

## 산불 전파의 수치 시뮬레이션

이 명 성, 원 찬 식\*, 허 남 건\*

서강대학교 대학원, \*서강대학교 기계공학과

### Numerical Simulation of a Forest Fire Spread

Myungsung Lee, Chan-Shik Won\*, Nahmkeon Hur\*\*

Graduate school, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

(Received August 28, 2006; revision received December 28, 2007)

**ABSTRACT:** In the present study, a forest fire spread was simulated with a three-dimensional, fully-transient, physics-based, computer simulation program. Physics-based fire simulation is based on the governing equations of fluid dynamics, combustion and heat transfer. The focus of the present study is to perform parametric study to simulate fire spread through flat and inclined wildland with vegetative fuels like trees or grass. The fire simulation was performed in the range of the wind speeds and degrees of inclination. From the results, the effect of the various parameters of the forest fire on the fire spread behavior was analyzed for the future use of the simulation in the prediction of fire behavior in the complex terrain.

**Key words:** Forest fire(산불), Fire spread(화재전파), WFDS(Wildland-urban interface fire dynamics simulator), CFD(Computational fluid dynamics, 전산유체역학), LES(Large eddy simulation, 대와동모사)

### 1. 서 론

최근 산림이 울창해짐에 따라 산불이 발생하면 화재의 규모가 대형화되고 피해액도 이전보다 증가되면서 산불에 대한 주의가 더욱 요구되고 있다. 2005년 4월 양양읍 화일리 야산에서 발생한 산불은 Fig. 1과 같이 천년 사찰인 낙산사의 일부 건물들과 문화재들을 전소시키는 등 심각한 피해를 입혔다. 위와 같은 산불에 의한 피해를 최소화하기 위해 산불 전파를 해석하는 프로그램의 적절한 활용이 필요한 실정이다. 산불 화재를 해석하는 프로그램은 모델링 방법에 따라 통계

데이터가 적용된 실험식을 이용하는 방법과 물리 법칙에 근거한 수치 시뮬레이션을 통한 방법으로



Fig. 1. Forest fire(Naksan temple, Gangwon, April 6, 2005, webpage, <http://yonhap-news.co.kr>).

† Corresponding author

Tel.: +82-2-705-8637; fax: +82-2-712-0799

E-mail address: nhur@sogang.ac.kr

구분된다. BehavePlus<sup>(1)</sup>, FARSITE<sup>(2)</sup> 등과 같은 경험적 화재해석 프로그램은 실험 결과로부터 얻어진 통계 자료를 시뮬레이션에 적용하여 화재 전파를 풍속, 지면의 경사도, 습도, 연료 특성의 함수로 표현한다. 위와 같이 실험식을 사용하는 화재전파 모델은 예측에 소요되는 시간이 짧은 장점이 있는 반면 물리적으로 타당하지 못한 결과를 낼 수 있는 단점도 있다. 예를 들어 FARSITE에서 화재의 크기와 전파 속도는 연료, 풍속, 경사도가 독립적으로 고려된 함수로 표현된다. 하지만 실제 산불 화재는 위의 같은 변수들이 서로 영향을 주고받는 복합적인 작용이므로 경험적인 화재 모델링은 그러한 점에서 한계를 가지고 있다.

근래 컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)과 같은 수치해석 분야가 발전함에 따라 나무 및 목초와 같은 산불 화재의 연료와 풍향, 풍속과 같은 대기조건 그리고 경사진 지형을 복합적으로 고려하여 해석 격자를 구성하고 유체역학, 연소, 열전달의 물리 법칙에 기반한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 산불을 해석하는 방법이 발전하면서 경험적인 화재 모델링 방법의 한계를 극복하고 있다. 그러한 모델의 대표적인 예로 WFDS<sup>(3)</sup> 등을 들 수 있다. Mell<sup>(4)</sup> 등은 WFDS를 이용하여 산불 화재 해석을 수행하였으나 이는 평탄한 지면에만 적용되었다. 이에 본 연구에서는 물리적 기반의 화재 해석 프로그램인 WFDS를 이용하여 다양한 풍속 조건에서 목초지 혹은 나무들과 같은 식물성 연료와 그동안 많이 고려되지 않았던 지면의 경사도를 고려한 화재 시뮬레이션을 수행함으로써 산불 전파 시뮬레이션의 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 화재해석 프로그램

본 연구에서 사용된 산불 전파 시뮬레이션 프로그램인 WFDS는 Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator의 약자로 건물 내부에서 발생하는 화재를 시뮬레이션하기 위해 미국 표준 연구소(NIST)에서 제작한 FDS(Fire Dynamics Simulator)<sup>(5)</sup>의 확장 프로그램이다. WFDS는 유체의 움직임과 연소 그리고 열전달 방정식을 풀기 위해 전산유체역학을 사용한다. 또한 LES(Large Eddy

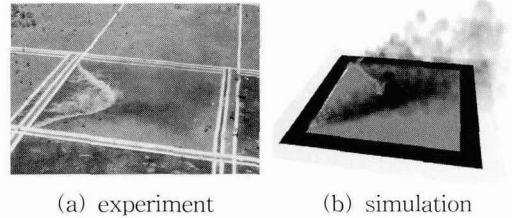


Fig. 2 Grassland fire simulation.

(<http://www2.bfrl.nist.gov/userpages/wmell/public.html>)

Simulation, 대와동모사) 난류 모델이 적용되어 부력에 의한 난류 유동과 가스 상태의 연소 시 발생하는 혼합 작용을 효과적으로 모사할 수 있다. WFDS에서 사용된 연속, 운동량, 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \mathbf{q} + \Phi \quad (3)$$

LES(Large Eddy Simulation) 난류 모델의 동점성 효과에 대한 Smagorinsky<sup>(6)</sup>의 subgrid scale 이론에 따르면 점성력 텐서에 대한 표현은 다음과 같이 기술된다.

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left( 2 \overline{\mathbf{S}}_{ij} \cdot \overline{\mathbf{S}}_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \overline{\mathbf{u}})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr} ; (\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (4)$$

여기서  $C_s$ 는 Smagorinsky 상수이고  $\Delta$ 은 격자 사이즈의 길이이며  $\overline{\mathbf{S}}_{ij}$ 는 변형률 텐서(strain tensor)를 나타낸다. Pr은 프란틀 수, Sc는 슈미트 수이다. 화재를 모사하기 위한 연소 모델은 혼합 분율 모델(Mixture Fraction Model)을 사용하였다.

WFDS 프로그램은 Fig. 2와 같이 목초지에서 수행한 화재 실험과 수치해석 결과로 검증되었다. 실험과 수치해석은 프로그램을 개발한 NIST에서 수행하였으며 결과를 통하여 WFDS 프로그

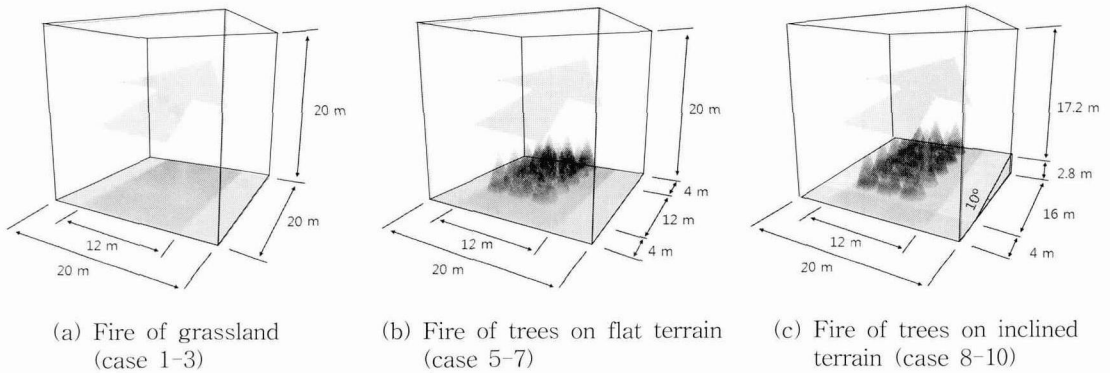


Fig. 3 Computational domain for the various cases.

램이 바람이 부는 목초지에서 실제 실험 결과를 잘 예측함을 알 수 있다. 하지만 WFDS 프로그램은 직육면체 격자를 사용하기 때문에 평지에서의 해석만 가능하며, 지형의 고저차가 심한 산악지형에서의 산불 전파 해석에는 지금까지 사용된 실적이 없다. 따라서 본 논문에서는 평탄한 목초지에서 화재 전파 예측이 가능한 WFDS 프로그램을 사용하여 지형의 고저차가 있는 산악지형에서의 산불 전파 예측의 가능성을 연구하였다.

### 3. 수치해석

풍속, 식물성 연료의 종류, 지면의 경사도가 화재 전파에 미치는 영향을 알기 위하여 Fig. 3과 같은 해석격자를 구성하였다. 해석격자의 크기는

밀면을 구성하는 가로, 세로, 그리고 높이가 모두 20 m인 정육면체이고 각 방향에 100개씩 격자를 구성하여 전체 격자 개수는 100만개이다. Fig. 3과 같이 바람은 화살표 방향으로 해석 격자 내부로 유입되며 바람이 유입되는 한 면만 입구 경계조건이고 나머지 4면은 압력 경계조건으로 구성되었다. Table 1과 같이 풍속을 2m/s~6m/s로 변화시키며 화재 전파를 수치 시뮬레이션 하였다. 모든 해석 케이스에서 화재가 시작되는 곳은 입구 경계면으로부터 폭이 12 m이고 길이가 1 m인 목초지가 시작되는 부분이며 1 m<sup>2</sup>당 200 kW의 열이 발생한다. 해석 케이스에 따라 case 1~3에서는 풍속의 변화에 의한 목초지(grass)의 화재 전파 속도 및 화염 거동 특성을 예측하고, case 4는 경사도가 있는 목초지의 화재 현상을 다루었다. case 5~7은 목초지와 나무가 조합된 화재 연료를 구성하여 지표화에서 수관화(tree crown fire)로 화재가 발달하는 현상을 예측하며, case 8~10은 실제적인 산불 화재 시 지형의 경사도가 화재 전파에 미치는 현상을 예측하기 위해 구성하였다. 수치 해석을 위하여 AMD 옵테론 듀얼코어 2.2GHz 1 CPU 리눅스 컴퓨터가 사용되었으며 계산 조건에 따라서 4~7시간의 계산 시간이 소요되었다.

WFDS에서 나무는 연료 요소(Fuel element)로 모사된다. 나무를 모사하는 구성 요소는 2가지로 분류되는데 첫째는 나무줄기(trunk) 부분이고 두 번째는 가지를 포함하는 나뭇잎 부분이다. 해석 격자에서 나무줄기는 지름이 15 cm이고 높이가 1 m인 원기둥으로 모사되었고, 수관화재시 산불 화재의 주된 연료가 되는 나뭇가지와 나뭇잎 부분은 밑지름이 3 m이고 높이가 5 m인 원뿔로 모사되었다. 위와 같이 수치해석에서 사용된 나무는

Table 1 Cases for numerical analysis

Case	Wind Velocity (m/s)	Fuel element	Ground condition
1	2	grass	flat (0°)
2	4		
3	6		inclined (+15°, -15°)
4	4		
5	2	grass, trees	flat (0°)
6	4		
7	6		
8	2		inclined (10°)
9	4		
10	6		

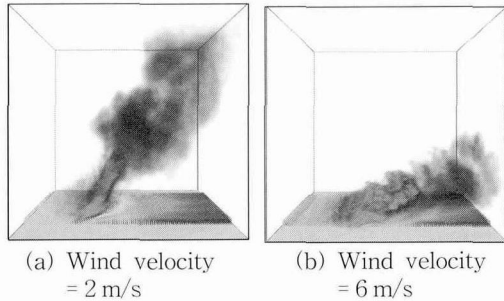


Fig. 4 Snapshot of grassland fire simulation.

총 높이가 6 m이고, 밀도가  $520 \text{ kg/m}^3$ 으로 밀도가 높은 편에 속하며 미국 표준 기술 연구소(NIST)의 실험<sup>(7)</sup>을 통하여 연소 시 발생하는 열량과 점화 온도 등이 수치시뮬레이션의 자료로 입력되었다. 또한 지면 위의 목초는 폭이 12 m이고 길이가 20 m이며 높이는 50 cm인 육면체로 묘사되었다. 목초의 밀도나 수분 함량은 호주의 목초지 화재 실험<sup>(8)</sup>에서 측정된 값이 사용되었다.

4. 결과 및 토의

Fig. 4는 지표면에서 발생하는 목초지 화재 시뮬레이션의 화재 전파와 연기의 유동 형상을 보여주고, Fig. 5는 전파되는 화염 선두의 앞쪽 위치를 1초마다 기록하여 시간에 따른 화재 선두 위치를 나타낸 그래프이다. Fig. 4에서 입구 경계 조건에 의하여 바람이 왼쪽에서 오른쪽으로 불면서 화염의 형상이 오른쪽으로 기울어진 형태로 되는 것이 관찰된다.

Fig. 4(a)와 같이 풍속이 2 m/s일 때 화염의 형상과 연기의 수송 방향은 지면에 수직인 방향에서 바람 방향으로 약간 기울어진 형태이고 Fig.

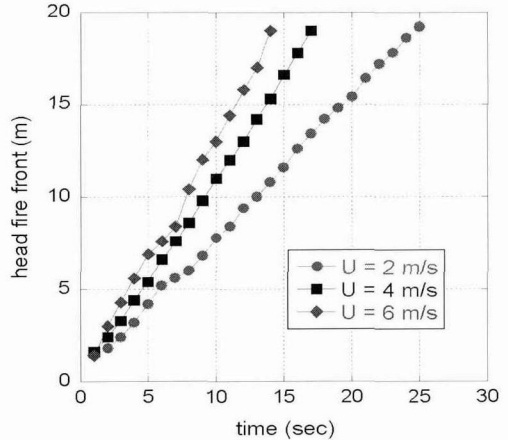


Fig. 5 Comparison of transient fire spread with various wind velocity of grassland fire.

5를 통하여 풍속이 2 m/s인 경우 목초지 20 m를 전파하는 데 약 25초가 소요되는 것을 알 수 있다. 한편 풍속이 6 m/s로 증가하면 Fig. 4(b)와 같이 화염과 지면과 이루는 각이 감소하여 화염면과 지면 사이에 접촉되는 면적이 증가하면서 화재 전파 속도는 더 증가하게 된다. 풍속이 6 m/s인 경우 목초지 20 m를 전파하는데 14초가 소요되어 풍속이 2 m/s일 때보다 화재 전파 속도가 더 증가한 것을 알 수 있다. 또한 두 케이스 모두 화재가 전파되면서 작은 화염 덩어리가 분리되어 나가는 것이 관찰됨에 따라 WFDS에서 잔불이 비화되는 것 역시 묘사되는 것을 알 수 있다. 경험식을 사용하는 화재 모델링 방법은 연료의 특성과 풍속 및 풍향을 변수로 입력하면 화재 전파 범위가 결과 값으로 도출되는 형식인데 반해 본 연구에서 수행된 WFDS를 사용한 물리적

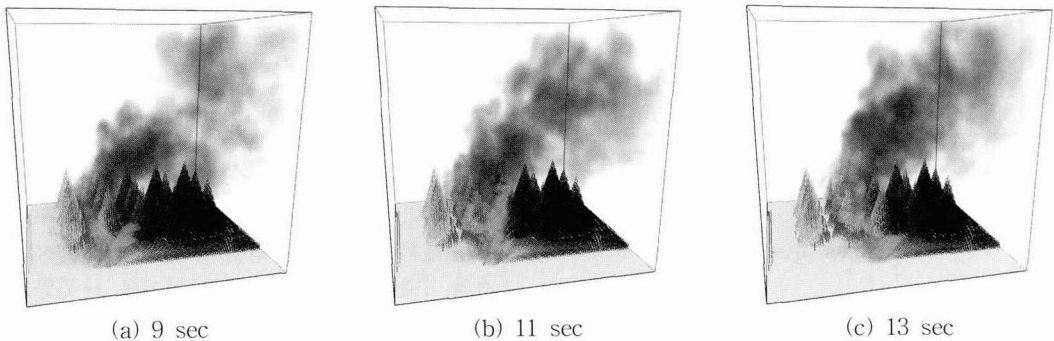


Fig. 6 Transient fire spread on the flat terrain with trees.

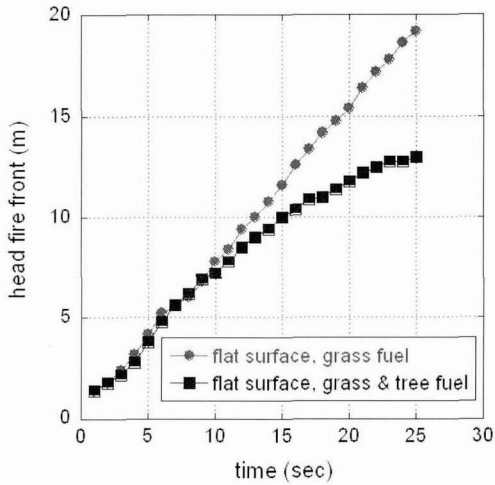


Fig. 7 Comparison of transient fire spread with two different type of vegetative fuel.

기반의 화재 시뮬레이션은 위와 같은 변수들을 직접 도메인에 적용하고 해석 격자를 구성하면 단순한 최종 화재 전파 범위뿐만 아니라 시간에 따른 실제적인 화재의 과정을 보여줄 수 있다.

나무 연료가 화재의 전파에 미치는 영향을 알기 위해 Fig. 6과 같이 목초지 위에 3m 간격으로 15그루의 나무를 위치하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 산불 화재 시 지표면에서 전파되는 화염은 나무에 옮겨 붙어 수관화재로 발달하여 화재가 더욱 커지게 된다. Fig. 6은 풍속이 2 m/s일 때 나무가 있는 지형에서 화재가 시간에 따라 전파되는 것을 나타낸 그림으로 점화 후 9 초일 때 지표면에서 전파되는 화재는 나무에 옮겨 불기 시작하고 13초 후에 지표면에서 전파되

는 화재가 나무를 지나갔지만 나무에 옮겨 붙은 불은 여전히 나무를 태우고 있는 것을 알 수 있다. 이에 따라 지표면에서 화재가 발생하는 목초지 화재의 경우보다 나무가 있는 경우의 화염 기둥이 더 높게 형성되며 그에 따라 비화되는 잔불이 더 멀리 수송될 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 7은 목초지 화재인 case 1과 나무가 있는 화재인 case 5의 화재 선두위치를 비교한 것으로 일정한 기울기로 화재 선두 위치가 증가하는 목초지 화재와는 달리 나무가 있는 화재의 경우 수관화(tree crown fire)가 발생함에 따라 화재 선두의 이동이 천천히 진행되므로 화재 전파 속도가 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에는 경사의 변화가 있는 경우 목초지에서의 화재 전파 양상을 바람의 속도가 4m/s인 경우에 대하여 나타내었다. WFDS의 경우 육면체 계산 격자를 이용하기 때문에 본 연구에서는 경사를 나타내기 위하여 계단 형태의 계산 격자를 구성하였다. 계산 결과를 보면, 그림에서 볼 수 있듯이 일반적으로 잘 알려진 상향사면의 연소 속도가 하향사면보다 빠른 현상을 잘 예측하고 있다.

마지막으로 경사진 지면에서 화재 전파의 특성을 파악하기 위해 10도의 경사면으로 도메인을 구성하고 풍속을 변화시키며 화재 전파 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 풍속이 2m/s와 6m/s일 때 화재 전파를 시간에 따라서 나타낸 것이다. 풍속이 2m/s인 Fig. 9(a), Fig. 9(b)를 보면 화염의 형상이 지면에 거의 수직인 방향을 유지하면서 경사면을 따라 화재가 전파되는 반면 풍속이 증가한 6m/s일 때는 강한 바람의 영향으로 Fig. 10(a), Fig. 10(b)와 같이 화염과

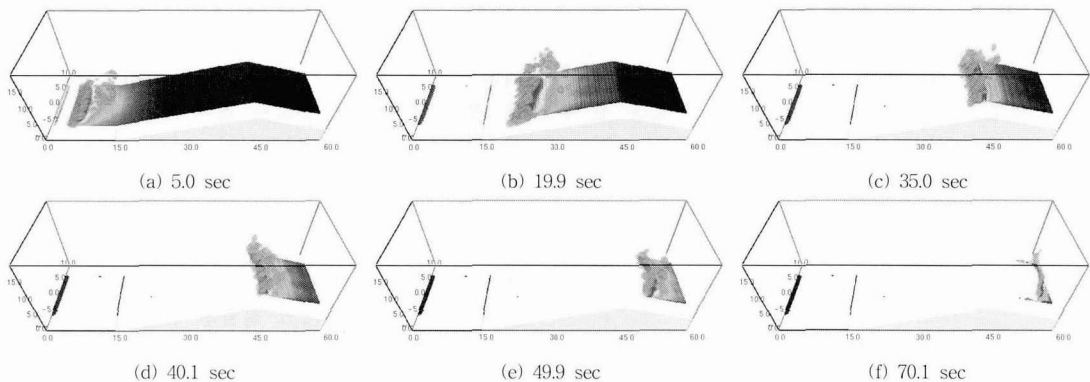


Fig. 8 Transient fire spread on the inclined surface (only grass, wind velocity = 4 m/s).

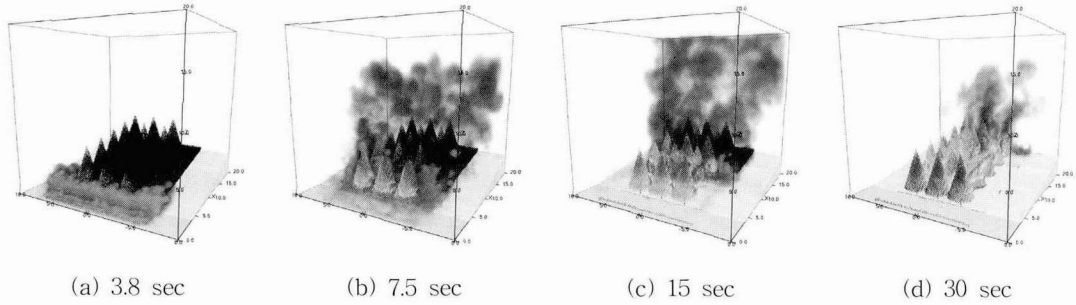


Fig. 9 Transient fire spread on the inclined surface (grass+tree, wind velocity = 2 m/s).

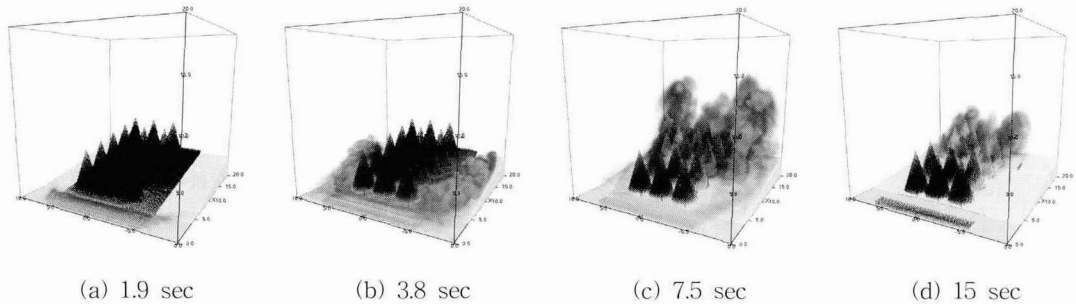


Fig. 10 Transient fire spread on the inclined surface (grass+tree, wind velocity = 6 m/s).

지면이 이루는 각도가 매우 작아지고 화염이 경사면을 따라 넓게 분포한 상태를 유지하며 화재가 빠른 속도로 전파되는 특징을 보인다. 또한 풍속이 2 m/s인 경우에는 화염이 직접 수관(tree crown) 층과 접촉하여 열을 가하면서 Fig. 9(c), Fig. 9(d)와 같이 화재 전파에 따라 나무들이 전체적으로 연소되지만, 풍속이 빠른 6 m/s의 경우에는 Fig. 10(b)와 같이 화염의 형상이 경사면과 평행한 방향을 유지하며 화재가 전파되어 수관층에 열을 효과적으로 전달할 수 없기 때문에 첫 번째 열의 나무들은 거의 연소시키지 못하는 것을 알 수 있다. 하지만 7.5초가 지난 Fig. 10(c)를 보면 화염의 방향이 경사면과 평행한 방향에서 지면에 수직인 방향으로 바뀌면서 나무 부분에 열을 효과적으로 전달하기 시작하여 Fig. 10(d)와 같이 세 번째 열의 나무들부터는 화염의 영향을 받아 전체적으로 연소되는 수관화 현상이 나타난다.

## 5. 결 론

WFDS를 사용하여 목초와 나무들로 구성된 평지와 그동안 타 연구에서 많이 고려되지 않았던

경사면에서 풍속을 변화시키며 시간에 따른 실제적인 화재 전파 시뮬레이션을 수행하였다. 경사가 없는 경우 주변 풍속과 연료 특성에 따른 화재의 전파 특성을 잘 예측함을 알 수 있었다. 이를 통하여 물리적 기반 화재 해석 프로그램인 WFDS를 이용하여 실제적인 화재의 전파 과정을 예측할 수 있었다. 그러나 WFDS의 경우 육면체 격자의 사용으로 대부분의 연구가 평지에서만 적용되어왔다. 이에 본 연구에서는 육면체 격자를 계단 형태로 구성하여 경사면을 고려하였다. 경사면이 적용된 경우, 상향 기울기 경사면보다 하향 기울기를 갖는 경사면에서 화재가 더디게 전파하는 특성을 잘 나타내었으며 나무가 있는 경우 상향 경사의 영향으로 평지보다 화재 전파가 빠르게 나타남을 보여주었다. 이와 같은 연구를 통하여 본 논문에서는 WFDS를 이용하여 경사가 있는 경우 산악지형에서의 산불 전파 예측 가능성을 검증하였다. 추후 연구를 통하여 다양한 경사도의 지형 조건, 나무의 수분 함량과 높이를 고려한 연료 조건, 그리고 계절풍 등을 고려한 기후 조건을 바탕으로 해석 도메인을 확장시켜 실제적인 산불해석이 수행되도록 연구를 진행할 것이다.

## 후 기

본 연구는 서강대학교 교내 자유 연구 과제 사업 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Andrews, P.L., Bevins, C.D. and Seli, R. C., 2005, BehavePlus fire modeling system version 3 user's guide, General Technical Report, RMRS-GTR-106WWW Revised.
2. Finney, M. A., 1998, FARSITE: Fire area simulator-model development and evaluation, Rocky Mountain Research Station, Research Paper, RMRS-RP-4 Revised.
3. Mell, W., Maranghides, A., Rehm, R., Manzello, S., Forney, G., Jenkins, M. A., Sun, R. and Krueger, S., 2006, url for NIST's wildland-urban interface fire webpage, <http://www2.bfrl.nist.gov/userpages/wmell/public.html>.
4. Mell, W., Jenkins, M. A., Gould, J. S. and Cheney, N. P., 2007, A physics-based approach to modeling grassland fires, International Journal of Wildland Fire, Vol. 16, pp. 1-22.
5. McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S. and Floyd, J., 2008, Fire dynamics simulator version 5 user's guide, NIST Special Publication 1019-5.
6. Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., 1991, A dynamic subgrid scale eddy viscosity model, Physics of Fluid A, Vol. 3, pp. 1760-1765.
7. Mell, W., Manzello, S., Maranghides, A., 2006, Numerical modeling of fire spread through trees and shrubs, Proceedings, 5th International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal, pp. 1-12.
8. Cheney, N. P. and Gould, J. S., 1995, Fire growth in grassland fuels, International Journal of Wildland Fire, Vol. 5, pp. 237-247.