

실온에서 건조된 리기다 소나무와 밤나무의 연소특성 Combustion Characteristics of the *Pinus rigida* and *Castanea savita* Dried at Room Temperature

정영진[†] · 진의*

Yeong-Jin Chung[†] · Eui Jin*

강원대학교 소방방재공학과, *강원대학교 소방방재연구센터
(2010. 4. 7. 접수/2010. 6. 11. 채택)

요 약

건자재로서 나무 결함중의 하나는 화재에 대한 취약성이다. 본 연구의 목적은 한국에서 자란 리기다 소나무와 밤나무의 연소성질을 시험하는 것과 건자재로서의 사용에 대한 바람직한 특성을 알아내는 것이다. 콘칼로리미터(ISO 5660-1)는 열방출율과 CO, CO₂ 발생과 연기차폐와 같은 연기지수를 측정하는 데 이용되었다. 50kW/m²의 외부 열유속하에서 밤나무의 평균열방출율(HRR_{mean})은 소나무의 평균열방출율 68.5kW/m²과 비교하여 70.4kW/m²을 나타내었다. 게다가 총열방출율(THR)은 밤나무(120.8MJ/m²)가 소나무(81.9MJ/m²)보다 높게 나타났다. 이들 결과는 시험된 나무종의 체적밀도에 의존된다. 밤나무는 소나무에 비하여 높은 CO_{mean} 수율과 높은 CO/CO₂ 수율을 나타내었다.

ABSTRACT

One of the limitation of wood as building materials is its flammability. The purpose of this paper is to examine the combustion properties of the *Pinus rigida* and *Castanea savita* which are grown in Korea 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 and CO₂ production and smoke obscuration. The HRR_{mean} of the *Castanea savita* and *Pinus rigida* at 50 kW/m² of radiant heat flux was 70.4 kW/m² and 68.5 kW/m². Furthermore, the THR of *Castanea savita* was 120.8 MJ/kg and it was higher than the THR of *Pinus rigida* (81.9 MJ/m²). These results are depend on the bulk density of tested wood species. The *Castanea savita* has high CO_{mean} yield and high CO/CO₂ yield compared with that of *Pinus rigida*.

Key words : Heat release rate, Combustion properties, Fire smoke index

1. 서 론

목재는 환경 친화적, 저탄소 녹색성장의 동력으로 그 가치가 평가되고 있다. 그러나 건자재로서 목재의 결점은 화재에 대한 취약성이다.

화재발생시 목질재료의 안전성은 화재조건에 노출되었을 때의 착화성, 열방출율, 화재의 전파 및 연소가스의 유해성 등으로 평가할 수 있다.¹⁾ 특히 화재에 의한 연기관련 지수는 화재의 전파 및 연소가스의 유해성에 직접적인 영향을 미치고 있어 정확한 연기지수 측정은 화재안전 측면에서 매우 중요한 요소로 인식되고 있다.

건조한 나무의 기본 조성은 탄소 50%, 수소 6%, 산소 44%로 구성되고 그 외에 소량의 질소와 무기 화합물로 구성되어 있다.²⁾ 일반적으로 나무의 주요 성분은 셀룰로오스 43%, 헤미셀룰로오스 28~35%, 리그닌 22~29% 등의 비율로 이루어진다.³⁾

나무의 열분해와 내화에 대하여, 나무의 조성은 흡수된 물과 휘발성 유분의 손실을 제외하고 약 100°C에 이를 때 까지 온도에 의해 영향을 받지 않는다. 약 175°C로 온도 증가에 따라 나무의 일부 성분은 분해하기 시작한다. 100~200°C 사이에서는 CO₂, 무기화합물, 수증기와 같은 비연소성 생성물이 생성된다. 200°C 이상에서는 셀룰로오스가 분해되고 타르와 가연성 휘발성물질이 생성된다.⁴⁻⁶⁾ 셀룰로오스는 240~350°C, 헤미

[†]E-mail: yjchung@kangwon.ac.kr

셀룰로오스는 200~260°C, 리그닌은 280~500°C에서 각각 분해된다. 목재가 450°C 이상으로 가열되면 모든 휘발성 물질은 증발되어 사라지고, 15~20% 정도의 숯(char)이 남는데 이는 리그닌 함유량이 많기 때문이다. 숯은 산소가 연소대에 쉽게 접근하는 것을 허용하지 않기 때문에 목재의 연소 속도를 감소시킨다.⁷⁾ 또한 목재의 탄화속도는 목재의 열분해와 열발생의 상호작용에 영향을 받으며, 이들은 목재의 종류, 밀도, 수분함량, 열 침투성, 열적특성과 같은 많은 변수들의 함수이다.^{8,9)}

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 에너지 방출속도가 느린 것들보다 더 위험하다. 열방출율을 측정하기 위하여 많은 기술들이 발전되어 왔는데 그 중의 하나가 콘칼로리미터(cone calorimeter)이다.¹⁰⁾

Boonme와 Quintiere는 콘칼로리미터를 이용하여 목재가 복사열유속에 노출될 때 목재의 백열과 붓꽃착화를 연구했다. 즉, 40kW/m² 미만의 열유속(heat flux)하에서 백열을 관찰하였고, 40kW/m² 초과와 열유속하에서 붓꽃연소를 관찰하였다. 그리고 10kW/m² 열유속하의 노출로부터 2시간 이내의 시간에서 백열착화의 발생을 보고하였다.^{11,12)} Mikkola는 상록교목(spruce)에 대하여 50kW/m²의 열유속하에서 탄화속도를 측정하였다.¹³⁾ 또 Quintiere와 Spearpoint 등은 연소속도 Data를 이용한 수학적 적분모델과 시간온도 곡선을 이용하여 탄화율과 탄화깊이를 측정하였다.^{14,15)}

저자는 인위적으로 건조된 리기다 소나무와 밤나무종의 열방출율과 연기발생 관련 지수를 측정하여 그의 연소 특성을 보고한 바 있다.¹⁶⁾

본 연구의 목적은 선행된 리기다 소나무와 밤나무의 연소특성에 대하여 시험조건외 변화즉, 자연 건조된 목재에 함유된 수분함량 및 체적밀도의 변화로 인한 확장된 연장선상의 열방출율 및 연기발생 관련 지수를 측정하여 이들의 연소특성을 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험목 준비 및 실험

시험목재는 침엽수인 리기다 소나무와 활엽수인 밤나무로서 경기도 용인소재 지역 농가에서 직접 얻었다. 이 수종들은 3.5년 동안 자연건조 시켰으며, 시편의 체적밀도는 시험하기 전에 부피와 무게를 측정하여 계산

하였다.

연소특성은 콘칼로리미터(ISO 5660-1)를 이용하여 다음 주 성질을 결정하는데 사용하였다.¹⁷⁾ 열방출율(HRR), CO와 CO₂ 생산과 연기차폐와 같은 화재연기지수(EN 13823).¹⁸⁾

Dual cone calorimeter(Fire Testing Technology)에 의한 열방출율 측정은 대부분의 유기재료가 연소 중에 산소 1kg이 소비되면 약 13.1MJ의 열이 방출되는 산소소비 원리를 바탕으로 하고 있다.¹⁹⁾ 설정한 복사열에 노출된 시편이 착화되어 연소될 때의 열방출율은 연소 생성물 흐름속의 산소 농도와 유속으로부터 유도된 산소 소비량을 측정하여 평가하였다. 재료의 연소로 인한 열방출율과 단위면적당 열방출량은 식 (1)과 (2)에 의하여 계산된다.

$$\dot{q}(t) = (\Delta h_c / r_o)(1.10)C\sqrt{\Delta P / T_c} \frac{X^o O_2 - X O_2}{1.105 - 1.5 X O_2} \quad (1)$$

$$q_A(t) = \dot{q}(t) / A_s = \dot{Q} / A \quad (2)$$

이때 q_A(t) 또는 \dot{Q} / A : 열방출율(kW/m²), $\dot{q}(t)$: 열방출속도(열방출량)(kW), A_s: 실험체의 표면적(m²), h_c: 순수연소열(kJ/kg), r_o: 화학양론적 산소 대 연료 질량비, C: 산소소비량 보정상수(m^{1/2}kg^{1/2}K^{1/2}), P: 오리피스외 압력차(Pa), T_c: 오리피스에서의 기체의 절대온도(K), X_{O₂}: O₂의 물분율에 대한 산소분기 눈금 판독 값, X^oO₂: 산소분석기 눈금의 초기 값이다.

콘칼로리미터 시험은 현재 실제 화재 조건을 가장 잘 모사한 시험방법으로서 일정량의 공기를 공급하면서 재료의 연소성을 정확하게 평가할 수 있는 동적방법(dynamic method)이다. 실험방법은 ISO 5660-1에 따라 실시하였고, 10mm 시편을 100mm × 100mm(- 2mm) 정사각형으로 절단하고 온도 23 ± 2°C, 상대습도 50 ± 5%에서 향량이 될 때까지 유지한 다음 알루미늄 호일로 비노출면을 감싼다. 시험에 앞서 콘미터의 열량이 설정값 ± 2% 이내, 산소분석기의 산소농도가 20.95 ± 0.01%가 되도록 교정하고 배출유량을 0.024 ± 0.002m³/s로 설정하였다. 시험편은 고밀도 세라믹 섬유보드 위에 저밀도 섬유 blanket을 위치시키고 그 위에 시편을 놓았다. 모서리 프레임은 모서리 프레임 효과를 최소화하기 위해 사용하였다. 시험은 ISO 5660-1 표준으로 지속적인 불꽃 연소가 시작된 때부터 30분간 경과 후에 종료하였으며, 추가로 2분간의 데이터 수집시간을 부여하였다. 모든 연소시험은 그들의 재현성을 보증하기 위하여 3번씩 수행하였다.

본 연구에서 선정된 시료는 콘칼로리미터에 수평으

Table 1. Properties of Wood Species Used in Tests

Samples	Class	Height (m)	Age (years)	Density (kg/m ³)	Moisture content (%)
<i>Pinus rigida</i>	Softwood	12.5	24	489	12.91
<i>Castanea sativa</i>	Hardwood	10.5	27	725	13.11

로 설치하고 외부 점화장치를 부착한 상태로 50kW/m² 복사열에 수집분 동안 노출시켜 착화되는 시간과 착화된 시료로부터 열방출율 및 연기관련 지수를 구하였다.

2.2 함수율 측정

함수율은 일정량의 시험목을 105°C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시험목의 중량을 4시간 간격으로 더 이상 중량변화가 없을 때까지 측정하고 다음 식을 이용하여 계산하였다.²⁰⁾

$$MC(\%) = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3)$$

W_m: 함수율을 구하고자 하는 목재편의 중량

W_d: 건조시킨 후의 절대건조 중량

3. 결과 및 토의

3.1 열방출율 및 착화 특성

목재의 종류, 밀도, 수분함량, 열침투성 및 열적특성은 목재가 연소될 때의 에너지 방출 속도, 연기생성, 가스 독성 등에 따라 결정된다.^{7,8,21)} 시험하는 동안에 측정되는 주 연소특성은 열방출율(heat release rate, HRR)이다. 그 것은 연소모델링을 위한 중요한 측정값이다.^{22,23)} 가연물과 관련하여 연소 특성의 이해를 돕는 다른 중요한 성질은 착화시간(time to ignition, TTI)과 비질량손실율(specific mass loss rate, SMLR)이다.

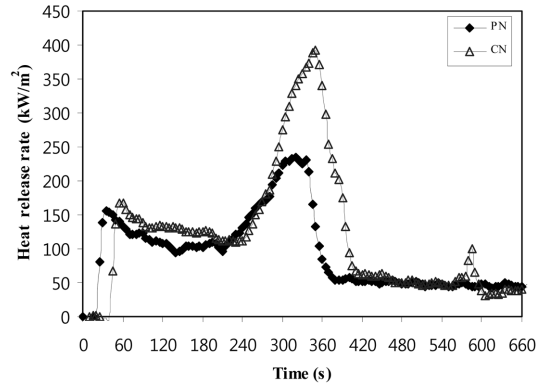


Figure 1. HRR curves of native wood species at 50 kW/m² radiant heat flux. PN: *Pinus rigida*, CN: *Castanea sativa*.

Figure 1에서 보여주는 바와 같이 리기다 소나무와 밤나무의 HRR곡선은 비슷한 경향을 보여준다. Table 2는 실험에 사용된 목재들의 연소특성을 나타낸 것이다. 50kW/m²의 외부 열원에서 시험한 수종의 평균열방출율, HRR_{mean}은 리기다 소나무(68.5kW/m²)와 밤나무(70.4kW/m²)가 근소한 차이를 나타내었다. 그러나 최대열방출율, HRR_{peak}는 밤나무(411.05kW/m²)가 리기다 소나무(235.47kW/m²)보다 높게 나타났다. 또한 리기다 소나무와 밤나무는 HRR_{peak}에 도달된 시간이 각각 320초, 342초로 나타났다. 이것은 Table 1에 나타낸 바와 같이 밤나무의 체적밀도(725kg/m³)가 소나무의 체적밀

Table 2. Combustion Properties of Native Wood Species

Samples	^a TTI (s)	^b SMLR _{ave} (g/s·m ²)	^c HRR _{mean} (kW/m ²)	^d HRR _{peak} (kW/m ²)	^e FT (s)	^f TOC (g)	^g THR (MJ/kg)
<i>Pinus rigida</i>	15	5.71	68.5	235.47	320	53.8	81.9
<i>Castanea sativa</i>	34	6.66	70.4	411.05	342	81.2	120.8
Samples	^h EHC (MJ/kg)	ⁱ TSR (m ² /m ²)	^j SEA _{mean} (m ² /kg)	CO _{mean} (kg/kg)	CO _{2mean} (kg/kg)	CO/CO ₂	
<i>Pinus rigida</i>	17.00	232.5	46.8	0.0575	1.69	0.0340	
<i>Castanea sativa</i>	15.82	292.6	38.0	0.0882	1.64	0.0538	

^aTime to ignition; ^bAverage specific mass loss rate; ^cMean heat release rate; ^dPeak heat release rate; ^eFlaming time; ^fTotal oxygen consumption; ^gTotal heat release rate; ^hEffective heat of combustion; ⁱTotal smoke release; ^jSpecific extinction area

도(489kg/m³)보다 크기 때문인 것으로 보인다.²⁴⁾

이에 대하여 HRR은 다음과 같은 식으로 설명되어 진다.²⁵⁾

$$\dot{Q}/A(\text{HRR}) = \dot{m} \cdot \Delta h_c \quad (4)$$

즉, HRR은 비질량손실율(specific mass loss rate, SMLR)에 비례한다. 여기에서 $\dot{Q}/A(\text{kW/m}^2)$: 열방출율)는 \dot{m} (kg/m²s: 비질량손실율)과 $\Delta h_c(\text{kJ/kg}$: 유효연소열 (effective heat of combustion, EHC)와의 곱으로 표시 된다. Table 2 및 Figure 2에서 보여주는 50kW/m²의 외부 열원하에서 리기다 소나무의 평균 비질량손실율 (SMLR_{ave})은 5.71g/sm², 밤나무는 6.16g/sm²였다. 이 결과는 근소한 차이 이지만 식 (1)의 $\dot{Q}/A(\text{HRR})$ 가 와 비례관계가 성립하는 것과 일치한다. 유효연소열은 질량 감소율과 함께 물질의 화재거동에 추가적인 정보를 제공해주기 위하여 사용될 수 있다. 유효연소열(EHC)은 한 가지의 분해형태를 갖는 균일한 시편의 연소시간 동안의 상수로서 이론적인 순연소열의 값보다 적다.²⁶⁾ 한 가지 이상의 분해형태를 갖는 재료나 복합재료 또는 비균일한 재료의 유효연소열은 반드시 일정하지는 않다. Table 2에 나타낸 리기다 소나무의 EHC는 17.00MJ/kg으로 밤나무(15.82MJ/kg)보다 높게 나타났다. 이것은 연소시 소나무의 휘발성 성분인 다량의 테르펜류 방출 때문으로 판단된다. 휘발성 성분에 대하여 침엽수로부터는 주로 테르펜류가 다량 방출되며 활엽수에서는 적은 양의 아세트산이 주로 방출된다.²⁷⁾

같은 경향으로 총산소소비량(total oxygen consumption: TOC)도 리기다 소나무와 밤나무는 각각 53.8g, 81.2g으로 나타났다. 즉, 체적밀도가 큰 밤나무의 연소 시에 소나무보다 더 많은 산소가 소요되는 것으로 판단된다.

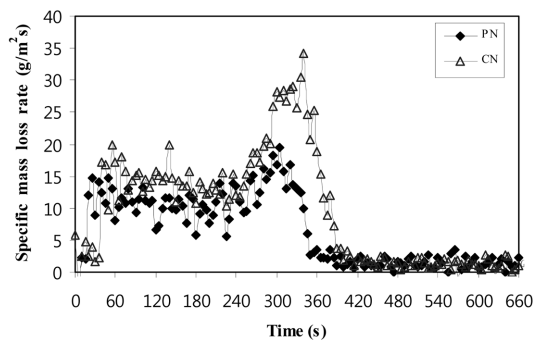


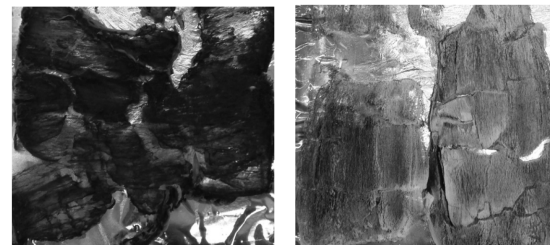
Figure 2. SMLR curves of native wood species at 50 kW/m² radiant heat flux.

열방출율(HRR)은 시료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기로 정의 되므로 총 연소시간을 고려하여 더욱 정량적인 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

총열방출량(total heat released, THR)은 각 실험에서 실험재료의 연소로 인해 방출된 열량으로서 시료 표면적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율에 대하여 주어진 시간을 적분하여 계산한다. 밤나무의 THR은 120.8MJ/m²으로 리기다 소나무(81.9MJ/m²)보다 높게 나타났다(Table 2). 이것은 Table 1에 나타낸 바와 같이 밤나무의 체적밀도(725kg/m³)가 소나무의 체적밀도(489kg/m³)보다 큰 결과로 HRR값의 발생과 같은 경향으로 설명된다.²⁴⁾

Figure 3은 완전연소 후의 탄화된 형태로서 2가지 물질의 잔여물들이 완전히 다르다는 것을 아는 것은 중요하다. 소나무의 연소 후 겉보기 잔여물은 밤나무의 잔여물과 비교하여 약간 검은색으로 나타났다. 밤나무 종은 회백색의 재였다. 이것은 일반적으로 각 수종 중에서 추출된 리그닌 함량과 연관지어 설명될 수 있겠으나, 리그닌 함량이 동일한 수종을 택하여 동일한 실험조건에서 비교 실험한 결과의 자료를 얻기는 매우 어렵다. 따라서 잘 알려진 침엽수 영역에 속하는 리기다 소나무의 리그닌 함량(25~35%)과 활엽수 영역에 속하는 밤나무 리그닌 함량(18~25%)에 의해 숯 생성을 비교할 수 있다.^{2,28)} 그러나 이외에도 숯생성은 기타 많은 변수들과의 함수관계가 있는 것이 설득력이 있다고 판단된다.^{7,8,21)} 리기다 소나무는 일반 침엽수의 리그닌 함량에 의한 연소보다는 일반적으로 잘 알려진 휘발성 물질인 다량의 테르펜류에 의하여 지배적인 연소반응이 이루어지는 것으로 판단된다.

연소의 착화시간(time to ignition, TTI)은 각 수종에 대하여 Table 2에 나타내었다. TTI는 밤나무가 34초로 리기다 소나무(15초)에 비하여 늦어진다. 이것은 아래의 식 (5)에²⁶⁾ 의하여 착화시간(t_{ig})은 다른 변수를 제



(a) *Pinus rigida* (b) *Castanea sativa*

Figure 3. The residues of the *Pinus rigida* and *Castanea sativa* combustion.

외시킴터라도 체적밀도(ρ)에 비례 하므로 밤나무의 착화시간이 소나무 보다 늦은 결과와 일치한다.

$$t_{ig} = C(k\rho c) \left[\frac{T_{ig} - T_s}{\dot{q}''} \right]^2 \quad (5)$$

$t_{ig}(s)$: 착화시간, C: 상수(표면 열손실의 유무에 따라 다름, $k(kW/m^{\circ}C)$: 열전도도, $\rho(kg/m^3)$: 연료의 밀도, $c(kJ/kg^{\circ}C)$: 연료의 비열, $T_{ig}(^{\circ}C)$: 점화(착화)온도, $\dot{q}''(kW/m^2)$: 열유속, $T_s(^{\circ}C)$: 불꽃으로부터 직접 영향이 미치지 않는 불꽃 앞쪽 연료의 온도

3.2 연기와 탄소 산화물 방출

물질에 관련된 연소의 이해를 돕는 또 다른 중요한 특성은 연기와 CO가스의 방출이다. 일반적으로 나무의 연소가스 생성물의 독성은 CO₂를 동반하는 CO의 방출에 의하여 결정되어진다. 시료에 대한 측정 결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타낸 총연기방출율(total smoke release, TSR)은 리기다 소나무와 밤나무가 각각 232.5m²/m², 296.6m²/m²였다. 밤나무의 단위면적당 연기방출량이 높은 것으로 보이나 이들 값의 차이는 시험목의 단위 면적당 연기발생량으로서 연기방출 특성을 정량적으로 설명하기에는 부족하다.

일반적으로 연기 차폐는 비소화면적(specific extinction area, SEA_{mean})으로 설명되어 진다. 비소화면적은 연기 방출율(rate of smoke release, RSR)(Figure 4)을 비질량 손실율, SMLR(Figure 2)로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다. 소나무의 SEA_{mean}(46.88m²/kg)은 밤나무(38.00m²/kg)보다 높게 나타났(Table 2). 그것은 리기다 소나무가 연소의 초기 단계에서 쉽게 빠른 속도로 연소되기 때문으로 판단된다. 또한 밤나무의 비소화면적이 리기다 소나무 보다 상대적으로 적은

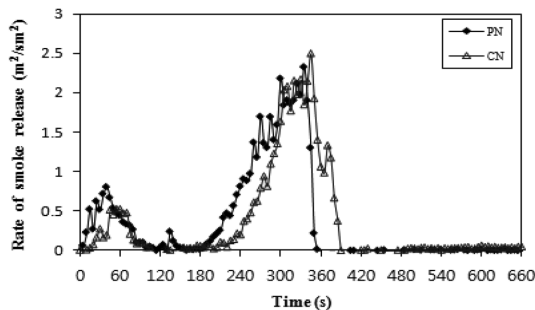


Figure 4. RSR curves of native wood species at 50 kW/m² radiant heat flux.

것은 밤나무가 연소억제 효과의 존재와 더불어 저발연성 종임으로 판단된다.

CO와 CO₂의 수율은 물질 연소에 의존한다.²⁹⁾ Figure 5은 콘칼로리미터에서 방출된 시간에 따른 CO 생성속도를 나타낸다. 밤나무에 의해 방출된 CO의 양은 리기다 소나무의 그것보다 점차적으로 증가되어지는 반면 리기다 소나무로부터 CO의 발생은 시간에 따라 감소되어진다. 밤나무로부터 CO_{mean} 생성량은 리기다 소나무의 것보다 비교적 높다(소나무: 0.0575 kg/kg, 밤나무: 0.0882 kg/kg). 이것은 전술한 3.1절에서 설명한 바와 같이 숲의 생성으로 인하여 연소 표면에 산소를 차단시킴으로써 불완전 연소를 하기 때문으로 판단된다.

Figure 6은 콘칼로리미터에서 방출된 시간에 따른 CO₂ 발생속도를 나타내었다. 시간이 지남에 따라 리기다 소나무는 약 360초에서 CO₂ 발생을 멈췄고, 밤나

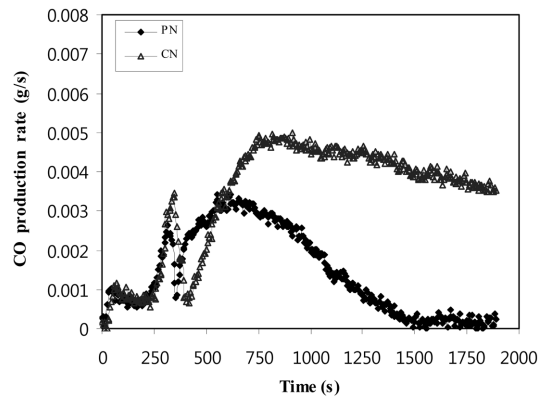


Figure 5. CO production rate curves of native wood species at 50 kW/m² radiant heat flux.

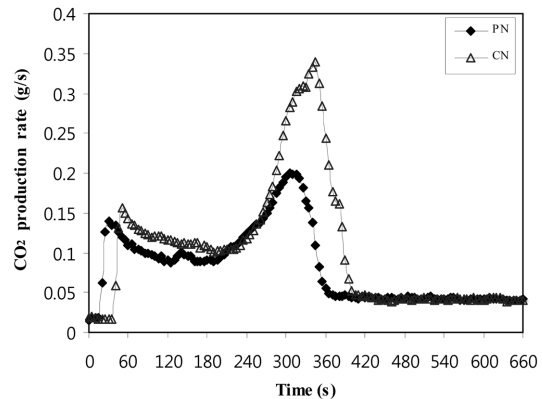


Figure 6. CO₂ production rate curves of native species wood at 50 kW/m² radiant heat flux.

무는 이보다 긴 약 400초에서 CO₂ 발생을 멈추었다. 또 리기다 소나무는 320초에서 CO₂ 발생속도가 최대로 나타났고, 밤나무는 355초에서 최대의 CO₂ 발생속도를 나타내었다. 이것은 리기다 소나무가 테르펜류의 많은 휘발성 물질을 함유하고 있고, 그의 체적밀도가 낮으므로 인하여 연소속도가 빨라졌음을 의미한다.³⁰⁾

Table 2에서 밤나무의 CO/CO₂의 비가 0.0538로 리기다 소나무(0.0340)보다 더 높았다. 이것은 밤나무의 연기 노출독성이 리기다 소나무보다 크다는 것을 의미한다.

4. 결 론

한국에서 자란 리기다 소나무와 밤나무 종의 열방출율, 연기발생 및 CO/CO₂ 관련지수를 측정하였다.

1. 리기다 소나무와 밤나무의 HRR_{mean}은 각각 68.5kW/m², 70.4kW/m²로 측정되었다. 그리고 THR은 밤나무(120.8MJ/m²)가 리기다 소나무(81.9MJ/m²)보다 높게 나타났다. 이것은 리기다 소나무의 체적밀도(489kg/m³)에 비하여 밤나무의 체적밀도(725kg/m³)가 큰 결과로 설명된다.

2. 리기다 소나무와 밤나무의 TTI는 각각 15초, 34로 측정되었다. 이것은 밤나무의 TTI가 소나무의 그것보다 높은 것으로서 각각의 TTI와 체적밀도가 비례관계가 성립됨을 알 수 있었다.

3. 유효연소열(EHC)은 리기다 소나무(17.00MJ/kg)가 밤나무(15.82MJ/kg)보다 높게 나타났다. 이것은 리기다 소나무의 휘발성 성분인 다량의 테르펜류 방출 때문으로 판단된다.

3. 밤나무는 리기다 소나무에 비하여 높은 CO_{mean} 수율(0.0882kg/kg)과 높은 CO/CO₂ 수율(0.0538)을 방출하였다. 그러나 밤나무는 낮은 SEA_{mean}(31.67m²/kg)을 나타내었다. 그 것은 밤나무가 저발연성 수종이며, 연소공정 중에 불완전 연소를 하기 때문으로 판단된다.

4. 밤나무는 비교적 높은 CO_{mean} 수율(0.0882kg/kg) 때문에 연소시 리기다 소나무와 비교해서 인체에 더욱 위험한 나무 종으로 판단된다.

5. 위에서 살펴본 바와 같이 리기다 소나무는 화재에 취약한 면이 있고, 밤나무는 화재 시에 일부 강한 면이 있으나, 유독성 물질이 비교적 많이 발생하였다.

참고문헌

1. M.J. Spearpoint and G.J. Quintiere, "Predicting the Burning of Wood Using an Integral Model",

Combustion and Flame, Vol.123, pp.308-324(2000).
 2. W.S. Atkins, "Wood Utilisation Systems-Combustion Strategies", Energy Technolodge Support unit, Department of Energy, U.K.(1984).
 3. F. Shafizadeh and W.F. DeGroot, "Combustion Characteristics of Cellulosic Fuels" In: edds. F. Shafizadeh, K.V. Sarkenon, and D.A. Tillman, Thermal Uses and Properties of Carbohydrates and Lignins, Academic Press, New York, U.S.A.(1976).
 4. F.L. Browne, "USDA Forest Service Forest Products Laboratory Report 2136", USDA Forest Service Forest Products Laboratory, Madison, Wis.1958; reviewed and refirmed(1963).
 5. F.C. Beall and H.W. Eickner, "Research Paper FPL 130", USDA Forest Service Forest Products Laboratory, Madison, Wis.(1970).
 6. D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", John Wiley & Sons, U.S.A.(1996).
 7. F.M. Pearce, Y.P. Khanna, and D. Raucher, "Thermal Analysis in Polymer Flammability", Chap. 8, Thermal Characterization of Polymeric Materials, Academic Press, New York, U.S.A.(1981).
 8. M.J. Spearpoint, "Predicting the Ignition and Burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter Using an Intergral Model", pp.30-46. NIST GCR 99-775, U.S.A.(1999).
 9. L. Yang, X. Chen, X. Zhou, and W. Fan, "The Pyrolysis and Ignition of Charring Matrials Under an External Heat Flux", Combustion and Flame Vol.133, pp.407-413(2003).
 10. V. Babrauskas, "New Technology to Reduce Fire Losses and Costs", eds. S.J. Grayson and D.A. Smith, Elsevier Appied Science Publisher, London (1986).
 11. N. Boonme and J.G. Quintiere, "Glowing and Flaming Autoignition of Wood", Twenty-ninth Symposium (International) on combustion, The Combustion Institute, Vol.29, pp.289-296(2002).
 12. N. Boonme and J.G. Quintiere, "Glowing Ignition of Wood", the onset of surface combustion, Thirtieth Symposium (International) on combustion, The Combustion Institute, Vol.30, pp.2303-2310(2005).
 13. E. Mikkola, "Charring of Wood Based Materials", pp.547-556, Fire Safety Science, Proceedings of the Third International Symposium, Elsevier, Applied Science, London(1991).
 14. J.G. Quintiere, "A Semi-quantitative Model for the Burning Rate of Solid Materials", NISTIR 4840, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD(1992).
 15. M.M. Hirschler, "Fire Hazard and Toxic Potency of

- the Smoke from Burning Materials”, *Advances in Combustion Toxicology* Vol.2, pp.229-230(1990).
16. Y.J. Chung, “Combustion Characteristics of the *Pinus Rigida* and *Castanea Savita* Using Cone Calorimeter”, *Journal of Korean Forest Society*, Vol.98, No.3, pp.319-323(2009).
 17. ISO 5660-1, “Reaction-to-Fire Tests ñHeat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)” (2002).
 18. EN 13823, “Reaction to Fire Tests for Building Products. Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item”(2002).
 19. M. Hirschler, “Thermal Decomposition and Chemical Composition”, pp.239-300, *American Chemical Society Symposium Series 797*(2001).
 20. W.T. Simpso, “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.(1987).
 21. J.D. DeHaan, “Kirks’s Fire Investigation”, pp.84-112. fifth edition, Prentice Hall(2002).
 22. V. Babrauskas, “Development of Cone Calorimeter-A Bench-scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption”, *Fire and Materials*, Vol.8, No.2, pp.81-95(1984). doi: 1002/fam.810080206.
 23. V. Babrauskas and S.J. Grayson, “Heat Release in Fires”, p.644, *E & FN Spon* (Chapman and Hall), London, UK(1992).
 24. H.C. Tran and R.H. White, “Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Calorimeter”, *Fire and Materials*, Vol.16, pp.197-206(1992).
 25. V. Babrauskas, “Heat Release Rate”, Section 3, In: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fourth ed., National Fire Protection Association, Massachusetts, U.S.A.(2008).
 26. J.G. Quintire, “Principles of Fire Behavior”, Chap. 5, Cengage Learning, Delmar, U.S.A.(1998).
 27. M. Risholm-Sundman, M. Lundgren, E. Vestin, and P. Herder, “Emissions 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. A.D. Chirico, M. Armanini, P. Chini, G. Cioccolo, F. Provasoli, and G. Audiso, “Flame Retardants for Polypropylene Based on Lignin”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.79, pp.139-145(2002).
 29. T.R. Hull and K.T. Paul, “Bench-scale Assessment of Combustion Toxicity-A Critical Analysis of Current Protocols”, *Fire Safety Journal*, Vol.42, pp.340-365(2007).
 30. M. Staudt, N. Bertin, U. Hansen, G. Seufert, P. Ciecioni, P. Foster, B. Frenzel, J.L. Fugit, and L. Torres, “The BEMA-project: Seasonal and Diurnal Patterns of Monoterpene Emissions from *Pinus Pinea* (L.)”, *Atmospheric Environment*, Vol.31, pp.145-156(1997).