

## 화왕산 억새연소실험을 통한 초지연소특성에 관한 연구

김동현, 구교상, 이영근 이명보  
국립산림과학원 산림환경부 산불연구과

### Study on Grass Fire Behavior through *Miscanthus sinensis* *var. purpurascens* Combustion in Mt. Whawang

Dong-Hyun, Kim, Kyeo-Sang, Gu, Young-Gun, Lee, Myung-Bo, Lee  
Div. of Forest Fire, Dept. of Forest Environment, Korea Forest Research Institute

#### 1. 서론

산불발생시 화재의 성장, 전이과정 등 산불특성은 산림내 연료의 종류 및 구성에 따라 각기 다른 화재성상과 확산패턴을 가지게 된다. 일반적인 산불확산 메커니즘은 부주의에 의한 실화, 담뱃불, 논밭두렁 소각 등 인위적인 원인에 의하여 낙엽 및 나뭇가지 등 지표층 연료의 연소로부터 시작되는데 이러한 지표화(地表面火, Surface Fire)로부터 발생된 산불은 수목의 줄기가 연소되는 수간화(樹幹火, Trunk Fire)와 수목의 상층부까지 연소되는 수관화(樹冠火, Crown Fire)로 발전되어진다. 이외 이탄층 등 지중연료의 연소로 인한 지중화(地中火, Ground Fire)와 산불시 발생하는 와류 및 대류열로 인한 상승기류와 강한 풍속으로 인해 비화(飛火, Spotting Fire)가 발생된다. 이러한 산불확산의 종류에 따른 모든 연소특성 메커니즘을 실제 산불실험을 통해 연소특성자료를 얻는 것은 확산의 위험 및 기상 등의 제약에 따라 많은 어려움이 뒤따르게 된다. 이에 본 연구에서는 소백산 자락에 위치하는 화왕산 정상부 약 8ha의 억새밭을 태우는 '화왕산 억새태우기 축제'를 이용하여, 지상 10m, 지표면 10m×2방향의 조사구를 만들어 불이 확산될 때의 온도변화 패턴을 조사, 연소형태를 분석하였다. 그 결과, 초지연소에 대한 연소온도 및 시간, 화염생성 높이, 확산속도, 연소 후 토양변화 등에 대한 결과를 얻었으며 이와 같은 실험결과를 토대로 향후, 연료모델 정립 및 초지인접 산림 및 시설물 등에 대한 위험성평가 및 관리에 활용하고자 한다.

#### 2. 연구방법 및 내용

##### 2.1. 억새군락 연료조사

화왕산 정상부인 해발 765m에 위치한 억새군락의 면적은 약 8ha로 억새의 최대 높이는 약 2.1m이며 평균 높이는 약 1.4m였다. 또한 1m×1m크기로 4조사구에 대해 연소물질의 양을 조사하였다. 한 결과 평균 단위면적당(m<sup>2</sup>) 약 0.56kg으로 실험당시의 억새의 수분함유량은 평균 23.4%이다.

- 위치 : 창녕군 화왕산 정상부 억새군락(해발 765m)

- 단위면적당 연소중량 : 평균 0.56kg/m<sup>2</sup>(0.36~0.84kg/m<sup>2</sup>)
- 연소물량 조사 및 연료수분함유량 : 연소물량 0.56kg/m<sup>2</sup>, 수분함유량 평균 약 23%



그림 1. 화왕산 억새군락 근경

○연료량 및 수분함유량

Plot No.	생중량(g)	건중량(g)	수분함유량(%)
1	827.4	512.8	38.0
2	434.6	361.2	16.9
3	679.1	531.0	21.8
4	1013.6	844.3	16.7
평균	738.7	562.3	23.4

2.2. 연소특성 실험조사

- 측정장소 : 창녕군 화왕산 정상부(해발 765m), 억새군락지
- 온도측정 장비설치
  - K-Type 열전대 센서 : 지상부 5개 센서, 지표부 20개 센서, 지중 2개 센서
  - 열화상 카메라 : Digital Thermal CAM(-20~1500℃)
- 기상 : 기온 12±2℃, 평균풍속 1.7m/s(최대풍속 5.7m/s), RH 38%



그림 2. 화왕산 억새군락 실험대상지 전경(좌), 센서설치(우)

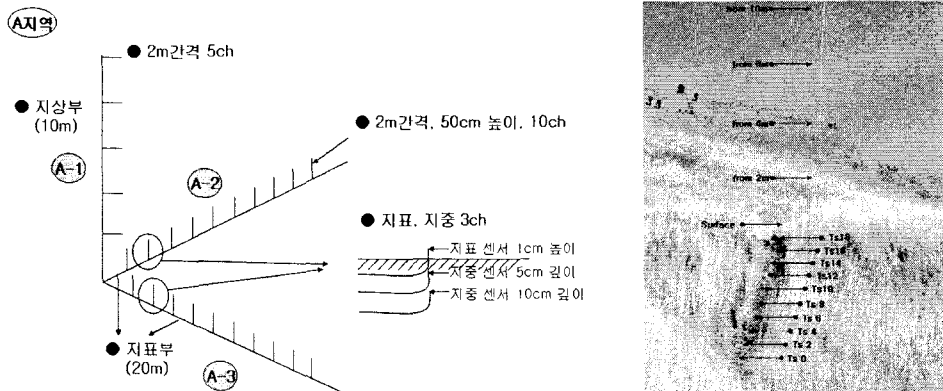


그림 3. 화왕산 억새군락 센서설치 개념도(좌), A-2, A-1센서설치(우)

### 2.3. 토양조사

토양조사는 국립산림과학원 토양조사 예규에 따라 입지를 조사하였으며, 토양시료는 토양단면을 만들고 토양깊이 0~5cm, 10~15cm 부위에서 여러 곳을 채취한 후 고루 혼합하여 1점을 만들고, 실내로 운반된 시료는 풍건하여 분석하였다. 전 질소는 켈달분석으로, 유효인산은 Lancaster법, 칼륨은 Flame photometer법을 이용하여 분석하였다.

## 3. 결 과

### 3.1. 연소특성 실험결과

열화상 이미지촬영 및 열전대 센서를 이용한 억새군락의 연소특성 분석결과, Hot Spot Point(분석면적: 1m<sup>2</sup>)의 열화상 평균온도분석에서는 그림 4와 같이 최대온도 810℃로 측정되었고 이때 100℃이상 화염의 유지시간은 약 1분으로 억새밭 연소시 화염의 이동이 그림 4와 같이 빠르게 움직임을 알 수 있다. 그림 5의 지표면 연소 온도변화에서는 2m간격의 10개 지점의 온도센서 자료 분석 결과, 최고온도 평균값은 약 850℃로 나타났으며 이때 가장 높은 온도값은 1018℃로 기록되었다. 거리별 온도분석을 통한 산불확산속도 측정결과에서 최저 산불확산속도 0.36km/hr, 최고 산불확산속도 4.3km/hr, 평균 확산속도 2.4km/hr로 조사되었다. 또한 그림 6, 7과 같이 억새군락지의 지표면, 지표면으로부터 2m, 4m, 6m, 8m 등 높이별 온도 측정결과 각각 885.2℃, 334.6℃, 258.3℃, 196.3℃, 187.3℃로 나타났으며 이때 8m높이의 온도센서에서 100℃내외의 온도값이 먼저 측정되었다. 높이별 최고온도 측정값에 대한 회귀분석한 결과, 이차역함수곡선값을 나타내었으며 이때 결정계수값은 0.999로 나타났다. 억새밭 연소시 5cm, 10cm 깊이의 지중에 대한 온도 결과값은 표 1에 나타난 바와 같이, 지표면 최고온도 885.2℃ 측정 2초 후 지중 5cm깊이에서 최고 온도 82.8℃를 나타내었으며 50℃이상 유지시간은 122초로 지표면보다 약 10초가량 유지하는 것으로 나타났다. 특히 지중 10cm에서는 온도변화가 거의 없이 26.8±0.2℃범위내의 온도값을 나타내었다.

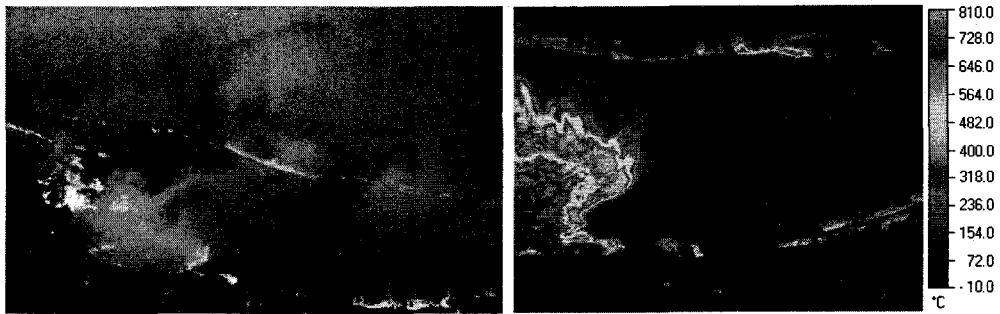


그림 4. 억새군락 연소 실험장면(좌), 열화상이미지(우)

표 1. 억새군락 연소 지중온도

구 분	지표면	지중 5cm	지중 10cm
최고 온도(℃)	885.2	82.8	26.8
50℃이상 유지시간(sec)	112	122	-

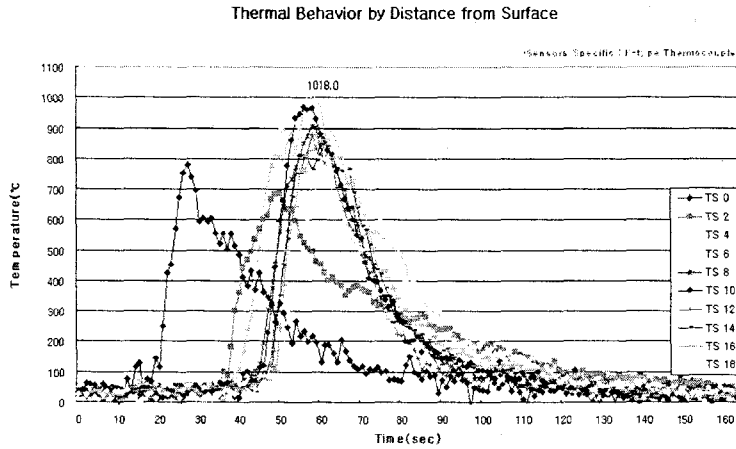


그림 5. 역새군락 연소 열전대 측정 센서위치 거리별 온도측정값

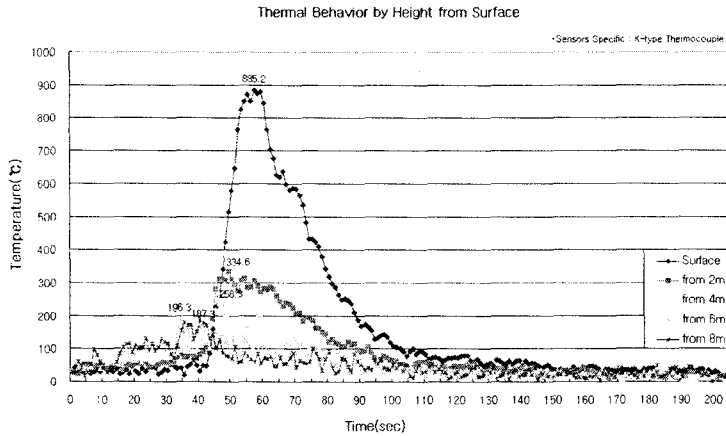


그림 6. 역새군락 연소 열전대 측정 센서위치 높이별 온도측정값

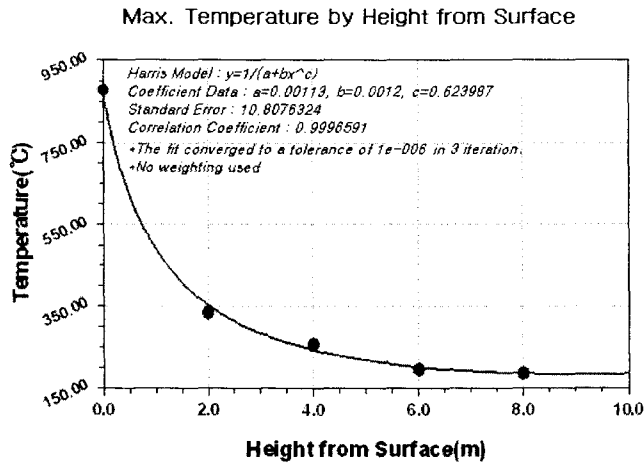


그림 7. 역새군락 연소시 열전대 측정 센서위치 높이별 최고온도측정값 분석

### 3.2. 산불전·후 토양변화조사

화왕산 조사지의 양분함량을 산불전과 산불후로 구분하여 비교하면 전질소의 경우 0.42%에서 0.40%로 약간 감소하였으며, 유효인산은 산불 전에 비하여 유효인산함량이 감소하였다. 반면에 치환성 칼륨은 1.07cmol+/kg에서 1.59cmol+/kg로 증가하였다. 화왕산의 토양은 강원도 산불피해지와 비교하였을 때 모암이 서로 다르기 때문에 토양의 특성도 다른 것으로 생각된다. 산불 전 토양양분은 강원도 동해지역이 낮았고, 화왕산 시험구는 높았는데 이는 화강암에서 생성된 강원도의 토양은 척박하여 토양양분이 낮고, 퇴적암에서 생성된 화왕산의 토양은 수분조건 등이 양호하여 양분함량이 비교적 높았던 것으로 생각된다.

표 2. 화왕산 토양내 양분 변화

현장시료명	전질소 T-N(%)	유효인산 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	치환성 양이온K <sup>+</sup> (cmol <sup>+</sup> /kg)
전	0.42	38.12	1.07
후	0.40	22.91	1.59

표 3. 동해안 산불피해지의 토양내 양분변화(화강암)

현장시료명		전질소 T-N(%)	유효인산 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	치환성 양이온K <sup>+</sup> (cmol <sup>+</sup> /kg)
토심 5cm	산불전	0.2	5	0.3
	산불후	0.1	20	0.3
5~15	산불전	0.1	5	0.2
	산불후	0.1	6	0.2

\*인용출처 : 동해안 산불지역 정밀조사보고서(참고문헌 7)

## 4. 고찰

화왕산 정상에 위치한 역새군락지 약 8ha에 대한 연소특성 실험결과, 화염이 형성된 열의 이동이 평균풍속 1.7m/s에서 2.4km/hr의 속도로 확산이 되어지는 것으로 일반 침엽수림 또는 활엽수림의 지표화 연소속인 1.35km/hr보다 약 1.8배가량 빠른 확산속도 경향을 나타낸다. 이는 역새같은 벼과식물의 착화특성상 열분해가 빨리 일어나 쉽게 연소되는 특징을 갖고 있기 때문이다. 하지만 온도변화곡선에서 시간-온도 분석값의 공간면적 범위가 작아 역새자체의 Potential Heat Energy가 높지 않음을 알 수 있다. 역새발 평균확산속도는 2.4km/hr로 최소확산속도 0.36km/hr, 최대확산속도 4.3km/hr에서 알 수 있듯이 산불의 확산시 동일한 연료조건하에서도 열기류 형성 및 순간 바람장의 변화로 인해 일정치 않음을 알 수 있었고 그림 6에 나타난 상층부 8m위치의 온도값이 표면부보다 100℃부근에서 앞서 관측된 점으로 미루어볼 때 열기류 및 화염의 상승으로 인한 대류열에 의한 열전달 과정을 알 수 있었다. 지중 5cm깊이의 토양층에서는 최고온도 82.8℃를 나타내어 장시간 온도 지속시 토양미생물 등에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났으며 50℃이상 온도유지 시간은 약 2분 내외로 앞으로 온도 및 노출시간에 따른 토양미생물 및 토양양분에 미치는 영향조사가 이루어져야할 것으로 사료된다. 산불 후 토양내 양분변화는 강원도 지역에서는 큰 차이 없이 유사하였으나 화왕산 시험구에서 산불 후의 양분변화가 나타났는데 특히, 유효인산의 경우는 상당량이 감소하여 일반적으로 증가하는 선행연구와 상반된 결과로 이에 대한 원인을 구명할 필요가 있다. 향후, 본 연구 결과를 바탕으로 하여 산불발생

전·후의 토양변화조사 및 임목지에 대한 산불확산 특성에 대한 연구를 지속하여 소나무 등 침엽수림 및 굴참나무 등 활엽수림지대의 연소특성조사 등 산불확산특성연구에 활용하고자 한다.

### 참고문헌

1. William H. Frandsen. Ignition Probability of Oreganic Soils. Can. J. For. Res. Vol 27, 1997. NRC. CANADA. pp1471-1477
2. Franden, W.H. 1987. The influence Combustion Limits in Peat as Influenced by Moisture, Mineral Contents, and Organic Bulk Density. In Proceeding of the 10th Conference on Fire and Forest Meteorology, April 1989, Ottawa. pp282-286
3. Hungerford, R.D., Frandsen, W.H., and Ryan K.C. 1995. Ignition and Burning Characteristics of Organic Soils. In Proceedings of the Tall Timbers Fire Ecology Conference. pp78-91
4. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, 지표물질 착화성실험을 통한 발화위험성 분석, 한국방재학회 2006년 춘계 논문발표자료집. 2006. pp379-385.
5. 송홍근, 김재광, 소나무와 잣나무의 잎과 수지에 함유된 정유 성분, 목재공학 22(3). 1994. pp59-67.
6. 김관수, 장인수, 박기돈, 김수정. 고온로의 가열온도에 의한 리기다소나무와 일본잎갈나무 생엽과 생지의 연소온도변화. Korean J. Ecol. 18(3). 1995. pp333-340
7. 국립산림과학원 동해안산불피해지 공동조사단, 동해안산불지역 정밀조사 보고서 I, 2000.12., pp240-251