

지표화 연료의 열량분석에 관한 실험방법 연구 A Study of Calory Analysis Methods about Surface Fire Fuel

김장환[†] · 김응식[†] · 박형주* · 이명보** · 김동현**

Jang-Hwan Kim[†] · Eung-Sik Kim[†] · Hyung-Ju Park* · Myung-Bo Lee** · Dong-Hyun Kim**

[†]호서대학교 안전보건학과, *호원대학교 소방행정학부, **국립산림과학원 산불연구과
(2008. 1. 25. 접수/2008. 9. 11. 채택)

요 약

본 논문에서는 산불의 한 형태인 지표화의 체계적인 연구를 위해 열량분석과 연소특성에 관한 실험방법과 측정 시스템을 제안하여 향후 산불 관련 연구에 있어서 이를 활용하고자 한다. 또한 제안된 방법과 시스템의 효용성을 나타내고자 부분적인 결과를 논문에 제시 하였다. 이를 위하여 지표화의 대표적인 연소 물질인 침엽수종과 활엽수종 낙엽을 선정하여 밀도 및 시료의 용기 크기를 변화시켜 가며 실험하였다. 열량분석은 통상 사용되는 분석기기 중 열중량 분석기(TGA : Thermogravimetric Analyzer), 연소열 측정장치(Oxygen Bomb Calorimeter)를 이용하여 분석하였으며, 연소특성은 기존의 이론적 모델로 가장 잘 알려져 있는 Pool fire 모델에 따른 모의 연소실험을 통하여 지표화 상부의 열 유체속도, 연소온도, 화염 높이에 따른 열방출 속도, 연소 질량감소 속도 등을 측정하여 분석하였다. 언급된 변수들은 지표화의 위험성 및 산불확산 예측에 기초 자료로 사용할 수 있다.

ABSTRACT

This study proposes the experimental methods which shows various guidelines for systematic study of surface forest fuels. The thermal characteristics of surface fire fuels such as Quercus Variabilis and Pinus Densiflora fallen leaves are measured using TGA and Oxygen Bomb Calorimeter. Both of them are common species of Korean forest. Also the combustion characteristics of surface fire fuels are analysed according to the methods which are commonly used in Pool Fire analysis. The measured parameters are gas velocity, temperature, flame height, heat release rate and mass loss rate. A system is designed to simulate the surface fire. Methods and results are shown for the application of forest fire study.

Keywords : Forest fire, Surface forest fire fuels, Thermal characteristics, Combustion characteristics

1. 서 론

최근 국내에서 발생되고 있는 대형 산불은 기상이변, 산림녹화 등으로 인한 하층 식생, 임목 등 산림 내 가연성 물질의 양이 증가와 산림의 이용 증가로 인하여 봄철 산불위험시기에 동시 다발적으로 발생하는 경향을 나타내고 있다.

산불은 진행 상태와 피해의 양상에 따라 지표화, 수간화, 수관화, 비산화로 진행되며 산불의 초기단계인 지표화는 지표에 쌓여 있는 잡초, 낙엽, 잡관목 등이 연소하는 형태로 지형, 기상, 바람의 영향을 받으며, 경

사지의 경우 시간당 4~7 km의 속도로 진행하고 바람이 강할 때에는 10 km이상 속도로 진행된다. 수간화는 나무의 줄기가 타는 산불로서 지표화가 강렬하게 연소할 때 일어나는 산불 형태이며, 수관화는 나무의 수관을 태우는 것으로서 나무의 수관(지엽)을 연소 시키는 산불이다. 일반적으로 지표화에서 나무가지에 불이 닿아 바람과 화염이 세어지면 복사열과 상승기류의 영향을 받아 나무 위쪽으로 불어서 수관화를 일으키게 된다. 따라서 지표화는 산불 확산에 초기단계로서 기본적으로 연구 되어야할 대상이다. 현재까지 국내에서는 이에 대한 방법론 및 실험 데이터는 간헐적으로 보고되고 있으며, 이의 범위는 열량분석 및 산불현장에 관련된 자료 분석 등으로 나뉜다.¹⁻⁴⁾

[†]E-mail: eskim@hoseo.edu

김동현,^{5,6)} 박형주⁷⁾ 등은 산불에 대한 주요수목인 굴참나무(*Quercus variabilis*: Q.V.)와 소나무(*Pinus densiflora*: P.D.)에 대한 열량 분석을 통해 각 부위별 전체 열량 값이 소나무가 굴참나무보다 열에 대한 저항성이 낮다고 판단할 수 있다고 하였다. 채희문,^{8,9)} Dupuy¹⁴⁾ 등은 2가지 종류의 연료인 침엽수(*Pinus pinaster* needles)와 침엽수 충진재(excelsior)를 이용 각 인자에 대한 연소 실험을 하였다.

본 연구에서는 산불의 발생 초기의 형태인 지표화에 대한 체계적인 연구를 위해 산림 내에 존재하는 가연물(낙엽, 고사목, 초본류, 임목)중에서 산불연료형별 조사 결과 연소물량이 많은 두 종류의 침엽수종과 활엽수종 낙엽을 선정, TGA, Oxygen Bomb Calorimeter를 이용하여 열량분석^{5,10)}을 실시하였다. 기존의 액체연료 모델로 널리 알려진 Pool fire 모델에서 측정되는 온도 분포, 화염높이에 따른 열방출 속도, 연소 질량감소 속도, 지표화 연료 상부의 열 유체속도 등을 중심으로 연소특성을 분석하였다. 따라서 본 논문에서는 열량분석과 연소특성 분석에 관한 실험방법 및 측정 시스템을 제시하였으며, 실험방법을 통하여 얻어진 데이터는 지표화의 위험성 및 산불확산 예측에 있어서 이를 활용하고자 한다.¹¹⁻¹³⁾

2. 실험

2.1 실험시료

지표화 연료에 대한 열량 분석에 사용된 시료는 침엽수종인 소나무 낙엽과 활엽수종인 굴참나무 낙엽을 자연 상태에서 채집, 시료의 동일한 함수율 조건을 맞추기 위해 45°C의 건조기에서 168 h 동안 건조시킨 후

사용하였으며, 건조 직후 함수율은 소나무 낙엽은 7.1%, 굴참나무 낙엽은 8.7%이다. 이들 시료에 대한 함수율 측정은 105°C의 건조기에서 장시간 건조시키면서 시료의 중량을 4시간 간격으로 측정하여 더 이상의 중량 변화가 없을 때까지 측정하고, 다음의 식(1)을 이용하여 계산하였다.

연소특성 실험 시료는 실험 준비 중 불가피하게 대기 중에 노출되며, 이때 시료의 함수율이 변화되어, 본 시험에 사용된 시료의 함수율은 10~15%이다.

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

여기서, MC : Moisture content [%]

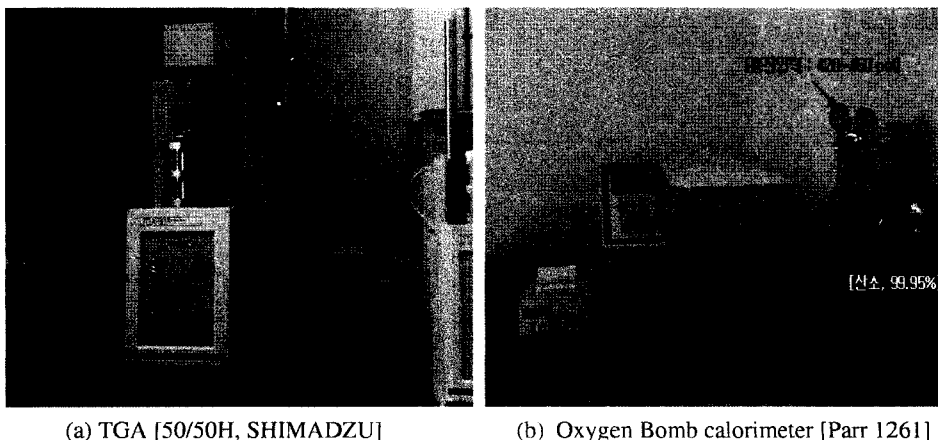
W_m : weight of sample before oven-drying

W_d : weight of sample after oven-drying이다.

2.2. 실험장치 및 방법

2.2.1 열량분석

열 특성을 분석하기 위해 Figure 1의 (a)는 SHIMADZU사의 TGA로 시료의 온도변화에 따른 열 특성 변화를 측정하기 위해 사용된 분석 장치이며, (b)는 단위 중량당 연소열을 측정하기 위해 사용된 Oxygen Bomb Calorimeter로 굴참나무 낙엽과 소나무 낙엽을 분쇄기를 이용하여 분쇄 후 시료로 사용하여 측정된 것이며, 그 이외의 잎, 그물망, 꼭지는 낙엽에서 분리 후 2 mm의 크기로 절단하여 사용하였다. 시료는 0.5~1.0 g씩 사용하였다. 점화선의 재질은 Nickel(길이 10 cm)이며, 고압 Bomb 내에 충전되는 산소의 순도는 99.95%이며, 압력은 30 kg/cm²으로 설정한 후 3회 실험하였다.



(a) TGA [50/50H, SHIMADZU]

(b) Oxygen Bomb calorimeter [Parr 1261]

Figure 1. Photograph of experimental apparatus.

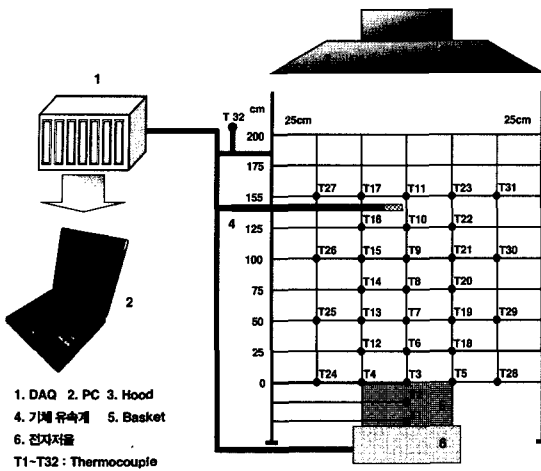


Figure 2. Experimental system.

2.2.2 연소특성 분석

시료에 대한 지표화 상부의 열 유체속도, 연소온도, 화염높이에 따른 열방출 속도, 연소 질량감소 속도 등에 대한 연소특성 분석에 사용된 측정 시스템의 개략도는 Figure 2와 같으며, 바스켓 중심축과 주위 온도를 측정하기 위해 32개의 열전대를 배치하였다. 이 중 T1는 바스켓 중심 바닥면에, T2는 바스켓 중앙부분(5 cm), T3는 바스켓 상부에 설치하였으며, T6~T11는 수직 중심축에 25 cm 간격으로 Ø1.6 mm K-type 열전대를 설치하였다. 바스켓 주위에는 20개(T12~T31)의 일반 실드 처리된 열전대를 사용 하였으며, 주위온도를 측정하기 위해 T32를 설치하였다. 질량감소량은 전자저울을 이용하여 1초 간격으로 측정 분석하였다. 점화는 바스켓 시료표면에 점화봉을 이용하여 약 3~5초 동안 유지

하였으며, 점화 후 연소가 시작되면, 화염의 수직과 수평온도를 측정하였으며, 기체의 유속을 측정하기 위해 유속 0~50 m/s, 온도 0~500°C의 측정범위를 갖는 기체 유속계를 바스켓의 직상부 1.5 m에 설치하였다. 화염의 높이는 비디오카메라를 이용하여 점화와 동시에 측정을 시작하여 불꽃이 완전히 없어지는 시점까지 측정하였으며, 5 cm간격으로 1 sec단위로 재생 분석 하였다. 온도변화는 DAQ(Data Acquisition)를 이용하여 기록하였고, 기체유속 및 전자저울은 별도의 인터페이스 Program을 이용하여 데이터를 1초 간격으로 자동으로 저장하였다.

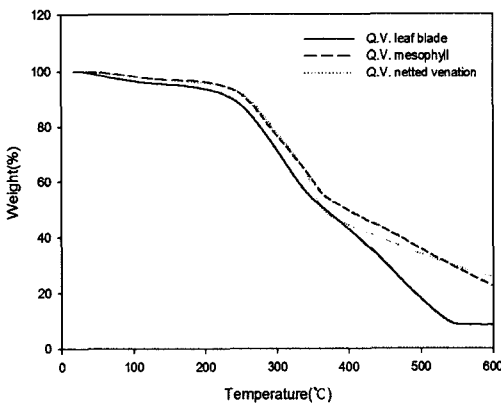
시료의 용기는 지름이 20 cm, 30 cm, 높이가 10 cm 인 두 종류를 사용하였으며, 이때 격자의 크기는 5x5 mm 인 원통형 바스켓을 사용하였다. 바스켓별 시료는 20 cm 인 경우 50 g, 70 g, 30 cm인 경우 150 g, 200 g로 변화시켜 가면서 수종별, 바스켓 지름별, 중량별로 각각 3 회씩 실험한 평균값을 이용하였다. 2006년 산불피해저감을 위한 진화기술 개발 보고서에 의하면 낙엽층 두께는 6~8 cm로 되어 있으며, 인근 산림 내 현장답사 시 낙엽층 두께는 대략 5~10 cm로 지형과 계절에 따라서 큰 차이를 보이고 있으며, 밀도 또한 계곡과 능선등의 지형에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 이외에도 지형 및 기상 인자인 함수율, 경사도에 따른 연소특성도 동일한 실험방법으로 측정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

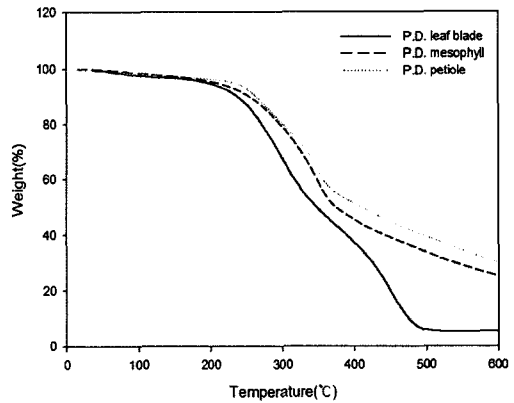
3.1 열량분석

3.1.1 TGA

Figure 3은 질소분위기에서 10°C/min의 승온 속도로



(a) Quercus variabilis fallen leaves



(b) Pinus densiflora fallen leaves

Figure 3. TGA curve.

실온에서 600°C까지 측정된 굴참나무와 소나무 낙엽의 각 부위별 열 중량 분해곡선을 나타내었다. 열중량 분석 결과 열분해 반응은 소나무 낙엽의 경우 155.6°C 굴참나무 낙엽의 경우 163.6°C에서 시작되었으며, 10%의 열 중량 손실에서는 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽에서의 열분해 온도는 거의 동일하였으나, 50%의 열 중량 손실 비율에서는 소나무 낙엽의 전체와 잎이 굴참나무 낙엽의 전체와 잎에 비해 약 20°C 정도 낮음을 알 수 있었다. 굴참나무 낙엽은 550°C, 소나무 낙엽은 490°C에서 더 이상 열 중량 손실이 일어나지 않아, 최대 600°C까지 승온 실험 측정하였다. 이러한 결과는 낙엽의 열분해 성분 구성비의 차이 때문인 것으로 판단되며, 산불로 인해 발생하는 화원에 의해 굴참나무 낙엽보다는 소나무 낙엽에서 보다 빠른 열분해가 발생될 수 있다는 것을 예측할 수 있다.^{5,7)}

3.1.2 연소열 측정 (cal/g)

소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽에 대한 연소열을 측정 한 결과 5,231 cal/g, 4,850 cal/g으로 각각 측정되었으며, 낙엽의 각 부위에 대한 연소열 측정결과는 Table 1에

Table 1. Combustion heat of Q.V. and P.D. fallen leaves⁷⁾

Type of sample	Quercus variabilis [cal/g]	Pinus densiflora [cal/g]
Leaf blade	4,850	5,231
Mesophyll	4,814	5,147
Netted venation (petiole)	4,605	4,669

나타내었다.

박형주 등에 의하면 연소열 측정결과 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 단위 중량당 연소열은 평균 약 450 cal/g의 차이가 남을 알 수 있었으며, 이로부터 동일 환경 조건에서의 산불 발생시 소나무 군락 지역에서 산불로 인한 위험성 및 피해의 정도가 높을 것으로 예측할 수 있다.⁷⁾

또한 Table 1에 나타낸 낙엽의 각 부위별에 대한 연소열을 측정결과에 의해 산불발생시 화염의 전파특성과 열원의 공급원으로 낙엽의 그물망이나 꼭지 부분이 아닌 낙엽의 잎 부분이 연소되면서 발생하는 열에 의해 더 큰 영향을 받는다는 것을 예측할 수 있다.

3.2 연소특성 분석

3.2.1 수직/수평온도 분포

Figure 4의 (a)는 소나무 낙엽 50g을 직경 20cm의 바스켓에 충전 후 바스켓 중심축에 따라 열전대(T3~T10)의 간격은 0.25m이며, T11는 0.3m의 간격으로 설치하였다. 온도 분포는 화염의 중심에 나타낸 것으로 최대온도는 T6에서 약 750°C로 측정되었다. 화염의 최대 온도는 바스켓의 표면으로부터 약 0.25m지점이며, 가장 온도가 낮은 T11(1.55m)의 온도는 약 100°C이다. James G. Quintiere 등에 의하면 높이에 따라 화염(Persistent Flame)에서 중간화염(Intermittent Flame)으로의 천이영역에 해당하는 영역인 것으로 판단된다.^{15,17)}

Figure 4의 (b)는 열전대 위치별 수직-수평의 온도 분포를 나타낸 것으로 바스켓 중심축을 기준으로 100~750°C의 온도 분포를 볼 수 있으며 중심축을 기준으로 좌우

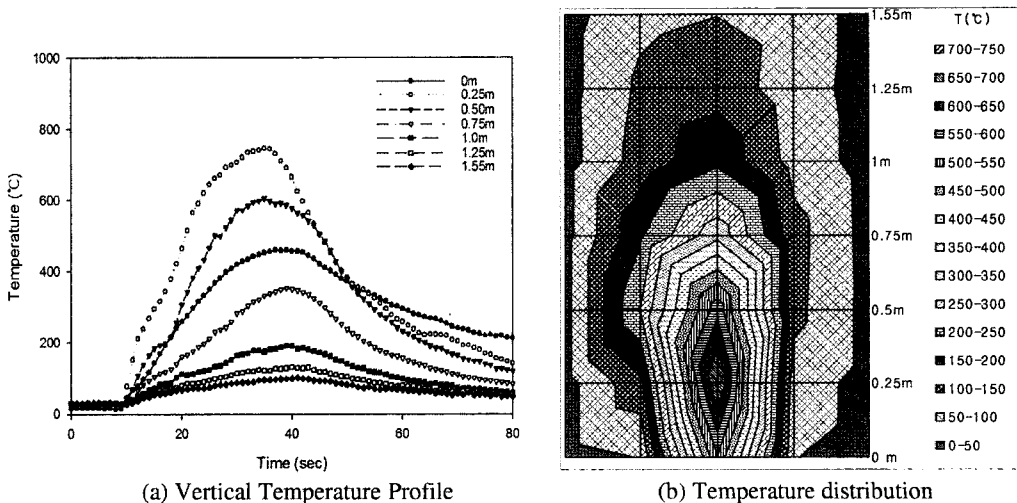


Figure 4. Temperature distribution around Flame Centerline (P.D.50 g-20 cm).

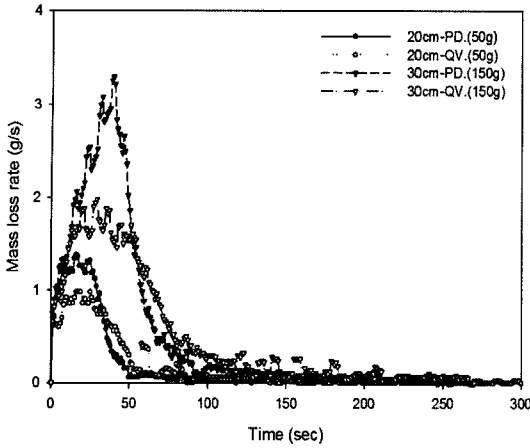


Figure 5. Examples of mass loss rate.

대칭적으로 온도분포가 이루어지고 있음을 알 수 있었다.^{15,17)} 격자 간격은 0.25×0.25 m으로 Figure 2와 같으며 (b)는 엑셀 프로그램을 사용하여 가시화한 온도분포를 그래프입니다.

3.2.2 질량감소속도 (Mass Loss Rate : MLR)

Figure 5은 바스켓별 직경에 따른 연료의 질량감소 속도를 측정된 예로 바스켓의 직경이 증가할수록 시료의 종류에 관계없이 질량감소속도가 증가함을 예측할 수 있다. 바스켓 직경 변화에 따른 최대 질량감소속도는 직경이 20 cm인 경우 소나무 낙엽 1.83 g/s, 굴참나무 낙엽 0.98 g/s, 30 cm인 경우 소나무 낙엽 3.3 g/s, 굴참나무 낙엽 1.98 g/s로 측정되었다. 또한 동일한 조건에서 침엽수종인 소나무 낙엽이 활엽수종인 굴참나무 낙엽에 비해 빠른 질량감소속도를 나타내었으며, 이는 두 시료간의 평균 열량값의 차이에서 기인된 것으로 판단된다.

3.2.3 질량감소속도와 화염 높이

Figure 6은 침엽수종인 소나무 낙엽을 직경 30 cm의 바스켓에 200 g 충전 후, 최대 화염 높이를 측정된 결과를 나타낸 것으로 약 50 sec 이후 화염높이가 약 1.2 m이며, 화염은 10~85 sec 동안 관찰되었다. 연소 시작 후 약 45 sec후에 최대 질량 감소가 발생하였으며, 약 5 sec 후에 최대 화염 높이 측정 되었다. Figure 6에서와 같이 질량감소속도의 변화에 따라 화염 높이가 변화됨을 알 수 있으며, 85 sec부근에서 소멸 후 질량감소는 시료의 훈소에 의한 것으로 사료된다.^{1,3,14)}

3.2.4 열량 구하는 방법

열방출속도(Heat Release Rate : HRR)은 연소물질이

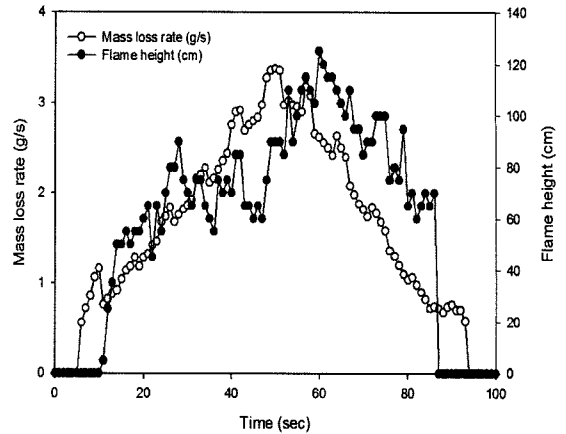


Figure 6. Mass loss rate and flame height.

연소 반응에서 열을 발생시키는 속도를 의미하며, 연소 화재 위험성 부문에서 가장 중요한 변수이다. 식 (2)에서 연소열은 기화반응에 의하여 단위 질량당 방출된 화학적 에너지를 말하며, Table 1의 연소열 값을 환산하면, 침엽수종 소나무 낙엽은 21.9 kJ/g, 활엽수종 굴참나무 낙엽은 20.3 kJ/g를 구할 수 있다. SFPE 방화공학 핸드북에 의하면 식(2)에 유효 연소열과 질량 감소속도를 곱하면 열 방출속도를 예측 할 수 있다.^{14,15)}

$$HRR = H_c \times MLR \tag{2}$$

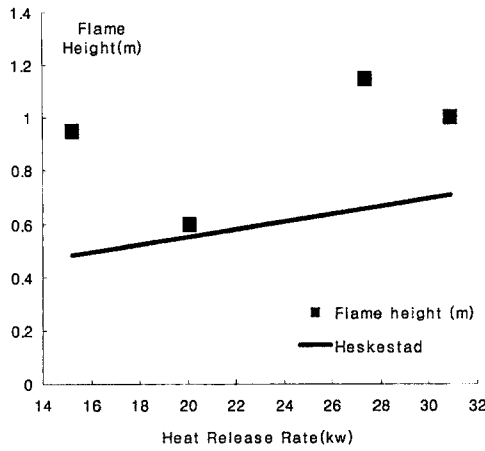
H_c : 유효 연소열 MLR : 질량감소속도

3.2.5 최대화염높이와 열방출속도

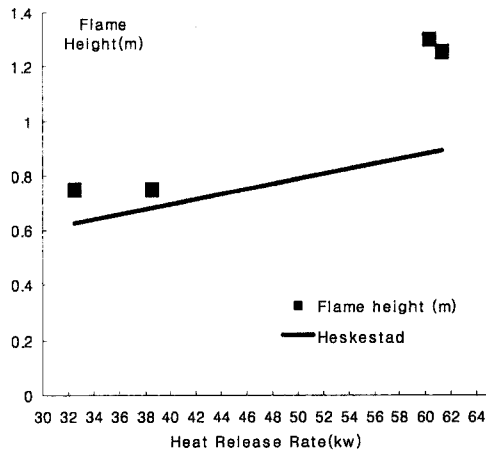
Figure 7은 침엽수종인 소나무 낙엽과 활엽수종인 굴참나무 낙엽으로 증량에 변화에 최대화염 높이와 열방출속도의 관계로 얻어진 그래프이다. 최대 화염 높이에 따른 열방출속도는 0~100 kw 미만으로 바스켓 별 최대화염높이에 따른 열방출속도는 20 cm인 경우 15~30 kW로 15 kW인 실험측정값의 경우 약 0.9 m, 식 (3)에 대입한 값은 약 0.5 m로 약 1.8배 차이가 났으며, 30 kW인 경우 1 m, 0.7 m로 관측된다. 30 cm인 경우 32~61 kW로 32 kW인 실험측정값의 경우 약 0.7 m, 식 (3)에 대입한 값은 약 0.6 m로 약 1.1 차이가 났으며, 62 kW인 경우 1.2 m, 0.8 m로 관측된다. 기존의 Heskestad 식 (3)을 이용한 화염의 높이 식과 비교하여 가시화시켰다.¹⁴⁻¹⁵⁾

$$L_{f,max} = 0.23Q_{max}^{2/5} - 1.02D \tag{3}$$

Q_{max} : [kw] L_{f,max}: m D: m



(a) 20cm



(b) 30cm

Figure 7. Maximum flame height and heat release rate.

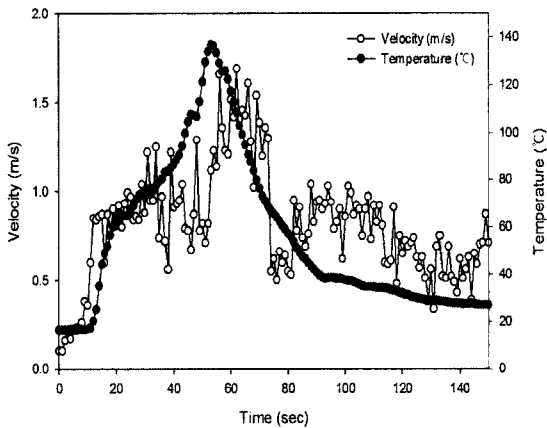


Figure 8. Gas velocity and temperature profiles (PD. 150 g-0.3 m).

3.2.6 기체유속

Figure 8은 침엽수종인 소나무 낙엽 150g을 직경 30cm의 바스켓에 충전 후 연소시 발생하는 기체유속과 온도를 측정된 것으로 연소 시 기체유속과 온도가 비례하는 것을 볼 수 있다. Figure 9에서와 같이 온도 변화에 따라 기체의 유속이 변화됨을 알 수 있으며, 최대 유속은 약 1.7 m/s이며, 이 때의 화염 최대온도는 140°C로 측정 되었다. 침엽수종 소나무 단순립 지하고는 6m이상이며, 소나무립-밀의 지하고는 0.7m내외로 지표층과 매우 인접하였다. 활엽수종 굴참나무 지하고는 4.5m이내이며, 혼효림(소나무-참나무류)의 지하고는 1.2m로 측정 관찰 되었다.¹²⁻¹³⁾ 따라서 지표화에서 수관화로의 전이에 있어서 기체유속 및 온도 측정 위치는 바스켓 직상부 1.5m 지점에 고정설치 측정하였다.

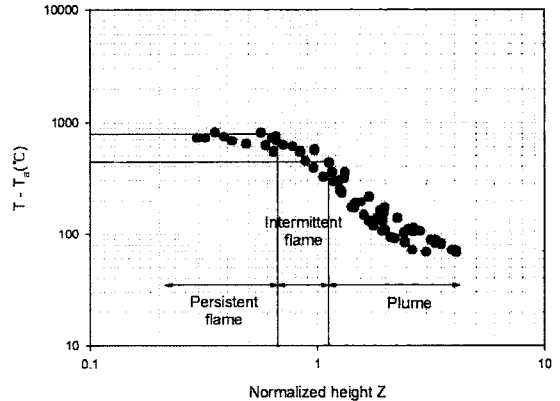


Figure 9. Maximum temperature vs normalized flame height.

3.2.7 정규화염

Figure 9은 전체 시료의 연소실험으로부터 정규화염 높이와 수직 온도 분포를 나타낸 그래프로 화염의 높이를 화염(Persistent Flame), 중간화염(Intermittent Flame), 플룸(Plume) 등 3개 구역으로 구분 할 수 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 최고 온도는 약 810°C로 중간화염 부근에서 관찰되었다.

3.3 고찰

산불은 연료, 지형, 기상인자에 의한 영향을 받으며, 이 3개의 인자는 산불의 진행방향, 진행속도 등을 결정하는 산불의 주요 인자이다. 본 논문에서는 연료인자를 분석하기 위한 실험방법에 대하여 중점을 두었으며, 형태, 크기, 밀도에 따라 연소 형태가 다르게 나타나며, 지형인자의 경우 산불의 진행방향과 확산속도에

중요한 영향을 준다. 또한 기상인자는 강우량, 바람, 습도, 온도 등의 인자로 연료의 연소현상에 영향을 준다. 본 논문은 국내 대표적인 수종인 침엽수종(소나무) 및 활엽수종(굴참나무)을 선택하여 실험방법을 제시하였고, 추후에는 다른 종류를 대상으로 확대 실시 할 계획이다.

4. 결 론

이상에서 제시된 실험 방법으로 연소실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 지표화에 대하여 열량 및 연소 특성을 Pool fire와 동일 분석 방법으로 측정된 결과 액체와 고체 연료의 차이가 있음에도 불구하고 유사한 특성을 관찰할 수 있었으나, 열량이나 온도가 액체 연료만큼 높은 효율을 나타내지는 못하고 있다.

2) TGA 분석에서 10%의 열 중량 손실에서는 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽에서의 열분해 온도는 거의 동일하였으나, 50%의 열 중량 손실 비율에서는 소나무 낙엽의 전체와 잎이 굴참나무 낙엽의 전체와 잎에 비해 약 20°C 정도 낮음을 알 수 있었다. 산불에 의해 굴참나무 낙엽보다는 소나무 낙엽에서 보다 빠른 열분해가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3) 소나무 낙엽의 연소열은 5,231 cal/g이고, 굴참나무 낙엽에 대한 연소열은 4,850 cal/g이다. 단위 중량당 연소열은 큰 차이가 남을 알 수 있었다. 동일 환경조건에서의 산불 발생시 소나무 군락 지역에서 산불로 인한 위험성 및 피해의 정도가 높을 것으로 판단되며 국내의 대표수종에 관하여 낙엽연소열 데이터를 확보하여야 한다고 사료된다.

4) 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 질량 감소속도를 알고 발열량을 구하였으며 화염높이와의 상관관계를 알 수 있었다.

5) 화염의 주위의 수직 및 수평 온도분포를 알 수 있었다.

6) 동일한 조건에서 침엽수종인 소나무 낙엽이 활엽수종인 굴참나무 낙엽에 비해 빠른 질량감소 속도를 나타내어 지표화에서는 빠른 전파속도를 보이고 있다.

7) 수관화로의 전이 메카니즘을 이해하기 위하여 화염높이 및 온도분포는 중요한 데이터로 활용이 가능하다.

참고문헌

1. 김응식, 김장환, 이명보, 김동현, 이시영, 박형주, “지

- 표화 연료의 열량분석에 관한 방법 연구”, 한국화재소방학회 춘계학술발표회 논문집(2006)
2. 김응식, 이시영, 김홍, 송종훈, 김수영, “유동장 해석을 통한 산불 확산 예측프로그램의 개발”, 한국임학회지, pp. 528-534(1998)
3. 김장환, 김응식, 이명보, 김동현, 박형주, “밀도에 따른 지표화 연료의 연소 분석”, 한국안전학회 춘계학술발표회 논문집, pp.165-170(2007)
4. 김장환, 김응식, 박형주, “지표화 연료의 연소특성 및 열량분석에 관한 연구”, 대한토목학회 전문학회 세미나(한국방재학회), pp.15-20(2007)
5. 김동현, 고재선, 최세환, 김광일, “고성산불지역에서의 화재조사와 주요수목의 열량분석에 관한 연구”, 한국화재소방학회지, 제13권, 제1호(1999)
6. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, “지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 한국방재학회(2006)
7. 박형주, 김응식, 김장환, 김동현, 이명보, “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회 춘계학술발표회 논문집, pp.302-308(2007)
8. 채희문, 이찬용, “산불 확산에 영향을 미치는 임지내 산림연료와 경사도에 관한 연구”, 한국농림기상학회지, 제5권, 제3호, pp.179-184(2003)
9. 채희문, 이찬용, “모의실험에 의한 풍속변화에 따른 산불 확산속도와 강도 분석”, 한국농림기상학회, pp. 213-217(2003)
10. 이시영, 박영주, 이해평, “수종별 낙엽과 생엽의 발열량 특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회 추계학술논문발표회, pp.438-443(2007)
11. 이시영, 이명욱, “숲 가꾸기 실행 및 미 실행지의 임분특성에 따른 산불위험성 비교분석”, 한국화재소방학회 논문지, 제21권, 제4호, pp.52-58(2007)
12. 안상현, 원명수, 김동현, 강영호, 이명보, 이시영, “의성군지역 산불발생 및 대형화 위험지역 구분”, 한국지리정보학회, 제8권, 제2호, pp.117-124(2005)
13. 이명보, 정주상, 조명희, 김응식, “산불피해저감을 위한 진화기술 개발”, 자연재해방재기술개발사업 결과보고서(2006)
14. J.L. Dupuy, J. Marechal, D. Morvan, “Fires from a cylindrical forest fuel burner : combustion dynamics and flame properties”, combustion and flame, pp. 65-76(2003)
15. James G. Quintiere, “Principles of Fire Behavior”, Delmar Publishers
16. G. Heskestad, “Fire Safety”, J.5, pp.109(1983)
17. B.J. McCaffrey, “Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results”, National Bureau of Standards Report, No NBSIR79-1910(1979)