

복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석

박형주, 김응식*, 김장환*, 김동현**, 이명보**

호원대학교 소방행정학부, 호서대학교 안전시스템공학과, 국립산림과학원 산림환경부

A Combustion Characteristic Analysis of Quercus variabilis and Pinus densiflora fallen leaves Using Radiation Heat Flux

Hyung-Ju Park, Eung-Sik Kim*, Jang-Hwan Kim*,
Dong-Hyun Kim**, Myung-Bo Lee**

Division of Fire Service Administration, Howon University

**Department of Safety System Engineering, Hoseo University*

***Department of Forest Fire Environment, Korea Forest Research Institute*

1. 서 론

산불의 진행상태와 피해의 양상에 있어 가장 대표적인 형태인 지표화는 지표상에 존재하는 가연물, 즉 잡초, 낙엽등의 지피물과 지상관목, 어린나무 등이 연소하는 형태로 지표면에 가연물의 양이 많을 경우 지표화로부터 수간화, 수관화로 전이될 수 있다. 지표화 연료에 영향을 주는 인자들은 연료의 함수량, 연료물량, 밀도, 연료의 두께 등이 있다. 이들 인자들에 따라 산불의 발생강도 및 산불 진행 속도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 지표화는 산불 확산 단계에 있어 초기단계로 가장 기본적으로 연구 되어야 할 대상이지만 현재까지는 국내에서 이에 대한 방법론 및 실험 데이터는 산발적으로 보고 되고 있으며, 이의 범위도 매우 제한적이다.

따라서 본 연구에서는 산림화재의 종합위험등급화와 산불위험예보에 필요한 산불 위험지수 산정에 있어 매우 중요한 인자인 연료에 대한 특성 기초 Data를 측정하기 위해 침엽수종인 소나무와 활엽수종인 굴참나무 낙엽을 건조시킨 후 분쇄 한 것을 시료로 사용하고, Oxygen Bomb Calorimeter를 이용하여 각 시료에 대한 연소열량(cal/g) 분석과 산불 화재시 발생하는 복사열에 대한 영향을 평가하기 위해 Mass Loss Calorimeter를 이용하여 일정한 외부 복사열원이 존재하는 상태에서 각 시료에 대한 연소특성(Time to ignition, Critical heat flux, Ignition temperature, Mass loss rate 등)을 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

(1) Oxygen Bomb Calorimeter

시료에 대한 단위 중량당 연소열(cal/g)을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 Oxygen

Bomb Calorimeter(Parr 1261)를 사용하였다.



Fig. 1 Photograph of experimental apparatus for Oxygen Bomb Calorimeter

(2) Mass Loss Calorimeter

일정한 Heat Flux($7\sim 50\text{kW/m}^2$)에서 각 시료의 연소특성(Time to ignition, Critical heat flux, Ignition temperature, Mass loss rate 등)을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 ISO 5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass Loss Calorimeter(FTT)를 사용하였다.

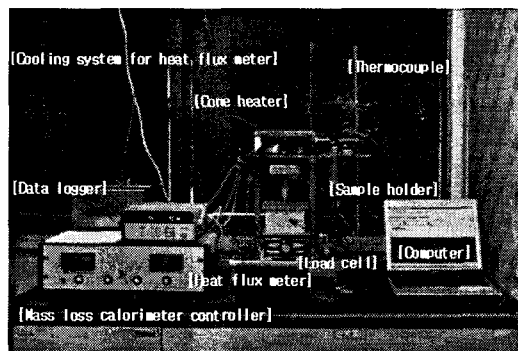


Fig. 2 Photograph of experimental apparatus for Mass Loss Calorimeter

2.2 실험시료

산불의 한 형태인 지표화의 연소 물질인 낙엽의 가장 보편적인 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽을 야산에서 채집하고, 45°C의 건조기에서 건조시킨 후 분쇄 전/후의 시료를 사용하여 연소열과 외부 복사열의 변화에 따른 연소특성을 분석하였다.

Oxygen Bomb Calorimeter를 이용한 연소열 측정에 사용된 시료의 크기와 함수율은 Table 1에 나타내었다. 함수율은 일정량의 시료를 105°C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시료의 중량을 4시간 간격으로 더 이상의 중량 변화가 없을 때 까지 측정하고, 다음의 식(1)을 이용하여 계산한다.

$$MC[\%] = \frac{W_m - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

여기서, MC[%] : Moisture content[%], W_m : weight of sample before oven-dry, W_d : weight of sample after oven-dry 이다.

Table 1. Oxygen Bomb Calorimeter를 이용한 연소열 측정에 사용된 낙엽의 함수율과 크기

Type of sample	Quercus variabilis		Pinus densiflora	
	MC[%]	Size	MC[%]	Size
Before grinding	10.21	2 mm	8.54	2 mm
After grinding	9.27	150 μ m	7.38	150 μ m

Mass Loss Calorimeter를 이용한 일정한 Heat flux에서 각 시료에 대한 연소특성을 측정하기 위해 사용된 시료의 크기는 2.0~710 μ m이며, 함수율은 굴참나무 낙엽은 3.74%, 소나무 낙엽은 3.72%이다. 각 시료는 45 $^{\circ}$ C의 건조기에서 168h 동안 건조시킨 후 믹서기를 이용하여 분쇄하고, mesh를 이용하여 분류한 후 사용하였다.

2.3 실험방법

(1) 연소열 측정

각 시료의 단위 중량당 연소열은 Fig. 1에 나타난 Oxygen Bomb Calorimeter를 이용 측정하였다. 시료는 Table 1에 나타난 것과 같이 분쇄 전/후의 시료를 0.5~1.0g씩 사용하였다. 점화선의 재질은 Nickel (길이 10 cm)이며, 고압 Bomb 내에 충전되는 산소의 순도는 99.5% 이며, 압력은 30kg/cm²으로 설정한 후 실험하였다.

(2) 연소특성 측정

일정한 Heat flux에서의 연소특성은 Fig. 2에 나타난 Mass Loss Calorimeter를 이용하여 측정하였으며, 시료는 건조 후 분쇄한 굴참나무 낙엽과 소나무 낙엽을 28g씩 사용하였다.

Heat flux은 Mass Loss Calorimeter controller를 이용하여 설정온도까지 상승시킨 후 설정온도에서 방출되는 복사열량을 Medtherm 사의 Heat flux meter를 이용하여 측정한다. 방출되는 복사열량(7~50kW/m²)이 일정해 지면 100mm x 100mm x 12mm 크기의 시료 용기에 측정하고자 하는 시료를 넣고 Cone heater 하부로부터 25.0mm(약 1 inch)의 위치에 놓고 초시계를 이용하여 점화시간, 화염존재시간, 소멸후 연소시간 등을 측정하였다. 또한 점화온도와 화염의 온도 변화를 측정하기 위해 시료 표면과 상부(시료 표면으로부터 100mm, 200mm)의 온도변화를 K-type(ψ 1.0mm)의 열전대를 이용하여 매 1초 간격으로 온도를 측정하였으며, 시험시간 동안 시료의 중량변화는 매 1초 간격으로 Load cell을 이용하여 측정하였다. 이때 각종 Data는 Data logger를 이용하여 Computer에 자동으로 저장된다.

3. 결과 및 토론

3.1 연소열(Combustion heat)

소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽을 이용한 연소열을 측정한 결과는 Table 2, 3에 나타

내었다.

Table 2는 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 단위 중량당의 연소열로 분쇄 전/후의 연소열량에는 큰 차이가 없는 것으로 측정되었으나, 소나무와 굴참나무의 단위 중량당 연소열은 평균 약 450cal/g의 차이가 남을 알 수 있었다. 이로부터 산불 발생시 굴참나무가 균락을 이루고 있는 산림지역보다 소나무가 균락을 이루고 있는 산림지역에서 더 산불의 위험성 및 피해의 정도가 높다는 것을 예측할 수 있다.

Table 3은 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 각 부위별 단위 중량당 연소열을 측정한 것으로 각 낙엽에 있어서 그물망(굴참나무 낙엽)과 꼭지(소나무 낙엽)가 잎 부분보다 연소열이 낮게 측정되었다. 이로부터 산불 발생시 화염전파의 열원 공급원으로는 낙엽의 잎 부분이 연소되면서 발생하는 열에 의해 더 영향을 받는다는 것을 예측할 수 있다.

Table 2. 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 단위 중량당 연소열

Type of sample	Quercus variabilis [cal/g]	Pinus densiflora [cal/g]
Before grinding	4,850	5,231
After grinding	4,853	5,367

Table 3. 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 각 부위별 연소열

Type of sample	Quercus variabilis [cal/g]	Pinus densiflora [cal/g]
전체	4,850	5,231
잎	4,814	5,147
그물망(꼭지)	4,605	4,669

3.2 연소특성 측정

Incident heat flux에서의 분쇄소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽에 대한 Ignition time, Ignition temperature, Mass loss rate 측정 결과는 다음과 같다.

(1) 점화시간(Ignition time)

Fig. 3은 각 시료에 대한 외부 복사열원과 평균 점화시간과의 관계를 나타낸 것으로, 그래프 (a)는 복사열원에 따른 평균 점화시간을, 그래프 (b)는 복사열원과 $1/\sqrt{t_{ig}}$ 의 관계를 나타낸 것이다.

점화시간은 단계에서 각 외부 복사열원의 단계에서 electric spark에 의해 시료의 표면에서 점화가 발생할 때까지의 시간으로 3회의 측정 결과에 대한 평균값을 사용하였다. Fig. 3 (a)에 나타난 바와 같이 점화시간은 외부 복사열원이 임계열속에 가까워질수록 무한대(∞)로 접근하고, 외부 복사열원이 임계열속보다 무한이 커질 경우 0으로 접근함을 알 수 있다. 즉, $\dot{q}_i'' \rightarrow \dot{q}_c''$ 일 때 $t_{ig} \rightarrow \infty$ 이고, $\dot{q}_i'' \gg \dot{q}_c''$ 일 때 $t_{ig} \rightarrow 0$ 으로 수렴함을 알 수 있다.

점화시간에 있어서 굴참나무 낙엽과 소나무 낙엽 간의 차이는 작았으나, 일반적으로 활엽수가 더 빨리 점화가 되리라 예상되었으나, 실험결과는 소나무 낙엽에서 조금 더 일찍 점화가 된 것을 알 수 있었다. 이는 낙엽의 표면적의 크기가 거의 일정해지기

때문인 것으로 판단된다. 또한 두 가지 시료 모두 9kW/m^2 미만의 외부 복사열원에서 는 점화가 발생하지 않았다.

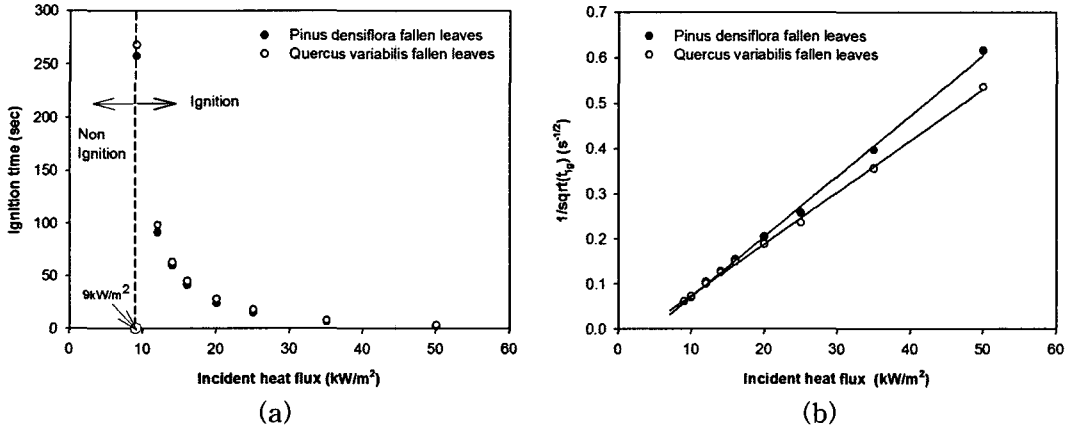


Fig. 3 외부 복사열과 점화시간과의 관계

(2) 점화온도

점화온도는 주어진 외부 복사열원에서 시험 시료의 노출된 표면 위에 위치한 1.0mm 의 직경을 갖는 K type의 열전대를 이용하여 점화가 되는 순간의 온도를 측정하였다.

Fig. 4는 외부 복사열과 점화온도와 관계를 나타낸 그래프로 일반적으로 외부 복사열원이 증가함에 따라 점화온도가 낮아짐을 알 수 있으나, 외부 복사열원이 9kW/m^2 일 때는 점화온도가 낮아진 현상을 관찰할 수 있다. 이는 외부 복사열원이 임계열속에 가까워질수록 점화 발생의 원인이 외부 복사열원보다는 시료내부의 열 축적에 의한 것이라고 판단된다.

Fig. 5는 외부 복사열원이 25kW/m^2 일 때 연소시간 동안 표면온도의 변화를 나타낸 것으로, 침엽수종인 소나무 낙엽이 더 오랜 시간동안 고온을 유지함을 알 수 있다. 이는 소나무가 밀집되어 있는 곳에서 발생한 산불의 온도와 그 지속시간이 굴참나무가 밀집되어 있는 곳에서 보다 더 길어질 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

(3) 질량감소속도

Fig. 5는 외부 복사열원이 25kW/m^2 일 때 연소시간의 경과에 따른 질량감소속도를, Fig. 6은 외부 복사열과 최대 질량감소속도와 관계를 나타낸 것이다. 두 시료에 대한 질량감소속도를 비교해 보면 활엽수종인 굴참나무 낙엽에서 최대질량감소속도와 평균 질량감소속도가 더 빠르다는 것을 알 수 있으며, 이는 같은 조건하에서 소나무 낙엽 보다 굴참나무 낙엽에서 연소현상이 빠르게 진행된다는 것을 의미한다.

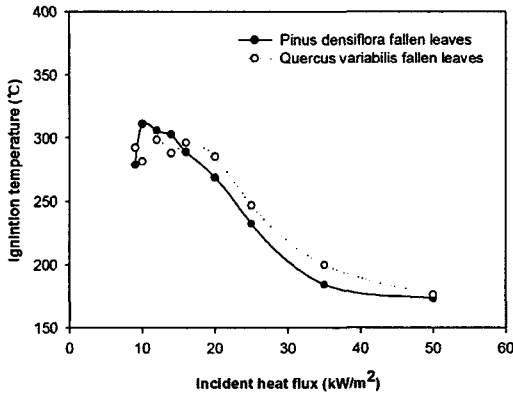


Fig. 4 외부 복사열과 점화온도와의 관계

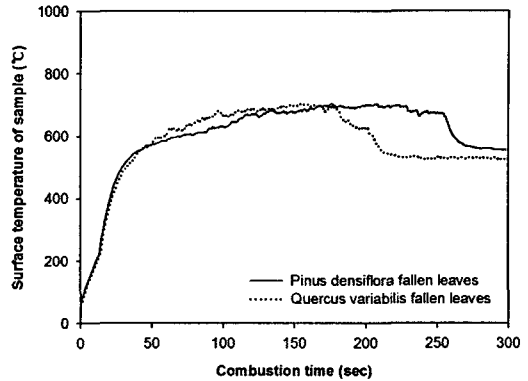


Fig. 5 연소시간의 경과에 따른 시료표면 온도의 변화[25kW/m²]

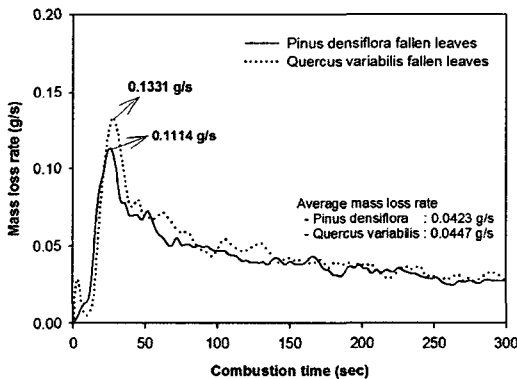


Fig. 6 연소시간의 경과에 따른 질량감소속도[25kW/m²]

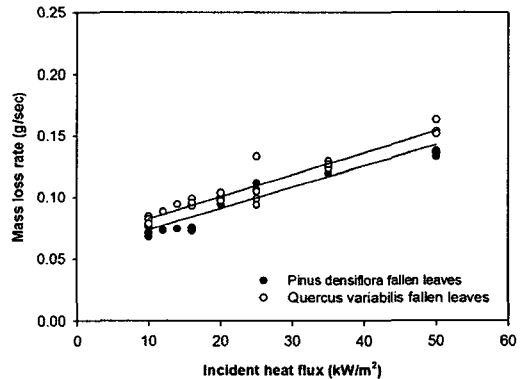


Fig. 7 외부 복사열과 최대 질량감소속도와의 관계

4. 결론

소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽을 분쇄 후 연소열량과 연소특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단위 중량당 연소열을 측정된 결과 소나무 낙엽이 굴참나무 낙엽에 비해 평균 약 450cal/g 정도 높게 나타났으며, 이로부터 산불 발생시 굴참나무가 균락을 이루고 있는 산림지역보다 소나무가 균락을 이루고 있는 산림지역에서 더 산불의 위험성 및 피해의 정도가 높다는 것을 예측할 수 있었다.

2) 외부 복사열원이 임계열속에 가까워질수록 점화시간이 무한대로 접근하고 외부 복사열원이 무한이 커질 경우 0으로 접근함을 알 수 있었으며, 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 시료에서 외부 복사열원이 9kW/m² 미만에서는 점화가 발생하지 않았다.

3) 외부 복사열원이 증가함에 따라 점화온도가 낮아짐을 알 수 있으나, 외부 복사열원이 9kW/m^2 일 때는 점화온도가 낮아진 현상을 관찰할 수 있다.

4) 연소시간 동안 표면온도는 활엽수종인 굴참나무에 비해 침엽수종인 소나무 낙엽이 더 오랜 시간동안 고온을 유지함을 알 수 있다. 이는 소나무가 밀집되어 있는 곳에서 발생한 산불의 온도와 그 지속시간이 굴참나무가 밀집되어 있는 곳에서 보다 더 길어질 수 있다는 것을 예측할 수 있었다.

5) 질량감소속도를 측정한 결과 활엽수종인 굴참나무 낙엽에서 최대질량감소속도와 평균질량감소속도가 더 빠르다는 것을 알 수 있었으며, 이는 같은 조건하에서 소나무 낙엽보다 굴참나무 낙엽에서 연소현상이 빠르게 진행된다는 것을 의미한다.

5. 참고문헌

1. 박형주, 김홍, 하동명, “적분모델을 이용한 난연처리된 Douglas fir의 화재특성 예측”, 한국안전학회지, Vol. 20, No. 3, pp. 98-104, 2005.
2. 박형주, 김홍, “일정한 복사열원에 노출된 목재의 탄화속도에 관한 연구”, 한국화재소방학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 86-92, 2004
3. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, “지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 한국방재학회 춘계학술발표논문지, 2006.
4. 김동현, 김태구, 김광일, “산림화재 종합위험등급화에 관한 연구”, 한국화재소방학회지, Vol. 15, No. 3, pp. 49~54, 2001.
5. 채희문, 이찬용, “산불 확산에 영향을 미치는 임지내 산림연료와 경사도에 관한 연구”, 한국농림기상학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 179~184, 2003.
6. 김관수, 장인수, 박기돈, “가열 온도에 의한 소나무와 잣나무 생엽과 생지의 연소 온도변화”, Natural Science(Taejon University), Vol. 6, pp. 99-106, 1995.
7. 박형주, 김홍, 강영구, “난연처리된 목재의 연소특성에 관한 연구” 목재공학학회지, Vol. 33, No. 4, pp. 39-44, 2005.
8. J. L. Dupuy, “Fire from a cylindrical forest fuel burner : combustion dynamics and flame properties”, combustion and flame, pp. 65-76, 2003.