

복사열 변화에 따른 소나무 생엽의 연소특성에 관한 연구

박영주 · 이시영 · 김수영 · 원윤범* · 한태진* · 이해평*
강원대학교 방재기술전문대학원, 강원대학교 소방방재학부*

Characteristics of Combustion for Living Leaves in Pinus Densiflora with Heat Flux

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

최근에는 산불의 빈도와 규모가 크게 증가하고 있는데 그 이유는 산불에 취약한 소나무 단순림이 우점하고 지형특성으로 인하여 건조기에 강한 바람이 불며 군사시설과 취락 농경지가 밀집되어 있고, 산림 내 연료원이 많이 축적되어 있기 때문이다. 따라서 전 국토의 65% 이상을 차지하고 있는 산림생태계의 효율적 관리와 이를 위하여 훼손의 원인, 훼손 방지를 위한 방안과 관리, 그리고, 훼손된 생태계에 대한 적절한 복구 및 관리방안과 화재안전 측면에서 산불화재 위험성을 경감시킬 수 있는 방안이 반드시 필요함(이규송, 2004)에 따라 화재강도 예측 대한 관심이 모아지고 있다.

산불발생 시 대부분의 임내 가연물들은 충분한 에너지를 갖는 열원에 노출되면 결국 착화되므로 여러 가지 열원에 의한 재료의 연소특성을 고려해야 한다. 목재는 연소 시 저온에서 완만하게 열분해 되어 탄소, 물 산화된 가스 등을 생성하지만 고온에서는 급격하게 열분해 되어 저온에서 생성되는 분해물과는 다른 물질을 생성한다(심중섭, 1994). 화염의 크기가 작을 때는(통상적으로 10cm 이하) 주위로의 열전달이 주로 대류나 전도 열전달에 의하여 일어나지만 화염의 크기가 커지면(20cm 이상) 복사열전달에 의한 비중이 급격히 상승하게 된다. 따라서 실질적인 화재에서는 복사 열전달이 화염의 전파에 직접적인 영향을 미치게 된다. 화염에서의 복사 열전달량에 대한 예측을 통하여 산림에서는 화재가 더 이상 퍼지는 것을 막아주는 안전지역의 크기를 설정하기도 한다(김충익, 1998).

따라서 본 연구에서는 화재전파특성을 예측하기 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 우리나라 자생 수종 가운데 가장 넓은 분포면적을 가지는 상록 침엽수 중 산불에 취약한 소

나무 생업을 대상으로 콘칼로리미터 장비를 이용하여 heat flux 변화(25kW/m², 50kW/m², 75kW/m²)에 따른 연소특성으로 화염전파특성, 가시거리 예측을 위한 발연량 특성, 연소생성물 특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 재료

본 연구에서는 산불에 취약한 침엽수 대표수종인 소나무 생업을 대상으로 연료의 준비는 실제 산불발생시 연소특성을 동일하게 적용하기 위하여 원형 상태로 사용하였으며 시험에 앞서 연료의 함수율을 측정하였다. 함수율을 측정하기 위하여 105℃로 설정한 건조기 내에 24시간 이상 건조시킨 후 항량이 될 때 까지 중량을 측정하여 함수율을 측정하였다. 항량 측정기준은 4시간 간격으로 무게를 측정하였을 때 0.1%의 무게 변화가 없을 때까지로 하였으며 함수율은 다음 식(1)에 의하여 산출하였다(심중섭, 1994). 여기서, MC(moisture content, MC)는 함수율[%], W는 건조 전 시료의 중량[g], W₀은 완전 건조시킨 시료의 중량을 나타내며 수분을 전혀 지니지 않는 목재의 무게에 대한 백분율로 표시된다. Table 1에 소나무 생업의 함수율을 제시하였다.

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

Table 1. Moisture Contents of Living Leaves in Pinus Densiflora

Species	Moisture Contents(%)
Pinus Densiflora	154.21

2.2 실험방법

소나무 생업을 대상으로 여러 가지 열원에 의한 연소특성을 고찰하고자 영국 FTT사(Fire Testing Technology Co.)의 Dual 콘칼로리미터(ISO 5660-1, 1993)를 사용하여 heat flux를 25kW/m², 50kW/m², 75kW/m²를 가하여 heat flux 변화에 따른 화염전파특성, 가시거리 예측을 위한 발연특성, 연소생성물 특성을 고찰하였으며 화염전파특성으로는 발열량과 산소소모량, 연소효율, 발연특성으로 총연기방출량과 연기온도, 연소생성물 특성으로 CO, CO₂ 방출농도, 총중량감소량, 중량감소율, 잔류량 특성을 고찰하였다. 실험조건은 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Experimental Conditions of Cone Calorimeter

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

3. 결과 및 고찰

3.1 화염전파 특성

3.1.1 발열량 분석

Fig. 1에는 소나무 생엽에 대한 heat flux 변화에 따른 총열방출량(Total Heat Release Rate, THR)곡선을 나타내었다. 총열방출량은 heat flux 25kW/m² 일 때 4.1MJ/m², 50kW/m² 일 때 23.4MJ/m², 7kW/m² 일 때 29.4MJ/m²로 나타나 heat flux가 75kW/m²는 50kW/m²보다 1.26배, 50kW/m²은 25kW/m²보다 5.71배 높은 것으로 나타났다. Fig. 2에는 소나무 생엽의 heat flux 변화에 따른 열방출율(Heat Release Rate, HRR) 곡선을 나타내었으며 열방출율은 재료가 연소하면서 발생하는 열량을 재료의 연소표면적으로 나눈 값으로 표현한다. 즉 열방출율은 연소하는 재료의 단위 표면적으로부터 주위로 방출된 열량값이다. 각 heat flux에서 최대열방출율은 25kW/m²에서는 17.45kW/m², 50kW/m²에서는 29.76kW/m², 75kW/m²에서는 50.14kW/m²로 나타나 heat flux가 증가시 최대열방출율은 1.7배 정도 높아지는 것을 알 수 있었다.

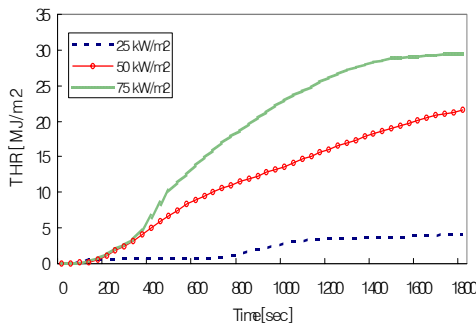


Fig.1. THR curves of living leaves in pinus densiflora.

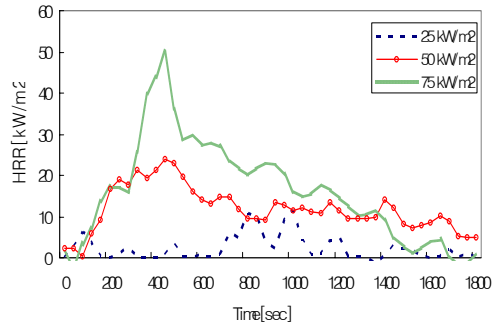


Fig. 2. HRR curves of living leaves in pinus densiflora.

Table 3. Thermal Characteristics of Living Leaves in Quercus Dentata

Classification		Heat Flux(kW/m ²)		
		25	50	75
Heat release rate	Mean(kW/m ²)	1.39	12.94	16.23
	Peak(kW/m ²)	17.45	29.76	50.14
	At time(s)	820	300	440
Total heat release(MJ/m ²)		4.1	23.4	29.4

3.1.2 산소소모량 분석

Fig. 3에는 소나무 생엽의 heat flux에 따른 산소소모량을 나타내었으며 Fig. 4에는 총 산소소모량을 나타내었다. Fig. 3의 heat flux에 따른 산소소모량은 heat flux가 50kW/m²

과 75kW/m²의 경우 400s에서 600s 사이에서 대체로 산소소모량이 많은 것을 알 수 있으며 총산소소모량은 25kW/m²에서 3.29g, 50kW/m²에서 15.2g, 75kW/m²에서 19.79g으로 나타나 heat flux가 높을수록 산소소모량이 많은 것으로 나타났다. 이에 대하여 Table 4에 제시하였으며 산소소모량은 그래프 기울기가 발열량과 동일영역에서 변하여 산소소모량은 발열량과 상관관계가 있음을 알 수 있다.

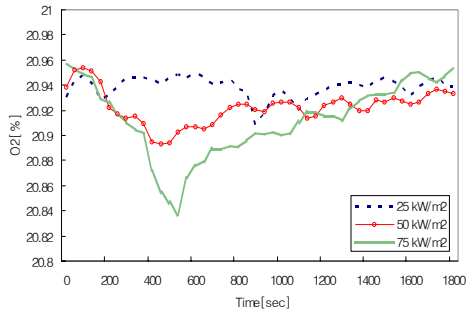


Fig. 3. Oxygen consumption curves of living leaves in pinus densiflora.

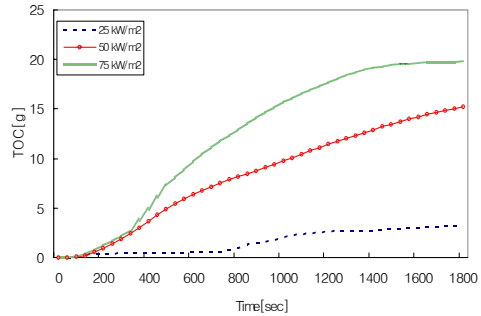


Fig. 4 Total oxygen consumption curves of living leaves in pinus densiflora.

Table 4. Characteristics of Oxygen Consumption for Living Leaves in Pinus Densiflora

Items	Heat Flux(kW/m ²)		
	25	50	75
Oxygen concentration Peak(%)	20.90	20.89	20.83
Total oxygen consumed(g)	3.29	15.2	19.79

3.1.3 유효연소열량 분석

Table 5에는 소나무 생엽의 heat flux별 유효연소열량 값을 나타내었다. 유효연소열량은 단위질량의 재료가 연소함으로 인하여 발생된 열량으로 표현되며 연소로 인해 방출된 열량과 질량손실로부터 계산된다. heat flux에 따른 유효연소열량 값은 다소 차이가 있는 것으로 나타났으며 heat flux가 높을수록 유효연소열량 값이 높은 것으로 나타났다. 이 결과로 볼 때 산소소비열량계의 의해 측정된 유효연소열량 값은 화재하중 계산에도 유용하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 5. Effective Heat of Combustion for Living Leaves in Pinus Densiflora

Item		Heat Flux(kW/m ²)		
		25	50	75
Effective Heat of Combustion (MJ/kg)	Mean	0.52	3.81	4.74
	Peak	12.17	71.12	77.20
	at time	1030	1280	955

3.2 발연 특성

Fig. 5에는 소나무 생엽의 heat flux에 따른 총연기방출량을 나타내었으며 Fig. 6에는 소나무 생엽의 복사열별 연소 시 발생하는 연기의 온도변화 곡선을 나타내었다. 총방출연기량은 각각의 시험에서 각 시료 표면적당 시간의 함수로서 표현되는 연기방출율 값들의 적분치이다. 총연기방출량은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 heat flux가 75kW/m²일 때 422.7m³/m²로 가장 많은 양의 연기를 방출하였으며 25kW/m²일 때 보다 2.95배, 50kW/m²일 때 보다 1.92배 많은 연기를 방출하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 6의 연기온도는 heat flux에 따라 다소 차이를 보이는 것으로 나타났으며 heat flux가 증가할 때 마다 연기온도는 14.8K 정도 높아지는 것을 알 수 있었다.

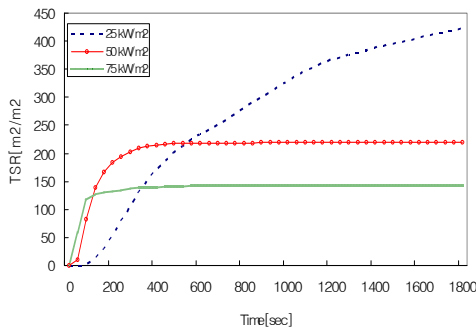


Fig. 5. Total smoke release of living leaves in pinus densiflora.

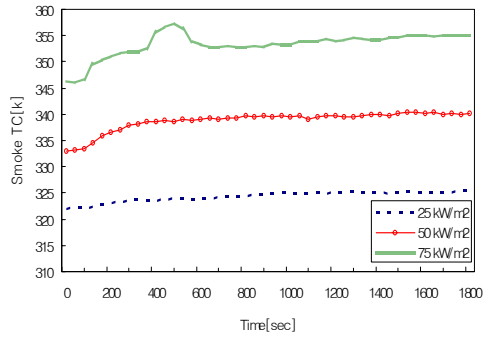


Fig. 6. Peak smoke temperature of living leaves in pinus densiflora.

Table 6. Characteristics of Smoke Release for Living Leaves in Pinus Densiflora

Items \ Heat Flux(kW/m ²)	25	50	75
Total Smoke Release(m ³ /m ²)	422.7	220.07	143.3
Peak Smoke Temp.(K)	325.56	340.35	355.15

3.3 연소생성물 특성

3.3.1 CO, CO₂ 분석

Fig. 7과 Fig. 8에는 소나무 생엽의 중량 50g에 대한 heat flux 변화에 따른 연소생성물인 CO와 CO₂의 방출농도를 나타내고 있다. Fig. 5와 Fig. 6에서 알 수 있듯이 CO와 CO₂의 방출농도는 heat flux가 증가함에 따라 최대 농도는 증가하는 것으로 나타났으며 최대농도가 나타나는 시간은 heat flux가 증가할수록 빠른 것으로 나타났다. 또한 Fig. 7의 질식성 가스인 CO의 경우 최대방출농도는 50kW/m²와 75kW/m²의 경우 800s 전에 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었으며 heat flux가 높을수록 빠른 시간에 최대값이 나타났다.

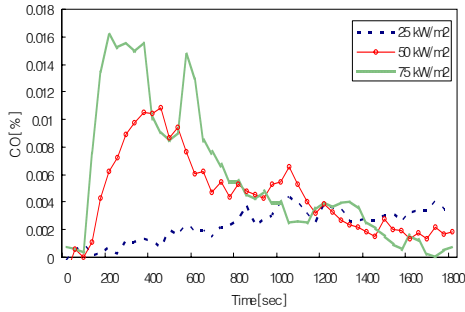


Fig. 7. CO consumption curves of living leaves in pinus densiflora.

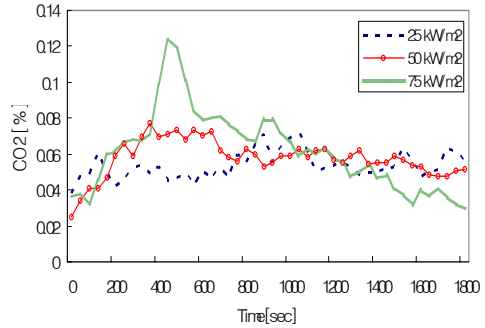


Fig. 8. CO₂ consumption curves of living leaves in pinus densiflora.

Table 7. Concentrations of the Combustion Gases for Living Leaves in Pinus Densiflora

Items		Heat Flux(kW/m ²)		
		25	50	75
CO yields	Peak(%)	0.0044	0.0105	0.0161
	At time(s)	1,040	360	200
CO ₂ yields	Peak(%)	0.0717	0.0731	0.1241
	At time(s)	1,040	480	440

3.3.2 중량감소량 분석

Fig. 9에는 소나무 생엽 중량 50g에 대한 heat flux에 따른 총중량감소량을 나타내었고 Fig. 10에는 중량감소율을 나타내었다. 총중량감소량은 25kW/m²일 때 42.8g, 50kW/m²일 때 49.2g, 75kW/m²일 때 49.92g으로 나타나 heat flux가 높을수록 중량이 급격히 감소하는 것을 알 수 있었으며 Table 5에 열분해에 의한 감량상태를 제시하였다.

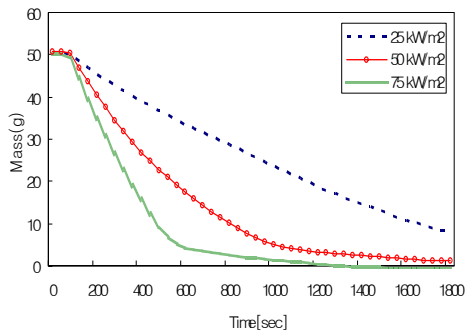


Fig. 9. Mass loss of living leaves in pinus densiflora.

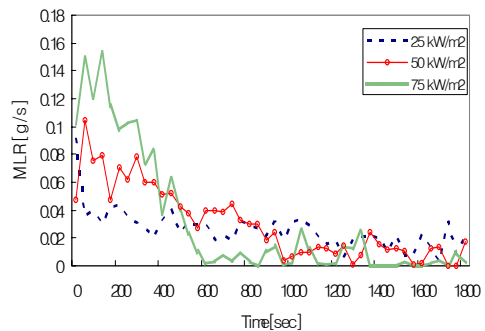


Fig. 10. Mass loss rate of living leaves in pinus densiflora.

Table 8. Mass loss of living leaves in pinus densiflora

Items		Heat Flux(kW/m ²)		
		25	50	75
Mass loss	Initial mass(g)	50	50	50
	Mass loss(g)	42.8	49.2	49.92
	Final mass(g)	7.2	0.8	0.08

4. 결 론

본 연구에서는 영동지역 산림 내 침엽수 대표수종 소나무 생엽을 대상으로 연소특성을 고찰하고자 복사열에 따른 화염전파특성 및 발연특성, 연소생성물 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) 화염전파특성으로 발열량 분석 결과, 총열방출량은 heat flux가 75kW/m²에서는 50kW/m²보다 1.26배, 50kW/m²에서는 25kW/m²보다 5.71배 높은 것으로 나타났으며 최대열방출율은 heat flux가 높을수록 1.7배 정도 높아지는 것을 알 수 있었다. 총산소소모량은 25kW/m²에서 3.29g, 50kW/m²에서 15.2g, 75kW/m²에서 19.79g으로 나타나 heat flux가 높을수록 산소소모량이 많았으며 heat flux가 높을수록 유효연소열량 값이 높은 것으로 나타났다.
- 2) 가시거리 예측을 위한 발연특성 분석 결과, 총연기방출량은 heat flux가 75kW/m²일 때 422.7m³/m²로 가장 많은 양의 연기를 방출하였으며 25kW/m²일 때 보다 2.95배, 50kW/m²일 때 보다 1.92배 많은 연기를 방출하는 것으로 나타났다. 또한 연기온도는 heat flux에 따라 다소 차이를 보였으며 heat flux가 증가 시 연기온도는 14.8K 정도 높아지는 것을 알 수 있었다.
- 3) 연소생성물 CO와 CO₂의 방출농도는 heat flux가 높을수록 최대 농도는 증가하는 것으로 나타났으며 질식성 가스인 CO의 경우 최대방출농도는 heat flux가 높을수록 빠른 시간에 최대값이 나타났으며 800s전에 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 중량 50g에 대한 총중량감소량은 25kW/m²일 때 42.8g, 50kW/m²일 때 49.2g, 75kW/m²일 때 49.92g으로 나타나 heat flux가 높을수록 중량이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 이규송, 정연숙, 김석철, 신승욱, 노찬호, 박상덕 (2004). “동해안 산불피해지에서 산불 후 경과 년수에 따른 식생구조의 발달”, 한국생태학회지, 27(2), pp.99-106.
2. 심종섭, 신동소, 이화형, 임기표, 조남석 (1994). “임산화학”, pp.137-145, 향문사.
3. 김충익 (1998). “화재의 복사 열전달에 관한 연구”, 방재시험연구원, 방재기술 제25호, pp.13-17.

4. ISO 5660-1 (1993). "Reaction to Fire Part 1, Rate of Heat Release from building products(Cone Calorimeter)", Generer.