

복사열전달 수치해석을 통한 지표화 방화선 구축 폭 산정

김동현¹⁾ · 이명보^{*} · 田中哮義^{**}

국립산림과학원^{*}, 京都大學^{**}

Estimation of Surface Firebreak through Mathematical Method for Radiative Heat Transfer

Donghyun KIM^{*} · MyungBo LEE^{*} · Takeyoshi TANAKA^{**}

Korea Forest Research Institute^{*}, Kyoto University^{**}

요 약

방화선 구축 작업은 산불확산이 진행되고 있는 화선으로부터 확산진행방향의 연소물질을 제거하여 화염이 확산되지 않도록 하는 대표적인 간접진화 방법이다. 하지만 방화선 구축 폭에 대한 기준은 산불진화 경험을 통해 약 0.5~1.5m폭으로 작업하는 것으로 알려져 있고 열전달 수치해석 및 실험 등을 통해 아직 구명된 바 없다. 이에 본 연구에서는 소나무 낙엽층을 대상으로 풍속 0~5m/s, 경사 0~50°의 조건에 대해 복사열전달 수치해석을 이용하여 방화선 구축 폭을 산정하였다. 그 결과, 복사열유속에 의한 낙엽의 발화가 발생하지 않는 거리는 각 조건별 평균화염높이에 대해서는 0.35~0.65m, 최대화염높이에 대해서는 0.75~1.05m로 산정되었다. 따라서 안전율을 고려한 적정 방화선 구축 폭은 최대화염높이를 적용한 1.05m가 적합할 것으로 판단되며 향후, 실험 및 현장사례조사를 통한 적정 방화선 구축 폭에 대한 비교분석 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

1. 서 론

방화선 구축은 산불로부터 화염확산을 방지하고 산림인접 주요 시설물뿐만 아니라 진화대원 및 안전지대로서의 기능을 확보하기 위한 중요한 작업이다. 또한 방화선 구축은 산불진화대원이 진화 가능한 지표화 화선을 소화(燒火)하는 직접진화 방법인 동시에 지표 연료를 제거하여 화염전이가 되지 않도록 하는 간접진화 방법의 하나이다. 간접진화 방법에서 지상진화대의 방화선 구축 작업시 어느 정도의 폭으로 방화선을 구축하느냐에 따라 효과적인 지표화 산불확산 방지효과를 얻을 수 있다. 방화선 구축 폭 산정을 위해서는 화염 길이, 연료의 연소특성 등을 고려하여야한다. 하지만 산불현장에서 단위면적당 연료하중과 경사, 풍속에 따라 변화되는 산불환경을 모두 고려하여 적용하는 것은 한계가 있다.

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

이에 우리나라의 경우, 산불현장 진화경험을 토대로 약 0.5~1.5m의 폭으로 방화선을 구축하도록 매뉴얼이 작성되어 있으며 미국의 방화선 구축 매뉴얼에서는 화염 높이의 4배에 해당하는 방화선 폭을 구축하도록 작성되어 있다. 국내·외적으로 방화선 구축 폭 산정에 있어 복사열전달 수치해석을 이용한 연구는 아직 이루어진 바 없다. 따라서 본 연구에서는 먼저 선행 연구로서 소나무림 낙엽층 연료를 대상으로 화염의 복사열전달에 의한 수치해석을 통한 방화선 구축 폭 산정 방법을 제시하고 각 조건별 방화선 구축 폭을 산정하였다. 본 연구에서는 강풍에 의한 비화물질 이동으로 인한 화염확산은 고려하지 않았다.

2. 연구방법

방화선 구축 폭 산정을 위해 소나무 낙엽층을 대상 연료로 하여 풍속 조건을 0~5m/s 범위에서 1m/s 간격으로 적용하였고 경사 조건은 0~50° 범위에서 10° 간격으로 적용하여 수치해석을 실시하였다.

2.1 복사열전달 모델 ; 점열원 모델 (Point Source Model)

지표화 화염으로부터의 복사열전달은 그림 1에서 보여주는 바와 같이 개별 화염으로부터 미연소 구간이 받는 총 복사열전달속률 산출을 통해 설명할 수 있다. 여기서 화염높이 (L_f)는 식 4로부터 구할 수 있으며 화염 중심점의 3차원 위치값은 x_f, y_f, z_f 이다. 화염으로부터 나오는 단위면적당 열에너지 산출 모델은 식 1의 점열원 모델을 이용하였다. 점열원 모델은 분출화염으로부터 거리 r 만큼 떨어진 목표물에 전달되는 단위면적 및 단위시간당 복사열전달속을 산정할 수 있다. 미연소 연료의 총 열전달속률이 착화에너지에 도달하게 되면 화염연소가 시작되어 화염확산이 이루어진다.

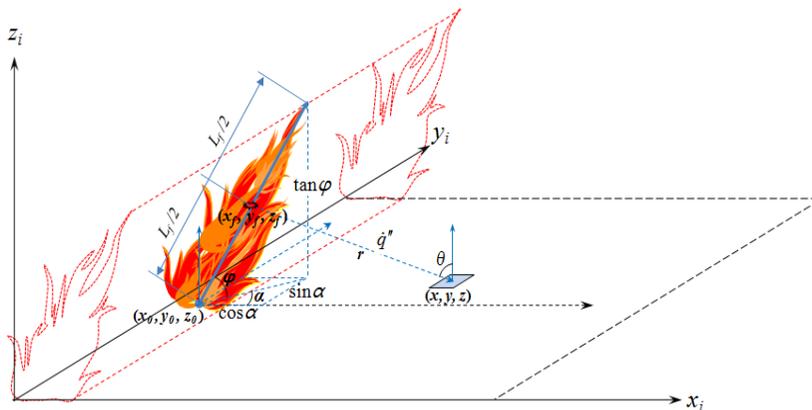


그림 1. 지표화 화염의 2차원 열전달 개념도

$$\dot{q}'' = \frac{\dot{Q}_r}{4\pi r^2} \cos\theta \quad 1)$$

여기서, \dot{Q}_r 은 복사분율 χ_r 에 총 열방출률을 곱한 수치에 해당하는 복사 출력이다. r 은 화염으로부터의 이격거리(radius of flame depth, m), θ 는 화염중심부와 z_f 벡터와의 사이 각으로 식 2와 같이 나타낼 수 있다. 화염으로부터 복사열전달 계산을 위해 필요한 화염 중심점의 위치좌표는 경사 및 바람에 의해 x_f , y_f , z_f 좌표가 이동되며 이는 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos\theta = \frac{z_f - z}{r} \quad 2)$$

$$\vec{P}_f = \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + \frac{1}{2}L_f \cos\phi \cos\alpha \\ y_0 + \frac{1}{2}L_f \cos\phi \sin\alpha \\ z_0 + \frac{1}{2}L_f \sin\phi \end{pmatrix} \quad 3)$$

2.2 열선속 산정

화염으로부터 방출되는 열선속을 산정하기 위해 식 1에 필요한 소나무 낙엽층의 평균 밀도 20kg/m^3 를 기준으로 한 열방출률(\dot{Q} , kW)은 평균 40kW, 최대 120kW를 각각 적용하였다(김동현, 2009). 식 2의 화염 중심점은 z_f 는 식 4에 의해 산출할 수 있다(김동현, 2009). 식 4에 의한 평균 및 최대 화염높이는 각각 0.71m, 1.46m이다. 화염 풍속 및 경사에 따른 화염의 중심점 위치변화는 식 3에 나타낼 수 있다. 여기서 경사 및 풍속에 따른 화염각 변화는 식 5), 6)에 의해 산출할 수 있다(김동현 2009).

$$H_f = 0.027(\dot{Q})^{2/3} \quad 4)$$

$$\tan\phi_w \sin\phi_w = 1.2 \frac{U_\infty^2}{gL_f} \quad 5)$$

$$\tan\phi_s \sin\phi_s = 1.2 \frac{U_s^2}{gL_f} \quad 6)$$

여기서 ϕ_w 는 풍속에 의한 화염각 기울기($^\circ$), ϕ_s 는 경사에 의한 화염각 기울기($^\circ$), U_∞ 는 풍속 (m/s), U_s 는 경사에 따른 공기유입속도(m/s)로 $0.01 \times \beta$ (경사도), g 는 중력가속도 (9.81m/s^2), L_f 는 화염높이(m)이다.

3. 결 과

소나무 낙엽의 착화에 필요한 복사열 유속은 자연발화(Self-ignition) 조건의 경우에는 7.9kW/m^2 , 불꽃착화(Pilot ignition)의 경우에는 4.9kW/m^2 이다(김동현, 2010). 지표화 화염 확산 특성과 안전율을 고려하여 소나무 낙엽착화 임계 복사열유속은 불꽃착화 열유속인 4.9kW/m^2 를 적용하는 것이 바람직하다. 이에 경사조건($0 \sim 50^\circ$) 및 풍속조건($0 \sim 5\text{m/s}$)에서

의 화염각 (ϕ)에 대한 임계복사열유속인 4.9kW/m^2 영향 거리는 그림 2와 같이 평균 화염 높이에 대해서는 $0.35\sim 0.65\text{m}$, 최대 화염 높이에 대해서는 $0.75\sim 1.05\text{m}$ 로 산정되었다, 따라서, 보다 안전한 화염확산 방지를 위한 방화선 구축 폭은 최대화염높이를 적용한 약 1.05m 로 나타났다. 향후, 화염확산 방지를 위한 임계 방화선 구축 폭에 대한 각 풍속 및 경사 조건별 실험과 함께 현장 사례조사 등의 비교 분석이 필요할 것으로 사료된다.

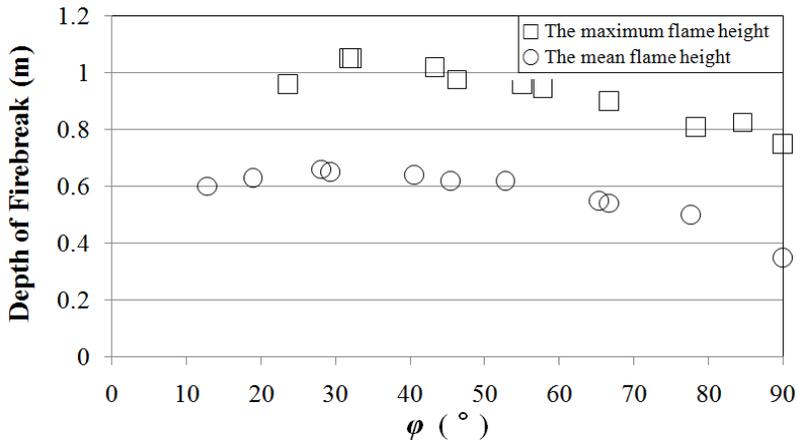


그림 2. 소나무 낙엽층의 방화선 구축 폭 산정 결과

감사의 글

본 연구는 행정안전부 국외훈련프로그램 지원 사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. 산림청 산림인력개발원 (2005). “산불진화대원 진화지침”.
2. 김동현 (2009), “소나무 낙엽층 화염높이 산정식에 관한 연구”, 한국화재소방학회논문집 Vol. 23 No. 6, pp. 1-6.
3. 김동현 (2009), “경사에 따른 화염각 변화와 지표 화염 확산에 관한 연구 - 무풍조건 기반 -”, 한국방재학회논문집 Vol. 9 No. 5, pp. 57-62.
4. 김동현 (2009), “산불 지표화에서의 바람에 의한 화염각 변화 산정식 도출에 관한 준-수치해석 연구”, 한국화재소방학회논문집 Vol. 23 No. 5, pp. 90-95.
5. Donghyun KIM (2010), “A Study for Surface Fire Behavior and Flame Spread Model in Forest Fire”, Doctoral Thesis, Kyoto University.
6. C.L.Tien, K.Y.LEE, A.J.Stretton (2005), “The SFPE handbook of fire protection engineering - Chapter 4. Radiation heat transfer”.