

# 실내사용 목재의 연소 특성 분석(I)<sup>1</sup>

손 동 원<sup>2,†</sup> · 강 석 구<sup>3</sup>

## Combustion Properties of Woods for Indoor Use ( I )<sup>1</sup>

Dong Won Son<sup>2,†</sup> · Seog-goo Kang<sup>3</sup>

### 요 약

최근 친환경 재료에 대한 국민들의 관심이 높아지면서 실내사용목재의 이용도 증가하고 있다. 본 연구는 실내사용 목재의 내화성 부여를 위한 기초자료로 활용될 수 있는 열특성 분석에 그 목적이 있다. 열방출률과 열방출량, 가스발생량, 중량감소 등의 연소성질을 열중량 분석(TGA) 및 콘칼로리미터(KS F ISO 5660-1)의 방법으로 분석하였다. 분석 결과 목재의 재질적 특성은 연소적 특성으로 발현되었으며, 열적성질과 연소가스 발생량과의 관계는 상관관계가 높게 나타났다. 탄화층 형성에 의한 연소억제 효과도 수종에 따라 현저한 차이를 보였다. 총열방출량과 중량감소량은 상관관계가 높게 나타났다. 점화시간과 총열방출량 등의 자료는 목재의 내화성능부여 등의 기초 자료로서 매우 중요하리라 판단되었다.

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze fundamental combustion characteristics of woods used for indoor applications. The combustion characteristics such as heat release rate, total heat release, gas yield, and mass loss were analyzed by the method of cone calorimeter or thermogravimetry. These analysis results show that material properties of wood are closely related to flammability. It was shown that the relationship between the mass loss and gas emission. The results of combustion properties of woods would be useful for fundamentals of guiding the safe use of wood indoor application.

**Keywords :** combustion characteristics, heat release rate, mass loss

<sup>1</sup> Date Received April 29, 2014, Date Accepted June 16, 2014

<sup>2</sup> 국립산림과학원 임산공학부. Korea Forestry research Institute. 57 Hoegiro, Dongdaemun-gu, Seoul, 130-712 Korea

<sup>3</sup> 충남대학교 환경소재공학과. Department of Bio-Based Materials, College of Agriculture & Life Science Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-764, South Korea

<sup>†</sup> 교신저자(corresponding author): 손동원(e-mail: dongwon@forest.go.kr)

**Table 1.** Moisture content and density of the specimens

Specification	Japanese red pine	Hemlock	Radiata pine	Teak	Walnut
Density (kg/m <sup>3</sup> )	414.1	407.3	418.9	648.4	674.4
M.C. (%)	11.0	10.7	13.7	8.3	9.6

## 1. 서론

실내사용 목재에 대한 가장 큰 우려는 화재에 대한 안전이다. 화재안전을 위한 많은 목재의 내화기술이 보고되고 있지만 실내사용 목재의 기초적 자료는 아직 충분하지 못하다.

목재는 450℃ 이상으로 가열되면 모든 휘발성 물질은 증발되어 사라지고, 리그닌 함량에 의하여 15~20% 정도의 숯(char)을 남긴다. 숯은 산소를 차단하여 연소 속도를 감소시킨다(Pearce *et al.* 1981). 목재의 탄화속도는 목재의 종류, 함수량, 열 침투성, 열적 특성과 같은 많은 변수들에 의하여 복합적으로 영향을 받는다(Spearpoint 1999).

목재는 외부 열원에 의해 분해를 시작하면 가연성 기체가 발생하고 기체는 공기와 혼합하여 연소성 혼합물을 만들어 목재 표면에 열유속이 높아질 때 착화가 일어난다(Boonmee and Quintiere 2002).

목재의 주요성분은 각각 다른 열분해 성질을 지닌다. 각성분이 분해되어 휘발가스를 발생시키는 온도대는 셀룰로오스 240~350℃, 헤미셀룰로오스 200~260℃, 리그닌 280~500℃이다. 목재와 같이 숯을 형성하는 물질의 열분해는 열과 질량의 변화를 동반하는 복잡한 화학작용이다(Yang *et al.* 2007).

화재발생 시 목질재료의 안전성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출성, 열방출률, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다. 특히 화재에 의한 연기관련 지수는 연소가스의 유해성에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 연기지수 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로 인식되고 있다(Cheong 2010). 일반 건축물의 내·외장용 목재는 화재 시 발생하는 대류열과 복사열에 의해 가열되면 분해되어 가연성 가스가 배출되고 외부 화염에 의해 착화되어 연소가 진행된다.

본 연구에서는 주요 실내사용 목재에 대한 열분석

을 열중량 분석 및 콘칼로리미터 분석을 실시하여 수중 간 열적 성질에 대한 데이터를 수집하여 특성을 구명하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시재료

국내에서 많이 사용되는 소나무, 험록, 라디에타파인, 티크, 월넛을 사용하였다. 이들 목재는 원목을 제재한 후 건조하여 100 mm × 100 mm × 10 mm의 크기로 제작하였다. 사용한 목재시편의 함수율 및 밀도는 Table 1과 같다.

### 2.2. 열중량(TGA) 분석

열중량 분석(TGA: Thermogravimetry Analysis)은 TA Instruments Inc.의 2960 SDT를 이용하여 측정하였다. 시료는 공시재료를 120 mesh 이하로 볼밀을 사용하여 분쇄한 후 건조하여 사용하였다. 시료는 10 mg을 분석용으로 사용하였으며 온도조건은 실온에서 800℃까지 10℃/min의 속도로 승온시켰으며, 공기(Air)분위기에서 유속은 100 ml/min으로 시험을 실시하였다.

### 2.3. 콘칼로리미터에 의한 연소특성 분석

연소시험은 KS F ISO 5600-1의 방법에 의하여 열유속 50 kW/m<sup>2</sup>조건에서 수행하였다. 시험조건은 습도 50%, 온도 23℃ 조건을 유지하였다. 콘칼로리미터 분석에서는 열방출률(HRR), 총열방출량(THR), CO, CO<sub>2</sub>발생량을 측정하였다.

설정된 외부 열유속에 노출된 시편이 착화되어 연소될 때의 열방출률은 연소 생성물 흐름 속의 산소

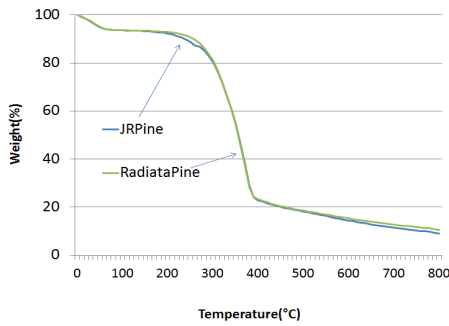


Fig. 1. TGA curves of Japanese red pine and Radiata pine.

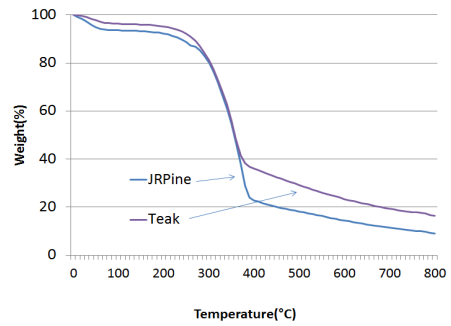


Fig. 3. TGA curves of Japanese red pine and Teak.

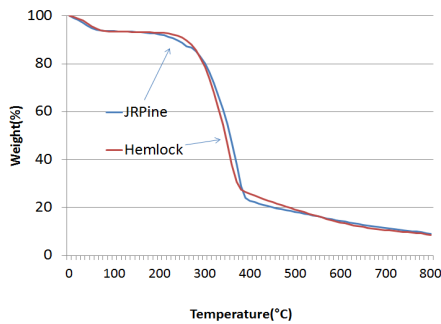


Fig. 2. TGA curves of Japanese red pine and Hemlock.

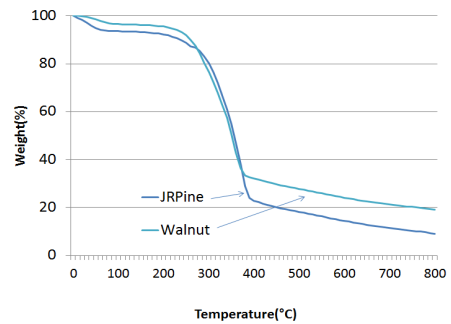


Fig. 4. TGA curves of Japanese red pine and Walnut.

농도와 유속으로부터 유도된 산소소비량을 측정하여 평가하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃연소가 시작된 때부터 30분경과 후에 종료하였다.

조습처리가 완료된 시험편은 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부점화장치가 부착된 상태로 50 kW/m<sup>2</sup> 외부 열유속에 30분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열방출률 및 연기관련지수를 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. TGA (Thermogravimetry Analysis) 분석

10°C/min의 승온속도로 실온에서 800°C까지 측정 한 TGA결과는 Figs. 1~4와 같다. Figs. 1~4에서와

같이 모든 시료는 열분해와 산화 과정을 거치며, 모든 시료가 유사한 분해 경로로 열분해 됨을 알 수 있었다. 시료의 최대온도 피크는 햄록 355°C, 월넛 357°C, 티크 358°C, 라디에타파인 369°C, 소나무 371°C이었다. 이때 잔사율은 햄록 42%, 월넛 45%, 티크 50%, 라디에타파인 38%, 소나무 37%였다. 이러한 결과는 셀룰로오스의 열분해 온도인 240°C~350°C와 관련이 있는 것으로 판단된다(Park 등 2005). 또한 침엽수의 분해커동이 활엽수보다 복잡한 경로를 거치며 분해된다고 보고하였다. 리그닌은 셀룰로오스나 헤미셀룰로오스 보다 열적 분해에 안정적이며 천천히 넓은 온도범위대에서 분해된다고 보고하고 있다(Quintire 1998). 본 연구결과에서 침엽수의 분해 최고 온도점이 활엽수보다 높으며 잔사율이 낮은 점은 이러한 연구결과와 부합된다고 판단되었다.

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

Parameter	JRPine	Hemlock	RadiataPine	Teak	Walnut
PHRR (kW/m <sup>2</sup> )	243.3	148.9	219.8	232.0	264.2
THR (MJ/m <sup>2</sup> )	79.9	97.5	189.5	96.4	169.6
CO <sub>mean</sub> (kg/kg)	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07
CO <sub>2mean</sub> (kg/kg)	2.34	2.31	2.32	2.47	2.48
CO/CO <sub>2</sub>	0.027	0.025	0.032	0.024	0.028
Total oxygen consumed (g)	54.4	67.0	114.9	69.2	108.3
Ignition time (s)	28	20	23	29	35
Initial mass (g)	47.2	46.4	47.7	72.8	61.5
Mass lost (g)	44.8	44.9	46.6	62.6	56.6
Mass loss (%)	94.9	96.7	97.7	86.0	92.0

### 3.2. 콘칼로리미터 분석

5수종에 대한 콘칼로리미터 시험을 실시하여 착화 시간, 열방출률, 총방출열량 등을 측정하였다. 실험 결과는 Table 2와 같다.

착화시간은 재료의 연소성능 및 특성을 나타내는 주요인자이다. 시료를 50 kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 노출시켜 대기조건에서 연소시킨 결과, 착화시간이 가장 빠른 수종은 햄록이 20초였으며, 가장 늦은 수종은 월넛으로서 35초로 나타났다. 각 수종의 착화시간은 햄록 < 라디에타파인 < 소나무 < 티크 < 월넛 순이었다. 착화시간은 침엽수와 활엽수에 대한 차이가 있었으며, 목재의 밀도와 상관관계가 있는 것으로 사료된다(Cheong 2010). 착화시간은 표면열손실의 유무에 따른 상수, 열전도도, 체적밀도, 연료의 비열 및 착화온도 항의 2승에 비례하며, 시험편에 가해지는 열유속의 2승에 반비례하는 것으로 설명된다(Quintire 1998).

재료가 지니고 있는 화재에 대한 위험성은 열방출률에서 좌우된다. 열방출률은 화재위험성을 결정하는데 있어 평균열방출률 및 최대열방출량은 화재 모델링을 위한 기본적인 변수들을 결정하는 데 사용된다(Shin 등 2010).

열방출은 산소 소비원리를 이용한 측정으로부터 계산할 수 있으며 이 원리를 대부분의 일반 가연물의 경우 연소에서 공기 흐름으로부터 소비된 산소 1

kg은 13.1 × 103 kJ과 동일한 열을 방출한다는 것이다(KS F ISO 5660-1). 5수종에 대한 열방출률 결과를 Figs. 5~8에 나타내었다. 천연목재의 연소적 특성 변화는 그래프상에서 초기의 열분해 개시와 분해 최고온도 도달 양상 등에서 유사한 경향을 나타내었다. 열방출률 최대값은 월넛으로 264.2 kW/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, 최소값은 햄록으로 148.9 kW/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 열방출률은 월넛 > 소나무 > 티크 > 라디에타파인 > 햄록 순으로 나타났다. 착화시간이 짧았던 햄록에서 총열방출률값이 가장 높게 나타난 것은 특이한 사항이라 하겠다.

총방출열량은 소나무가 가장 낮은 79.9 MJ/m<sup>2</sup>을 나타냈으며 라디에타파인이 가장 높아 189.5 MJ/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 총방출열량은 소나무 < 티크 < 햄록 < 월넛 < 라디에타파인 순으로 나타났다.

스티븐 등(Stevens *et al.* 1995)은 heat flux 50 kW/m<sup>2</sup>를 이용한 콘칼로리미터 실험의 최대열방출률과 ASTM E84 규격시험을 근거로 한 화염전파지수가 상관성을 지닌다고 하였고 목재 시편을 heat flux 50 kW/m<sup>2</sup>를 이용한 콘칼로리미터 실험을 통하여 화염전파지수 값 75와 200이 최대열방출률 205와 350 kW/m<sup>2</sup> 값과 상관관계가 있음을 보고하였다. 시간에 따른 열방출률그래프(Figs. 5~8)에서 수종간에 다른 경향성을 보여준다. 열방출률은 비질량손실률과 유효연소열의 곱으로 표현된다(Cheong 2010).

외부열원 50 kW/m<sup>2</sup>에서 시험된 수종의 단위면적

실내사용 목재의 연소 특성 분석(I)

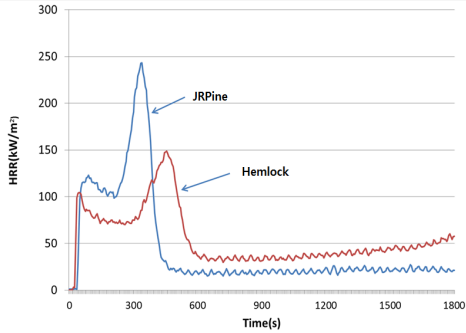


Fig. 5. Heat release rates of Japanese red pine and Hemlock.

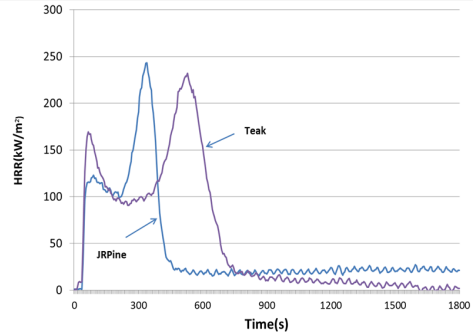


Fig. 7. Heat release rates of Japanese red pine and Teak.

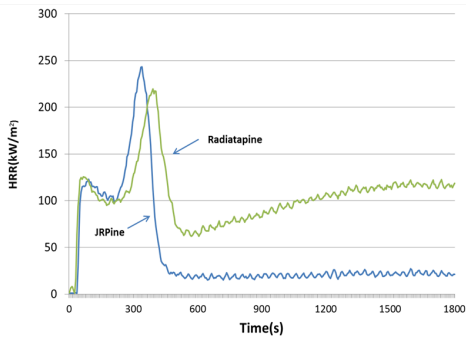


Fig. 6. Heat release rates of Japanese red pine and Radiatapine.

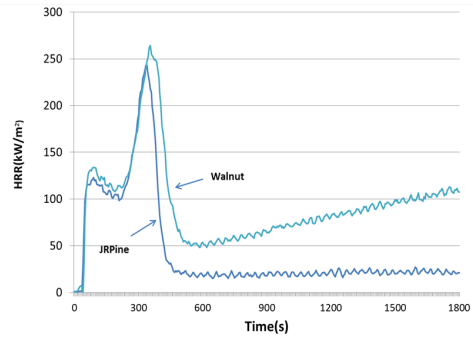


Fig. 8. Heat release rates of Japanese red pine and Walnut.

당 최대열방출률(PHRR)은 수종간 차이를 나타내었으며 이러한 차이는 체적밀도의 차이로 보고된 바 있다(Cheong 2010). 또한 최대열방출률에 도달한 시간은 소나무 345 s, 월넛 355 s, 라디에타파인 390 s, 험록 505 s, 티크 530 s 순이었다. 이것은 연소억제성을 나타내는 것으로 수종간의 연소지연 효과를 나타내는 것으로 설명된다(Pearce *et al.* 1981). 시험편에서의 열적 파동의 첫 번째 피크는 연소표면 근처에서 숯이 형성되기 전에 발생한다. 중간 피크대는 처음 숯층이 형성된 후 단열효과로 시료가 점진적으로 연소하기 때문에 감소되는 경향이 관찰된다(Pearce *et al.* 1981).

재료의 연소양상은 CO<sub>2</sub>와 CO가스의 발생률에서

확인될 수 있다. 서로 다른 연소속도를 보이는 수종에서 유해성을 확인하기 위하여 동일한 양의 CO<sub>2</sub>가 발생할 때 함께 생성되는 CO의 양을 비교한 인자가 CO/CO<sub>2</sub>비이다(Choi 2011).

CO<sub>2</sub>의 발생은 자연스러운 연소생성물에 해당하며, CO의 생성은 목재 표면 탄화층에 의해 산소의 접촉이 제한되기 때문에 발생한다고 보여진다. 분석된 5수종의 CO/CO<sub>2</sub>는 티크가 최소치로 0.024이고 최대값은 라디에타파인으로 0.032이었다. 중량감소율은 티크가 86%로 최소값을 보였으며 라디에타파인이 97%로서 목재연소의 거동이 CO가스의 배출과 높은 상관성을 보여 주었다.

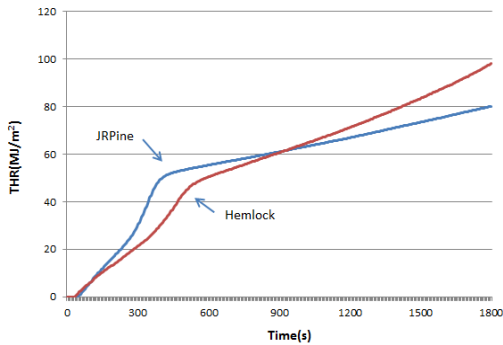


Fig. 9. Total Heat release of Japanese red pine and Hemlock.

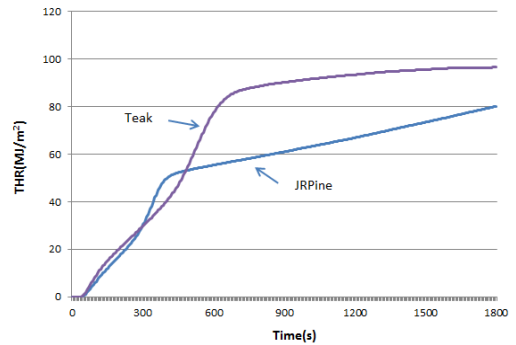


Fig. 11. Total Heat release of Japanese red pine and Teak.

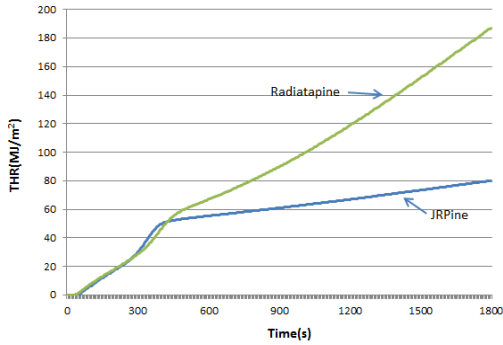


Fig. 10. Total Heat release of Japanese red pine and Radiatapine.

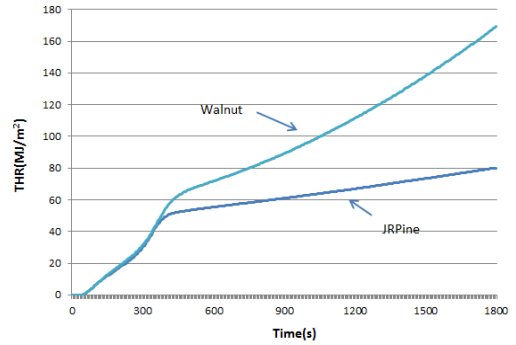


Fig. 12. Total Heat release of Japanese red pine and Walnut.

#### 4. 결 론

실내사용 목재 5수종에 대하여 목재 화재안전에 대한 기초자료제공을 목적으로 열특성을 열중량 분석(TGA)과 콘칼로리미터(KS F ISO 5660-1) 분석을 통하여 조사하였다.

- 1) TGA 분석에서 피크 최고치는 햄록 355℃, 월넛 357℃, 티크 358℃, 라디에타파인 369℃, 소나무 371℃이었다. 이때 잔사율은 햄록 42%, 월넛 45%, 티크 50%, 라디에타파인 38%, 소나무 37%였다.
- 2) 열방출률 시험에서는 열방출률 최대값은 월넛으로 264.2 kW/m<sup>2</sup>으로 나타났으며, 최소값은

햄록으로 148.9 kW/m<sup>2</sup>으로 나타났다.

- 3) 총열방출열량 분석에서는 총방출열량은 소나무가 가장 낮은 79.9 MJ/m<sup>2</sup>을 나타냈으며 라디에타파인이 가장 높아 189.5 MJ/m<sup>2</sup>으로 나타났다.
- 4) 분석된 5수종의 CO/CO<sub>2</sub>는 티크가 최소치로 0.024이고 최대값은 라디에타파인으로 0.032이었다. 중량감소율은 티크가 86%로 최소값을 보였으며 라디에타파인이 97%로서 목재연소의 거동이 CO가스의 배출과 높은 상관을 보여 주었다.

## REFERENCES

- Boonmee, N., Quintiere, J.G. 2002. Glowing the ignition and burning rate of wood. In: Twenty-ninth Symposium (international) on combustion, The Combustion Institute 29. pp: 289-296.
- Cheong, Y.J. 2010. Combustion Properties of the *Quercus variabilis* and *Zelkova serrata* Dried at Room Temperature (II). Applied Chemistry for Engineering 21(4): 469-474.
- Choi, J.M. 2011. A Study on Combustion Characteristics of Fire Retardant Treated *Pinus Desiflora* and *Pinus Koraiensis*. Journal of The Korean Wood Science and Technology 39(3): 244-251.
- KS F ISO 5660-1. Reaction to fire test - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (Cone calorimeter method).
- Park, H.J., Kang, Y.G., Kim, H. 2005. Study on Combustion Characteristics of Fire Retardant Treated Wood. Journal of The Korean Wood Science and Technology 33(4): 38-44.
- Pearce, F.M., Khanna, Y.P., Raucher, D. 1981. Thermal Characterization of Polymeric Materials. Chap. 8, Academic Press, New York, U.S.A.
- Quintire, J.G. 1998. Principles of Fire Behavior. Chap. 5. Cengage Learning, Delmar, USA.
- Shin, B.W., Song, Y.H., Rie, D.H., Chung, K.S. 2010. A study on Combustion Characteristics of Wood-Plastic Composites. Korean Institute of Fire Science & Engineering 24(6): 7-12.
- Spearpoint, M.J. 1999. Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an intergral model. 30, NIST GCR 99-775, U.S.A.
- Stevens, M.G., Voruganti, V., Rose, R. 1995. "Correlation of Small Scale Fire Tests to ASTM E 84 Tunnel Performance for Thermoset Resin System", Proc. Fire and Material, International Conference, Interscience Communication Ltd, London. Vol 4.
- Yang, H., Yan, R., Chem, H.D., Lee, H., Zheng, C. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 86: 1781-1788.