

자연 건조된 굴참나무와 느티나무 목재의 연소성(II)

정영진[†] · 진 의*

강원대학교 소방방재공학과, *강원대학교 소방방재연구센터
(2010년 6월 22일 접수, 2010년 7월 9일 채택)

Combustion Properties of the *Quercus variabilis* and *Zelkova serrata* Dried at Room Temperature (II)

Yeong-Jin Chung[†] and Eui Jin*

Department of Fire and Disaster Prevention, Kangwon National University, Kangwo-do 245-711, Korea
*Fire & Disaster Prevention Research Center, Kangwon National University, Kangwo-do 245-711, Korea
(Received June 22, 2010; Accepted July 9, 2010)

목재는 연소성이 높은 본질적인 결함을 가지고 있다. 본 연구의 목적은 자연 건조된 굴참나무와 느티나무의 연소성질을 시험하였다. 열방출율과 CO/CO₂ 발생과 연기차폐와 같은 연기지수를 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 측정하였다. 50 kW/m²의 외부 열유속하에서 굴참나무의 총 방출열량, THR (140.2 MJ/m²)은 느티나무의 THR (85.7 MJ/m²)과 비교하여 높게 나타났다. 그리고 굴참나무의 총 연기발생량, TSP 3.50 m²는 느티나무의 TSP 0.65 m²에 비하여 높게 나타났다. 이들 결과는 시험목의 체적밀도에 의존함을 보여준다. CO/CO₂ 발생비는 굴참나무와 느티나무가 각각 0.053, 0.043을 나타내었다. 또한 느티나무가 굴참나무에 비해 숯생성으로 인한 증대된 연소 억제성을 보여주었다.

Wood has an essential drawback such as high combustion ability. The purpose of this paper is to examine the combustion properties of the *quercus variabilis* and *zelkova serrata* dried at room temperature. The cone calorimeter (ISO 5660-1) was used to determine the heat release rate (HRR) and fire smoke index, as well as CO/CO₂ production and smoke obscuration. The total heat release (THR), 140.2 MJ/m² of the *quercus variabilis* under an external 50 kW/m² was high in comparison with THR 85.7 MJ/m² for the *zelkova serrata*. Furthermore, the *quercus variabilis* has high total smoke production (TSP), 3.50 m² compared with TSP 0.65 m² of *zelkova serrata*. These results depend on the bulk density of tested wood species. In addition, the CO/CO₂ production ratio of *zelkova serrata* and *quercus variabilis* was measured as 0.053, 0.043, respectively. Also, *zelkova serrata* showed an increase of fire-resistance attributed to char formation compared with that of *quercus variabilis*.

Keywords: combustion, cone calorimeter, *Quercus variabilis*, *Zelkova serrata*

1. 서 론

목재는 외부 열원에 의해 분해하며 가연성 기체를 발생시킨다. 이들은 공기와 혼합하여 연소성 혼합물을 만들고 목재 표면에 열유속(heat flux)이 높아질 때 착화는 비교적 빠르게 일어난다. 불꽃착화는 가열표면으로부터 떨어진 기체상에서 우선적으로 일어난다. 그러나 열유속이 낮을 때, 표면의 숯 형성은 불꽃착화가 일어나기 전에 증대된다[1].

화재발생시 목질재료의 안전성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출율, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다[2]. 특히 화재에 의한 연기관련 지수는 화재의 전파 및 연소가스의 유해성에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 연기지수 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로 인식되고 있다.

일반적으로 목재의 주요 성분은 셀룰로오스 43%, 헤미셀룰로오스 28~35%, 리그닌 22~29% 등의 비율로 이루어진다[3].

이들 주요 성분의 차이는 나무종 사이에 발열량 값을 변화시키는 원인이 된다[4]. 목재의 최대 열량값은 비록 실제 측정된 값이 숯생성과 수분함량의 변화 때문에 다소 낮아질지라도 약 17 MJ/kg 정도이다 [5-7]. 목재에 있어서 수분함량은 그의 에너지 발생에 있어서 중요한 인자이고, 수분 함량이 높은 목재는 쉽게 연소하지 않는다[8]. 또한 목재의 밀도는 여러 수종과 수분함량에 따라 변화하기 때문에 목재의 밀도를 모를 때에 제공되는 것은 중요하다[9].

목재는 450 °C 이상으로 가열되면 모든 휘발성 물질은 증발되어 사라지고, 리그닌 함유량에 의하여 15~20% 정도의 숯(char)을 남긴다. 숯은 산소가 연소대에 쉽게 접근하는 것을 허용하지 않기 때문에 고분자물질의 연소 속도를 감소시킨다[10]. 또한 목재의 탄화속도는 목재의 열분해와 열발생의 상호작용에 영향을 받으며, 이들은 목재의 종류, 밀도, 습기함량, 열 침투성, 열적특성과 같은 많은 변수들의 합

† 교신저자(e-mail: yjchung@kangwon.ac.kr)

수이다[5].

목재의 또 다른 중요한 성질은 연소하는 동안에 발생하는 열방출율(heat release rate, HRR)이다. 열방출율은 화재시에 대상 물질의 잠재 위험성을 나타내기 때문에 중요하다. 열방출율을 측정하기 위하여 많은 기술들이 발전되어 왔는데 그 중의 하나가 콘칼로리미터(cone calorimeter)이다[11]. 콘칼로리미터에 의한 열방출율 측정은 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1 kg이 소비되면 약 13.1 MJ의 열이 방출되는 산소소비 원리를 바탕으로 하고 있다[12].

Boonne와 Quintiere는 콘칼로리미터를 이용하여 목재가 복사열유속에 노출될 때 목재의 백열과 불꽃착화를 연구했다. 즉, 40 kW/m² 미만의 열유속(heat flux)하에서 백열을 관찰하였고, 40 kW/m² 초과 열유속하에서 불꽃연소를 관찰하였다. 그리고 10 kW/m² 열유속하의 노출로부터 2 h의 이내의 시간에서 백열착화의 발생을 보고하였다 [1,13]. Mikkola는 상록교목(spruce)에 대하여 50 kW/m²의 열유속하에서 탄화속도를 측정하였다[14]. Quintiere와 Spearpoint는 연소속도 Data를 이용한 수학적 적분모델과 시간온도 곡선을 이용하여 탄화율과 탄화길이를 측정하였다[15,16]. 이 연구는 발연 착화에 대하여 최소 열유속에 대한 정보를 제공한다. 박형주 등은 cone heater를 이용하여 각기 다른 일정한 복사열원에 노출된 목재의 탄화속도 측정하고, 노출된 목재의 탄화는 시간의 선형함수로 간주될 수 있다고 보고하였다[17].

저자는 리기다 소나무와 밤나무종의 열방출율과 연기발생 관련 지수를 측정하여 그의 연소 특성을 보고한 바 있다[18].

본 연구에서는 화재위험성 평가 및 소방설계를 위한 내외장용 건축재의 연소특성에 대한 기초자료를 제공하고자, 대기 중의 산소농도 조건에서 콘칼로리미터를 이용하여 자연 건조된 굴참나무와 느티나무 목재의 열방출율 및 연기발생 관련 지수가 고찰되었다.

2. 실험

2.1. 시험목 준비 및 실험

시험목은 리기다 소나무로서 경기도 용인소재 지역 농가에서 직접 얻었다. 이들 시험목은 베어 놓은 후 3.5 yr 동안 자연건조 시켰다. 화재시험은 ISO 5660-1의 방법에 의해 열유속 50 kW/m² 조건에서 수행하였다[19]. 연소특성을 측정하기 위해 사용한 시료의 크기는 100 mm × 100 mm × 10 mm (φ 2 mm)의 규격으로 제작하였으며, 시험조건은 습도 50%, 온도 23 °C 조건을 유지하였다. 시험편은 단열제인 저밀도 유리섬유를 이용하여 높이를 조절하였으며, 시편 홀더의 열손실을 감소시키기 위하여 전도도가 낮은 고밀도 세라믹판 재료로 절연시켰다. 시편홀더는 수평방향으로 위치시켰다. 연소특성은 ISO 5660-1 시험방법으로 수행하였으며 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산하였다.

콘칼로리미터는 열방출율(HRR), CO 발생량과 연기차폐와 같은 화재연기 지수 등의 성질을 결정하는 데에 사용되어졌다[20].

설정된 외부 열유속에 노출된 시편이 착화되어 연소될 때의 열방출율은 연소 생성물 흐름 속의 산소 농도와 유속으로부터 유도된 산소 소비량을 측정하여 평가하였다. 연소시험은 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2 min간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 모든 연소시험은 그들의 재현성을 보증하기 위하여 3번씩 수행하였다.

본 연구에서 선정된 시험목은 콘칼로리미터에 수평으로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50 kW/m² 외부 열유속에 수직분 동

Table 1. Properties of Wood Species Used in Tests[22]

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

Table 2. Combustion Properties of Native Wood Species

Samples	^a TTI[22] (s)	^b SMLR _{ave} (g/s · m ²)	^c HRR _{peak} [22] (kW/m ²)	^d FT (s)	^e TOC (g)	^f THR (MJ/kg)
<i>Quercus variabilis</i>	51	9.2	432.07	370	92.2	140.2
<i>Zelkova serrata</i>	29	5.4	208.62	487	58.5	85.7

Samples	^g EHC (MJ/kg)	^h TSP (m ³)	ⁱ SEA _{mean} [22] (m ² /kg)	CO _{mean} [22] (kg/kg)	CO _{2mean} (kg/kg)	CO/CO ₂
<i>Quercus variabilis</i>	14.77	3.50	41.11	0.0829	1.54	0.053
<i>Zelkova serrata</i>	13.06	0.65	9.23	0.0818	1.65	0.043

^aTime to ignition, ^bAverage Specific mass loss rate, ^cPeak heat release rate per unit area, ^dFlaming time, ^eTotal oxygen consumption, ^fTotal heat release, ^gEffective heat of combustion, ^hTotal smoke production, ⁱSpecific extinction area

안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열방출율 및 연기 관련 지수를 구하였다.

2.2. 함수율 측정

함수율은 일정량의 시험목을 105 °C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시험목의 중량을 4 h간 간격으로 더 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식을 이용하여 계산하였다[21].

$$MC (\%) = \frac{Wm - Wd}{Wd} \times 100 \tag{1}$$

Wm: 함수율을 구하고자 하는 목재편의 중량

Wd: 건조시킨 후의 절대건조 중량

굴참나무의 체적 밀도는 976 kg/m³으로 느티나무의 체적밀도 655 kg/m³보다 크게 나타났다. 굴참나무가 느티나무보다 치밀한 조직을 가지고 있음을 의미하며 수분함량은 굴참나무가 12.14%, 느티나무가 16.34%를 보유하고 있는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열방출율

물질의 성질은 그 것이 연소할 때 열이 물질로부터 방출되어지는 속도, 연기생성, 가스 독성 등을 결정한다. 시험하는 동안에 결정되는 주 연소특성은 열방출율(heat release rate, HRR)이다. 그것은 연소모 델링을 위하여 중요한 측정이다[23,24]. 또한 물질에 관련된 연소의 이해를 돕는 다른 중요한 성질은 착화시간(time to ignition, TTI)과 질량 손실율(mass loss rate, MLR)이다. 그들의 결과는 Table 2에 나타내었다.

연소의 착화시간(TTI)은 각 수종에 대하여 Table 2에 나타난 바와 같이 굴참나무가 51 s로 느티나무(29 s)에 비하여 지연되는 것으로 나타났다. 이것은 식 (2)에 의하여 나무의 착화 시간이 그의 표면 열손실

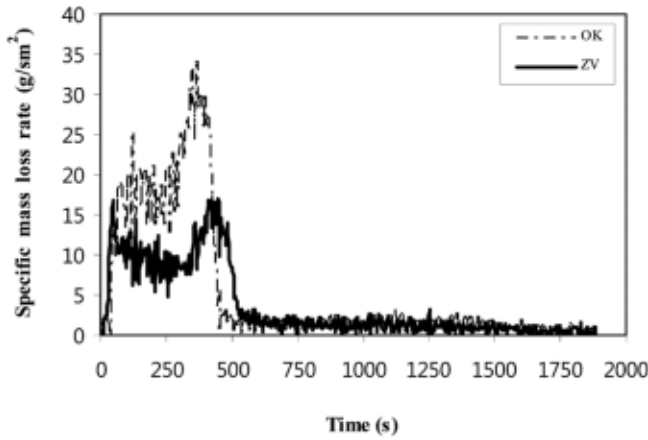


Figure 1. SMLR curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux. OK: *Quercus variabilis*, ZV: *Zelkova serrata*.

의 유무에 따른 상수, 열전도도, 체적밀도, 연료의 비열 및 착화 온도 향의 2승에 비례하며, 시험편에 가해지는 열유속의 2승에 반비례하는 것으로 설명된다[25].

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

t_{ig} (s): 착화시간, C: 상수(표면 열손실의 유무에 따라 다름, k (kW/m²·°C): 열전도도, ρ (kg/m³): 연료의 밀도, c (kJ/kg·°C): 연료의 비열, T_{ig} (°C): 점화(착화)온도, \dot{q}'' (kW/m²): 열유속, T_s (°C): 불꽃으로부터 직접 영향이 미치지 않는 불꽃 앞쪽 연료의 온도

Table 1의 굴참나무의 체적밀도는 976 kg/m³으로 느티나무의 체적 밀도 655 kg/m³에 비하여 큰 값을 가진다. 따라서 굴참나무의 TTI가 현재의 주어진 조건(Table 1)에서 식 (2)의 밀도향에 의존하여 증가한 것으로 판단된다.

질량손실율(MLR)은 화재거동에 대하여 추가적인 정보를 준다[26]. 여기에서는 비질량손실율(average specific mass loss rate, SMLR)도 전술한 바와 같은 의미로 도입하였으며, 더욱 정량적인 의미로 평가 된다. Table 2 및 Figure 1에서 보여준 외부 열유속 50 kW/m²에서 굴참나무의 SMLR은 9.2 g/sm², 느티나무는 5.2 g/sm²였다. 그러나 연소하는 동안 초기의 SMLR에 대해서는 현저한 차이가 있었으며, 시간이 경과함에 따라 굴참나무는 450 s 이후 비질량손실율이 매우 약한 정도로 유지되나, 느티나무는 500 s 이후 끝까지 분명하게 유지되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 느티나무의 연소 시 숯생성으로 인한 단열효과로 설명될 수 있다[10]. 또한 이에 대하여 SMLR (\dot{m}) 다음과 같은 관계식으로 주어진다[6].

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

여기에서 \dot{Q}/A (kW/m²) = HRR; \dot{m} (kg/m²s) = SMLR; Δh_c (kJ/kg) = EHC로 표시된다.

SMLR (\dot{m})은 HRR을 유효연소열(effective heat of combustion, EHC)으로 나눈 값으로 표시된다. 즉, Table 2에 나타난 굴참나무의 HRR이 느티나무의 HRR보다 크므로 굴참나무의 SMLR이 느티나무보다 큰 값으로 측정된 것은 식 (3)과 잘 일치한다.

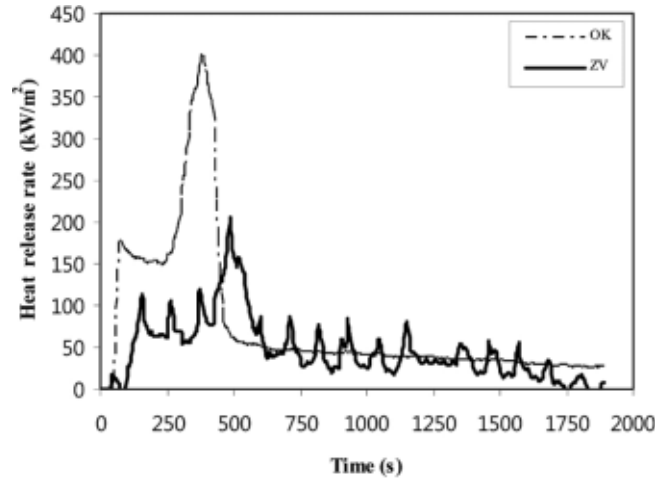


Figure 2. HRR curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

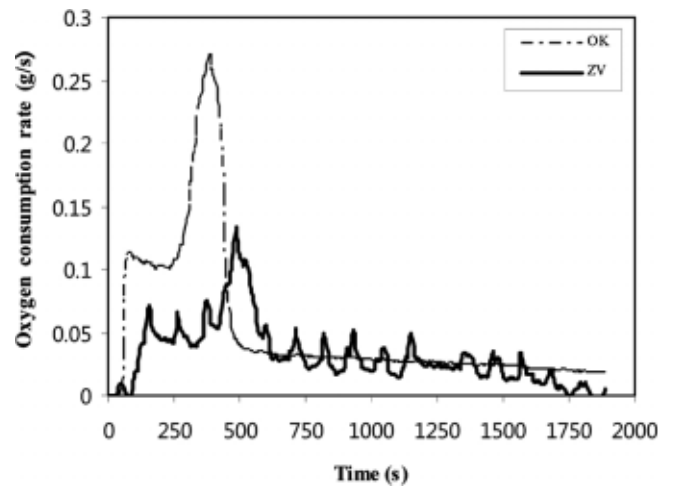


Figure 3. OCR curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

Figure 2에 시험편의 시간에 따른 열방출율 커브를 나타내었으며, 그의 커브는 굴참나무와 느티나무가 현저하게 다른 경향성을 보여준다. HRR은 식 (3)에 나타난 바와 같이 비질량손실율(SMLR)과 유효연소열(Δh_c)의 곱으로 표현된다. 외부 열원 50 kW/m²에서 시험된 수종의 단위 면적당 최대열방출율(peak heat release rate per unit area, HRR_{peak})은 굴참나무(432.07 kW/m²)가 밤나무(208.62 kW/m²)와 비교하여 매우 강한 거동을 나타내었다(Table 2 및 Figure 2). 유사한 예로 HRR의 시간에 대한 적분값인 총방출열량(total heat release, THR)은 굴참나무(140.2 MJ/m²)가 느티나무(85.7 MJ/m²)보다 높게 나타났다(Table 2). 이것은 Table 1에 나타난 바와 같이 굴참나무의 체적밀도(976 kg/m³)가 느티나무의 체적밀도(655 kg/m³)에 비하여 큰 결과로 설명된다[6]. 즉, 체적밀도가 큰 굴참나무는 Table 2에 나타난 SMLR 값을 식 (3)에 대입하면 HRR 값이 느티나무의 그것보다 크게 계산되어진다. 이론식과 실험결과의 경향과 방향성이 잘 일치하며, 이 결과로 굴참나무는 화재 시에 느티나무보다 더 큰 화재위험성을 내포하고 있는 것으로 판단된다.

유효연소열(EHC)은 한 가지의 분해 형태를 갖는 균일한 시험편의 연소시간 동안의 상수로서 이론적인 순연소열의 값보다 적다[25]. 한 가지 이상의 분해형태를 갖는 재료나 복합재료 또는 비균일한 재료의

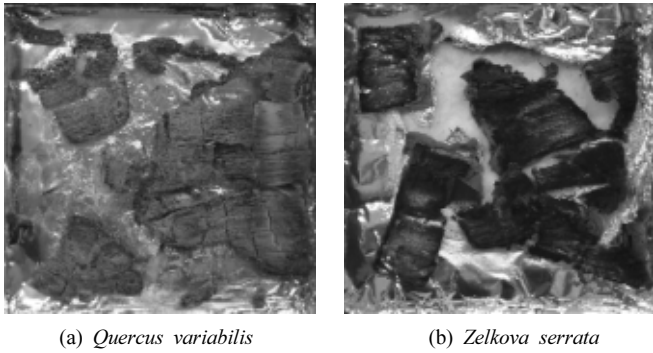


Figure 4. The residues of wood after combustion.

유효연소열은 반드시 일정하지는 않다. Table 2에 나타난 굴참나무와 느티나무의 EHC는 각각 14.77 MJ/kg와 13.06 MJ/kg으로 굴참나무가 약간 높게 나타난 것은 각각의 수분함량의 차이에 의하여 예측된 바와 같았다.

그러나 Table 2 및 Figure 1에서 나타난 HRR_{peak} 에 도달된 굴참나무(432.07 kW/m^2)와 느티나무(208.62 kW/m^2)의 시간이 각각 370 s, 487 s로 나타났다. 이것은 느티나무가 강한 연소 억제성을 가지므로 연소 지연 효과를 나타내는 것으로 설명된다[10]. 또 느티나무의 수분함량(16.34%)도 굴참나무(12.14%)에 비하여 영향을 미쳤을 것으로 판단된다[5,7].

Figure 1의 각각의 시험편에 대하여 열적 파동의 첫 번째 봉우리는 연소표면 근처에서 숯이 형성되기 전에 발생한다. 중간 부분은 처음 숯층이 형성된 후 두께를 통하여 숯의 단열효과로 시료가 점차적으로 연소하기 때문에 감소되는 경향이 관찰되었다[10]. 두 번째 봉우리는 열적 파동이 뒷면 절연층에 도달할 때 일어나고 휘발 성분이 증가됨으로써 높은 열분해 효과가 열적 파동을 만드는 것으로 판단된다[16]. 특히, 느티나무의 경우, 세 번째, 네 번째, 다섯 번째, 여섯 번째 등 여러 번의 봉우리가 발생하는 것은 위와 같은 과정이 여러 번 반복되는 것으로 판단된다.

Figure 2에서 보여준 높은 열분해 효과를 만들기 위해서는 열적 파동의 봉우리가 발생될 때마다 Figure 4에 나타난 바와 같이 같은 시간대에 산소소비 속도(oxygen consumption rate, OCR)가 증대되는 것을 보여준다. Table 2의 총산소소비량(total oxygen consumption, TOC)은 굴참나무와 느티나무가 각각 92.2 g, 58.5 g으로 나타났다. 즉, 체적밀도가 큰 굴참나무의 연소 시에 느티나무보다 더 많은 산소가 소요되는 것으로 판단된다.

또한 열방출율의 감소는 열분해 및 연소에 의한 질량 감소에 의하여 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 주제로 중요시된다.

연소 중 각 수준의 잔여물들이 완전히 다르나, 시험편에 대한 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30 min 경과 후(ISO 5660-1의 표준) 시험 종료 후의 잔여물은 거의 연소하여 굴참나무는 회백색의 재료, 느티나무는 진한 갈색으로 관찰되었다(Figure 4).

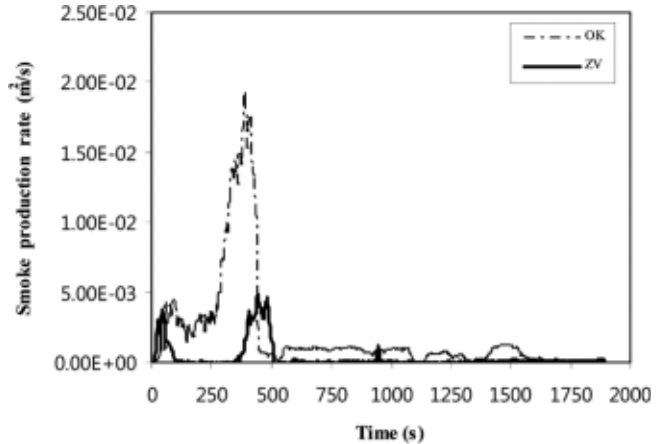


Figure 5. SPR curves of wood species at 50 kW/m^2 external heat flux.

3.2. 연기와 탄소 산화물 방출

물질에 관련된 연소의 이해를 돕는 또 다른 중요한 특성치는 연기와 CO가스의 방출이다. 화재시 주된 위험은 연기의 조성과 조성물의 농도이다. 연기란 화염에서 생성되어 떠다니는 기체의 흐름을 의미하며, 이 흐름은 더 이상의 화학반응 없이 지속적으로 공기와 혼합된다. 일반적으로 목재의 연소가스 생성물의 독성은 CO_2 를 동반하는 CO의 방출에 의하여 결정되어진다. 그 결과는 Table 2에 주어진다. 모든 동물은 인체 내에서 옥시헤모글로빈(O_2Hb)에 의하여 이송되는 산소를 필요로 한다. 폐로 유입된 CO는 헤모글로빈과 결합하는 것을 방해한다[26].

총연기방출량(total smoke production, TSP)은 굴참나무와 느티나무가 각각 3.50 m^3 , 0.65 m^3 였다(Table 2). 이들 값의 차이는 시험 수종의 체적밀도 차이로 설명될 수 있다. 즉, 굴참나무는 느티나무에 비하여 체적밀도가 크므로 인하여 총연기방출율이 높은 것으로 이해된다. 이것은 Figure 5에서 보여준 시간에 따른 연기발생속도(smoke production rate, SPR)에서 관찰된다. 그러나 시험목의 연기방출 특성을 정량적으로 설명하기에는 부족하다. 일반적으로 연기 차폐는 비소화면적(specific extinction area, $\text{SEA}_{\text{meann}}$)으로 설명되어진다. 비소화면적은 연기방출율(rate of smoke release, RSR)을 비질량손실율(SLMR)로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다. 굴참나무의 $\text{SEA}_{\text{meann}}$ ($41.11 \text{ m}^2/\text{kg}$)은 느티나무($9.23 \text{ m}^2/\text{kg}$)보다 현저히 높게 나타났다(Table 2). 그것은 굴참나무가 대부분의 연소 단계에서 비교적 빠른 속도로 연소되고 연소와 더불어 그 큰 밀도 차이 때문으로 판단된다. 또한 느티나무의 $\text{SEA}_{\text{meann}}$ 이 굴참나무 보다 상대적으로 적은 것은 느티나무가 난연효과의 존재와 더불어 저발연성 수종임을 알 수 있었다. 따라서 내외장재로 사용된 굴참나무는 느티나무보다 가시거리가 짧으므로 화재시에 화재위험성이 더 큰 목재로 판단된다.

CO의 수율은 물질 연소에 의존한다[27]. 굴참나무로부터 CO 발생량(0.0829 kg/kg)은 느티나무의 그것(0.0818 kg/kg)과 근소한 차이를 보였다. 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.

Figure 7은 콘칼로리미터에서 방출된 시간에 의한 CO_2 발생속도를 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 굴참나무는 약 500 s에서 CO_2 발생이 급격히 둔화되었고, 느티나무는 이보다 긴 약 650 s 부근에서

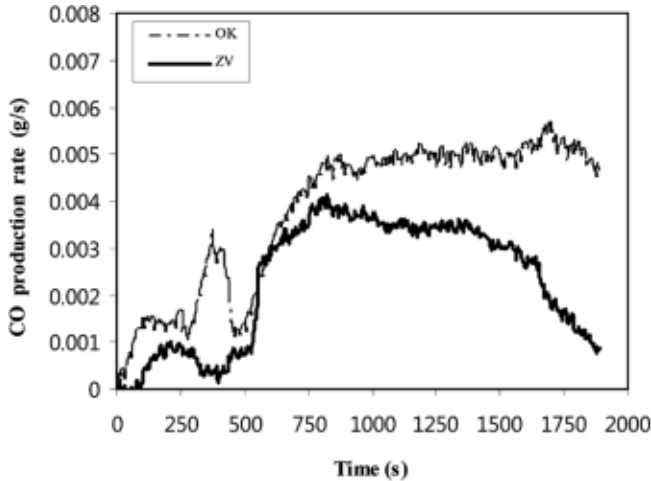


Figure 6. CO production rate curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

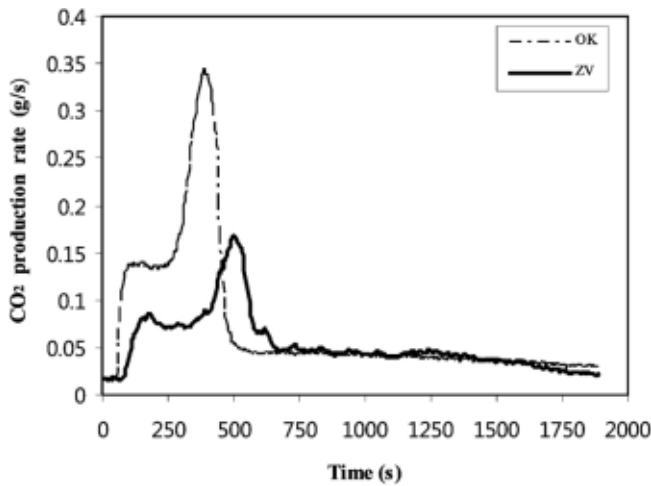


Figure 7. CO₂ production rate curves of wood species at 50 kW/m² external heat flux.

CO₂ 발생이 급격히 낮아졌다. 또 굴참나무는 383 s에서 CO₂ 발생속도가 최대 나타났고, 느티나무는 500 s에서 최대의 CO₂ 발생속도를 나타내었다. 이것은 느티나무가 그의 많은 숯생성으로 인하여 연소속도가 느려졌음을 의미한다[10].

Table 2에 나타낸 굴참나무와 느티나무의 CO/CO₂의 비가 각각 0.053, 0.043으로 측정되었다. 위의 결과로 느티나무는 굴참나무에 비하여 인체에 대한 유해성이 비교적 약하게 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

자연 건조된 굴참나무와 느티나무 종에 대하여 화재위험성 평가 및 소방설계를 위한 연소특성에 대한 기초자료를 제공하기 위하여 열방출율과 연기발생 관련 지수를 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 측정하였다.

1) 굴참나무의 THR (140.2 MJ/m²)은 느티나무(85.7 MJ/m²)와 비교하여 높은 총방출열량 나타내었다. 또한 굴참나무의 EHC (14.77 MJ/m²)

는 느티나무(13.06 MJ/m²)와 비교하여 높은 유효연소열을 나타내었다. 이것은 느티나무의 체적밀도(655 kg/m³)에 비하여 굴참나무의 체적밀도(976 kg/m³)가 큰 결과로 설명되며, 화재 시에 굴참나무는 느티나무보다 더 큰 잠재 위험성을 내포하는 것으로 판단되었다.

2) CO/CO₂비는 굴참나무, 0.053과 느티나무, 0.043이고, 시간에 따른 CO 발생속도는 굴참나무가 느티나무보다 대체적으로 높았다. 이것은 굴참나무의 빠른 비질량손실율 때문으로 판단되며, 이것은 느티나무가 굴참나무보다 인체에 대한 유해성이 비교적 약하게 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

3) TSP는 굴참나무(3.50 m³)가 느티나무(0.65 m³)에 비하여 높게 측정되었다. 또 초기에 시간에 따른 SPR은 굴참나무가 느티나무에 비하여 현저하게 높게 나타났다. 그것은 느티나무가 굴참나무에 비하여 낮은 체적밀도 및 연소공정 중에 굴참나무에 비하여 많은 양의 숯을 생성하여 연소를 억제하는 저발연성 수증으로 판단되며, 화재 시에 굴참나무는 느티나무에 비하여 가시거리가 짧아지는 것으로 판단되었다.

4) 따라서 본 실험을 통하여 느티나무는 굴참나무보다 내외장용 건자재로서 비교적 우수한 화재 안전성이 있음을 보였다.

참 고 문 헌

1. N. Boonmee and J. G. Quintiere, Twenty-ninth Symposium (international) on combustion, *The Combustion Institute*, **29**, 289 (2002).
2. M. M. Hirschler, *Advances in Combustion Toxicology*, **2**, 229 (1990).
3. F. Shafizadeh and W. F. DeGroot, Combustion characteristics of cellulosic fuels, eds F. Shafizadeh, K.V. Sarkenien and D. A. Tillman, *Thermal Uses and Properties of Carbohydrates and Lignins*, Academic Press, New York, U.S.A. (1976).
4. D. A. Tillan, *Wood as an energy resource*, Academic Press, New York, U.S.A. (1978).
5. M. J. Spearpoint, Predicting the ignition and burning rate of wood in the cone calorimeter using an intergral model, 30, NIST GCR 99-775, U.S.A. (1999).
6. V. Babrauskas, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fourth ed., National Fire Protection Association, Massachusetts, U.S.A. (2008).
7. H. C. Tran and R. H. White, *Fire and Materials*, **16**, 197 (1992).
8. 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).
9. N. P. Chermisinoff, *Wood for energy production*, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., U.S.A. (1980).
10. F. M. Pearce, Y. P. Khanna, and D. Raucher, *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Chap. 8, Academic Press, New York, U.S.A. (1981).
11. V. Babrauskas, *New Technology to reduce Fire Losses and Costs*, eds S. J. Grayson, and D. A. Smith, Elsevier Applied Science Publisher, London, UK. (1986).
12. M. Hirschler, *Thermal decomposition and chemical composition*, 239, American Chemical Society Symposium Series 797 (2001).
13. N. Boonmee and J. G. Quintiere, Thirtieth Symposium (International) on combustion, *The Combustion Institute*, **30**, 2303 (2005).
14. E. Mikkola, *Fire Safety Science*, Proceedings of the Third International

- Symposium, 547, Elsevier, Applied Science, London (1991).
15. J. G. Quintiere, A Semi-quantitative Model for the Burning Rate of Solid Materials, NISTIR 4840, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, M.D., U.S.A. (1992).
 16. M. J. Spearpoint and G. J. Quintiere, *Combustion and Flame*, **123**, 308 (2000).
 17. H. J. Park and H. Kim, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, **18**, 86 (2004).
 18. Y. J. Chung, *Journal of Korean Forest Society*, **98**, 319 (2009).
 19. ISO 5660-1, Geneva (2002).
 20. EN 13823 (2002).
 21. W. T. Simps, Wood Handbook-Wood as an Engineering Material, Chap.12, Forest Product Laboratory U.S.D.A., Forest Service Madison, Wisconsin, U.S.A. (1987).
 22. Y. J. Chung and I. K. Kwon, *Journal of Korean Forest Society*, **99**, 96 (2010).
 23. V. Babrauskas, doi: 1002/fam. 810080206, *Fire and Materials*, **8**, 81 (1984).
 24. V. Babrauskas and S. J. Grayson, Heat release in Fires, 644, E & FN Spon (Chapman and Hall), London, UK. (1992).
 25. J. G. Quintire, Principles of Fire Behavior, Chap. 5, Cengage Learning, Delmar, U.S.A. (1998).
 26. M. Delichatsios, B. Paroz, and A. Bhargava, *Fire Safety Journal*, **38**, 219 (2003).
 27. T. R. Hull and K. T. Paul, *Fire Safety Journal*, **42**, 340 (2007).