

소나무와 떡갈나무의 주요 부위별 열적특성에 관한 연구

The Thermal Characteristics of Tree Branches, Barks, Living Leaves and Dead Leaves in *Pinus densiflora* and *Quercus dentata*

박영주*[†] · 이시영* · 이해평

Young-Ju Park*[†] · Si-Young Lee* · Hae-Pyeong Lee

강원대학교 소방방재학부, *강원대학교 방재기술전문대학원
(2008. 1. 14. 접수/2008. 3. 12. 채택)

요 약

본 연구에서는 영동지역의 대표 수종인 소나무와 떡갈나무를 대상으로 주요 부위별 열적특성을 고찰하고자 콘칼로리미터 시험을 수행하여 중량변화, 착화시간, 화염유지시간, 발열량 그리고 CO와 CO₂ 배출농도를 비교 분석하였다. 소나무와 떡갈나무 모두 가지의 총중량감소가 가장 크게 나타났으며, 낙엽의 착화시간이 9 s 정도로서 가장 빠르게 나타났다. 낙엽과 수피부위의 화염유지시간은 640~1,016 s 정도였으며, 총방출열량은 낙엽이 생엽의 2배 정도인 60.1 MJ/m²로 가장 높게 나타났다. 또한, CO 및 CO₂의 최대 배출농도는 떡갈나무의 가지부위가 소나무의 가지보다 2.82배 이상 높게 나타남으로써 소나무와 떡갈나무의 열적특성은 부위별로 많은 차이가 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

Disclosed is a study related to the thermal characteristics of *Pinus densiflora* and *Quercus dentata* identifying the presence of any significant difference in the above trees, which are native to Young Dong Province of Korea, according to different regions of the trees such as branches, barks, living leaves and dead leaves. For this purpose, we have carried out a cone calorimeter test focusing on the variables such as mass loss, heat release, ignition time, flame holding time and concentrations of CO and CO₂. The results showed that the total mass loss was greatest in tree branches, whereas the ignition time of dead leaves was fastest both in *Pinus densiflora* and *Quercus dentata*. The flame holding times of dead leaves and barks were about 640~1,016 s and the total heat release of dead leaves was around 60.1 MJ/m², twice the total heat release of living leaves. In addition, the maximum exhaust concentrations of CO and CO₂ in tree branches of *Quercus dentata* was 2.82 times higher than those of *Pinus densiflora*, respectively. From the foregoing, it was confirmed that there exist region-specific differential thermal characteristics in *Pinus densiflora* and *Quercus dentata*.

Keywords : *Pinus densiflora*, *Quercus dentata*, Cone calorimeter, Mass loss, Heat release rate

1. 서 론

산불은 대부분 기상 환경이 매우 건조한 상태에서 가연성 연료인 지표연료로부터 시작된다. 지표연료로부터 시작된 화재의 연소상태는 연료의 수직분포, 함수량, 연료량 등에 따라 좌우되며, 화재의 위험성을 결정하는데 고려할 요소들은 재료의 착화성 및 연소성, 재료가 타면서 발생하는 열량과 열량의 방출속도,

연기 및 연소가스의 발생 등이 있으며, 이 요소들은 산불의 성장과 전파에 직접적인 영향을 미치고 있으므로¹⁾ 가연성 연료에 대한 연소특성 분석은 중요한 요소로서 인식되고 있다. 따라서 가연성 연료에 대한 기초분석이 반드시 필요하며 이를 위한 가연성 연료의 선택은 가지와 잎, 수피, 그리고 심재의 구분 없이 전체를 연소시키므로 연소특성을 고려하여야 한다. 그러나 연료에 대한 각 국가별 기준은 산림지역의 식생분포와 종류에 따라 다르게 적용되고 있으며 국내에서는 이에 대한 기초자료가 크게 부족한 실정이다.²⁾

[†] E-mail: yjpolymer@kangwon.ac.kr

산림방재에 대한 국내의 동향을 살펴보면 미국의 경우, 체계적으로 산불을 관리할 수 있도록 산불방지위원회에서는 산불위험등급시스템인 연료습도에 영향을 주는 여러 환경인자가 기반이 되어야 하며 전국적으로 적용되어야 한다는 점을 강조하고 있다. 또한 산불위험률 시스템은 화재제어 활동계획에 도움을 주는 4개 지수인 인위적 산불발생지수와 번개에 의한 화재발생 지수, 연소지수, 연소물량지수를 제공하여 위험구간을 표시하고 있으며,³⁾ 지표화 연료의 연소에 대한 위험성을 예측하기 위하여 산불의 확산용도 예측으로 개발한 BEHAV 프로그램에서 산불강도를 단위면적당 발생열량(Btu/ft²)으로 정의하여 수량화하는 방법을 제시하는 등의 연구가 진행되고 있다. 이들은 자국에 대한 산불의 식생, 지형, 기상 등 제반 산불관련 인자들을 조사·분석하고 실내의 실험에 의해 기초자료를 축적하며 실제 산불에 대한 응용연구를 통해 체계적이고 과학적인 산불관리 체계를 정립해가고 있다.⁴⁾ 최근에는 산불발생 후에 연료의 감소, 연기발생으로 인한 대기질의 변화에 대한 연구가 진행되고 있다.³⁾ 국내에서는 산불확산예측 프로그램 개발⁵⁾과 환경인자가 산불의 온도 및 연소속도에 미치는 영향⁶⁾에 관한 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 임내가연물의 연소특성에 관한 연구들로 생엽과 생지의 함수량 변화 및 온도변화에 따른 착화성 연구,⁷⁾ 건조한 연료의 열분해시험 연구,⁸⁾ 복사열 25 kW에서의 지표화 연료의 착화시간과 발화온도 측정 연구⁹⁾를 수행하였다. 그러나 임내가연물에 대한 화재위험성을 예측하기 위한 이러한 연구수행은 산불위험지수 산정과 산불의 확산 예측에 있어 매우 중요하나 산불현장에서 측정인력과 장비의 접근이 매우 어려우므로 실내실험을 통해 자료를 수집하는 것이 일반적이다. 또한, 산불의 연소형태를 규명하기 위해서는 많은 실내실험과 현장데이터의 수집이 요구되지만 현재 국내의 현실적인 제반 여건상 자체 실험을 통한 산불의 연소형태의 규명이 어려운 실정이다.¹¹⁾ 따라서, 종합적인 연구는 아직까지 미흡한 실정이며, 산불의 연소매커니즘을 체계적으로 규명하기 위해서는 총체적이

고 다양한 많은 실험들을 통한 화학적 방법에 기초한 연구들이 절실히 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 강원도 영동지역을 중심으로 과거 1996년도에 건국 이후 최대의 산불이라고 했던 고성산불과 1993년 이미 한차례의 불세례를 받은 삼척의 2000년 산불은 경상북도 울진군까지 뻗치는 등의 삼척시 대규모 산불¹²⁾에 따른 산림파괴가 빈번하게 발생함에 따라 영동지역 삼척시의 임상을 파악하였다. 임상 분포는 소나무 단순림이 전체의 78.3%를 차지하고 그 밖에 인공 조립된 리기다소나무, 낙엽송 등의 침엽수림이 약 1.1% 분포하며 활엽수림 및 침활혼효림으로 구성된 임분이 약 14.4%로 나타났으며 바다에 접한 근덕면과 원덕읍 동쪽은 동해의 해안선을 따라 좁은 대상으로 곰솔(*Pinus thunbergii*)림이 나타났으나 대부분 지역은 소나무림이 점유하고 있음을 알 수 있었다.¹³⁾ 따라서, 임상별 대표 수종들 가운데 하나인 소나무와 떡갈나무를 선정하고 각각 주요 부위별로 시료를 채취하여 콘칼로리미터(Cone calorimeter)¹⁴⁾를 사용하여 각각의 시료들에 대한 부위별 착화시간, 총열방출량, 중량감소율, 화염유지시간, CO 및 CO₂ 배출농도 등에 대한 실험을 수행함으로써 소나무와 떡갈나무의 연소특성을 고찰하였으며 콘칼로리미터 시험법 적용은 실제 산불발생 시의 연료의 위험성을 그대로 적용하기 위하여 균일하지 않은 재료의 연소특성을 유지하기 위하여 인위적으로 시편을 제작하지 않고 시료를 원형 그대로를 유지하여 사용하였다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 연소특성 결과들은 실제 산불발생시 연료의 위험성을 잘 나타낼 수 있어 산불피해를 최소화시킬 수 있는 위험평가기준의 기초자료로 충분히 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구에서는 침엽수인 소나무와 활엽수인 떡갈나무를 대상으로 생엽, 낙엽, 가지 및 수피를 채취하여

Table 1. Percentage of Moisture Content for *Pinus Densiflora* and *Quercus Dentata*

부 위	수 종	소나무			떡갈나무		
		함수율(%)	크기(mm)	중량(g)	함수율(%)	크기(mm)	중량(g)
생엽		60.19	원형유지	50	62.70	원형유지	50
낙엽		32.07	원형유지	50	17.93	원형유지	50
가지		53.52	100(길이)	50	29.52	100(길이)	50
수피		22.81	100×100 (가로×세로)	50	19.94	100×50 (가로×세로)	50

함수율을 측정하였으며, 연료의 채취는 강원도 영동지역에서 강우 후 다음날 동일 장소에서 채취하여 함수율을 측정하여 사용하였다. 실험에 사용된 각각의 시료들에 대한 조건은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

2.2.1 함수율측정

연료의 함수율을 측정하기 위하여 원형의 재료를 200 g의 양을 정량하여 OF-12GW의 건조기에 105 °C에서 4시간 단위로 무게에 중량변화가 없을 때까지 건조하여 측정하였으며 3회 측정에 대한 평균치를 함수율값으로 하였다. 함수율 계산은 다음 식 (1)에 의하여 계산하였다. 여기서, MC(Moisture content)는 함수율, W는 건조전 중량, W₀는 완전건조 후 중량이다.

$$MC(\%) = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100(\%) \quad (1)$$

2.2.2 콘칼로리미터 시험

콘칼로리미터 실험의 원리는 산소 1 kg이 소비될 때 13.1 MJ의 열을 방출하는 산소소비원리(Oxygen consumption principle)를 바탕으로 하고 있으며 시편이 연소될 때 연소생성물 흐름속의 산소농도와 유속으로부터 유도된 산소소비량을 측정하여 평가한다. 콘칼로리미터는 수평으로 부착된 복사관에 시편을 노출하여 열방출을 구하는 방법으로 이 장치는 콘 형태의 복사 전기히터, 시편의 질량을 측정하기 위한 무게측정장치, 시편홀더, 산소분석장치, 유량측정장치를 부착한 배출시스템, 스파크 집화회로, 열플럭스미터(Heat flux meter), 교정용 버너 및 데이터 수집 및 분석시스템들로 구성되어 있다.

실험조건은 Table 2에 제시하였으며 시편제작은 원형을 유지한 연료의 중량 50 g을 홀더에 고정하여 시편을 수평방향으로 설치하고 50 kW/m²의 복사열에 1800 s 동안 노출시켰을 때의 착화시간(Time to ignition), 총열방출량(Total heat release), 중량감소율(Mass loss

Table 2. Experimental Conditions of Cone Calorimeter

구성요소	실험	조건
규격(mm)	100×100	(가로×세로)
복사열(kW/m ²)	50	(온도 : 770 °C)
시편 고정	수평	
연소시간(s)	1800	
연소 분위기	공기	

rate), 화염유지시간, CO 및 CO₂ 농도를 측정하였다. 실험 횟수는 시험편에 대해 3회 시험을 실시하고 시험 결과를 기록하였으며 3회의 실험을 통해 얻어진 값을 평균해서 사용하였다. 열방출율과 단위면적당 열방출율, 중량감소율은 식 (2)~(8)을 이용하여 실험시간 동안 모든 데이터가 수집되며 분석시스템에서 자동 기록된다.

$$\dot{q}(t) = (\Delta h_c / r_o)(1.10) C \sqrt{\frac{T_c}{\Delta P}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \quad (2)$$

- 여기서 \dot{q} : 열방출율(kW)
- Δh_c : 순수연소열(kJ/kg)
- r_o : 화학양론적 산소 대 연료 질량비($\Delta h_c / r_o$ 는 NFPA Handbook을 참조하고 정확한 값을 알고 있지 못하면 13.1×10³ kJ/kg으로 설정한다)
- C : 산소소비량 보정상수(m^{1/2}kg^{1/2}K^{1/2})
- ΔP : 오리피스 압력차(Pa)
- T_c : 오리피스에서의 기체의 절대온도(K)
- X_{O_2} : O₂의 몰분율에 대한 산소분석기 눈금 판독값
- $X_{O_2}^0$: 산소분석기 눈금의 초기값
- 1.10 : 공기와 산소분자량 비율

$$\dot{q}_A(t) = \dot{q}(t) / A_s \quad (3)$$

- 여기서 \dot{q}_A : 단위면적당 열방출율(kW/m²)
- A_s : 실험편의 초기 노출면적(m²)

$$-[\dot{m}]_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t} \quad (4)$$

$$-[\dot{m}]_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t} \quad (5)$$

$$-[\dot{m}]_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \quad (6)$$

$$-[\dot{m}]_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (7)$$

$$-[\dot{m}]_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 임상별 대표수종인 소나무와 떡갈나무를 대상으로 낙엽, 생엽, 가지 및 수피 부위에 대한 연소특성 실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

3.1 소나무의 부위별 열적특성

소나무 부위별 중량변화와 착화시간, 착화시간과 자연소화시간에 따른 화염유지시간을 측정하여 연소특성을 고찰하였으며, 열방출량 측정을 통한 발열량 특성과 연소가스인 CO 및 CO₂ 발생에 대한 농도특성을 알아보았다.

3.1.1 연소특성

Figure 1에는 부위별 실중량 50 g에 대한 시간변화에 따른 중량변화 곡선을 나타내었고 Figure 2에는 시간변화에 따른 중량감소를 곡선을 나타내었다. Figure 1에서 총중량감소가 가장 큰 부위는 그림에 나타나듯이 49.45 g의 중량감소를 보인 가지부위였으며, 생엽 48.88 g, 수피 48.66 g, 낙엽 44.05 g과 같은 순서로 총중량감소량이 나타났다. 가지부위의 경우는 초기에 중량감소가 가장 크고 빠르게 진행되었으며 800 s 이후에는 중량감소가 거의 나타나지 않았는데 낙엽과 수피는 중량감소가 1,800 s까지 대체로 느리게 중량감소가 진행되었다. Figure 2의 중량감소율 곡선에서 최대중량감소율은 가지는 405 s에서 0.126 g/s, 낙엽은 70 s에서 0.123 g/s, 생엽은 70 s에서 0.112 g/s, 수피는 305 s에서 0.092 g/s로 나타났으며 평균 중량감소율은 총중량감소량을 시험시간으로 나눈 값으로 가지는 0.027 g/s, 생엽

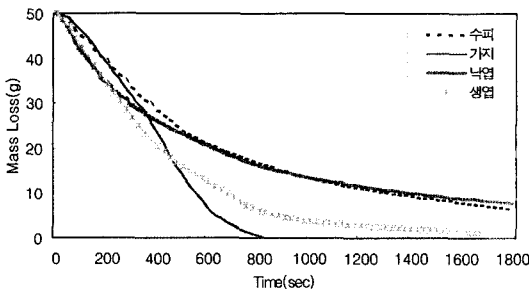


Figure 1. Mass loss of pinus densiflora.

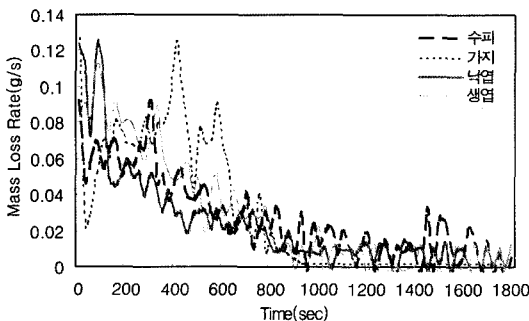


Figure 2. Mass loss rate of pinus densiflora.

0.026 g/s, 수피 0.024 g/s, 낙엽 0.023 g/s의 순으로 나타났다. 부위별 착화시간은 복사열에 노출된 실험재료가 착화에 충분한 양의 가연성 증기를 발생시켰을 때 콘칼로리미터에 설치된 스파크 점화기의 불꽃에 의해 착화되어 10초 이상 불꽃연소를 지속하게 되는 시간을 말하며 Table 3에 제시한 바와 같이 낙엽 9 s, 수피 20 s, 생엽 49 s, 가지 350 s 순서로 부위별로 많은 시간차이가 나타났으며 착화시간은 낙엽이 9 s로서 가장 빠르게 나타났고 가지는 350 s 정도로 가장 늦게 착화되었다. 착화 후 자연소화 되기까지의 화염 유지시간은 재료가 복사열에 노출되면서 착화가 일어나는 시간과 착화가 종료될 때의 시간 즉 자연소화 될 때까지의 시간을 말하며 화염 유무를 육안으로 판단하여 분석시스템에 기록하여 확인하였으며 화염유지시간은 Table 3에 제시한 바와 같이 수피 1016 s, 낙엽 927 s, 가지 261 s, 생엽 52 s로서 부위별 시간차이가 크게 나타났으며 수피가 가장 오랜 시간 화염을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 함수율에 따른 착화특성은 건조한 낙엽이 생엽과 비교하여 착화시간이 40 s 빠르게 나타났으며 화염이 유지되는 시간은 875 s 더 지속되는 것으로 나타났다. 자연소화시간은 함수율이 높은 생엽이 낙엽보다 835 s 빠르게 소화되는 것으로 나타났으며 중량감소는 함수율이 높은 생엽이 중량감소가 큰 것으로 나타났다. 따라서, 함수율이 낮으면 착화시간이 빠르고 화염유지 시간이 길어지며 그만큼 연소가 빠르게 진행되어 화재발생 시, 연소의 확대가 빠르게 진행되는¹⁵⁾ 반면 함수율이 높은 연료의 경우 착화가 늦고 화염유지시간이 짧게 나타나는 경향을 보이며 화염이 종료된 후에도 부위별 중량감소 현상이 나타났다. 연소 후 잔류물은 총중량감소가 가장 적은 낙엽이 5.98 g 정도로 가장 많이 발생하였다.

Table 3. Characteristic of Combustion for Pinus Densiflora

연소특성	부위				
	낙엽	생엽	가지	수피	
초기 중량(g)	50	50	50	50	
최종 중량(g)	재(회분)	1.87	0.62	0.43	0.77
	탄화	4.11	0.50	0.12	0.57
평균중량감소율(g/s)	0.023	0.026	0.027	0.024	
최대중량감소율(g/s)	0.123	0.112	0.126	0.092	
최대중량감소시간(s)	70	70	405	305	
착화시간(s)	9	49	350	20	
자연소화시간(s)	936	101	611	1,036	
화염유지시간(s)	927	52	261	1,016	

3.1.2 발열량 특성

Figure 3에는 부위별 시료들 중량 50 g을 대상으로 시간변화에 따라 연소로 인해 방출된 열방출량 곡선으로 총방출열량을 나타내었다. 총방출열량은 시료 표면 적당 시간에 대한 함수로 표현되는 열방출율을 주어진 시간을 적분하여 누적된 값으로 구하였다. 낙엽은 63.0 MJ/m², 수피 59.9 MJ/m², 가지 47.27 MJ/m², 생엽 22.8 MJ/m²로 나타남으로써 낙엽과 수피부위의 총열방출량이 대체로 높게 나타났으며 총열방출량이 가장 높은 낙엽은 가장 낮은 생엽보다 2.76배 높게 나타났다. Table 4에는 평균열방출율을 제시하였으며 평균열방출율은 총열방출량을 시험시간으로 나눈 값으로 kW/m², 낙엽 35.03 kW/m², 수피 33.29 kW/m², 가지는 26.26, 생엽 13.09 kW/m² 순으로 나타나 낙엽이 평균열방출율이 가장 높게 나타났다. 따라서 초기에 중량감소가 급격히 진행된 가지의 평균열방출율이 가장 높게 나타났는데 이는 초기에 열분해가 급격하게 진행되어 많은 양의 열을 방출하면서 연소하기 때문인 것으로 사료된다.¹⁶⁾ Figure 4는 시간변화에 따른 열방출을 곡선으로 시료 표면적당 발생하는 열량의 크기로 나타나며 최대열방출율은 재료 표면적당 발생한 순간적인 열량의 크기인데 낙엽이 143.3 kW/m²으로 가장 빠른 시간에 가장 높게 나타남을 알 수 있었으며 생엽은 37.62 kW/m²으로 가장 낮게 나타남으로써 낙엽과는 3.81배의 차이를 보였다. 최대열방출시간은 최대열방출율이 나타나는 시간을 나타내며 낙엽이 60 s에서 가장 빠르게 나타났다.

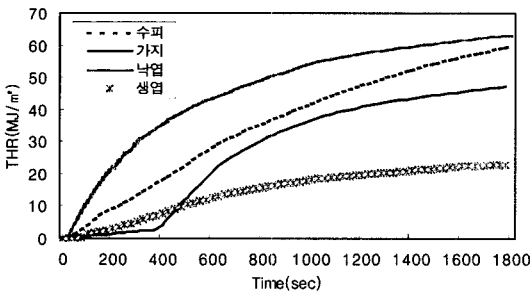


Figure 3. Total heat release of pinus densiflora.

Table 4. Characteristics of Heat Release for Pinus Densiflora

연소특성	부위	낙엽	생엽	가지	수피
총방출열량(MJ/m ²)		63.0	22.8	47.27	59.9
평균열방출율(kW/m ²)		35.03	13.09	26.26	33.29
최대열방출율(kW/m ²)		143.3	37.62	94.65	65.57
최대열방출시간(s)		60	80	450	95

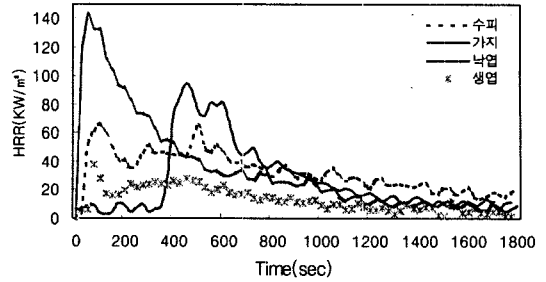


Figure 4. Heat release rate of pinus densiflora.

3.1.3 연소가스 CO 및 CO₂

Figure 5과 6에는 부위별 중량 50 g의 시료들을 대상으로 착화 후 연소가 지속되는 시간변화에 따른 CO와 CO₂의 배출농도 변화를 나타내었다. 부위별 CO의 최대농도는 85.56~135.9 ppm 정도인 것으로 나타났으며 생엽 135.9 ppm, 수피 134.80 ppm, 가지 134.5 ppm, 낙엽 83.70 ppm의 순으로 나타났다. 또한, CO₂의 부위별 최대농도는 1,611.02~2,997.13 ppm 정도인 것으로 나타났으며 낙엽 2,997.13 ppm, 가지 2,495 ppm, 수피 1,611.02 ppm, 생엽 1,192.06 ppm의 순으로 나타났다.

Table 5. Concentrations of the Effluent Gases for Pinus Densiflora

연소특성		부위	낙엽	생엽	가지	수피
CO 농도	평균(kg/kg)		0.0663	0.0555	0.0364	0.781
	최대(ppm)		85.56	135.9	134.5	134.8
	최대농도시간(s)		1125	300	700	800
CO ₂ 농도	평균(kg/kg)		1.65	1.02	1.04	1.54
	최대(ppm)		2997.1	1192.06	2495	1611.0
	최대농도시간(s)		125	150	450	175

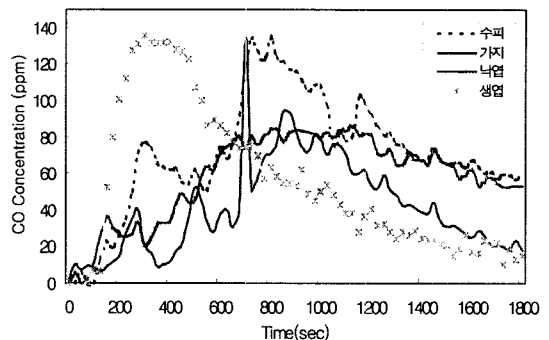


Figure 5. CO concentration of pinus densiflora.

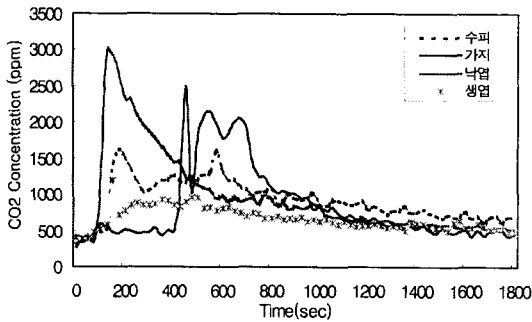


Figure 6. CO₂ concentration of pinus densiflora.

3.2 떡갈나무의 열적특성 결과 및 고찰

떡갈나무의 부위별 중량변화와 착화시간, 착화시간과 자연소화시간에 따른 화염유지시간을 측정하여 연소특성을 고찰하였고 열방출량 측정을 통하여 발열량 특성과 CO 및 CO₂ 발생에 대한 농도특성을 살펴보았다.

3.2.1 연소특성

Figure 7에는 부위별 중량 50g에 대한 중량변화 곡선을 나타내었고 Figure 8에는 시간변화에 따른 중량감소율 곡선을 나타내었다. Figure 7의 중량 50g에 대하여 총중량감소량이 가장 많은 부위는 소나무와 마찬가지로 48.9g의 중량감소를 보인 가지인 것으로 나타났다으며, 수피 47.89g, 생엽 47.78g, 낙엽 42.74g 순서로 총중량감소량이 나타났다. 가지의 경우 소나무와 마찬가지로 초기에 중량감소가 가장 크게 나타남을 알 수 있었으며 건조한 낙엽의 경우 중량감소가 다른 부위보다 느리게 진행되었다. Figure 8의 중량감소율 곡선에서 중량감소율이 최대일 때는 가지는 405s에서 0.126 g/s, 낙엽은 70s에서 0.123 g/s, 생엽은 70s에서 0.112 g/s, 수피는 350s에서 0.092 g/s로 나타났으며 평균중량감소율은 가지 0.027 g/s, 수피 0.025 g/s, 수피 0.025 g/s, 낙엽 0.023 g/s인 것으로 나타났다. 부위별 착화시간은 Table 6에 제시한 바와 같이 낙엽 9s, 생엽 59s, 수피 106s, 가지 302s 순서로 나타나 부위별로

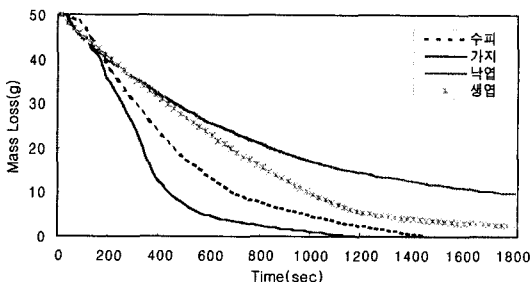


Figure 7. Mass loss of quercus dentata.

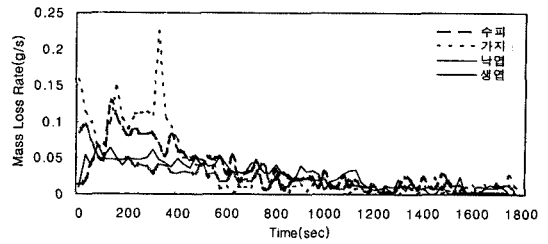


Figure 8. Mass loss rate of quercus dentata.

Table 6. Characteristics of Combustion for Quercus Dentata

연소특성	부위	낙엽	생엽	가지	수피
	초기 중량(g)	50	50	50	50
최종 중량(g)	재(회분)	2.26	1.11	1.02	2.11
	탄화	5.0	1.11	0.08	0
평균중량감소율(g/s)	0.023	0.025	0.027	0.025	
최대중량감소율(g/s)	0.094	0.068	0.224	0.125	
최대중량감소시간(s)	15	60	325	115	
착화시간(s)	9	59	312	103	
자연소화시간(s)	996	94	630	743	
화염유지시간(s)	987	35	318	640	

많은 시간차이를 보였으며 소나무와 마찬가지로 낙엽의 착화시간은 9s 정도로 가장 빠르게 착화되었고 가지는 302s 정도로 가장 늦게 착화되었다. 함수율이 높은 생엽은 낙엽에 비하여 착화가 늦고 화염유지시간이 짧게 나타나는 경향을 보이며 착화 전과 화염이 종료된 후에도 부위별 중량감소 현상이 나타났다. 이러한 결과는 연료의 함수율에 따른 조직형태와 두께에 따라 나타나는 결과라 사료된다. 착화 후 자연 소화되까까지의 화염유지시간을 살펴보면 Table 6에 제시한 바와 같이 낙엽 987s, 수피 640s, 가지 318s, 생엽 35s인 것으로 나타남으로써 부위별로 많은 시간차이를 보였으며 건조한 낙엽이 가장 오랜 시간동안 화염을 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 함수율에 따른 착화 특성은 소나무와 마찬가지로 건조한 낙엽이 생엽과 비교하여 착화시간이 50s 빠르게 나타났으며 925s 더 지속되는 것으로 나타났다. 자연소화시간은 함수율이 높은 생엽이 낙엽보다 902s 빠르게 소화되는 것으로 나타났다. 따라서, 함수율이 낮으면 착화시간이 빠르고 화염이 지속되는 시간이 길어지며 반면 함수율이 높은 연료의 경우는 착화가 늦고 화염유지시간이 짧게 나타나는 경향을 보이며 연소가 서서히 진행되는 것을 알 수 있다. 또한, 활엽수와 침엽수와의 산불위험성 비교

분석 연구로 침엽수가 화염이 지속되어 유지되는 시간이 비교적 길게 나타난다고 연구 보고⁹⁾된 바에 따라 활엽수의 떡갈나무가 침엽수의 소나무보다 부위별 화염지속시간이 짧은 것으로 나타났으나 가지 부위는 오히려 소나무보다 화염이 지속되는 시간이 긴 것으로 나타났다. 이러한 결과는 24% 정도의 함수율 차이와 연료의 두께와 굵기의 차이에 따라 나타나는 결과라 사료된다. 연소 후의 잔류물의 발생량은 소나무와 마찬가지로 총중량감소량이 가장 적은 낙엽이 7.26 g 정도로 가장 많이 발생하였고 떡갈나무는 소나무와 비교하여 모든 부위에서 잔류물의 발생량이 1.2~2.0배 정도 더 높은 것으로 나타났다.

3.2.2 발열량 특성

Figure 9과 Table 7에는 부위별 시간변화에 따라 나타나는 열방출량 으로서 중량 50 g에 대하여 방출된 총 열량을 나타내었다. 수피는 59.7 MJ/m², 낙엽은 57.2 MJ/m², 가지 52.03 MJ/m², 생엽 24.1 MJ/m²의 순으로 소나무와 마찬가지로 수피와 낙엽의 총열방출량이 대체로 높게 나타났으며 소나무와 비교하여 생엽과 수피는 큰 차이가 없었고 가지는 소나무보다 오히려 총열방출량이 1.56배 정도 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 연료의 함수율 차이에 기인한 결과로 사료되며 Table 1에 제시한 부위별 함수율을 살펴보면, 소나무의 가지보다 떡갈나무 가지의 함수율이 1.80배 정도 높은 것을 알 수 있다. 따라서 건조한 연료의 경우

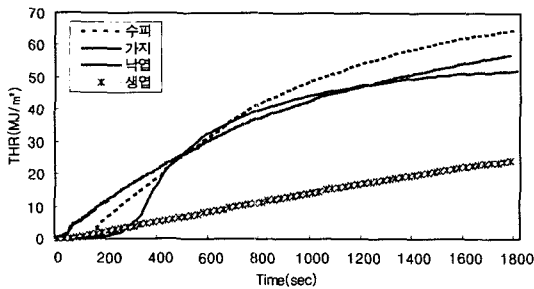


Figure 9. Total heat release of quercus dentata.

Table 7. Characteristic of Heat Release for Quercus Dentata

연소특성	부위	낙엽	생엽	가지	수피
총방출열량(MJ/m ²)		57.2	24.1	25.03	59.7
평균열방출율(kW/m ²)		32.14	13.90	28.91	33.17
최대열방출율(kW/m ²)		100.40	23.08	226.66	85.54
최대열방출시간(s)		30	130	330	120

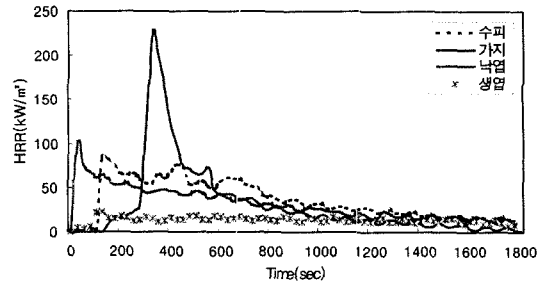


Figure 10. Heat release rate of quercus dentata.

대체로 총열방출량이 높게 나타남을 알 수 있다.

평균열방출율은 Table 7에서 볼 수 있듯이 가지는 28.91 kW/m², 수피는 33.17 MJ/m², 낙엽은 32.14 MJ/m², 생엽 13.90 MJ/m²의 순으로 나타났으며 초기에 중량감소가 급격히 진행된 수피의 평균열방출율이 가장 높게 나타났는데 소나무와 마찬가지로 비교적 초기에 열분해가 급격하게 진행되어 많은 양의 열을 방출하면서 연소하기 때문인 것으로 사료된다.¹⁶⁾ Figure 10은 시간변화에 따른 열방출을 곡선으로 시료 표면적당 발생하는 열량의 크기를 나타내며 최대열방출율은 가지가 226.66 kW/m²으로 가장 높게 나타났으며 최대열방출율이 가장 작은 낙엽과는 9.82배 정도의 차이가 나타났다. 최대열방출율에 대한 결과값들을 Table 7에 제시하였다.

3.2.3 연소가스 CO 및 CO₂

Figure 11와 12에는 부위별 중량 50 g의 시료들을 대상으로 착화 후 연소가 지속되는 시간변화에 따른 CO와 CO₂의 배출농도 변화를 나타내었으며, Table 8에는 결과값 들을 정리하여 제시하였다. 부위별 CO의 최대농도는 63.65~424.61 ppm의 구간에서 나타났으며 가지는 424.61 ppm, 낙엽 90.42 ppm, 수피 83.43 ppm, 생엽 63.65 ppm 정도인 것으로 나타났다. 또한, CO₂의 부위별 최대농도는 689.04~4,533.28 ppm의 구간에서 나타났으며 가지 4,533.28 ppm, 낙엽 1,842.32 ppm, 수

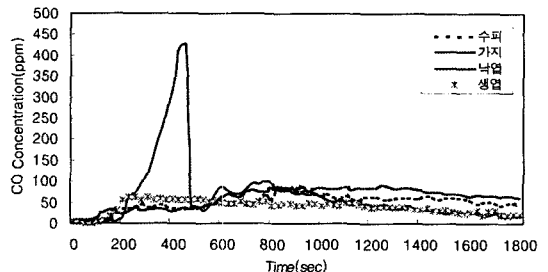


Figure 11. CO concentration of quercus dentata.

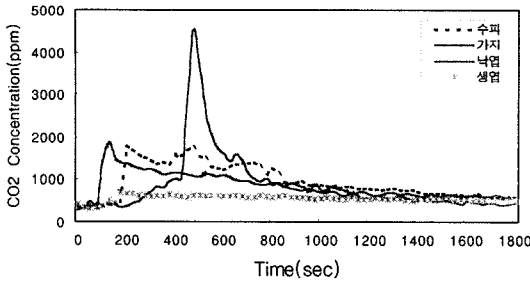


Figure 12. CO₂ concentration of quercus dentata.

Table 8. Concentrations of the Effluent Gases for Quercus Dentata

연소특성		부위	낙엽	생엽	가지	수피
CO 농도	평균(kg/kg)		0.0741	0.0437	0.0654	0.0425
	최대(ppm)		90.42	63.65	424.61	83.43
	최대농도시간(s)		1250	225	450	850
CO ₂ 농도	평균(kg/kg)		1.59	0.92	1.89	1.31
	최대(ppm)		1842.3	689.04	4533.28	1797.7
	최대농도시간(s)		125	175	475	200

피 1,797.68 ppm, 생엽 689.04 ppm 정도인 것으로 나타났다.

4. 결 론

1) 소나무와 떡갈나무의 부위별 열적특성 결과로는 소나무와 떡갈나무 모두 건조한 낙엽의 착화시간이 가장 빠르게 나타났고 가지의 착화시간이 가장 늦게 나타남을 알 수 있었다. 화염 유지시간은 소나무와 떡갈나무 모두 수피와 낙엽의 화염유지시간이 대체로 길게 나타남을 알 수 있었다. 총중량감소량은 함수율이 높은 생엽과 수피가 초기에 중량감소가 급격히 진행되었으며 이는 연료가 두께와 굵기에 따른 조직이 열분해에 의한 중량감소 보다 연료가 복사열에 노출되어 착화가 시작되기 전과 화염이 종료된 후에도 수분에 의한 중량감소가 크게 작용하기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 소나무와 떡갈나무의 부위별 총중량감소량은 떡갈나무보다 소나무의 총중량감소량이 크게 나타남을 알 수 있었으며 부위별 건조한 연료일수록 착화시간은 빠르고 화염유지시간이 길게 나타남을 알 수 있었다.

2) 발열량 특성에 대한 부위별 결과로서 총열방출량이 가장 높게 나타난 부위는 소나무의 낙엽으로서 생엽보다 2.76배 정도 높게 나타났으며, 떡갈나무 역시

낙엽의 총열방출량이 생엽보다 2.37배 정도 높게 나타났다. 따라서 소나무와 떡갈나무 모두 생엽보다 낙엽의 총열방출량이 높게 나타났으며, 건조한 연료의 경우 대체로 착화가 빠르고 화염유지시간이 길게 나타남으로써 열방출량이 높은 것으로 나타났다. 또한, 임상별로는 활엽수인 떡갈나무보다 침엽수인 소나무가 가지를 제외한 나머지 부위에서는 총열방출량이 높게 나타남을 알 수 있었다.

3) CO 및 CO₂ 배출농도에 대한 결과로는 떡갈나무 가지의 CO 최대농도가 가장 높게 나타났으며 소나무의 가지보다 3.16배 정도 높게 나타났으며 CO₂ 최대농도 또한 떡갈나무의 가지가 소나무보다 1.82배 정도 높게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 이창우, 김정환, 현성호, "Polyurethane foam의 유해가스 분석에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.15, No.1, pp.61-67(1999).
2. 정주상, 이병두, 김형호, "GIS 및 판별분석에 의한 삼척산불지역의 소나무임분 피해도 추정", 한국임학회 논문지, Vol.91, No.3, pp.355-361(2002).
3. 이시영, "외국의 산불방지시스템, 국립산림과학원 방재특집", Vol.6, No.4, pp.25-33(2004).
4. 이병두, 정주상, 김형호, 이시영, "GIS 응용에 의한 2000년 삼척산불의 확산속도 분석", 한국임학회 논문지, Vol.90, No.6, pp.781-787(2001).
5. 김웅식, 이시영, 임효재, 김홍, 송중훈, 김수영, "유동장 해석을 통한 산불확산예측 프로그램 개발", 한국임학회 논문지, Vol.87, No.4, pp.52-54(1998).
6. 이시영, "환경인자가 산불의 온도 및 진행속도에 미치는 영향", 동국대학교 석사학위논문(1990).
7. 김관수, 장인수, 박인돈, 김수정, "고온로의 가열온도에 대한 리기다 소나무와 일본 잎갈나무 생엽과 생지의 연소온도 변화", 한국생태학회 논문지, Vol.18, No.3, pp.333-340(1995).
8. 김동현, 고재선, 최세환, 김광일, "고성산불지역에서의 화재조사와 주요수목의 열량분석에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.13, No.1, pp.31-33(1999).
9. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, "지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석", 한국방재학회 추계학술발표지, pp.379-384(2006).
10. 박형주, 김웅식, 김장환, 김동현, "복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석", 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.3, pp.41-46(2007).
11. KS F 2271 : 건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법(1998).
12. 임주훈, "동해안 대형산불과 산불피해지의 식생회복",

- 삼립과학원, 숲과문화 기획연구, Vol.10, No.2, pp.22-23(2001).
13. 임주훈, 신수철, 이시영, 김명수, 오정수, “산불피해임분의 맹아특성을 이용한 내화수림대 조성”, 한국산림자원측정학회, 학술발표회, pp.6-7(2002).
 14. ISO 5660-1, “Reaction to Fire Part 1, Rate of Heat Release from building products(Cone Calorimeter), Generer(1993).
 15. 강성동, 이창우, 현성호, 윤명오, “다중이용시설 바닥 마감재의 연소가스 독성평가에 관한 실험 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.16, No.1, pp.20-21(2002).
 16. 이근원, 김관웅, “콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.17, No.1, pp.76-83(2003).