

## 복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석 A Combustion Characteristic Analysis of Quercus Variabilis and Pinus Densiflora Fallen Leaves Using Radiation Heat Flux

박형주<sup>†</sup> · 김응식\* · 김장환\* · 김동현\*\*

Hyung-Ju Park<sup>†</sup> · Eung-Sik Kim\* · Jang-Hwan Kim\* · Dong-Hyun Kim\*\*

호원대학교 소방행정학부, \*호서대학교 안전시스템공학과, \*\*국립산림과학원 산림환경부  
(2007. 4. 24. 접수/2007. 8. 13. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 지표화의 연소물질인 소나무와 굴참나무 낙엽에 대해 일정한 외부 복사열에 의한 연소특성을 분석하였다. 일정한 외부 복사열에 노출된 낙엽의 착화시간, 착화온도, 임계열유속, 질량감소속도를 측정하기 위해 낙엽의 종류별로 5개의 시료를 사용하였으며, 낙엽에 복사열을 노출시키기 위해 Mass loss calorimeter를 사용하였다. 시료 용기의 크기는 100 mm×100 mm×12 mm로 소나무와 굴참나무 낙엽을 건조 후 분쇄하여 사용하였다. 연구결과, 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 시료에서 외부 복사열이 9 kW/m<sup>2</sup> 미만에서는 착화가 발생하지 않았다. 또한, 연소시간 동안 표면온도 변화는 굴참나무 낙엽에 비해 소나무 낙엽이 더 오랜 시간동안 고온을 유지함을 알 수 있었으며, 최대질량감소속도와 평균질량감소속도에 있어서는 굴참나무 낙엽이 소나무 낙엽 보다 더 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 향후, 연소특성에 대한 구체적인 연소반응 특성에 대한 실험연구가 필요할 것으로 판단된다.

### ABSTRACT

The combustion characteristics of surface forest fire fuels was analysed using variable external irradiation level. The characteristics such as ignition time, ignition temperature, critical heat flux and mass loss rate were measured. Fuel samples were exposed to incident heat fluxes from 8 to 50 kW/m<sup>2</sup>. For the measurement of various combustion characteristics, the size of specimen holder was 100 mm × 100 mm × 12 mm and the fuel samples grinded by electric mill were the fallen leaves of Quercus variabilis and Pinus densiflora. As results, the occurrence of ignition is possible to the heat flux more than 9 kW/m<sup>2</sup>. The fuel of Pinus densiflora keeps its high temperature longer than that of Quercus variabilis during the combustion process. The results of measurement shows that the maximum and average mass loss rate of Quercus variabilis larger than that of Pinus densiflora.

**Keywords :** Forest fire, Surface fire, Fallen leaves, Heat flux, Combustion characteristics

## 1. 서 론

최근 사회여건의 다변화로 인하여 산림자원에 대한 효율적인 이용과 보존에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 생활수준의 향상에 따른 여가시간의 증가와 건강에 대한 인식 변화 등에 의해 산림 휴양활동이 급격히 증가하고 있는 추세이다. '90년대 이후 매년 50% 이상 급격히 증가하고 있는 향락객 및 입산자의 수와 더불어 산불의 발생 건수와 피해도 또한 증가하고 있다. 우

리나라에서 발생하고 있는 산불은 등산객, 성묘객, 무속행위자 등 입산자의 사소한 부주의에 의한 실화가 가장 많으며 그 밖에 논·밭두렁 소각, 담뱃불, 군사 훈련, 어린이 불량난 등에 의해 발생하고 있다.<sup>1)</sup>

'96년에는 정부수립 이후 최대 규모의 산불피해가 발생한 강원도 고성산불(3,762 ha)을 비롯하여 527건에 5,368 ha에 달하는 산불피해가 발생하였으며, 2000년에는 고성·동해·강릉·삼척·울산 산불이 동해안지역을 따라 거의 동시 다발적으로 발생하여 전국 이래 최대의 초대형 산불피해(23,448 ha)를 주었다.

이러한 대형 산불의 주요원인은 '94년부터 지속된 극

<sup>†</sup> E-mail: sandelf@howon.ac.kr

심한 가뭄과 지역적인 기상이변, 그리고 산림녹화 등으로 인한 하층식생, 임목 등 산림 내 가연성물질의 양이 증가하고, 낙엽 층이 잘 썩지 않고 축적되어 있기 때문에 산림의 이용 증가와 더불어 봄철 산불위험시기에 다발·대형화되는 것으로 나타나고 있다. 특히 과거 동해안 지역에서만 발생하던 대형 산불이 최근에는 중·서부(청양예산산불 2002년, 군산익산산불 2004) 및 남부지방(함양산불 2005, 남원산불 2005)에서도 발생하는 등 전국적으로 그 규모가 확대되고 있는 실정이다.<sup>2)</sup>

산불의 피해는 단순히 산림자원의 손실뿐만 아니라 산림 생태계의 파괴 및 문화재, 주택, 기간시설 및 공공시설 등의 피해로 인한 국가 및 지역 경제활동에 막대한 영향을 초래하고 산불피해지의 토사유출 및 산사태 등과 같은 산불 후 2차 피해를 유발할 수 있는 잠재적 위험성을 제공하는 등 국가적 규모의 재해로 인식되고 있다. 따라서 대형 산불의 예방과 산불피해 저감을 위한 기술개발 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>3)</sup>

산불의 형태 및 강도는 임내의 연료물량, 수종 등 임상과 경사, 사면의 장, 해발고 등 지형 상태와 풍향, 풍속, 상대습도 등 기상상태에 따라 달라지며 산불의 확산 형태는 지표화, 수관화, 지중화, 비산화 등으로 구분된다. 지표화의 특성에 관한 연구는 임내 지표면에 존재하는 가연물, 즉 잡초, 낙엽 등의 지피물과 관목류 등이 연소하는 형태로 지표면에 가연물의 양이 많을 경우 지표화로부터 수관화로 전이될 수 있어 산불의 발생 및 초기 확산에 있어 지표화에 관한 연구는 중요하다.<sup>3,5)</sup>

따라서 본 연구에서는 산불의 종합위험등급화와 산불위험예보에 필요한 산불 위험지수 산정에 있어 매우 중요한 인자인 연료에 대한 특성 기초 Data를 제공하기 위해 침엽수종인 소나무와 활엽수종인 굴참나무 낙엽에 대하여 산불확산시 열전달 중 복사열에 대한 영향을 평가하기 위해 Mass Loss Calorimeter를 이용하여 일정한 외부 복사열이 존재하는 상태에서 각 시료에 대한 착화시간(Ignition time), 임계열유속(Critical heat flux), 착화온도(Ignition temperature), 질량감소속도(Mass loss rate) 등에 대한 연소특성을 측정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

일정한 Heat Flux(8~50 kW/m<sup>2</sup>)에서 각 시료에 대한 착화시간(ignition time), 임계열유속(critical heat flux), 착화온도(ignition temperature), 질량감소속도(mass loss rate) 등의 연소특성을 측정하기 위해 Figure 1과 같이

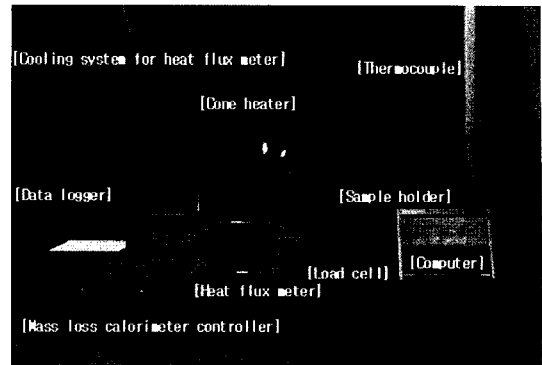


Figure 1. Photograph of experimental apparatus for Mass Loss Calorimeter.

ISO 5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass Loss Calorimeter(FTT사)를 사용하였다.

### 2.2 실험시료

산불확산의 한 형태인 지표화의 주요 연소물질인 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽을 야산에서 채집하고, 45 °C의 건조기에서 168 h 동안 건조시킨 후 전동 밀(electric mill)을 이용하여 분쇄하고, mesh를 사용하여 분류한 후 사용하였다. Mass loss calorimeter를 이용한 일정한 Heat flux에서 각 시료에 대한 연소특성을 측정하기 위해 사용된 시료의 크기는 710~150 μm이며, 함수율은 굴참나무 낙엽은 3.74%, 소나무 낙엽은 3.72%이다. 이때 낙엽에 대한 함수율은 식 (1)의 방법으로 측정하였다.

함수율은 일정한 시료를 105 °C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시료의 중량을 4시간 간격으로 더 이상의 중량 변화가 없을 때까지 측정하고, 다음의 식 (1)을 이용하여 계산한다.<sup>6)</sup>

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

### 2.3 실험방법

일정한 Heat flux에서의 복사열에 의한 연소특성은 Figure 1에 나타난 Mass loss calorimeter를 이용하여 측정하였으며, 시료는 건조 후 분쇄한 굴참나무 낙엽과 소나무 낙엽을 각각 28 g씩 사용하였다.

Heat flux는 Mass loss calorimeter controller를 이용하여 설정온도까지 상승시킨 후 설정온도에서 방출되는 복사열량을 Heat flux meter를 이용하여 측정한다. Cone heater로부터 방출되는 복사열량(8~50 kW/m<sup>2</sup>)이 일정한 지면 100 mm×100 mm×12 mm 크기의 시료 용기에 측정하고자 하는 시료를 넣고 Cone heater 하

부로부터 25.0 mm(약 1 inch)의 위치에 놓고 초시계를 이용하여 착화시간, 화염유지시간, 소멸 후 연소시간 등을 측정하였다. 시료에 대한 착화는 Cone heater 하부와 시료 상부의 중간 위치에서 점화 스파크를 이용하여 실시하였다. 또한 착화온도와 화염의 온도 변화를 측정하기 위해 시료 표면과 상부(시료 표면으로부터 100 mm, 200 mm)의 온도변화를 K-type(Ø1.0 mm)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 고찰

Mass loss calorimeter를 이용한 일정한 heat flux에서의 분쇄한 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽에 대한 착화시간, 임계열유속, 착화온도, 질량감소속도를 측정 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 착화시간(Ignition time)

외부 복사열의 변화에 따른 평균 착화시간과  $1/\sqrt{t_{ig}}$ 은 Table 1에 나타내었다. 착화시간은 각 외부 복사열의 단계에서 electric spark에 의해 시료 표면에서 착화가 발생할 때까지의 시간으로 3회의 측정 결과에 대한 평균값을 사용하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 두 가지 시료 모두  $9 \text{ kW/m}^2$  미만의 외부 복사열에서는 착화가 발생하지 않았으며, 소나무 낙엽에 비해 굴참나무 낙엽이 외부 복사열에 의한 착화시간이 더 길게 측정되었으나, 두 시료간의 큰 차이는 보이지 않았다. 일

Table 1. Average ignition times of fallen leaves

Heat flux (kW/m <sup>2</sup> )	Pinus densiflora		Quercus variabilis	
	Ignition time (s)	1/sqrt(t <sub>ig</sub> ) (s <sup>-1/2</sup> )	Ignition time (s)	1/sqrt(t <sub>ig</sub> ) (s <sup>-1/2</sup> )
8	No ignition	-	No ignition	-
9	257.6	0.0623	268.0	0.0611
12	91.5	0.1045	98.4	0.1008
14	60.4	0.1287	62.8	0.1262
16	41.5	0.1552	45.0	0.1491
20	23.9	0.2046	27.9	0.1893
25	15.0	0.2582	17.9	0.2364
35	6.4	0.3953	7.9	0.3558
50	2.6	0.6202	3.5	0.5345

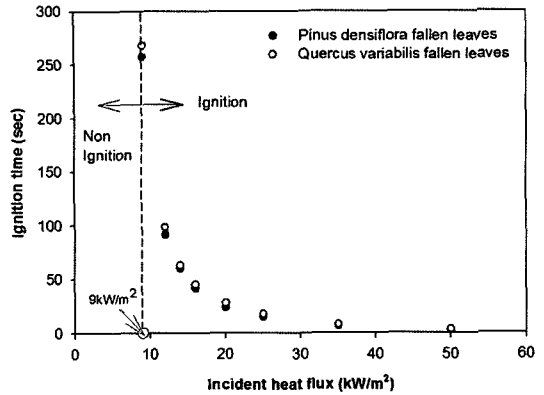


Figure 2. Ignition time vs incident heat flux for fallen leaves.

반적으로 침엽수종인 소나무 낙엽보다 활엽수종인 굴참나무 낙엽의 표면적이 크기 때문에 동일한 외부 복사열에서 더 빨리 착화가 발생할 것으로 예상되었으나, 실험결과는 소나무 낙엽에서 조금 더 빠르게 착화가 된 것을 알 수 있었다. 이는 건조 후 분쇄과정을 통해 거의 동일한 입도 분포를 갖는 시료를 사용함에 따라 낙엽들의 표면적이 거의 일정해지기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 2는 외부 복사열의 변화와 측정된 평균 착화시간과의 관계를 나타낸 그래프이다. Figure 2에 나타낸 바와 같이 착화시간은 외부 복사열이 임계열유속에 가까워질수록 무한대( $\infty$ )로 접근하고, 외부 복사열이 임계열유속보다 무한히 커질 경우 0으로 접근함을 알 수 있다. 즉, 식 (2)로부터  $\dot{q}'' \rightarrow \dot{q}_{cr}''$  일 때  $t_{ig} \rightarrow \infty$  이고,  $\dot{q}'' \gg \dot{q}_{cr}''$  일 때  $t_{ig} \rightarrow 0$  으로 수렴함을 알 수 있다.<sup>7,9)</sup>

$$t_{ig} = \frac{4}{3} k \rho c \left[ \frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] \frac{(T_{ig} - T_0)^2}{[\dot{q}''(t_{ig})]} \quad (2)$$

#### 3.2 임계열유속(Critical heat flux)

임계열유속은 외부 복사열에 노출된 시료에서 착화가 발생하는 데 필요한 최소의 복사열로 정의되며, 착화가 발생할 때의 가장 낮은 복사열과 착화가 발생하지 않는 가장 높은 복사열의 사이에서 실험적으로 열유속을 얻을 수 있다. 또한 각 외부 복사열에 따른 착화시간의 그래프에서 직선의 절편으로부터 예측할 수 있다. 결국, 본 연구에서는 임계열유속을 식 (2)로부터 유도된 다음 식 (5)와 착화시간으로부터 예측하였다.<sup>10)</sup>

$$\frac{1}{\sqrt{t_{ig}}} = (\dot{q}'' - \dot{q}_{cr}'') \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} k \rho c \left[ \frac{1 - \beta_{ig}}{2 - \beta_{ig}} \right] (T_{ig} - T_0)}} \quad (3)$$

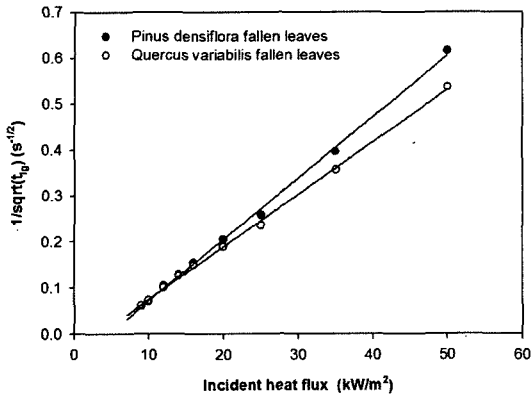


Figure 3. Linear regression analysis of ignition time according to incident heat flux.

$$\text{slope} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3}k\rho c \left[ \frac{1-\beta_{ig}}{2-\beta_{ig}} \right]}} (T_{ig} - T_0) \quad (4)$$

$$\text{intercept} = -\text{slope}(\dot{q}_{cr}) \quad (5)$$

Figure 3은 모든 외부 복사열을 통한 직선의 회귀선을 갖는 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽에 대한 외부 복사열의 변화에 따른  $1/\sqrt{t_{ig}}$ 을 나타내었다. Figure 3에서 각 직선의 절편 즉, 직선과 x축이 만나는 점이 각 시료에 있어서의 임계열유속이 된다. 식(5)와 Figure 3으로부터 예측된 임계열유속을 Spearpoint에 의해 제안된 0.76에 의해 변경된 모든 외부 복사열 data를 이용하여 각 시료에 대한 착화에 필요한 최종 임계열유속은 소나무 낙엽의 경우  $6.04 \text{ kW/m}^2$ , 활엽수 낙엽의 경우  $4.49 \text{ kW/m}^2$ 으로 예측되었다. 이는 4종의 목재 (Redwood, White oak, Douglas fir, Maple)를 대상으로 한 외부 복사열에 의한 임계열유속이  $7.83\sim 10.21 \text{ kW/m}^2$ 에 비해 현저히 낮은 것으로 시료의 밀도 차이에 의해 발생한 것으로 판단된다.<sup>11)</sup>

### 3.3 착화온도(Ignition temperature)

착화온도는 주어진 외부 복사열에서 시험 시료의 노출된 표면 위에 위치한 1.0 mm의 직경을 갖는 K type의 열전대를 이용하여 점화가 되는 순간의 온도를 측정하였다.

Figure 4는 외부 복사열과 점화온도와의 관계를 나타낸 그래프로 일반적으로 외부 복사열이 증가함에 따라 점화온도가 낮아짐을 알 수 있으나, 굴참나무 낙엽의 경우  $16 \text{ kW/m}^2$ , 소나무 낙엽의 경우  $10 \text{ kW/m}^2$  미만에서 점화온도가 낮아진 현상을 관찰할 수 있다. 이는 외부 복사열이 임계열유속에 가까워질수록 열분해

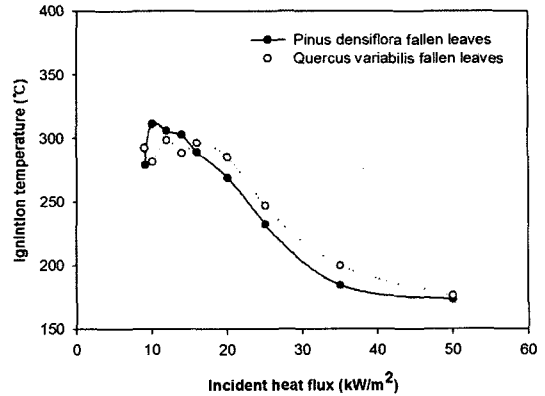


Figure 4. Ignition temperature vs incident heat flux for fallen leaves.

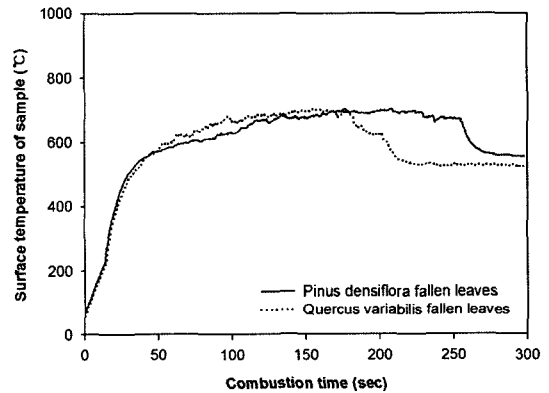


Figure 5. Surface temperature profile during the combustion at  $25 \text{ kW/m}^2$ .

가스의 발생이 직접적인 복사열에 의한 것보다 시료 내부의 열 축적에 의해 발생되고 electric spark에 의해 착화가 발생하는 것이라고 판단된다.

Figure 5는 외부 복사열이  $25 \text{ kW/m}^2$ 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.

Figure 6과 7은 소나무 낙엽과 활엽수 낙엽에 대한 외부 복사에 따른 시료의 표면온도를 나타낸 그래프로 외부 복사원이  $8 \text{ kW/m}^2$ 일 경우에는 초기온도에서 점점 상승하여 점차적으로 일정한 값에 수렴함을 알 수 있으나, 외부 복사열이 높아지면 시료 표면의 온도는 상승을 계속하여 열분해 가스가 다량 발생하고, 가연 범위를 만족하면 electric spark에 의해 착화가 일어나

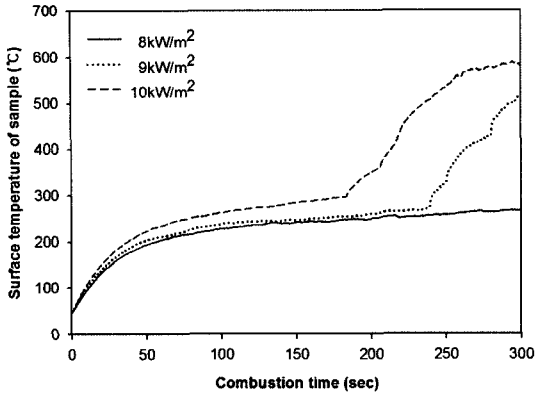


Figure 6. Surface temperature profile during the combustion at various incident heat flux of pinus densiflora fallen leaves.

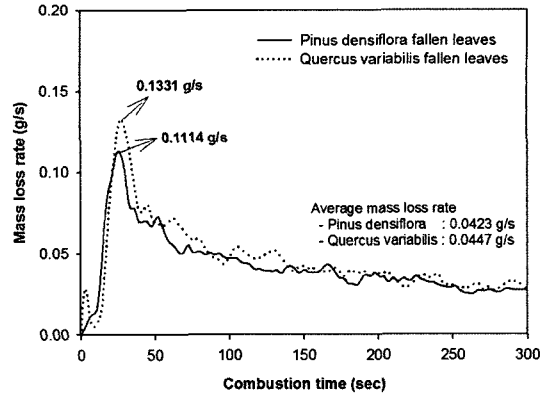


Figure 8. Mass loss rate profile during the combustion at  $25 \text{ kW/m}^2$ .

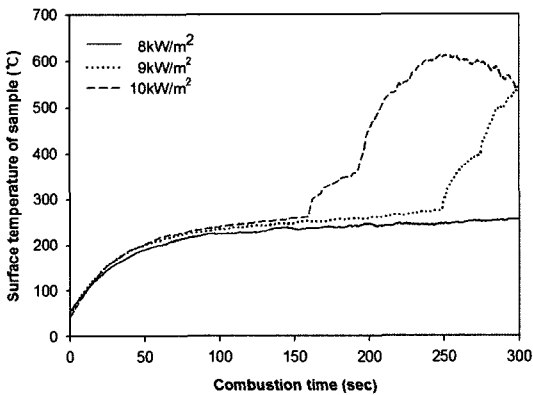


Figure 7. Surface temperature profile during the combustion at various incident heat flux of quercus variabilis fallen leaves.

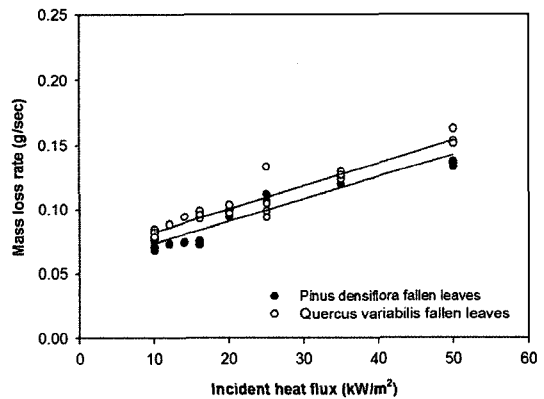


Figure 9. Maximum mass loss rate vs incident heat flux for fallen leaves.

는 것을 알 수 있다. 즉, 외부 복사열이 어느 일정 수치보다 높아지면 시료의 표면온도는 정상치를 얻지 못하고 착화가 발생하며, 외부 복사열이 증가할수록 착화에 이르는 시간이 짧아짐을 알 수 있다. 이 현상은 착화 여부가 온도에 관한 정상상태의 존재에 의하여 특정지을 수 있음을 의미한다.

### 3.4 질량감소속도

Figure 8은 외부 복사열이  $25 \text{ kW/m}^2$ 일 때 연소시간의 경과에 따른 질량감소속도를, Figure 9은 외부 복사열과 최대 질량감소속도와와의 관계를 나타낸 것이다. 두 시료에 대한 질량감소속도를 비교해 보면 활엽수종인 굴참나무 낙엽에서 최대질량감소속도는  $0.1331 \text{ g/s}$ 이고, 평균질량감소는  $0.0447 \text{ g/s}$ 인데 반하여 침엽수종인 소

나무 낙엽의 경우에는 최대질량감소속도가  $0.1114 \text{ g/s}$ 이고, 평균질량감소속도는  $0.0423 \text{ g/s}$ 로 측정되었다. 이로부터 같은 조건하에서 소나무 낙엽 보다 굴참나무 낙엽에서 연소현상이 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

외부 복사열에 따른 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 연소특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 시료에서 외부 복사열이  $9 \text{ kW/m}^2$  미만에서는 점화되지 않았다.
- 2) 외부 복사열의 변화에 따른 착화시간의 그래프로부터 예측된 임계열유속은 소나무 낙엽의 경우  $6.04 \text{ kW/m}^2$ , 활엽수 낙엽의 경우  $4.49 \text{ kW/m}^2$ 로 나타났다.

3) 외부 복사열이 증가함에 따라 착화온도가 낮아짐을 알 수 있으나, 굴참나무 낙엽의 경우  $16 \text{ kW/m}^2$ , 소나무 낙엽의 경우  $10 \text{ kW/m}^2$  미만에서 착화온도가 낮아지는 현상을 관찰할 수 있다.

4) 시료의 표면온도를 측정된 결과 소나무가 밀집되어 있는 곳에서 발생한 산불의 온도와 그 지속시간이 굴참나무가 밀집되어 있는 곳에서 보다 더 길어질 수 있다는 것을 예측할 수 있다.

5) 질량감소속도를 측정된 결과 같은 조건하에서 굴참나무 낙엽이 소나무 낙엽보다 연소현상이 더 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있었다.

### 기호설명

T	: Temperature [°C]
c	: Specific heat [J/kg · K]
q	: Heat flux [ $\text{W/m}^2$ ]
t	: Time [s]
$\alpha$	: Thermal diffusivity [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\beta$	: Ratio of convective grain and radiative loss with incident heat flux [-]
k	: Thermal conductivity [ $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ]
$\rho$	: Density [ $\text{kg/m}^3$ ]
0	: Initial, Ambient
i	: Incident, Initial
ig	: Ignition
( )"	: Per unit area
( ' )	: per unit time
MC[%]	: Moisture content[%]
$W_m$	: weight of sample before oven-dry
$W_d$	: weight of sample after oven-dry

### 참고문헌

1. 이시영, 원명수, 한상열, “산불발화지점의 임상 및 지형특성을 이용한 산불 발생 위험지수 개발”, 한국화재소방학회 논문지, Vol. 19, No. 4, pp.75-79(2005).
2. 과학기술부, “산불예측 및 감시기술개발”, pp.20(2002).
3. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, “지표화물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 한국방재학회 춘계학술발표논문지(2006).
4. 채희문, 이찬용, “산불 확산에 영향을 미치는 임지내 산림연료와 경사도에 관한 연구”, 한국농림기상학회지, Vol. 5, No. 3, pp.179-184(2003).
5. 이시영, “환경인자가 산불의 온도 및 진행속도에 미치는 영향”, 동국대학교 석사학위논문(1990).
6. W. T. Simpson, “Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes”, Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Forest Product Laboratory U.S.D.A. Forest Service Madison, Wisconsin, Chapter 12, pp.1-21(1987).
7. J. S. Michael, “Predicting the Ignition and burning Rate of Wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model”, NIST GCR 99-775, pp.47-66(1999).
8. G. H. H. Silcock and Shields, T. J., “A Protocol for Analysis of Time-to-ignition Data from Bench Scale Tests”, Fire Safety Journal, Vol. 24, pp.75-95(1995).
9. M. J. Spearpoint and Quintiere, J. G., “Predicting the burning of Wood Using an Integral Model”, Combustion and Flame, Vol. 123, pp.308-324(2000).
10. 박형주, 김홍, 하동명, “적분모델을 이용한 난연처리된 Douglas fir의 화재특성 예측”, 한국안전학회지, Vol. 20, No. 3, pp.98-104(2005).
11. Hyung Ju Park, “The Analysis on Combustion Characteristics of Flame Retardant Treated Wood Using an Integral Model”, Ph.D. Dissertation, Hoseo Uni.(2004).