

자연 건조된 굴참나무와 느티나무의 연소특성

정영진 · 권인규*
강원대학교 소방방재공학과

Combustion Characteristics of the *Quercus variabilis* and *Zelkova Serrata* Dried at Room Temperature

Yeong-Jin Chung and In-Kyu Kwon*

Department of Fire and Disaster Prevention, Kangwon National University, Kangwo-do 245-711, Korea

요 약: 건자재로서 나무 결함중의 하나는 그의 가연성이다. 본 연구의 목적은 자연 건조된 굴참나무와 느티나무의 연소성질을 시험하는 것과 건자재로서의 사용에 대한 바람직한 특성을 알아내는 것이다. 열방출율과 CO 발생과 연기차폐와 같은 연기지수를 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 측정하였다. 50 kW/m²의 열속하에서 굴참나무의 평균 열방출율, HRR_{mean}(77.94 kW/m²)은 느티나무의 HRR_{mean}(13.06 kW/m²)과 비교하여 높게 나타내었다. 그리고 굴참나무의 평균 비소화면적, SEA_{mean} 41.11 m²/kg은 느티나무의 평균 비소화면적 SEA_{mean} 9.23 m²/kg에 비하여 높게 나타났다. 이들 결과는 시험목의 밀도에 의존함을 보여준다. 그리고 굴참나무는 느티나무에 비하여 높은 CO 발생속도를 나타내었다. 또한 느티나무가 굴참나무에 비해 숯생성으로 인해 난연성이 증대되었음을 보여주었다.

Abstract: One of the restriction of wood as building material is its combustibility. The purpose of this paper is to examine the combustion properties of the quercus variabilis and zelkova serrata which are dried at room temperature and meet the desirable characteristics for use of construction materials. The cone calorimeter (ISO 5660-1) was used to determine the heat release rate (HRR) and fire smoke index, as well as CO production and smoke obscuration. The HRR_{mean} 77.94 kW/m² of the quercus variabilis at 50 kW/m² was high in comparison with HRR_{mean} 13.06 kW/m² for the zelkova serrata. Furthermore, the quercus variabilis has high specific extinction area (SEA_{mean}), 41.11 m²/kg compared with SEA_{mean} 9.23 m²/kg of zelkova serrata. These results are depend on the density of tested wood species. In addition, the quercus variabilis has high CO production rate compared with that of zelkova serrata. Also, zelkova serrata showed an increase of retardant properties attributed to char formation compared with that of quercus variabilis.

Key words : heat release rate, combustion properties, fire smoke index, wood

서 론

목재는 오랜 역사를 통해 일상 생활에서 건자재, 가구재 등 친환경적 소재로 많이 사용되어 왔다. 그러나 목재의 단점 중의 하나는 그의 가연성이다.

건조한 나무의 기본 조성은 탄소 50%, 수소 6%, 산소 44%로 구성되고 그 외에 적은 양의 질소와 무기 화합물로 구성되어 있다(Atkins, 1984). 일반적으로 나무의 주요 성분은 셀룰로오스 43%, 헤미셀룰로오스 28-35%, 리그닌 22-29% 등의 비율로 이루어진다(Shafizadeh and DeGroot, 1976).

나무의 열분해와 내화에 대하여, 나무의 조성은 흡수된 물과 휘발성 오일의 손실을 제외하고 약 100°C에 이를 때까지 온도에 의해 영향을 받지 않는다. 약 175°C로 온도 증가에 따라 일부 나무의 성분은 분해하기 시작한다. 100-200°C 사이에서, CO₂, 무기화합물, 수증기와 같은 비연소성 생성물이 생성된다. 200°C 이상에서 셀룰로오스는 분해되고 타르와 가연성 휘발성물질이 생성된다(Browne, 1963; Beall and Eickner, 1970; Drysdale, 1996): 셀룰로오스 240-350°C, 헤미셀룰로오스 200-260°C, 리그닌 280-500°C에서 분해된다. 목재가 450°C 이상으로 가열되면 모든 휘발성 물질은 증발되어 사라지고, 15-20% 정도의 숯(char)을 남기는데 이는 리그닌 함유량이 많기 때문이다. 숯은 산소가 연소대에 쉽게 접근하는 것을 허용하지 않기

*Corresponding author
E-mail: kwonik@kangwon.ac.kr

때문에 고분자물질의 연소 속도를 감소시킨다(Pearce *et al.*, 1981). 또한 목재의 탄화속도는 목재의 열분해와 열발생의 상호작용에 영향을 받으며, 이들은 목재의 종류, 밀도, 습기함량, 열 침투성, 열적특성과 같은 많은 변수들의 함수이다(Spearpoint, 1999; Yang, 2003).

나무의 또 다른 중요한 성질은 연소하는 동안에 발생하는 열방출율(heat release rate)이다. 열방출율은 화재시에 대상 물질의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다. 그들의 잠재적인 에너지를 비교적 빨리 방출하는 재료들은 그것을 더욱 느리게 방출하는 것들보다 더 위험하다. 열방출율을 측정하기 위하여 많은 기술들이 발전되어 왔는데 그 중의 하나가 콘칼로리미터(cone calorimeter)이다(Babrauskas, 1986). 콘칼로리미터에 의한 열방출율 측정은 대부분의 유기재료가 연소중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소소비 원리를 바탕으로 하고 있다(Hirschler, 2001).

선행된 연구를 고찰해 보면 나무의 열분해 및 연소의 거동에 대하여 착화는 중간 열속에서 백열로부터 불꽃연소로 진행하며, 증대된 열속에 의해 직접 불꽃연소로 일어난다(Bilbao, 2001). 이 연구는 발연 착화에 대하여 최소 열속에 대한 정보를 제공한다. 상록교목(spruce)에 대하여 50 kW/m²의 열속(heat flux)하에서 탄화속도를 측정할 바도 있다(Mikkola, 1991). 또 연소속도 Data를 이용한 수학적 적분모델과 시간온도 곡선을 이용하여 탄화율과 탄화길이를 측정하였다(Quintiere, 1992; Spearpoint and Quintiere, 2001).

화재발생시 목질재료의 안전성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출율(Chung, 2007), 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다(Hirschler, 1990). 특히 화재에 의한 연기관련 지수는 화재의 전파 및 연소가스의 유해성에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 연기지수 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로 인식되고 있다.

저자는 리기다 소나무와 밤나무종의 열방출율과 연기 발생 관련 지수를 측정하여 그의 연소 특성을 보고한 바 있다(Chung, 2009).

본 연구의 목적은 콘칼로리미터를 이용하여 참나무와 느티나무의 열방출율 및 연기발생 관련 지수를 측정하여 이들의 연소특성을 비교 하였다.

재료 및 실험방법

1. 시험목 준비 및 실험

시험목은 활엽수인 굴참나무와 느티나무로서 경기도 용인소재 지역 농가에서 직접 얻었다. 굴참나무는 2년, 느티나무는 3년 동안 자연건조 시켰다. 화재시험은 ISO 5660-1의 방법에 의해 열속(heat flux) 50 kW/m² 조건에서 수행

Table 1. Properties of wood species used in tests.

Samples	Class	Height (m)	Age (years)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)
Quercus variabilis	Hardwood	11.5	24	976	12.14
Zelkova serrata	Hardwood	12.5	26	655	16.34

하였다. 연소특성을 측정하기 위해 사용한 시료의 크기는 100 mm×100 mm×10 mm(±2 mm)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 습도 50%, 온도 23°C 조건을 유지하였다. 시험편은 단열체인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더로의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 연소특성은 ISO 5660-1 시험방법으로 수행하였으며 시편의 체적 밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다.

콘칼로리미터(ISO 5660-1, 2002)는 다음 주 성질을 결정하는데 사용되어졌다: 열방출율(HRR), CO 발생량과 연기차폐와 같은 화재연기 지수(EN 13823, 2002; Chung, 2007).

설정된 복사열에 노출된 시편이 착화되어 연소될 때의 열방출율은 연소 생성물 흐름속의 산소 농도와 유속으로부터 유도된 산소 소비량을 측정하여 평가하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30분 경과후에 종료하였으며, 추가로 2분간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 모든 연소시험은 그들의 재현성을 보증하기 위하여 3번씩 수행하였다.

본 연구에서 선정된 시료는 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m² 복사열에 수분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열방출율 및 연소 파라미터를 구하였다.

2. 함수율 측정

함수율은 일정량의 시험목을 105°C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시험목의 중량을 4시간 간격으로 더 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식을 이용하여 계산하였다(Simpso, 1987).

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

W_m : 함수율을 구하고자하는 목재편의 중량
W_d : 건조시킨 후의 절대건조 중량

결과 및 고찰

1. 열방출율

물질의 성질은 그것이 연소할 때 열이 물질로부터 방출되어지는 속도, 연기생성, 가스 독성을 결정한다. 시험

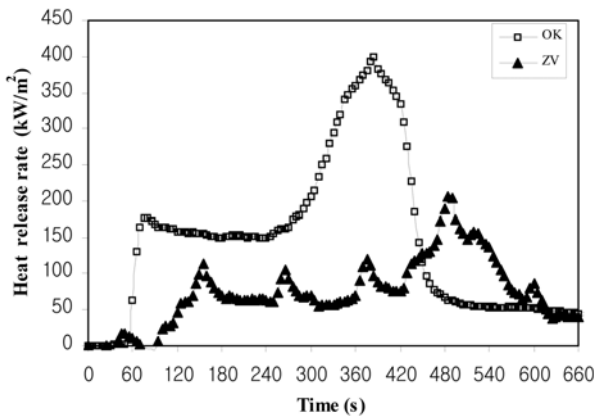


Figure 1. HRR curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux. OK: *Quercus variabilis*, ZV: *Zelkova serrata*

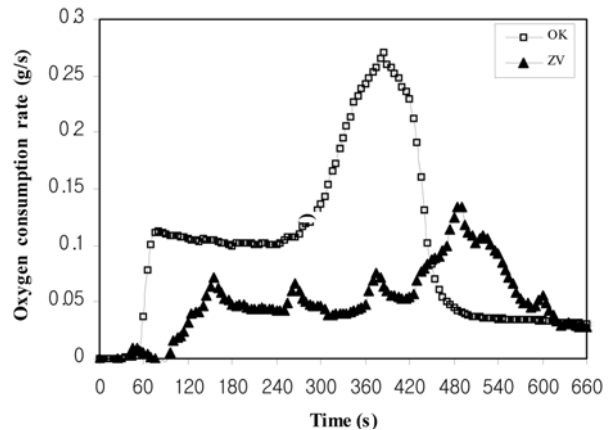


Figure 2. OCR curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

하는 동안에 결정되는 주 연소특성은 열방출율(heat release rate, HRR)이다. 그것은 연소모델링을 위하여 중요한 측정이다(Babrauskas, 1984; Babrauskas and Grayson, 1992). 물질에 관련된 연소의 이해를 돕는 다른 중요한 성질은 착화시간(time to ignition, TTI)과 질량손실율(mass loss rate, MLR)이다.

시험편의 시간에 따른 열방출율 커브를 Figure 1에 나타내었으며, 그의 커브는 굴참나무와 느티나무가 상이한 경향성을 보여준다.

외부 열원 50 kW/m² 에서 시험된 수종의 HRR_{mean}는 굴참나무(77.94 kW/m²)가 밤나무(13.06 kW/m²)와 비교하여 매우 강한 거동을 나타내었다(Table 2). 이것은 Table 1에 나타난 바와 같이 굴참나무의 밀도(976 kg/m³)가 느티나무의 밀도(655 kg/m³)에 비하여 큰 결과로 설명된다(Tran and Wite, 1992).

그러나 굴참나무와 느티나무는 최고 열방출율(HRR_{peak})에 도달된 시간이 각각 370 s, 487 s로 나타났다. 이것은 느티나무가 강한 난연성을 가지므로 연소지연 효과를 나타내는 것으로 설명된다. 또 느티나무의 수분함량(16.34%)도 굴참나무(12.14%)에 비하여 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Dehaan, 2002; Spearpoint, 1999; Yang, 2003).

각각의 시험편에 대하여 열적 파동의 첫 번째 봉우리는 연소표면 근처에서 숯이 형성되기 전에 발생한다. 중간부분은 처음 숯층이 형성된 후 두께를 통하여 숯의 단열효과(Pearce *et al.*, 1981)로 시료가 점차적으로 연소하기 때

문에 감소되는 경향이 관찰되었다. 두 번째 봉우리는 열적 파동이 뒷면 절연층에 도달할 때 일어나고(Spearpoint and Quintiere, 2000) 휘발성 성분이 증가됨으로써 높은 열분해 효과가 열적 파동을 만드는 것으로 판단된다. 특히, 느티나무의 경우, 세 번째, 네 번째, 다섯 번째 등 여러 번의 봉우리가 발생하는 것은 위와 같은 과정이 여러 번 반복되는 것으로 판단된다. 휘발성 성분에 대하여 침엽수로부터는 주로 테르펜류가 방출되나 활엽수에서는 아세트산이 주로 방출된다(Risholm-Sundman *et al.*, 1998). 활엽수의 열적 분해시 또 다른 보고(Carlson *et al.*, 1995)에 의하면 아세트산, 포름산, 메탄올, 플루탈 등이 방출된다고 하였다.

Figure 1에서 보여준 높은 열분해 효과를 만들기 위해서는 열적 파동의 봉우리가 발생될 때 마다 Figure 2에 나타난 바와 같이 같은 시간대에 산소소비 속도(oxygen consumption rate, OCR)가 증대되는 것을 보여준다.

또한 열방출 속도의 감소는 열분해에 의한 질량 감소에 의하며 가연성 기체의 농도 감소에 의한 것으로 판단된다. 곡선의 마지막 부분은 휘발성 성분이 소모된 후이며 비불꽃 연소에 기인하는 백열이다. 열방출 속도가 높은 불꽃 연소는 화재의 영역(phase)을 성장시키고 발전시키므로 중요하며 이것은 화재의 세기를 좌우한다. 반면 백열은 대부분의 화재의 마지막 영역에 대응되므로 내화성의 주체로 중요시 된다.

연소 중 각 수종의 잔여물들이 완전히 다르나, 시험편

Table 2. Combustion properties of wood species used in tests.

Samples	^a TTI (s)	^b MLR _{mean} (g/s)	MLR _{peak} (g/s)	^c HRR _{mean} (kW/m ²)	HRR _{peak} (kW/m ²)	^d TSR _{whole} (m ² /m ²)	^e SEA _{mean} (m ² /kg)	CO _{mean} (kg/kg)
<i>Quercus variabilis</i>	51	0.0465	0.341	77.94	432.07	394.15	41.11	0.0829
<i>Zelkova serrata</i>	29	0.0345	0.172	13.06	208.62	72.35	9.23	0.0818

^aTime to ignition; ^bMass loss rate; ^cHeat release rate; ^dTotal smoke release; ^eSpecific extinction area

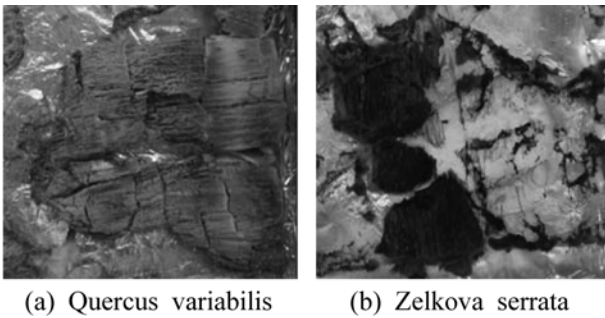


Figure 3. The residues of wood after combustion.

에 대한 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30분 경과 후(ISO 5660-1의 표준) 시험 종료후의 잔여물은 거의 완전 연소하여 갈참나무는 회백색의 재료, 느티나무는 진한 갈색으로 관찰되었다(Figure 3).

연소의 착화시간(TTI)은 각 수종에 대하여 Table 2에 나타내었다. TTI는 굴참나무가 51 s로 느티나무(29 s)에 비하여 늦어진다. 이것은 전술한 각 수종의 열방출을 성질에 대하여 설명한 바와 같이 각 수종의 밀도 차이에 의한 것으로 판단된다.

질량손실율(MLR)은 화재거동에 대하여 추가적인 정보를 준다(Delichatsios *et al.*, 2002). Figure 4에서 보여준 50 kW/m² 에서 굴참나무의 평균 MLR_{mean}은 0.0465 g/s, 느티나무는 0.0345 g/s였다. 연소하는 동안 초기의 질량손실율에 대해서는 특별한 차이가 없으나 최고 MLR_{peak}은 굴참나무(0.341 g/s), 느티나무(0.172 g/s)의 질량손실속도의 차별화가 있었으며 시간이 지남에 따라 450 s에 이르러 굴참나무는 질량손실 속도가 급격히 소멸되나 느티나무는 끝까지 유지되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 느티나무의 숯생성에 의한 연소억제 효과로 설명될 수 있다(Pearce *et al.*, 1981).

2. 연기와 탄소 산화물 방출

물질에 관련된 연소의 이해를 돕는 또 다른 중요한 파

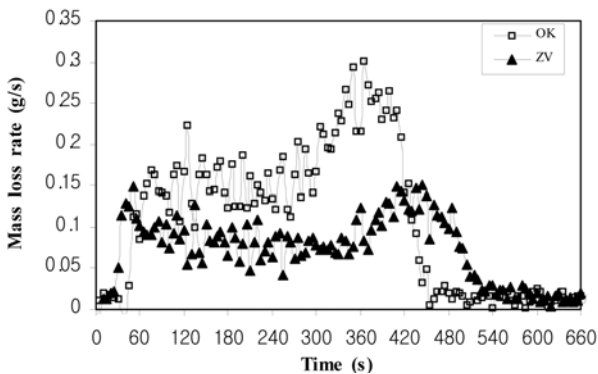


Figure 4. MLR curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

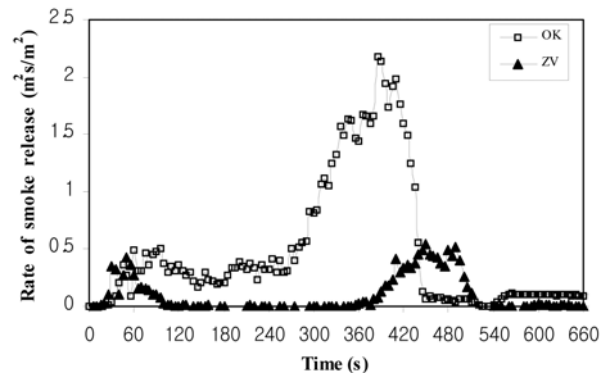


Figure 5. RSR curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

라미터는 연기와 CO가스의 방출이다. 일반적으로 나무의 연소가스 생성물의 독성은 CO₂를 동반하는 CO의 방출에 의하여 결정되어진다. 그 결과는 Table 2에 주어진다.

총연기방출율(total smoke release, TSR_{whole})은 굴참나무와 느티나무가 각각 140.20 m²/m², 85.75 m²/m²였다(Table 2). 이들 값의 차이는 시험 수종의 밀도 차이로 설명될 수 있다. 즉, 굴참나무는 느티나무에 비하여 밀도가 크므로 인하여 총연기방출율이 높은 것으로 이해된다. 이것은 Figure 5에서 보여준 시간에 따른 연기방출율(rate of smoke release, RSR, m²/s/m²)의 경향이 그와 유사함을 보여준다. 일반적으로 연기 차폐는 비소화면적(specific extinction area, SEA_{meann})으로 설명되어진다. 비소화면적은 연기발생속도(smoke production rate, SPR)를 질량감소속도로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다. 굴참나무의 비소화면적(41.11 m²/kg)은 느티나무(9.23 m²/kg)보다 현저히 높게 나타났다(Table 2). 그 것은 굴참나무가 대부분의 연소단계에서 비교적 빠른 속도의 연소와 더불어 큰 밀도 차이로 판단된다. 또한 느티나무의 비소화면적이 굴참나무 보다 상대적으로 적은 것은 느티나무가 난연효과의 존재와 더불어 저발연성 수종임을 알 수 있었다.

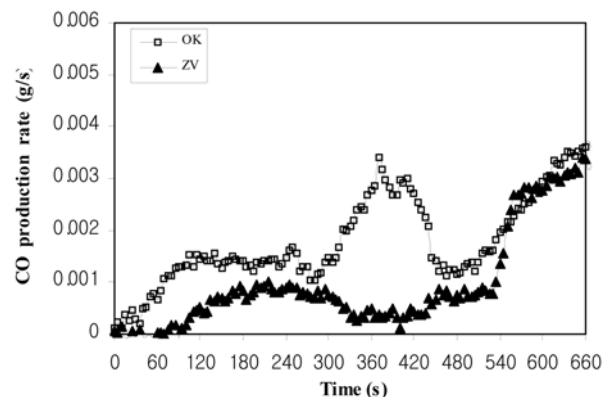


Figure 6. CO production rate curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

CO의 수율은 물질 연소에 의존한다(Hull and Paul Keith, 2007). 굴참나무로부터 CO 발생량(0.0829 kg/kg)은 느티나무의 그것(0.0818 kg/kg)과 특별한 변화가 없는 것으로 측정되었다. 그러나 Figure 6은 콘칼로리미터에서 시간에 따른 CO 발생속도는 차별성을 나타내었다. 즉, 굴참나무에 의해 방출된 CO의 발생속도는 느티나무의 그것보다 대체적으로 높게 나타났다. 이것은 전술한 굴참나무의 빠른 질량손실 속도 및 큰 체적밀도에 기인한 것으로 판단된다.

결론

자연 건조된 굴참나무와 느티나무 종의 열방출율과 연기 발생 관련 지수를 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 측정하였다.

1. 굴참나무의 HRR_{mean} (77.94 kW/m²)는 느티나무(13.06 kW/m²)와 비교하여 높은 열방출율을 나타내었다. 이것은 느티나무의 밀도(655 kg/m³)에 비하여 굴참나무의 밀도(976 kg/m³)가 큰 결과로 설명된다. 또한 같은 이유로 굴참나무의 TTI(51 S)는 느티나무의 TTI(29 s)에 비하여 오랜 시간 동안의 TTI가 소요되었다.

2. CO_{mean} 수율은 굴참나무, 0.0829 kg/kg과 느티나무, 0.0818 kg/kg으로 특별한 차이는 없으나, 시간에 따른 CO 발생속도는 굴참나무가 느티나무보다 대체적으로 높았다. 이것은 굴참나무의 빠른 질량손실 속도 및 그의 체적밀도 때문으로 판단된다.

3. SEA_{mean}는 굴참나무(41.11 m²/kg)가 느티나무(9.23 m²/kg)에 비하여 높게 측정되었다. 또 유사한 의미를 갖는 TSR은 굴참나무(394.15 m²/m²), 느티나무(72.35 m²/m²)이다. 그 것은 느티나무가 굴참나무에 비하여 낮은 밀도 및 연소공정 중에 굴참나무에 비하여 많은 양의 숯을 생성하여 연소를 억제하는 저발연성 수준으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 강원대학교 교원연구역량 강화를 위한 연구비지원으로 수행되었습니다.

인용문헌

- Atkins, W.S. 1984, Wood Utilisation Systems-Combustion Strategies, Energy Technolodge Support unit, Department of Energy. U.K.
- Babrauskas, V. 1984. Development of cone calorimeter-A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption, Fire and Materials 8(2): 81-95. doi: 1002/fam.810080206
- Babrauskas, V. 1986. New Technology to reduce Fire Losses and Costs, In : Grayson, S.J. and Smith, D.A., eds., Elsevier Applied Science Publisher, London.
- Babrauskas, V. 2001. Ignition of wood, pp. 71-88. In : A Review of the State of the Art. Interflam 2001, Interscience Communications Ltd., London, UK.
- Babrauskas, V. and Grayson, S.J. 1992. Heat release in Fires, pp. 644, E & FN Spon (Chapman and Hall), London, UK.
- Beall, F.C. and Eickner, H.W. 1970, Research Paper FPL 130, USDA Forest Service Forest Products Laboratory, Madison, Wis.
- Bilbao, R. 2001, Experimental and theoretical study of the ignition and smoldering of wood including convective effects. Combustion Flame 126: 1363-1372.
- Boonmee, N. and Quintiere, J.G. 2002. Glowing the ignition and burning rate of wood. pp. 289-296. In : Twentieth Symposium (international) on combustion, The Combustion Institute, 29.
- Boonmee, N. and Quintiere, J.G. 2004. Glowing ignition of wood: the onset of surface combustion. pp. 2303-2310. In : Thirtieth Symposium (international) on Combustion, The Combustion Institute. 30.
- Browne, F.L. 1963. USDA Forest Service Forest Products Laboratory Report 2136, USDA Forest Service Forest Products Laboratory, Madison, Wis., 1958; reviewed and reformed.
- Carle, J.B. and Brown J.L. 1976. Wood as a source of solid fuel. In : Watt, G.S. ed. a review, New Zealand Forest Service, Auckland. NZ.
- Carlson, F.E., Phillips, E.K., Tenhaeff, S.C., and Detlefsen, W.D. 1995. A study of formaldehyde and other organic emissions from pressing of laboratory oriented strandboard. Forest Prod. J. 45(3): 71-77.
- Chirico, A.D., Armanini, M., Chini, P., Cioccolo, G., Provasoli, F., and Audiso, G. 2002. Flame retardants for polypropylene based on lignin. Polymer Degradation and Stability 79: 139-145.
- Chung, Y.J. 2007a. Combustion Characteristics of Veneers Treated by ammonium Salts. Journal of the Korean Industrial & Engineering Chemistry 18(2): 194-198.
- Chung, Y.J. 2007b. Flame retardancy of veneers treated by ammonium salts. Journal of the Korean Industrial & Engineering Chemistry 18(3): 251-254.
- Chung, Y.J. 2009. Combustion Characteristics of the Pinus Rigida and Castanea Savita Using Cone Calorimeter. Journal of Korean Forest Society 98(3): 319-323.
- Delichatsios, M., Paroz, B. and Bhargava, A. 2003. Flammability properties for charring materials. Fire Safety Journal 38: 219-228.
- Drysdale, D. 1996. An introduction to fire dynamics, John Wiley & Sons, U.S.A.
- EN 13823, 2002. Reaction to Fire Tests for Building

- Products. Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item.
20. Glasius, M., Ketzel, M., Wahlin, P., Jensen, B., Monster, J., Berkowicz, R. and Palmgren F. 2006. Impact of wood combustion on particle levels in a residential area in Denmark. *Atmospheric Environment* 40(37): 7115-7124. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.06.047
 21. Hirschler, M.M. 1990. Fire Hazard and Toxic Potency of 0.1 the Smoke from Burning Materials. *Advances in Combustion Toxicology* 2: 229-230.
 22. Hirschler, M. 2001. Thermal decomposition and chemical composition, pp. 239-300. In: American Chemical Society Symposium Series 797.
 23. Hull, R.T. and Paul Keith, T. 2007. Bench-scale assessment of combustion toxicity-a critical analysis of current protocols, *Fire Safety Journal* 42(5): 340-365. doi: 10.1016/j.firesaf.2006.12.006
 24. ISO 5660-1, 2002. Reaction-to-Fire Tests ñ Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate ñ Part1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method).
 25. Kubler, H. 1980. Wood as building and hobby material, pp.139-149J. John Wiley & Sons, Inc., U.S.A.
 26. Risholm-Sundman, M., Lundgren, M., Vestin, E. and Herder, P. 1998. Emissions of acetic acid and other volatile organic compounds from different species of solid wood. *Holz als Rohund Werkstoff* 56(2): 125-129.
 27. Simps, W.T. 1987. Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes, Chap.12. pp.1-21, In: *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, U.S.A.
 28. Spearpoint, M.J. 1999. Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an integral model, pp.30-46. NIST GCR 99-775, U.S.A.
 29. Mikkola, E. 1991. Charring of Wood Based Materials, pp. 547-556, In: *Fire Safety Science, Proceedings of the Third International Symposium*, Elsevir Applied Science, London.
 30. Pearce, F.M., Khanna, Y.P. and Raucher, D. 1981. Thermal analysis in polymer flammability, Chap. 8. In: *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Academic Press, New York, U.S.A.
 31. Quintiere, J.G. 1992. A Semi-quantitative Model for the Burning Rate of Solid Materials, NISTIR 4840, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
 32. Shafizadeh, F. and DeGroot, W. F. 1976. Combustion characteristics of cellulosic fuels. In: Shafizadeh F., Sarkenen K.V. and Tillman D.A. eds. *Thermal Uses and Properties of Carbohydrates and Lignins*, Academic Press, New York, U.S.A.
 33. Spearpoint, M.J. and Quintiere, G.J. 2000. Predicting the burning of wood using an integral model, *Combustion and Flame*, 123: 308-324.
 34. Tissari, J., Hytonen, K. Lyyranen, J. and Jokinenmi J. 2007. A nodal field measurement method for determining fire particle and gas emissions from residential wood combustion. *Atmospheric Environment* 41(37): 8330-8344.
 35. Tran, H.C. and White R.H. 1992. Burning rate of solid wood measured in a heat release calorimeter. *Fire and Materials* 16: 197-206.
 36. Yang, L., Chen, X., Zhou, X. and Fan, W. 2003. The pyrolysis and ignition of charring materials under an external heat flux. *Combustion and Flame* 133: 407-413.