목재칩과 목분의 하향 심부화재특성

Downward Smoldering Fire Characteristics of Wood Chips and Wood Flour

김진수* · 이동호**

Kim, Jin Su · Rie, Dong Ho

Abstract

Deep-seated fire that flameless combustion is one of the smoldering fires. It continues when fuel condensed state for heated by temperature. Deep-seated fire is toxic compounds many more than flame combustion. When that is no in case of heat source that is vulnerable, will serve as a middle step to generate a flame. However, causing deep-seated fire progress is not consistent. Also it is difficult to reproduce the experiment. The study is basic experiment for reproduce the deep-seated fire according to the density of the wood, deep as the basis for the experiment to analyze the burning rate of the fire. It is analyze that characteristics of the wood-flour and wood chips in the fire. Experimental container made of quartz was used in order to observe the eyes, the fire, the rate of progress in the vessel equipped with a thermocouple, to be able to measure the internal temperature. In addition, by using an infrared thermal imaging camera on the outside surface temperature was measured. Weight by measuring the reduction of deep-seated fire burning rate and calorific value of the correlation was derived.

Key words : Deep-seated fire, Burning rate, Fire characteristics of the wood, Calorific value

요 지

저온 무염연소인 심부화재는 훈소의 한 형태로써 응축상태 연료의 표면을 직접 가열할 때 발산되는 열에 의해 지속된다. 심부화재는 화염연소보다 연료 중에 독성 화합물로 전환되는 양이 많고 열원의 강도가 약해 직접 화염을 발생시킬 수 없을 때, 화염을 발생시키는 중간단계 역할을 하게 된다. 그러나 심부화재를 발생시키는 진행과정이 일관되지 않고, 재현이 어려워 심도 있는 연구가 이뤄지지 않았다. 본 연구는 정량적인 방법으로 심부화재를 재현하고 목재의 밀도에 따른 심부화재의 연소속도를 분석하기 위한 기초 실험으로써 목분과 목재칩의 하향의 심부화재 특성을 분석하였다. 실험은 하향의 심부화재 진행 속도를 육안으로 관찰 가능하도록 석영으로 제작한 용기를 사용하였으며 용기 내부에 열전대를 장착하여 내부온도를 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 외부에 적외선 열화상 카메라를 이용하여 표면 온도를 측정하여 심부화재 연소속도 및 발열량과의 상관관계를 도출하였다.

핵심용어 : 심부화재, 연소속도, 목재의 화재 특성, 발열량

1. 서 론

곡물, 사료, 석탄, 목재 및 다공성 물질은 잠재적인 화재의 원인이 된다. 그러나 속도가 느린 저온 무염연소인 심부화재는 유염연소인 일반화재와는 다르게 발생 사실을 인지하기 어렵고, 일반적인 소화시설로 진압할 수 없어 미국의 NFPA와 우리나라 NFSC에서도 표면화재보다 까다로운 규정을 적용하고 있다.

심부화재는 훈소의 한 형태로써 응축상태 연료의 표면을 직접 가열할 때 발산되는 열에 의해 지속된다. 심부화재는 화염연소보다 연료 중에 독성 화합물로 전환되는 양이 많고

열원의 강도가 약해 인체에 유해하나 인지가 어렵다.(황성욱 등, 2011) 심부화재의 주요한 가연물이 되는 나무는 절반가량이 셀룰로오스로 이루어져 있고, 질량으로 보았을 때 이 셀룰로오스의 절반가량은 산소로 이루어져 있다. C, H는 그 자체만으로도 연소가 잘 이루어지는 물질이며, 셀룰로오스의 열분해 시 발생하는 O는 대기중의 산소 농도가 16% 이하로 낮아지더라도 C와 H의 연소를 도와 지속적으로 연소가 이루어질 수 있다. 이러한 심부화재는 산소가 충분하지 못하므로 활발한 연소는 진행되지 못하며 불꽃 없는 화학반응(훈소)이 계속된다. 훈소는 목재뿐만 아니라 면과 같은 식물섬유나 종이 등 천연 고분자물질을 이용한 가연물의 경우 모두 해당된

*정회원. 인천대학교 소방방재연구센터 연구원(E-mail: launch@incheon.ac.kr)
Member. Fire Disaster Prevention Research Center, National University of Incheon

**교신저자. 정회원. 인천대학교 소방방재연구센터 교수(Tel: +82-032-835-8293, Fax: +82-032-835-0779, E-mail: riedh@incheon.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Fire Disaster Prevention Research Center, National University of Incheon

다(이승훈, 2009).

심부 화재의 대표적 예는 대구 서문시장 화재로서 화재 진압이 완료된 이후 심부화재에 의한 2차 화재로 이어지는 사고로 발생되었다. 심부화재 특징은 진행과정이 일관되지 않고, 재현이 어려워 아직 규격화 된 장비가 개발되지 않고 있으며, 국내에서도 관련 연구가 활발히 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 심부화재의 평가에 대한 정량적이고 체계적인 연구를 위한 기초 실험으로써 입도가 다른 목재와 목재칩을 사용하여 심부화재를 재현하고 방출열량 및 화재전파속도의 규명을 위한 실험을 실시하였다. 하향의 심부화재 재현 및 평가는 콘 칼로리미터(Cone calorimeter)를 이용하여 입도가 다른 목분과 목재칩의 열방출률 측정하였고, 열전대를 이용하여 내부 온도를 측정함과 동시에 비접촉 온도계측 방법인 적외선열화상 카메라를 이용하여 심부화재의 연소패턴과 연소 전파속도를 규명 하였다.

기존의 국내 연구는 산·불임야 화재연구를 중심으로 진행되었다. 김동현 외 4명은 “산불 지표화의 1차원 화염전파 모델의 수치해석 연구”(김동현 등 2008)에서 고체연소물질의 표면화염전파에 대한 수치해석을 통해 제시한 1차원 지표화 확산 모델식에서 지표연료의 화염유지시간, 화염의 온도, 지표연료의 착화온도 등에 대한 실험 및 이론식을 적용한 바 있다. 또한 김용식, 김장환 외 3명의 “밀도에 따른 지표 연료의 연소실험 분석”(김용식 등, 2010)에서는 굴참나무와 소나무 낙엽을 이용하여 연료의 밀도 변화에 따른 연소속도, 연소시간 등의 연소특성을 분석하여 밀도와 연소속도의 관계를 규명하였고, 김동현, 김장환 외 1명의 “뒷불 특성에 관한 실험방법 연구”(김동현 등, 2010)에서는 열전대를 장착한 모형 실험장치를 제작하여 낙엽 분해층에 따른 화재의 전이온도, 전파속도 등을 연구하였다.

국외 연구로는 J. Madrigal 외 4명이 “Effective Heat of Combustion for Flaming Combustion of Mediterranean Forest Fuels”(J. Madrigal 등, 2010)에서 벤치 스케일의 Calorimeter를 이용하여 산불 화재의 연료인 낙엽의 연소 값을 측정하였고, LEI Yi 외 1명은 “Experimental Study of Upward Forward Smoldering Combustion”(LEI Yi 2011)에서 폴리우레탄의 상향 연소 실험을 통해 내부 온도를 측정하였다. 또한 Fang He 외 1명은 “Experimental investigation of natural smoldering of char granules in a packed bed”(Fang He, 2011)에서 복수의 열전대를 이용하여 나무숯의 상부와 하부 방향으로의 혼소 내부 온도를 측정한 바 있다. 기존 연구는 심부화재의 종류 중 하나인 산불화재의 특성을 중점적으로 선정 연구하였다.

2. 실험 방법 및 과정

2.1 실험 방법

2.1.1 시료의 선정

실험 대상은 심부화재 대상 물질 중 사용빈도가 높은 목재인 뉴송(뉴질랜드산 소나무)으로 불리는 라디에타 소나무를 선정하였다.

Table 1. Wood flour and wood chip

Sample	View	Photograph by using Micro CMOS camera
Wood Flour
	500 μm~1,000 μm	
Wood Chip
	1,000 μm~20,000 μm	

Table 1의 좌측 사진은 목분(Wood flour과 목재칩(Wood chip)의 사진을 나타내며, 우측 사진은 목분과 목재칩을 마이크로 CMOS 카메라로 촬영하여 그 크기를 나타내었다. 실험에 사용된 목재의 입자는 진동체를 이용하여 500 μm~1,000 μm 크기의 목분과 1,000 μm~20,000 μm 크기의 목재칩으로 체가를 하여 사용하였다.

이들 시료에 대한 함수율 측정(김장환 등, 2008년)은 80°C의 조건하에 건조기에서 62시간 건조 후 시료의 질량 변화가 없을 때까지 4시간 간격으로 반복 측정하여 제작 실험하였으며, 다음의 식 (1)을 이용하여 함수율을 계산하였다(Simpson, 1987). 건조 직후 함수율은 목분이 10.6%, 목재칩이 11.8%이다.

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

MC: Moisture content [%]

W_m : Weight of sample before overdry

W_d : Weight of sample after overdry이다.

2.2 열 특성 분석

시료의 열 특성을 분석하기 위해 Cone Calorimeter를 사용하여 열방출률(Heat release rate)을 측정하였다. 일반적으로 열방출률은 화재가 발생하는 동안 주어진 시간의 한 점에서 순간적으로 방출된 열량을 말한다. 즉, 연소물질이 연소 반응에서 열을 발생시키는 속도를 의미하며, 연소 화재 위험성 부문에서 가장 중요한 변수이다(Hirschler, 1992). 열방출률 측정은 ISO 5660-16 시험방법을 기준으로 하며 (2)와 같은 식으로 계산된다(ISO 5660-1, 1993).

$$\dot{q}(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{r_o} \right) (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \cdot \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \quad (2)$$

$\dot{q}$: 열방출률(kW)

Δh_c : 순연소열(kJg-1)

r_o : 양론적 산소/연료 질량비

C : 오리피스 유량계 교정 상수($\sqrt{m \cdot g \cdot k}$)

Δp : 오리피스미터 압력차(Pa)
 T_e : 오리피스미터 내에서 가스 절대온도(K)
 $X_{O_2}^0$: 산소 분석기 눈금의 초기 값
 X_{O_2} : 산소 분석기 눈금 값

열 특성 측정은 Cone calorimeter 시험법에 맞게 규격화된 용기인 세로 100 mm × 가로 100 mm 시편 홀더에 알루미늄 포일을 놓고 준비된 목분과 목재칩을 채운 후 실험하였다. 이때, 시료를 담은 홀더에 복사 열 유속(Heat Flux) 25 kW/m²을 노출시켰으며 시료가 모두 탄화되어 산소농도가 안정화 되는 시점인 600초까지 진행하였다.

목분과 목재칩 모두 3번씩 반복 실험하였으며 Table 2는 실험에 사용된 목분과 목재칩의 질량과 밀도를 나타낸다. 입도가 다른 목분과 목재칩은 압착하여 같은 밀도의 조건하에서 실험을 실시하였다.

Fig. 1은 목분의 열방출률을 시간에 따른 그래프로 나타내었다. 열방출률은 3회의 반복 실험결과 유사한 그래프 패턴을 나타냈으며 실험 시작 67초 후에 최대 열방출률(Peak heat release rate)에 도달하였다. 이 때 최대 열방출률은 각각 88.57 W/m², 88.31 W/m², 86.13 W/m²으로 평균 87.67 W/m²의 값을 나타내었다.

Fig. 2는 목재칩의 열방출률을 나타낸다. 목재칩은 목분보다 6초 빠른 61초에 최대 열방출률에 도달하였고 84.69 kW/m², 89.88 kW/m², 91.72 kW/m²으로 평균 88.76 kW/m²의 값으로 나타났다.

최대 열방출률은 입도가 다른 목분 및 목재칩도 크게 차이가 발생하지 않음을 확인하였다. 또한 최대 열방출률에 도달

Table 2. Property of sample material

Sample	Quality of the material	
	Weight(g)	Density (g/cm ³)
Wood flour	13.13	0.15
	13.11	
	13.09	
Wood chip	13.12	0.15
	13.14	
	13.10

Fig. 1. Wood flour heat release rate at 25 kW/m²

Fig. 2. Wood chip heat release rate at 25 kW/m²

Table 3. Peak heat release rate

	Number	Peak HRR at 25 kW/m ²	Average value (MJ/m ²)
Wood flour	1	88.57	87.67
	2	88.31	
	3	86.13	
Wood chip	1	84.69	88.76
	2	89.88	
	3	91.72	

하는 시간의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 동일 밀도를 충전시키기 위해 압착과정을 거친 목재칩의 경우 복원력이 발생하여 공극률이 증가하는 형태로 연소하기 때문으로 보이며, 압착과정을 거치지 않은 목분의 경우 일정 밀도를 유지하며 연소에 의해 부피가 감소하는 형태로 진행되기 때문으로 사료된다.

Fig. 3은 목분의 총열방출률(THR, Total heat release rate)을 나타내었다. 3회 반복 실험한 총열방출률은 각각 21.85 MJ/m², 20.99 MJ/m², 21.07 MJ/m²으로 평균 21.30 MJ/m²의 값으로 나타났다.

Fig. 4는 목재칩의 총열방출률을 나타내었다. 총열방출률은 21.32 MJ/m², 22.04 MJ/m², 23.12 MJ/m²으로 목분과의 차이가 거의 없는 평균 22.16 MJ/m²으로 나타났다.

Fig. 3. Wood flour total heat release rate at 25 kW/m²

Fig. 4. Wood chip total heat release rate at 25 kW/m²

Table 4. Total heat release rate

	Number	THR at 25kW/m² (MJ/m²)	Average value (MJ/m²)
Wood flour	1	21.85	21.30
	2	20.99	
	3	21.07	
Wood chip	1	21.32	22.16
	2	22.04	
	3	23.12	

Table 4는 Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 바탕으로 표로 수치화 하여 나타내었다.

2.3 심부화재 실험 장치 및 방법

Fig. 5는 심부화재를 평가하기 위한 심부화재 평가 계통도를 나타낸다.

실험 장치는 하부와 상부가 개방된 용기의 구조에 0.3φ(선경)×1 mm(간격)의 Mesh(메쉬망)를 설치하였다. 심부화재용

- ① Quartz glass
 - ② Thermocouple
 - ③ Forward looking infrared, FLIR
- Fig. 5. Case D schematic diagram

Table 5. Property of sample material

Sample	Quality of the material	
	Weight(g)	Density(g/cm³)
Wood flour	141.6	0.15
Wood chip	141.3	0.15

실험용기는 내경 100 mm 높이 120 mm의 석영으로 제작하여 외부에서 적외선 열화상 카메라를 이용하여 비접촉 온도 측정이 가능하며 용기 중앙에 열전대(Thermocouple)를 장착하여 내부 중심 온도를 측정하였다. 또한 용기로부터 1 m 떨어진 외부에는 적외선열화상 카메라(FLIR T200)를 설치하여 온도를 측정 하였다.

실험은 밀도를 동일하게 하기 위해 Table 5와 같이 목분과 목재칩 모두 141 g씩 충전 시켰으며 콘 히터를 사용하여 25 kW/m²의 열유속으로 점화시켰다.

3. 실험 결과 및 고찰

Table 6은 석영용기의 깊이 방향으로의 심부화재 진행 상황을 외부에 장착한 열화상 카메라로 촬영한 결과를 나타낸다. 온도 측정은 시료에 점화원으로 사용된 콘 칼로리미터의 콘 히터 가열 열량의 영향이 미치지 않는 30분부터 70분간의 온도 변화를 측정하였으며, 측정된 열화상을 분석하여 심부화재의 전파속도를 추정하였다.

Table 6의 (a)는 목분을 대상으로 석영홀더 내부의 심부화재의 열화상을 나타낸다. 가장 밝은 부분은 심부화재 내부의 중심을 나타내며 시간 경과에 따라 연직 하부 깊이 방향으로 이동하는 현상을 파악할 수 있다. 30분 경에는 13 mm 위치에 존재하던 고온의 심부는 100분 경 51 mm까지 연소가 진행되었다.

Table 6의 (b)는 깊이 방향으로의 목재칩 심부화재 진행 상황을 열화상으로 촬영하여 나타낸 결과이다. 콘 히터의 영향을 받는 30분까지는 목분과 같은 위치에 존재하며 100분 경과 41 mm까지 진행됨으로써 목분과 10 mm 가량 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 Table 5의 결과로부터 깊이 방향으로의 심부화재에 진행속도에 따른 화재 위치를 기준으로 나타낸 그래프이다.

Fig. 6의 (a)는 시간에 따른 목분의 깊이 방향 심부화재 위치를 나타내었으며 최소제곱법(Least square method)을 통해 관계식을 도출하였다. (b)는 깊이 방향으로의 목재칩 심부화재 위치를 시간에 따른 거리로 나타낸 그래프이며, 관계식으로 정리된 결과는 Table 7에 나타났다. 목분에 비해 속도가 낮은 기율기의 값을 나타냈으며 계산된 식을 이용하여 깊이 방향으로의 목재칩 심부화재 속도를 산출할 수 있다.

이러한 목분과 목재칩의 이동 속도 차이는 입도가 적은 목분의 열이 외부로 방출되기 어려워 내부의 온도 전달을 빠르게 하였기 때문에 나타난 결과로 보인다.

Fig. 7은 내부에 장착한 Thermocouple을 이용하여 온도를 측정한 결과이다. 목분의 온도는 8,000초가 지난 시점에

Table 6. Velocity of deep seated fire

(a) Wood flour

(b) Wood chip

(a) Wood flour

(b) Wood chip

Fig. 6. Velocity of deep seated fire

Table 7. Least square method

	Relational expression
Wood flour	$Y_f = 0.56X - 2.82$
Wood Chip	$Y_c = 0.42X + 0.31$
$Y = \text{Distance(mm)}, X = \text{Time(min)}$

Fig. 7. Temperature of thermocouple

473°C까지 증가하였고, 목재칩은 339°C까지 증가하였다. 목분의 온도가 목재칩 보다 높게 나타나는 특징이 관찰되었다.

4. 결 론

목분과 목재칩을 대상으로 연직 하부로의 심부화재 전파특성을 규명하기 위하여 콘 칼로리미터를 이용한 발열량 측정과 석영용기를 이용한 비침측 온도계측 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 충전 밀도에서 입도가 다른 목분과 목재칩의 경우 최대 열방출률은 목분이 87.67 W/m², 목재칩이 88.76 W/m²으로 나타났고 열방출률은 목분의 경우 21.30 MJ/m², 목재칩은 22.16 MJ/m²으로 나타남으로써 목분과 목재칩은 열방출률에 큰 차이가 발생하지 않음을 확인하였다.
- 2) 동일한 밀도의 경우 목재칩에 비해 충전물이 높은 목분의 내부 온도가 목재칩의 내부 온도 보다 높게 나타났다.
- 3) 적외선 열화상을 기준으로 연직하부로의 심부화재 속도는 목분과 목재칩이 각각 0.56 mm/min, 0.42 mm/min의 값으로 진행됨을 밝혔다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 소방방재청 차세대 핵심 소방안전기술 개발사업 “심부화재 진압용 소화용수 기준 평가 및 분석”에 대한 연구비 지원에 의한 결과의 일부이며 본 연구를 가능케 한 소방방재청에 감사드립니다.

References

- Fang He, Frank Behrendt, (2011) “Experimental investigation of natural smoldering of char granules in a packed bed”, *Fire Safety Journal* 46, pp. 406-413.
- Hirschler, M.M. (1992) “Heat Release from Plastic Materials”, in *Heat Release in Fires*, V. Babrauskas and S.J. Grayson eds., Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 373-422.
- Hwang, S.-W. and Lee, W.-H. (2011) “Hardness and Dimensional Stability of Radiata Pine(*Pinus radiata* D.Don) Heat-Compressed Wood”, *Mokchae Konghak*, Vol. 39, No. 3, pp. 206-212.
- ISO 5660-1 (1993) “Reaction to Fire Part 1, Rate of Heat Release from building products(Cone Calorimeter)”, Generer.
- Kim, D.-H., Kim, J.-H., and Kim, J.-H. (2010) “The Study on Experimental Method of Smoldering Ground Fire”, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 24, No. 6, pp. 1-6.
- Kim, D.-H., Tanaka, T., Himoto, K., Lee, M.-B., and Kim, K.-I. (2008) “A Numerical Study of 1-D Surface Flame Spread Model -Based on a Flatland Conditions-”, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 22, No. 2 pp. 63-69.
- Kim, E.-S. Kim, J.-H. Kim, D.-H. Park, H.-J., and Kim, J.-H. (2010) “A Combustion Analysis of Surface Fuel Burning Experiment According to Density Variation”, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-7.
- Lee, S.H. (2009) “The theory and practice of fire investigation”, *DongHwaTechnology*, pp. 23-86.
- LEI Yi, LIANG Dong, (2011) “Experimental Study of Upward Forward Smoldering Combustion”, *Sciencedirect procedia engineering*, pp. 196-204.
- Madrigal, J., Guijarro, M., Hernando, C., Díez, C., and Marino, E. (2010) “Effective Heat of Combustion for Flaming Combustion of Mediterranean Forest Fuels”, *Fire Technology*, 47, pp. 461-474.
- Simpson, W.T. (1987) “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.

© 논문접수일 : 2012년 11월 14일

© 심사의뢰일 : 2012년 11월 19일

© 심사완료일 : 2012년 11월 30일