

경사에 따른 화염각 변화와 지표 화염 확산에 관한 연구 - 무풍조건 기반 -

A Study on the Flame Tilt and Flame Spread due to Up-slope on the Surface Fuel Bed - No wind condition -

김동현*

Kim, Dong-Hyun

Abstract

Flame spread velocity to virgin surface fuel bed on a ground slope increases as the flame gets closer to the slope according to the change of a ground slope angle. The existing studies have generally adopted the theory that flame gets closer to the slope as the slope angle increases, without considering the change of flame tilt against the slope. In this study, experiments were made on the actual characteristics of the flame on slopes of various angles, and as a result, this study offers the flame tilt equation according to the slope angle, and derive correlation between flame tilt and flame spread velocity on slope conditions.

Key words : Forest fire, Flame spread velocity, Flame tilt, Slope

요 지

경사면에서의 지표 연소물질에 대한 화염확산은 경사각변화에 따라 화염이 경사면과 가까워져 열전달이 많이 이루어져 확산이 빠르게 이루어진다. 기존 연구에서는 경사면에 대한 화염각 변화를 고려하지 않고 일반적으로 경사각의 기울어짐으로 인해 화염이 그 만큼 지표면과 가까워지는 것을 적용하였다. 따라서 본 연구에서는 경사면에서의 실제 화염의 성상에 대해 실험하였다. 그 결과 경사에 따른 화염기울기 산정식을 제안 하였고 경사조건에서의 화염기울기와 화염확산속도와의 관계에 대해 기술하였다.

핵심용어 : 산불, 화염확산속도, 화염각, 경사

1. 서 론

산불은 지중화, 지표화, 수관화, 비화 등의 과정을 통해 확산되며 산불의 초기 발생과 초기 화염의 전파는 지표화에서부터 시작이 되어 수관화, 비화로 발전된다. 따라서 산불확산에 대한 연구에 있어 지표화에 대한 연구가 선행되어야 한다. 지표화에 따른 산불확산은 연료의 종류, 경사, 바람 등의 조건에 의해 변화된다. 특히, 우리나라는 건조한 봄철 계절풍의 영향으로 강한 편서풍이 부는 기상환경과 급경사지가 많은 산악형 산지로 이루어져 있는 지형환경, 그리고 산불에 취약한 침엽수림대가 약 40%이상을 차지하고 있어 산불 발생 및 대형화의 위험에 놓여져 있다. 따라서 본 연구에서는 산불 확산연구에 있어 경사조건에서의 화염의 성상과 확산속도 변화에 대해 논의하고자 한다.

산림입지 환경에서의 경사지는 완경사지(15° 미만), 경사지

(16~20°), 급경사지(21~25°), 험준지(26~30°), 절험지(31° 이상)로 구분된다(산림청 2004). 우리나라 산림입지의 평균 경사는 약 28°로 급경사지가 주를 이룬다. 우리나라 각 지자체 별 10년 평균 산불발생 건수별 피해면적과 21° 이상 급경사지 분포특성을 살펴보면 표 1, 그림 1과 같다. 지자체의 평균 경사는 약 75%이상의 급경사지이며 대부분 급경사지 비율이 높은 지역이 산불건당 피해면적이 많이 나타나는 경향을 보이고 있다.

경사에 따른 산불확산속도에 대한 국내 연구는 실험을 통해 경사와 산불확산속도와의 관계에 대한 연구(안상현 외1, 2008)가 진행된바 있고 외국에서 또한 Rothermel(1972), Albin(1981), Dupuy(1995), Morandini(2001), Domingos(2005) 등에 의해 연구되어진 바 있다. 하지만 단순한 실험적 연구에서의 경사에 따른 산불확산관계 연구가 진행되었으며 경사에 따른 화염각변화에 대한 분석과 이로 인한 확산특성에 대한

*정회원 · 국립산림과학원 산림방재연구과 연구사(E-mail:k3d2h1@forest.go.kr)

표 1. 우리나라 각 지자체별 건당 산불피해면적과 급경사지 비율

광역시·도	산불건당 피해면적 (ha/fire)	급경사지 비율 (%)
서울특별시	0.08	20
부산광역시	0.32	69
대구광역시	0.34	99
인천광역시	0.39	36
광주광역시	0.63	49
대전광역시	0.63	75
울산광역시	1.49	99
경기도	1.12	86
강원도	46.90	87
충청북도	1.48	94
충청남도	12.05	44
전라북도	2.38	71
전라남도	1.35	58
경상북도	2.24	93
경상남도	1.50	54
제주도	1.48	86

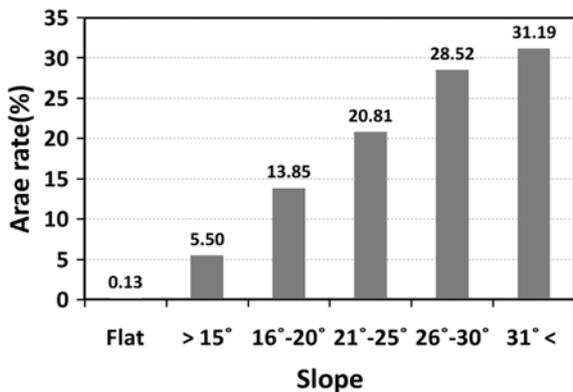


그림 1. 우리나라의 산림경사 분포도 (산림청, 2004).

연구는 아직 이루어지지 않았다. 특히 경사 효과로 인해 발생하는 화염각 기울기에 대해서는 고려하지 않고 경사각 변화에 따른 화염과 기울기와의 고려만 제시된 바 있다.

2. 이론적 배경

경사조건에 따른 확산속도는 경사로 인해 화염과 경사면의 사이 각이 좁아져 화염으로부터 열유속(heat flux)이 경사면의 미연소 연료(virgin fuel)에 많이 도달하여 그만큼 빨리 확산이 이루어진다. Rothermel(1972)은 이에 대해 $V=V_0(1+\phi_s)$ 와 같이 화염각 변화에 대한 확산속도를 해석을 제시하였다. 경사면에서의 화염각 변화로 인한 화염 확산 속도는 풍속에 비해 적은 영향을 미치는 것으로 기존 연구에 보고되었고 실험 결과에서도 나타나 있다(Dupuy, 1995). 그리고 경사에 따른 화염각 변화연구는 풍속에 비해 많은 연구들이 수행되지 않았다. 제한적인 몇몇 연구들에서 경사 효과에 대한 화염각

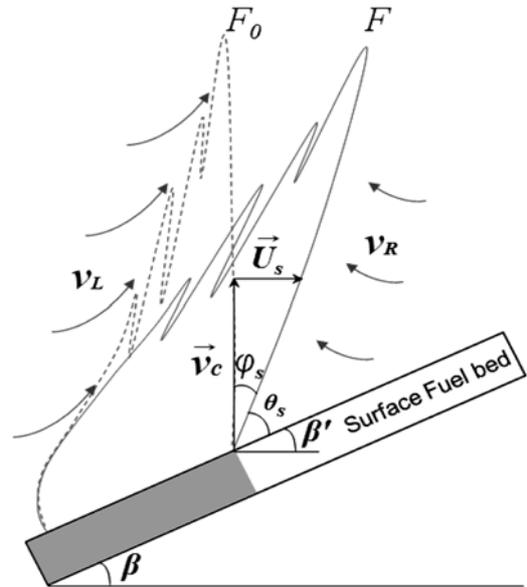


그림 2. 경사에 따른 화염각 변화 모식도.

변화에 대한 연구가 진행되었다(Dupuy 1995, F. Morandini 2000). F. Morandini(2001)는 경사-풍속 조건에서의 실험과 이론값의 결과 비교에서도 ‘경사각에 따른 화염각 변화 영향은 작다’라는 가정을 두어 화염각 ϕ_s 의 적용 없이 화염과 경사면의 사이 각을 $\theta_s=90-\beta$ 로 적용한 연구를 수행한 바 있다.

그림 2는 실제 경사도에 따른 화염각 변화 모식도이다. 여기서 실제 실험에서는 화염각이 F 와 같이 기울기가 변화되는 현상을 나타내고 있다. 하지만 기존 연구에서는 F_0 를 화염형상으로 가정하고 화염과 경사면과의 사이 각에 대해 $\phi_s+\theta_s$ 로 가정하여 경사에 따른 화염각 변화를 적용하였다(Albini 1981, Morandini 2001).

따라서 본 연구에서는 실제 경사에 의해 화염각이 얼마나 변화되고 확산속도에 영향을 미치는지 살펴보았다.

3. 실험 및 수치해석

3.1 실험

경사에 따른 화염각 변화와 화염확산속도와의 관계를 알기 위해 시험 장치를 실내에 설치하여 바람 영향이 없는 조건에서 실험 하였다. 시험 장치는 그림 3과 같이 낙엽층 연료상은 폭 0.5 m, 길이 2.2m이며 화염의 확산속도 측정을 위해 시험 장치에 0.2 m 간격씩 K-type 열전대를 설치하여 화염 도달 시간을 매초 단위로 측정하여 확산속도를 산출하였다. 경사각 변화는 0~55° 범위에서 10개 경사각에 대해 실험을 실시하였다. 화염기울기(ϕ_s)는 Digital Camera (Model: Canon 5D)를 이용하여 화염 정상 촬영을 통해 측정하였다. 연료 밀도는 한국의 일반적인 낙엽층 밀도인 20 kg/m³로 실험하였다. 낙엽의 수분함유량(FMC, Fuel Moisture Contents)은 약 13±2%의 건조한 낙엽을 이용하였다.

3.2 화염각

경사면에서의 화염각 변화는 그림 1과 같이 화염발생시 생

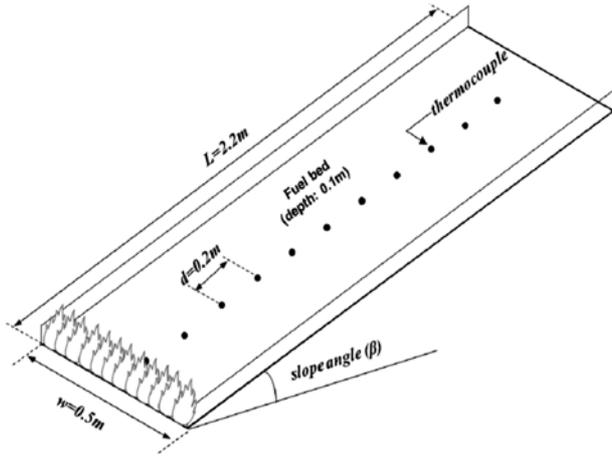


그림 3. 경사에 따른 화염각 변화 및 화염확산속도 측정 시험 장치.

성된 대류열에 의해 외부로부터 공기가 유입되면서 생기는 공기 유속으로 인해 발생된다. 무풍조건의 평지에서의 화염은 그림 4와 같이 화염을 기준으로 우측과 좌측의 공기유입 속도가 같다($U_{\infty(L)}=U_{\infty(R)}$).

하지만 무풍조건의 경사면에서의 공기 유속은 상향면의 유속이 하향면의 유속보다 크다. 따라서 화염각 또한 그림 2와 같이 상향으로 더 기울어지는 것으로 나타난다.

따라서 경사면에서의 화염으로 인해 발생하는 유속은 그림 5와 같이 표현할 수 있고 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_s = U_{\infty} \times \cos \beta \quad (1)$$

여기서 경사조건이 아닌 바람에 따른 화염각 산정은 Froude number를 이용하여 식 2와 같이 제시된다. 이에 Albini (1981)는 실험값과 식 2에 대해 대수해법을 이용하여 Fr 계수 $A=1.22$ 를 제시하였고 Putnam (1965)은 천연가스 화염에 대한 실험 data로부터 Fr 계수 $A=1.4$ 를 제시하였다. 저지는 앞선 연구에서 풍동연소시험을 통해 소나무 낙엽연료층(*Pinus densiflora* fuel bed)에 대한 풍속에 따른 화염각 변화에 대한 실험을 실시하였고 실험 경사각과 Froude number와의 통계분석을 통해 식 3과 같이 Fr 계수 $A=1.85$ 를 제시한 바 있다(Kim et al. 2009). 이때의 실험값과의 화염각 비교결과, 오차 각은 평균 3.3° 나타내었다. 이에 본 연구에서는 동일한 연료조건에서 실험한 식 3을 이용하여 경사각에 의한 화염각 변화 산정식을 도출하고자 한다.

$$\phi_w \propto \tan^{-1} \left(A \frac{U_{\infty}}{\sqrt{gH_f}} \right) = \tan^{-1}(A \times Fr) \quad (2)$$

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

$$\phi_w = \tan^{-1} \left(1.85 \frac{U_{\infty}}{\sqrt{gH_f}} \right) \quad (3)$$

여기서 U_{∞} 는 평지조건에서 수평으로 부는 풍속이다.

따라서 식 3에 식 1을 대입하면 식 4와 같이 화염각 변화를 나타낼 수 있다. 여기서 그림 5의 U_{∞} 는 경사면에 대한

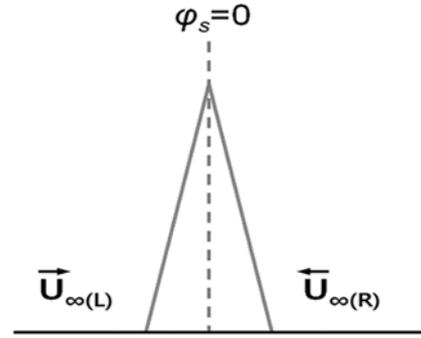


그림 4. 평지 무풍조건에서의 화염과 공기유입 모식도.

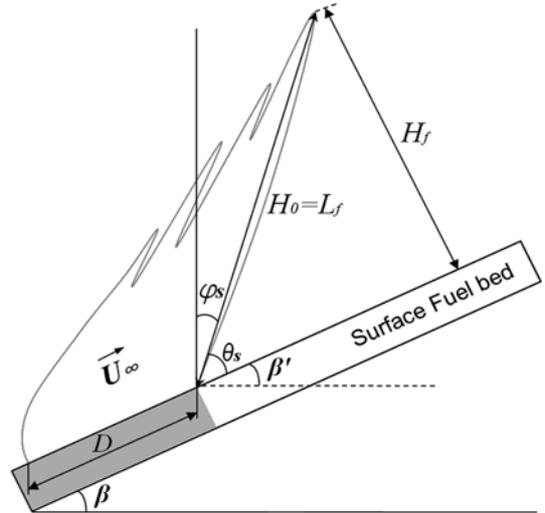


그림 5. 상향 경사면에서의 공기유입속도와 화염각 변화.

바람방향이므로 수평으로 부는 바람인 U_s 를 식 2에 대입하여야 한다. 그리고 경사에 의해 화염각이 기울면 화염높이(H_f) 또한 변화되기 때문에 화염높이(H_f)에 대한 Froude number 식에서 $H_f=L_f \cdot \cos \phi_s$ 이므로 식 4와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \phi_s \sin \phi_s = 1.85 \frac{U_s^2}{gL_f} \quad (4)$$

여기서, 화염과 경사면의 사이각 $\theta_s = 90 - (\beta + \phi_s)$ 이다.

4. 결 과

경사에 따른 화염각 변화 실험 결과, 그림 6과 같이 경사가 증가할수록 화염각 기울기 또한 증가되는 것으로 나타났다. 특히, 화염각은 경사 약 30° 까지는 비례적으로 증가하다가 그 이상에서는 화염각 약 20° 범위에서 일정해 지는 결과를 보였다. 화염각 변화에 따른 화염과 경사면의 사이각 θ_s 는 경사가 커질수록 비례적으로 줄어드는 경향을 보였다. 여기서 화염각 ϕ_s 에 대한 공기유입에 따른 풍속 U_s 는 그림 7과 같다. 경사도에 의해 외부 공기 유입효과를 가지는 것을 알 수 있다. 이 결과, 경사에 따라 화염으로 인한 공기유속이 발생되고 경사 40° 의 경우에는 평지에서의 풍속 0.3 m/s 와 같은 효과가 발생하는 것으로 나타났다.

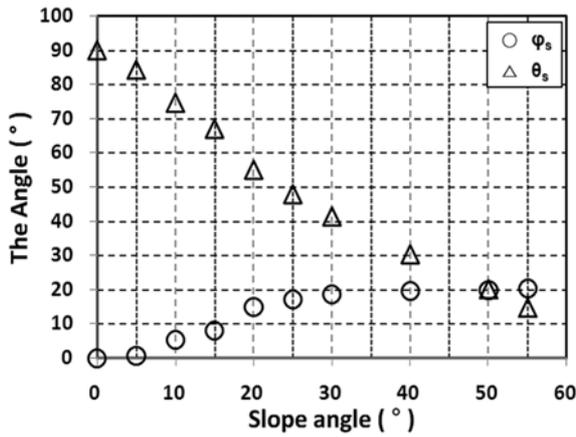


그림 6. 경사도 변화에 따른 화염각(ϕ_s)과 화염과 경사면 사이 각 (θ_s) 변화.

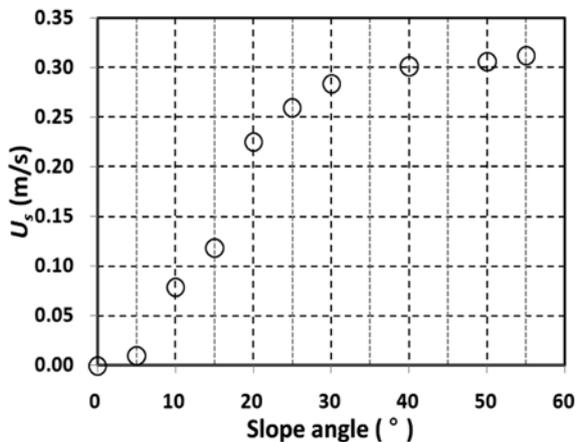


그림 7. 경사에 따른 화염각 변화에 대해 식 4로부터 유추한 수평 공기 유속 U_s .

5. 논 의

5.1 경사각 변화에 따른 화염각 변화

실험을 통해 경사에 따른 화염각 변화가 풍속에 비해 크게 나타나지는 않지만 실제 실험 그림 8과 같이 화염의 기울기가 경사효과에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 화염의 확산속도에서도 경사에 의한 화염기울기 변화를 고려하여 화염과 경사면의 사이 각 산정식 $\theta_s = 90 - \beta$ 가 아닌 $\theta_s = 90 - (\beta + \phi_s)$ 를 적용하는 것이 좀 더 정확성이 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그림 9는 경사변화에 따른 $\cos\beta$ 와 풍속에 대한 U_s/U_∞ 비의 무차원 계수와의 관계 그래프이다. 이 그래프에서는 경사변화에 따라 무차원 풍속 비가 같음을 알 수 있다. 따라서 실험에 따른 화염각과 식 4로부터 유추된 U_s 를 통해 경사에 대한 화염각 산정식을 식 5와 같이 제시할 수 있다.

여기서 경사에 따른 공기유입 속도는 그림 10에서 보이는 바와 같이 경사가 증가함에 따라 경사면의 유입 공기 유속 (U_∞)이 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이때 선형회귀분석을 통한 추계식은 식 5와 같고 이때 결정계수는 0.98이다. 경사도에 따른 유입 유속에 대한 추계식 5의 추정값과 실험 측정값과의 통계분석 결과, 평균 오차값은 2.5 cm/s로



그림 8. 실험을 통한 무풍조건에서의 경사에 따른 화염각 변화 장면.

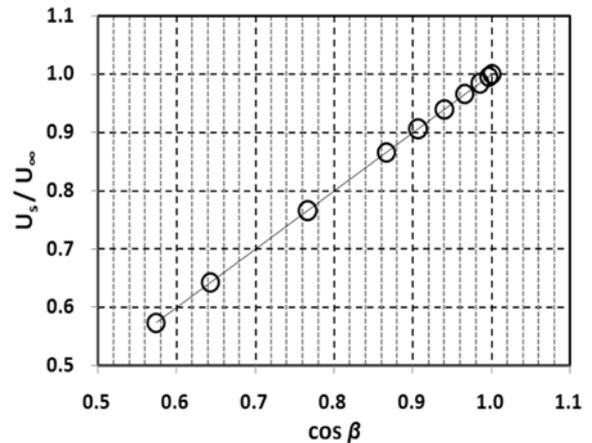


그림 9. 경사에 따른 무차원 비 U_s/U_∞ 와 $\cos\beta$ 와의 관계 그래프.

98%의 신뢰수준을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 경사에 대한 공기유입유속을 고려한 화염각 변화 관계식은 식 5로부터 식 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_\infty = 0.01\beta \quad (5)$$

$$\phi_s = \tan^{-1} \left(1.85 \frac{U_\infty \cos \beta}{\sqrt{gH_0}} \right) = \tan^{-1} \left(1.85 \frac{0.01\beta \times \cos \beta}{\sqrt{gH_0}} \right) \quad (6)$$

경사에 따른 화염각 변화는 그림 11과 같이 실험값과 제시된 식 6의 계산값을 표시하였다. 실측치와 계산 값과의 평균 오차는 약 2.3°이며 표준편차는 1.7로 나타났다. 오차평균에 대한 값들의 일표본 t-검정 결과, 95%유의수준을 가지는 것으로 분석되었다.

5.2 경사각 변화에 따른 화염확산속도

경사변화에 따른 화염확산속도는 그림 12와 같이 화염각을 반영하였을 경우와 화염각 반영하지 않은 경우의 화염확산속도 차이를 보여주고 있다.

경사 20°이내 경사지에서는 화염확산속도에 큰 차이를 나

6. 결 론

경사에 따른 화염각 변화에 대한 실험과 Froude number에 기초로 한 준수치해석 결과 다음과 같이 결론을 얻었다.

- 1) 경사에 따라 화염각이 변화됨을 알 수 있고 확산속도에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 경사지에서의 화염확산 속도 예측 시 화염기울기에 대한 고려가 필요하다.
- 2) 실험과 Froude number를 이용하여 경사에 대한 화염각 변화 관계식을 식 4와 같이 제시하였다. 제시된 식에 대한 실험 화염각의 평균 오차 각은 약 2.3°로 t-검정 결과, 95% 유의수준범위에 속하여 실측치 예측 관계식으로 적합한 것으로 평가된다.
- 3) 경사에 따른 화염확산속도는 화염각 변화를 예측하지 않은 경우, 25° 이상의 경사지에서부터는 약 2배의 확산 속도 차이를 나타냄으로 경사에 의한 화염각 변화 예측에 대한 수식 6을 적용하여야 한다.

따라서 본 연구에서 수행된 경사에 따른 화염각 산정식을 적용하여 향후, 열전달 수치해석을 통한 화염확산연구에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 산림청 (2009) 2008년 산불통계연보
 산림청_국립산림과학원 (2004) 한국의 산림입지-산림토양-안상현, 신영철 (2008) 경사에 따른 산불의 확산속도. 한국방재학회 논문집, 한국방재학회, 제8권, 제4호, pp. 75-79.
 김동현, Tanaka Takeyoshi, 이명보, 김광일 (2009) 낙엽층 화염 높이 산정에 관한 연구. 2009년도 춘계학술논문발표회 논문집. 한국화재소방학회. pp. 365-371.
 Kim, D.H., TANAKA, T. and Lee, M.-B. (2009) A numerical study of flame tilt by slope and wind added. International Wild-fire Management Conference. P005.
 Albini, F.A. (1981) A model for the wind-blown flame from a line fire. Combust. Flame, 43, pp. 155-174.
 Albini F.A. (1985) A model for fire spread in wildland fuels by radiation. Combustion Sci. Technology. 42, pp. 229-58.
 McCaffrey, B. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd ed. (1995) Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, Quincy, MA.
 David R. Weise and Gregory S. Biging. (1996) *Effects of wind velocity and slope on flame properties*. Can. J. For. Res. 26. pp. 1849-1858.
 Dupuy, J.L. (1995) *Slope and fuel load effects on fire behavior: laboratory experiments in pine needles fuel beds*. Int J. Wildland Fire;5(3) pp. 153-64.
 Zukoski, E.E., Cetegen, B.M. and Kubota, T. (1984) *Visible structure of buoyant diffusion flames*, Twentieth Symposium (International) on Combustion. Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1984, pp. 361-366.
 Morandini, F., Santono, P.A. and Balbi, J.H. (2001) *The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope*. Fire Safety Journal 36. pp. 519-543.
 Nelson, R.M. Jr. and Adkins, C.A. *Flame characteristics of wind-driven surface fires*. Can. J. For. Res. 16, 1293-1300 (1986).
 Rothermel, R.C. and Anderson, H.E. (1966) *Fire spread character-*

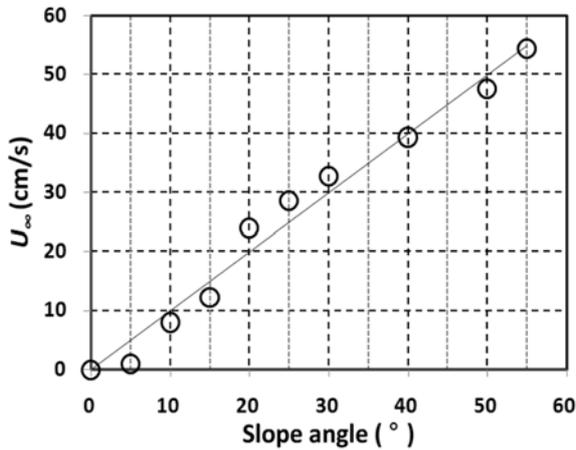


그림 10. 경사에 따른 화염각 변화에 대해 식 3으로부터 유추한 경사면의 유입 공기 유속 U_{∞} .

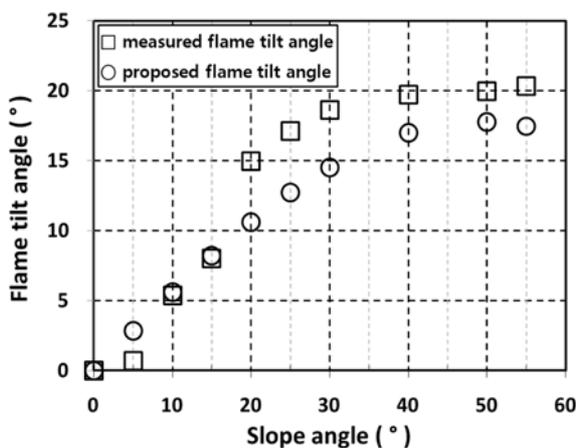


그림 11. 경사에 따른 화염각 변화 실험 측정치와 계산 값과의 비교.

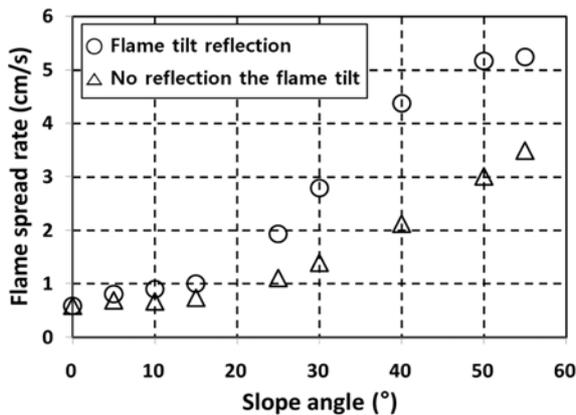


그림 12. 경사에 따른 화염각 변화와 화염확산속도와의 관계.

타내지 않았으나 25°이상 급경사지에서부터는 화염각을 반영한 확산속도가 그렇지 않은 경우보다 약 2배 빠른 확산 속도를 보였다. 만일 경사조건에서 화염각 변화를 고려하지 않고 화염확산속도를 예측한다면 약 2배 가까운 확산속도 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 경사조건에서의 화염전파속도 예측을 위해서는 경사에 따른 화염각 변화를 고려하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

- istics determined in the raboratory.* USDA For. Serv. Inter-
mountain Forest Rnge Exp. Res. Pap. INT-30.
- Nelson, R.M. and Jr. (1980) *Flame characteristics for fires in south-
ern fuels.* USDA Forest Service. Southeast. For. Exp. Stn. Res.
Pap. SE-205.
- Putnam AA. (1965) *A model study win-blown free burning fires.*
Proceedings of the 14th Symposium (Int) Combustion. pp.
1039-1107.
- Santoni, P.A. Balbi, J.H. (1998) *Modelling of two-dimensional flame
spread across a sloping fuel bed.* Fire Safety Journal 31. pp.
201-225.
- Wendy Anderson, Elsa Pastor, Bret Butler, Edward Catchpole, Jean-
Luc Dupuy, Paulo Fernandes, Mercedes Guijarro, Jose-Miguel
Mendes-Lopes, Joao Ventura. (2006) *Evaluating models to esti-
mate flame characteristics for free-burning fires using labora-
tory and field data.* Forest Ecology and Management. 234S,
S77.

◎ 논문접수일 : 09년 08월 19일
◎ 심사의뢰일 : 09년 08월 20일
◎ 심사완료일 : 09년 09월 03일