한국화재소방학회 논문지, 제22권 제3호, 2008년
[논 문]

J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 22, No. 3, 2008

초지화재 발생시 바람의 속도 및 초본의 높이가 화염전파에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Study on the Effects of the Wind Velocity and Height of Grassland on the flame Spread Rate of Forest Fires

배승용 · 김동현* · 유홍선† · 이성혁

Sung-Yong Bae · Dong Hyun Kim* · Hong-Sun Ryou† · Sung Hyuk Lee

중앙대학교 기계공학부, *국립산림과학원 산불연구팀

(2007. 11. 26. 접수/2008. 9. 11. 채택)

요 약

산불은 산림이 울창해짐에 따라 대형화되고 화재에 의한 피해면적이나 그 피해액은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 산불은 바람의 속도, 초지의 습도, 높이, 열량 등 많은 환경변수들의 차이에 따라 화염전파속도가 달라진다. 산불의 화염전파속도에 이러한 환경변수가 주는 영향을 정확히 예측한다면 산불 진화에 많은 도움이 되지만, 아직 정확한 영향에 대한 분석이 구축되어 있지 않다. 본 연구에서는 NIST에서 개발된 산불 화염전파 예측프로그램인 WFDS를 이용하여 다량의 실험 데이터를 보유하고 있는 호주의 초원화재실험조건을 기본 시뮬레이션 조건으로 설정하고, 수치해석결과와 실험결과를 비교하였으며, 이를 기준으로 초본의 높이와 바람속도의 변화에 따른 화염전파속도에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 수치해석 결과 표면연료의 높이와 화염전파속도는 의 관계를 가지고, 바람의 속도에 따른 화염전파속도는 호주의 실험값에 비해 17%가량 하향 예측되었다. 또한 바람의 속도가 7.5 m/s 이상 높아지면, 열분해 된 가연물질이 빠른 바람의 속도에 의한 이동으로 인해 농도가 낮아지므로, 화염전파속도가 늦어진다.

ABSTRACT

With the rapid exuberant growth of the forest, the number and size of forest fires and the costs of wildland fires have increased. The flame spread rate of forest fires is depending on the environmental variables like the wind velocity, moisture of grassland, etc. If we know the effects of the environmental variables on the fire growth, it is useful for wildland fire suppression. But analysis of the spread rate of wildland fire for these effects have not been established. In this study, the effects of wind velocity and height of grassland fuel have been investigated using the WFDS which is developed at NIST for prediction of the spread of wildland fires. The results showed that the relation between the height of the fuel and the spread rate of the head fires is , and the spread rates related to the wind velocity are predicted 17% less than the experimental results of Australia. When the wind velocity is over 7.5 m/s, the concentration of pyrolyzed gas phase fuel is getting low due to fast movement of pyrolyzed gas, the flame spread rate becomes slow.

Keywords : WFDS, Forest Fire, Flame Spread Rate, Wind velocity, Height of grassland

1. 서 론

우리나라는 국토의 70% 이상이 산림으로 이루어져 있으며, 산림이 울창해짐에 따라 산불이 발생하게 되면 대형화되고, 그 피해량 역시 증가하고 있는 추세이다. 이광원[1]에 의하면 1957년부터 1995년까지 총 10,803건의 산불이 발생하였다. 또한 이 기간 연평균 300건에 달하는 산불이 발생하였고, 40여 년간 발생한 산불에 의해 총 146,995 ha의 면적이 소실되었다. 또한 김선영 등[2]에 따르면 1999년부터 2002년까지의 봄철 산불기간(2/1~5/15)동안 총 1,959건의 산불이 발생하였고, 이에 의해 총 10,097 ha의 면적을 소실하였다. 이는 4

†E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

년간 봄철 산불기간 만을 조사한 것임에도 불구하고, 연평균 490건의 산불이 발생해 과거에 비해 산불의 발생이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 매년 산불의 발생 빈도 및 이에 의한 피해가 증가하고 있으며, 이를 줄이기 위해서는 산불에 대한 공학적인 접근을 통해 산불의 물리적 현상을 이해하고 효과적인 대응방안을 모색해야 한다.

산불은 복잡한 물리적, 화학적 작용에 의해 발생하고, 스케일도 다양하다. 또한 대기, 지형, 화재, 고체 연료 등의 조합에 영향을 받고, 이러한 환경변수와의 상호작용에 의해 화재가 전파된다. 따라서 화염전파속도에 영향을 미치는 변수의 영향도를 파악하게 되면, 산불 발생 시 화염이 전파되는 것을 늦춤으로써 효과적인 화재진압이 가능하다. 하지만 국내의 산불에 대한 연구는 산불에 대한 사례조사 및 분석이나, 산불위험을 예측하는 예보시스템의 개발 등에 대한 연구로 국한되어 있고,[3-4] 화재의 크기 및 화염전파속도 등과 같은 화재의 본질적인 특성 대한 연구는 전무한 실정이다. 미국의 NIST(National Institute of Standard and Technology)에서 개발된 WFDS(Wild land-urban interface Fire Dynamics Simulator)는 식물성 연료와 대기조건 그리고 화재의 상호작용에 관심을 둔 물리적 기반의 3차원 모델로써, William Mell 등[5-6]이 그 정확도를 평가하기 위하여 호주의 초지화재실험[7]과 비교하여 높은 정확도를 가짐을 입증하였지만 구체적인 환경요인의 영향에 대한 평가는 아직 구체화되어있지 않다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 환경 요인 중 연료의 높이(height)와 바람의 속도(inlet wind velocity)에 변화를 주며 이러한 환경변수들이 화염전파속도에 어떠한 영향을 주는지에 대해 수치해석을 통하여 분석해 보았다.

2. 수치해석

2.1 수치해석모델

호주의 초지화재실험을 수치해석을 통해 해석하기 위하여 사용된 프로그램은 WFDS로써 부력, 열전달, 연소 그리고 연료의 열적감퇴에 대한 기본 수치해석기법은 미국의 NIST에서 개발된 대표적인 화재 시뮬레이션인 FDS(Fire Dynamics Simulator)의 것과 같다. WFDS에서 적용되는 지배방정식은 다음과 같다.[10]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_l) + \nabla \cdot \rho Y_l u = \nabla \cdot (\rho D)_l \nabla Y_l + W_l''' \tag{2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u\right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h u - \frac{Dp}{Dt} = q''' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_l h_l (\rho D)_l \nabla Y_l \tag{4}$$

또한 WFDS는 다른 모델에 비해 화재/고체연료, 화재/대기조건의 상호작용을 직접적으로 계산함으로써 사실적인 화염전파를 모사할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 기존 건축물의 화재를 계산하는 FDS 모델에 연소 후 char분율, 연료의 밀도, 표면-부피비, 습도, 높이 질량 등의 파라미터를 추가함으로써 식물성연료를 형성하였고, 산불 모사가 가능하게 하였다. 이 모델에서는 아래와 같이 간략화된 식물성 연료(wood)의 화학상태방정식을 사용하여 화재를 표현한다.[6]

$$C_{3.4}H_{6.2}O_{2.5} + 3.7(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3.4CO_2 + 3.1H_2O + 13.9N_2 \tag{5}$$

2.2 수치해석 조건

Figure 1은 본 연구에서 사용된 호주 초지화재 실험의 지형을 나타낸 것으로써, 전체 계산 영역의 크기는 길이 300 m, 폭 300 m, 높이 200 m로 설정하였다. 화재가 전파되는 가연부는 녹초지(Burning grass)로 하였고, 그 크기를 길이 200 m, 폭 200 m, 높이 0.51 m로 설정하여 전체 계산영역의 중앙부에 위치시켜 수치해석을 실시하였다. 또한 녹초지는 타지 않는 구역(Unburning grass)으로 25 m씩 둘러 쌓여있도록 설정하여, 가연부를 넘어서는 화재의 전파가 이루어지지 않도록 하였다. 바람은 Figure 1의 좌측으로부터 계산영역 내부로 들어오도록 설정하였고, 입력되는 바람의 속도는 지면으로부터 2 m 높이에서 측정된 값을 기준으로 설정하였

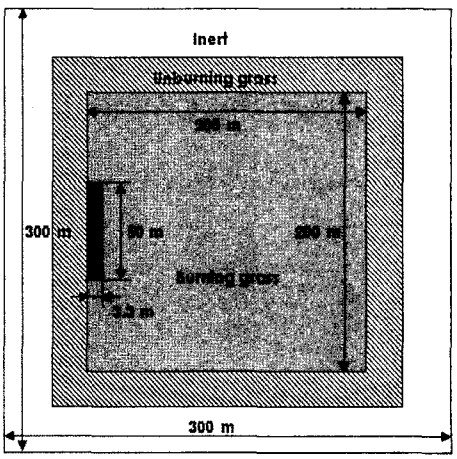

Figure 1. Geometry of WFDS Simulation

Table 1. Cases of Simulation

	ΔH_c (kJ/kg)	Height (m)	Wind velocity (m/s)
Case 1	15,585	0.51	5
Case 2	15,585	0.765	5
Case 3	15,585	1.275	5
Case 4	15,585	0.51	2.5
Case 5	15,585	0.51	7.5
Case 6	15,585	0.51	9
Case 7	15,585	0.51	10

다. 또한 계산영역으로 유입되는 바람의 속도 profile은 사용자 정의 함수로 본 연구에 적용된 식은 난류유동으로써 다음과 같다.[6]

$$u_z = u_2(z/z_2)^{1/7} \quad (6)$$

녹초지의 중앙 앞부분 즉, 바람이 들어오는 방향의 맨 앞부분에 길이 50 m, 폭 3.3 m 의 크기를 갖는 점화원을 두었고, 호주 초지실험 시 두 명의 실험자가 중앙에서 양쪽 끝으로 이동하며 초지에 점화를 한 것을 표현하기 위하여 26초 동안 계산영역의 너비방향의 중심으로부터 양쪽으로 25 m씩 시간에 따라 이동하도록 설정하였다.

Table 1은 위 지형을 이용하여 초본의 물성치에 변화를 주며 계산된 각 case를 나타낸 것으로써 초지실험에 사용된 표면연료의 물성치 중 초본의 높이와 들어오는 바람의 속도가 화염전파속도에 미치는 영향에 대한 수치해석을 실시하였다. 모든 경우에서 사용된 연소열(ΔH_c)은 호주 초지실험을 통해 측정된 값을 사용하였으며, 본 연구에서 사용된 초본의 연소열은 15,585 kJ/kg이다.[6] Case 1은 호주 초지실험 중 바람의 속도가 5 m/s인 경우를 수치해석 한 것으로써, 나머지 case들은 이를 기준으로 하여 입력조건은 변화시켰다. Case 2, 3은 초본의 높이가 주는 영향에 대해 알아보기 위하여 초본의 높이를 각각 0.765 m, 1.275 m로 변화시켰다. 또한 초본의 높이가 변화함에 따라 초본의 면적, 부피, 무게 역시 변화하게 되므로, 본 연구에서는 초본을 직육면체로 가정하여 높이의 변화에 따른 면적, 부피, 무게의 변화를 예측한 뒤, 이를 이용하여 초본의 단위면적당 무게(kg/m^2), 면적/체적비율(m^{-1})을 높이 변화에 따라 바꾸었다. Case 4-7은 바람의 속도가 화염전파에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 외부로부터 들어오는 바람의 속도를 각각 2.5 m/s, 7.5 m/s, 9.0 m/s, 10.0 m/s로 변화를 주었다.

Table 2. Size of grid cell

	Changed value	Number of grid cell (L×5W×H)	Size of grid cell
Test 1	Grid	180×180×72	1.6 m
Test 3	Grid	150×150×72	2.0 m
Test 3	Grid	100×100×72	3.0 m
Test 4	Grid	90×90×72	3.3 m

2.3 Grid Sensitivity Test

본 연구에서 사용된 산불 확산 예측 모델인 WFDS는 LES(Large Eddy Simulation)방식을 사용하여 난류유동장을 해석하기 때문에 단위격자(Grid cell)의 크기가 계산결과에 많은 영향을 미치게 된다. 그러므로 단위격자의 크기를 변화시켜 주며 적절한 격자의 크기를 맞추어 수치해석을 해야 한다. 본 연구에서는 미소격자의 크기를 각각 1.6 m, 2.0 m, 3.0 m, 3.3 m(x, y방향 동일)로 변화시켜 주며 수치해석 한 결과와호주초지실험 결과를 비교하여 적절한 미소격자의 크기를 설정하였다. Table 1은 미소격자 크기에 따른 화염전파속도에 주는 영향을 알아보기 위해 계산된 각 Test를 나타내고 있다.

Figure 2는 미소 격자의 크기에 따른 화염전파속도를 계산한 결과를 나타내고 있는 그래프이다. 계산 격자가 커짐에 따라 무시하게 되는 Eddy의 양이 많아지며 화재에 의해 발생되는 총 발열량(Total heat release rate)이 작아지게 되어, 화염전파속도가 느려지게 되는 것을 알 수 있다. 또한 수치해석 결과와 호주 실험 결과를 비교해 보았을 때 미소격자의 크기가 1.1 m일 때 가장 정확한 값을 나타내고 있으나, 이렇게 계산할 경우 Test 1에 비해 격자수가 약 4배 증가하게 되고, 이

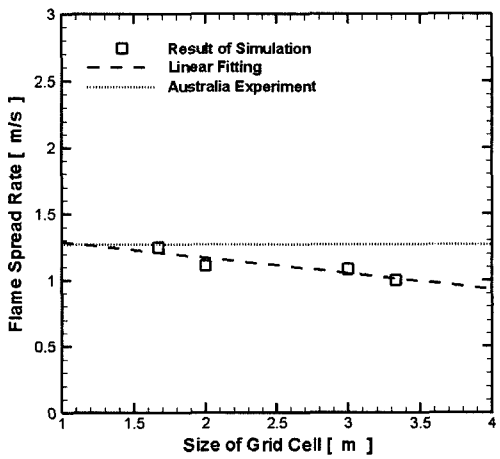

Figure 2. Head fire spread rate of the each tests

로 인하여 계산 시간 등의 문제가 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 계산 시간을 줄일 수 있으면서 비교적 정확한 결과를 보이는 Test 1을 기준으로 수치해석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 산불확산 예측 프로그램인WFDS를 이용하여, 표면 고체연료의 높이 및 바람의 속도가 화염전파속도에 미치는 영향에 대하여 수치 분석하였다. Figure 3은 WFDS를 이용한 수치해석 결과로써, 초지에 발생한 화재에 의하여 화염의 전파되는 형상을 단위체적당 발열량을 통해 나타냈다. 또한 Figure 4는 WFDS 코드를 통해 예측된 초본의 높이에 변화를 주었을 때 화염선두(Head Fire)의 위치를 나타내고 있다. 예측된 결과를 살펴보면 초본의 높이를 0.51 m에서 0.765 m, 1.275 m로 변화시켜줄 경우 화염선두가 초지의 200 m 지점까지 연소가 이루어지는 시간은 각각 175 sec, 120 sec, 75 sec로 나타나고 있고, 초본의 높이가 높아질수록 화염전파가 빠르게 이루어지는 것으로 나타났다. 이는 초본의 높이가 증가함에 따라 단위면적당 중량은 증가하고, 면적-체적비율은 감소하게 되는데, 수치해석을 통해 계산되는 화염에 의해 발생되는 발열량은 연료의 두 물성치에 비례하여 변화하게 된다. 여기서 단위면적당 중량의 변화량에 비해 면적-체적비율의 변화량이 매우 작아 화염 내 총 발열량이 증가하게 되고, 이로 인하여 화염전파속도가 증가하게 되는 것이다.

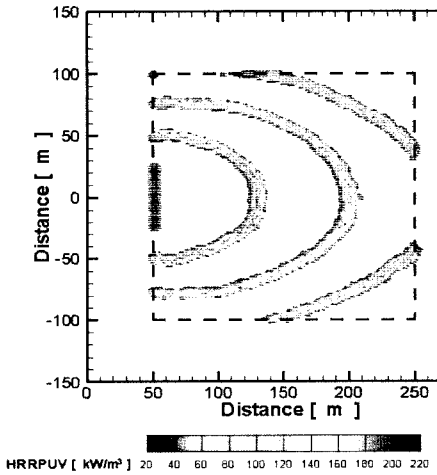

Figure 3. Contour of heat release rate per unit volume for reference case.

또한 화염선두가 전파된 거리는 시간에 따라 일정한 증가율을 갖고 증가하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 최초 발화지점으로부터 초지의 200 m 지점까지 도달하는 동안의 평균 화염전파속도를 구할 수 있다. Figure 5는 WFDS 코드를 이용하여 계산된 결과를 통해 화염전파속도가 증가하게 되는 것이다. 또한 화염선두가 전파된 거리는 시간에 따라 일정한 증가율을 갖고 증가하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 최초 발화지점으로부터 초지의 200 m 지점까지 도달하는 동안의 평균 화염전파속도를 도출하여 초본의 높이에 따른 화염전파속도를 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 통한 결과는 초본의 높이가 증가함에 따라 화염전파속도는 그 높이에 비례하여 증가하고, 초본의 높이와 화염전파속도의 관계식은 다음과 같다.

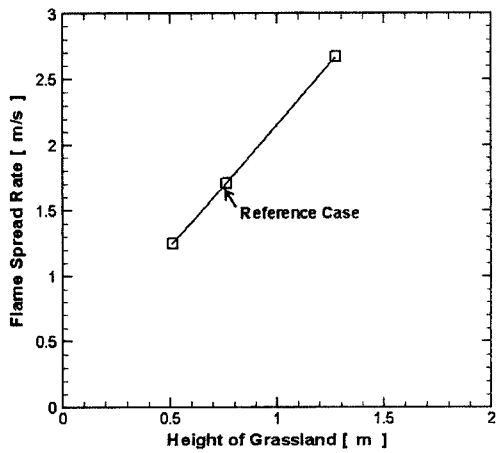

Figure 4. The flame spread rate of the head fire versus the fuel height.

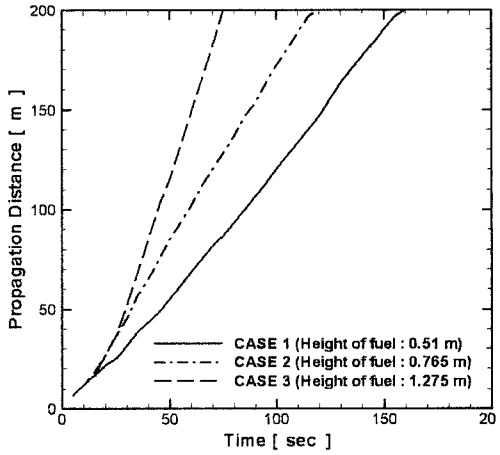

Figure 5. The propagation distance of the head fire versus the fuel height.

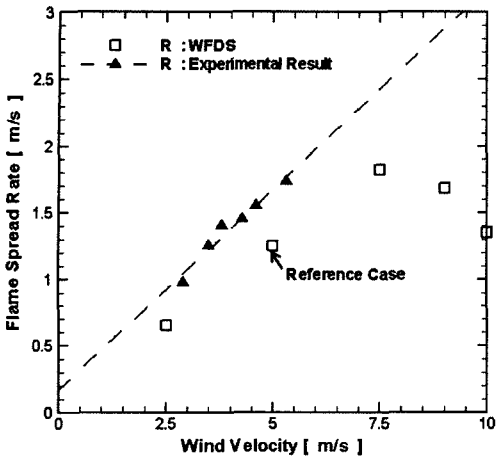

Figure 6. The flame spread rate of head fire versus wind velocity.

$$R_s = 1.85h + 0.3 \quad (7)$$

Figure 6는 바람의 속도에 따른 화염전파속도를 나타낸 것이다. 바람의 속도가 증가함에 따라 바람에 의한 Convective force가 높아지고, 화염이 화염선단(downwind)방향으로 더욱 기울어지게 되어 화염선단(downwind)방향에 있는 연료로의 대류 및 복사를 통한 열전달이 증가하게 된다. 이로 인해 연료 내의수분이 빠르게 증발하고, 연료의 열적감퇴(pyrolysis degradation) 역시 빠르게 진행된다. 바람의 속도가 증가하게 되면 연료의 열적감퇴가 빠르게 이루어지며, 다량의 기체상태의 가연물질을 방출하게 되어 화염전파가 빠르게 이루어지는 것이다. 또한 Figure 5에서 보는 바와 같이 산불확산 예측 프로그램인 WFDS를 통해 바람의 속도가 화염전파에 주는 영향에 대해 해석한 결과는 호주의 초지실험에 의해 도출해 낸 관계식에 비해 약 17% 낮게 나왔다. 호주실험에 의해 도출된 관계식[8]은 다음과 같다.

여기서 R_s는 화염전파속도, U_2는 높이 2 m 지점에서의 바람 속도, M은 초본의 수분함유량을 나타낸다.[6]

$$R_s = (0.165 + 0.534U_2)e^{-0.108M} \quad (8)$$

하지만 바람의 속도가 7.5m/s보다 높아질 경우, 대류 및 복사 열전달을 통해 열분해(pyrolysis) 된 화염의 화염선단(downwind)방향에 있는 기상의 가연물질이 높은 바람의 속도에 의해 바람의 방향으로 이동하게 된다. 이러한 현상으로 인하여 화염의 화염선단(downwind)방향에 존재하는 가연물질의 농도가 낮아지게 되고, 화염전파속도역시 낮아지게 된 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 호주의 초지실험 데이터를 기반으로, 산불확산 예측 프로그램인 WFDS를 이용하여 초본의 높이 및 바람의 속도가 화염전파에 주는 영향에 대해 알아보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초본의 높이가 높아질수록 화염전파속도는 빨라지게 되고, 그 관계식은 다음과 같다.

$$R_s = 1.85h + 0.3$$

(2) 바람의 속도에 따른 화염전파속도는 호주의 초지실험을 통해 도출해낸 관계식에 비해 약 17% 정도 낮게 예측되었다.

(3) 바람의 속도가 7.5 m/s 이상 높아지게 되면 빠른 바람의 속도에 의해 가연물질이 이동하게 되어 그 농도가 낮아져 화염전파속도가 늦어지게 된다.

감사의 글

본 논문은 국립산림과학원 연구과제 수행과 2008년도 중앙대학교 우수 연구자 연구비에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. 이광원, "산불 발생 실태와 영향인자 분석", 농촌경제, Vol.20, No.1, pp.53-70(1997)
2. 김선영, 이병두, 이시영, 정주상, "산불통계자료를 이용한 산불 위험지수 고찰", 한국농림기상학회지, Vol. 7, No.4, pp.235-239(2005)
3. 안상현, 원명수, 강영호, 이명보, "수치산림입지도를 이용한 산불발생위험지역구분", 한국화재소방학회논문지, Vol,19, No.3, pp.64-69(2005)
4. 조명희, 이명보, 조윤원, 김동현, 신동호, "CDMA 데이터망을 이용한 Mobile GIS 시스템 개발-산불발생시 지상 진화대원 업무를 사례로", 한국화재소방학회논문지, Vol.21, No.1, pp.60-68(2007)
5. William Mell, Joseph J. Charney, Mary Ann Jenkins, Phil Cheney, Jim Gould, "Numerical simulations of grassland fire behavior from the LANL-FIRETEC and NIST-WFDS models", EastFIRE Conference(2005)
6. William Mell, Mary Ann Jenkins, Jim Gould, Phil Cheney, "A physics-based approach to modeling grassland fires", International Journal of Wildland Fire, Vol.16, No.1, pp.1-22(2007)
7. N.P. Cheney and J.S. Gould, "Fire growth in grassland fuels", International Journal of Wildland

Fire, Vol. 5, No.4, pp.237-247(1995)
8. N.P. Cheney, J.S. Gould, W.R. Catchpole, "Prediction of Fire Spread in Grasslands", International Journal of Wildland Fire, Vol.8, No.1, pp.1-13(1998)
9. 김동현, 김태구, 김광일, "산림화재 종합위험등급화에 관한 연구", 화재소방학회논문지, Vol.15, No.3(2001)
10. K.McGrattan, G. Forney, "Fire Dynamics Simulator (Ver. 4) Technical Reference Guide", National Institute of Standards and Technology(2004)