

산림 미기상 해석을 위한 최적모델 개발

이석준¹ · 최용한¹ · 정재희¹ · 원명수² · 임규호^{1*}

¹서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부,

²국립 산림과학원 산림보전부 산림방재연구과

(2015년 4월 2일 접수; 2015년 4월 9일 수정; 2015년 6월 28일 수락)

Development of Optimal Modeling System for Analyzing Mountain Micrometeorology

SukJun Lee¹, YongHan Choi¹, JeaHee Jung¹, MyoungSoo Won² and Gyu-Ho Lim^{1*}

¹School of Earth and Environmental Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

(Received April 2, 2015; Revised April 9, 2015; Accepted June 28, 2015)

ABSTRACT

The extreme weather conditions become frequent and severe with global warming. To prevent and cope forest disaster like a forest fire, we need an accurate micrometeorological prediction system for mountainous regions. This study addressed the forest fires occurred at Bonghwa and Gangneung in March, 2013. We constructed and optimized the prediction system that were required to interpret and simulate the forest micrometeorology. At first, we examined WRF physical sensitivity. Subsequently, KMA AWS observation data were assimilated using three-dimensional variation data assimilation method. The effectiveness of the assimilation was examined by using AWS observations enhanced with the Forest Research Institute observations. Finally, The 100 meters spatial resolution wind data were obtained by using the MUKLIMO for the given wind vector from WRF.

Key words: Forest fire, Forest micrometeorology, 3D-var, MUKLIMO

I. 서 론

산불은 산사태와 산림 병해충등과 함께 대표적인 산림 재해 가운데 하나로, 광범위한 지역에 빠른 속도로 피해를 입히는 특성을 갖고 있다. 산불은 수목의 손실로 인한 경제적인 피해 외에도 토양 유출과 이로 인한 산사태 피해, 생물의 다양성 감소, 관광객의 감소 등 다양한 측면의 손실을 야기한다. 한반도는 산악 지역의 면적이 넓고 산림이 밀집되어 있기 때문에 산불이 한 번 발생하면 대형 산불로 확대될 가능성이 높다(Lee *et al.*, 2013). 또한 최근 연구 결과들에 따르

면, 지구온난화와 연관된 기온 상승, 상대 습도 감소, 강수 일수 감소 등에 의해 향후 산불의 발생, 특히 대형 산불의 발생 가능성이 높아질 것으로 예상된다(Piñol *et al.*, 2000). 우리나라는 지구온난화와 연관된 기후 변화로 인해 산림 기상 환경에 많은 변화가 생길 것으로 예상되며, 이와 관련하여 산불, 산사태 등 산림 재해의 발생 횟수와 강도 또한 증가할 것으로 보인다.

산림 재해로 인한 인명 및 재산 피해를 줄이기 위해서는 산림 재해에 대한 예측 및 대응 기술이 확립되어 있어야 한다. 기상 요소 가운데, 산불의 경우에



* Corresponding Author : Gyu-Ho Lim
(gyuholim@snu.ac.kr)

는 바람의 세기 및 방향, 습도 등이, 그리고 산사태의 경우에는 강수량 등이 중요한 역할을 한다. 산림 지역에 대한 기상 요소를 정확하게 예측할 수 있는 시스템의 확립을 통해 산불과 같은 대형 산림재해의 발생 가능성을 예측하고, 산림재해가 발생하였을 경우 효과적으로 대응하여 그 피해를 줄이는 노력이 필요하다.

산림 지역에 대한 기상 요소를 정확하게 예측할 수 있는 시스템은 크게 세 부분으로 구성하였는데, 중규모 모형인 WRF(Weather Research and Forecasting) 모형, WRF 모형의 초기 조건을 개선하기 위한 자료 동화 시스템인 WRF-DA 시스템, 그리고 WRF 모형 모의 결과를 입력 자료로 역학적 다운스케일링을 하기 위한 MUKLIMO(Micro scale Urban Climate Model) 모형이 세 부분을 이룬다. 중규모 모형인 WRF 모형의 모의 결과는 다음과 같은 역할을 한다. 첫째, 자료 동화를 위한 배경장을 제공하며, 자료 동화 과정에서는 배경장, 관측, 그리고 각각의 오차 공분산을 이용하여 향상된 초기 조건인 분석장을 생성한다. 분석장은 다시 WRF 모형의 초기 조건으로 사용되어, 최종적인 WRF 모형의 모의 결과를 산출한다. 둘째, WRF 모형의 수행을 통해 1km 해상도의 바람, 온도, 습도, 강수량 등 산림 미기상 요소에 대한 고해상도 실시간 예측이 가능하다. 셋째, WRF 모형 1km 해상도 모의 결과는 MUKLIMO 모형의 입력 바람장으로 사용되어 약 100m 해상도의 3차원 바람장 산출이 가능하다.

또한 WRF-DA 시스템은 초기자료에 관측자료를 동화함으로써 초기조건 불확실성을 줄이기 위한 과정을 거친다. 최정희 등(2002)은 부산에서 열린, 아시아 요트 선수권 대회 지원을 위해 부산 단기간 예측 시스템에 AWS 자료동화를 적용한 바 있고, Choi *et al.*(2009)은 중규모 모형인 MM5와 객관 분석 방법을 이용하여 AWS 관측 자료를 동화하는 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 이와 같은 과정을 위하여, 기상청과 산림과학원에서 설치한 AWS(Automatic Weather System)를 이용하여 관측자료를 동화 하였다.

마지막으로 산불의 예보와 대응에 필수적인 바람장 예보는 적어도 수 백 미터 규모의 모의 결과를 필요로 한다. 3차원, 고해상도 바람장을 얻기 위하여 Boo *et al.*(2000)은 MUKLIMO 모형을 이용하여 여의도 광장의 공원화 사업이 가져온 바람장의 변화를 살펴본 바 있고, Ahn *et al.*(2003)은 복잡한 구조를 갖는,

서울, 그리고 대구 월드컵 경기장 부근의 10m 해상도 바람장을 수치 모의하였다. 또한 Min *et al.*(2005)은 MUKLIMO 모형을 이용하여 경북대학교 캠퍼스 내 상세 바람장을 모의 하였다. 본 연구에서는 산악지역의 고해상도 바람장 자료를 확보하기 위해 MUKLIMO를 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 사례선정

2013년 1월 1일부터 산악 기상망 AWS관측 자료가 축적됨에 따라, 산악 기상망 자료의 유용성과 활용 가능성을 조사하기 위하여 산악 기상망 AWS가 설치된 지역인 경북 및 강원 지역에서 발생한 산불 사례를 선정하여 실험을 수행하였다. 경북 지역에 대해 선정한 산불 사례는 2013년 3월 9일 경북 봉화에서 발생한 산불이다. 2013년 3월 9일 15 KST 관측에서는 경북 지역의 상대습도가 30% 이하로 매우 건조한 것으로 나타났으며, 남한 대부분 지역의 상대습도도 40% 이하로 산불이 발생하기에 좋은 조건을 갖추고 있었다. 또한 강원 지역에 대해서는 2013년 3월 28일 강릉에서 발생한 산불 사례를 선택하였다. 3월 28일 경기도와 강원도, 충청도 지역의 상대습도가 30% 이하로 건조한 상태로 관측됐다.

2.2. 관측자료 및 모델

본 연구에서 사용한 관측자료는 기상청에서 설치한 AWS 467개소이고 주로 서울을 중심으로 하는 수도권 인근, 그리고 산지보다는 평지 쪽에 밀집되어 있다. 또한 산림과학원에서 설치한 AWS 30개소를 사용하였고 주로 산악지역을 중심으로 설치되었다. Fig. 1은 기상청 AWS 관측 자료와 국립산림과학원 AWS관측 자료의 분포를 나타낸다. 사용한 AWS의 관측 요소는 풍속, 풍향, 온도, 기압, 습도 자료를 사용하였다.

또한 중규모 모형으로 사용한 모델은 WRF v3.5.1을 사용하였다. 이번 연구에서는 산림 미기상의 실시간 예측을 위한 시스템 최적화를 최종 목적으로 하고 있다. Fig. 3은 WRF 모형의 수행을 위한 모의 영역과 모의 영역에 대한 지형 고도를 나타낸다. 수평 방향의 해상도가 27, 9, 3, 1km인 총 4개의 모의 영역을 설정하였고, 단방향 등지 격자 내림법(one-way nesting)을 이용하였다.

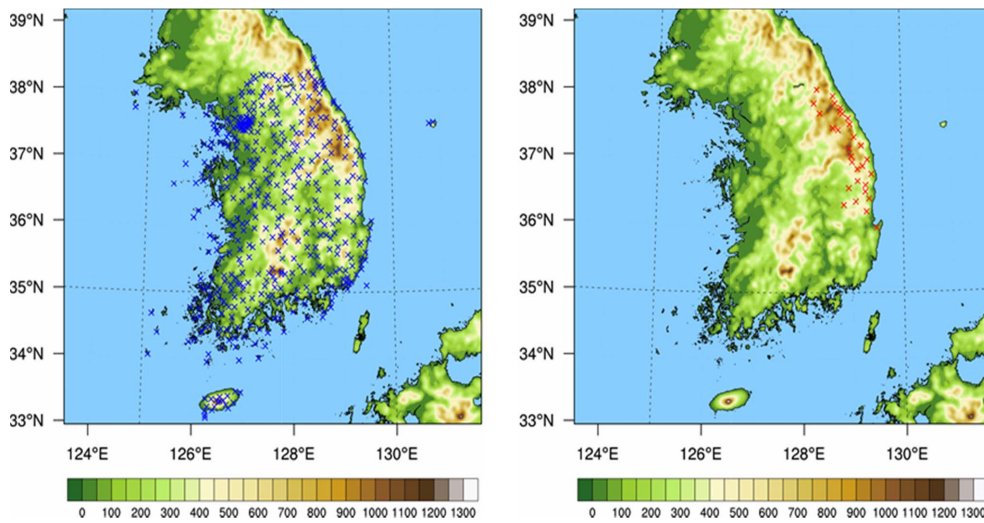


Fig. 1. KMA AWS station(left)and KFRI AWS station (right).

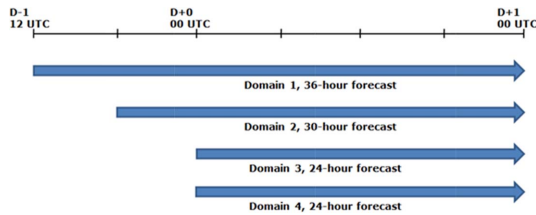


Fig. 2. WRF run-time schedule.

모형 수행을 위한 초기 및 경계 자료로는 실시간 예측을 하기 위해서 전구 모형의 예보 자료를 사용해야 한다. 본 연구에서는 미국 NCEP(National Center for Environmental Prediction)에서 운영 중인 전구 모형의 예보 자료인 GFS(Global Forecast System) 자료를 모형의 초기 및 경계 조건으로 사용하였다.

모의 시간에 대해서는 수평 해상도가 3km(혹은 1km)

인 모의 영역에서 경북과 강원도에 각각 발생한 2013년 3월 9일 09 KST와 2013년 3월 27일 09 KST를 초기 시각을 기준시각으로 설정한다. 해상도가 27km인 모의 영역의 초기 시각은 기준시각의 12시간 전으로 설정하고, 해상도가 9km인 모의 영역의 초기 시각은 기준시각의 6시간 전으로 설정한다. 이는 관측자료를 동화하면 내삽과정에서 발생하는 역학적 불균형을 해소하기 위해 역학적 적응시간이 필요하기 때문이다.

2.3. 자료동화

본 연구에서는 3차원 변분 자료동화 방법을 이용하여, 3km 해상도 모의 영역(D3)에 대해 기상청 및 국립산림과학원 AWS 관측 자료를 동화하였다. 동화에 사용한 관측자료는 AWS를 사용 하였으며 앞서 언급한 기상청 467개소와 과 산림과학원의 30개소를 사용

Table 1. Summary of the WRF model configuration

Medel	WRF V 3.5.1			
Domain	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Resolution	27 km	9 km	3 km	1 km
Dinemsion	238 × 180	238 × 226	247 × 226	100 × 100(GB) 109 × 109(GW)
Vertical layer	35 layer			
Grid nesting	1way - Nesting			
Initial condition	GFS (6 - hourly 1° × 1°)			
Microphysics	WSM 6 scheme			
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch		Not used	

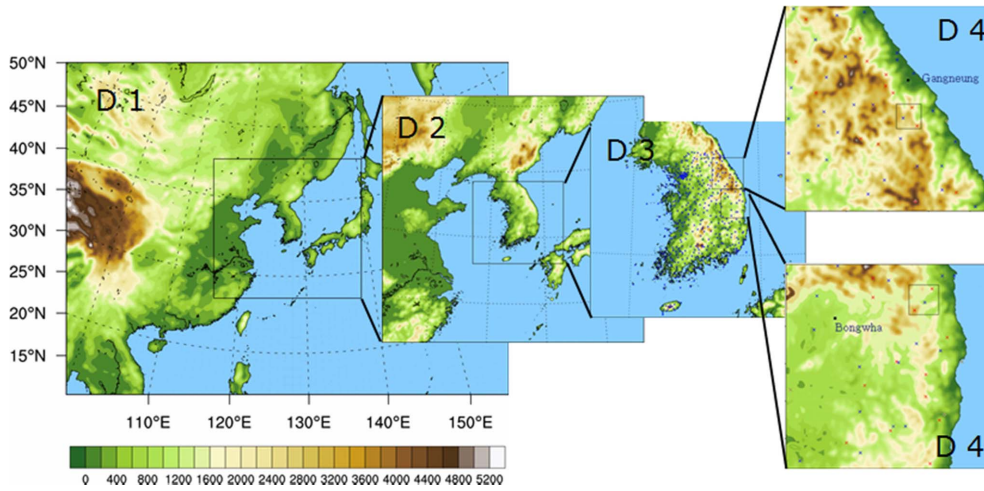


Fig. 3. Model domain for Domain1 (D1), Domain2 (D2), Domain3 (D3) and Domain4 (D4).

하였고 동화에 사용한 관측 요소는 u, v, 기온, 기압, 습도자료를 사용하였다. 또한 동화실험에 사용된 모형은 WRF-DA이다.

$$J = \frac{1}{2}(x-x_b)B^{-1}(x-x_b) + \frac{1}{2}(H(x)-Y)R^{-1}(H(x)-Y) \quad (1)$$

3차원 변분 자료동화 방법은 비용함수(J)를 최소화 하는 분석장 x를 계산하는 자료동화 기법이다. 여기에서 x_b 는 배경장, B는 배경오차 공분산, H는 배경장과

관측의 변수 종류 및 위치를 맞추어 주는 관측 연산자, y는 관측이다.

2.4. MUKLIMO 모형

MUKLIMO 모형은 Sievers and Zdunkowski(1986)에 의해 처음에는 미세규모 바람장을 수치 모의하기 위한 2차원 모형으로 제안되었다. 이후 Sievers(1995)가 유선함수 방법을 토대로 2개의 유선함수를 이용하

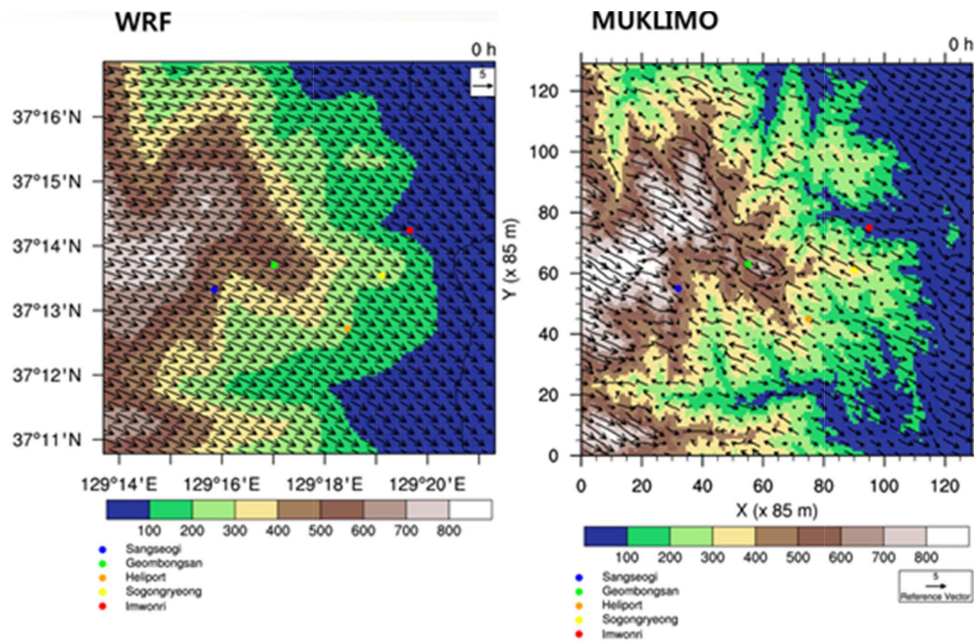


Fig. 4. MUKLIMO can make to obtain higher resolution data than WRF.

여 3차원 비 발산 바람장을 계산할 수 있도록 개선하였다. MUKLIMO 모형을 이용하면 제한된 영역에 대하여 수목, 건물, 거칠기 길이의 효과를 고려한 수 미터에서 수 십 미터 해상도의 3차원 바람장을 진단적으로 계산할 수 있다. 또한 WRF는 30초의 지형해상도를 제공하지만 MUKLIMO는 3초 해상도의 지형자료를 이용할 수 있기 때문에 보다 정밀한 바람장 산출이 가능하다. 본 연구에서는 중규모 모형인 WRF 모형의 모의 결과를 MUKLIMO 모형의 입력 바람장으로 사용하였다. WRF 모형의 1km 해상도 모의 영역에 대한 모의 결과를 평균하여 MUKLIMO 모형의 입력 바람장으로 사용하였다. MUKLIMO 모형 수행은 다음과 같은 순서에 의해 이루어진다. 우선 MUKLIMO 모형 수행을 위한 모의 영역이 결정되면 모의 영역에 대한 지형 및 수목 Input 파일을 생성한다. 이후 WRF 모형을 수행하여 1km 해상도 모의 영역에 대한 모의 결과를 도출한 후, 이를 평균하여

MUKLIMO 모형 수행을 위한 입력 바람장으로 사용한다. 지형, 수목, 거칠기 길이에 대한 인풋 파일과 예단 모형인 WRF 모형의 모의 결과를 입력 자료로 MUKLIMO 모형을 수행하여 100m 해상도의 바람장 자료를 산출 할 수 있다.

III. 결 과

MUKLIMO 모형의 입력 바람장은 WRF 모형 1km 해상도 모의 결과로부터 얻기 때문에, MUKLIMO 모형의 바람장 산출 결과를 자료 동화를 한 경우와 하지 않은 경우로 나누어 검증함으로써 MUKLIMO의 성능에 대해 자료동화 효과도 살펴보았다. Fig. 5는 경북 지역에서 2013년에 발생한 산불 사례에 대해, MUKLIMO 모형을 이용하여 고해상도 바람장을 추출하고 그 결과를 관측과 비교한 것이다. KMA 실험 외에 기상청 AWS 자료와 국립산림과학원 AWS 자료

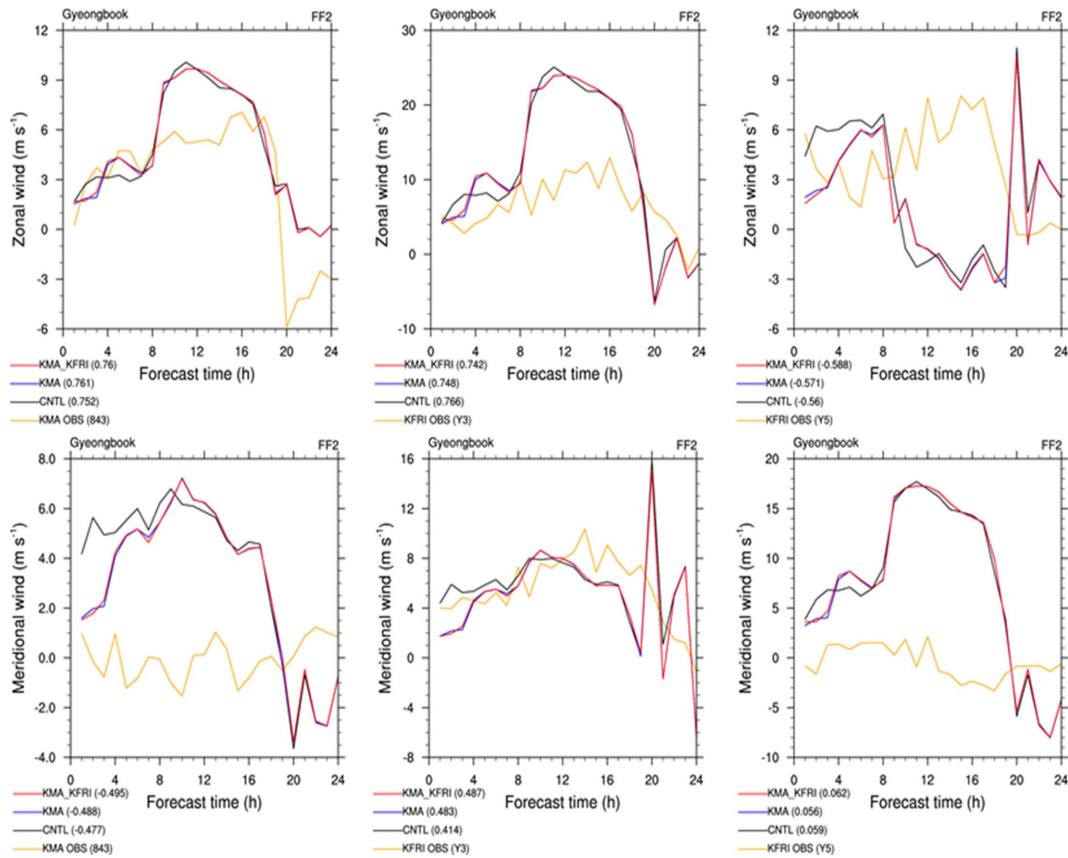


Fig. 5. MUKLIMO model simulation result verification for Gyeongbuk. KMA AWS data (left), two KFRI AWS data (middle and right).

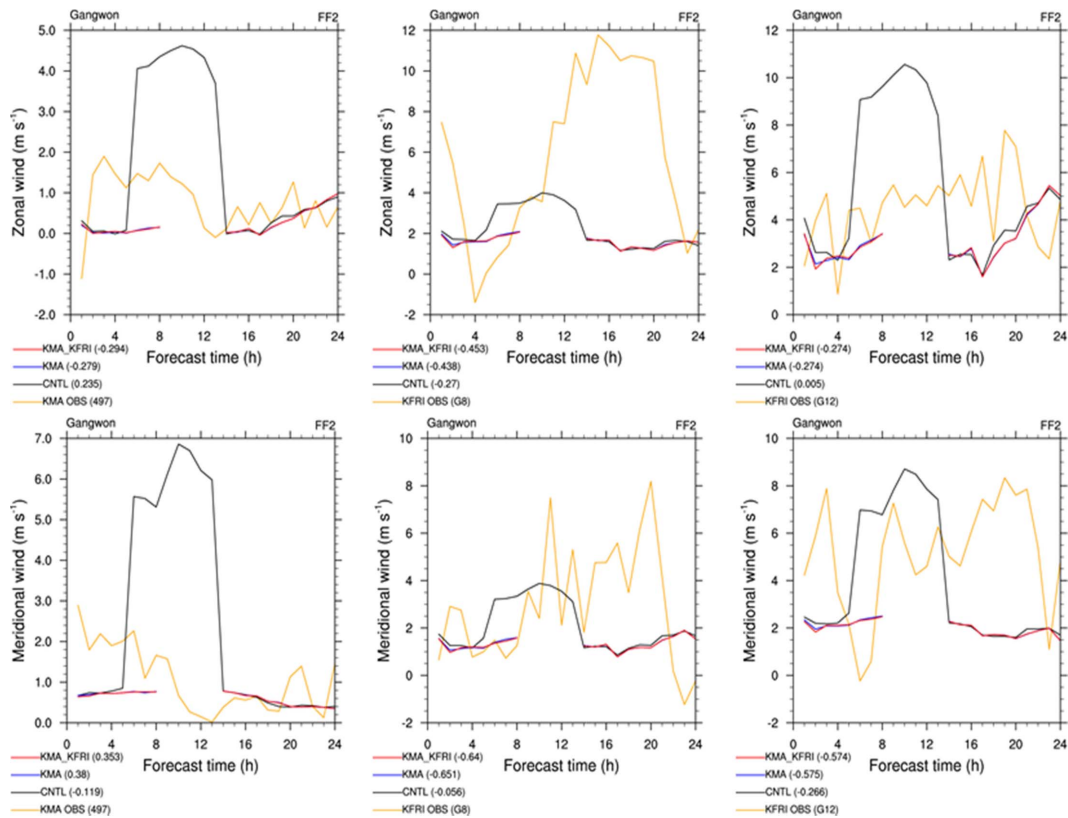


Fig. 6. MUKLIMO model simulation result verification for Gangwon. KMA AWS data (left), two KFRI AWS data (middle and right).

를 동시에 동화한 KMA_KFRI 실험을 수행하였고, 검증에도 국립산림과학원 AWS 자료를 이용하였다. 동서 방향의 바람의 경우, 서로 인접한 기상청 AWS 관측과 국립산림과학원 AWS 관측 사이에 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다(좌측상단, 중앙상단). 두 관측 지점에 대한 MUKLIMO 모형의 모의 결과에는 큰 차이가 없어 기상청 AWS 관측과는 유사하나 국립산림과학원 AWS 관측과는 비교적 큰 차이를 나타낸다. 또 하나의 국립산림과학원 AWS 관측 지점(우측상단)에 대한 MUKLIMO 모형의 모의 결과는 상이 반대로 나타나 상관 계수의 값이 음인 것을 확인할 수 있다. 기상청 혹은 국립산림과학원 AWS 자료의 동화를 통해 MUKLIMO 모형의 모의 결과가 약간 향상되나, 그 향상 정도가 크지 않고 예보 초기 시각 근처에 국한되는 경향을 보인다. 남북 방향의 바람의 경우, 기상청 AWS 관측소와 국립산림과학원 AWS 관측소(좌측하단)에 대한 MUKLIMO 모형의 모의 결과가 크기에만 차이를 나타내는 것을 확인할

수 있다. 실제 관측에서도 두 지점에 대한 남북 방향의 바람이 유사한 패턴을 나타낸다. 하지만 바람의 세기가 매우 약했던 관측과 달리 MUKLIMO 모형에서는 상당히 강한 바람을 모의하는 것을 확인할 수 있다. 나머지 국립산림과학원 관측 지점(중앙하단, 우측하단)에 대한 MUKLIMO 모형의 모의 결과는 관측과 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다. 동서 방향의 바람과 마찬가지로, 남북 방향의 바람 모의에 있어서도 기상청 혹은 국립산림과학원 AWS 자료의 동화 효과는 예보 초기 시각 부근에 한정되며, 기상청 AWS 관측 자료에 비해 국립산림과학원 AWS 자료의 효과는 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 강원 지역에서 2013년에 발생한 산불 사례에 대해, WRF 모형과 MUKLIMO 모형을 수행한 후, 그 모의 결과를 관측과 비교한 것이다. 기상청 AWS 관측 지점에 대한 모의 결과는(우측), 관측과 상당한 차이를 보인다. 관측에서는 그 진폭이 크지는 않지만 시간에 따라 바람의 세기 변화가 나타나는데,

MUKLIMO 모형의 모의 결과에서는 바람의 크기가 0에 가깝게, 그리고 시간 변화 없이 모의된다. 또 한 가지 주목해야 할 점은 강원 지역에 대한 MUKLIMO 모형의 수행 시 지형의 고도가 높아 모형 수행이 불완전하게 종료되는 경우가 있다는 점이다. 향후 이러한 문제점에 대한 해결책 제시가 필요할 것이다. 국립산림과학원 AWS 관측 지점 바람에 대한 MUKLIMO 모형의 모의 결과에서도 시간에 따른 바람 변화를 잘 모의해 내지 못하고 있다(중앙, 좌측). 강원 지역은 경북 지역에 비해 지형의 고도가 높고, 이로 인해 연직 방향의 좌표계 설정에 변화가 필요한 것으로 사료된다. MUKLIMO 모형의 모의 결과는 지형, 수목, 거칠기 길이 등의 영향을 받기도 하지만 WRF 모형의 모의 결과를 입력 자료로 하기 때문에, WRF 모형의 영향도 크다.

IV. 결 론

중규모 모형인 WRF 모형을 이용하여 경북과 강원 지역에 대해 1km 해상도의 모의 결과를 도출하였다. 국립산림과학원에서 설치·운영 중인 산악 기상 관측망 자료의 활용을 위하여, 2013년에 발생한 산불 사례를 선정하여 실험을 수행하였다.

기상청 및 국립산림과학원의 AWS 자료를 이용하여 WRF 모형의 3km 해상도의 Domain에서 3차원 변분 자료동화 방법을 사용하여 자료동화를 수행하였고, 미세규모 도시 모형인 MUKLIMO 모형을 이용하여 경북 및 강원 지역에 대한 약 100m 해상도 3차원 바람장을 산출하였다. WRF 모형의 모의 결과를 MUKLIMO 모형의 입력 바람장으로 사용하여, MUKLIMO 모형을 일종의 예단 모형으로 사용하였다. 바람장 계산 시 지형 및 수목의 효과를 고려하기 위하여, DEM 3초 해상도 지형 자료와 국립산림과학원 수목 자료(수종 및 수령)를 이용하여 MUKLIMO 모형에 대한 입력 자료를 생성하였다.

MUKLIMO 모형을 이용하여 지형 및 수목의 효과를 반영한 모의 바람장과 WRF 모형의 모의 바람장을 기상청 및 국립산림과학원 AWS 자료와 비교·검증하였다. 2013년에 발생한 산불사례를 선정하여 실험을 수행하였다. 검증 결과, 자료동화를 수행한 Input 자료를 사용한 MUKLIMO 모형의 모의 결과가 자료동화를 수행하지 않은 Input 자료를 사용한 MUKLIMO 모

형의 모의 결과에 비해 관측에 가까움을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 자료동화를 한 시점에 가까울수록 뚜렷하게 나타났다. MUKLIMO 모형을 이용하여 산출한 3차원 바람장은, 특정 고도 혹은 지표면에서의 바람 벡터의 2차원 분포, 특정 고도에서의 연직 방향 바람의 분포, 바람 세기의 연직 구조 등의 형태로 가시화하여 산불의 예방 및 진화에 유용하게 사용될 수 있다.

적 요

지구 온난화와 연관된 기후 변화는 악기상 현상의 발생 빈도 및 강도를 증가시킨다. 따라서 산불, 산사태 등 산림 재해의 예방 및 대응을 위한 정밀한 산림 미기상 예측 시스템의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 2013년 3월 봉화와 강릉에서 발생한 산불을 WRF와, 3D-var로 모의 하였다. WRF에서 나온 Output 자료를 이용하여 MUKLIMO 모형을 기반으로 산림 미기상 해석 및 모의를 위한 예측 시스템의 구축과 최적화를 이루었다. 이를 위해 3차원 변분 자료 동화 방법을 사용하여 기상청 AWS 관측 자료를 동화하였고, WRF의 예보에 MUKLIMO 모형을 결합하여 100m의 고해상도 바람장을 산출하였다. 자료동화를 수행하지 않은 CNTL 실험에 비해 자료 동화를 수행한 KMA 혹은 KMA_KFRI 실험의 모의 결과가 관측과 가까워짐을 확인하였다. MUKLIMO에서 산출된 바람장 자료를 이용하여 보다 정확한 산림 미기상 예측 시스템을 구축할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산림과학원 위탁연구과제(과제번호:0409-20150008)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, K.-D., Y.-H. Lee, C.-H. Cho, and K.-D. Min, 2003: Numerical experiments of microscale wind field with MUKLIMO at the 2002 Worldcup stadium area. *Journal of the Korean Meteorological Society* **39**(5), 587-605. (in Korean with English abstract)
- Boo, K.-O., Y. Chun, and S.-N. Oh, 2000: A numerical experiment of the wind field in Youido region. *Journal of the Korean Meteorological Society* **36**(3), 327-336. (in

- Korean with English abstract)
- Choi, H. J., H. W. Lee, K. H. Sung, and M. J. Kim, 2009: The effect of atmospheric flow field according to the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis on complex area. *Journal of Environmental Science International* **18**(3), 271-281. (in Korean with English abstract)
- Lee, H. W., S. H. Tak, and S. H. Lee, 2013: Numerical experiment on the variation of atmospheric circulation due to wild fire. *Journal of Environmental Science International* **22**(2), 173-185. (in Korean with English abstract)
- Min, K. D., J. W. Yoon, K. D. Ahn, 2005: A study on the atmospheric environment and simulations of wind field using MUKLIMO at the KNU campus. *Journal of the Environmental Science* **14**(3), 311-325. (in Korean with English abstract)
- Piñol, J., J. Terradas, and F. Lloret, 1998: Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climate Change* **38**(3), 345-357.
- Sievers, U., 1995: Generalization of the stream-function method to three dimensions *Meteorol. Meteorologische Zeitschrift* **4**(1), 3-15.
- Sievers, U., and W. G. Zdunkowski, 1986: A microscale urban climate model. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* **59**(1), 13-40.
- 최정희, 이용희, 강동연, 조천호, 2002: AWS 자료를 포함한 지상자료동화가 단시간 예측에 미치는 영향. *대기* **12**(1), 377-380.