

## 암반지형의 재발화 연소특성

김장환 · 김응식 · 이명보\* · 김동현\* · 박형주\*\*

호서대학교 안전보건학과, 국립산림과학원 산불연구과\*, 호원대학교 소방행정학부\*\*

### Litter and Duff Combustion Characteristics in Rock Bed

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

Hoseo University, Korea Forest Research Institute, Howon University

#### 요 약

본 연구에서는 암적 지형에서의 모의 연소실험을 통한 뒷불 재발화에 대한 연구를 하였으며, 연구를 통해 얻어진 데이터로 암반층 재발화로 인한 산불확산과 산림연료의 종류, 함수율에 따른 산불 재발화의 관계를 분석하고 산불 재발화의 기초 데이터로 제공하여 연소특성 및 진화관리 기술을 연구 하였다

#### 1. 서 론

세계 기상이변으로 인한 대형 산불이 자주 발생하고 있다. 국내에서도 매년 540건의 산불이 발생하여 이로 인한 피해가 약 1,800ha에 이르고 있다. 우리나라 산불은 대륙성 기후대의 영향으로 봄철 기온이 높고 건조한 3~4월경에 많이 발생하고 있다. 국내의 경우, 산불 재발화 특성 및 감시 등 관리기법이 과학적으로 구명되어 있지 단계별 진화관리 기술이 미흡하고 산불현장에서 뒷불정리를 위한 작업 및 관리기준 등이 없어 효과적인 대처 미비로 인한 대형 산불로의 확산이 빈번히 발생되고 있다. 또한 산불 재발화 감시 인력 약 40~400여명/건 및 야간산불 등 뒷불감시 소요시간이 12시간 이상으로 비효율적 뒷불감시로 인한 인력낭비 및 재확산이 우려된다. 최근 봄철의 산불의 형태는 진화한 후에도 암반층 지형의 부엽토층에서 불씨가 다시 살아나 재발화 하는 경향이 있다. 2005년 4월 4일 23:53경에 발생한 양양읍 산불은 잔불 정리 중이던 산불이 초속 15m가 넘는 강풍(최대풍속 28m이상)으로 산불이 확산 되었고 2005년 고성 산불은 북방한계선 이북에서 발화된 불이 남하하여 새벽부터 진화하였으나 강풍으로 다시 불씨가 살아나 그 인근 마을 까지 확산되어 헬기 13대, 진화차 20대, 진화인력 천명이 투입되었다.

본 논문에서는 산불 재발화 유형 중에서 암반층에서의 재발화에 관한 실험방법과 측정시스템을 제시하였으며, 실험방법을 통하여 얻어진 데이터는 산불 재발화의 위험성 및 예측에 있어서 이를 활용하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

암반층 재발화 모형장치는 온도센서가 설치되는 단면을 가로 40cm, 세로 40cm의 대리석을 이용하여 현장과 유사하게 만들었으며, 암반과 암반사이 간격을 5, 10, 15cm로 하였고 그 사이에 토층을 1cm, 낙엽 분해층을 10cm, 낙엽층을 5cm의 높이로 설치하여 실험하였다. 모형실험은 암반층 재발화 시간에 따른 온도 데이터 측정을 위하여 총 40개의 Thermocouple(K-type)을 이용하여 수직-수평 온도분포를 측정하였으며, 데이터 수집은 Agilent사의 DAQ(Data acquisition : 34970A) 이용하여 10초 단위로 측정 분석 하였다.



그림 1. 암반 모형 장치

### 2.2 Thermocouple 배치

낙엽층(L층)과 낙엽 분해층(F,H층)으로 나누어 현장에서 채취한 낙엽유기물을 현장 구조와 유사한 구조로 구성하였다. Thermocouple은 수직배열 하여 01~02사이와 04~05사이 이는 5cm 간격으로 하였으며, 02~03 사이의와 03~04 사이는 10cm의 간격으로 배치하였다.

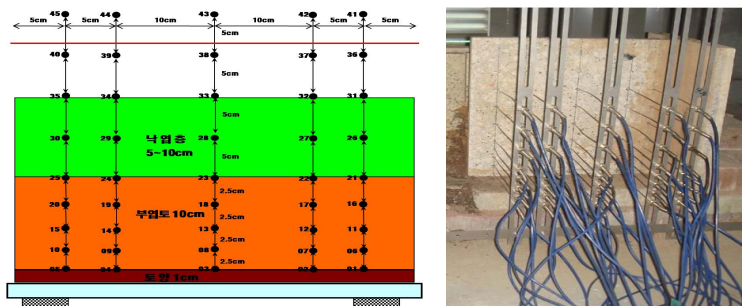


그림 2. Thermocouple 배치 단면도

### 2-3. 실험 시료

실험에 사용된 시료는 침엽수종인 소나무 낙엽과 활엽수종인 굴참나무 낙엽, 그리고 부엽토를 자연 상태에서 채집하여 현장과 유사한 시료를 사용하였으며, 최대한 자연채취 상

태를 보존하고 동일한 함수율 조건을 맞추기 위해 건조기에 하루정도 건조를 시켰다. 건조시킨 낙엽들과 부엽토는 실험 시에 1g씩 채취하여 A&D사의 MX-50(가열방식 수분계)으로 3회 측정하여 낙엽의 평균값을 15%대로 유지하였으며, 분해층 함수율은 20%, 30%, 40%로 유지 실험하였다. 이때 함수율이 높게 측정되면 다시 건조시키고 함수율이 낮게 측정되면 수분을 증가하여 함수율을 높였다.

### 2-4. 실험 방법

암반 뒷불 재발화 모형실험은 암반사이에 낙엽층(L층), 낙엽 분해층(F층), 토양층의 세 부분으로 구분하였다. 토양층 1cm, 낙엽 분해층 10cm, 낙엽층 5cm 로 차례대로 쌓은 뒤 암반에 Thermocouple 40(5\*8)개를 수직/수평으로 배치하였다. 표 1. 과 같이 암반간격, 낙엽 분해층과 낙엽층의 밀도, 함수율에 변수를 주고 수종별로 실험을 하였다.

표 1. 실험변수

수 종	침엽수			활엽수		
	간 격 (cm)	5	10	15	5	10
밀 도 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	188	250	313	188	250	313
낙엽 분해층 함수율(%)	20	30	40	20	30	40

40개의 채널 중에서 최대온도가 100℃이하로 떨어지면 DAQ측정은 종료시킨 후, 데이터를 분석하였으며, 낙엽층, 낙엽 분해층에 대한 연소특성, 시료의 함수율, 지속시간 및 전과 속도 등의 인자를 얻을 수 있다.

### 3. 실험 결과

그림 3은 함수율에 따른 지속시간으로 소나무 낙엽과 굴참나무 낙엽의 함수율이 20%, 30%, 40%로 굴참나무 20%, 40%에서 재발화가 발생하지 않았으며, 평균적으로 굴참나무 낙엽보다 소나무 낙엽의 연소 지속 시간이 더 길게 측정되었다. 또한 30%대에서 연소 지속 시간이 가장 길게 측정되었다.

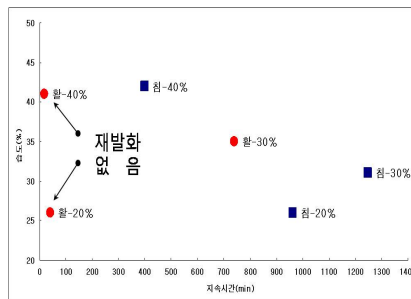


그림 3. 함수율에 따른 지속시간(100℃)

그림 4는 함수율에 따른 수직/수평 전과속도를 나타낸 그래프로서 수평 전과속도에서 함수율 40% 이상이면 화염의 전과가 안 되는 것으로 측정되었고, 수직 전과속도는 침엽

수/활엽수가 거의 동일한 패턴을 보였다.

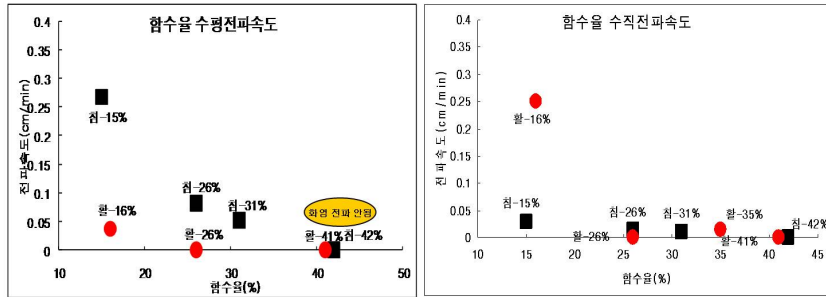


그림 4. 합수율 수평/수직 전 파속도

그림 5는 암반간격에 따른 수평 최고온도 분포(분해층 중앙)를 나타낸 그래프로서, 침엽수종의 암반간격이 5cm인 경우 암반 안쪽의 온도가 현저히 낮게 측정되었고 활엽수종의 암반간격이 5cm인 경우엔 온도가 거의 없었다. 암반간격이 10cm, 15cm의 경우 100℃ 이상의 온도변화가 없었다.

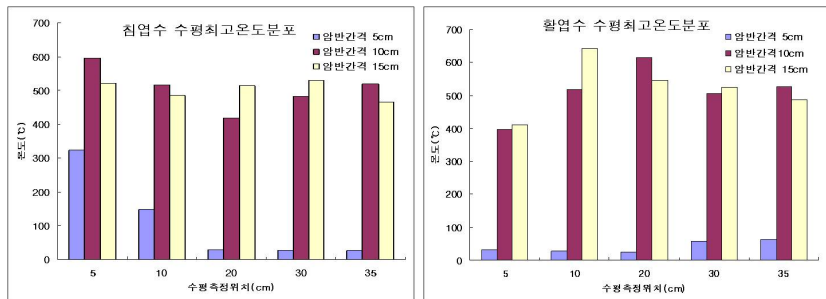


그림 5. 침엽수/활엽수 수평 최고온도 분포

그림 6은 암반간격에 따른 수직 전파속도를 나타낸 그래프로서, 암반간격이 5cm일 때에는 화염전파가 안되었으며, 활엽수가 침엽수에 비해 수직 전파속도가 최고 약 9배정도 빠르게 전파되었다.

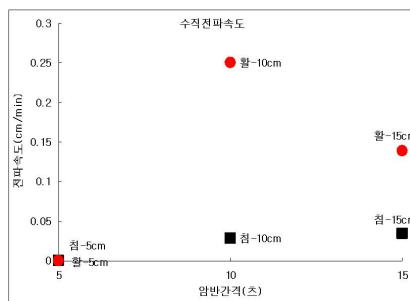


그림 6. 암반간격에 따른 수직 전 파속도

그림 7.은 암반간격에 따른 지속시간을 나타낸 그래프로써, 암반간격이 5cm인 경우 100분 이상 지속되지 않았고, 암반간격이 10cm인 경우 활엽수종이 침엽수종에 비해 약 10시간 이상 지속시간이 길게 측정되었다.

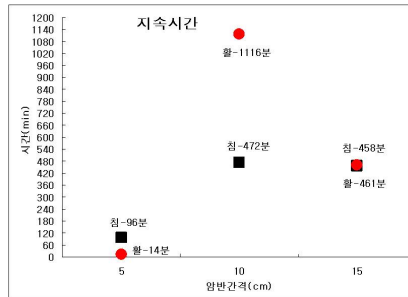


그림 7. 암반간격에 따른 지속시간

그림 8.은 암반간격에 따른 밀도의 지속시간을 나타낸 그래프로써, 활엽수종이 침엽수종에 비해 지속시간이 최고 약 1.4배가 빠르게 측정되었으며 밀도가 증가 시 250kg/m<sup>3</sup> 후 떨어지는 패턴을 보였다.

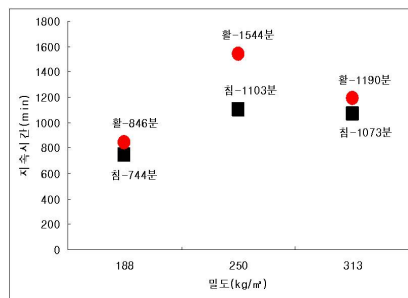


그림 8. 암반간격에 따른 밀도의 지속시간

그림 9.은 암반간격에 따른 밀도의 수직/수평 전파속도를 나타낸 그래프로써, 활엽수종은 침엽수종에 비해 최고 약 1.7배정도 수직전파속도가 빠르게 측정되었으며 수평전파속도는 침엽수종이 활엽수종에 비해 최고 약 1.4배정도 빠르게 측정 되었다.

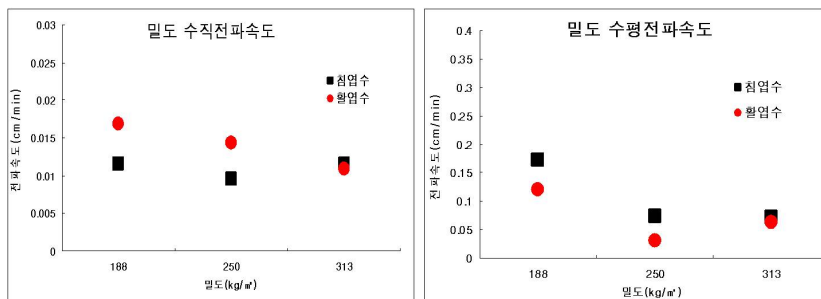


그림 9. 암반간격에 따른 밀도의 수직/수평전파속도

#### 4. 결 론

본 연구의 실험 결과에 따라서 다음과 같은 결론이 도출 되었다.

1. 암석지 모의실험에서 함수율에 따른 수평 전파속도는 침엽수/활엽수종의 함수율이 40%이상이면 화염전파가 일어나지 않았으며, 함수율과 수평 전파속도는 반비례하는 경향을 보인다. 또한 수직 전파속도는 침엽수/활엽수종 거의 동일한 패턴을 보인다.
2. 암반간격 5cm, 10cm, 15cm에 따른 수평 최고온도 분포는 침엽수종의 경우 5cm에서 암반 안쪽의 온도가 현저히 낮게 측정되었으며, 활엽수종의 경우 온도 변화가 거의 없었다. 10cm, 15cm 경우 침엽수/활엽수종의 경우 100℃이상의 온도 변화가 없었다.
3. 암반간격 5cm, 10cm, 15cm에서의 수직 전파속도는 5cm인 경우 화염 전파가 안 되었 으며, 활엽수가 침엽수에 비해 수직 전파속도가 최고 약 9배 정도 빠르게 전파 되었 다.
4. 암반간격 5cm, 10cm, 15cm에서의 지속시간은 암반간격이 5cm인 경우 100분 이상 지속되지 않았고, 암반간격이 10cm인 경우 활엽수종이 침엽수종에 비해 약 10시간 이상 지속시간이 길게 측정 되었다.
5. 암반간격에 따른 밀도 모의실험에서는 지속시간(100℃)이 활엽수종이 침엽수종에 비해 지속시간이 최고 약 1.4배가 길게 측정되었으며 일정 밀도 이상 시 떨어지는 패턴을 보였다.
6. 암반간격에 따른 밀도의 수직/수평 전파속도는 활엽수종은 침엽수종에 비해 최고 약 1.7배정도 수직전파속도가 빠르게 측정되었으며 수평전파속도는 침엽수종이 활엽수종에 비해 최고 약 1.4배정도 빠르게 측정 되었다.

## 참고문헌

1. 김장환, 김응식, 이명보, 김동현, 박형주, (2008). "지표화 연료의 열량분석에 관한 실험 방법 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol. 22, No. 3, pp.258-264.
2. 박형주, 김응식, 김장환, 김동현, (2007). "복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석", 한국화재소방학회 논문지, Vol. 21, No.3, pp.44-46.
3. 김장환, 김응식, 이명보, 김동현, 박형주, (2007). "밀도에 따른 지표화 연료의 연소분석", 한국안전학회춘계학술발표회.
4. 김동현, 고재선, 최세환, 김광일, (1999). "고성산불지역에서의 화재조사와 주요수목의 열량분석에 관한 연구", 한국화재소방학회지, 13권1호.
5. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, (2006). "지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석", 한국방재학회.
6. G. Heskestad, (1983), "Fire Safety", J.5 pp109.
7. J.L. Dupuy, J. Marechal, D. Morvan, (2003), "Fires from a cylindrical forest fuel burner : combustion dynamics and flame properties", combustion and flame, pp.65-76.