

뒷불 특성에 관한 실험방법 연구 The Study on Experimental Method of Smoldering Ground Fire in Forest Fire

김동현 · 김장환* · 김응식*†

Dong-Hyun Kim · Jang-Hwan Kim · Eung-Sik Kim*†

국립산림과학원 산불연구과, *호서대학교 안전보건학과
(2009. 9. 30. 접수/2010. 12. 10. 채택)

요 약

산불 형태 중에서 뒷불은 지표층 내부의 발화점 이상 온도가 분해층에서 부식층으로 전이되어 뒷불이 발생 할 수 있는 형태로 잠재적 위험성을 가지고 있다. 본 논문은 뒷불의 현장과 유사한 지표층 구조로 설정하여 실험을 통해 뒷불의 잠재적 위험성과 연소특성 규명을 목적으로 한다. 시료는 침엽수종 소나무 낙엽층과 활엽수종 굴참나무 낙엽층으로, 실제 산림내의 지표층 구조인 낙엽층, 분해층, 부식층으로 구분하여 재현하였다. 8개의 열전대(K-type)를 층별 경계면과 그 사이에 배치하여 전이온도, 지속시간, 전파속도를 측정하였다. 결과적으로 F-H층으로 전이되는 경우와 전이가 일어나지 않은 경우는 L층과 F층 경계면의 발화조건이며, 유기물층의 뒷불 전이 임계습도는 35~44% 사이에 존재하며, 온도는 350°C 이상시 뒷불 전이가 일어날 확률이 아주 높다는 결론을 도출하였다. 본 연구에서는 다층구조의 뒷불 모델을 제시하였으며 이를 사용하여 훈소의 층간 전이현상, 함수율에 따른 발화여부, 전파속도 및 시간에 따른 경계면의 온도변화 등을 알 수 있었다. 또한 뒷불의 연소특성을 규명할 수 있는 실험방법을 확립하였다.

ABSTRACT

A smoldering ground fire can be a probable cause of reignition of surface fire when transmitted from Fermentation layer to Humus layer with temperature higher than that of ignition. Purpose of this paper is to identify experimental methodology on the potential risk of a smoldering ground fire, which is similar to the real surface fuel bed, and its combustion characteristics. The fuel model designed in this study is composed of 3 layers such as Litter layer, Fermentation layer and Humus layer and 8 Thermocouples are set through 3 layer at each boundary and in between to detect the temperature change and duration of smoldering and propagation velocity. As a result, it was observed that ignition conditions in the boundary between L layer and F layer determined transmission and non-transmission to F-H layer. In addition, range of critical humidity at which a smoldering ground fire was transmitted in a material layer was 33~44% and when temperature exceeds 350°C, likelihood of transmission of a smoldering ground fire was high. In the research, the experimental model for multi-layer smoldering ground fire is suggested and information about propagation of smoldering fire, possibility of reignition according to moisture content, propagation velocity and temperature change are obtained. Also, the built-up methods were established to help analyze basic characteristics of smoldering ground fire.

Key words : Smoldering ground fire, Reignition, Moisture content, Velocity, Surface fire

1. 서 론

최근 양양산불('05.04.04), 대구팔공산산불('06.03.12) 등 산불진화 후 남아 있는 불씨의 재발화로 인해 대형

산불 확산사태가 빈번하게 발생하고 있다. 재발화 감시를 위해 산불건당 약 40~400명의 인력이 동원되고 있고 잔불 관리 작업시간은 12시간 이상으로 부적절한 인력과 자원의 투입과 비효율적인 관리가 지속적인 문제로 남아 있다. 뒷불 재발화 특성 및 감시 등 관리기법이 과학적으로 구명되어 있지 않으며, 뒷불 재발화

† E-mail: eskim@hoseo.edu

특성 및 단계별 진화관리 기술이 미흡하고 산불현장에서 뒷불정리를 위한 작업 및 관리기준 등이 없어 뒷불 재발화에 의한 대형 산불로의 확산이 빈번히 발생되고 있어, 이에 관한 연구가 필요하다. 뒷불은 발생특성에 따라 낙엽층, 암석지, 고사목 등의 3가지 유형으로 구분하였다. 이중에서 낙엽층에서의 뒷불은 산불이 진행된 후 가장 넓게 분포되어 있고 타지 않은 연료와의 경계선을 이루고 있기 때문에 산불 진화 후 최우선적으로 관리가 필요한 유형이다. 본 연구에서는 일반적인 산불에서의 낙엽층을 대상으로 뒷불에 대한 연소특성에 대해 살펴보고자 한다.

훈소는 뒷불의 초기단계로 화염으로 발생하는 중간 단계 역할을 하게 된다. 일반적인 훈소의 전달속도는 주로 반응영역으로의 산소 공급 조건에 지배를 받는다. 하지만 이러한 기본적인 조건 외에 산불에서의 훈소는 지표물이 함유하고 있는 수분함유량에 따라 자가 지속형 훈소 전파가 가능할 수 있는 조건들을 찾아야 한다.¹⁾ 산소 공급조건인 경우, 산림 지표층 연료상태에서는 밀도 측정을 통해 연료물질별 공극을 고려하여야 하며 공기유입을 발생시키는 바람인자에 대한 고려가 필수적이다.^{3,5)} 하지만, 산림 내 지표층 연료에서의 산소공급은 지표층 아래 바람이 불어도 영향을 받지 않는 위치에 있으므로 바람에 의존적이지 않고 자체 공극간의 열적 대류현상에 의한 산소공급이 이루어진다고 볼 수 있다.^{8,9)} 또한 자가 지속형 훈소 전파를 위해 열적 손실을 발생시키는 연료의 수분함유량 조사가 필요하며 낙엽층에서의 자가 지속형 훈소가 일어나지 않는 조건의 수분함유량 한계치 조사가 필요하다.^{2,4,7)} 훈소는 물질의 종류 및 수분함유량, 밀도 등의 특성에 따라 산

소공급, 자가 지속형 훈소 상태에 대한 세부적인 연구가 필요하다.^{5,6)} 따라서 본 연구를 통하여 산불에서의 주요 연소 물질인 지표층 연료에 대해 실험적 접근 방법을 통해 뒷불의 연소특성을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험시료

뒷불 재발화 실험에 사용된 낙엽시료는 침엽수종인 소나무(*Pinus densiflora*: P.D.) 낙엽과 활엽수종인 굴참나무(*Quercus variabilis*: Q.V.) 낙엽을 자연 상태에서 채집하였다. 채집된 낙엽은 동일한 함수율 조건을 맞추기 위해 45°C의 건조기에서 168시간 동안 건조시킨 후 사용하였으며, 실험 시료는 실험 준비 중 불가피하게 대기 중에 노출되며, 이때 시료의 함수율이 변화되어, 15~20% 범위의 시료를 실험하였다. 낙엽 분해층(F층), 부식층(H층)의 시료는 매 실험 시마다 인근 야산에서 시료를 채집하여 Moisture analyzer(AND, MX-50)를 이용하여 함수율을 측정 실험하였다.

함수율 산정은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.¹¹⁾

$$FMC (\%) = (W_m - W_d) / W_d \times 100 \quad (1)$$

여기서 FMC: 연료습도(%), W_m : 전중, W_d : 후중 이다.

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 실험 장치

재발화 모형 실험장치는 지름 30cm, 높이 20cm의 원통형 바스켓을 사용하였다. 열전대(K-type)는 총 8개를 이용하였으며, 산림 내 낙엽층(L층)과 낙엽 분해층

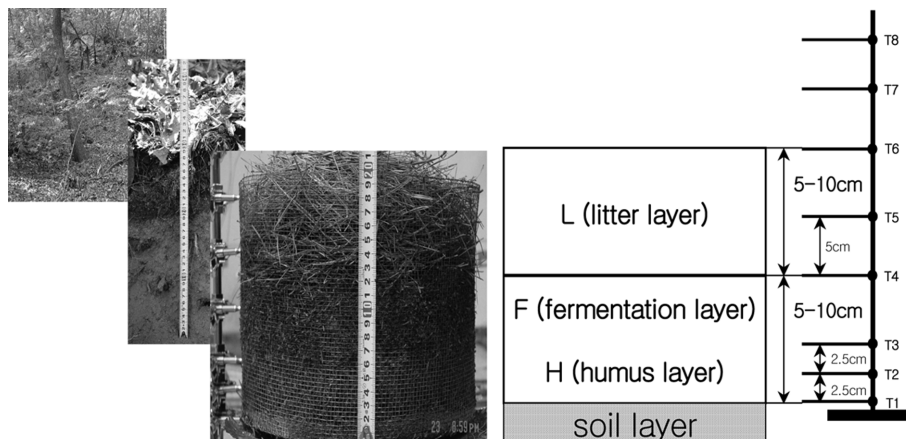


Figure 1. Structure of duff.

(F, H층)의 경계면의 위치에 있는 열전대 T1~T3를 2.5cm 간격으로 하였으며, T4~T8은 5cm 간격으로 배치하여 실험하였다.¹³⁾ 데이터 수집은 DAQ(Agilent, 34970A)를 이용하여 1초 단위로 측정 분석하였다.

Figure 1은 산림 내 존재하는 실제 낙엽층과 분해층의 현장 사진이며, 원통형 바스켓에 현장에서 채취한 낙엽유기물을 현장 구조와 유사한 구조로 낙엽 유기물층 구조를 구성하여 실험하였다.

2.2.2 실험 방법

산림내 낙엽층(L층)과 낙엽분해층(F층), 부식층(H층)을 채취, 원통형 바스켓에 채취 밀도와 동일한 밀도인 L층(28.3kg/m³) 및 F,H층(283.1kg/m³)을 채워 넣고 연소특성 실험을 하였다.¹³⁻¹⁵⁾ 이때 각 낙엽층별 함수율은 L층 15~20%, F-H 층 20~60%이며, 연소특성(수직온도 분포, 연소시간, 전파속도, 지속시간)을 측정하였다. 각 연료층의 깊이는 채취 장소의 조건과 유사한 조건으로 소나무, 굴참나무 낙엽에 대해 L층 깊이는 5cm, 10cm로 하여 실험을 실시하였다. 이때 F-H 층의 연료층 깊이를 5cm, 10cm로 두어 실험을 실시하였다. 각 연료층별 온도변화 측정은 L층 표면에 불꽃 점화 후 각층의 경계면의 온도가 100°C 이하로 감소될 때까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 F-H층으로 전이된 경우

Figure 2는 굴참나무 L층이 10cm인 경우로 L층의

T4 지점에서 최고 510°C까지 측정되었고 약 60분 동안 100°C 이상의 온도를 유지하였다. L-F층의 경계층인 T3 지점에서 최고 440°C까지 측정되었고 약 120분 동안 100°C 이상의 온도를 유지하였으며, F-H층의 경계층인 T2 지점에서 최고 394°C까지 측정되었고 약 130분 동안 100°C 이상의 온도를 유지하였다. 여기서 점화 후 약 40분경과 지점에서 H layer 층의 T2지점의 온도가 급격히 증가하기 시작하여, 약 80분경에 약 400°C 부근까지 온도가 상승 하였다. 결과적으로 약 60분경에 F-H층으로 열이 전이되어 뒤틀 재발화가 발생한 것으로 사료된다.

3.2 F-H층으로 전이가 안 된 경우

Figure 3은 소나무 L층이 10cm인 경우로 L층 중앙 T4지점에서 약 600°C까지 측정되었고, 약 25분 동안 100°C 이상의 온도를 유지하였다. L-F층의 경계층인 T3 지점에서 최고 65°C까지 측정되었다. 점화 후 L-F층의 경계층에서 열이 전이가 안됐으며, 결과적으로 뒤틀 재발화가 발생하지 않은 것으로 사료된다.

3.3 분해층 두께별 지속시간

Figure 4는 수종별 분해층 중심부가 발화하기 시작하여, 탄화하기 시작하는 온도보다 낮은 약 70°C까지의 하강시간을 지속시간으로 간주하였다. 두께는 5cm와 10cm의 두 가지 모델로 실험하였다. 분해층 두께가 5cm인 경우 침엽수종과 활엽수종의 지속시간은 약 10시간 정도이며, 10cm인 경우 지속시간은 약 21시간으로 측정되었다. 분해층 두께가 2배 증가시 최고온도 도

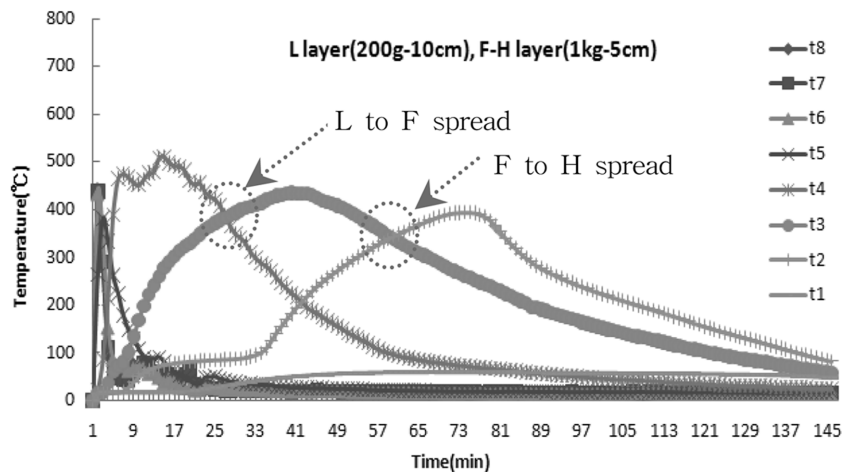


Figure 2. In case of reignition (L layer 10 cm).

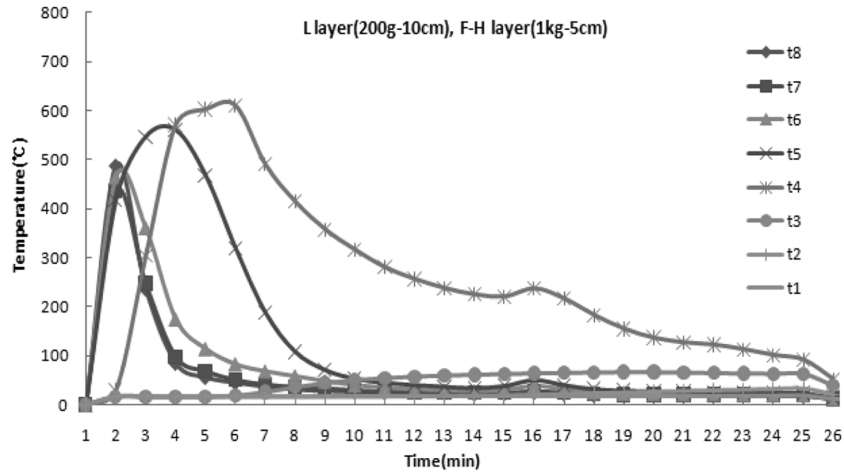


Figure 3. In case of no reignition (L layer 10 cm).

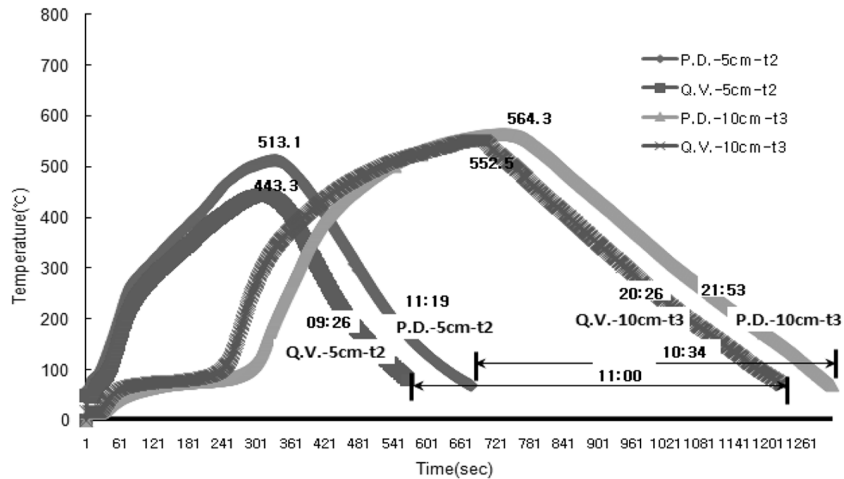


Figure 4. Duration time of F-L by depth of F layer.

달시간 및 지속시간은 약 2배 증가 되는 것으로 측정 되었다.

3.4 함수율별 온도 분포

Figure 5는 함수율에 따른 층별 온도분포이다. F층과 H층으로의 뒷불 전이 임계 발화습도는 35~44% 사이에 위치하며, 전이 발생 시 유기물층의 온도는 약 350°C 이상으로 상승하였다. 낙엽층(L층)에서의 온도 변화는 평균 450~500°C로 측정되었으며, 급작스런 외부환경변화(돌풍, 표면탄화물질의 제거)가 발생하지 않는 경우 약 40%의 함수율을 임계뒷불 재발화 습도라고 할 수 있다.

3.5 함수율별 지속시간

Figure 6은 함수율에 따른 지속시간으로 분해층이 5cm인 경우 함수율이 35%이면서 약 11시간 지속되며, 10cm인 경우 함수율이 35%이면서 약 23시간 정도 연소가 지속 되었다. 활엽수의 경우 10cm 두께에서 함수율 20%의 경우 지속시간이 약 15시간 정도였으며, 함수율 30%의 경우 지속시간이 약 18시간 정도로 측정 되었다. 결론적으로 같은 함수율인 경우 지속시간은 두께에 비례하며, 같은 두께일 경우 함수율과 지속시간은 비례한다.

3.6 함수율과 연소전파 속도의 관계

Figure 7은 침엽수종과 활엽수종의 함수율에 따른 낙

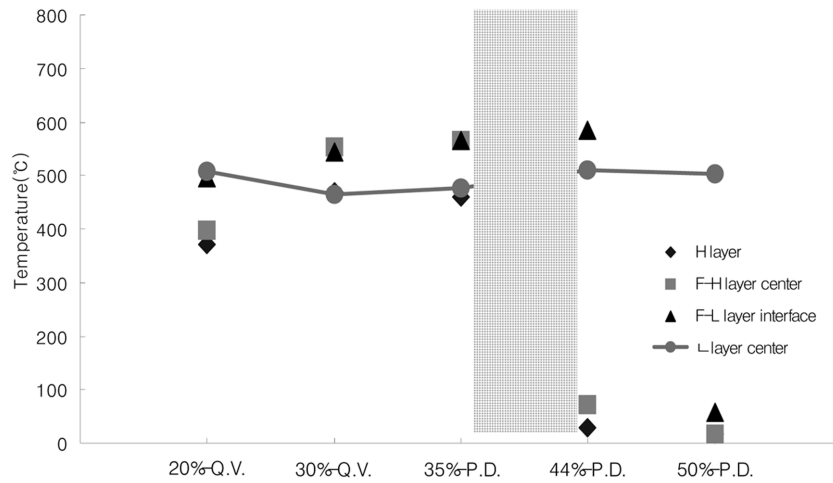


Figure 5. Temperature distribution by FMC.

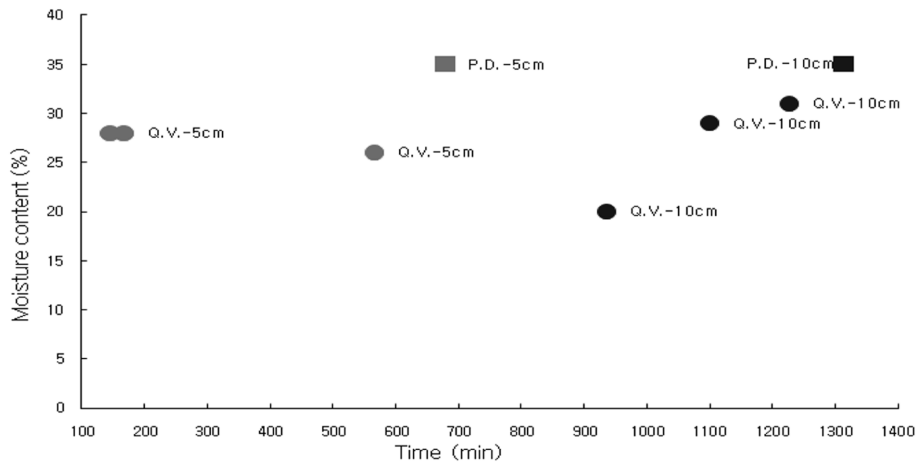


Figure 6. Duration time of temperature by FMC.

엽과 분해층의 경계면에서 중심까지의 전파속도로 시료의 함수율과 전파속도는 반비례 경향을 보인다.

4. 결 론

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

1) 뒷불 발생기준 기준

- F-H층으로 전이된 경우

낙엽층(L층) 중앙 T4지점(10cm)에서 약 510°C까지 측정되었으며, T3(L층과F층 경계면)가 약 400°C 부근에서 T2의 온도가 급격히 증가하기 시작하여, 약 60분

경에 낙엽층에서 F-H층으로 온도가 전이되어 재발화가 발생할 가능성이 높다.

- F-H층으로 전이 되지 않은 경우

낙엽층(L층) 중앙 T4지점(10cm)에서 약 600°C까지 측정되었으나, T3(L층과F층 경계면)가 발화점 이상으로 올라가지 않고 소멸되어 재발화 가능성이 희박하다.

2) 분해층 두께별 지속시간은 분해층 두께가 2배 증가 시 최고온도 도달시간 및 지속시간도 비례하여 약 2배 증가된다.

3) 유기물층의 뒷불 전이 임계습도가 35~44% 사이에 존재하며, 그 이상의 습도에서는 전이가 일어나지 않았다.

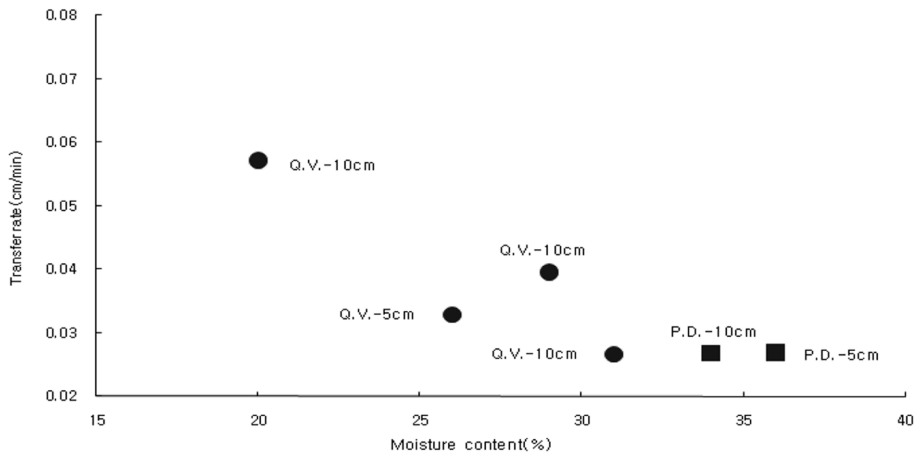


Figure 7. Moisture content & Transfer rate.

4) 뒷불 전이가 일어날 경우 유기물층의 온도는 350°C 이상 상승하며, 함수율 별 낙엽층(L층)에서의 온도 변화는 평균 450~500°C로 측정 되었다.

5) 함수율이 35%이면서 분해층이 5cm인 경우 약 11시간 지속되며, 10cm인 경우 약 22시간 연소시간이 관찰되었다.

6) 함수율과 전파속도는 반비례 경향을 보인다.

참고문헌

1. 김정환, 김응식, 이명보, 김동현, 박형주, “지표화 연료의 열량분석에 관한 실험방법 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.22, No.3, pp.258-264(2008).
2. 박형주, 김응식, 김정환, 김동현, “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.3, pp.44-46(2007).
3. 김응식, 김정환, 김동현, 박형주, 김정훈, “밀도에 따른 지표 연료의 연소실험 분석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.24, No.1, pp.1-7(2010).
4. 김동현, 구교상, 이영근, 이명보, “화왕산 역새연소실험을 통한 초지연소특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회, 춘계학술발표회, pp.238-243(2006).
5. 채희문, 이찬용, “모의실험에 의한 풍속변화에 따른 산불 확산속도와 강도 분석”, 한국농림기상학회, Vol.5, No.4, pp.213-217(2003).
6. 채희문, 이찬용, “산불 확산에 영향을 미치는 임지내 산립연료와 경사도에 관한 연구”, 한국농림기상학회

지, Vol.5, No.3, pp.179-184(2003).

7. 김동현, 고재선, 최세환, 김광일, “고성산불지역에서의 화재조사와 주요수목의 열량분석에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.13, No.1, pp.31-36(1999).
8. 김응식, 이시영, 김홍, 송종훈, 김수영, “유동장 해석을 통한 산불 확산예측프로그램의 개발”, 한국임학회지, Vol.87, No.4, pp.528-534(1998).
9. 김응식, “산불연소 확산 예측모델 알고리즘 및 프로그램 개발”, 산림청(1997).
10. 이시영, 염육철, 정연하, “산불의 연소진행속도 및 연소물의 내화성 연구”, 한국임학회, 하계총회 학술발표회, pp.85-86(1991).
11. 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)
12. James G. Quintiere, “Principles of Fire Behavior”, Delmar Publishers, pp150-168(2004).
13. J.L. Dupuy, J. Marechal, and D. Morvan, “Fires from a Cylindrical Forest Fuel Burner: Combustion Dynamics and Flame Properties”, pp.65-76(2003).
14. B.J. McCaffrey, “Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results”, National Bureau of Standards Report No. NBSIR79-1910(1979).
15. G. Heskestad, “Fire Safety”, J.5 pp.109(1983).