

## 산불 지표화에서의 바람에 의한 화염각 변화 산정식 도출에 관한 준-수치해석 연구

### Semi-numerical Study on the Flame Tilt Equation due to Wind on the Surface Fire in Forest Fire

김동현

Dong-Hyun Kim

국립산림과학원 산림방재연구과  
(2009. 8. 17. 접수/2009. 10. 9. 채택)

#### 요 약

산불의 확산에 있어 바람은 매우 중요한 인자이다. 바람은 또한 지형에 따라 변화되며 이로 인해 다른 확산형태를 가지게 된다. 따라서 산불의 확산속도 해석을 위해 먼저 풍속에 따른 화염각 변화를 살펴볼 수 있다. 이는 바람에 의해 변화된 화염각으로 인해 미연소 지표 대상물에 열전달의 차이를 가져오기 때문이다. 풍속이 증가할수록 화염과 지표면이 가까워짐으로 인해 열전달이 증가되어 미연소물질이 착화온도에 빨리 도달하게 되어 화염의 확산속도가 빨라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 바람에 의한 화염각 변화 산정식을 Froude number 관계식을 이용한 수치해석과 실험을 통해 제시하였다. 그 결과, Froude number 계수  $A=1.85$ 를 제시하였고 제시된 식에 대한 실험 화염각의 평균 오차각은 약  $3.3^\circ$ 로 다른 모델식에 비해 실험값과 유사한 결과를 나타내었다. 향후, 이 연구를 통해 열전달 수치해석을 통한 화염확산연구에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### ABSTRACT

The wind is very important factor in forest fire spread. Flame spread has a change through wind pattern change in forest fire. In order to analyze the forest fire flame spread rate, change of flame tilt depending on wind may be considering first. This is because the flame spread rate varies by the flame tilt changed due to transfer of heat. Especially, as wind speed grows, flame gets closer to surface, heat transfer ratio increase, virgin fuel bed reaches ignition temperature more rapidly, and flame moves faster. This study deduces, through experiment and physical figure analysis, relations on the change behavior of flame tilt due to wind. The value of flame tilt angle calculated from the equation and the experiment value showed average error angle of  $3.3^\circ$ , which is relatively smaller than results of previous studies that used other coefficient. Froude number coefficient  $A$  can be calculated in the method provided in this research for estimation of flame tilt angle of virgin fuel bed with varying thermal properties. The research finding is expected to be applied to future studies on flame spread through numerical analysis of heat transfer.

**Key words :** Forest fire, Flame spread rate, Flame tilt, Surface fuel bed, Wind driven

#### 1. 서 론

산불은 화염의 전파로 인해 확산되므로 화염전파에 대한 해석 연구는 산불확산예측 알고리즘 개발에 있어 가장 중요한 부분이다. 화염의 전파는 지표층 연료의

화재발생시 생성된 화염으로부터 열전달에 의해 미연소물질로 온도가 전이되는 과정이다. 따라서 지표 연소물질의 화염 높이를 포함한 연소 특성에 관한 실험 연구가 선행되어야 한다. 기존 우리나라의 주요 수종에 대한 지표물질의 화염높이 및 착화성 등의 연소특성에 관한 연구는 2006년 이후 지속적으로 연구되고 있다.<sup>1-5)</sup> 전 세계적으로 산불확산에 관한 연구는 지난

E-mail: k3d2h1@forest.go.kr

50년 이루어져 왔다. 이러한 연구 업적들로 이론적인 배경과 경험적인 연구결과들은 지금에서도 이론적 근거와 새로운 방법론적 대안들을 제시해주는 근거가 되고 있다. 특히, 열전달 메커니즘 해석을 통한 산불확산에 관한 연구는 화염이라고 가시적인 열적 형상에 대한 확산과정을 해석하는 물리적 수치해석의 이론적인 대안을 제시해주고 있다.<sup>6,8,9)</sup>

산불 발생시 풍속에 따라 확산속도가 달라지는 것은 화염으로부터 미연소물질에 도달하는 열에너지 값이 달라지기 때문이다.<sup>10)</sup> 바람에 의한 화염각 변화로 인해 화염의 높이 변화와 화염으로부터 지표면과의 형상계수(view factor)가 물리적으로 변화된다. 이것으로 열전달 수치해석을 통한 화염 전파 속도, 화염연소 폭, 화염 강도 등을 평가할 수 있다. 화염 확산 속도가 증가하는 것은 변화된 화염으로 인해 지표면의 미연소 연료에 열을 전달할 때 경사가 급할수록, 풍속이 빨라질수록 화염과 지표면의 사이 각이 줄어들어 형상계수(view factor) 값이 커짐으로 인해 열전달이 증가되어 지표면 온도가 빨리 상승하는 효과가 발생되기 때문이다.<sup>10,11)</sup> 덧붙여 평지의 바람이 없는 조건에서의 초기 화염높이(Ho)는 화염길이(Lf)와 같지만 풍속에 의해 화염각이 변화되면 일반적으로 화염의 높이(Hf)는 화염의 길이(Lf)보다 작은 값(Hf < Lf)을 가진다. 따라서 이러한 화염각 변화에 대한 연구는 화염의 유동 및 열전달 해석에 있어 매우 중요하다. 이에 있어 기존의 많은 연구자들이 화염각 변화에 대한 연구를 수행 하였다. 특히 바람에 의한 화염각 변화에 대해 많은 연구들이 수행되었다.<sup>6,9,12,14)</sup> Nelson(1980)은 풍속조건에서의 화염길이와 화염각에 대해 Fang(1969)의 실험 결과 값 및 제시된 관계식과 모델에 대해 재해석하여 Byram Number를 이용한 풍속에 대한 화염각 산정식을 제시한 바 있다.<sup>14)</sup> 하지만 기존 연구들의 경우, 지표화에 대한 화염길이 및 화염각에 대해 각기 다른 기준을 제시하고 있어 상대적인 결과 비교를 하기 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 평지조건에서의 풍속에 따른 화염각 변화에 대해 기존 연구들에 대한 이론적 배경들에 대해 분석하였고 이를 바탕으로 산불에 취약한 한국의 주요 수종인 *Pinus densiflora*의 fuel beds 연소 실험으로 화염각 변화에 대한 준(準)-수치해석(semi-numerical) 방법을 통해 산정식을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 화염각의 정의

화염과 경사면과의 사이 각은 기존 연구에서는 Figure

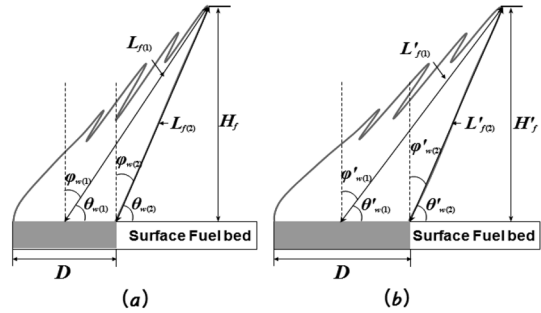


Figure 1. Change of flame tilt depending on flame width.

1의 (a)와 같이 화염의 폭의 중심(D/2)지점에서 화염 끝 지점과의 연결선과 지표면과의 사이 각을 산출하기도 하였고<sup>15,16)</sup> Figure 1의 (b)와 같이 화염의 선단면을 기점으로 화염각을 산출하기도 하였다.<sup>11)</sup> 화염의 열전달에 있어서 화염으로부터의 방출되는 열에너지는 화염의 선단부로부터 방출되는 복사열에너지 형태로 열전달이 이루어지기 때문에 화염 폭을 고려한 화염각 산정은 화염확산에 따라 일정치 않게 변화되는 값을 가진다. 예를 들어, 풍속이 같을 경우, 착화온도가 낮고 화염이 오래 지속되는 연소물질의 경우에는 그렇지 못한 연소물질보다 상대적으로 화염각이 작게 형성될 수밖에 없다. 이는 동일한 풍속조건에서 화염의 폭에 따라  $\theta_{w(1)} > \theta'_{w(1)}$ 와 같이 나타나게 되지만 화염 선단면과 지표면과의 화염각은  $\theta_{w(2)} > \theta'_{w(2)}$ 로 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Figure 1의 (b)와 같이 화염폭에 대한 변수를 고려하지 않고 화염 선단면을 기점으로 화염각 변화에 대한 연구를 수행하였다.

### 2.2 바람에 의한 화염각 변화 모델

산불에서의 풍속에 의한 화염각 변화( $\phi_w$ )는 균일한 바람(uniform wind)에서 Froude number(Fr)와 풍속과의 상관관계를 통해 식(1)과 같이 유추할 수 있다.

$$\phi_w \propto \tan^{-1}\left(A \frac{U_\infty}{\sqrt{gH_0}}\right) = \tan^{-1}(A \times Fr) \quad (1)$$

여기서,  $Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{gH_0}}$  이다.

Froude number를 이용한 기존 연구내용을 살펴보면 Albin(1981)  $\tan(\phi_w)$ 에 대한 대수해법을 이용하여 Froude number와 화염각( $\phi_w$ )과의 상관관계 분석을 통해 식(2)와 같이 제시하였다. Putnam(1965)은 천연가스 화염에 대한 실험 data로부터 식(3)과 같이 제시하였다. 여기

서 이 두식은 모두 화염 폭의 중간부로부터 얻은 화염 각으로 앞서 화염각에 대해 설명한 바와 같이 실제 화염 확산에는 고려되어야 할 부분이 있다.

$$\phi_w = \tan^{-1}\left(1.22 \frac{U_\infty}{gH_0}\right) \quad (2)$$

$$\phi_w = \tan^{-1}\left(1.4 \frac{U_\infty}{gH_0}\right) \quad (3)$$

### 3. 실험방법

#### 3.1 풍속에 따른 화염각 변화 실험

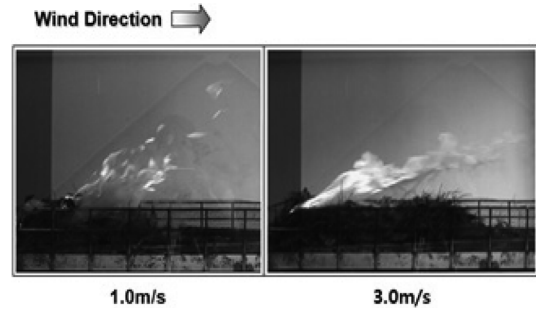
풍속에 따른 화염각 변화를 알기 위해 Figure 2와 같이 시험 장치 내에 일정한 풍속이 불 수 있도록 풍동 장치를 제작하여 실험을 실시하였다. 실험 풍속 조건은 0~5m/s까지 0.5m/s간격으로 총 10개 항목에 대해 실험하였다. 지표 연소시험 장치의 크기는 폭 0.5m, 길이 2.2m이다. 시험 대상 연료의 상태는 Table 1과 같이 소나무 낙엽에 대해 우리나라 일반적인 낙엽층 밀도인 20kg/m<sup>3</sup>, 연료층 두께 0.1m 그리고 낙엽의 수분 함유량(FMC: Fuel Moisture Contents, %)은 약 13±2%의 건조한 낙엽을 사용하였다.<sup>4)</sup> 화염각( $\phi_w$ )은 Digital Camera(Model: Canon 5D)를 이용하여 화염 정상 촬영을 통해 측정하였다.

#### 3.2 화염각 측정

풍속에 따른 화염각 변화 측정은 Figure 1에서 설명된 바와 같이 화염 선단면과 지표면사이의 각을 측

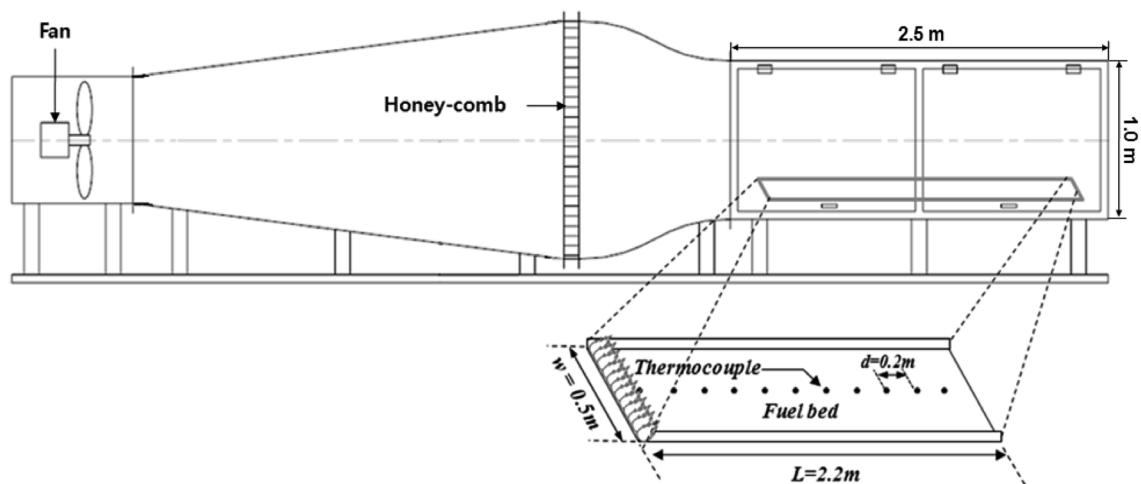
**Table 1.** Fuel Characteristics for Combustion Test in Wind Condition

Fuel Type	Fuel Density (kg/m <sup>3</sup> )	FMC (%)	Fuel Depth (m)
<i>P. densiflora</i>	20	13 ± 2	0.1



**Figure 3.** Experiment on wind-driven change of flame tilt at no-slope condition in a wind tunnel.

정하였다. 일반적인 화염은 간헐성을 가지게 되는데 플룸(Flume) 상태를 제외한 안정된 상태(Steady state)의 화염 선단면 측정이 필요하다. 이에 초기 점화상태에서는 무풍상태에서 화염확산을 진행하여 소나무 낙엽층의 평균 화염높이인 40cm로<sup>4)</sup> 안정된 상태에 도달된 시점을 기준으로 풍속을 주어 Figure 3으로부터 Figure 1과 같이 화염확산 초기 단계에서 화염 선단면의 수직기점에서 지표면으로 기운 화염각각( $\phi_w$ )을 측정하였다.



**Figure 2.** Wind tunnel device to measure flame tilt and flame spread rate changed due to wind and the flame spread rate.

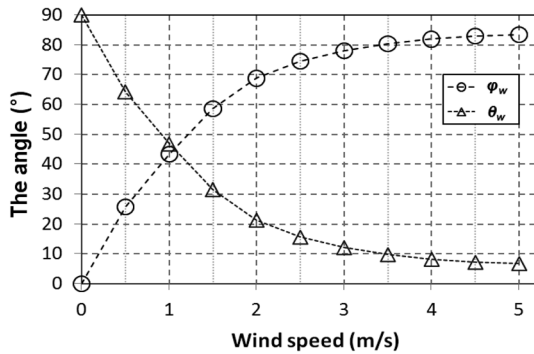


Figure 4. Experimental the flame tilt ( $\phi_w$ ) and the angle between flame and surface ( $\theta_w$ ).

#### 4. 결 과

##### 4.1 화염각 실험결과

풍속에 따른 화염각 변화 실험결과, Figure 4와 같이 풍속이 증가할수록 화염각이 커져 화염과 지표면과의 사이 각이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 화염각과 화염과 지표면 사이 각이 45°로 동일해 지는 지점은 풍속이 약 1.05m/s일 때이며 풍속이 3m/s 이상에서는 화염각이 약 80° 이상으로 화염이 지표면에 거의 접해져 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 준(準)-수치해석(Semi-numerical)을 통한 화염각 산정

풍속에 따른 화염각 변화에 대한 추정식은 Froude number에 대한 화염각 관계식(1)로부터 식(4)로부터 산정할 수 있다.

$$\tan\phi_w \sin\phi_w = 1.85 \frac{U_\infty^2}{gL_f} \quad (4)$$

여기서,  $\tan\phi_w \propto Fr = \frac{U_\infty}{\sqrt{gH_f}} = \frac{U_\infty}{\sqrt{gL_f \cos\phi_w}}$  이다.

계수 A에 대한 값의 추정은 Albini(1981), Putnam (1965)와 같이 실험값으로부터 대수해법(algebraically solved)이나 상관관계분석을 통해 구할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험 측정값을 통해 얻은 풍속별 화염각 변화값과 Froude Number와의 상관관계 분석을 통계적으로 처리하여 계수 A값 1.85를 구해 식(1)에 적용하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

여기서, 통계분석 처리 방법은 다음과 같다.

- 1 step: 풍속별 실험값과 Fr number 값과의 화염

각 오차평균( $\bar{y}$ ) 산정

- 2 step: 편차 산정( $d_i = y_i - \bar{y}$ )

여기서,  $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) = 0$

- 3 step: 표준편차( $\sigma$ ) 산정
- 4 step: 표준오차 평균값의 계수 A를 적용  
여기서  $\sigma/\sqrt{N}$ , N은 전체 data 개수

#### 5. 고 찰

본 실험에서의 화염각 변화 산정에 있어 화염거동이 일정한 패턴을 보이는 안정화 상태를 가지는 평지 조건에서의 풍속에 의한 화염각 변화에 대해 실험 결과값과 식(2), (3) 그리고 통계분석을 통해 구해진 상관 계수 A = 1.85를 적용한 식(4)에 대한 비교결과는 Figure 5와 같다. 여기서 실험 결과와 각 제시된 식들과의 평균 오차각은 Albini(A = 1.22) 적용 식(2)는 8.3°, Putnam (A = 1.4) 적용 식(3)은 5.7° 그리고 A = 1.85 제시된 식 4는 3.3°로 나타났다. 풍속 조건에서 Froude number를 기초로 하여 제시된 각 식들(식(2), (3), (4))과 실험값에 대한 화염각( $\phi_w$ )에 대한 관계 그래프는 Figure 6과 같다. 여기서 측정값과의 화염각 오차가 각 식들마다 차이를 보이는 것은 각각의 실험 data로부터 대수해법(algebraically solved) 또는 통계분석을 통해 얻은 보정 계수 A를 적용하였기 때문이다. 따라서 각기 열적 특성이 다른 연료를 적용할 경우, 본 논문에서 기술한 방법을 통해 각 연료별 적정 계수 값을 산정하면 전산 해석(computational solving)시 보다 높은 정확도를 가질 수 있다. 여기서 화염기울기  $\phi_w$ 에 대한 tan값이 식(4)의 부연 수식에서 Froude number에 비례하기 때문에 Figure 6의  $\tan\phi_w$ 로 상호 비교하였다.

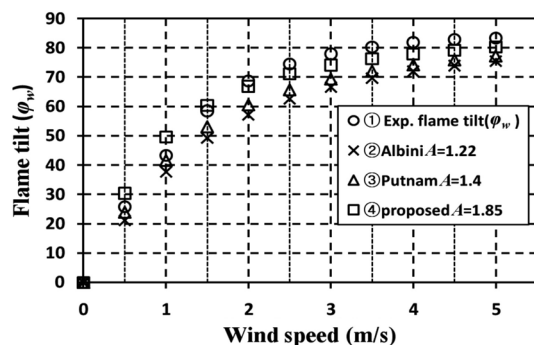


Figure 5. Experimental data vs. results of related equations for wind-driven change of flame tilt.

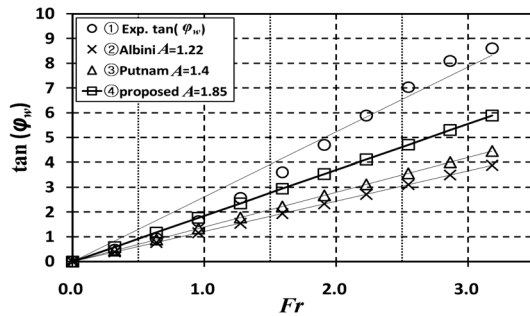


Figure 6. Comparison of predictions from  $\tan\phi_w$  in flame tilt equations (eq. (2), (3), (4)) based on Froude number ( $Fr$ ) in wind.

## 6. 결 론

풍속에 따른 화염각 변화에 대한 실험과 Froude number에 기초로 한 준-수치해석 결과, 화염각 변화 예측을 위해 식(4)와 같이 제시하였다. 제시된 식에 대한 실험 화염각의 평균 오차각은 약 3.3°로 다른 모델식에 비해 실험값과 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 진행된 화염각 산정을 위한 유추방법이 유의성을 가지는 것으로 판단된다. Froude Number를 기초로 한 지표연소물질의 화염각 변화 예측은 연료의 열적 특성이 다른 물질의 경우에는 본 연구에서 제시된 방법을 통해 Froude number 계수  $A$ 를 제시할 수 있고 향후, 이 연구를 통해 열전달 수치해석을 통한 화염확산연구에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 약 어

$H_0$	: 초기화염높이(m)
$L_r$	: 화염길이(m)
$H_f$	: 화염높이(m)
$D$	: 화염의 폭(m)
$\theta$	: 화염 선단면과 지표면과의 사이 각(°)
$\phi$	: 화염 기울기(°)
$A$	: 플라우드 수의 계수
$U_\infty$	: 풍속(m/s)
$g$	: 중력가속도(m/s <sup>2</sup> )
$y_i$	: 오차
$\bar{y}$	: 오차평균
$d_i$	: 편차
$\sigma$	: 표준편차

## 참고문헌

1. 김장환, 김응식, 박형주, 이명보, 김동현, “지표화 연료의 열량분석에 관한 실험방법 연구”, 한국화재소방학회논문지, 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”, 한국화재소방학회논문지, Vol.21, No.3, pp.33-41(2007).
4. 김동현, 田中孝義, 이명보, 김광일, “낙엽층 화염높이 산정에 관한연구”, 2009년도 춘계학술논문발표회 논문집, 한국화재소방학회, pp.365-371(2009).
5. D.H. Kim, “Forest Fire Risk Assessment through Analyzing Ignition Characteristics of Forest Fuel Bed”, V International Conference on Forest Fire Research, pp.30-31(2006).
6. F.A. Albini, “A Model for the Wind-blown Flame from a Line Fire”, Combust. Flame, Vol.43, pp.155-174(1981).
7. F.A. Albini, “A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by Radiation”, Combustion Sci. Technology, Vol.42, pp.229-58(1985).
8. 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).
9. A.A. Putnam, “A Model Study Win-blown Free Burning Fires”, Proceedings of the 14th Symposium (Int) Combustion, pp.1039-1107(1965). (The combustion Institute: Pittsburgh).
10. F. Morandini, P.A. Santono and J.H. Balbi, “The Contribution of Radiant Heat Transfer to Laboratory-scale Fire Spread under the Influences of Wind and Slope”, Fire Safety Journal, Vol.36, pp.519-543 (2001).
11. P.A. Santoni and J.H. Balbi, “Modelling of Two-dimensional Flame Spread Across a Sloping Fuel Bed”, Fire Safety Journal, Vol.31, pp.201-225 (1998).
12. J.B. Fang, “An Investigation of the Effect of Controlled Wind on the Rate of Fire Spread”, Ph.D. dissertation, Department of Chemical Engineering, Univ. of New Brunswick, Fredericton(1969).
13. R.C. Rothermel and H.E. Anderson, “Fire Spread Characteristics Determined in the Laboratory”, USDA For. Serv. Intermountain Forest Rnge Exp. Res. Pap. INT-30(1966).
14. R.M. Nelson, Jr., “Flame Characteristics for Fires in Southern Fuels”, USDA Forest Service. Southeast. For. Exp. Stn. Res. Pap. SE-205(1980).

15. Wendy Anderson, Elsa Pastor, Bret Butler, Edward Catchpole, Jean-Luc Dupuy, Paulo Fernandes, Mercedes Guijarro, Jose-Miguel Mendes-Lopes and Joao Ventura, "Evaluating Models to Estimate Flame Characteristics for Free-burning Fires using Laboratory and Field Data", *Forest Ecology and Management*. 234S, S77(2006).
16. David R. Weise and Gregory S. Biging, "Effects of Wind Velocity and Slope on Flame Properties", *Can. J. For. Res.*, Vol.26, pp.1849-1858(1996).