한국농림기상학회지, 제11권 제4호(2009)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 11, No. 4, (2009), pp. 192~205

계산유체역학모형 CFD_NIMR_SNU를 이용한 국지적으로 가열된 산악지역의 상세 바람 흐름 모사

– 화왕산 산불 사례 –

구해정 · 최영진 · 김규랑* · 변재영
국립기상연구소 응용기상연구과

(2009년 10월 26일 접수; 2009년 12월 16일 수정; 2009년 12월 16일 수락)

Simulation of Detailed Wind Flow over a Locally Heated Mountain Area Using a Computational Fluid Dynamics Model, CFD_NIMR_SNU

– a fire case at Mt. Hwawang –

Hae-Jung Koo, Young-Jean Choi, Kyu Rang Kim* and Jae-Young Byon
Meteorological Application Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA, 45 Gisangcheong-gil, Dongjak-gu, Seoul, 156-720, Republic of Korea

(Received October 26, 2009; Revised December 16, 2009; Accepted December 16, 2009)

ABSTRACT

The unexpected wind over the Mt. Hwawang on 9 February 2009 was deadly when many spectators were watching a traditional event to burn dried grasses and the fire went out of control due to the wind. We analyzed the fatal wind based on wind flow simulations over a digitized complex terrain of the mountain with a localized heating area using a three dimensional computational fluid dynamics model, CFD_NIMR_SNU (Computational Fluid Dynamics_National Insitute of Meteorological Research_Seoul National University). Three levels of fire intensity were simulated: no fire, 300°C and 600°C of surface temperature at the site on fire. The surface heat accelerated vertical wind speed by as much as 0.7 m s^{-1} (for 300°C) and 1.1 m s^{-1} (for 600°C) at the center of the fire. Turbulent kinetic energy was increased by the heat itself and by the increased mechanical force, which in turn was generated by the thermal convection. The heating together with the complex terrain and strong boundary wind induced the unexpected high wind conditions with turbulence at the mountain. The CFD_NIMR_SNU model provided valuable analysis data to understand the consequences of the fatal mountain fire. It is suggested that the place of fire was calm at the time of the fire setting due to the elevated terrain of the windward side. The suppression of wind was easily reversed when there was fire, which caused updraft of hot air by the fire and the strong boundary wind. The strong boundary wind in conjunction with the fire event caused the strong turbulence, resulting in many fire casualties. The model can be utilized in turbulence forecasting over a small area due to surface fire in conjunction with a mesoscale weather model to help fire prevention at the field.

Key words **: CFD, Turbulence, TKE, Mountain fire**

* Corresponding Author : Kyu Rang Kim (krk9@kma.go.kr)

I. 서 론

일반적으로 수 km 이하 공간 규모에서 지형이나 건물이 존재할 경우, 그 복잡도와 지면 특성에 따라 공기의 흐름체계가 여러 형태로 나타난다(Oke, 1987; Kaimal and Finnigan, 1994; Arya, 2001; Baik *et al.*, 2007; NIMR, 2008). 특히, 겨울과 봄철에 많이 발생하는 산악의 풍하측 강풍은 건조한 대기 특성과 강한 풍속으로 인하여 산불의 발생과 확대요인으로 작용할 수 있을 뿐 아니라 항공기 이착륙 지연에도 영향을 줄 수 있어 재산상의 피해 뿐만 아니라 자연생태계의 파괴도 초래할 수 있다(Lee *et al.*, 2001a; 2001b; Jang and Chun, 2008; Won *et al.*, 2008). 산악지형에서의 흐름 흐름체계는 평지보다 좀 더 복잡한 과정에 의하여 나타난다. Kaimal and Finnigan(1994)에 따르면 지표면의 높이가 변화하는 경우 기압장의 변화 유도 및 난류 발생의 가능성도 커지게 된다. 이로 인해 날씨나 기후 등 종관 규모에서의 예보를 세분화 하는데 어려움이 따르게 된다. 특히, 높은 언덕이나 산악지형으로부터 유도되는 내부 중력파에 의해 이 문제는 더욱 커질 수 있다. 또한 일변화에 따른 정적 안정도 역시 산악 지형의 흐름을 설명하는 중요한 요소가 된다. 만약에 언덕이 대기 경계층을 요란시킬 만큼 충분히 크다면 부력에 의한 흐름이 주야간 모든 시간대에 매우 중요하게 작용하며, 역으로 언덕 주변의 대기 흐름이 대기 경계층 이내에서 작다면 경계층이 정적으로 안정되었을 때에 부력에 의해서만 영향을 받게 된다. 한편, 산악 화재와 같이 산악 지형에 고온의 강제 가열이 있는 경우 열속 증가에 따른 열적 난류 생성을 유도하여 대류 및 돌풍의 발생을 유도할 수 있을 뿐 아니라, 연료가 되는 식물의 종류에 따라서 그 강도는 다양하게 나타날 수 있게 된다(Oke, 1987). 그러나 현재 기상예보에 활용되는 기상관측과 수치예보 모델은 수 십~수 백 km 규모의 격자 간격에서 경계층 이내의 난류 과정 등을 모수화 하여 기상변수를 예측하므로 수 십 m 이내 격자 규모에서 복잡한 지형의 상세 흐름 특성을 정확히 예측하는 데는 한계가 있다. 따라서 어떤 복잡한 지역에서의 상세한 대기의 흐름 특성과 대기오염물질의 확산, 화재 등의 국지적 기상현상을 모사하기 위해서는 지표면에서부터 수 백 미터 고도 사이에서 발생하는 기류의 상세한 변화를 모사하고 예측할 필요가 있게 된다. 이러한 국지기상학적 특성을 분석하고 예측하기 위해 큰 맴돌이 모의(Large Eddy Simulation, LES) 혹은 계산 유체 역학 모형(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 같은 상세 기상 모형을 이용할 수 있다(Li *et al.*, 2006).

지금까지 풍하측 강풍의 발생 메커니즘에 대한 연구와 함께 대기 중에 존재하는 역전층, 산악 지역의 비대칭성, 지표면의 마찰, 경계층의 효과가 풍하측 강풍에 미치는 영향에 대해서 다양한 선행 연구가 이루어져 왔다. Miller and Durran(1991)의 연구에서는 풍하측 산의 경사가 강풍을 만드는데 중요한 역할을 담당하는 것을 수치실험을 통해 증명하였고, Richard *et al.*(1989)에서는 지표면 마찰에 의해 풍하측 풍속이 감소하고 풍속이 최대가 되는 지점이 풍상측과 가까운 쪽으로 이동한다고 밝힌 바 있다. 한편, Clark *et al.*(1996a)은 나비어-스토크스 대기 유동 방정식과 열적, 질량 보존 등의 지배방정식으로 이루어진 접합된 기상-화재 모형을 개발하여 10-20m 해상도의 열적으로 유도된 대류 효과 연구를 수행함으로써 복잡한 산악지역에서 화재가 발생한 경우 지면의 강한 국지적 가열 특성이 소용돌이 발생에 영향을 줄 수 있음을 보였다. 최근 Kim and Baik(2001; 2004)에 의해 도시 협곡에서의 가열조건 변화에 따른 계산 유체 역학 모형이 개발됨에 따라 산악과 같은 복잡한 지형에의 적용 및 좀 더 현실적인 상세 흐름 모사의 가능성이 열리게 되었다. 이 모형은 도시 협곡 내에서 건물 배치와 높이, 지면과 건물 벽의 가열강도에 따른 흐름 특성을 모사하며 풍동 실험 결과를 통하여 검증된 바 있다(Baik *et al.*, 2007). 그러나 실제 삼차원의 복잡한 지형에서 지면 가열과 식생효과, 그리고 기상특성을 반영하여 그 발생 기작에 대해 밝혀진 연구는 아직까지 미미하여 보다 상세한 연구가 필요하며, 특히, 미규모 영역에서 발생할 수 있는 산악 화재와 관련한 기상학적 접근의 연구는 많이 부족한 실정이다.

본 연구에서는 이전에 개발된 삼차원 계산유체역학 모형(Baik *et al.*, 2007, Kim and Baik, 2004, NIMR, 2006: NIMR, 2007; NIMR, 2008)인 CFD_NIMR_SNU을 실제 산악기상 사례에 적용시켜 보고자 한다. 산악화재 사례에 대한 여러 가지 가열 조건을 주어 수치실험을 수행함으로써 국소지역 지면 가열에 의해 형성된 따뜻한 공기가 주변의 흐름 특성에 어떠한 영향을 미치는지 이해하고, 향후 국지기상 예보에 대한 이 모형의 활용 가능성을 고찰하고자 한다.

II. 실험설계 및 방법

본 연구를 위해 경상남도 창녕군 화왕산 지역의 해발고도 757m정상에 위치한 배바위 지점(위도 35.5472°N, 경도 128.532778°E)을 연구대상으로 설정하였다(Fig. 1). 화왕산 지역(Fig. 1(a)의 B지점)은 경상남도 내륙에 위치하고 있으며, 대부분 산악으로 이루어진 복잡한 지형 형태를 가진다. 2009년 2월 9일 1820 LST경 강풍에 의해 발생된 산악 화재 사례를 연구대상일로 선정하였다. 이 산은 주로 억새 밭과 진달래 군락으로 알려져 있으며, 특히 산 정상에 서식하는 식생은 억새로 이루어져 있다(http://gallery.encyber.com). Fig. 2는 연구 대상일인 2월 9일 1800 LST의 지상일기도를 나타낸 것이다. 이날의 지상일기도에서 경상남도 지역은 저기압과 고기압 가장 자리에 위치하여 동서 방향의 기압경도가 큰 것으로 나타나 강한 바람이 불 수 있는 종관적 기상상태를 제공하였다.

화재 사례에 대한 수치 모의를 위해 사용한 모형은 레이놀즈 평균 유동 방정식(RANS; Reynolds Averaged Numerical Scheme)으로 이루어진 계산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 모형인

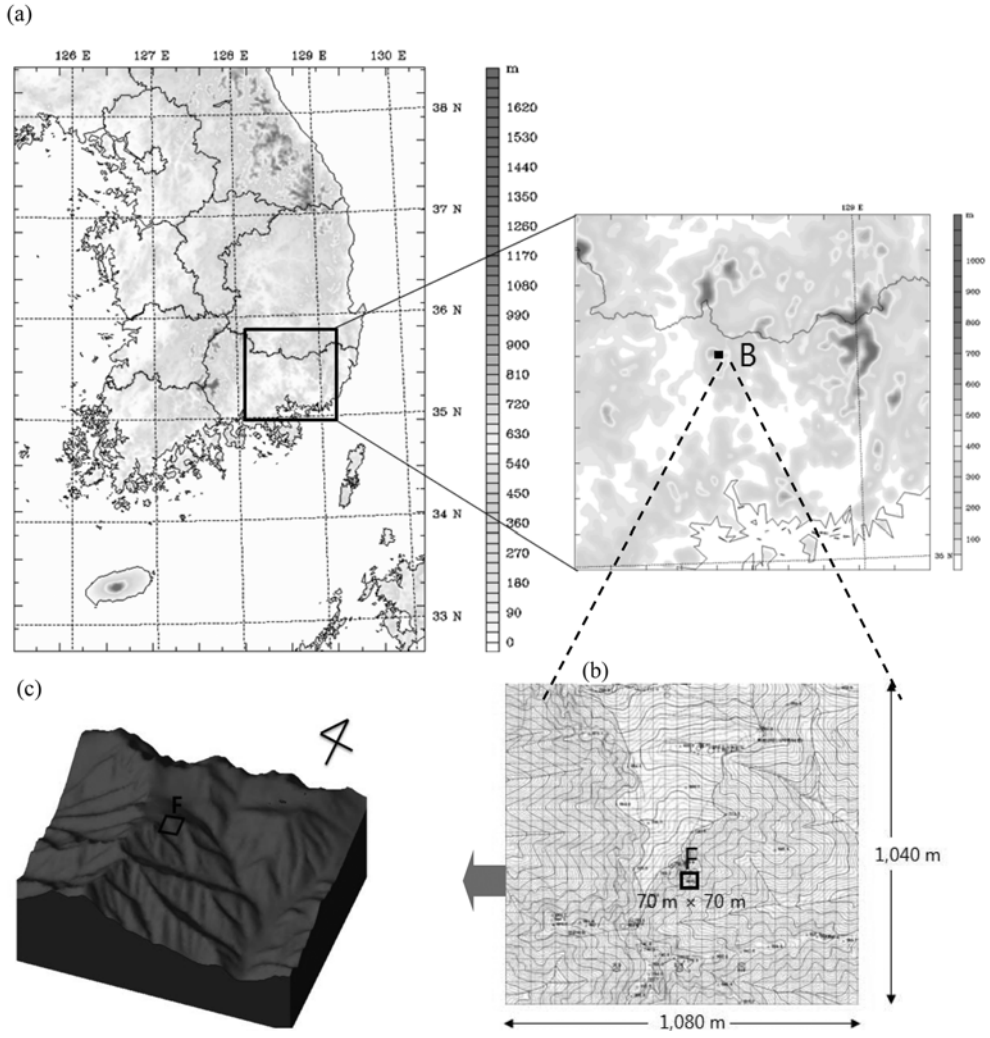

Fig. 1. (a) The WRF domain with 1km resolution topography around the place of the fire event ("B") at Mt. Hwawang, (b) Topography of the CFD_NIMR_SNU domain (the "B" region). The black square (region "F") in the region "B" is surface heating area with high temperature conditions. (c) 3-D topography of the CFD_NIMR_SNU domain.

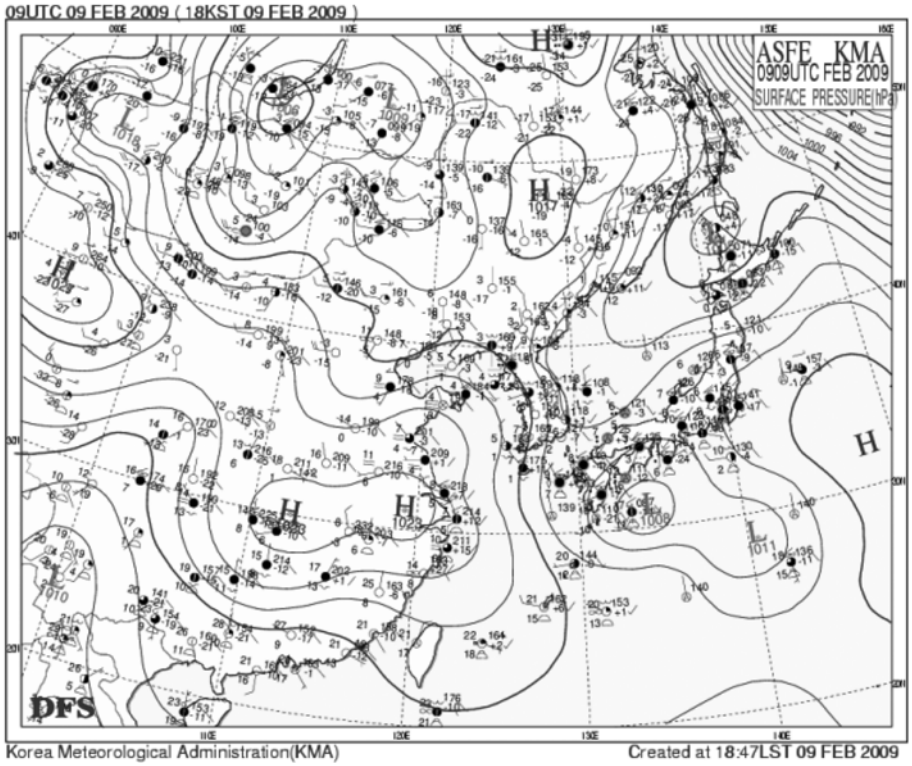

Fig. 2. Observed sea-level pressure field at 1800 LST 9 February 2009.

CFD_NIMR_SNU로서 Kim and Baik(2001, 2004)에 의해 개발되어 도시 지역 등에서의 상세한 기상 및 대기 확산 현상을 밝히는데 사용되는 삼차원 미기상 모형이다. 이 모형은 비압축성, 비정수, 비회전 방정식 계를 고려하며, 운동량과 질량, 스칼라, 그리고 난류 운동 에너지와 소멸률 등에 관한 지배 방정식은 엇갈림 격자계에서 유한 체적(finite volume)법으로 수치적으로 계산되고, SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘(Patankar, 1980)을 이용하여 차분화 된다(Baik *et al*., 2003; Kim and Baik, 2004). 이후 이 모형은 국립기상연구소의 기본과제인 '국지 기상 특성 진단 및 기상환경영향평가 기술 개발 연구(2006; 2007; 2008)' 사업을 통해 지속적으로 개선되었다. 특히, 열역학 방정식 과정이 추가됨으로써 기존의 CFD모형들이 해결하지 못한 기온 변화에 따른 기류변화를 잘 모사할 수 있도록 설계되었다. 그렇지만 이 모형은 개발 당시 도시 건물 주변에서의 흐름을 분해하기 위해 개발된 모형이어서 아직까지 식생효과는 포함하고 있지 않아 화재의 진화과정을 정확하게 모사하는 데는 한계가 있을 수 있다. 그러나 기본적으로 산악의 복잡한 지형 특성은 도시 지역의 건물의 복잡한 특성과 많은 부분 유사성이 있는 것으로 판단되며(Oke, 1987, Arya, 2001), 중규모 모형에서 분해하기 어려운 수 미터 규모의 복잡한 지형적 특성과 강제 가열 효과를 해석하기 위한 대안으로 적절한 도구라 사료된다.

Figs. 1(b)-(c)는 화왕산 주변지역의 축척 1:5,000의 수치 지도(국가지리정보유통망 자료 제공: www.ngic.go.kr)와 삼차원 지형을 나타내는 것으로 CFD_NIMR_SNU 모형의 실험 영역은 1,080m×1,040m×900m, 격자 크기는 Dx=7.5m, Dy=7.5m, Dz=3m이며, 총 적분시간은 4,800s, 적분 간격은 0.5s이다. 계산 결과는 매 600s 마다 저장되도록 설정하였으며, 해석을 위해 사용된 결과는 평균흐름이 정상상태가 되는 적분 후 3,600s인 경우를 주로 나타내었다. 또한 모델 영역의 해발최저고도는 478.1m 이나, 계산의 부하량을 최소화 하기 위하여 모델 영역 내 최저 고도를 0.0m로 가정 하였다. 계산 영역으로 유입되는 초기값은 1 km 수평해상도의 중규모 모형 WRF(Weather Research

and Forecasting, Skamarock *et al.*, 2005)로부터 모의된 결과를 이용하였다. 사용된 WRF 모형은 ARW (Advanced Research WRF) 버전 3.1이다. 여기서 2009년 2월 9일 1500 LST 사례의 4시간 후의 예측 결과를 사용하였다. 이 때 WRF 모형에서 예측된 화왕산 인근 지점(Fig. 1(a)의 B지점, 경도 128.5361°E, 위도 35.5438°N)의 10m 고도 바람은 u~0.3ms^{-1}, v ~ -6.8ms^{-1} 이었으며, 2m 고도 기온은 0.8°C, 지표면 온도는 -0.7°C 이었다.

화재 실험을 위해 Fig. 1(b)의 F영역인 발화지점(해발 757m 배바위 근처 가로 70m, 세로 70m)의 지면 온도를 300°C와 600°C로 가정하고 적분시간 동안 동일한 조건을 유지하도록 하였다. Kim *et al.*(1995)은 산불발생시 연소대상 초본식물의 하나인 참억새(Miscanthus)의 연소 상승온도의 범위를 350~400°C로 설정하여 식물 부위별 발염 및 최고 온도, 연소열량, 연소시간 등의 관계를 조사한 바 있다. 이를 감안하면 이 같은 실험 조건은 실제 어느 정도 적절한 방법이라 사료된다. 또한 시뮬레이션의 온도범위를 300°C와 600°C로 크게 설정한 이유는 지표온도에 따른 흐름의 특성을 좀 더 분명하게 구분지어 나타내기 위함이다. 모델 계산 공간으로 유입되는 초기 경계조건은 Kim and Baik(2004) 및 Baik *et al.*(2007)의 조건을 따랐다. 식 (1)과 (2)의 U_{in}, W_{in}는 입구 면에서의 바람, 식 (3)의 K_m는 초기 조건으로 주어지는 난류 운동 에너지 그리고 식 (4)의 ε_{in}는 난류 운동 에너지의 소멸률이다.

$$U_{in}(z) = \frac{U_*}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

$$W_{in}(z) = 0 \quad (2)$$

$$k_{in}(z) = \frac{U_*^2}{C_\mu^{1/2}}\left(1-\frac{z}{\delta}\right)^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{in}(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k_{in}^{3/2}}{\kappa z} \quad (4)$$

여기서 U_*는 마찰속도, z는 고도, z_0는 거칠기 길이(0.05m), δ는 경계층 두께(1,000m), κ는 폰 카르만(von Karman) 상수(0.4), C_μ는 실험적 상수(0.0845)를 나타낸다(모델 및 변수에 관한 상세한 사항은 Kim and Baik(2004)과 Baik *et al.*(2007)을 참고하기 바란다).

III. 결과 및 고찰

3.1. 화재 발생 전후 기상 특성

일반적으로 산불이 발생되기 위해서는 산림 내 가연물질인 연료와 열 및 산소가 필요하며 산불연소작용은 연료, 지형, 기상 등 환경인자에 의해 많은 영향을 받는다(http://ebook.forest.go.kr). 그 중 바람은 산불 확산과 진화에 영향을 주는 가장 중요한 요소이다. 강풍이 부는 경우 연료가 되는 산림을 빠르게 건조시킬 수 있으며, 산소의 공급을 증가시켜 연소를 촉진할 수 있는 상태로 될 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 대기가 적절하게 성층화 되었을 때 활강 강풍 현상 발생이 가능하게 되어 건조하고 강한 강풍(양지간풍)이 발생 할 수 있다. 이 때 산불 발생의 가능성이 높으며 산불이 발생할 경우 양지간풍에 의해 산불확산의 속도 또한 빨라지게 되는 것이다(Lee *et al.*, 2003). 이와 같은 이유로 우리나라 산불 역시 봄철 건조기에 계절풍이 겹쳐 동시다발로 확산되는 경향이 많다. Fig. 3은 화재 발생 당일 2009년 2월 8일의 화왕산에서 남서쪽으로 약 5.74km 떨어진 창녕 자동기상관측지점의 관측 값을 나타낸다. 이날 0900 LST 이전까지는 주로 남서기류의 영향을 받아 풍속이 강하지 않으나, 1200 LST이후 고기압과 저기압의 가장자리에 들면서 북풍계열의 풍향으로 바뀌면서 풍속이 세어지고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 1700 LST 전후로 풍속이 가장 강하게 나타나고 이후에 점차 감소되어 화재시점(1820 LST)에는 오히려 약화된 모습을 보인다. 이러한 특징은 앞서 설명한 Lee *et al.*(2003)의 산불발생에 따른 강풍발생 가능성의 기상현상을 충분히 설명해 주지 못한다. 즉 생활지역에 밀접하게 위치한 기상관측소의 바람 관측값은 화재 발생지점과의 거리, 고도, 지형특성 등을 고려할 때 고도가 높은 산악지역의 특성을 대표하기는 어려운 것으로 판단된다.

Fig. 4는 중규모 수치모형인 WRF를 이용하여 같은 날1300 LST를 예보 시작시간으로 하여 1km 수평해상도로 예측된 자료의 지면 고도 10m에서의 풍속을 1시간 간격으로 나타낸 것이다. 지상기상 관측자료에서 나타난 바와 같이 화재발생 이전 시각에는 화왕산 주변지역의 평균 풍속이 7m s^{-1} 이상으로 다소 강한 바람이 나타난다. 그러나 화재가 발생한 이후에는 5m s^{-1} 이하로 약화된 것을 확인할 수 있다. 이는 실제

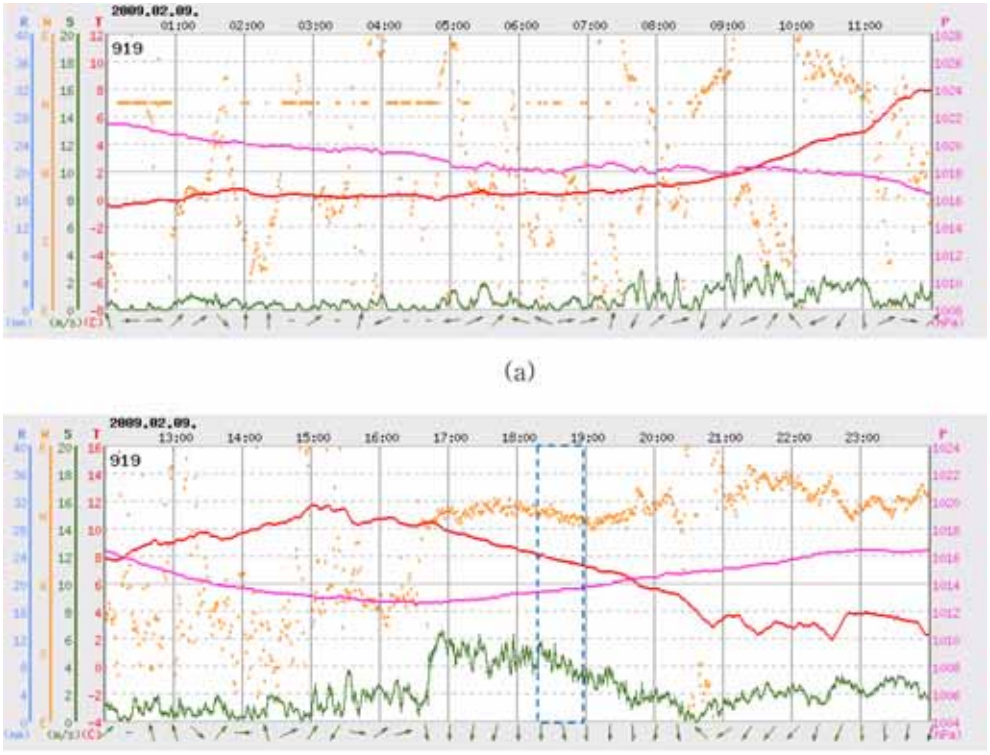

Fig. 3. Observed air temperature (T), wind direction (W), wind speed (S), and air pressure (P) at Changnyeong AWS near the Hwawang Mountain on 9 February 2009. (a) 01:00-12:00 LST, (b) 12:00-24:00 LST.

화재가 발생한 지점의 풍속 강화에 다른 요인들이 작용한 것으로 해석할 수 있다. 여기서 고려해야 할 사항은 중규모 수치 모형은 1km 해상도의 지형을 고려하므로 그 이하의 좀 더 복잡한 지형효과를 반영하기 어렵다는 특성이 있으며, 또한 강제적으로 가열된 지면효과를 나타내지 못하여 정확한 예측에 한계가 있을 수 있다. 그리하여 그 이하의 규모에 대한 정확한 해석을 위해서는 고해상도 기상관측과 수치 모의가 필요하게 된다. 이에 대한 한계를 극복하기 위해 다음 절에서 계산 유체 역학 모형을 이용하여 국소규모 지면 가열에 따른 상세 바람장 해석에 관한 모의 결과를 제시하기로 한다.

3.2. CFD_NIMR_SNU 모의 결과

3.2.1. 가열강도에 따른 바람장 특성 분석

복잡한 지형으로 이루어진 지역에서 국소 지면 가열이 없는 경우를 포함하여 가열 온도가 300°C인 경우와 600°C인 경우에 대하여 수치 모의한 결과를 분석하였다. 각각의 경우에 대한 수평 바람장 분포와 연직 바람 분포를 Figs. 5-7에서 나타내었다.

Fig. 5는 대기의 평균 흐름이 정상상태가 되는 적분시간 3,600s 일 때, 지면 가열 조건이 없을 때와 300°C와 600°C로 국소가열 조건을 주었을 때의 수평 바람벡터와 상승류를 지면고도 1.5m와 10.5m 고도에서 나타낸 것이다. 국소 지면 가열이 없는 경우(Fig. 5(a)-(b)), 산 정상부 풍상측에서 지형효과에 의해 수평 바람이 강하게 불고 산정상을 넘어가면서 그 후면에서 풍속이 약화되는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 복잡하게 존재하는 지형 계곡에서는 접근류 내의 평균 시어와 난류에 매우 민감하지만 지형적으로 유도된 흐름이 언덕의 면비, 경사도와 모양에 따라 결정되기 때문에 이 같은 흐름은 도심의 밀집한 빌딩군에서 나타나는 건물 주변의 흐름체계와 유사하다(Arya, 2001). 그러나 화재에 의해 강제적으로 강한 지면 가열이 있는 경우(Fig. 5(c)-(f)), 가열 지역의 흐름이 불안정해지면서 상승류가 나타나고 있다. 게다가 지면 가열이

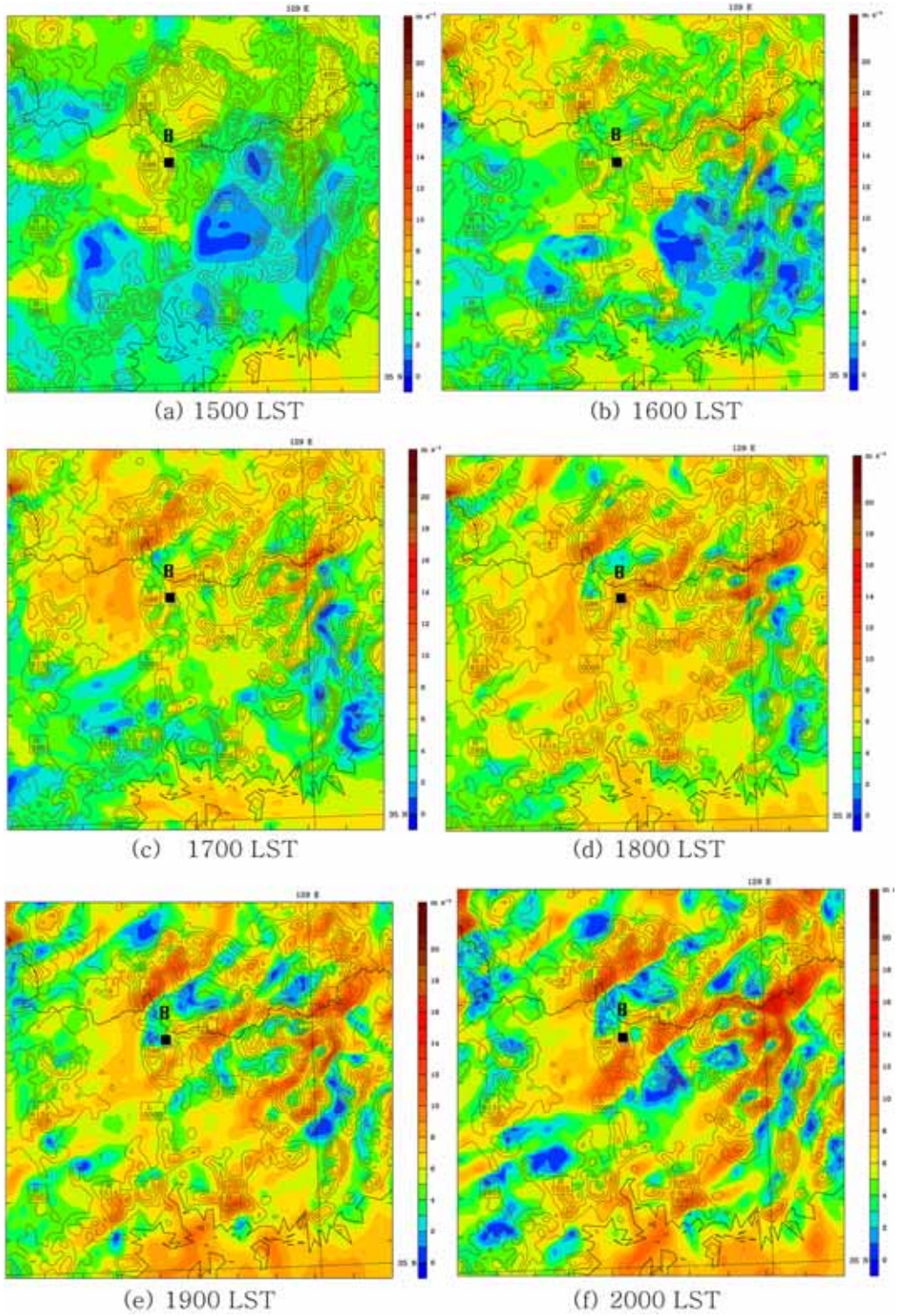

Fig. 4. Distribution of simulated wind speed in color shades from WRF in the height of 10 m at t = (a) 15:00, (b) 16:00, (c) 17:00, (d) 18:00, (e) 19:00, and (f) 20:00 LST. The domain area is the same as in Fig. 1b and the black squares indicate the region "B". Wind speed is shaded on a color scale.

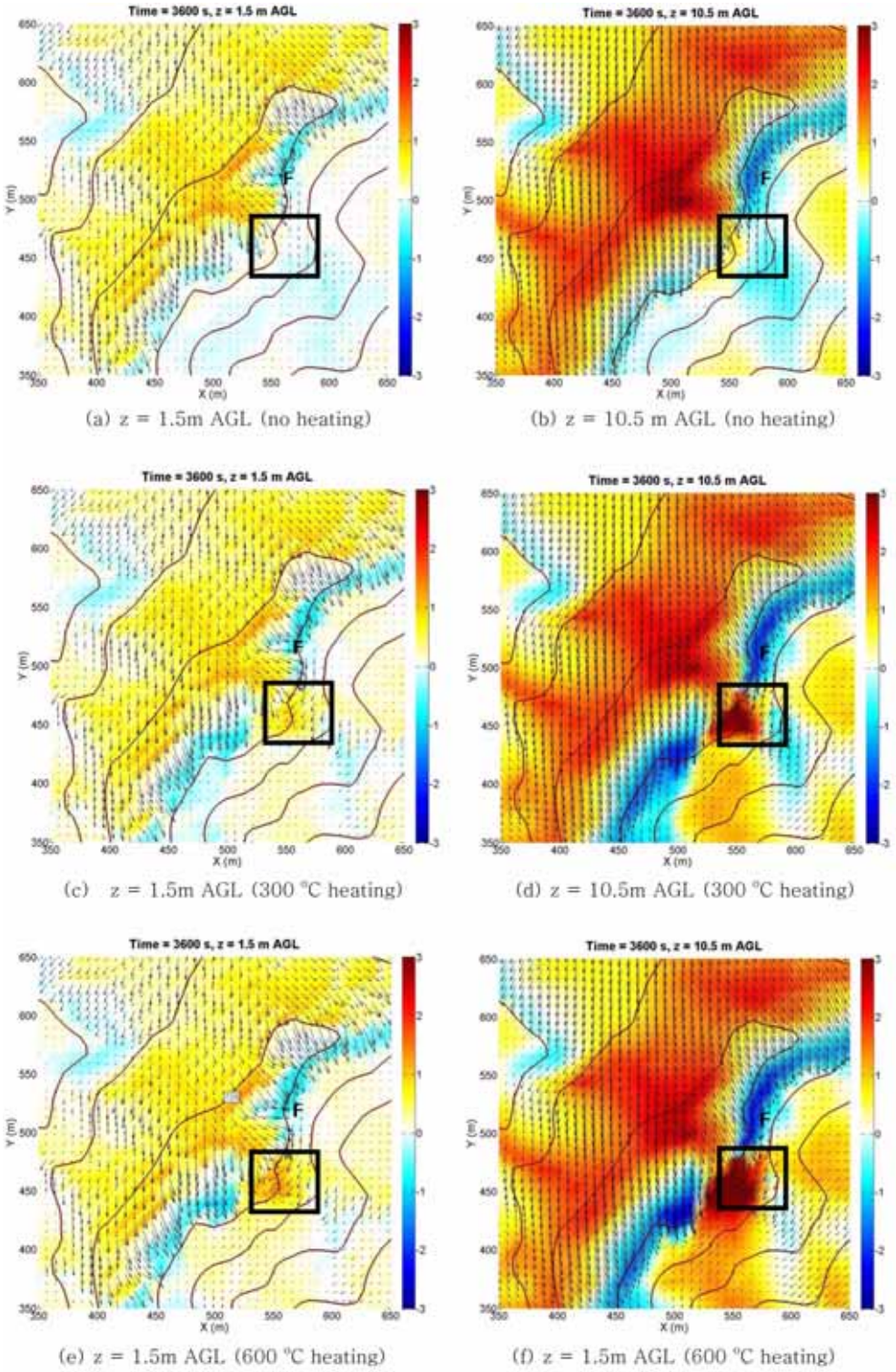

Fig. 5. Horizontal wind fields with shaded vertical wind velocity at t = 3,600 s and z = 1.5 m AGL (a, c, e) and 10.5 m AGL (b, d, f) in the cases of no surface heating (a, b), 300°C surface heating (c, d), and 600°C surface heating (e, f). Black squares indicate the surface heating area (region "F").

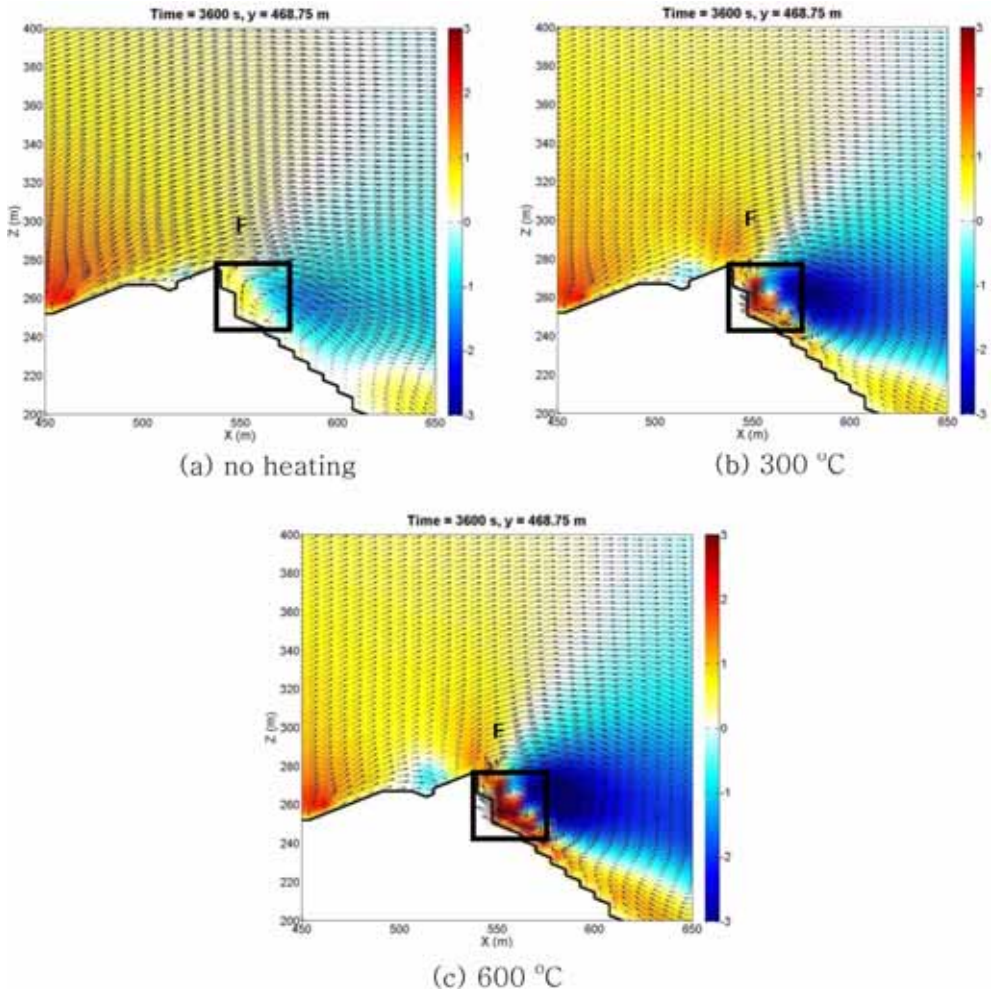

Fig. 6. Vertical wind fields with shaded vertical wind velocity at t = 3,600 s in the cases of (a) no surface heating, (b) heat temperature = 300°C, and (c) heat temperature = 600°C. Black squares indicate the surface heating area (region "F").

없을 때 나타나던 풍상측 수평바람이 풍하측 고온 가열에 의해 발생한 상승 기류에 가로막혀 그 세기가 약해지고 수렴장이 발생함으로써 수평 바람장의 변화가 있음을 알 수 있다. 이는 특정 지역에 강한 가열이 일어난 경우 난류 특성 변수인 강화된 현열 플럭스가 열적 상승을 유도 할 수 있고, 다른 지역에 비해 열적 저기압이 형성되어 바람의 수렴이 유도됨으로써 바람장 변화에 기여할 수 있다는 선행 연구 내용과 일치한다(e.g., Clark *et al.*, 1996b; Patton and Coen, 2004; Lee *et al.*, 2008). 또한, 가열 온도가 높아질 수록 가열 지점의 상승류와 바람벡터의 세기와 방향이 크게 변화함을 알 수 있다. 즉, 가열의 강도가 세어질수록 상승류가 나타나는 면적이 증가할 뿐 아니라 수평적으로 수렴이 이루어지는 높이도 산 정상부 쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 한편, 10.5m 고도에서 본 수평 바람장(Fig. 5(b), (d), (f))은 강한 가열이 주변에 더 강한 수평 바람과 상승 하강기류를 유도하고 있음을 알 수 있다. 특히, 600°C의 지면 가열 조건에서는 가열이 있기 전에 나타나던 하강기류가 사라지고 산 사면 풍하측 수십 m까지도 상승기류가 나타난다.

Fig. 6은 적분시간 3,600 초일 때, 지면 가열 조건이 없을 경우(Fig. 6(a))와 있는 경우(Fig. 6(b)-(c)) 측면에서 본 연직 바람분포와 연직류를 나타낸다. 지면 가열이 있는 경우 바람이 불어오는 산 정상 후면에서 더 강해진 상승 기류와 바로 아래 산 사면에서

유도된 하강 기류에 의해 연직으로 소용돌이가 형성되고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 이 소용돌이가 지상의 바람을 느리게 만들어 돌풍 발생의 조건을 갖는 것으로 사료된다. 이 경우 제시된 그림에서 연직으로 최대 30m까지 기류가 상승하고 있음을 파악할 수 있다. 즉, 지면 가열 강도가 강할수록 부력에 의한 연직상승과 하강기류의 경도가 강화되는 것으로 사료되며, 이 때의 소용돌이는 풍하측 산사면 근처에서 강한 상승 기류를, 그 위 상층부에서 강한 하강 기류를 가지게 된다. 이는 Kwak *et al.*(2008)에 의해 연구된 도시 도로 협곡에서 지면 바닥 가열이 있을 때 건물의 풍하측 후면에서 형성된 소용돌이가 풍하측 건물 근처에 강한 하강기류를 유발시켜 역학적으로 유도된 흐름과 열적으로 유도된 흐름이 결합하여 생성된 소용돌이 결과와도 유사하다(Kwak *et al.*, 2008). 또한 제시된 그림에서 가열이 없을 때 약하게 나타나던 풍상측의 하강 기류는 가열 강도가 강할수록 세어지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 비록 국소 영역이지만 고온의 지면 가열이 주변의 흐름 특성에도 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 따라서 지면 가열이 더 강화될 경우 고온에 의한 영향은 더 확대될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 가열이 없을 때와 있을 때 적분시간 3,600s에서 화재 발생 중심 지점(해발고도 740.6m)의 수평풍속(uv 평균풍속, Fig. 7(a))과 연직풍속(w, Fig. 7(b))을 지면에서의 고도별로 나타낸 것이다. 수평풍속의 경우(Fig. 7(a)) 가열이 없을 때 고도에 따라 지표 근처(약 30m)에서 급격히 증가하다가 일정해 지는 경향을 보인다. 그러나 300°C및 600°C로 가열된 경우 지면 근처 수평풍속의 최대값이 가열 강도에 따라 감소한 모습을 보이고 있다. 가열에 따른 수평풍속의 세기는 300°C로 가열한 경우 지면고도 15m지점에서 가장 크게 감소되며(약 3.1m s^{-1} 감소), 600°C로 가열한 경우 지면에서 21m 지점에서 가장 크게 감소한다(약 3.4m s^{-1} 감소). 그러나 세 조건에서의 수평 풍속은 지면고도 약 200m 이후부터는 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 이 지점에서 가열에 의해 수평풍속의 영향이 지면고도 약 200m 고도까지 이르는 것으로 판단할 수 있다. 연직풍속의 경우(Fig. 7(b)) 가열이 없을 때 지면 근처에서 상승류가 가장 크게 나타나며 고도에 따라 점차 감소하다가 일정해지는 경향을 보인다. 그러나 지면의 강제 가열이 있는 경우 가열 강도에 따라 지면근처에서 부는 상승류가 강화된 것을 알 수 있다. 가열에 따른 상승류의 세기는 300°C로 가열한 경우 지면고도 24m지점에서 가장 크게 증가하며(약 0.7m s^{-1} 증가), 600°C로 가열한 경우 지면에서 15m 지점에서 가장 크게 증가(약 1.1m s^{-1} 증가)하고 있다. 이 때 지면가열의 강도가 강할수록 지면근처에서 상승류의 세기가 더 강해진 것으로 파악된다. 하지만 연직풍속의 경우 또한 지면고도 약 200m 이후부터는 동일하게 나타나는 것으로 보인다. 이 같은 결과들은 Figs. 5-6에서 언급된 바와 같이 지면의 고온 가열이 풍하측 사면에서 수평 속도와 연직 풍속의 변화에 영향을 주게 된 한 예라 할 수 있다. 그러나 본 사례에 적용된 CFD_NIMR_SNU 모형에서는 복사 전달에 의한 대기의 가열효과가 충분하게 고려되지 못하여 흐름 특성이 다소 약하게 나타난 것으로 판단된다. 향후 이에 대한 보완이 이루어진다면 복사 전달 효과에 의한 연직 풍속이 더욱 강화될 수 있을 것으로 보이며, 좀 더 현실적인 모의가 가능할 것으로 판단된다.

3.2.2. 난류 운동 에너지 특성 비교

대기 중의 공기 흐름은 난류 흐름 특성을 가지며, 역학적으로 생성된 난류 운동 에너지와 열적으로 형성된 난류 운동 에너지로 구분할 수 있다(Tennekes and Lumley, 1973). 역학적으로 생성된 난류는 중립 안정도를 가진 바람이 강한 밤에 지배적이며, 지표 기복이 크고 풍속이 강할 때 강해진다. 반면, 열적 난류는 주로 바람이 아닌 하층대기의 급 가열로 인하여 공기의 밀도가 작아져 부력항과 지표면의 마찰력에 의해 바람의 비틀림(tilting)에 의한 상승이 일어날 때 위치 에너지가 커져 발생한다. 따라서 지면의 가열 효과가 있는 산악지역 경우 두 가지 형태의 난류가 동시에 나타날 수 있게 되는 것이다. Fig. 8은 적분 후 3,600sec일 때 지면고도 1.5m(Fig. 8(a), (c), (e))와 10.5m(Fig. 8(b), (d), (f))에서 강제 지면 가열 유무에 따른 난류 운동 에너지 생성 항을 화재가 일어난 지점(Fig. 1의 F영역) 주변을 대상으로 각각 나타낸 것이다. 먼저 지면에 거의 인접한 고도 1.5m(Fig. 8(a), (c), (e))에서 북서풍이 부는 경우 난류 운동 에너지의 분포는 세 경우 모두 산 정상부에서 다소 강한 분포를 보이며, 이는 역학적 난류로 설명될 수 있다. 그러나 가열 지역 F에서 가열이 없는 경우(Fig. 8(a))에는 열적 난류가 생성되지 않으나 300°C(Fig.

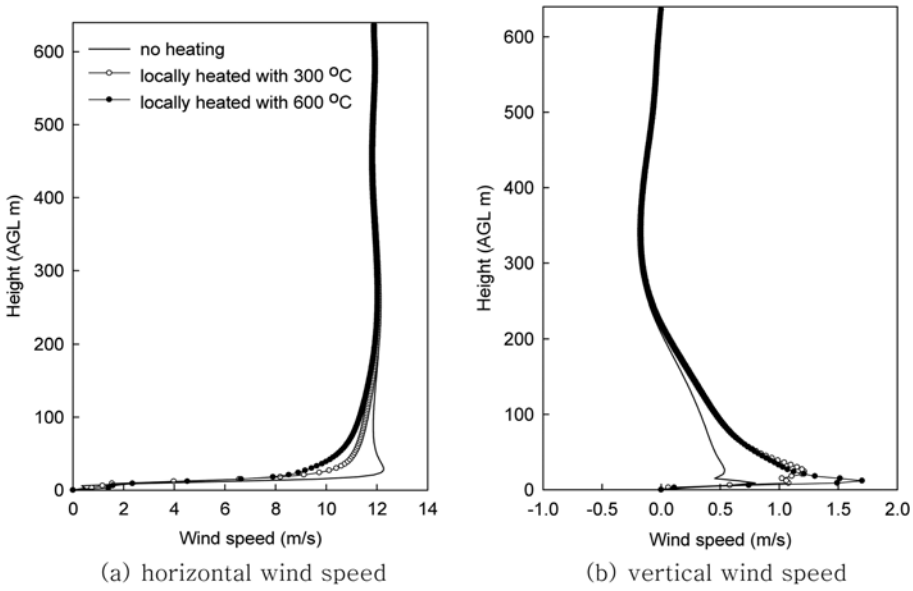

Fig. 7. (a) Horizontal and (b) vertical wind speeds at the center of the region "F" at t = 3,600 s with (open and closed circles) and without (black line) the locally imposed surface heating.

8(c))로 가열조건을 주었을 때 약하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 600 °C(Fig. 8(e))로 가열조건을 준 경우에는 더욱 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

한편, 지면고도 10.5m(Fig. 8(b), (d), (f))에서 난류 운동 에너지의 분포는 지면고도 1.5m일 때에 비해 전반적으로 강한 분포를 보인다. 또한 지면 고도에서는 주로 산 능선부를 중심으로 난류 운동 에너지가 강하게 나타났으나, 이 고도에서는 산 능선보다는 산 사면과 산정상부에 바로 인접한 풍하측 지역에서 더욱 강한 에너지 분포를 보인다. Fig. 1의 F지역에서 강제 가열이 없는 경우(Fig. 8(b))에는 풍하측 후면의 사면에서 난류 운동 에너지 분포가 나타난다. 그러나 300°C(Fig. 8(d))로 가열조건을 주었을 때는 가열지역 F를 중심으로 난류 운동 에너지가 강해지며 후면에서 그 인근 지역까지 강화된 모습을 확인할 수 있다. 또한 600°C(Fig. 8(f))로 가열조건을 준 경우에는 난류 운동 에너지가 더욱 강하게 분포한다. 이 같은 산악지형 풍하측 사면의 강제 가열에 의한 열적 난류의 생성은 앞 절에서 언급한 Figs. 5-7의 가열지역 주변의 수평 바람의 변화와 강한 상승류의 발생 가능성을 뒷받침 해 주는 것이라 할 수 있으며, 이로 인해 발생된 운동 에너지가 풍하측의 강풍 발생을 유도하게 된 것이다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 CFD_NIMR_SNU 모형을 이용하여 산악지역 화재 사건을 사례로 복잡한 지형과 지면 국소 가열이 대기 흐름특성에 어떠한 영향을 주는지 분석하였다. 특히, 중규모 기상 모형에서는 해상도의 한계로 모의되지 못한 지면 가열에 의한 바람장의 흐름을 이 모형에서는 잘 모사하는 것으로 나타났다. 그 결과 국소 지면가열이 없는 경우 풍상측에는 수평바람이 강하고 발생지역에서 바람이 약한 상태였으나, 국소 지면가열이 존재하는 경우에는 고온으로 가열된 지역에서 연직으로는 강한 상승류가, 수평적으로는 수렴속이 생성됨을 확인하였다. 이 같은 흐름이 화재발생 지역 주변을 대상으로 와류 발생을 유도할 수 있음을 알았다. 또한 가열 온도가 높을수록 수평 수렴과 상승류가 강화되었으며, 이는 열적인 효과가 난류 운동 에너지 변화에 영향을 준 것으로 해석된다. 이 결과를 통해 복잡한 지형에서 지형적 특성과 열적 특성이 결합되어 국지적으로 강한 소용돌이가 유도될 수 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라 실제 산불 사례에서 강한 지면가열에 의해 발생한 돌풍의 수직 상승 높이가 약 20m에 이르는 점을 감안하면 본 실험연구가 산악 화재의 효과를 어느 정도 잘 모사함을 확인할 수 있었다.

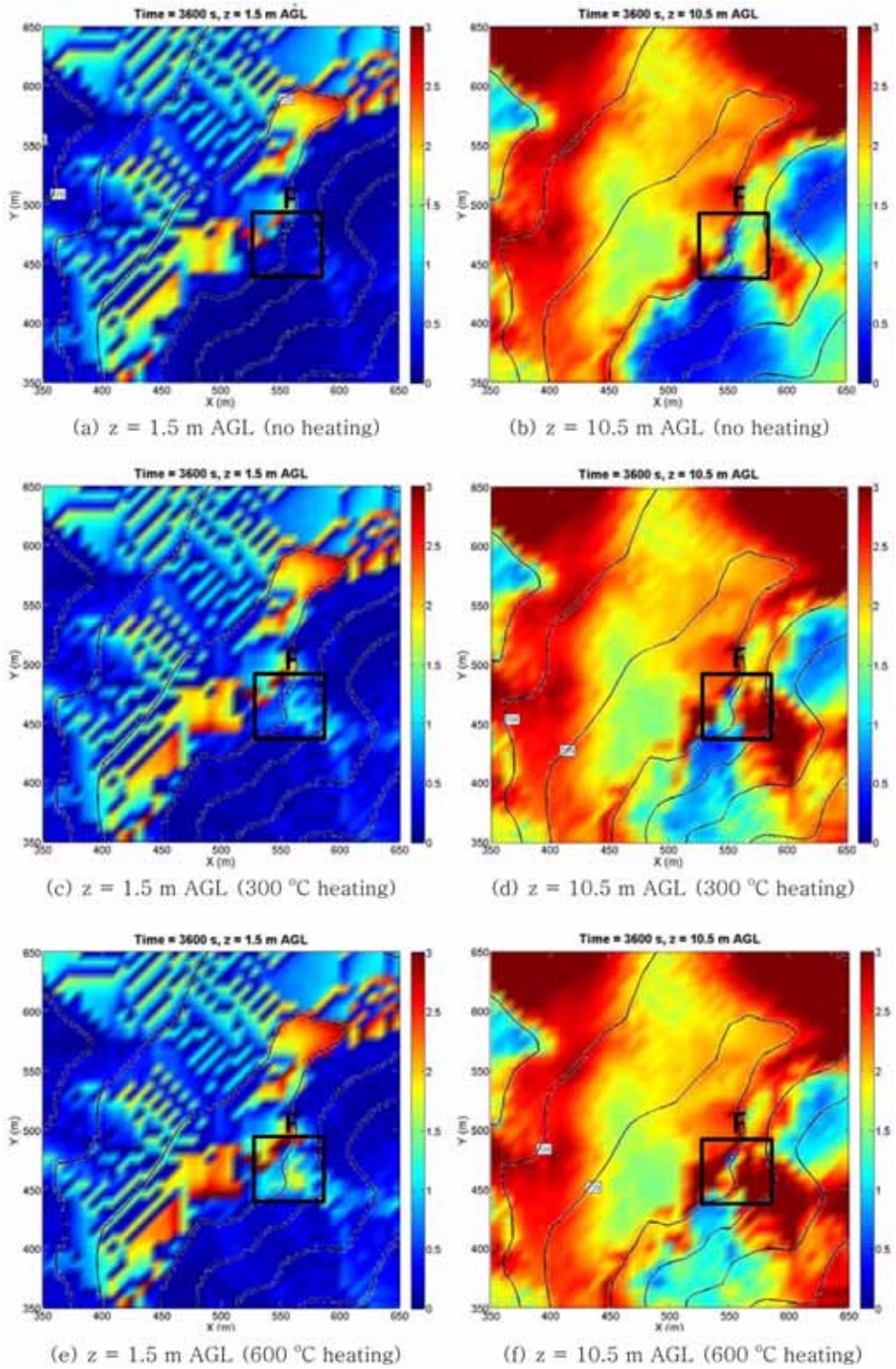

Fig. 8. Turbulent kinetic energy fields at 3,600 s in the cases of no surface heating (a, b), 300°C (c, d) and 600°C surface heating (e, f) at z = 1.5 m and 10.5 m AGL. Black squares indicate the surface heating area (the region "F" on Fig. 1).

이 결과는 복잡한 지형의 산악기상 분석에 계산 유체 역학 모형의 활용 가능성을 시사한다. 즉 현재 3시간 간격으로 제공되는 기상청의 중규모 수치 예보자료를 초기조건으로 하여 특정 지역에 대한 바람장을 미리 예측함으로써 산불 발생가능 지역의 조기 대비를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 아직까지 이 모형은 이상적인 대기 흐름상태를 모사하므로 실용화되기 위해서는 많은 노력이 요구된다. 향후 산곡풍과 같은 중규모 흐름의 효과를 적절하게 반영하기 위해 복사 전달 과정이 포함된 지표 물리 과정의 개선과 중규모 모형과의 결합 연구 등에 관한 다양한 실험 및 검증 연구가 지속적으로 수행될 것이다.

적 요

2009년 2월 9일 화왕산에서는 대보름 행사인 '억새 태우기'가 많은 사람들이 지켜보는 가운데 시작되었지만 예상하지 못한 강풍으로 산불로 확대되어 많은 인명피해가 발생하였다. 본 연구에서는 3차원 계산 유체 역학 모형인 CFD_NIMR_SNU 모형을 이용하여 복잡한 산악지역에서 국지적 가열에 따른 바람장을 모사함으로써 이날 발생한 산악 화재의 특성을 분석하였다. 화재가 발생한 지역의 지표 온도는 가열이 없을 때, 300°C 및 600°C 일 때의 3가지 가열 강도조건을 주어 모사하였다. 지표 가열은 화재 발생 지역 중앙에서 수직 바람장을 0.7m s^{-1}(300°C)와 1.1m s^{-1}(600°C)만큼 증가시켰다. 난류운동에너지는 화재의 열에너지 자체 및 열적 순환에 의해 증가된 운동에너지에 의해 증가하였다. 화재로 인한 열은 복잡한 지형과 강한 경계 바람 조건과 함께 화왕산의 예상하지 못한 난류와 강풍 조건을 유도하였다. CFD_NIMR_SNU 모형은 인명피해를 발생시킨 산불을 이해하는데 도움이 되는 귀중한 분석 자료를 제공하였다. 모사 결과에 따르면 화재 발생 지점은 풍상측의 높은 지형으로 인하여 화재 발생 직전까지는 바람이 거의 억제되었던 것으로 보인다. 이러한 바람의 억제는 화재 발생에 따른 뜨거운 공기의 상승과 강한 경계 바람 조건에 의해 쉽게 되돌려졌다. 즉, 강한 경계 바람과 화재로 인한 가열이 함께 작용하여 강한 난류가 만들어졌고, 여러 명의 사상자가 발생한 산악 화재로 확산되었던 것이다. CFD_NIMR_SNU 모형은 중규모 모형과의 결합을 통하여 좁은 영역의 화재로 인한 난류 예보를 생산하는 등 산불 예방을 위해 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 "국지 기상 특성 진단 및 기상환경영향평가 기술개발 연구"와 "녹색성장 지원기술개발연구"의 지원으로 수행되었습니다. 좋은 연구결과가 될 수 있도록 조언해 주신 서울대학교 백종진 교수님과 부경대학교 김재진 교수님께 깊은 감사를 드리며, 그림 작성에 도움을 주신 국립기상연구소 서범근씨께도 진심으로 감사를 드립니다. 또한 훌륭한 논문으로 거듭날 수 있도록 많은 조언을 해 주신 심사위원님 및 편집위원님께도 감사드립니다.

REGERENCES

Arya, S. P., 2001: *Introduction to micrometeorology* (2nd ed.). Academic Press, 420pp.

Baik, J.-J., J.-J. Kim, and H. J. S. Fernando, 2003: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *Journal of Applied Meteorology* **42**, 1636-1648.

Baik, J.-J., Y.-S. Kang, and J.-J. Kim, 2007: Modeling reactive pollutant dispersion in an urban street canyon. *Atmospheric Environment* **41**, 934-949.

Clark, T. L., M. A. Jenkins, J. Coen, and D. Packham, 1996a: A coupled atmosphere-fire model: convective feedback on fire-line dynamics. *Journal of Applied Meteorology* **35**, 875-901.

Clark, T. L., M.A. Jenkins, J. L. Coen, and D. R. Packham, 1996b: A coupled atmosphere-fire model: role of the convective Froude number and dynamic fingering at the fireline. *International Journal of Wildland Fire* **6**(4), 177-190.

Jang, W., and H.-Y. Chun, 2008: Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere* **18**(3), 207-224. (in Korean with English abstract)

Kamial, J. C., and J. J. Finnigan, 1994: *Atmospheric Boundary Layer flows*,. Oxford University Press 289pp.

Kim, J.-J., and J.-J. Baik, 2001: Urban street-canyon flows with bottom heating. *Atmospheric Environment* **35**, 3395-3404.

Kim, J.-J. and J.-J. Baik, 2004: A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k-ε turbulence model. *Atmospheric Environment* **38**, 3039-3048.

Kim, K.-S., I.-S. Jang, and J.-S. Lee, 1995: Catch-fire Temperature and Amount of Combustion-Heat on the fuel of Miscanthus type. *Korean Joural of Ecology* **18**(4), 483-491. (in Korean with English abstract)

Kwak, K.-H., J.-J. Baik, and S.-H. Lee, 2008: Modeling the diurnal variation of urban street canyon flow.

Proceedings of the AUTUMN Meeting of KMS 2008, Korean Meteorological Society, 312-313. (in Korean)

Lee, H. W., W.-B. Jeon, S.-H. Lee, and H.-J. Choi, 2008: Analysis of Numetical Meteorological Fields due to the detailed surface data in complex coastal area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **24**(6), 649-661. (in Korean with English abstract)

Lee, S.-Y., S.-Y. Han, S.-H. An, M.-B. Lee, and J.-S. Oh, 2001a: Regional analysis of forest fire occurrence factors. *Proceedings of the Korean Society Agricultural and Forest Meteorology Conference*, The Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology, 123-126.

Lee, S. Y., S.-Y. Han, S.-H. An, J.-S. Oh, M.-H. Jo, and M.-S. Kim, 2001b: Regional analysis of forest fire occurrence factors in Kangwon province. *Korean Jouranl of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(3), 135-142. (in Korean with English abstract)

Li, X.-X., C.-H. Liu, D. Y. C. Leung, and K. M. Lam, 2006: Recent Progress in CFD modeling of wind filed and pollutant transport in street canyons. *Atmospheric Environment* **40**, 5640-5658.

Miller, P. P., and D. R. Durran, 1991: On the sensitibity of downslope windstorms to the asymmetry of the mountain profile. *Journal of Atmospheric Science* **48**, 1457-1473.

National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2006: Diagnosis of Characteristics of Local Meteoroloy and Development of Techniques for the Meteorological Environmental Impact Assessment (I). 218pp. (in Korean with English abstract)

NIMR, 2007: Diagnosis of Characteristics of Local Meteoroloy and Development of Techniques for the Meteorological Environmental Impact Assessment (II). 153pp. (in Korean with English abstract)

NIMR, 2008: Diagnosis of Characteristics of Local Meteoroloy and Development of Techniques for the Meteorological Environmental Impact Assessment (III). 119pp. (in Korean with English abstract)

Oke, T. R., 1987: *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Routledge 435pp.

Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York pp. 126-131.

Patton, E. G. and J. L. Coen, 2004: WRF-Fire: A coupled atmosphere fire module for WRF. *Preprint of WRF/MM5 Users's Workshop*, Boulder, June 22-25, 49-63. Richard, Ep. P., Mascart, and E. C. Nickerson, 1989: The role of surface friction in downslope windstorms. *Journal of Applied Meteorology* **28**, 241-251.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Technical Note NCAR/TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 88 pp.

Tennekes and J. L. Lumley, 1973: *A first course in turbulence (2nd printing)*. The MIT Press, 300pp.

Won, M. S., K. S. Koo, M. B. Lee, and Y. M. Son, 2008: Estimation of non-CO_2 Greenhouse Gases Emissions from Biomass Burning in the Samcheok Large-fire Area Using Landsat TM imagery. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(1), 17-24. (in Korean with English abstract)

이재규, 권태영, 정태경, 고숙진, 2003: 국가 산악기상센터의 역할과 발전에 관한 연구, 연구보고서, 53pp.

http://ebook.forest.go.kr(2009. 8. 1)

http://www.ngic.go.kr(2009. 2. 11)

http://gallery.encyber.com(2009. 11. 24)