

영동지역 교목 수종의 연소특성에 관한 연구

박영주 · 이시영 · 김수영 · 원윤범* · 한태진* · 이해평*

강원대학교 방재기술전문대학원, 강원대학교 소방방재학부*

Characteristics of Combustion for Living Leaves of Various Trees in Youngdong Area

Park, Young Ju · Lee, Si Young · Kim, Su Young · Won, Youn Bum* ·
Han, Tae Jin* · Lee, Hae Pyeong*

Professional Graduate School of Disaster Prevention Technology,
Kangwon National University, School of Fire & Disaster Prevention, Kangwon
National University*

1. 서 론

산불화재는 임내 가연물로부터 발화가 개시되어 대형화재로 발달하기 까지 초기의 화염이 주위로 전파되는 과정을 반드시 거친다. 이러한 화염의 전파는 산소농도(%)의 미미한 변화에 민감하게 반응하며 화재강도에 영향을 미치는 열방출율과 연소성, 발연성, 발생가스 등은 매우 중요한 의미를 갖게 된다(심중섭, 1994). 목재의 연소는 분해연소를 갖는다. 즉 목재의 주성분인 셀룰로오즈($C_6H_{10}O_5$)_n와 리그닌(C : 60~65, H₆, O : 30~35%)이 가열에 의해서 열분해를 일으키며 열분해 생성물은 260℃ 부근에서 맹렬하게 되고 적당한 열에너지가 있으면 목재는 인화한다. 더욱이 가열온도가 400~460℃로 되면 점화원 없이도 발화하게 된다. 목재의 고온 성상으로 분해성 가스 속에 CO, H₂, C_nH_m 등의 가연성 가스와 분해탄소나 공기 중의 O₂와 화합해서 연소하게 되며 이때 점화원(열에너지)을 받으면 상단부의 가연성 증기와 공기의 혼합체가 발열 연소하는 경우를 인화라고 하며 열에너지가 많은 재료의 고체 표면에 착화하는 경우를 발화라고 한다. 이처럼 한 곳에서 발생한 화염이 주위의 연료에 열을 전달하여 연료의 표면온도를 상승시킴으로써 점화온도 이상으로 이르게 되어 연료의 표면온도가 점화온도보다 높아지게 되면 급격한 열분해가 일어나서 연료가스가 발생하게 되고 많은 열량을 방출하는 화염을 이루게 되어 큰 화재로 발전하게 된다(김진국, 1996).

따라서 본 연구에서는 영동지역에서 자생하는 교목 수종들 가운데 가래나무, 오리나무, 신갈나무, 단풍나무 4가지 수종의 생엽을 대상으로 연소 개시로부터 화재발달에 미치는 여러 연소특성들을 고찰하고자 콘칼로리미터와 연기밀도시험, 발화온도 측정기를 이용하여 각 수종에 대하여 연소특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 실험연료

본 연구에 사용된 실험연료는 강원도 영동지역에서 자생하는 수종을 선정하였으며 선정기준은 주요 분포 수종으로서 가래나무, 오리나무, 신갈나무, 단풍나무 4가지 수종의 생엽을 선정하여 Table 1에 제시하였다. 연료의 형태는 실제 산불발생 시 연료와 동일한 조건을 적용하기 위하여 원형상태로 사용하였다.

Table 1. Percentages of Moisture Contents for Living Leaves

Species	Moisture Contents(%)
가래나무(<i>Juglans mandshurica</i>)	196.24
오리나무(<i>Alnus japonica</i>)	169.17
신갈나무(<i>Quercus mongolica</i>)	143.85
단풍나무(<i>Acer palmatum</i>)	210.10

2.2 실험방법

2.2.1 함수율 측정

연료의 함수율을 측정하기 위하여 생엽 200g을 취하여 105℃ 온도를 유지하도록 설정한 건조기 내에서 24시간 이상 건조시킨 후, 항량이 될 때까지 중량을 측정하여 함수율을 측정하였으며, 항량 측정 기준은 4시간 간격으로 무게를 측정하였을 때, 0.1%의 무게변화가 없을 때로 하여 측정하였다. 함수율은 다음 식(1)에 의하여 산출하였으며(김진국, 1996), 여기서, MC(moisture content)는 함수율[%], W는 건조 전 시료의 중량[g], W₀은 완전 건조시킨 시료의 중량[g]을 나타낸다.

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

2.2.2 화염전파특성, 연소생성물, 가시거리에측 분석

Table 2. Experimental Conditions of Cone Calorimeter and Smoke Density Chamber

Items	Cone calorimeter	Smoke density chamber
Size(mm)	100×100	75×75
Weight(g)	50	10
Heat flux(kW/m ²)	25, 50, 75	25
Test time(s)	1,800	1,200
Material condition	Raw	Raw

영동지역에서 자생하는 주요 교목류 수종인 가래나무, 오리나무, 신갈나무, 단풍나무에 대하여 산불발생시 연료의 화재강도 예측을 위한 연소특성을 고찰하기 위하여 영국 FTT사의 콘칼로리미터(Dual Cone Calorimeter)(ISO 5660-1, 1993)와 연기밀도(Smoke Density Chamber)(ASTM E 662, 1993)시험기를 이용하여 화염전파특성과 연소생성물,

가시거리 예측을 위한 발연특성 분석을 하였으며 실험조건은 Table 2에 제시하였다.

2.2.3 착화특성 분석

착화특성 분석을 위한 실험방법으로 일본 Kuramochi사의 모델명 KRS-RG-9000의 Group식 발화점 시험기(홍윤명, 1992)와 Cone calorimeter tester를 적용하여 발화온도, 착화시간, 화염유지시간을 측정하였다. 발화온도 측정 시, 발연의 확인은 육안에 의해 판단하고, 발화대기 시간은 4s로써 착화원 없이 물질이 자연발화 할 때의 최저온도로 측정되며 발화이론에서는 이때가 열의 발생속도와 확산속도가 평형을 나타내는 점으로 정의된다. 실험조건은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Experimental Conditions of Ignition Temperature

Items	Contents
Model	KRS-RG-9000
Method of measurement	Group
Weight	20mg
Condition of material	Raw
Waiting time of Ignition(s)	4

3. 결과 및 고찰

3.1 화염전파 특성

3.1.1 발열량 및 산소소모량 분석

Fig. 1에는 교목류 수종인 가래, 오리, 신갈, 단풍나무의 생엽에 대한 열방출율 곡선을 나타내었으며 Fig. 2에는 총열방출량 곡선을 나타내었다. Fig. 1의 열방출율은 수종간 큰 차이는 없는 것으로 나타났으나 신갈나무의 경우 최대열방출율에 도달한 시간이 105s로 다른 수종에 비하여 짧은 것으로 나타났다.

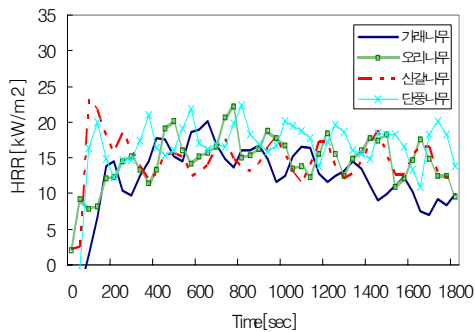


Fig. 2. Heat release rate for living leaves of various trees.

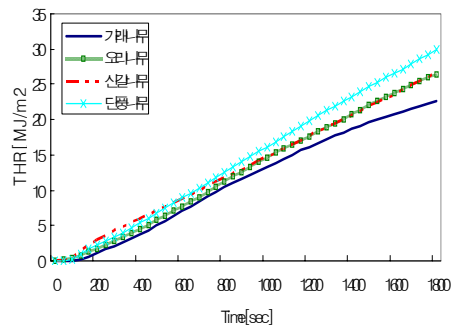


Fig. 3. Total heat release for living leaves of various trees.

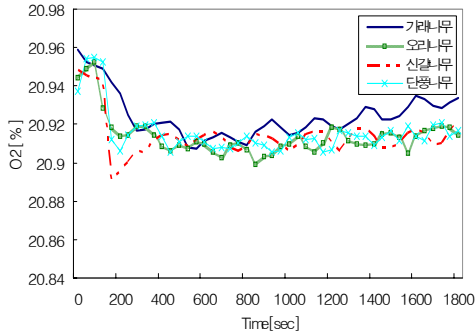


Fig. 4. Oxygen concentration for living leaves of various trees.

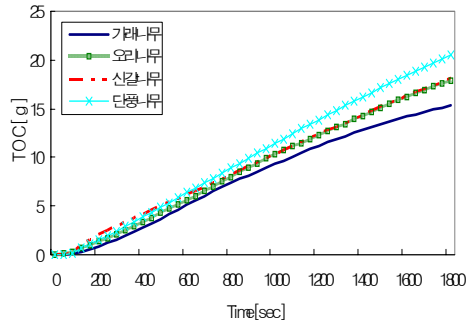


Fig. 5. Total oxygen Consumption amount for living leaves of various trees.

이러한 결과는 화재 발생시 단시간에 연소가 용이하여 화재가 커진다는 것을 의미한다. 평균열방출율은 가래나무 12.50kW/m², 오리나무 14.69kW/m², 신갈나무 15.15kW/m², 단풍나무 17.17kW/m²로 나타나 12.5kW/m²~17.2kW/m²사이인 것으로 나타났다. 이에 대하여 Table 3에 제시하여 나타내었다. Fig. 2의 총열방출량은 23MJ/m²~30 MJ/m²정도의 열량을 방출하는 것으로 나타났으며 총열방출량 역시 평균열방출량이 가장 높은 단풍나무가 29.87MJ/m²로 가장 높은 것으로 나타났다. Fig. 3에는 시간변화에 따른 산소소모량 곡선을 나타내었으며 Fig. 4에는 총산소소모량을 나타내었다. Fig. 3의 산소소모량은 그래프 기울기가 발열량과 동일영역에서 변하여 발열량과 상관관계가 있음을 알 수 있으며 Fig. 4의 총산소소모량은 가래나무 20.91g, 오리나무 26.65g, 신갈나무 18.14g, 단풍나무 20.90g의 산소가 소모됨을 알 수 있었다.

Table 4. Characteristics of Flame Spread for Living Leaves of Various Trees

Items		가래나무	오리나무	신갈나무	단풍나무
Heat release rate	Mean(kW/m ²)	12.50	14.69	15.15	17.17
	Peak(kW/m ²)	20.48	22.73	28.36	22.65
	At time(s)	570	755	105	665
Total heat release(MJ/m ²)		22.6	26.5	26.45	29.87
Oxygen concentration Peak(%)		20.91	20.90	20.89	20.90
Total oxygen consumed(g)		15.32	17.9	18.14	20.51

3.1.2 유효연소열량 분석

Table 5에는 유효연소열량 값을 나타내었다. 유효연소열량은 단위질량의 재료가 연소함으로 인하여 발생된 열량으로 표현되며 연소로인해 방출된 열량과 질량손실로부터 계산된다. 산소소비열량계의 의해 측정된 유효연소열량 값으로 최대 유효연소열량은 신갈나무가 79.04MJ/kg로 가장 높은 것으로 나타났으나 평균유효연소열량은 가래나무 4.15MJ/kg, 오리나무 4.7MJ/kg, 신갈나무 5.14MJ/kg, 단풍나무 5.96MJ/kg으로 나타났으며 수중간 큰

차이는 없는 것으로 나타났다.

Table 5. Effective Heat of Combustion Living Leaves of Various Trees

Item		가래나무	오리나무	신갈나무	단풍나무
Effective Heat of Combustion (MJ/kg)	Mean	4.15	4.7	5.14	5.96
	Peak	78.06	62.731	79.04	60.08
	at time	1,260	1,585	1,450	1,545

3.2 발연량 특성

Fig. 5에는 교목류 4가지 수종인 가래나무 오리나무, 신갈나무, 단풍나무에 대하여 시간변화에 따른 총연기방출량을 나타내었으며 Fig. 6에는 연기온도변화 곡선과 Fig. 7에는 최대연기밀도를 나타내었다. 총연기방출량은 가래나무 170.4m³/m², 오리나무 298.8m³/m², 신갈나무 113.65, 단풍나무222.75m³/m²으로 나타났으며 오리나무가 총연기방출량이 가장 높은 것으로 나타났으며 오리나무는 총연기방출량이 가장 낮은 것으로 나타난 신갈나무보다 2.63배 높은 연기를 방출하는 것으로 나타났다. 연기온도는 334K~340K사이로 나타났으며 최대연기밀도는 가래나무 106.81Ds, 오리나무 178.41Ds, 신갈나무 174.66Ds, 단풍나무 149.23Ds로 나타나 오리나무와 신갈나무는 가래나무와 단풍나무보다 연기를 많이 방출하는 것으로 나타났으며 신갈나무는 최대연기밀도에 다다른 시간이 880s로 연기노출 위험성이 가장 높은 것으로 나타났다. 이에 대한 결과를 Table 6에 제시하였다.

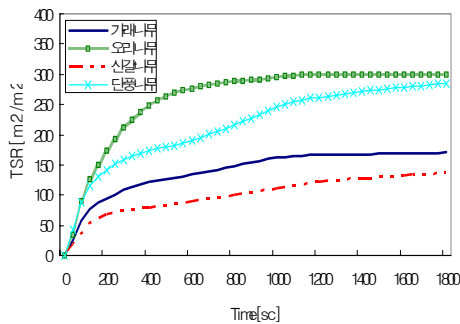


Fig. 6. Total smoke release of Various Arbor.

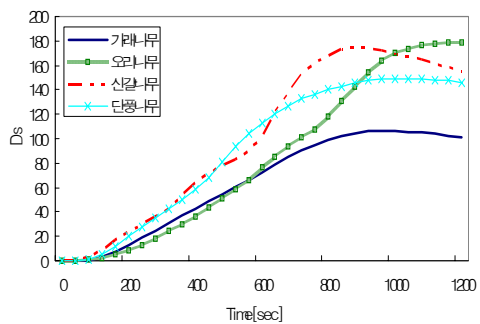


Fig. 7. Smoke density of Various Arbor.

Table 6. Characteristics of Smoke Release for Living Leaves of Various Trees

Items	가래	오리	신갈	단풍
Total Smoke Release(m ³ /m ²)	170.4	298.8	113.65	222.75
Peak Smoke Temp.(K)	340.00	340.28	343.71	334.22
Max. Smoke Density	106.806	178.41	174.66	149.23
Max. Ds Time	960	1,160	880	1,040

3.3 연소생성물 특성

Table 5에 수종별 중량 50g에 대한 시간변화에 따른 연소생성물인 CO와 CO₂의 방출 농도를 나타내었다. 수종별 CO 평균방출농도는 가래나무 0.03kg/kg, 오리나무 0.04kg/kg, 신갈나무 0.05kg/kg, 단풍나무 0.05kg/kg으로 나타나 단풍나무가 CO를 가장 많이 방출하는 것으로 나타났다. 최대방출농도는 오리나무 23.33kg/kg으로 신갈나무 4.33kg/kg에 비해 5.39배 높은 것으로 나타났다. 또한 수종별 CO₂의 평균방출농도는 가래나무 0.89kg/kg, 오리나무 1.07kg/kg, 신갈나무 0.89kg/kg, 단풍나무 1.11kg/kg으로 단풍나무가 가장 많은 양의 CO₂를 방출하였으며 단풍나무는 다른 수종에 비하여 CO와 CO₂ 노출 위험성이 큰 것으로 나타났다. 반면, 최대방출농도는 오히려 단풍나무가 57.52g/kg으로 가장 낮은 농도를 보이는 것으로 나타났고 신갈나무 100.20g/kg, 오리나무 912.64g/kg, 가래나무 1,323.48g/kg으로 나타났다. 총중량감소량은 오리나무가 49.7g으로 가장 중량감소가 큰 것으로 나타났으며 다음 중량감소가 큰 순서로 가래나무 47.9g, 신갈나무 45.71g, 단풍나무 44.61g의 중량감소를 보였으며 오리나무는 0.028g/s로 평균중량감소율이 가장 큰 것으로 나타났다.

Table 7. Concentrations of the Combustion Gases for Living Leaves of Various Trees

Items		가래	오리	신갈	단풍
CO yields	Mean(kg/kg)	0.03	0.04	0.05	0.05
	Peak(kg/kg)	17.10	23.33	4.33	1.73
	At time(s)	1,500	1,625	1,525	1,555
CO ₂ yields	Mean(kg/kg)	0.89	1.07	0.89	1.11
	Peak(kg/kg)	1,323.48	912.64	100.20	57.52
	At time(s)	1500	1,625	1,525	1,555
Mass loss	Initial mass(g)	50	50	50	50
	Mass loss(g)	47.90	49.70	45.71	44.61
	Final mass(g)	2.10	0.30	4.29	5.39
MLR	Mean (g/s)	0.027	0.028	0.026	0.025
	Peak (g/s)	0.075	0.082	0.067	0.073
	At time(s)	240	95	300	90

3.4 착화 특성

Table 8에는 영동지역에서 자생하는 교목수종인 가래나무, 오리나무, 신갈나무, 단풍나무 4가지 수종에 대한 착화특성을 제시하였다. 착화시간을 살펴보면 가래나무와 오리나무는 착화가 일어나지 않는 반면 신갈나무와 단풍나무에서는 착화가 일어났으며 신갈나무는 54s, 단풍나무는 57s에 착화가 일어났고, 화염유지시간은 23s로 차이는 없는 것으로 나타났다. 또한, 발화온도는 착화가 일어난 신갈나무 300℃, 단풍나무 310℃로 나타나 가래나무 335℃, 오리나무 345℃ 보다 낮은 것으로 나타나 착화에 대한 위험성이 큰 것으로 나타났다. 따라서 이러한 착화특성은 산불발생시 신갈나무와 단풍나무는 가래나무와 오리나무보다 화재에 취약함을 알 수 있다.

Table 8. Characteristics of Ignition for Living Leaves of Various Trees

Items	가래	오리	신갈	단풍
Time to ignition(s)	-	-	54	57
Time to flameout(s)	-	-	77	80
Ignition temperature(°C)	335	345	300	310

4. 결 론

본 연구에서는 영동지역에서 자생하는 가래나무, 오리나무, 신갈나무, 단풍나무의 화염 전파특성 및 발연특성, 연소생성물 특성, 착화특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) 화염전파특성의 발열량 분석결과, 수종간 큰 차이는 없는 것으로 나타났으며 총방출열량은 $23\text{MJ/m}^2 \sim 30\text{MJ/m}^2$ 정도의 열량을 방출하였고 평균열방출율은 $12.50\text{kW/m}^2 \sim 17.17\text{kW/m}^2$ 의 열량을 방출하는 것으로 나타났으며 단풍나무가 다른수종에 비하여 발열량이 높은 것으로 나타났다. 따라서 단풍나무가 발열량에 따른 총산소소모량이 20.90g 으로 산소가 가장 많이 소모됨을 알 수 있었으며 평균유효연소열량은 5.96MJ/kg 으로 가장 높은 것으로 나타났다.
- 2) 가지거리 예측을 위한 발연특성 결과, 총연기방출량은 가래나무 $170.4\text{m}^3/\text{m}^2$, 오리나무 $298.8\text{m}^3/\text{m}^2$, 신갈나무 113.65 , 단풍나무 $222.75\text{m}^3/\text{m}^2$ 으로 나타나 오리나무가 총연기방출량이 가장 높은 것으로 나타났으며 오리나무는 신갈나무 보다 2.63배 많은 연기를 방출하는 것으로 나타났다. 최대연기밀도는 가래나무 106.81Ds , 오리나무 178.41Ds , 신갈나무 174.66Ds , 단풍나무 149.23Ds 로 나타나 오리나무와 신갈나무는 가래나무와 단풍나무에 비하여 연기노출에 대한 위험성이 큰 것으로 나타났다.
- 3) 연소생성물 CO와 CO₂의 방출량 분석결과, 단풍나무가 CO와 CO₂를 가장 많이 방출하는 것으로 나타났으며 오리나무는 질식성 가스인 CO의 최대방출농도가 신갈나무에 비해 5.39배 많은 것으로 나타났다. 또한 총중량감소량은 오리나무가 49.7g 으로 가장 중량감소가 큰 것으로 나타났으며 평균중량감소율 또한 0.028g/s 로 가장 높은 것으로 나타났다.
- 4) 착화특성 분석결과, 가래나무와 오리나무는 착화가 일어나지 않는 반면 신갈나무와 단풍나무에서는 평균 55s 정도에 착화가 일어나 23s 동안 화염을 유지하는 것으로 나타났으며 발화온도는 신갈나무 300°C , 단풍나무 310°C , 가래나무 335°C , 오리나무 345°C 로 나타나 신갈나무와 단풍나무는 초기 발화위험성이 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 산림청 '산림과학기술개발사업(과제번호 S210808L0101004)'의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. 심종섭, 신동소, 이화형, 임기표, 조남석 (1994). “임산화학”, pp.137-145, 향문사.
2. 김진국 (1996). “공기유입이 화재강도에 미치는 영향에 대한 실험적 연구”, 한국화재 보험협회, 방재기술, 제21호, pp.5-11.
3. ISO 5660-1 (1993). “Reaction to Fire Part 1, Rate of Heat Release from building products(Cone Calorimeter)”, Generer.
4. ASTM E 662, “Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials”.
5. 홍윤명, 정국삼 (1992). “安全工學實驗”, pp.9-11, 동화기술.