

# 국내 유용 해외 목재 수종의 연소특성 평가<sup>1</sup>

서 현 정<sup>2,3</sup> · 강 미 란<sup>2</sup> · 박 정 은<sup>2</sup> · 손 동 원<sup>2,†</sup>

## Combustion Characteristics of Useful Imported Woods<sup>1</sup>

Hyun Jeong Seo<sup>2,3</sup> · Mee Ran Kang<sup>2</sup> · Jung-Eun Park<sup>2</sup> · Dong Won Son<sup>2,†</sup>

### 요 약

본 연구는 국내에서 주로 사용되는 수입 목재 수종의 화재 안전성 평가에 대한 기초 자료를 구축하기 위하여 연소 및 열적 특성을 분석하였다. 연소 특성은 KS F ISO 5660-1 규정에 의거한 콘 칼로리미터 시험 방법으로 열방출률, 총 방출열량, 연소 가스 발생, 그리고 중량 감소를 분석하였다. 열적 안정성은 열중량 분석(Thermogravimetric analysis)을 통해 시료의 열분해 온도 및 시점을 확인하였다. 분석된 수종은 국내 유용 수입 수종으로 멀바우(Merbau), 뎀페닝(Mempening), 가로가로(Garo Garo), 말라스(Malas), 그리고 딜레니아(Dillenia)로 총 5수종을 선정하여 실험을 실시하였다. 열방출률 값은 말라스 > 뎀페닝 > 가로가로 > 멀바우 > 딜레니아 순으로 확인되었다. 총 방출열량을 분석한 결과, 뎀페닝 > 말라스 > 가로가로 > 멀바우 > 딜레니아 순으로 측정되었다. 가스분석 결과에서는 딜레니아가 CO/CO<sub>2</sub> 비율이 최대치로 0.034로 확인되었고, 뎀페닝과 말라스가 0.020으로 최소치를 나타내었다. 중량감소율의 최솟값은 딜레니아가 74.79%로 나타났으며, 말라스가 83.52%로 CO와 CO<sub>2</sub>의 발생과 목재 연소의 거동과의 상관관계를 나타내었다. 수종별 열분해 온도는 멀바우 348.07℃, 뎀페닝 367.57℃, 가로가로 350.59℃, 말라스 352.41℃, 딜레니아 364.33℃로 확인되었다.

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the combustion and thermal properties in order to establish baseline data for the fire safety evaluation of imported wood. The combustion properties such as heat release rate, total heat release, gas yield, and mass loss were analyzed by the method of cone calorimeter test according to KS F ISO 5660-1 and thermogravimetric analysis (TGA). Analyzed species are five kinds of species as Merbau, Mempening, Garo Garo, Malas, and Dillenia. The heat released rate values showed the highest value of Malas as 375.52 kW/m<sup>2</sup>, and Dillenia showed the lowest value as 133.30 kW/m<sup>2</sup>. The data values were confirmed in the following order: Malas > Mempening > Garo Garo > Merbau > Dillenia. In case of the total heat release, it was measured in the following order: Mempening

<sup>1</sup> Date Received November 23, 2015, Date Accepted January 4, 2016

<sup>2</sup> 국립산림과학원 임산공학부 목재가공과. Department of Wood Processing, Korea Forest Research Institute, Seoul 02455, Republic of Korea

<sup>3</sup> 국민대학교 삼림과학대학 임산생명공학과. Forest Product & Biotechnology, College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 02707, Republic of Korea

<sup>†</sup> 교신저자(Corresponding author): 손동원(e-mail: dongwon12@korea.kr)

> Malas > Garo Garo > Merbau > Dillenia. The gas analysis results were that Dillenia showed the highest value of 0.034. Also, Mempening and Malas showed the lowest at 0.020 in the CO/CO<sub>2</sub>. Min of mass reduction was shown as 74.79% Sargent cherry, on the other hand, Malas had a 83.52%. It showed a correlation between and of the CO and CO<sub>2</sub> generation and combustion characteristics of wood. The thermal decomposition temperature of the wood in the TGA were as follow that Merbau 348.07℃, Mempening 367.57℃, Garo Garo 350.59℃, Malas 352.41℃, Dillenia 364.33℃. The aim of this study is to determine the combustion properties of imported wood according to ISO 5660-1. And, based on the results of this study, we would proceed with further research for improving the fire safety of wood for construction.

**Keywords :** combustion properties, cone calorimeter, heat release rate, mass loss rate, thermal stability

## 1. 서 론

목재는 가공의 용이성과 우수적 기계적 강도, 재생 가능한 친환경성으로 인해 건축 내장재 및 외장재, 가구재 등으로 유용하게 사용되고 있다. 특히 친환경 재료에 대한 인식의 향상으로 목재의 수요량이 증가하면서 목재 사용의 화재 안전에 대한 요구 또한 증가하는 추세이다(Eom, 2007). 또한 2013년에 발표된 「목재의 지속가능한 이용에 관한 법률」을 기반으로 하여 친환경 재료로써 목재 및 목질 재료의 사용이 더욱 확대되고 있다(Seo *et al.*, 2013; Son and Kang, 2014; Son and Kang, 2015). 이러한 사회 분위기에서 목재 사용 시 난연 및 방염 처리에 대한 연구가 활발히 추진되고 있으나 목재의 연소에 대한 기초적인 분석 연구가 충분히 이루어지지 않아 기초 데이터가 부족한 실정이다(Son and Kang, 2015; White and Diertenberger, 2013; Lowden and Hull, 2013). 목재의 연소 및 열적 특성은 수종의 밀도, 비중, 추출물 등에 따라 달라질 수 있으며(Yang *et al.*, 2006) 이러한 기본 특성을 바탕으로 적정한 난연제의 종류 및 처리 방법을 선정할 수 있다.

선행 연구에 따르면, 목재는 화염에 노출되었을 때 일반적으로 250~300℃의 온도에서 연소가 시작된다. 목재는 크게 세 가지의 성분으로 구성되어 있고, 그중 주요 구성 성분은 셀룰로오스(cellulose), 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 그리고 리그닌(lignin)으로써, 각 성분별로 열분해 되어 휘발성 가스를 방출하는 온도 대는 서로 다르다(Yang *et al.*, 2006; Chung, 2009; Seo *et al.*, 2015). 목재의 주요 구성 성분 중 리

그닌의 경우 열분해 시 char를 형성하는 역할을 하여 초기 점화 후 화염의 확산을 억제할 수 있다(Gao *et al.*, 2005). Char는 재료의 표면에서 화염 또는 복사 열의 확산을 억제하는 역할을 하며, 초기 점화 시간에 따라 다르게 형성되므로(Delichatsios *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2011) 재료의 초기 점화 시간을 늦추는 것에 영향을 미쳐 화재 안전성을 높이는 데 기여할 수 있다고 판단된다.

또한, 목재의 주요 구성 성분 중 리그닌의 함량 비율은 목재의 종류에 따라 다르며, 일반적으로 침엽수(softwoods)의 경우 20~35% 정도이고 활엽수재(hardwoods)의 경우 17~28%로써 침엽수재가 활엽수재보다 약 10% 정도 많은 양의 리그닌의 함유한다(Sjostrom, 2003). 목재 연소 시 char의 형성 및 표면 착화를 지연하는 특성은 구성 성분 함량에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 수종별 연소 특성 및 열적 특성은 해당 재료의 고유의 성질이라 할 수 있다. 이러한 이유로 수종별 연소 및 열적 특성에 관한 기초 데이터를 수집하여 특성을 확인하고 수종의 특성에 따라서 난연 및 방염 처리 방법을 달리할 수 있기 때문에 해당 특성을 파악하고자 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 연소 특성 및 열적 특성을 확인하기 위한 해외 수종으로써 멀바우(Merbau; *Intsia bjiuga*, *I. partanbanica*), 뎀페닝(Mempening; *Lithocarpus echinifera*), 가로가로(Garo Garo; *Mastixiodendron pachyclados* *M. plectocarpum*), 말라스(Malas; *Homaliun foetidun*), 그리고 딜레니아(Dillenia; *Dillenia philippinensis*)로 총 5수종을 선정

하였다. 해당 수종들은 국내에서 집성목, 가구재, 마루바닥재, 데크재 등으로 다양하게 제작되어 건축 내장재 및 외장재, 그리고 구조재로 활용되고 있는 수입 수종으로써 시장 조사 및 문헌 조사를 통해 유용 수종으로 선정되었다(White and Dietenberger, 2010; Gratkowski *et al.*, 2006; KES-2012; Canada wood, 2015). 본 수종들의 연소 및 열적 특성에 대한 분석은 건물 적용 시 화재 확산 가능성 및 안전성 평가를 위한 기초 자료로 사용될 수 있다.

건물에서 화재가 발생하였을 때, 재료의 화재 안전성을 평가하기 위해서는 재료가 화염에 노출되었을 때의 착화 시점, 재료 표면에서의 열방출률과 방출열량, 화염의 전파 속도, 그리고 연기 발생량 등의 요소가 필요하다. 이러한 화재 안전성 평가 요소를 측정하기 위한 실험으로 KS F ISO 5660-1 콘 칼로리미터 시험 규격이 있다(Kim *et al.*, 2012; Fu *et al.*, 2015; Seo *et al.*, 2015; KS ISO 5660-1, 2003). 해당 규격은 화재 안전 규격이 성능 측정 쪽으로 연구 동향이 변하고 있는 국제적인 경향에 따라 열방출률(Heat release rate)을 측정할 수 있는 실용적인 시험규격으로써(KS ISO 5660-1, 2003) 현재 우리나라의 건축 재료 또한 해당 규격을 준수하여 난연 성능을 확인하고 있다. 또한 본 연구에서 분석하고자 하는 재료의 연소 특성을 종합적으로 측정하기에 적합한 시험 규격이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 콘 칼로리미터 시험 방법에 의거하여 건축용 목재의 연소 특성에 대해 확인 및 분석하였다. 또한 목재의 열적 특성에 대해 확인하기 위해서 열중량 분석(Thermogravimetric analysis; TGA)을 실시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

본 실험에서는 국내 유용 수입 수종으로 멀바우(Merbau; *Intsia bjiuga*, *I. partanbanica*), 멤페닝(Mempening; *Lithocarpus echinifera*), 가로가로(Garo Garo; *Mastixiodendron pachyclados* *M. plecto-*



Fig. 1. Testing wooden specimens.

*carpum*), 말라스(Malas; *Homalium foetidum*), 그리고 딜레니아(Dillenia; *Dillenia philippinensis*). 총 5수종을 선정하여 연소 특성 및 열적 특성을 분석하였다. 목재 수종은 KS F ISO 5660-1 시험 기준에 따른 콘 칼로리미터 시험 진행을 위하여 100 mm × 100 mm × 10 mm의 크기로 제작하여 사용하였다. 제작된 목재 시험편은 온도 25℃, 상대습도 50%의 조건의 항온항습기에서 안정화시킨 뒤 실험을 실시하였다. 또한, 열중량 분석을 위해서 공시 재료를 120 mesh 이하의 크기로 분쇄 후 건조하여 사용하였다. Fig. 1에 콘 칼로리미터 시험편을 나타내었다.

Table 1에 시험편의 물리적 특성에 대하여 나타내었다.

**Table 1.** Density of the specimens

Specification	Merbau	Mempening	Garogaro	Malas	Dillenia
Mass (g)	79.70	104.90	72.50	89.10	73.90
Density (kg/m <sup>3</sup> )	0.64	0.75	0.73	0.76	0.75

**Table 2.** Results of Cone Calorimeter test

Parameter	Merbau	Mempening	Garogaro	Malas	Dillenia
PHRR (kW/m <sup>2</sup> )	150.98	291.89	270.92	375.52	133.30
THR (MJ/m <sup>2</sup> )	76.40	123.25	96.83	102.77	48.31
CO <sub>mean</sub> (kg/kg)	0.036	0.032	0.037	0.035	0.074
CO <sub>2</sub> mean (kg/kg)	1.680	1.578	1.734	1.764	2.200
CO/CO <sub>2</sub>	0.021	0.020	0.021	0.020	0.034
Total oxygen consumed (g)	51.37	82.53	65.94	69.64	33.81
Time to ignition (s)	76	99	39	72	49
Mass loss rate (%)	78.91	82.86	90.79	83.52	74.79

## 2.2. 실험방법

KS F ISO 5660-1에 의거하여 콘 칼로리미터 (Cone calorimeter, Fire Testing Technology Ltd., UK) 시험을 통해 착화 후 연소가 진행되는 동안 재료의 열방출률, 총방출열량 및 연기발생량을 측정하여 연소 특성을 평가하였다. 본 실험은 실험실 조건 온도 25℃, 상대습도 50%에서 가열강도(Heat flux) 50 kW/m<sup>2</sup>로 하여 각 수종별로 30분 동안 실시하였다. 열적 특성은 열중량 분석(Thermogravimetric analysis; TGA)을 통해 확인하였으며 TA Instruments Inc.의 2960 SDT를 이용하여 분석을 실시하였다. 시료는 각 수종별로 5 mg을 분석을 위해 사용하였고, 질소 분위기(N<sub>2</sub>)에서 실온에서부터 800℃까지 분당 10℃의 승온 속도로 실험을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

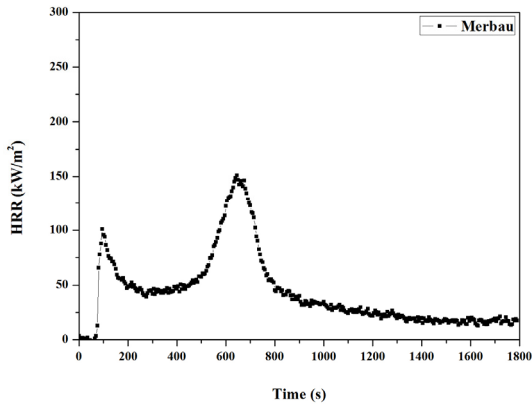
### 3.1. 콘 칼로리미터(Cone calorimeter) 시험 결과

5수종에 대한 콘 칼로리미터 실험을 실시하여 열방출률(Heat release rate; HRR), 총방출열량(Total

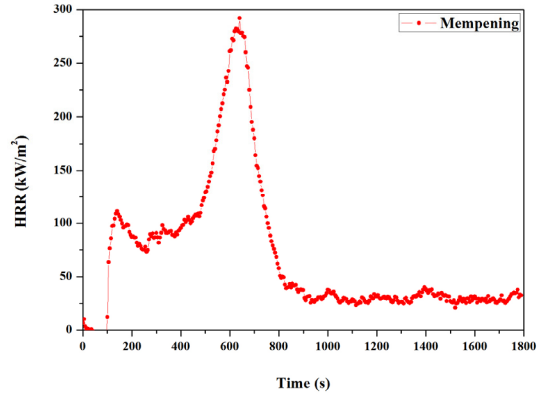
heat release; THR), 착화 시간(Time to ignition; TTI) 및 연기 발생(Smoke production rate; SPR) 중 CO 및 CO<sub>2</sub> 발생 수율에 대해서 측정하였다. 콘 칼로리미터 실험 결과를 Table 2에 나타내었다.

열방출률이란 재료의 표면적(m<sup>2</sup>) 당 발생하는 순간적인 열량의 크기를 나타내는 값으로, 재료 표면 착화 시 연소 가능성을 잘 표현할 수 있는 요소이다 (Guillaume *et al.*, 2014; Seo *et al.*, 2015). Fig. 2에 수종별 열방출률 값을 그래프로 나타내었다. Son and Kang (2015), Seo *et al.* (2015)이 발표했던 바와 같이 천연 목재는 연소 시 두 번의 열분해 과정을 거쳐 연소되며, 초기 열분해가 진행되고 분해 최고 온도에 도달하는 것으로 확인되었다. 열방출률 값의 첫 번째 피크는 수종 간의 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 Kim *et al.* (2006)의 보고와 유사한 값을 나타내며, 탄화 작용으로 인해 목재 표면에 형성된 char에서 기인된 것으로 사료된다. 두 번째 피크는 해당 수종의 고유 열방출률 값으로 수종별로 차이를 나타내었다. 열방출률의 최대값 중 가장 큰 값을 나타낸 수종은 말라스로 375.52 kW/m<sup>2</sup>로 확인되었고, 가장 낮은 값은 딜레니아로 133.30 kW/m<sup>2</sup>로 확인되었다. 열방출률 값은 말라스 > 멤페닝 > 가로가로 > 멀바우 > 딜레니아 순으로 나타났다.

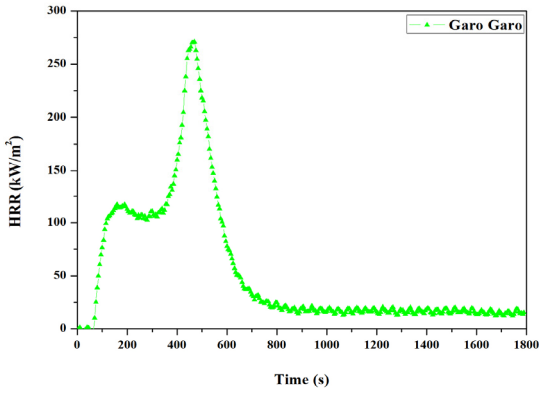
국내 유용 해외 목재 수종의 연소특성 평가



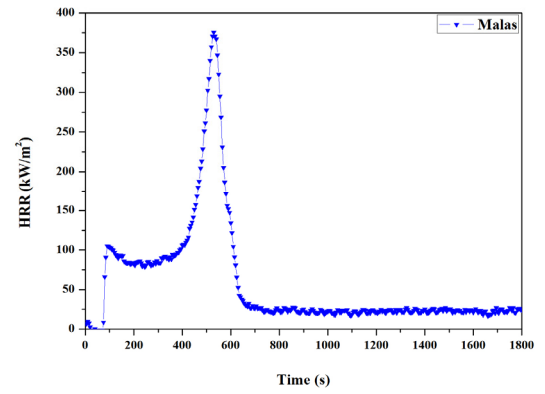
(a) Merbau



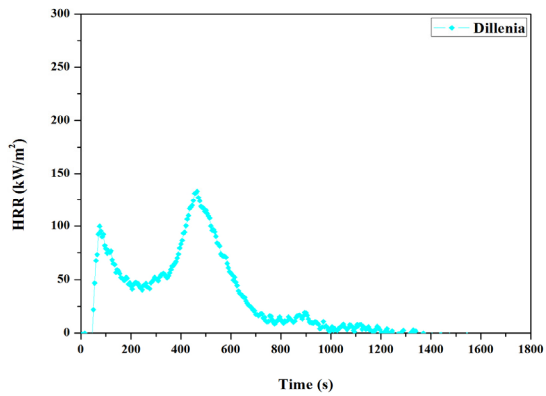
(b) Mempening



(c) Garo Garo



(d) Malas



(e) Dillenia

Fig. 2. Heat release rates of wooden specimens.

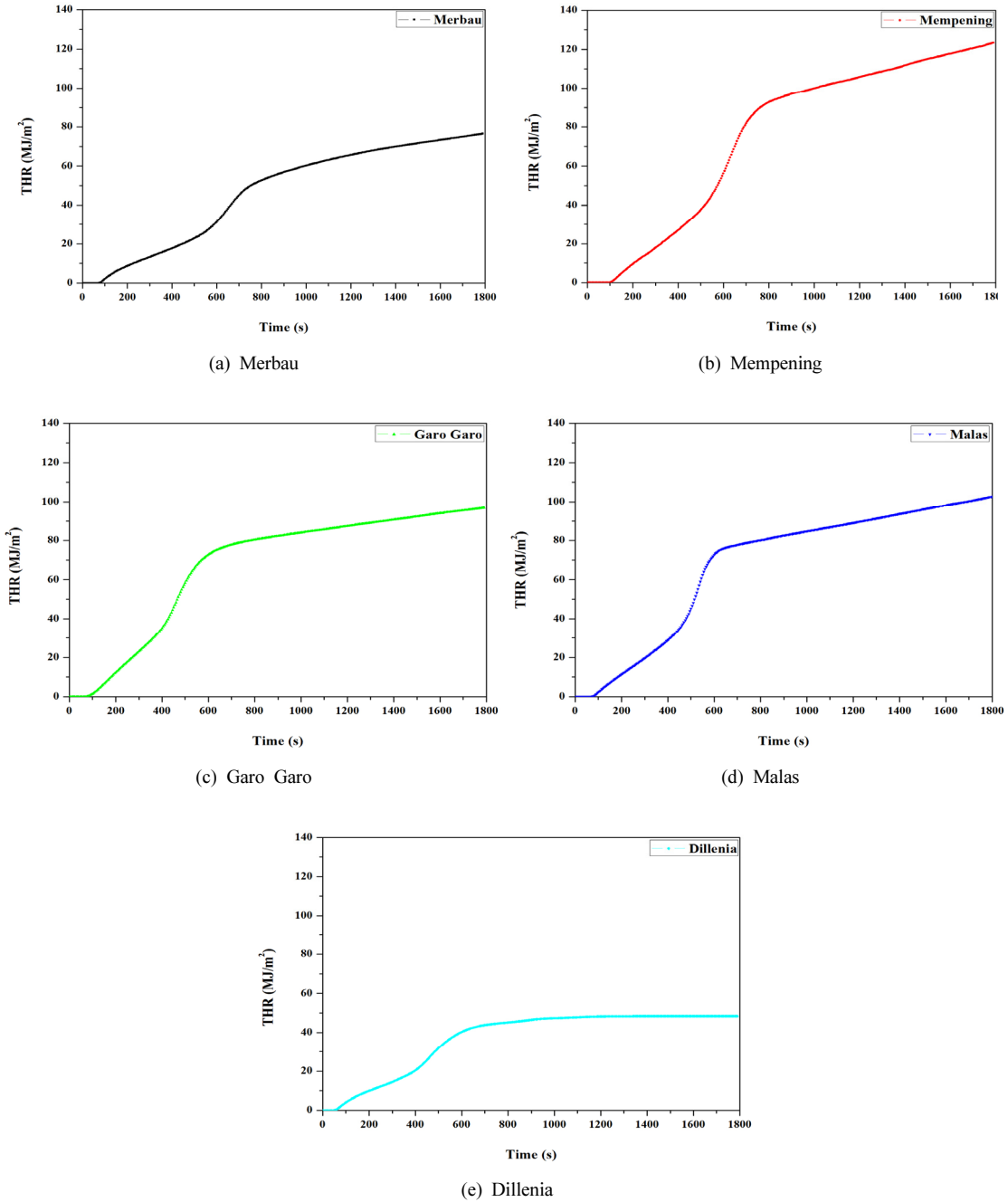


Fig. 3. Total heat release of wooden specimens.

착화 시간(Time to ignition; TTI)은 재료 표면에서 화염이 발생하기 시작한 시점으로 열방출률과 함께 가연성 및 화염 확산 가능성을 나타낼 수 있는 요소이다(Li, 2003; Lee *et al.*, 2011). 표면 착화 시점이 지연될수록 화염 확산의 가능성이 억제되는 것으로 판단할 수 있으며 방염 또는 난연성을 가지고 있는 재료로 구분할 수 있다. 착화 시간은 뎀페닝이 99초로 가장 늦은 시점을 나타내었고, 가로가로가 39초로 착화가 빠르게 나타난 것으로 확인되었다. 뎀페닝은 활엽수종으로 내부에 검(gum) 물질이 많이 함유되어 있지 않은 수종으로써 목재 표면의 공극으로 열이 흡수되면서 착화 지연에 영향을 미친 것으로 판단된다(Kim, 2004). 또한 산소 소비량의 경우 열방출률 및 총방출열량 값에 비례하는 것을 확인하였고, 딜레니아가 33.81 (g)으로 가장 낮은 값을 나타내었다. 열방출률 값이 가장 높게 나타난 수종은 말라스였으나 산소 소비량이 가장 높은 수종은 뎀페닝인 것이 특이 사항으로 보인다.

총 방출열량은 재료의 표면 착화 후 연소가 진행되는 동안 재료 표면에서 방출되는 열량의 총 합을 나타내는 값으로, 다른 재료의 표면으로 화염이 확산될 가능성을 파악할 수 있게 해주는 값이다(Guillaume *et al.*, 2014; Seo *et al.*, 2015). 해당 데이터의 결과 값을 Fig. 3에 나타내었다. 총 방출열량의 최댓값은 뎀페닝으로 123.25 MJ/m<sup>2</sup>로 확인되었고, 최솟값으로는 딜레니아로 48.31 MJ/m<sup>2</sup>로 확인되었다.

총 방출열량은 뎀페닝 > 말라스 > 가로가로 > 멀바우 > 딜레니아 순으로 확인되었고, 이 값은 열방출률 값과 관련성이 있는 것으로 사료된다. 뎀페닝과 말라스 수종은 타 수종들에 비해 열량 값이 높게 나타났는데 이는 활엽수종의 공극 내부로의 흡열 반응에 기인된 것으로 판단된다. 뎀페닝과 말라스 두 수종 모두 활엽수종으로 내부 공극의 분포가 고른 특징이 있다(Kim, 2004).

CO는 재료의 불완전 연소 생성물으로써 재료 표면에 형성된 char가 공기 중의 산소와 접촉을 제한하기 때문에 발생되며(Byrne and Nagle, 1997; Lowden and Hull, 2013; Seo *et al.*, 2015), CO<sub>2</sub>는 완전 연소

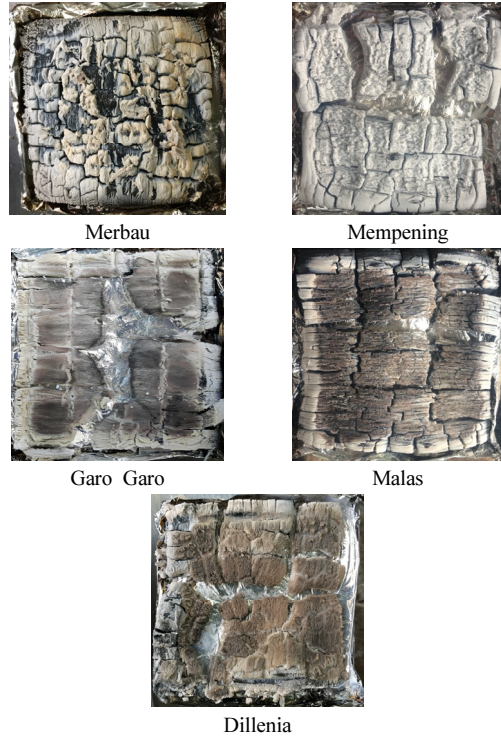


Fig. 4. Wooden specimens after cone calorimeter test.

생성물로 일반적으로 CO<sub>2</sub>의 생성량이 높을수록 재료의 중량 감소율이 증가한다. 이는 목재의 연소 시 char의 생성으로 인하여 표면의 화염 전파 속도를 늦추는 역할을 하고, 이때 생성되는 가스는 주로 CO로써 해당 연소 가스의 발생량이 높을수록 연소의 진행이 억제되는 것으로 사료된다. CO/CO<sub>2</sub> 값은 CO<sub>2</sub> 발생 수율 대비 CO의 발생 수율으로써 목재의 완전 연소가 더디게 진행되는 것을 나타내는 값이라고 표현할 수 있다. CO/CO<sub>2</sub> 값이 가장 높은 수종은 딜레니아로 0.034이며 중량 감소율은 74.79%로 확인되었다. CO/CO<sub>2</sub> 값의 최소치는 뎀페닝과 말라스로 0.020으로 확인되었고 중량 감소율은 각각 82.86%, 83.52%였다. 이러한 결과를 바탕으로 CO와 CO<sub>2</sub>의 발생이 목재 연소 거동과 높은 상관관계를 가지고 있다고 사료된다. Fig. 4에 콘 칼로리미터 시험 후 목재 시험편들을 나타내었다.

**Table 3.** Temperature ranges of wood components pyrolysis and combustion process

Temperature ranges (°C)	Decomposition processes of wood
160~200	Pyrolysis of three components in wood begin.
180~350	Hemicellulose decomposes fist.
275~350	Cellulose starts to be thermally decomposed.
250~500	Pyrolysis of lignin begins.

### 3.2. 열중량 분석(Thermogravimetric Analysis; TGA) 시험 결과

분당 10℃의 승온 속도로 실온에서 최고온도 800℃ 까지 측정된 열중량 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 열중량 분석 원리는 가열로에 시료를 넣고 열을 가하였을 때 온도의 상승에 따른 시료의 질량 변화를 측정하는 것으로, 연소 과정에 대한 열분해의 분석이 가능하다(Yang and Roy, 1999). Fig. 5에서와 같이 모든 목재는 열분해 및 산화 과정을 거쳤으며, 다양한 분해 경로로 열분해 되었음을 확인하였다. 열분해 곡선은 크게 두 가지 형태의 열분해를 나타내었는데, 첫 번째는 40~60℃에서의 중량 감소를 나타내었고, 두 번째 열분해는 250~450℃의 온도 범위에서 중량 감소가 나타나는 것이 확인되었다. 첫 번째 온도 범위에서의 중량 감소는 목재 내부의 수분 및 기타 휘발성 물질이 가스화 되는 과정으로써, Randriamanantena *et al.* (2009)은 해당 과정을 거친 이후에 본 재료의 열분해가 본격적으로 진행된다고 보고하였다. 목재의 성분별 열분해 온도 범위를 Table 3에 나타내었다.

각 수종별 열분해 온도는 멀바우 348.07℃, 뽕페닝 367.57℃, 가로가로 350.59℃, 말라스 352.41℃, 딜레니아 364.33℃로 확인되었다. 이때의 잔존율은 멀바우 50.15%, 뽕페닝 67.50%, 가로가로 37.63%, 말라스 70.40%, 딜레니아 55.21%이었다. 이러한 결과는 Kim *et al.* (2006)과 Lowden and Hull (2013)이 보고한 셀룰로오스(250~350℃) 및 리그닌(250~500℃)의 열분해 온도와 관련이 있는 것으로 사료된다. 선행 연구에 의하면, 리그닌은 다른 구성 성분에 비해 넓은 온도 범위에서 완만하게 중량 감소를 나타내어 셀룰로오스나 헤미셀룰로오스에 비해 높은

열적 안정성을 가지고 있다고 보고되고 있다(Chung and Spearpoint, 2007; Randriamanantena *et al.*, 2009; Lowden and Hull, 2013). 또한, 목재 내의 리그닌 함량에 따라 DTG 곡선의 경향이 달라지는 데, 그래프의 DTG 곡선의 200~500℃ 구간에서 활엽수재(뽕페닝, 말라스)의 경우 완만한 곡선이 보이는 것을 확인하였다. 이는 침엽수재와 활엽수재의 리그닌 구조의 차이와 활엽수재의 헤미셀룰로오스 함량이 높은 것에 기인된 것으로 사료된다.

본 연구를 통해서 국내에서 사용되는 해외 목재의 연소 특성 및 열적 특성에 대해서 확인하였다. 목재의 구성 성분의 비율은 평균적으로 나타낼 수 있으나 수종별 연소 특성 및 열적 특성은 다르게 나타날 수 있다고 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 해당 수종을 건물에 적용 시 난연 및 방염 처리를 하였을 때 어느 정도의 성능 향상이 이루어질 수 있는지를 확인할 수 있는 기초 자료를 구축하였다. 향후 연구에서는 각 수종별 난연 및 방염 처리 전 후의 난연 성능을 확인하고 적절한 처리 방법에 대한 실험을 진행하고자 한다.

## 4. 결 론

국내에서 주로 사용되는 수입 목재 5수종에 대하여 화재 안전성에 대한 기초자료 제공을 목적으로 연소 및 열적 특성에 대하여 분석하였다.

- (1) 콘 칼로리미터 시험에서 열방출률의 최댓값을 나타낸 수종은 말라스로 375.52 kW/m<sup>2</sup>으로 확인되었고, 가장 낮은 값은 딜레니아로 133.30 kW/m<sup>2</sup>로 확인되었다. 열방출률은 말라스 > 뽕



국내 유용 해외 목재 수종의 연소특성 평가

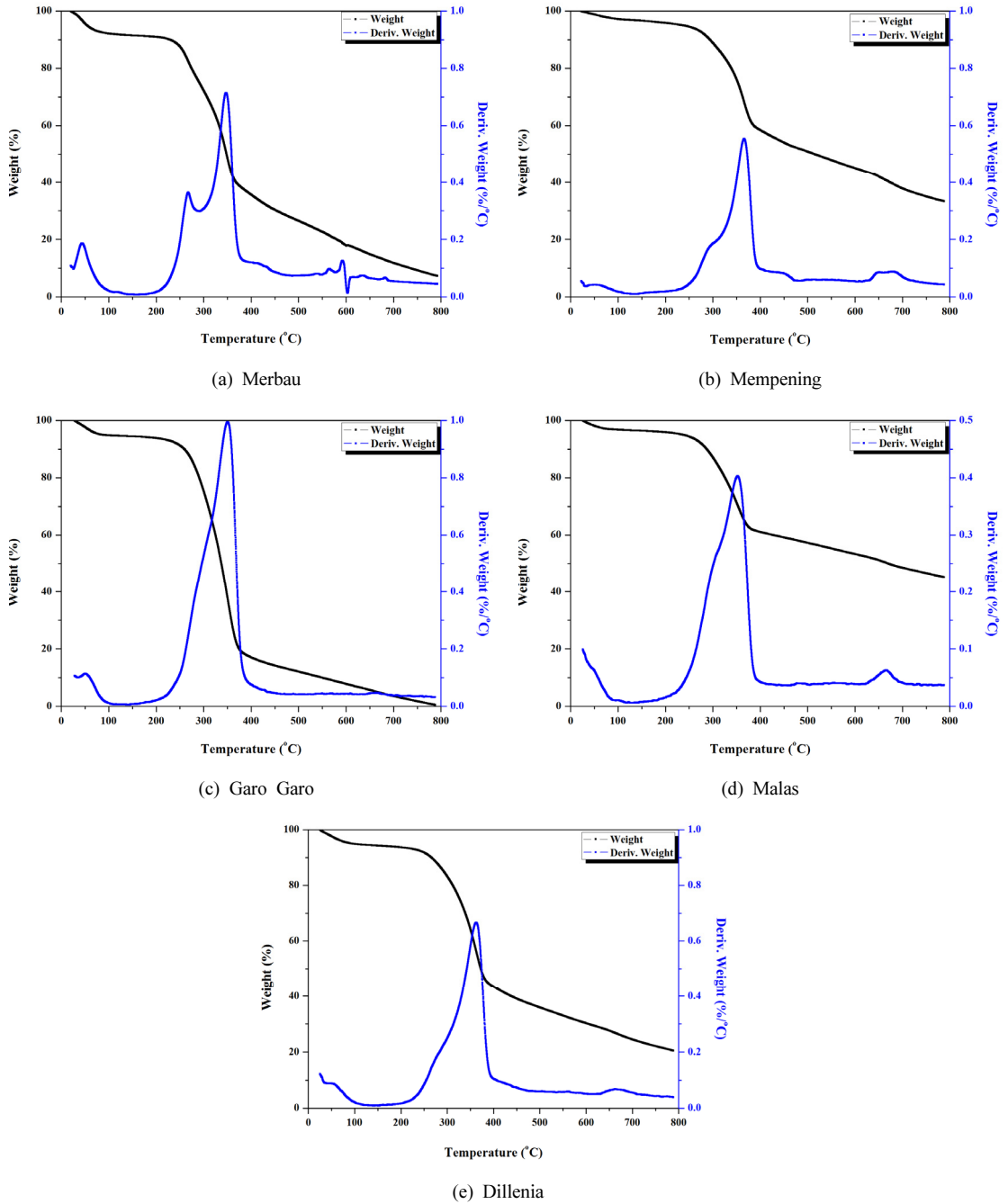


Fig. 5. TGA/DTG curves of wooden specimens.

페닝 > 가로가로 > 멀바우 > 딜레니아 순으로 나타났다.

- (2) 총 방출열량을 분석한 결과, 최댓값은 뽕페닝으로 123.25 MJ/m<sup>2</sup>로 확인되었고, 최솟값으로는 딜레니아로 48.31 MJ/m<sup>2</sup>로 확인되었다. 총 방출열량은 뽕페닝 > 말라스 > 가로가로 > 멀바우 > 딜레니아 순으로 나타났으며 이 값은 열방출률 값과 상관관계가 있는 것으로 사료된다.
- (3) 착화 시간은 뽕페닝이 99초로 가장 늦은 시점으로 나타났으며, 가로가로는 39초로 가장 빠르게 표면 착화가 진행되었다. CO/CO<sub>2</sub>는 딜레니아가 0.034로 최대치이고, 뽕페닝 및 말라스가 0.020으로 확인되었다. 이 값은 재료의 연소 거동과 유사한 경향을 나타내었다.
- (4) TGA 분석에서 목재의 수종별 열분해 온도는 멀바우 348.07℃, 뽕페닝 367.57℃, 가로가로 350.59℃, 말라스 352.41℃, 딜레니아 364.33℃로 확인되었다. 이때의 잔존율은 멀바우 50.15%, 뽕페닝 67.50%, 가로가로 37.63%, 말라스 70.40%, 딜레니아 55.21%이었다.

## 사 사

본 연구는 국립산림과학원 연구사업 “목재 및 목질재료의 난연 성능 향상” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Byrne, C.E., Nagle, D.C. 1997. Carbonization of wood for advanced materials applications. *Carbon* 35(2): 259-266.
- Chung, Y.J., Spearpoint, M. 2007. Combustion properties of native Korean wood species. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes* 9(3): 118-125.
- Chung, Y.J. 2009. Comparison of combustion properties of the *Pinus regida*, *Castanea sativa* and *Zelkoa serrata*. *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering* 23(4): 73-78.
- Delichatsios, M., Paroz, B., Bhargava, A. 2003. Flammability properties for charring materials. *Fire Safety Journal* 38(3): pp. 219-228.
- Eom, Y.G. 2007. Wood and engineered wood as the eco-friendly building materials. *Air cleaning technology* 20(2): 26-49.
- Fu, Y., Lu, S., Li, K., Liu, C., Cheng, X., Zhang, H. 2015. An experimental study on burning behaviors of 18650 lithium ion batteries using a cone calorimeter. *Journal of Power Sources* 273: 216-222.
- Gao, M., Ling, B., Yang, S., Zhao, M. 2005. Flame retardance of wood treated with guanidine compounds characterized by thermal degradation behavior. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 73(1): 151-156.
- Gratkowski, M.T., Dembsey, N.A., Beyler, C.L. 2006. Radiant smoldering ignition of plywood. *Fire Safety Journal* 41(6): 427-443.
- Guillaume, E., Marquis, D., Saragoza, L. 2014. Calibration of flow rate in cone calorimeter tests. *Fire and Materials* 38: 194-203.
- Kim, H.S., Kim, S., Kim, H.J., Yang, H.S. 2006. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochimica Acta* 451(1-2): 181-188.
- Kim, J., Lee, J.H., Kim, S. 2012. Estimating the fire behavior of wood flooring using a cone calorimeter. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 110: 677-683.
- Kim, S.H. 2004. Wood species Information. Wood Korea.
- KS F ISO 5660-1. 2003. Reaction to fire test - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (Cone calorimeter method).
- Lee, B.H., Kim, H.S., Kim, S., Kim, H.J., Lee,

- B.W., Deng, Y., Feng, Q., Luo, J. 2011. Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter. *Construction and Materials* 25(7): 3044-3050.
- Li, B. 2003. Influence of polymer additives on thermal decomposition and smoke emission of poly (vinyl chloride). *Polymer Degradation and Stability* 82(3): 467-476.
- Lowden, L.A., Hull, T.R. 2013. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews* 2(4): 1-19.
- Randriamananantena, T., Razafindramisa, F.L., Ramanantsizehena, G., Bemes, A., Lacabane, C. 2009. Thermal behaviour of three woods of Madagascar by thermogravimetric analysis in inert atmosphere, *Proceedings of the Fourth High-energy Physics International Conference*, August 21-28, Antananarivo, Madagascar.
- Seo, H.J., Kim, S., Son, D.W., Park, S.B. 2013. Review on Enhancing Flame Retardant Performance of Building Materials using Carbon Nanomaterials. *Journal of the society of living environmental system Korea* 20(4): 514-526.
- Seo, H.J., Kang, M.R., Son, D.W. 2015. Combustion Properties of Woods for Indoor Use (II). *Journal of the Korean wood science and technology* 43(4): 478-485.
- Seo, H.J., Kim, S., Huh, W., Park, K.W., Lee, D.R., Son, Kim, Y.S. 2015. Enhancing the flame-retardant performance of wood-based materials using carbon-based materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 119(3): 1-8.
- Son, D.W., Kang, S. 2014. Combustion Properties of Woods for Indoor Use (I). *Journal of the Korean Wood Science and Technology* 42(6): 675-681.
- Son, D.W., Kang, M.R. 2015. Combustion Characteristics of Fire Retardants Treated Wood (I). *Journal of the Korean wood science and technology* 43(1): 96-103.
- Sjostrom., E. 1993. *Wood chemistry. Fundamentals and Applications*. Second edition ed. San Diego: Academic press.
- The Information of National timber industry, KFS-2012 trends in May, Korea Forest Service (2012).
- White, R.H., Dietenberger, M.A. 2010. Fire safety of wood construction. In: *Wood handbook-Wood as an engineering material*, Centennial Edition. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- White, R.H., Dietenberger, M.A. 2013. Fire safety of wood construction. *General Technical Report FRL-GTR-190*. Chapter 18.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Yang, H.S. 2006. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochimica Acta* 451(1-2): 181-188.
- Yang, J., Roy, C. 1999. Using DTA to quantitatively determine enthalpy change over a wide temperature range by the “mass-difference baseline method”. *Thermochimica Acta* 333(2-3): 131-140.