

지표화 산불의 화염전파 수치해석

김동현*, 이명보**, 김광일***

A Numerical Study of Flame Spread of A Surface Forest Fire

Dong-Hyun Kim*, Myung-Bo Lee** and Kwang-Il Kim***

Key Words : Forest Fire(산불), Surface Fire(지표화), Flame Spread(화염확산), Rate of Spread(확산속도), Numerical Analysis(수치해석)

Abstract

The characteristics of the spread of a forest fire are generally related to the attributes of combustibles, geographical features, and meteorological conditions, such as wind conditions. The most common methodology used to create a prediction model for the spread of forest fires, based on the numerical analysis of the development stages of a forest fire, is an analysis of heat energy transmission by the stage of heat transmission. When a forest fire breaks out, the analysis of the transmission velocity of heat energy is quantifiable by the spread velocity of flame movement through a physical and chemical analysis at every stage of the fire development from flame production and heat transmission to its termination. In this study, the formula used for the 1-dimensional surface forest fire behavior prediction model, derived from a numerical analysis of the surface flame spread rate of solid combustibles, is introduced. The formula for the 1-dimensional surface forest fire behavior prediction model is the estimated equation of the flame spread velocity, depending on the condition of wind velocity on the ground. Experimental and theoretical equations on flame duration, flame height, flame temperature, ignition temperature of surface fuels, etc., has been applied to the device of this formula. As a result of a comparison between the ROS(rate of spread) from this formula and ROSs from various equations of other models or experimental values, a trend suggesting an increasing curved line of the exponent function under 3m/s or less wind velocity condition was identified. As a result of a comparison between experimental values and numerically analyzed values for fallen pine tree leaves, the flame spread velocity reveals has a error of less than 20%.

1. 서론

전 세계적으로 기후변화와 산림이용으로 인해 수많은 산림이 소실되고 있다. 특히 산불은 낙뢰 등 자연적인 원인에 의한 것이든 사람의 활동에 있어 불의 이용으로 인해 고의적이든 비고 의적이든 산불은 끊임없이 발생되고 있다. 산불의 발생원인은 크게 낙뢰와 같이 자연적인 원인과 부주의에 의한 인위적인 원인에 의해 발생된다. 특히 산불의 초기발화는 대부분 지표화(地表面火, surface fire)로부터 시작이 되어 수관화(樹冠火, crown fire) 이어져 빠르게 산불이 확산되어 진다. 산불의 확산특성은 지형(경사, 사면의 향, 지세 등), 기상(풍속, 풍향, 상대습도 등), 연료(연료의 형태, 연료습도, 열방출에너지량 등)의 조건들에 영향을 받는다. 이러한 산불에 영향을 미치는 변수들을 고려한 산불확산예측을 적용하기위해 전 세계적으로 연구되고 있는데 미국의 BehavePlus(Andrews et al. 2003), FARSITE(Finney 1998), 캐나다의

Forest Service Fire Behavior Prediction System(Hirsch 1996)과 호주 의 Mk 4 MacArthur Fire Danger Meters(Nobel et al. 1980) 그리고 CSIRO Grassland Fire Spread Meter 등은 풍속, 경사, 습도, 연료 특성들에 의해 산불확산이 예측되지만 화재에 대한 기상과 연료의 상호작용에 대해 조율하는 것을 배제한 야외실험 측정결과(Hirsch 1996, Nobel et al. 1980)와 실내 실험규모의 단순한 화염 확산 실험결과(Rothermel 1972, Albini 1976)를 통해 제시되어 졌다. 특히, 세계적으로 널리 알려져 있는 BehavePlus와 FARSITE 산불확산예측 프로그램은 Rothermel(1972)에 의해 개발된 semi-empirical 기법에 기초로 하여 만들어졌다. 이와 같은 모델 들은 외부환경 조건들에 대해 경험적 실내 실험을 근거로 비물리학적 산불확산예측 쉽고 빠르게 적용할 수 있게 만들어 졌다(Beer 1991). 하지만 이러한 모델들은 내외부의 열유동 및 기체 유동장 변화에 대한 해석이 반영되지 않은 단점을 가지고 있어 앞으로 예측해석 결과의 정확성에 대해 해결해 나가야할 숙제를 가지고 미국, 프랑스, 포르투갈, 그리스 등 국의 산불연구학자들을 중심으로 지속적인 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 산불 발생시 화염의 복사열전달 수치해석을 통한 화염확산속도에 측 알고리즘 개발하였다.

* 국립산림과학원 산불연구과, k3d2h1@forest.go.kr

** 국립산림과학원 산불연구과, mblee@forest.go.kr

*** 인제대학교 보건안전공학과, kikim@inje.ac.kr

2. 이론적 배경

2.1 화염의 높이 및 폭

일반적으로 바람이 불지 않는 조건에서의 액체 또는 고체 가연물질의 수평면 화재에 대한 화염높이 산정은 McCaffrey(1995), Heskestad(1998)에 의해 제시된 무풍시 산림 지표면의 주요 가연물질인 낙엽층의 연소시 화염높이 산정은 Equ. 1을 적용하였다.

$$H_0 = -1.02D + A Q^{2/5} \quad (1)$$

계수 A는 표준 대기조건 하에서 일반적인 값 0.235(m·kW-2/5)을 적용한다. 이는 가연성 물질에 대해 연소반응시 유입되는 공기의 단위질량 당 방출되는 열 Hc/r이 크게 변화하지 않는 사실과 연관되어 적용한 것으로 일반적인 계수 A의 범위는 0.240~0.226(m·kW-2/5)이다. 바람이 부는 조건에서의 화염높이의 산정은 바람에 의한 화염의 기울 적용을 통해 화염의 높이를 산정할 수 있다. 바람의 영향으로 인한 화염의 기울기 산정은 그림 1에 나타난 바와 같이 화염의 중심축과 수평면과의 경사각 ϕ 의 값을 구할 수 있다. 여기서 바람이 불지 않는 조건에서의 화염높이 H0는 바람이 부는 조건상태에서는 화염의 길이 값 L이 된다. 따라서 화염의 길이 L은 식 1의 H0값을 통해 구할 수 있다. 또한 바람조건하에서 발생하는 화염의 경사각 산정을 통해 실제 화염높이를 구할 수 있다. 이것은 풍속과 중력가속도에 관한 Froude수의 적용을 통해 계산되어질 수 있다.

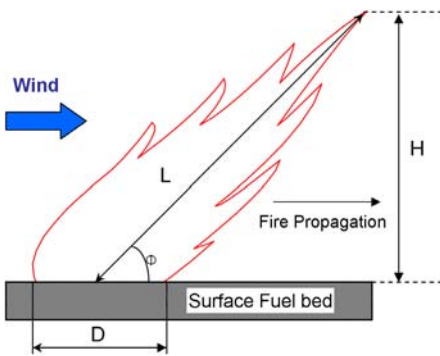


Figure 1. Geometrical Characteristics of the Flame by wind

바람조건하에서 화염높이산정을 다음과 같이 각각 Byram(1959), Thomas(1963), Putnam(1965), Nelson과 Adkins(1986) 식에 대해 적용, 해석하였다.

- (a) Byram: $L=0.0775 \cdot I_0 \cdot 46$
- (b) Nelson and Adkins: $L=0.0475 \cdot I_0 \cdot 493$
- (c) Thomas : $L=0.02661 \cdot I_0 \cdot 67$
- (d) Putnam: $H=H_0(1+4Fr_{Putnam}) \cdot 0.6$

여기에서, $I=360u_0H_0$ 이다.

일반적인 화염의 폭은 가연물질의 연소분해와 함께 생성되는 가연성가스가 급속한 산화반응에 의해 생성되는 화염에 대한 수평상의 길이를 말한다. 따라서 지표 낙엽층 가연물질에 대한 연소시간(Burnout time, sec)의 실험 측정값과 계산식에 의해 산출된 확산속도(V_{spread} , m/s)의 곱에 의해 계산될 수 있다. (식 2)

$$D = V_{spread} \times t_{burnout} \quad (2)$$

또한, 기하학적인 화염의 높이 및 길이 에 대한 경사각 해석을 통해 Fang(1969)이 산출식 $\tan\phi/\cos\phi = 1.54Fr_{Fang}$ 을 제시한 바 있다.

2.2 화염의 열선속

지표화로부터 발생된 화염으로부터 미연소지에 대한 화염전파를 해석하기위해서는 복사 열선속 예측에 대한 계산이 고려되어야 한다. 이는 목표요소에 대한 이 복사열속의 계산이 잠재적 위험과 착화의 가능성을 제공해 주기 때문이다. 실제 산불상황에서는 연료물질의 종류, 배열상태, 가연물의 양, 기상 조건 등에 따라 임의적이고 시간에 따라 변화한다. 따라서 화염의 열속 계산에 대해 형상계수와 방사율 적용을 통해 구해질 수 있다. 형상계수는 일반적으로 평면층, 선대칭 원통 및 원추 등과 같은 간단한 기하학적 형상으로 표현할 수 있다. 화염으로부터 목표지점에 대한 열선속 계산을 식 3, 4, 5와 같이 화염지점 A0에서 A1, A2, A3와의 View Factor 산출식 통해 열선속을 산출하였다.(그림 2) 또한 화염으로부터 일정거리 이상의 열선속은 열전달에 큰 영향을 미치지 않음을 가정하여 바람순방향에서는 화염의 길이에 2배에 해당하는 목표지점까지 반영하였고 전진화염의 반대 방향의 경우에는 화염길이와 같은 거리를 목표지점으로 반영하였다.

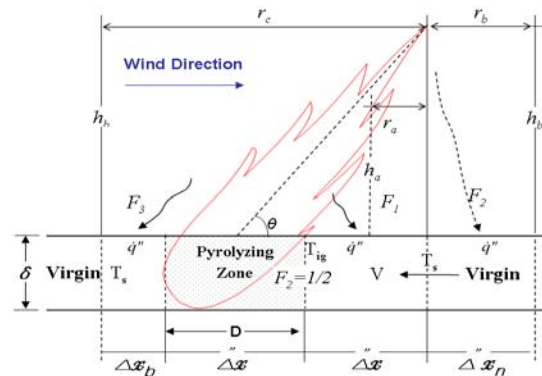


Figure 2. Schematic of Heat Flux of the 1-D flame

$$F_1 = F_s + F_a = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{r_a}{\sqrt{h_a^2 + r_a^2}} \right) \quad (3)$$

$$F_2 = F_s - F_b = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_b}{\sqrt{h_b^2 + r_b^2}} \right) \quad (4)$$

$$F_3 = F_s - F_c = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_c}{\sqrt{h_c^2 + r_c^2}} \right) \quad (5)$$

대상화염이 균일이라고 가정하여 각 목표지점으로 전파되는 과정에 대해 총 열전속은 식 6과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{q}'' = \dot{q}''_r \sum_{n=1}^3 F_n \quad (6)$$

2.3 화염의 이동 속도

일반적인 산불의 화염전파는 바람이나 지형의 기울기에 따른 복사 열전달 및 대류열에 따라 달라진다. 대부분의 산림 연료의 상태는 토양층의 지표 바닥면을 따라 상부에 형성된 다공성 연료층(Porous fuel layer)로 구성되어져 있다. 따라서 산불에 대한 화염전파해석은 고체가연물질에 대한 표면화염전파 해석을 통해 이루어진다. 즉, 전진화염 앞에서 열전달에 의해 초기온도 T_s 인 미연소연료를 발화온도인 T_{ig} 로 가열하는(단위시간 및 단위면적당) 열에너지 구하는 방정식을 통해 화염전파를 해석할 수 있다. 정상상태 조건의 경우, 매체의 온도변화 및 엔탈피의 상관관계식은 식 7과 같이 정의된다.5)

$$\rho V \Delta h = \dot{q}'' \quad (7)$$

여기서, $\Delta h = c(T_{ig} - T_s)$ 이다.

따라서 화염의 이동속도는 착화에 필요한 열에 대한 물질의 연소로부터 생성되는 열유속량과의 관계로 구해낼 수 있다.

화염전파해석에 있어서의 고체연료인 산림연료의 형태는 크게 열적 두께가 얇은 경우와 열적 두께가 두꺼운 경우로 구분되어질 수 있다. 일반적인 지표층의 산림연료는 셀룰로오스로 구성된 낙엽층으로 단위 가연물의 열적 두께가 얇은 다공성 고체연료에 해당된다. 따라서 산불에 있어서 지표층연료의 화염전파속도는 식 8과 같이 표현할 수 있다.

$$V = \frac{\dot{q}''}{\rho c(T_{ig} - T_s)} \quad (8)$$

화염의 열전달에 의한 전파는 화원의 크기, 종류에 따른 높이, 바람의 영향 등에 따라 화염전파속도가 달라질 수 있다. 따라서 화염전파속도의 기본 방정식에서 화염의 높이와 바람에 의해 화염의 변화특성을 전파속도계산에 반영되어져야한다. 여기서는 지표층연료에 대한 화염의 높이 산정과 함께 풍속에 따른 화염 높이 및 길이 변화를 전파속도 반영하였다.

3. 지표화 1차원 화염전파 수치해석 결과 및 고찰

3.1 화염전파 해석

시간경과에 따른 열방출량 해석은 $\dot{Q} = \Delta H \dot{m}''$ 에서 시간에 대한 미분을 통해 식 9와 같이 나타낼 수 있고 시간경과에 따른 온도변화는 식 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 시간에 따른 온도변화는 $\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{q}''}{\rho c \delta}$, $\frac{dT}{dt} = \frac{(T_{t+\Delta t} - T_s)}{\Delta t}$ 의 치환에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \Delta H \dot{m}'' = \Delta H \frac{dm''}{dt} \\ &= \Delta H \frac{d}{dt}(\rho \delta) = \Delta H \rho \frac{d\delta}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

$$T_{t+\Delta t} = T_t + \frac{\dot{q}''}{\rho c \delta} \Delta t \quad (10)$$

화염전파속도 V_{spread} 는 Eq식 8과 1차원 화염전파해석을 위해 화염으로부터 나오는 Heat Flux \dot{q}''_r 에 대한 목표지점의 열전속 View Factor관계식의 적용을 통해 식 11과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{\epsilon \sigma (T_f^4 - T_\infty^4)}{\rho c (T_{ig} - T_\infty)} \times F_n \quad (11)$$

3.2 1차원 화염전파 수치해석 알고리즘

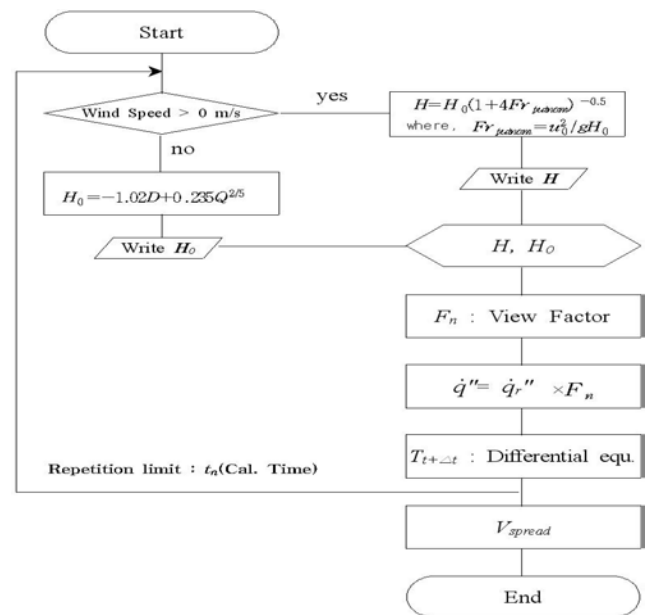


Figure 3. Calculation flow chart for 1-D forest surface fire spread(flame spread) rate numerical analysis

1차원 화염진과속도 산출을 위한 수치해석은 2장에서 논의한 이론적 관계식을 정리하였고 실험에 의한 각 변수값 측정등을 통해 그림 3의 시뮬레이션 순서도에 따라 적용하여 산출한다. 본 연구결과로 개발되어진 알고리즘을 이용하여 1-D 지표화 화염확산 예측 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며 그림 5와 같이 변수값 인자들에 대한 결과값이 나타내어진다.

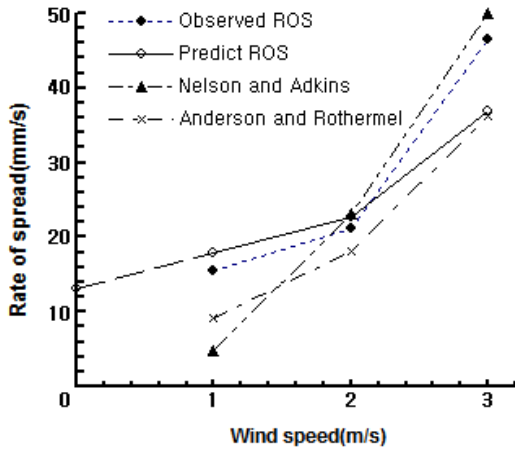


Figure 6. Observed and predicted ROS from this study model and from other laboratory-based models vs. wind speed(*Exp. Condition: Pinus ponderosa needles fuel bed, Mc 10%).

4. 결론

산불의 초기 확산형태는 대부분 지표화로부터 시작되어 수관화, 비화로 확산된다. 산불의 초기 확산속도의 예측은 산불의 초동진화에 있어 매우 중요한 도움을 줄 수 있다. 기존 지표화 등의 산불확산속도 예측은 실험에 기반을 둔 모델을 활용하였다. 본 연구에서는 열전달 해석에 기반을 둔 화염의 진과속도를 산정하는 수치해석 모델식과 알고리즘을 개발하였다. 실험값 및 다른 모델식과의 ROS 비교 결과, 풍속 3m/s이하의 조건에서의 지표화 확산속도의 경우, 지수함수식의 증가곡선을 나타내는 경향을 가지는 것으로 나타났다.

Nomenclature

M_c	Fuel Moisture Content(%)
\dot{Q}	Heat release rate(kW)
H_c	the heat of combustion(J)
\dot{m}''	the mass loss rate per unit area(kg/m ²)
D	flame depth(m)
Δh	the difference in thermal enthalpy per unit mass between the fuel at its ignition and the virgin fuel(J/g)
H_0	no wind flame height(m)
H	wind added flame height(m)
u_0	wind speed(m/s)
g	gravitational acceleration(m/s ²)

F_n	view factor
\dot{q}''	heat flux(kW/m ²)
\dot{q}_r''	radiative heat flux(kW/m ²)
ϵ	emissivity
σ	Stefan-Boltzmann constant
ρ	fuel density(kg/m ³)
c	specific heat(J/kg °C)
δ	fuel layer tick(m)
T_{ig}	ignition temperature(°C)
T_f	flame temperature(°C)
T_∞	virgin material temperature(°C)

참고문헌

- [1] 김동현, 김태구, 김광일, “산림화재 종합위험등급화에 관한 연구”, 화재소방학회논문지, Vol. 15, No. 3(2001).
- [2] 김동현, 이명보, 강영호, 이시영, “지표물질 착화성 실험을 통한 발화위험성 분석”, 2006 한국방재학회 학술발표대회 논문집(2006), 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(2006), pp30-31.
- [4] 박형주, 김웅식, 김장환, 김동현, “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 화재소방학회논문지(2007). Vol. 21. No. 3.
- [5] 이병두, 정주상, 이명보, 김동현, “산불확산예측모델의 개발”, 한국화재소방학회 2006년도 춘계학술논문발표회 논문집(2006), pp231-235.
- [6] Keisuke Himoto, Takayoshi Tanaka, "A Burning Model for Charring Materials and Its Application to the Compartment Fire Development", Fire Science and Technology, Vol. 23, No. 3(2004), pp170-190.
- [7] Albin, F.A.. A Physical model for fire spread in brush. In "11th Symp.(Int.) on Combust." The Combustion Institute, Pittsburgh(1967), pp.553-560.
- [8] Anderson, H. E.. "Heat Transfer and Fire Spread." Res. Pap. INT-69, USDA Forest Service, Ogden(1969).
- [9] M. Nelson and C. W. Adkins, "Flame characteristics of wind-driven surface fires," Canadian J. Forest Res. 16(1986), p.1293.