

## 낙엽층의 화염높이 산정에 관한 연구

김동현\* · 田中哮義\*\* · 이명보\* · 김광일\*\*\*

국립산림과학원 산불연구과\*, DPRI Kyoto Univ.\*\*, 인제대학교  
보건안전공학과\*\*

### Study on the flame height definition in Forest

Kim, Dong Hyun\* · Takeyoshi Tanaka\*\* · Lee, Myung Bo\* · Kim, Kwani Il\*\*\*

Div. of Forest Fire Research, KFRI\*, DPRI Kyoto Univ.\*\*, Dept.  
Occupational Health & Safety Eng. Inje Univ.\*\*\*

#### 요 약

산불에 있어 화염높이 산정은 복사열전달에 의한 수평 또는 수직적 화염확산을 예측하는데 있어 매우 중요한 부분이다. 화염특성 중 화염높이는 빛을 수반하는 화염(the luminous flame)의 평균높이로 확인할 수 있다. 본 연구에서는 외부 풍속과 경사 등으로 인한 화염 높이가 변화될 수 있는 조건을 제외한 산림 내 지표연소물질인 낙엽층(fuel bed)에 대한 화염높이 관측실험과 Cone calorimeter(ASTM-1354)을 이용하여 Heat Release Rate 측정하였고 surface fuel에 대한 화염높이 산출식  $H_f = 0.027 \dot{Q}^{2/3}$ 을 도출하였다. 실험값과 개발 산정식, 기존 Heskestad(1998) 식과의 적용값 비교 결과, 소나무 낙엽의 경우, 실험값과 개발 산정식 적용값의 표준오차는 0.08, 실험값과 기존 Heskestad(1998)의 표준오차는 0.23으로 개발 산정식의 정확성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 이 식을 이용하여 복사열전달에 의한 화염확산해석 및 화염의 높이에 따른 수관화 전이해석 등에 활용 가능할 것으로 사료된다.

#### 1. 서 론

대부분 고체 형태의 연료들은 연소시 화염을 통해 열에너지를 방출한다. 화염을 통해 방출되는 Heat flux에 의해 주위의 virgin fuel이 열 분해되며 착화온도에 도달하면 화염이 착화되는 과정을 통해 화염확산이 이루어진다. 이는 산불확산에 있어서도 산림내 연료물질들의 연소로 발생한 화염이 지표화(surface fire), 수관화(crown fire)의 형태로 열전달 메커니즘에 의해 화염전파가 이루어진다. 산불에 대한 화염의 특성은 수차례 조사되었다(Putman 1965; Albini 1981; Nelson and Adkins 1986). 화염의 길이(Flame length)는 지표화(Surface fire)에서 수관부(Crown layer)로 연소, 확산되는 과정을 예측하는데 유용하

다(Van Wagner 1973). Flame length 예측모델은 BEHAVE 모델에 사용되는 경험적 상관관계(Byram 1959), fire dynamics의 상관관계(Albini 1981, Nelson and Adkins 1986) 그리고 일반적인 화재역학에서 해석한 화염높이 산정을 위한 수치해석 상관관계(Heskestad 1983)가 제시된바 있다. 일반적으로 무풍-평지(no wind, no slope)조건에서의 Flame Height와 Fire Length는 같지만 경사와 바람에 의해 Flame Height는 Flame Length보다 작은 값을 가진다(그림 1). 여기서 바람 또는 경사에 의해 화염이 지표 연소물질과 보다 가까워짐으로써 복사 열전달율이 높아지게 되어 보다 빠른 확산이 이루어진다. 따라서 화염의 높이 산정은 산불확산 예측 등 산불의 위험성을 평가하는데 중요하다.

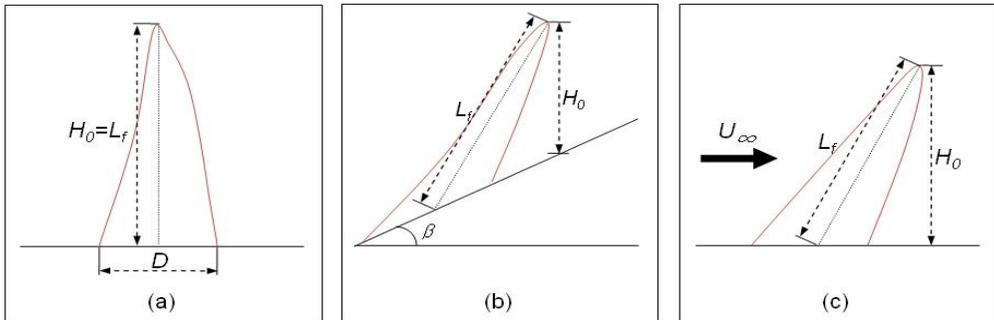


그림 2. 경사-바람에 의한 화염변화; (a) 무풍-평지조건, (b) 무풍-경사조건, (c) 풍속-평지조건

그림 2는 평균화염높이  $H_0$ 를 정의한 것으로 발화원 상부거리에 대한 화염의 간헐성 (intermittency)  $I$ 에 대한 변화가 개략적으로 제시되어 있다. 평균화염높이  $H_0$ 는 간헐성이 0.5로 떨어지는 발화원 상부의 거리이다. 간헐성 측정결과에 따른 평균화염높이와 객관적인 판정결과는 육안관찰을 통해 평균을 구한 화염높이와 상당히 일치한다(Zukoski 1985). 본 연구에서는 무풍, 평지조건에서 열적 두께가 얇은 지표층 낙엽에 대한 화염높이 측정 실험을 통해 화염의 간헐성이 0.5로 떨어지는 발화원 상부로부터의 거리를 측정한 기준연구결과(J.H. Kim et al, 2008) 에서 제시된 화염높이 측정결과와 수치해석을 통해 얻은 산정식 값 그리고 기준 연구되어진 화염높이 예측식을 통해 상호 비교하였다.

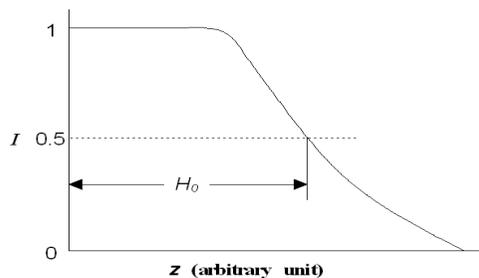


그림 3. 화염의 간헐성에 따른 화염높이 변화

## 2. 연구 방법 및 결과

### 2.1 열방출률(Heat release Rate) 산정

화염의 높이는 발화원의 종류에 따라 HRR(Heat Release Rate, kW)에 의해 달라지며 연소직경, 연료밀도 등의 물리적 변수들에 따라 달라진다. 연소물질의  $Q$ (HRR, kW)의 산정은 식 1)과 같이 계산된다. 여기서 질량감소율( $\dot{m}$ , kg/s)은 식 4)에 의해 계산된다.

$$HRR(kW) = \Delta h_c \times MLR \quad 1)$$

여기서,  $\Delta h_c$ 는 열용량(the effective heat of combustion, kJ/kg),  $MLR$ 는 (the mass loss rate, kg/s)이다.

$$\dot{m} = \frac{\rho \times 1 \times \delta}{t_b} \quad 2)$$

여기서,  $\rho$ 는 연료밀도(fuel density, kg/m<sup>3</sup>), 1은 단위연소면적(m<sup>2</sup>),  $\delta$ 는 연료깊이(fuel depth, m),  $t_b$ 는 연소시간(burning time, sec)이다.

### 2.2 Flame Height Model

산불에 있어서 수치해석을 통한 화염높이 산정에 관한 연구는 no wind, no slope 상태에서 이루어져 있지 않다. 화염높이 예측을 위해 일반적으로 바람이 불지 않는 조건에서의 액체 또는 고체 가연물질의 수평면 화재에 대한 화염높이 산정은 McCaffrey(1995), Heskestad(1998)에 의해 식 3)과 같이 제시되었다.

$$H = 0.35 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad 3)$$

여기서,  $Q$ 은 열방출률(Heat Release Rate),  $D$ 는 연소직경(Burning Length)이다.

Wind-aided/no slope fire에 대한 화염높이는 Albini(1981), Nelson and Adkins(1986), Guijarro(1997), Mendes-Lopes(2003), Fernandes(2002), Catchpole(1998a), Duputy(1996)에 의해 실험과 함께 질량, 에너지 보존방정식으로부터 관계식 개발 등으로 연구된 바 있다. Albini(1981)는 1-dimensional fires에서의 화염높이 추정식을  $H \propto I_B/U$ 로 제시하였고 Nelson and Adkins(1986)은 이 식을 바탕으로 식 4)와 같이 제시하였다. 하지만 이 식의 경우에는 풍속이 0인 무풍상태의 경우 화염의 높이를 산정하기 어렵다.

$$H = \frac{a I_B}{U} \quad 4)$$

여기서,  $I_B$ 는 Byram's Fire Intensity( $\text{kW/m}^2$ )이고  $a$ 는  $1/360$ ,  $U$ 는 풍속( $\text{m/s}$ )이다.

### 2.3 낙엽의 화염높이 산정식 도출

지표화 연소물질의 연소시 발생하는 화염높이 산정을 위하여 본 연구에서는 J.G. Quintiere 방정식을 이용하여 수치해석 하였다. 평균화염높이에 대한 무차원 화염비 (Dimensionless Flame Ratio,  $z/Z^{**}$ )는 J.Q Quintiere와 B.S. Grove(1988)에 의해 그림 3으로부터 식 5와 같이 제시할 수 있다. 여기서 평균화염 높이( $Z_f$ , m) 산출식은 식 6로부터 식 7과 같이 도출하여 표 1에 제시된 낙엽연료의 물리적 특성들을 식 7에 대입하여 낙엽 연소시 화염높이 산정식을 식 8과 같이 도출하였다.

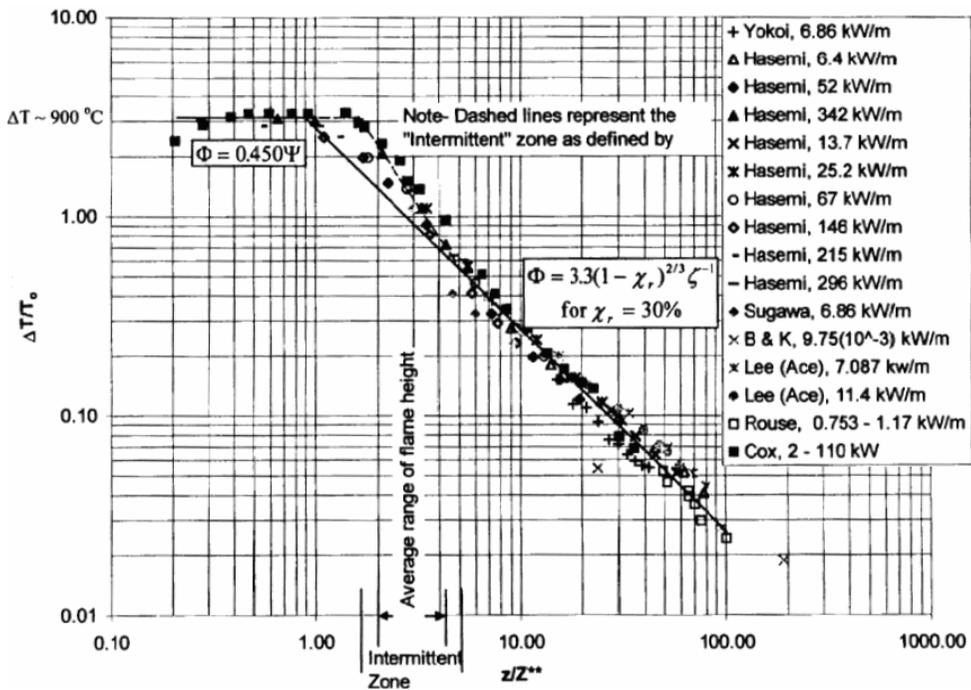


그림 4. 무한선속에서의 화염의 무차원 온도 vs. 높이

$$H = \frac{z}{Z^{**}} = 3 \quad (5)$$

$$Z^{**} = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_c c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad (6)$$

$$Z_f = 3Z^{**} = 3 \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_c c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/3} \quad (7)$$

여기서,  $\rho_c$ 는 밀도(Fuel density,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c_p$ 는 일반대기압 비열(Specific heat of air at constant pressure,  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ),  $T_0$ 는 초기온도(Temperature,  $\text{K}$ ),  $g$ 는 중력가속도(Gravity acceleration,  $\text{m}/\text{s}^2$ )이다. 식 7)에서 우리나라 산림의 일반적인 낙엽밀도  $\rho_c$ 에 대해  $2.0\text{kg}/\text{m}^3$ 을 대입하였고 초기온도는 실온 상태의  $293\text{K}$ 를 대입하였다. 그 결과, 식 8)과 같이 낙엽연소시 화염발생높이 식을 도출 하였다.

표 1. 화염높이 산정을 위한 낙엽층 연료의 변수 및 변수값

변수	밀도 ( $\rho_c$ , $\text{kg}/\text{m}^3$ )	비열 ( $c_p$ , $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	초기온도 ( $T_0$ , $\text{K}$ )	중력가속도 ( $g$ , $\text{m}/\text{sec}^2$ )	연소직경 ( $D$ , $\text{m}$ )
변수값	$2.0^{1)}$	1.01	293	9.81	0.3

비고 : 1) 우리나라 산림의 일반적인 지표낙엽층 밀도

$$H_f = Z_f = 0.027 (\dot{Q}')^{2/3} \quad 8)$$

## 2.4 낙엽의 화염높이 결과 값 비교

소나무 낙엽에 대한 화염높이 산출을 위해 기 실험연구(김장환 외, 2008)된 화염높이 관측값과 G. Heskestad 화염높이 산출식 3) 그리고 J.G. Quintiere 화염높이 관계정의 이론을 이용하여 새롭게 수치 해석한 화염높이 산출식 8) 등에 적용, 비교한 결과는 그림 4와 같다.

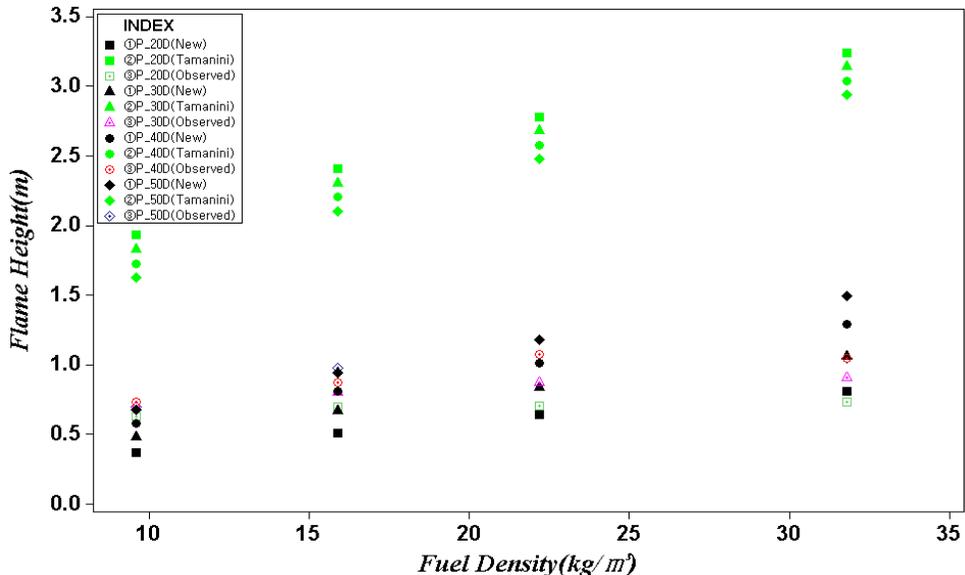


그림 5. 소나무 낙엽의 화염높이 비교(실험값, G. Heskestad식, 도출식)

실험값과의 각 산출식 화염높이 값과의 정확성 검증을 통해 통계분석한 결과, 실험값과 새롭게 해석하여 도출한 화염높이 산출식과의 표준오차는 0.08으로 나타났고 실험값과 G. Heskestad 화염높이 산출식과의 표준오차는 0.23으로 개발 산정식의 정확성이 높은 것으로 나타났다.

### 3. 결 론

산불에 있어 초기확산으로 이어지는 지표화에 대해 낙엽층 연료를 대상으로 J.G. Quintiere의 무한선속에서의 화염의 무차원 온도 vs 높이 관계정의를 이용하여 수치해석을 통한 화염높이 산출식  $H_f = 0.027\dot{Q}^{2/3}$ 을 도출하였다. 이 식을 이용하여 소나무 낙엽의 연소시 화염높이에 대해 실험 data와 기존 Heskestad(1998) 식에 적용한 산출값과 상호 비교한 결과 실험값과 개발 산정식 적용값의 표준오차는 0.08, 실험값과의 표준오차는 0.23으로 개발 산정식의 정확성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 이 식을 이용하여 복사열전달에 의한 화염확산해석 및 화염의 높이에 따른 수관화 전이해석 등에 활용 가능할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. 김장환, 김응식, 박형주, 이명보, 김동현(2008). “지표화 연료의 열량분석에 관한 실험방법 연구” 한국화재소방학회논문지, Vol 22, No. 3, pp.258-264.
2. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영(2006). “지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 2006 한국방재학회 학술발표대회 논문집, pp379-384.
3. Dong Hyun Kim, "Forest Fire Risk Assessment through Analyzing Ignition Characteristics of Forest Fuel Bed", V International Conference on Forest Fire Research, pp.30-31(2006)
4. 박형주, 김응식, 김장환, 김동현(2007). “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회논문지, Vol.21., No.3, pp.33-41.
5. Albin, F.A., 1981. A model for the wind-blown flame from a line fire. Combust. Flame, 43, 155-174.
6. Nelson, R.M. Jr., Adkins, C.A., 1986. Flame characteristics of wind-driven surface fires. Can. J. For. Res. 16, 1293-1300.
7. Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Serv. Intermountain Forest and Range Exp. Stn. Res. Pap. INT-115.
8. Anderson, W., Paster, E., Butler, B., Catchpole, E., Dupuy, J. L., Fernandes, P., Guijarro, M., Mendes-Lopes, J.-M., Venture, J., 2006. Evaluating models to estimate flame characteristics for free-burning fires using laboratory and field data. V International Conference on Forest Fire Research.

9. E.E. Zukoski, Fire Safety Science-Proceedings of the First International Symposium, Hemisphere, New York (1984).
10. E.E. Zukoski, B.M. Cetegen, and T. Kubota, 20th Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, PA(1985)
11. Zukoski, E.E., Cetegen, B.M., Kubota, T., Visible Structure of Buoyant Diffusion Flames, 20th Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp 361-366(1984)
12. J.G. Quintiere and B.S. Grove, Correlations for Fire Plumes, Department of fire protection Engineering University of Maryland College Park, MD 20742. (1998)
13. J.G. Quintiere and B.S. Grove, A Unified Analysis for Fire Plumes, Twenty-Seventh Symposium on Combustion/The Combustion Institute, pp. 2757-2766(1998).