WRF-Fire 산불 연료 · 지형자료 해상도와 지상바람의 연소면적 모의민감도 및 오차 분석연구

성지혜 · 한상옥* · 정종혁 · 김기훈

국립기상연구소 예보연구과 재해기상연구센터

(접수: 2013년 10월 7일, 수정: 2013년 11월 16일, 게재확정일: 2013년 12월 4일)

Study on Sensitivities and Fire Area Errors in WRF-Fire Simulation to Different Resolution Data Set of Fuel and Terrain, and Surface Wind

Ji-Hye Seong, Sang-Ok Han*, Jong-Hyeok Jeong, and Ki-Hoon Kim

High-impact Weather Research Center, Forecast Research Division, NIMR/KMA, Gangneung, Korea

Abstract This study conducted WRF-Fire simulations in order to investigate sensitivities of the resolution of fire fuel and terrain data sets, and the surface wind to simulated fire area. The sensitivity simulations were consisted of 8 different WRF-Fire runs, each of which used different combination of data sets of fire fuel and terrain with different resolution. From the results it was turned out that the surface wind was most sensitive. The next was fire fuel and then fire terrain. Unfortunately, every run produced too much fire area. In other words no simulations succeeded in simulating such proper fire area so as for the WRF-Fire to be used realistically. It was verified that the errors of fire area from each runs were contributed by 41%, 53%, and 6% from surface wind, fire fuel, and fire terrain, respectively. Finally this study suggested that the selection of Anderson fuel category in the area of interest seemed to be very critical in the performance of WRF-Fire simulations.

Key words: WRF-Fire, sensitivity, fuel category, terrain, resolution

1. 서 론

산불은 산림자원의 생태계 피해뿐만 아니라 사회경제적으로도 막대한 손실을 끼치기 때문에 그로 인한 재해저감을 위한 다방면의 노력과 연구들이 진행 중이다. 지난 50년간 우리나라는 매년 평균 451회의 산불이 발생하였고, 피해면적은 연평균 3,700 ha에 이르고 있다. 특히 제1, 2차 산림기본계획 시행(1973~1987년) 이후 고령급 산림면적률의 증가로 대형산불에 의한 임목 피해면적과 피해액이 1990년대 중반 이후에 증가하는 경향이 있는 것으로 보고되고 있다(KFS, 2010). 우리나라처럼 자연적인 발화보다 사람의 실화로 인한 산불발생이 대부분인 경우 산불로 인한 피해

를 경감하기 위해서는 예방차원의 노력이 매우 효과적이지만, 일단 발화된 산불은 확산 방향과 진행속도를 적절히 예측하여 효율적인 진화작업으로 대형산불로의 발달을 막을 수 있어 그 피해를 최소화할 수가 있다.

산불의 확산방향과 진행속도를 예측하기 위해 단순한 선형알고리즘부터 복잡한 전산유체역학 코드까지 개발되어 있다. BehavePlus(Andrews, 2007)나 FARSITE(Finney, 1998) 모델은 지점 값이나 평면 격자 형태로 발화 초기시각의 바람과 주변 연료 자료를 입력하여 산불확산을 예측할 수 있도록 개발되었다. 이 모델들은 각각 1, 2차원으로 산불확산을 계산하기 때문에 계산시간이 짧아 실시간 운영이 용이한 반면 기상-산불간의 상호작용이 계산되지 않고 초기시각의 바람자료만을 이용하여 산불의 확산범위를 나타내기 때문에 정확도 측면에서 한계가 있다. 3차원 유체역학 기반의 FIRETEC(Linn *et al.*, 2002)와 WFDS(Mell *et al.*,

*Corresponding Author: Sang-Ok Han, High-impact Weather Research Center, Gangneung 210-702, Korea.
Phone : +82-70-7850-6631, Fax : +82-33-644-2657
E-mail : sohan@korea.kr

2007)은 연구나 재분석용으로 적절하지만 계산 시간이 너무 방대하여 실시간으로 활용하기에 무리가 있다. 이를 극복하기 위한 보다 발전적인 방법으로 3차원 대기모델에 2차원 산불확산모델을 접합하여 화염으로부터 소용돌이나 국지순환과 같은 기상-산불 상호작용을 고려한 기상과 산불모델의 접합연구가 진행되어 왔다(Clark *et al.*, 1996a, b). WRF-Fire(Mandel *et al.*, 2009)는 중규모 대기모델 시스템인 WRF(Skamarock *et al.*, 2008)에 2차원 산불확산모델을 접합하여 WRF에서 계산된 바람정보를 매 계산스텝마다 산불확산모델에 전달함으로써 기상장과 산불변수가 상호작용하면서 산불확산 예측이 가능하도록 개발된 접합모델 시스템이다(Mandel *et al.*, 2011).

Peace *et al.*(2011)은 호주에서 발생한 실제 산불사례의 WRF-Fire 모의 연구를 통해 기상과 산불의 상호작용을 살펴봄으로써 산불확산 예측의 정확도 개선을 위해 고해상도의 식생자료와 지형자료의 중요성을 언급하였다. Dobrinkova *et al.*(2010a, b)과 Jordanov (2011)는 자체적으로 생산한 90 m급 해상도의 지형자료와 10 m급 해상도의 연료자료를 활용한 Bulgaria Harmanli 지역에서의 WRF-Fire 모의실험 비교를 통해 연료자료와 지형자료가 보다 고해상도일수록 산불확산 예측이 보다 정확해질 수 있음을 밝힌 바 있다. Mandel(2011)은 WRF-Fire가 산불확산 예측에 실용적으로 활용되기 위해서는 대기모델의 격자 크기가 400 m 일 경우 Fire 모델에 사용되는 연료자료는 최소 30 m 정도의 해상도를 가져야 하는 것이 이상적이라고 주장하였다. WRF-Fire는 미국 NCAR에서 개발되어 전 세계적으로 공개된 커뮤니티 모델시스템으로서 누구나 쉽게 사용할 수 있지만 Mandel이 언급한 초고해상도(1/3초 해상도) 지형 및 연료자료는 매우 방대하여 제공되지 않고 있다. 따라서 선행 연구자들이 언급한 이상적인 WRF-Fire 모의실험 또는 실용적 활용은 아직은 매우 제한적일 수 밖에 없는 실정이다. 우리나라에서도 몇몇 실험적인 WRF-Fire 모의실험 사례(Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013)가 있지만 사용된 지형 및 연료자료는 Mandel이 언급한 이상적인 해상도에는 미치지 못하고 있고, 1/3초 정도의 고해상도 지형 및 연료자료를 구하기가 쉽지 않아 활발한 산불확산 연구 수행에 많은 제약이 있는 실정이다.

본 연구에서는 자체적으로 제작한 지형 및 연료자료를 이용하여 2011년 1월 31일 강원도 양양군 현남면 상월천리에서 실제 발생한 산불사례를 WRF-Fire로 모의하였다. 이를 통해 WRF-Fire의 산불확산 모의에 있어 가장 핵심적인 요소인 연료, 지형 및 지상바람의 상대적인 중요성을 자료의 해상도별 모의민감도와 연소면적오차 측면에서 살펴보았다. 이를 위해 산불모델용 지형 및 연료자료를 1/3초(약 10 m), 3초(약

90 m) 및 30초(약 900 m)로 각각 제작하여 해상도별로 WRF-Fire 적분을 수행하고 각각의 계산된 산불확산 면적을 실제 피해 연소면적에 대비하여 상대적으로 비교 분석하였다. 또한, 모의된 지상바람의 차이에 의한 산불확산 민감도도 추가적으로 살펴보았다. 이를 통해 WRF-Fire의 실용적 활용을 위해 기존 선행 연구자들이 언급한 초고해상도 지형 및 연료자료의 중요성을 재확인하고 예측정확도 제고를 위한 방안을 검토하였다.

2. 연구방법

2.1 산불사례 개요

본 연구에서 모의하는 산불사례는 2011년 1월 31일 1814LST에 발화한 강원도 양양군 현남면 상월천리 산불이다. Figure 1은 발화지점 주변의 정사영상으로서 본 실험의 산불모의 영역과 동일하다. 중앙에 표시된 곳이 발화 지점으로서 편도 1차선 산간도로변에 위치한 가옥이다. 가옥 오른쪽으로 야산의 경사면이 존재하고 가옥 왼쪽 편 도로 건너에는 10여 미터 넓이의 실개천이 아래 방향으로 흐르고 있으나 겨울철이라 거의 말라 있는 건천 상태이다. 조사된 바에 의하면 가옥의 마당에서 낙엽을 태우던 중 강풍에 의해 불이 가옥 오른쪽 경사면으로 번진 것으로 알려졌다. 이 산불은 약 93.3 ha(KFS, 2012)의 면적을 태우고 다음날 오전 10시 30분에 진화가 완료되어 다행히 대형 산불로는 발달하지 못하였다. 하지만, 발화 초기에는

Fig. 1. The orthophotomap for the location of fire-ignition indicated by white fire mark at map center. The map corresponds to the WRF-Fire simulation domain for this study.

Fig. 2. The maps showing the distribution of surface wind vectors around the fire area at (a) 1830 LST, 31. Jan., (b) 0130 LST, 1. Feb., and (c) 1030 LST, 1. Feb.

Fig. 3. The time series graph for the hourly mean wind speed (solid line) and the maximum gust wind speed (dotted line) during the past one hour from Yangyang airport AWS which is located near the fire area. In the graph A and B denote fire ignition and extinction time, respectively.

Fig. 4. The time series graph for hourly effective humidity during the one month period prior to the fire ignition observed at the Bukgangneung AWS which is the nearest AWS available for the observation of effective humidity.

과거 대형산불과 같이 비교적 산불확산에 좋은 기상 조건을 갖추고 있었다.

Figure 2는 발화 이후 진화가 완료된 시각까지 산 불지역의 AWS 지상바람 분포를 나타낸 것으로서 왼쪽부터 각각 1월 31일 1830LST, 2월 1일 0130LST, 2월 1일 1030LST의 자료이다. 또한 발화지점 인근의 양양공항 AWS에서는 산불발생시 최대 순간풍속이 19.3 m s^{-1} 를 기록하는 등 강한 풍속을 유지하다가 진화 시점에는 풍속이 약해졌고, 평균풍속 역시 1월 31일 1830LST에 12.5 m s^{-1} 로 관측되었으며 진화시각인 2월 1일 1030LST에는 5.0 m s^{-1} 로 관측되어 산불이 발생한 시간에 강한 바람이 불고 있었음을 알 수 있다(Fig. 3). Figure 4는 발화 지점에서 가장 가까운 실효습도 관측지점인 북강릉의 실효습도로서 발화 이전 1개월 기간을 나타낸 것이다. 지난 1개월 기간 동안 대기는 실효습도 30% 정도로 건조한 상태를 유지하고 있었으며 발화 주변 지역에서는 근 25일 이상 강수 현상이 관측되지 않았다. 따라서 지표 및 지중의 연료는 매우 타기 쉬운 상태였을 것으로 사료된다.

일반적으로 산불 피해면적은 진화 후 해당 피해지역 지자체의 조사에 의해 대략 밝혀지지만 상세한 피해분포 및 시각 별 산불확산 방향이나 속도는 피해지역의 항공촬영을 실시간으로 실시하거나 연구자가 직접 GPS 장비를 가지고 현장답사를 하지 않는 한 현실적으로 파악하기가 어렵다. 본 산불사태의 경우도 연소 피해면적 이외에 자세한 산불확산 및 연소분포에 관한 정보는 얻을 수가 없었다. 따라서 본 연구의 WRF-Fire 모의결과에 대한 분석검증은 발화부터 진화 시각까지 적분을 통해 모의된 연소면적을 조사된 실제 피해면적과 비교하는 매우 제한적인 방법을 쓸 수밖에 없다.

2.2 WRF-Fire 산불연료 및 산불지형 자료 생성

WRF-Fire 모델시스템에서 산불연료 자료는 각 대기격자의 아격자 형태로 구성되는 산불격자로 내삽되어 사용된다. 이렇게 아격자 상에서 정의된 연료종류(연료코드)는 지형 및 지상바람과 함께 산불의 확산 방향 및 속도, 화염 세기 등 산불의 행동특성을 결정하는 핵심 요소이다. 일반적으로 산불격자는 대기격

자의 10~20배 정도의 고해상도 아격자로 구성되기 때문에 연료자료 또한 그 정도의 높은 해상도 자료를 필요로 한다. WRF-Fire의 연료자료는 Category Data

로 Anderson(1982)의 분류체계를 이용하여 13가지 연료 종류로 구축된다. 각 연료 종류와 종류별 연소특성을 결정짓는 상수 값들이 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. The 13 Anderson fuel categories and their fuel properties (Adopted as it is from WRF-Fire documentation).

Fuel model	Typical fuel complex	Fuel loading (Tons/acre)				Fuel bed depth (Feet)	Moisture of extinction dead fuels (%)
		1 hour	10 hours	100 hours	Live		
1	Short grass (1 foot)	0.74	0.00	0.00	0.00	1.0	12
2	Timber (grass and understory)	2.00	1.00	.50	.50	1.0	15
3	Tall grass (2.5 feet)	3.01	.00	.00	.00	2.5	25
4	Chaparral (6 feet)	5.01	4.01	2.00	5.01	6.0	20
5	Brush (2 feet)	1.00	.50	.00	2.00	2.0	20
6	Dormant brush, hardwood slash	1.50	2.50	2.00	.00	2.5	25
7	Southern rough	1.13	1.87	1.50	.37	2.5	40
8	Closed timber litter	1.50	1.00	2.50	0.00	0.2	30
9	Hardwood litter	2.92	.41	.15	.00	.2	25
10	Timber (litter and understory)	3.01	2.00	5.01	2.00	1.0	25
11	Light logging slash	1.50	4.51	5.51	0.00	1.0	15
12	Medium logging slash	4.01	14.03	16.53	.00	2.3	20
13	Heavy logging slash	7.01	23.04	28.05	.00	3.0	25

Table 2. The 23-type land cover classifications in Korea and its matching to Anderson fuel category.

Landcover classification code (ministry of environment) and anderson fuel code			
Level I	Level II	Classification Code	Anderson Fuel Code
Urban or Built-up Land	Residential	110	14
	Industrial Area	120	14
	Commercial Area	130	14
	Recreation Facilities Area	140	14
	Traffic Area	150	14
	Public Facilities	160	14
Agricultural Land	Rice Paddy	210	14
	(dry) Field	220	14
	Plastic Film-house cultivation Area	230	14
	Orchard	240	9
	Other cultivation Area	250	14
Forest Land	Deciduous Broadleaf	310	9
	Evergreen Needleleaf	320	8
	Mixed Forest	330	2
Rangeland	Grassland	410	3
	Shrubland	420	1
Wetland	Wooded Wetland	510	14
	Herbaceous Wetland	520	14
Bare Ground	Natural Bare	610	14
	Other Bare	620	14
Pawnee	Inland Water	710	14
	Seashore Water	720	14
Military Zone		990	14

Table의 상수 값들은 연료의 속성을 내포하는 것이다. 본 연구에서는 WRF-Fire에서 사용하고 있는 13개 카테고리 별 상수값을 그대로 사용하였다.

본 연구에서 사용되는 연료자료는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도 자료를 이용하여 생산하였다. 이 토지피복도 자료는 우리나라의 대표적인 토지피복을 7개로 대분류하고 각각의 대분류를 다시 상세 피복종류별로 세분하여 총 23개 피복종류를 5m급 해상도로 제공하는 SHP 형식의 자료이다. 이 23개 토지피복 종류 각각을 WRF-Fire의 13개 Anderson 분류 체계에 맞춰 정성적인 판단으로 맵핑함으로써 사례 산불지역의 연료자료를 1/3초(약 10m) 해상도로 제작하였다. 즉, 환경부의 23개 토지피복 각각에 대해 가장 유사한 Anderson 연료를 할당하여 23개 피복을 13개 연료로 재분류한 것이다. 이는 정량적인 연료분류가 사실상 불가능한 상황에서 선택할 수밖에 없는

방법으로서 Anderson이 1982년 보고서에서 제시하고 있는 분류방법이다. Table 2는 환경부의 23개 피복종류를 13개 Anderson 연료종류로 재분류한 것을 나타낸 것이다. 표에서 연료코드 14번은 연소되지 않는 피복종류를 나타낸다. 환경부 토지피복 중 농업지역은 과수원을 제외하고 산불이 발생한 겨울철에 식생이 존재하지 않는다고 판단하여 연료코드 14로 분류하였다. 산림지역은 각각 활엽수림, 침엽수림, 혼효림으로 나누어져 있는데 이들은 연료코드 9, 8, 2로 각각 분류하였다. 이들 코드는 Anderson(1982)이 보고서에서 유사 연료코드 분류용으로 제시한 사진을 참조하여 결정하였다. Figure 5는 연료코드 9, 8, 2에 해당하는 보고서의 사진을 나열한 것이다. 본 연구에서는 연료자료 해상도의 민감도 실험을 위해 1/3초 자료 이외에 3초 및 30초 자료를 추가적으로 생산하였다.

산불연료와 마찬가지로 Fire 모델의 산불지형은 WRF

Fig. 5. The photographs that are representative of Anderson fuel category (a) 9, (b) 8, and (c) 2. The photographs were adopted from the report by Anderson (1982).

대기모델의 지형과 독립적으로 대기모델 격자의 아격자 형태로 정의됨으로써 산불확산 계산에 핵심요소로 사용되는 기본 자료이다. 따라서 산불지형자료 역시 연료와 마찬가지로 대기모델 지형과 별도로 존재하는 10~20배의 고해상도 자료이어야 한다. 이 산불지형은 산불확산 계산에 필수적인 지형 요소인 해발고도, 경사의 방향, 경사도 등을 표현하는데 이용된다. 예를 들면, 급경사 지형에서 발생한 산불은 복사열, 대류열 등의 영향으로 평지 산불보다 그 진행속도가 빠르다 (Santoni *et al.*, 1999).

본 연구에서 사용된 1/3초와 3초 해상도의 산불지형자료는 국토지리정보원의 ngi 형식 수치지형도 자료를 WRF-Fire 시스템의 래스터 이진파일 형식으로 변환하여 각각 제작하였다. 30초 산불지형 자료의 경우 WRF 시스템에서 제공하는 대기모델용 지형자료를 그대로 사용하였다.

3.3 WRF-Fire 실험설계

본 연구의 산불확산 모의실험은 Fire 모듈(Mandel *et al.*, 2009)이 접합된 WRF(Skamarock *et al.*, 2008) 버전 3.2.1을 사용하여 수행하였다. Fire 모듈은 WRF 버전 3.2부터 물리 옵션으로 추가되어 있다. Fire 모듈은 WRF의 최하층 모델대기로부터 바람장을 전달 받아 산불지형의 경사방향과 바람벡터의 합으로 산불의 확산과 진행방향을 계산한다. 이때, 연료자료의 연소특성을 고려한 Rothermel(1972)의 확산률 계산식을 사용하게 된다. Rothermel은 실험을 통해 화염의 확산에 대한 경험식을 도출하였으며 식은 다음과 같다.

$$R = \frac{I_R \zeta (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$$

I_R : 단위면적당 화염이 미치는 영향 강도($\text{b.t.u./ft}^2 \cdot \text{min}$)

ζ : 연료비율(packing ratio)에 따른 계수

ϕ_W : 화염 영향 강도에 미치는 바람 강제력 coefficient

ϕ_S : 화염 영향 강도에 미치는 지형(경사도) 강제력 coefficient

ρ_b : 완전건조된 연료 밀도(적재된 상태 그대로 빈 공간이 포함된 밀도)

ε : 연료상태에 따른 발화점 가열 coefficient(연료의 크기와 모양에 따른 부피 대 표면적 비율에 따라 결정됨)

Q_{ig} : 발화점까지 필요한 열에너지(연료수분이 적을수록 쉽게 발화됨)

Fire 모듈의 산불확산을 계산과정에서 생긴 열과 수증기는 플럭스 형태로 WRF 모델의 최하층 대기로 전달되고, 적분에 따른 연직혼합 과정을 거쳐 모델대기 전체로 영향을 주게 된다. 산불확산 범위는 지형과 고도의 함수로 이루어진 Level Set Method를 이용하여 계산된다.

산불확산 모의실험을 위한 WRF 모델의 영역과 물리과정 설정은 다음과 같다. 모델 영역은 발화지점을 중심에 두고 남북과 동서 방향으로 각각 10 km이고, 100 m 크기의 수평격자 100×100 개로 구성된다. 연직층은 35개로 구성되어 있고 모델 최상층의 기압면은 50 hPa이다. WRF 모델의 물리과정 옵션으로, 행성경계층 모수화는 YSU PBL, 미세구름물리 모수화 방안으로는 WSM6, 지면물리 과정으로는 5-layer thermal diffusion을 각각 선택하였다. 적운모수화 과정은 모델의 수평격자가 100 m로 초고해상도이기 때문에 사용하지 않았다. WRF 모델 적분을 위한 초기장과 측면경계장은 300 m 해상도의 WRF 재분석장을 사용하였으며, 측면경계장의 시간 간격은 1시간이다. 적분 초기시간은 발화시각 1시간 전인 1월 31일 1700LST이고 적분종료 시간은 2월 1일 11시로서 총 18시간 동안 적분을 수행하였다. WRF-Fire 모델 수행의 주요 구성요소는 Table 3에 정리하였다.

초기 및 경계장으로 사용된 300 m 해상도의 WRF 분석장은 다음과 같이 생산하였다. ECMWF의 0.25도 분석장을 초기 및 경계장으로 활용하여, Fig. 6에 나타난 것과 같은 8.1 km, 2.7 km, 900 m 및 300 m의 등격자 모델영역에 대하여 2-way 방식으로 적분을 수

Table 3. The key model configurations for the WRF-Fire simulations of this study.

Model	WRF V3.2.1
Dimension	100 × 100 × 35
Horizontal grid size	100 m
Horizontal subgrid size	10 m
Microphysics	WSM 6 scheme
Cumulus parameterization	None
Planetary Boundary Layer	YSU PBL scheme
Land-Surface Model	5-layer thermal diffusion
Initial & Boundary condition	WRF analysis field (hourly, 300 m-resolution)
Integration period	2011.1.31.1700 LST ~ 2011.2.1.1100 LST (18 hr)

Fig. 6. The map showing the nested domain configuration that was used in the WRF retrogressive runs for obtaining 300 m-resolution 3-d atmospheric fields to be used in the WRF-Fire experiments. The configuration has coarsest 8.1 km grid spacing for the outermost domain1 with other nested domains getting finer by one thirds.

행하였으며, 300 m 격자 영역에서는 자체 제작한 1/3 초 지형과 landuse 자료를 사용하였다. 본 연구의 산불사례 지역을 포함하는 300 m 격자영역은 1시간 간격으로 적분결과를 출력하였다. 이 자료를 GRIB 형식 파일로 전환하여 위에서 설명한 WRF-Fire 수행에 사용한 것이다.

Fire 모듈은 각 대기격자에 대해 10 m 크기 10×10 개의 아격자로 운영하였고, 대기모델 적분 1시간째인 실제 발화 시각 31일 1800LST부터 가동하도록 하였다. 초기 불씨(발화 형태)는 반경 20 m의 원 형태로 실제 발화지점에 위치하도록 하였다. 산불연료자료 해상도에 따른 민감도 실험은 산불지형을 1/3초로 고정하고 연료자료를 30초, 3초, 1/3초로 변경하여 수행하

였고(Table 4의 F30, F03, F01) 산불지형자료 해상도에 따른 민감도 실험은 연료를 1/3초로 고정하고 지형자료를 30초, 3초, 1/3초로 각각 변경하여 수행하였다(Table 4의 T30, T03, T01). Table 4에서 W03S와 W10M 실험은 산불지형과 연료를 1/3초로 고정하고 WRF 대기모델의 지형자료를 각각 3초와 10분으로 변경하여 수행한 실험으로서, 각 실험 별로 모의된 지상바람의 차이를 대기모델의 지형 차이로 강제 유도함으로써 바람의 차이에 따른 산불확산의 민감도를 살펴보기 위한 실험이다.

Figure 7은 30초, 3초, 1/3초 해상도의 산불연료와 산불지형 자료를 읽어 10 m 해상도의 산불격자로 내삽하여 표현한 WRF-Fire 모델영역의 산불연료 분류 코드와 산불지형 고도를 이미지와 등고선으로 각각 나타낸 것이다. 3초와 1/3초 자료는 서로 큰 차이가 없으나, 30초 자료의 경우 나머지와 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

3. 실험결과

3.1 산불 연료자료 해상도의 산불확산 민감도

Figure 8은 산불연료 자료의 민감도 실험결과로서 발화 후 30분부터 진화 시각까지 4시간 간격으로 각 실험의 연소면적 분포를 나열한 것이다. 첫번째 줄부터 산불연료 자료의 해상도가 각각 30초, 3초, 1/3초인 Table 4의 F30, F03, F01를 나타낸다. 이 그림에 나타난 연소면적의 분포 차이는 오직 사용한 연료자료의 해상도 차이에 의해 초래된 결과이다.

그림에서 보인 모든 실험결과는 발화 후 산불이 지배적인 서풍 계열의 바람에 의해 동쪽 방향으로 확산하고 있음을 나타내고 있으며, 연료자료의 해상도에 따른 산불확산의 차이는 시각별 각 연소면적의 분포를 통해 잘 확인할 수 있다. 30초 연료자료를 사용한 F30은 3초와 1/3초를 각각 사용한 F03과 F01에 비해 상세한 분포특성이 모의되지 않았고, 연소면적 또한 상대적으로 과장되어 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 7

Table 4. The names for each of sensitivity runs and their corresponding experiment settings.

Experiment		Fuel resolution	Fire-terrain resolution	WRF-terrain resolution
Fuel sensitivity experiment	F30	30"	1/3"	3"
	F03	3"	1/3"	3"
	F01	1/3"	1/3"	3"
Fire-terrain sensitivity experiment	T30	1/3"	30"	3"
	T03	1/3"	3"	3"
	T01	1/3"	1/3"	3"
WRF-wind sensitivity experiment	W03S	1/3"	1/3"	3"
	W10M	1/3"	1/3"	10'

Fig. 7. The image (a, c, and e) and contour (b, d, and f) maps showing the fuel categories and fire terrain which were interpolated to the WRF-Fire 10 m subgrids of this study from data sets with resolution of (a and b) 30 s, (c and d) 3 s, and (e and f) 1/3 s.

에서 보인 연료코드의 분포 차이를 Fire 모델이 그대로 잘 반영하고 있는 것으로 파악된다. F03과 F01은 연료의 공간분포가 세밀히 표현되어 있어 모의된 연

소분포 또한 세밀히 표현되고 있음을 알 수 있다.

각 연료민감도 실험의 경과 시각별 연소면적과 모델영역 평균풍속을 Table 5에 정리하였다. 진화 시각

Fig. 8. The maps displaying the spatial distribution of burned areas at times as denoted in the left side of the figures from the fuel sensitivity runs: first column (F30) for 30 s-, second column (F03) for 3 s-, and last column (F01) for 1/3 s-resolution data set.

Table 5. The burned area and domain-mean surface wind speed at each denoted times from the fuel sensitivity runs (F30, F03, and F01).

Exp.	1.31. 1830 LST (30 min. after ignition)		1.31. 2230 LST (4 hour 30 min. after ignition)		2.1. 0230 LST (8 hour 30 min. after ignition)		2.1. 0630 LST (12 hour 30 min. after ignition)		2.1. 1030 LST (16 hour 30 min. after ignition)	
	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)
F30	9.97	10.57	230.00	9.19	1049.58	6.69	1291.33	5.74	1497.13	5.4
F03	0.48	10.57	140.10	9.23	377.17	6.74	557.73	5.60	718.07	5.43
F01	0.48	10.57	128.76	9.23	365.15	6.46	526.95	5.64	633.69	5.38

의 연소면적은 30초(F30), 3초(F03), 1/3초(F01) 실험에 대해 각각 약 1500 ha, 720 ha, 630 ha로서 실제 보고된 피해면적 93.3 ha보다 각각 1600%, 770%, 680% 과대모의하고 있다. 이것은 과대모의 정도를 연소면적오차 백분율로 나타낸 것으로서 F30이 F01에 비해 약 920% 더 과대모의 하고 있음을 알 수 있다. F30과 F01에 쓰인 연료자료의 해상도는 각각 약 900 m, 10 m로 그 차이는 890 m이므로 F30과 F01의 연소면적오차를 차이 920%를 890 m로 나누면 연료자료의 단위 해상도당 면적오차율이 약 1.03% 증가함을 알 수가 있다. 같은 방식으로 F03과 F01을 비교하면 단위 해상도당 면적오차율이 약 1.13% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 연료자료의 해상도에 따른 연소면적오차는 다소 비선형적으로 나타남을 확인할 수가 있다. 하지만 본 연구에서는 900 m와 10 m 해상도 사이에 연소면적오차가 대략 선형적으로 증가하는 것으로 가정함으로써 해상도에 따른 민감도 정도를 다음 절의 지형자료에 의한 민감도와 비교하는 수치로 사용하고자 한다.

위에서 구한 연료자료의 단위해상도 당 1.03%의 연소면적 오차 증가요인을 고려할 때 연료자료 해상도가 10 m에서 100 m로 낮아지면 WRF-Fire 산불모의 실험의 다른 요인에 의한 오차를 제외하고도 약 93%의 연소면적 오차가 더 증가될 수 있음을 추론할 수가 있다. 따라서 본 민감도 실험은 고해상도 자료가 오차를 최소화할 수 있다는 당연한 결과에도 불구하고 연료자료의 해상도에 따른 오차증가 정도를 정량적으로 가늠해 볼 수 있었다.

3.2 산불 지형자료 해상도의 산불확산 민감도

Figure 9는 산불지형 자료의 민감도 실험결과로서 발화 후 30분부터 진화 시각까지 4시간 간격으로 각 실험의 연소면적 분포를 나열한 것이다. 첫번째 줄부터 산불지형 자료의 해상도가 각각 30초, 3초, 1/3초인 Table 4의 T30, T03, T01를 나타낸다. 연료의 민감도 실험과 마찬가지로 그림에 나타난 연소면적의

분포 차이는 오직 사용한 산불지형 자료의 해상도 차이에 의해 초래된 결과이다.

그림에 나타난 확산 양상과 연소면적을 보면 각 실험의 모의결과에 큰 수준의 차이가 발견되지 않는다. 이는 Fig. 7에 보인 것처럼 발화지점에서 산불확산 방향으로 주변의 지형이 복잡하지 않아 지형자료의 해상도 차이에도 불구하고 연소지점의 산불격자에 표현된 산불지형의 경사나 분포가 실험별로 큰 차이가 나지 않기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 모의된 연소면적을 계산하여 실험 간의 차이를 정량적으로 분석할 수가 있다. Table 6은 각 지형민감도 실험의 경과와 시각 별 연소면적과 모델영역 평균풍속을 정리한 것이다. Table 6에 나타난 것처럼 각 시각 별 연소면적은 1/3초(T01), 3초(T03), 30초(T30) 자료 해상도 순서로 더 크다. 이것은 Rothermel의 산불확산을 식에서 알 수 있듯이 지형경사도를 나타내는 요소가 클수록 산불확산율은 증가하기 때문이다. 일반적으로 모델격자로 내삽된 지형고도 정보는 고해상도 자료를 사용할수록 격자간의 경사를 더 크게 표현한다. 이와 같이 본 실험의 경우에도 산불연료자료가 고해상도일수록 산불격자에서 지형경사가 더 크게 표현되었을 것이라는 것은 충분히 생각해 볼 수가 있다. 따라서 본 실험 결과에 나타난 것처럼 산불지형자료가 고해상도일수록 산불확산 속도가 더 큼으로 인해 같은 연소시간동안 더 큰 연소면적이 모의되는 것이다.

진화 시각의 연소면적은 30초(T30), 3초(T03), 1/3초(T01) 실험에 대해 각각 약 550 ha, 590 ha, 630 ha로서 실제 보고된 피해면적 93.3 ha보다 각각 590%, 630%, 680% 과대모의하고 있다. 앞 절의 연료민감도 실험과 마찬가지로 900 m 해상도 T30과 10 m 해상도 T01 실험의 연소면적오차율 차이가 선형적으로 변한다고 가정하고, 두 실험간 오차율 차이 약 80%를 해상도 차이 890 m로 나누면 지형자료의 단위 해상도당 약 0.09%의 오차율 차이를 산출할 수가 있다. 따라서 앞 절에서 산출한 연료민감도 수치 1.03%와 지형민감도 수치 0.09%를 단순 비교하면 연소면적 오

Fig. 9. The same as the Fig. 8 but for the terrain sensitivity runs: first column (T30) for 30 s-, second column (T03) for 3 s-, and last column (T01) for 1/3 s-resolution data set.

Table 6. The same as Table 5 but for the fire terrain sensitivity runs (T30, T03, and T01).

Exp.	1.31. 1830 LST (30 min. after ignition)		1.31. 2230 LST (4 hour 30 min. after ignition)		2.1. 0230 LST (8 hour 30 min. after ignition)		2.1. 0630 LST (12 hour 30 min. after ignition)		2.1. 1030 LST (16 hour 30 min. after ignition)	
	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)
T30	0.5	10.57	85.55	9.24	282.69	6.54	423.93	5.73	545.99	5.48
T03	0.46	10.57	113.31	9.23	338.45	6.54	486.77	5.69	585.52	5.54
T01	0.48	10.57	128.76	9.23	365.15	6.46	526.95	5.64	633.69	5.38

차와 관련하여 산불연료의 해상도가 지형의 해상도보다 약 11배 정도 더 민감하게 작용하는 것으로 파악된다. 물론 이 주장은 해상도별 면적오차가 선형적으로 변한다는 것을 가정하고 도출한 것이기 때문에 다소 문제의 소지가 있다. 하지만 연료와 지형 자료의 면적오차에 미치는 상대적인 기여도를 이해하는데 큰 무리는 없을 것으로 판단된다. 왜냐하면 위의 민감도 수치를 산출하는데 있어 같은 가정과 조건을 사용하였기 때문이다.

산출된 지형자료의 단위해상도당 오차를 차이 0.09%를 근거로 산불지형자료의 해상도가 10 m에서 100 m로 낮아질 때 연소면적오차를 차이는 약 8%로서 앞 절에서 제시한 연료자료의 93% 수준에 비하면 미미한 수준임을 알 수가 있다.

3.3 지상바람의 산불확산 민감도

지상바람의 산불확산 모의 민감도를 살펴보기 위하여 앞서 Table 4에서 설명한 것처럼 산불연료와 산불지형 자료를 1/3초로 고정하고 대기모델의 지형자료가 10분(W10M)과 3초(W03S)인 실험을 각각 수행하였다. 이는 대기모델의 지형을 완화된 형태와 자세한 형태로 달리 표현함으로써 Fire 모듈에 전달되는 지상바람의 차이를 유도하기 위한 것이다.

Figure 10의 첫번째와 두번째 줄은 각각 W10M(대기지형 10분)과 W03S(대기지형 3초) 실험의 지상바람 벡터와 연소면적 분포로서 발화 후 30분부터 진화시각까지 4시간 간격으로 나열하였다. 각 시각 별로 모델영역 전체의 바람벡터 분포는 대체로 비슷하지만 국소적으로 자세한 형태는 상당한 차이가 있음을 그림을 통해 알 수 있으며, 이에 따라 연소면적도 시각별로 다소 차이가 있음을 감지할 수 있다. 이를 좀더 확실히 확인하기 위하여 그림의 세번째 줄에 W03S에서 W10M를 뺀 지상바람의 벡터 차이와 각각의 연소면적을 동시에 나타내어 살펴보았다. 그림에서 W03S의 연소분포(파선)는 벡터 차이를 반영하여 W10M(실선)에 비해 상대적으로 벡터방향으로 확산하고 있음

을 볼 수 있다.

위의 바람민감도 실험의 각 경과 시각 별 연소면적과 모델영역 평균풍속을 Table 7에 정리하였다. 진화시각의 연소면적은 W10M과 W03S 실험에 대해 각각 약 670 ha와 630 ha로서 실제 보고된 피해면적 93.3 ha보다 대략 720%와 680% 과대모의하고 있다. 따라서, W10M과 W03S의 오차율 차이 약 40%를 전체 연소시간에 대한 평균풍속 차이 0.49 ms⁻¹로 나누면 바람이 1 ms⁻¹ 증가함에 따라 면적오차는 약 88.6% 증가하는 것으로 나타났다. 본 산불사례의 경우 연소시간 동안 주변 AWS에서 관측된 평균풍속이 약 5 ms⁻¹인 것으로 나타났는데(Table 8), 만약 10 m s⁻¹ 정도로 강풍이 불었다고 가정하면 실제 연소면적은 약 510 ha에 이른다는 뜻이 된다.

일반적으로 WRF 모델은 계통적으로 지상바람을 3 ms⁻¹ 정도 과대 모의하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구의 산불확산 모의결과는 바람만 고려하여도 약 265% 정도는 연소면적을 과대 모의하고 있는 것으로 생각해 볼 수가 있다. 이를 확인하기 위하여 F01 실험 사례를 이용하여 바람의 오차가 가져오는 면적오차를 다음과 같이 가늠하여 보았다. 우선 Table 5의 각 경과 시각의 연소면적은 전 시각의 평균풍속에 의해 선형적으로 증가한다고 가정하고, 증가한 면적을 평균풍속으로 나누면 대략적인 단위 풍속당 연소면적을 산출할 수가 있다. 다음으로, 각 경과 시각에 관측된 AWS 평균풍속을 모델 평균풍속에서 빼면 각 경과 시각의 지상바람 오차를 알 수 있다. AWS 평균풍속은 Table 8에 정리한 산불지역 주변의 5개 관측지점 값을 산술 평균하여 구하였다. 마지막으로 단위풍속의 연소면적을 지상바람 오차로 곱하면 각 경과 시각마다의 바람오차로 인해 과대 모의된 연소면적을 산출할 수가 있다. F01 실험에 이를 적용하면 첫 시각을 제외한 나머지 각 시각에서 46.5 ha, 97.1 ha, 43.1 ha, 35.6 ha의 바람에 의한 면적오차가 구해지고, 이를 전부 합하면 222.3 ha의 전체 연소면적 오차가 산출된다. 이는 F01에서 모의한 633.7 ha의 35%에 해

Fig. 10. The same as the Fig. 8 but for the surface-wind sensitivity runs: first column for W10M run, second column for W03S run as explained in the text. The last column shows the vector difference of surface winds between the W03S and W10M runs, and the burned areas for W10M (solid) and W03S (dashed).

Table 7. The same as Table 5 but for the surface wind sensitivity runs (W10M and W03S).

Exp.	1.31. 1830 LST (30 min. after ignition)		1.31. 2230 LST (4 hour 30 min. after ignition)		2.1. 0230 LST (8 hour 30 min. after ignition)		2.1. 0630 LST (12 hour 30 min. after ignition)		2.1. 1030 LST (16 hour 30 min. after ignition)		Mean (m s ⁻¹)
	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	burned area (ha)	wind speed (m s ⁻¹)	
W10M	0.68	11.00	243.09	10.66	381.42	7.03	476.32	5.57	674.36	5.48	7.948
W03S	0.48	10.57	128.76	9.23	365.15	6.46	526.95	5.64	633.69	5.38	7.456

Table 8. The AWS-observed surface wind speeds around the fire area of this study at times as denoted in the table which correspond to those for previous tables.

AWS	Wind speed (m s ⁻¹)					Mean (m s ⁻¹)
	1.31. 1830 LST (30 min. after ignition)	1.31. 2230 LST (4 hour 30 min. after ignition)	2.1. 0230 LST (8 hour 30 min. after ignition)	2.1. 0630 LST (12 hour 30 min. after ignition)	2.1. 1030 LST (16 hour 30 min. after ignition)	
104 (Bukgangneung)	3.1	2.7	3.7	3.0	1.0	2.70
498 (Guryongryeong)	8.8	5.5	5.7	3.4	3.5	5.38
593 (Seorim)	5.6	5.6	5.2	5.1	4.0	5.10
92 (Yangyang)	12.5	8.5	6.0	7.0	5.0	7.80
523 (Jumunjin)	3.7	4.9	3.1	0.3	2.0	2.80
Mean (m s ⁻¹)	6.74	5.44	4.74	3.76	3.10	4.76

당하고 실제 연소면적 93.3 ha의 230%에 달하는 면적인 것이다.

지금까지 민감도 실험 결과를 종합하면, 바람의 세기와 지형 및 연료자료의 해상도가 가지는 물리량의 의미가 다르기 때문에 서로 단순 비교하는 것에 무리는 있지만 WRF-Fire의 연소면적 오차와 관련하여 민감도 측면에서는 바람의 세기가 가장 중요하게 다루어져야 함을 알 수 있으며, 연료자료는 지형자료에 비해 상대적으로 고해상도 자료의 사용이 더욱 강조되어야 한다는 결론을 얻을 수가 있다. 이는 다른 오차 유발 효과를 제외한 민감도 측면에서의 결론이며, 연료 코드 분류 오류와 같은 다른 오차요인을 고려할 때 본 연구의 실험에서는 연료자료에 의해 야기되는 절대적인 연소면적 오차가 가장 큰 것으로 파악되었다. 이에 대해서는 다음 장의 결론 부분에서 추가적으로 더 설명하였다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 WRF-Fire의 산불확산 모의에 사용

되는 산불연료 및 산불지형 자료의 공간해상도와 지상바람이 모의 결과에 미치는 민감도를 실제 산불사례의 모의실험을 통해 살펴보았다. 본 연구는 보다 긍정적인 산불확산 모의를 위해서 산불 연료 및 지형 자료의 해상도가 높아야 한다는 당연한 사실을 연소면적오차의 정량적 민감도 분석을 수행함으로써 확인하고, 이를 통해 WRF-Fire로 산불확산 모의를 함에 있어 연료, 지형 및 바람의 상대적 중요도를 정량적으로 가늠해 볼 수 있게 하였는데 그 의의를 찾을 수 있겠다.

산불연료는 산불지형에 비해 자료의 해상도 차이에 따라 11배 정도 민감하게 연소면적 오차에 작용하였다. 또한, 지상바람의 경우 단위속도 당 88.6% 정도의 연소면적오차를 차이를 초래할 수 있음이 밝혀졌다. 이는 산불 연료 및 지형 자료의 해상도 문제 이전에 WRF-Fire 지상바람의 계통적 오차를 줄이는 노력이 시급함을 시사하는 것이다.

본 연구에서 가장 실제와 가까운 결과를 낼 것으로 기대되는 1/3초 해상도의 연료 및 지형자료를 사용한 실험(F01)에서도 모의된 최종 연소면적은 633.7 ha였

다. 이는 실제 보고된 연소면적 93.3 ha과는 상당한 차이가 있으며, 540.4 ha 정도로 과대 모의하였다. 과대 모의 면적 중에 3장에서 설명한 바람에 의한 오차 222.3 ha를 빼고 난 318.1 ha는 산불연료 및 산불지형과 연관된 오차 때문인 것으로 간주할 수가 있다. 즉, 본 사례실험의 경우 지상바람이 연소면적 오차의 41%를 초래한다고 볼 수 있다. 나머지 59%는 연료 및 지형자료와 관련하여 발생한 오차라고 설명할 수 있다. 만약 연료와 지형자료 해상도의 민감도 수준에 비례해서 연료와 지형이 연소면적오차에 기여한다고 가정하면 산불연료는 53%, 산불지형은 6%의 크기로 전체 연소면적오차를 설명한다고 할 수 있다. 이와 같이 산불연료와 관련된 연소면적오차가 이렇게 큰 것은 연료 카테고리 결정 과정의 속성상 오류가 많이 개입될 수밖에 없기 때문인 것으로 짐작된다. 따라서 연소면적오차를 유발하는 요인을 정리하면 아래와 같다.

첫째, Anderson(1982)이 언급한 것처럼 관심지역의 적절한 연료종류(코드) 할당은 산불행동 양식을 적절하게 모의하는데 가장 결정적인 역할을 한다고 알려져 있다. 하지만, 앞서 설명한 것처럼 환경부 피복종류를 참조하여 Anderson의 분류체계와 꼭 일치하도록 본 연구의 연료코드를 생산하는 것은 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 Anderson이 1982년 보고서에서 제시한 연료 종류별 사진들과 실제 산불지역의 피복상태를 주관적으로 비교 판단하여 사례 산불 지역의 연료코드를 결정하였다. 이 과정에 피할 수 없는 오차 요인이 존재할 수밖에 없다.

둘째, Anderson의 분류코드와 최대한 유사한 연료 코드가 본 연구의 사례와 같은 특정 지역에 대해서 결정되었다고 하더라도 그 지역에서 직접 측정하지 않는 한 각 연료코드의 면적당 연료량, 연료두께 등 연소특성을 좌우하는 상수 값들의 불확실도가 크게 존재할 수밖에 없다. 이는 Anderson의 13개 분류체계가 구축될 당시 미국의 특정 고유지역에서 측정된 고유상수 값들을 일반화하여 적용하였기 때문이다.

셋째, 산불확산 모델에는 인간의 진화 활동에 의한 산불확산 저지효과가 고려되어 있지 않다. 본 연구의 산불사례 경우에도 소방 헬기와 많은 인원이 동원되어 진화작업이 활발히 전개되었다. 진화작업에 의한 확산 저지효과가 어느 정도인지 정량적으로 알려져 있지는 않지만 동일한 연소시간에 대해 자연상태의 연소면적을 훨씬 줄일 수 있었을 것임은 자명해 보인다.

위에서 언급한 요인들로 인해 한국 산지에서 WRF-Fire가 실용적으로 사용되기 위해서는 아직 선행해서 해결하여야 할 많은 도전 과제들이 있어 보인다. 무엇보다도 산지의 연료 특성과 분포가 정밀하게 조사되어야 한다. 최소한 이를 기반으로 Anderson의 연료 코드 지도가 10 m대 해상도로 제작되어야 한다. 이는

국가적인 규모의 거대 프로젝트가 필요한 매우 어려운 과제임이 틀림없다. 따라서, 향후에는 실제 연소면적 분포가 제대로 파악된 산불사례에 대해 WRF-Fire의 지속적인 민감도 실험을 수행함으로써 한국 지형과 식생분포에 적합한 확산 경험식의 개발과 같은 저비용의 산불확산 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소의 재해기상연구센터 설립운영(R&D)사업 (NIMR-2012-B-7)의 일환으로 수행되었습니다. 연료 및 지형자료 생성을 위해 자료를 제공해 주신 환경부와 국토지리원에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Anderson, H. E., 1982: Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. *USDA Forest Service General Technical Report*, **122**, 1-22.
- Andrews, Patricia L., 2007: BehavePlus fire modeling system: Past, present, and future. *Proceedings of 7th Symposium on Fire and Forest Meteorology*, American Meteorological Society, 13 pp.
- Clark, T. L., M. A. Jenkins, J. Coen, and David Packham, 1996a: A coupled atmospheric-fire model: Convective feedback on fire line dynamics. *J. Appl. Meteor.*, **35**, 875-901.
- , M. A. Jenkins, J. Coen, and David Packham, 1996b: A coupled atmospheric-fire model: Convective feedback number and dynamic fingering. *Int. J. Wildland Fire*, **6**, 177-190.
- Dobrinkova, N., and G. Jordanov, 2010a: WRF-Fire wildfire modeling in the test area of Harmanli, Bulgaria. *Geoscientific Model Development Discussions*, 10 pp.
- , G. Jordanov, and Jan Mandel, 2010b: WRF-Fire Applied in Bulgaria. *Atmos. Ocean. Phys., UCD CCM Report 290*, 8 pp.
- Finney, M. A., 1998: FARSITE: Fire area simulator model development and evaluation. *USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station*, 47 pp.
- Jordanov, G., D. B. Jonathan, and N. Dobrinkova, 2011: Simulation of the 2009 Harmanli fire (Bulgaria). *Lecture Notes in Comput. Science Lect. Notes Comput. Sc.* **7116**, 291-298.
- KFS (Korea Forest Service), 2010: Reviews and government action plan for forest fire using statistical analysis. forest fire policy report, 302 pp.
- , 2012: *Annual report of forest fire statistics for*

2012. Korea Forest Service, 123.
- Linn, R., J. Reisner, J. J. Colmanm, and J. Winterkamp, 2002: Studying wildfire behavior using FIRETEC. *Int. J. Wildland Fire*, **11**, 233-246.
- Lee, H.-W., S.-H. Tak, and S.-H. Lee, 2013: Numerical experiment on the variation of atmospheric circulation due to wild fire. *J. Environ. Sci. Int.*, **22**, 173-185.
- Lee, Y.-H., J.-H. Jin, E.-H. Kim, J.-C. Ha, H.-C. Lee, and B.-D. Lee, 2011: Case study for Yang-yang forest fire simulation in 2005 using atmosphere-forest fire coupled model. *Proceeding of Spring Meeting of KMS*, 36-37.
- Mandel, J., J. D. Beezley, and A. K. Kkochanski, 2011: Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 591-610.
- Mell, W., M. A. Jenkins, J. Gould, and P. Cheney, 2007: A physics-based approach to modeling grassland fires. *Int. J. Wildland Fire*, **16**, 1-22.
- _____, A. Maranghides, R. McDermott, and S. Manzello, 2009: Numerical simulation and experiments of burning douglas fir tree. *Combust. Flame*, **56**, 2023-2041.
- Peace, M. T. Mattner, and G. Mills, 2011 : Case studies and preliminary WRF-fire simulations of two bushfires in sea breeze convergence zones. *Ninth Symposium on Fire and Forest Meteorology*, 18 pp.
- Pyne, S. J., P. L. Andrews, R. D. Laven, 1996: Introduction to Wildland Fire. *JOHN WILEY & SONS, INC.*, 769.
- Rothermel, R. C., 1972 : A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *USDA Forest Service Research Paper, INT-115*, 1-40.
- Santoni, P. A., J. H. Balbi, and J. L. Dupuy, 1999 : Dynamic Modeling of Upslope Fire Growth. *Int. J. Wildland Fire*, **9**, 285-292.
- Skamarock, W. C., and M. L. Weisman, 2008 : The impact of positive-definite moisture transport on NWP on NWP precipitation forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 488-494.
- ※ 영어로 작성되지 않은 한글 및 일본어 참고문헌은 편집진에서 영어로 번역하였습니다. 번역된 참고문헌은 다음과 같습니다.
- 1) 산림청, 2010: 산불통계 분석을 통한 산불정책 변천 및 대응방안. *산불정책보고서*, 산림청, 302 pp.
KFS (Korea Forest Service), 2010: Reviews and government action plan for forest fire using statistical analysis. forest fire policy report, 302 pp.
- 2) 산림청, 2012: 2012년 산불통계 연보, 산림청, 123.
KFS (Korea Forest Service), 2012: *Annual report of forest fire statistics for 2012*. Korea Forest Service, 123.