한국화재소방학회 논문지, 제23권 제6호, 2009년
[논 문]

J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 23, No. 6, 2009

소나무 낙엽층 화염높이 산정식에 관한 연구

Study on Flame Height Equation for the *Pinus densiflora* Surface Fuel Bed

김동현

Dong-Hyun Kim

국립산림과학원 산림방재연구과

(2009. 4. 27. 접수/2009. 12. 11. 채택)

요 약

산불에서의 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 지표연소물질(surface fuel)인 소나무 낙엽층(fuel bed)에 대한 화염높이 관측실험과 열량분석계을 이용하여 발열량(Heat Release Rate) 측정실험과 수치해석을 통해 지표연소물질에 대한 화염높이 산출식 $H_f = 0.027(\dot{Q}')^{2/3}$을 도출하였다. 실험값과 개발 산정식, 기존 Heskestad[15] 식과의 적용값 비교 결과, 소나무 낙엽의 경우, 실험값과 개발 산정식 적용값의 표준오차는 0.08, 실험값과 기존 Heskestad 식의 표준오차는 0.23으로 개발 산정식의 정확성이 높은 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Flame height calculation in a forest fire is a crucial part of predicting horizontal or vertical flame spread flared by radiation heat transfer. Flame height, which is one of the flame characteristics, can be estimated by the average height of luminous flame. This research relied on flame height observation test on *P. densiflora* surface fuel bed, which are surface combustibles in a forest, and calorimeter to measure Heat Release Rate, thus produced $H_f = 0.027(\dot{Q}')^{2/3}$, flame height calculation equation for surface fuel. The research did not take into consideration such conditions as external velocity, slope and other variables that could affect flame height. According to comparison among experiment results, calculation results of the above formula and those of existing Heskestad formula (1998), it was found that standard error in fallen pine needles between experimental results and calculation results of the above formula amounts to 0.08, whereas standard error in same plant between experimental results and calculation results of existing Heskestad formula[15] amounts to 0.23.

Key words : Forest fire, Surface fire, Flame height, *Pinus densiflora*, Surface fuel bed

1. 서 론

대부분 고체 형태의 연료들은 연소시 화염을 통해 열 에너지를 방출한다. 화염을 통해 방출되는 열유속(Heat flux)에 의해 미연소 연료(virgin fuel)가 열 분해되면서 착화온도에 도달하면 화염이 착화되는 과정을 통해 화염확산이 이루어진다. 이는 산불확산에 있어서도 산림내 연료물질들의 연소로 발생된 화염이 지표화(surface fire), 수관화(crown fire)의 형태로 열전달 메커니즘에 의해 화염전파가 이루어진다. 산불에 대한 화염의 특성은 수차례 조사되었다.[5-8,11,12] 화염길이(Flame length)는 지표화에서 수관부로 연소, 확산되는 과정을 예측하는데 유용하다. 화염길이 예측모델은 BEHAVE 모델에 사용되는 경험적 상관관계, 화재역학 상관관계[5,6] 그리고 일반적인 화재역학에서 해석한 화염높이 산정을 위한 수치해석 상관관계[14]가 제시된바 있다. 산불확산에 있어 지표화 화염의 높이를 예측, 추정하는 것은 육안 또는 화염온도측정을 통한 실험적 방법과 수치해석

E-mail: k3d2h1@foa.go.kr

을 통한 화염확산 예측식을 구하는 방법이 있다. 본 연구에서는 무풍, 평지조건에서 열적 두께가 얇은 소나무 낙엽층에 대한 화염 높이 측정실험과 수치해석을 통한 화염높이 산정식을 도출하여 상호 비교, 검토하였다.

2. 이론적 배경

산불확산에 있어 화염의 높이는 연료의 특성과 바람, 경사에 의해 달라진다. 일반적으로 무풍-평지(no wind, no slope)조건에서의 화염높이와 화염길이는 같지만 경사와 바람에 의해 화염높이는 화염길이보다 작은 값을 가진다. 여기서 바람 또는 경사에 의해 화염이 지표연소물질과 보다 가까워짐으로써 복사 열전달율이 높아지게 되어 보다 빠른 확산이 이루어진다. 따라서 화염의 높이 산정은 산불확산 예측 등 산불의 위험성을 평가하는데 중요하다. Figure 1은 평균화염높이 H_0를 정의한 것으로 발화원 상부거리에 대한 화염의 간헐성(intermittency) I에 대한 변화가 개략적으로 제시되어 있다.

평균화염높이 H_0는 간헐성 I값이 0.5로 떨어지는 발화원 상부의 거리이다. 간헐성 측정결과에 따른 평균화염높이와 객관적인 판정결과는 육안관찰을 통해 평균으로 구한 화염높이와 상당히 일치한다.[10] 본 연구에서는 무풍, 평지조건에서 열적 두께가 얇은 지표층 낙엽에 대한 화염높이 측정실험을 통해 화염의 간헐성이 0.5로 떨어지는 화염높이 측정결과와 수치해석을 통해 얻은 산정식 값 그리고 기존 연구되어진 화염높이 예측식을 통해 상호 비교하였다.

2.1 가시화염의 평균높이 산정

가시화염의 평균 높이는 육안관측(visual observation)

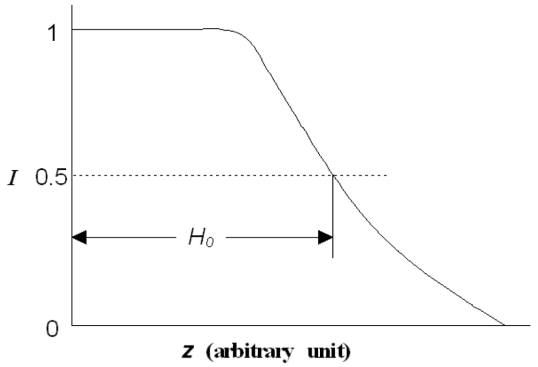

Figure 1. Average height of the flame and a change in flame intermittency *I*.

Table 1. Flame Height of *P. densiflora* in Each Fuel Density by Visual Measurement

Diameter (m) \ Fuel density (kg/m^3)	9.6	15.9	22.2	31.8
0.2	0.63	0.70	0.71	0.74
0.3	0.70	0.81	0.88	0.91
0.4	0.74	0.88	1.08	1.05
0.5	0.70	0.98	1.18	1.05

을 통해 측정할 수 있다. 발화원 상부거리에 대한 화염 간헐성 I가 0.5의 값을 가지는 평균화염높이를 측정하였다. 본 연구에서는 실험을 통해 얻은 화염높이를 구하는 기준으로 간헐성이 0.5로 떨어지는 발화원 상부로부터의 거리를 측정한 기존 연구결과[4]에서 제시된 결과와 비교하였다. 이 실험은 Surface fuel bed의 각 연료 밀도별 가시화염의 높이를 비디오카메라를 이용하여 측정한 것이다. 실험에 의한 육안관측 평균화염높이 측정결과값은 Table 1과 같다.

2.2 열방출률 산정

화염의 높이는 발화원의 종류에 따라 HRR(Heat Release Rate, kW)에 의해 달라지며 연소직경, 연료밀도 등의 물리적 변수들에 따라 달라진다. 연소물질의 $\dot{Q}$ (HRR, kW)의 산정은 식 (1)과 같이 계산된다. 여기서 질량감소율($\dot{m}$, kg/s)은 식 (2)에 의해 계산된다.

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

여기서, Δh_c는 열용량(the effective heat of combustion, kJ/kg), MLR는 중량감소속도(the mass loss rate, kg/s)이다.

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

여기서, ρ는 연료밀도(fuel density, kg/m^3), 1은 단위연소면적(m^2), δ는 연료깊이(fuel depth, m), t_b는 연소시간(burning time, sec)이다.

2.3 화염높이 산정모델

산불에 있어서 수치해석을 통한 화염높이 산정에 관한 연구는 무풍, 평지 상태에서 이루어져 있지 않다. 화염높이 예측을 위해 일반적으로 바람이 불지 않는 조건에서의 액체 또는 고체 가연물질의 수평면 화재에 대한 화염높이 산정은 McCaffrey,[15] Heskestad[14]에 의

해 식 (3)과 같이 제시되었다.

$$H = 0.23\dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (3)$$

여기서, $\dot{Q}$은 열방출률(Heat Release Rate), D는 연소직경(Burning Length)이다.

평지상태의 풍속조건에서의 산불에 대한 화염높이는 Albini,[5] Nelson[6] 등에 의해 실험과 함께 질량, 에너지 보존방정식으로부터 관계식 개발 등으로 연구된 바 있다. Albini[5]는 1-D fires에서의 화염높이 추정식을 $H \propto I_B/U$로 제시하였고 Nelson[6]은 이 식을 바탕으로 식 (4)와 같이 제시하였다. 하지만 이 식의 경우에는 풍속이 0인 무풍상태의 경우 화염의 높이를 산정하기 어렵다.

$$H = \frac{aI_B}{U} \quad (4)$$

여기서, I_B는 Byram's Fire Intensity(kW/), a는 1/360, U는 풍속(m/s)이다.

3. 화염높이 산정 수치해석

3.1 열방출률의 산정

봄철 건조한 소나무 낙엽에 대해 식 (1)과 (2)에 필요한 변수값 연료깊이(δ, m)는 평균 지표층 낙엽층 두께 0.1m, 연소시간(t_b, sec)는 40sec, 소나무 낙엽의 열

Table 2. MLR & HRR of *P. densiflora* in Each Fuel Density

Fuel Density (kg/m^3)	9.6	15.9	22.2	31.8
MLR (kg/s)	0.024	0.040	0.056	0.080
HRR (kW)	249.1	412.7	576.2	825.3

Remark: Fuel Moisture Content (%) is 15 ± 2

용량(Δh_c, kJ/kg)는 각각 10,381을 적용하였다.[2,3] 그 결과 각 밀도별 연료감소량(Mass Loss Rate, (kg/s)와 발열량(Heat Release Rate, kW) 결과값은 Table 2와 같다.[1]

3.2 소나무낙엽 화염높이 산정식 도출

지표화 연소물질의 연소시 발생되는 화염높이 산정을 위하여 본 연구에서는 J.G. Quintiere 방정식을 이용하여 수치해석 하였다. 평균화염높이에 대한 무차원 화염비(Dimensionless Flame Ratio, z/Z^{**})는 Quintiere와 Grove[12]에 의해 얻어진 Figure 2로부터 식 (5)와 같이 제시할 수 있다.

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

여기서 평균화염 높이(Z_f, m) 산출식은 식 (6)으로부터 식 (7)과 같이 도출할 수 있다.

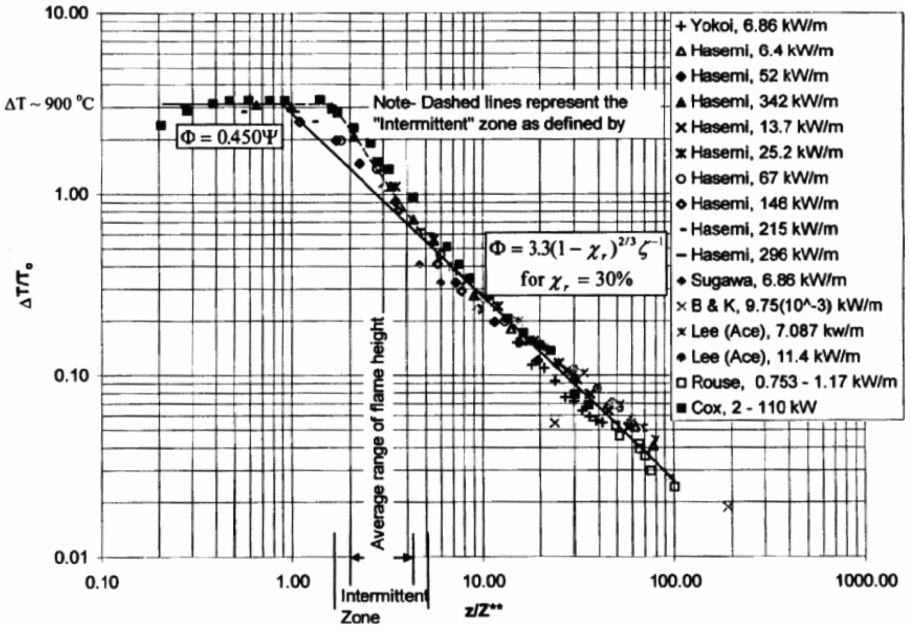

Figure 2. Dimensionless temperature vs. height for the infinite line, X_r = 30%.

Table 3. Flame Height of *P. densiflora* in Each Fuel Density by Heskestad Eq. (3)

Factors	Density (ρ_c, kg/)	Specific Heat (c_p, kJ/kg · K)	Initial Temperature (T_0, K)	Gravitational Acceleration (g, m/sec^2)	Combustion Diameter (D, m)
Value	1.2045[1)]	1.01	293	9.81	0.3

Remark: 1) Standard Air Density

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

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

여기서, ρ_c는 표준공기밀도(standard air density, kg/m^3), c_p는 일반대기압 비열(Specific heat of air at constant pressure, kJ/kg·K), T_0는 초기온도(Temperature, K), g는 중력가속도(Gravity acceleration, m/s^2)이다. 식 (7)에서 각 변수값은 Table 3에 제시된 값을 대입하였고 초기온도는 실온 상태의 293K를 대입하였다. 그 결과, 식 (8)과 같이 소나무 낙엽 연소시 화염높이 산출식을 도출하였다.

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

4. 결과 및 고찰

소나무 낙엽층의 화염높이 산정식의 정확성 평가를 위해 여러 밀도별 화염높이를 상호비교 하였다. 기 실험연구[4)]된 화염높이 관측값과 Heskestad 화염높이 산출식 (3), 그리고 Quintiere[1,2)] 화염높이 관계정의 이론을 이용하여 수치 해석한 화염높이 산출식 (8)에 적용한 소나무 낙엽층 화염높이는 Table 4와 같고 Figure 3에서 보이는 바와 같이 각 밀도별, 연소직경별 화염높이에서 가시화염 관측값과 수치해석 화염높이 산출식에 의한 값의 분포가 가까움을 알 수 있다. 가시화염을 기준으로 Heskestad 산출식과 새로운 도출식에 대해 오차통계 분석한 결과, 각 조건별 오차평균값은 각각 1.58m, 0.07m이고 표준오차는 각각 0.23, 0.09로 나타나 개발 산정식의 정확성이 보다 높은 것으로 나타났다(Table 5).

5. 결 론

산불에서의 초기 확산으로 이어지는 지표화에 대해 우리나라 대표 침엽수종인 소나무 낙엽층 연료를 대상으로 J.G. Quintiere의 무한선속에서의 화염의 무차원 온도 vs 높이 관계정의를 이용하여 수치해석을 통한

Table 4. Flame Height (m) in Each Fuel Density and Combustion Diameter

Combustion Diameter (m) \ Flame Height Model \ Fuel Density (kg/m^3)		9.6	15.9	22.2	31.8
0.2	Visual Observation	0.63	0.70	0.71	0.74
	Heskestad Equation (3)	1.93	2.41	2.78	3.25
	New Equation (8)	0.37	0.51	0.64	0.81
0.3	Visual Observation	0.70	0.81	0.88	0.91
	Heskestad Equation (3)	1.83	2.31	2.68	3.14
	New Equation (8)	0.48	0.67	0.84	1.07
0.4	Visual Observation	0.74	0.88	1.08	1.05
	Heskestad Equation (3)	1.73	2.21	2.58	3.04
	New Equation (8)	0.58	0.81	1.02	1.29
0.5	Visual Observation	0.70	0.98	1.18	1.05
	Heskestad Equation (3)	1.63	2.10	2.48	2.94
	New Equation (8)	0.67	0.94	1.18	1.50

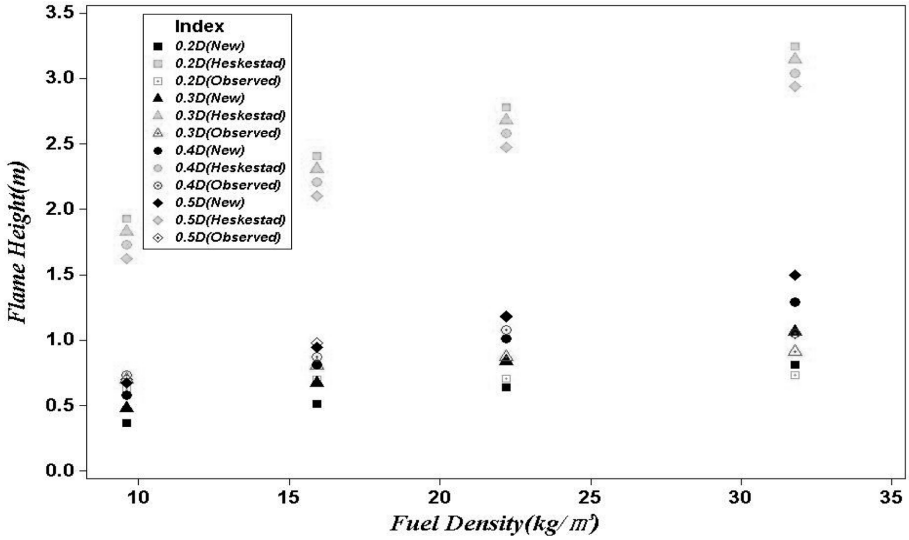

Figure 3. Compare of *P. densiflora* flame height on Table 5.

Table 5. Flame Height (m) in Each Fuel Density and Combustion Diameter

Combustion Diameter (m) \ Statistics Analysis		The Mean Error	The Standard Error	The Standard Deviation	Dispersion
Visual Observation & New Equation (8)	0.2	0.1107	0.0747	0.1493	0.0223
	0.3	0.0595	0.0806	0.1612	0.0260
	0.4	0.0102	0.0860	0.1721	0.0296
	0.5	0.0940	0.1180	0.2350	0.0550
	The Mean	0.06	0.08	0.16	0.03
Visual Observation & Heskestad Equation (3)	0.2	1.900	0.237	0.515	0.266
	0.3	1.668	0.176	0.467	0.218
	0.4	1.454	0.273	0.416	0.173
	0.5	1.308	0.267	0.415	0.173
	The Mean	1.58	0.24	0.45	0.21

화염높이 산출식 (8)을 도출하였다. 이 식에 의해 산출된 소나무 낙엽층의 화염의 높이에 대해 가시화염 관측값과 Heskestad(1998) 식에 적용한 산출값과 상호 비교하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 제시코자 한다.

1) 가시화염 관측값에 대한 개발 산정식 적용값, Heskestad 식의 화염높이의 평균 오차는 각각 0.06m, 1.58m로 나타나 개발 산정식이 Heskestad 식에 대비해 약 26배의 화염높이 값의 차이를 나타내었다.

2) 화염높이의 정확성을 나타내는 표준오차에 있어서도 가시화염 관측값에 대한 개발 산정식 적용값, Heskestad 식의 화염높이의 평균 오차는 각각 0.08, 0.24로 분석되어 개발 산정식의 정확성이 높은 것으로 나타났다.

향후, 이 식을 이용하여 복사열전달에 의한 산불의 화염높이 및 화염확산해석 등에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김장환, 김응식, 박형주, 이명보, 김동현, “지표화 연료의 열량분석에 관한 실험방법 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.22, No.3, pp.258-264 (2008).

2. 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, “지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 한국방재학회 학술발표대회 논문집, pp.379-384(2006).
3. 박형주, 김응식, 김장환, 김동현, “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.3, pp.33-41(2007).
4. 김동현, 田中哮義, 이명보, 김광일, “낙엽층 화염높이 산정에 관한연구”, 2009년도 춘계학술논문발표회 논문집,한국화재소방학회, pp.365-371(2009).
5. F.A. Albini, “A Model for the Wind-blown Flame from a Line Fire”, Combust. Flame, Vol.43, pp.155-174(1981).
6. R.M. Nelson, Jr. and C.A. Adkins, “Flame Characteristics of Wind-driven Surface Fires”, Can. J. For. Res., Vol.16, pp.1293-1300(1986).
7. R.C. Rothermel, “A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels”, USDA Forest Sterv. Intermountain Forest and Range Exp. Stn. Res. Pap. INT-115(1972).
8. W. Anderson, E. Paster, B. Butler, E. Catchpole, J.L. Dupuy, P. Fernandes, M. Guijarro, J.-M. Mendes-Lopes, and J. Venture, “Evaluating Models to Estimate Flame Characteristics for Free-burning Fires using Laboratory and Field Data”, V International Conference on Forest Fire Research (2006).
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. E.E. Zukoski, B.M. Cetegen, and T. Kubota, 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 Coumbustion Institute, pp.2757-2766(1998).
14. G. Heskestad, Fire Safety Journal, Vol.30, p.215 (1998).
15. B. McCaffrey, “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 2nd ed., Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, Quincy, MA(1995).