로 큰 차이가 나지 않았다. 그러나 2차 열분해 영역에서의 열방출 특성은 32% 감소되는 큰 차이를 보여 1차 열분해 영역이 더 우세한  $HRR_{peak}$  값으로 나타났다.

화재초기의 위험성을 평가하면 1st- $HRR_{peak}$  영역에서는 가문비나무가 가장 큰 위험성을 보였으며 삼나무가 가장 위험성이 작은 목재로 나타났다. 화염에 휩싸일수록 2nd- $HRR_{peak}$  영역에서는 평균밀도가 클수록 열축적이 커지므로 화재위험성이 큰 것으로 나타났다. 그러나 가문비나무가 높은 열을 방출하며  $HRR_{peak}$  도달시간이 65 s로 빨리 도달하므로 화재초기 위험성이 가장 크고 나왕과 적송은 지연 시간이 길어져 상대적으로 덜 위험한 것으로 판단된다. 열방출율의 감소는 질량감소율의 감소에 의한 것이며 가연성 기체 생성이 감소하기 때문으로 판단된다. Table 3에서 보듯이 나왕은 적송보다 순간 질량감소율이 제일 크지만 휘발성 물질의 발생량이 적송보다 작으므로 최대열방출률이 작은 것으로 판단된다.

### 3.4 총열방출량(Total heat release, THR)

총열방출량(THR)은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인해 방출된 총열량이다. 이것은 화재발생 시 발생하는 열의 총량을 의미하며 시료 표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출을 주어진 시간을 적분하여 계산한 값이다.

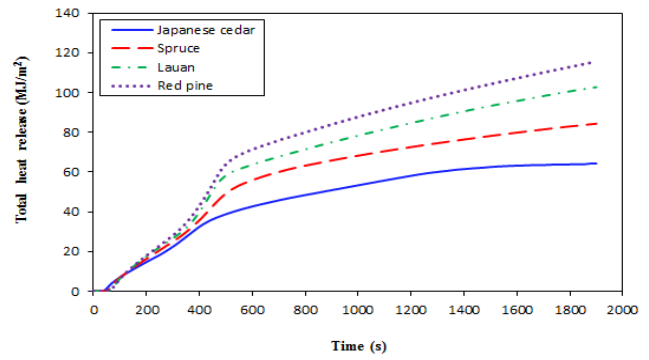


Figure 5. Total heat release curves at 25  $kW/m^2$  external heat flux.

Table 3과 Figure 5에 나타난 바와 같이 THR값의 증가 순서는 삼나무 63.3  $MJ/m^2$ , 가문비나무 68.8  $MJ/m^2$ , 나왕 95.8  $MJ/m^2$ , 적송 114.2  $MJ/m^2$ 으로 나타났다. 적송이 삼나무보다 1.8배 높은 값으로 나타났다. 평균밀도가 높을수록 연소 시간이 증가함으로써 총열방출량은 증가하는 경향성이 컸다. 이것은 탄화하는 물질인 목재는 탄화하여 단열층을 생성하기 때문에 표면온도가 증가하고, 평균밀도가 증가하면 화재 시 열축적이 커지므로 총열방출량도 증가하는 것으로 판단된다. 또한 이것은 식(3)에 대해 시간에 대한 적분 값이므로  $HRR$  값이 증가할수록 THR값이 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

### 3.5 유효연소열(Effective heat of combustion)

유효연소열(EHC)은 질량감소율(MLR)과 함께 물질의 화재거동에 추가적인 정보를 제공해준다. EHC는 한 가지의 분해 형태를 갖는 균일한 시편의 연소시간 동안의 상수로서 이론적인 순연소열의 값보다 적다<sup>(28)</sup>. 한 가지 이상의 분해형태를 갖는 재료나 복합재료 또는 비균일한 재료의 유효연소열은 반드시 일정하지 않다. 유효연소열은 목재의 단위 질량당 연소 반응에 의해 발생된 에너지이다. 그리고 이것은 식(2)와 같이 열방출율과 질량감소율의 비로써 나타난다. 이 값은 불꽃에서 휘발성 물질의 연소세기를 제시하고 화재 억제성의 연구에 도움을 준다. Table 3에 의하면 각 목재의 EHC 값은 나왕 15.5  $MJ/kg$ , 가문비나무 16.2  $MJ/kg$ , 적송 17.7  $MJ/kg$ , 삼나무 19.1  $MJ/kg$  순으로 증가하였다. 삼나무가 나왕과 비교하여 1.23배 높았다. 삼나무가 평균밀도가 작고 화재 시 휘발성 성분이 많아 연소세기가 가장 높아 위험하고 나왕이 휘발성분이 가장 낮아 화재 억제성이 큰 것으로 판단된다. 이 값은 질량 감소율이 클수록 작은 값은 갖는 경향성이 나타났으며 이는 목재를 구성하고 있는 화학 성분의 결합에너지에 따라 다르게 나타나는 것으로 생각된다.

### 3.6 화재성능지수(FPI)와 화재성장지수(FGI)

화재 위험성을 더 명확하게 파악하기 위해 두 가지 요인

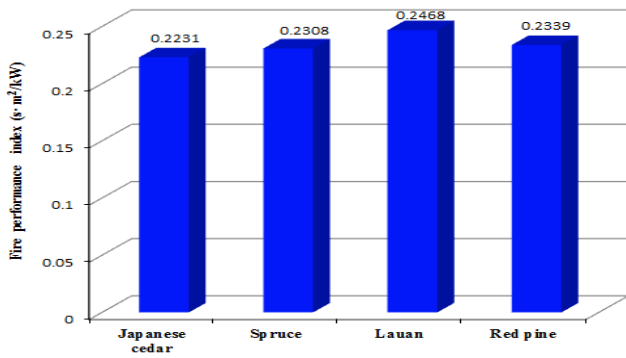


Figure 6. The graph of fire performance index at 25 kW/m<sup>2</sup> external heat flux.

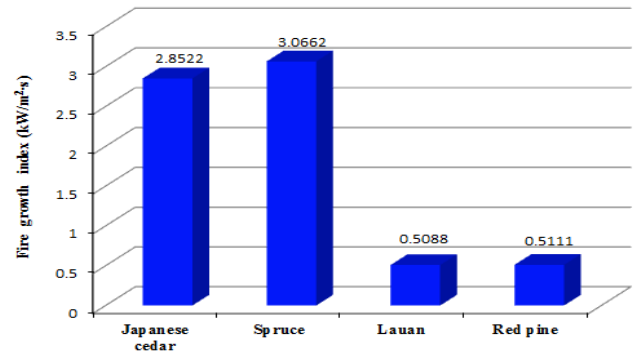


Figure 7. The graph of fire growth index at 25 kW/m<sup>2</sup> external heat flux.

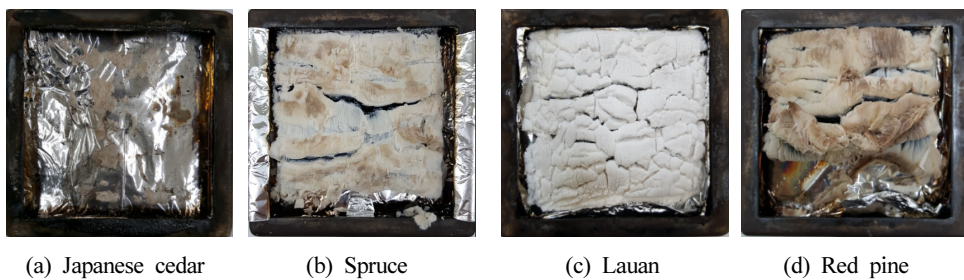


Figure 8. The residues of the wood species after combustion.

의 관련 값을 기초로 하는 화재성능지수(FPI)와 화재성장지수(FGI)를 계산하였다. FPI는 TTI와 HRR<sub>peak</sub>의 비로 정의된다. 이는 목재의 FPI의 값과 플래시오버의 시간과 서로 상관성이 있으며 FPI 값이 증가하면 플래시오버 시간이 늦어진다<sup>(29)</sup>. FPI 값이 감소할수록 화재 안전성 또한 감소된다<sup>(14)</sup>. 즉, FPI의 값이 감소할수록 화재위험성은 더 높아진다.

FGI를 구하는 식은 다음 식 (4)과 같다.

$$FPI = \frac{TTI(s)}{HRR_{peak}(kW/m^2)} \quad (4)$$

Figure 6에서 보듯이 25 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에서는 이 FPI값이 큰 차이는 없었지만 삼나무, 가문비나무와 적송, 나왕의 순으로 증가하였다. 삼나무는 밀도가 작아 잘 타므로 FPI가 가장 나쁘고 나왕은 휘발성이 낮아 FPI가 안정한 것으로 판단된다. 적송이 가문비나무보다 FPI가 큰 것은 평균 밀도가 커 TTI값이 크기 때문이다. 이는 FPI의 값이 클수록 화재 안정성은 증가하고 화재 위험성은 낮아지므로 목재의 화재위험성은 나왕, 적송, 가문비나무, 삼나무 순으로 위험성이 높았다.

화재성장지수(FGI)는 HRR<sub>peak</sub>와 HRR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간의 비로 정의된다. FGI 값이 작을수록 HRR<sub>peak</sub>에 도달하는 시간이 늦어지며, 그 재료의 화재 안전성이 커지고 화재 위험성이 작아진다<sup>(30)</sup>. 화재성능지수(FPI)와 화재성장지수(FGI)는 측정된 데이터를 이용해 계산하여 얻어지는 값으

로, 콘칼로리미터 실험에서 재료의 화재 안전성을 파악하는데 종합적인 평가로 볼 수 있다<sup>(31)</sup>.

FGI를 구하는 식은 다음 식 (5)와 같다.

$$FGI = \frac{HRR_{peak}(kW/m^2)}{Time\ to\ HRR_{peak}(s)} \quad (5)$$

25 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에서는 Figure 7에 나타낸 바와 같이 FGI값이 나왕, 적송, 삼나무, 가문비나무 순으로 증가하였다. 이는 FGI의 값이 높을수록 화재 위험성은 높아지고, 화재 안전성은 낮아지므로 나왕, 적송, 삼나무, 가문비나무 순으로 위험성이 높았다. 나왕과 적송은 삼나무 및 가문비나무와 비교하면 5.6~6.0배 화재안전성이 높았다. 이것은 나왕과 적송이 2차 열분해영역에 도달하는 시간이 지연됨으로써 화재초기에 최대열방출시간을 갖는 삼나무와 가문비나무에 비해 안전성이 높은 것으로 판단된다.

### 3.7 연소 후 잔여물

Figure 8에 콘칼로리미터로 실험한 후 시험편의 잔여물 사진을 나타내었다. 연소 후 잔여물의 비교는 시험편들 사이의 연소거동의 차이를 설명할 수 있다. 삼나무의 연소 후 걸보기 잔여물은 거의 없었다. 가문비나무는 흰색 바탕에 갈색에 가까운 면화 형태로 남았고, 나왕은 흰색에 가까운 면화 형태로 남았다. 적송은 흰색 바탕에 갈색에 가까운 면화 형태로 남았고 가문비나무와 비교하여 갈색의 양이 조

금 더 많은 것으로 관찰되었다. 이는 열유속이 탄화물을 재의 형태로 변화시키기 쉬움을 나타낸다. 25 kW/m<sup>2</sup>의 열유속에서 각각의 시험편간의 표면 형태의 걸보기 잔여물을 구분한 결과 검은색의 숯을 발견할 수는 없었다. 그러나 속 에 있는 잔여물은 검은색의 탄화물인 숯이 발견되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 건축용 목재인 삼나무, 가문비나무, 나왕, 적송을 선정하여 화재 위험성을 콘칼로리미터(ISO 5660-1)로 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 착화시간은 35 s~55 s였고 삼나무가 가장 빨랐으며 나왕과 적송은 비슷한 값으로 가장 많이 지연되었다. 목재의 평균밀도가 증가함에 따라 착화시간이 지연되었다.

2. 최대열방출률은 156.87 kW/m<sup>2</sup>~235.1 kW/m<sup>2</sup>였으며 가문비나무가 화재위험성이 가장 높았다. 질량감소율이 목재 중 가장 컸고 화재초기의 위험성을 평가하면 1st-HRR<sub>peak</sub> 영역에서 가장 큰 위험성을 보였다. 삼나무에 비해 1.7배 화재위험성이 높았다.

3. 총열방출량은 63.3 MJ/m<sup>2</sup>~114.2 MJ/m<sup>2</sup>이었으며 적송이 가장 높았다. 평균밀도가 커질수록 열축적이 커지고 연소시간이 길어지므로 총열방출량이 높아졌으며 삼나무와 비교하여 1.8배 높았다.

4. 평균유효연소열은 15.5 MJ/kg~19.1 MJ/kg이었으며 삼나무가 가장 높았다. 나왕과 비교하여 1.23배 높았으며 삼나무가 화재 시 휘발성분으로 인하여 연소세기가 가장 높아 위험하고 나왕이 가장 낮아 화재 억제성이 컸다.

5. FPI에 의한 화재위험성은 큰 차이는 없었지만 나왕 (0.2468 s·m<sup>2</sup>/kW) < 적송 (0.2339 s·m<sup>2</sup>/kW) < 가문비나무 (0.2308 s·m<sup>2</sup>/kW) < 삼나무 (0.2231 s·m<sup>2</sup>/kW) 순으로 위험성이 높았고, FGI에 의한 화재 위험성은 나왕 (0.5088 kW/m<sup>2</sup>·s) < 적송 (0.5111 kW/m<sup>2</sup>·s) < 삼나무 (2.8522 kW/m<sup>2</sup>·s) < 가문비나무 (3.0662 kW/m<sup>2</sup>·s) 순으로 위험성이 높았다.

따라서 목재 4 종류에 대하여 외부열유속 25 kW/m<sup>2</sup>에서 화재위험성을 평가한 결과 삼나무와 가문비나무가 화재위험성이 높았으며 나왕이 가장 위험성이 낮은 것으로 나타났다.

#### 후 기

2017년 강원대학교 방재전문대학원 우태영의 박사학위 논문을 일부 발췌한 것임.

#### References

1. B. M. Suleiman, J. Larfeldt, B. Leckner and M. Gustavsson, "Thermal Conductivity and Diffusivity of Wood", Wood

Science and Technology, Vol. 33, No. 6, pp. 465-473 (1999).

2. P. S. Ngohe-Ekam, P. Meukam, G. Menguy and P. Girard, "Thermophysical Characterization of Tropical Wood used as Building Materials: With respect to the Basal Density", Construction and Building Materials, Vol. 20, No. 10, pp. 929-938 (2006).

3. W. K. Smith and J. B. King, "Surface Temperatures of Materials during Radiant Heating to Ignition", Journal of Fire and Flammability, Vol. 1, pp. 272-288 (1970).

4. R. Bilbao, J. F. Mastral, M. E. Aldea, J. Ceamanos, M. Betrán and J. A. Lana, "Experimental and Theoretical Study of the Ignition and Smoldering of Wood including Convective Effects", Combustion and Flame, Vol. 126, No. 1-2, pp. 1363-1372 (2001).

5. M. Gao, K. Zhu, Y. J. Sun and C. Sun, "Thermal Degradation of Wood treated with Amino Resins and Amino Resins modified with Phosphate in Nitrogen", Journal of Fire Sciences, Vol. 22, No. 6, pp. 505-515 (2004).

6. M. Gao, C. Y. Sun and K. Zhu, "Thermal Degradation of Wood treated with Guanidine Compounds in Air : Flammability Study", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 75, No. 1, pp. 221-232 (2004).

7. J. B. Carle and J. L. Brown, "Wood as a Source of Solid Fuel", ed. G. S. Watt, A Review, New Zealand Forest Service, Auckland, NZ (1976).

8. 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, No. 4, pp. 391-415 (2001).

9. N. Boonmee and J. G. Quintiere, "Glowing Ignition of Wood: the on Set of Surface Combustion", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 2303-2310 (2005).

10. A. Naumann, H. Seefeldt, I. Stephan, U. Braun and M. Knoll, "Material Resistance of Flame Retarded Wood-Plastic Composites against Fire and Fungal Decay", Polymer Degradation and Stability, Vol. 97, No. 7, pp. 1189-1196 (2012).

11. J. Martinka, T. Chrebet and K. Balog, "A Fire Risk Assessment for Bio Ethyl Tert-Butyl Ether (ETBE)", Procedia Engineering, Vol. 69, pp. 616-621 (2014).

12. P. Zhao, C. Guo and L. Li, "Exploring the Effect of Melamine Pyrophosphate and Aluminum Hypophosphite on Flame Retardant Wood Flour/Polypropylene Composites", Construction and Building Materials, Vol. 170, pp. 193-199 (2018).

13. J. Jiang, J. Z. Li, J. Hu and D. Fan, "Effect of Nitrogen



- Phosphorus Flame Retardants on Thermal Degradation of Wood”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 12, pp. 2633-2637 (2010).
14. T. Jiang, X. Feng, Q. Wang, Z. Xiao, F. Wang and Y. Xie, “Fire Performance of Oak modified with N-methylol Resin and Methylolated Guanylurea Phosphate/Boric Acid-based Fire Retardant”, *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp. 1-6 (2014).
  15. C. A. Giudicea, P. V. Alferib and G. Canosa, “Siloxanes Synthesized ‘in situ’ by Sol-Gel Process for Fire Control in Wood of *Araucaria Angustifolia*”, *Fire Safety Journal*, Vol. 61, pp. 348-354 (2013).
  16. K. L. Friquin, “Material Properties and External Factors influencing the Charring Rate of Solid Wood and Glue-Laminated Timber”, *Fire and Materials*, Vol. 35, No. 5, pp. 303-327 (2011).
  17. E. Mikkola, “Charring of Wood, VTT Research Report 689”, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland (1990).
  18. 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).
  19. U. S. Forest Service (USFS) “Wood Handbook: Wood as an Engineering Material”, U. S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA (1999).
  20. T. Y. Woo, “A Study on the Fire Risk Assessment of Building Wood”, Ph.D. Dissertation, Kangwon University, Gangwondo, Republic of Korea (2017).
  21. J. G. Quintire, *Principles of Fire Behavior*, Chap. 5, Cengage Learning, Delmar, U.S.A. (1998).
  22. Y. J. Chung, “Combustion Characteristics of the *Pinus Rigida* and *Castanea Sativa* Using Cone Calorimeter”, *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 98, No. 3, pp. 319-323 (2009).
  23. Y. Chung, “Comparison of Combustion Properties of Native Wood Species used for Fire Pots in Korea”, *Journal of Industrial Engineering Chemistry*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-19 (2010).
  24. B. H. Lee, H. S. Kim, S. Kim, H. J. Kim, B. Lee, Y. Deng, Q. Feng and J. Luo, “Evaluating the Flammability of Wood-based Panels and Gypsum Particleboard using a Cone Calorimeter”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 7, pp. 3044-3050 (2011).
  25. 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).
  26. Y. J. Chung, “Combustion Characteristics of the *Quercus Varialis* and *Zelkova Serrata* dried at Room Temperature”, *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 99, No. 1, pp. 96-101 (2010).
  27. 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 als Rohund Werkstoff*, Vol. 56, No. 2, pp. 125-129 (1998).
  28. J. D. Dehaan, “Kirks’s Fire Investigation”, Fifth Ed., pp. 84-112, Prentice Hall, New Jersey, USA (2002).
  29. B. Wang, Q. Tang, N. Hong, L. Song, L. Wang, Y. Shi and Y. Hu, Y. Hu, “Effect of Cellulose Acetate Butyrate Microencapsulated Ammonium Polyphosphate on the Flame Retardancy, Mechanical, Electrical, and Thermal Properties of Intumescent Flame-Retardant Ethylenevinyl Acetate Copolymer/ Microencapsulated Ammonium Polyphosphate/ Polyamide-6 Blends”, *ACS Applied Material and Interfaces*, Vol. 3, No. 9, pp. 3754-3761 (2011).
  30. L. Liu, J. Hu, J. Zhuo, C. Jiao, X. Chen and S. Li, “Synergistic Flame Retardant Effects between Hollow Glass Microspheres and Magnesium Hydroxide in Ethylene-Vinyl Acetate Composites”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 104, pp. 87-94 (2014).
  31. S. Fang, Y. Hu, L. Song, J. Zhan and Q. He, “Mechanical Properties, Fire Performance and Thermal Stability of Magnesium Hydroxide Sulfate Hydrate Whiskers Flame Retardant Silicone Rubber”, *Journal of Materials Science*, Vol. 43, No. 3, pp. 1057-1062 (2008).