

## RAMS의 실시간 기상장 예측 향상을 위한 최신 토지피복도 자료의 적용가능성 평가

### Applicable Evaluation of the Latest Land-use Data for Developing a Real-time Atmospheric Field Prediction of RAMS

원경미 · 이화운\* · 유정아<sup>1)</sup> · 홍현수<sup>2)</sup> · 황만식<sup>1)</sup>  
천광수<sup>1)</sup> · 최광수<sup>1)</sup> · 이문순<sup>1)</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>국립환경과학원 화학안전예방과,  
<sup>2)</sup>대전대학교 환경공학과

(2007년 5월 3일 접수, 2007년 11월 21일 채택)

Gyeong Mee Won, Hwa Woon Lee\*, Jeong Ah Yu<sup>1)</sup>, Hyun Su Hong<sup>2)</sup>,  
Man Sik Hwang<sup>1)</sup>, Kwang Su Chun<sup>1)</sup>, Kwang Su Choi<sup>1)</sup> and Moon-Soon Lee<sup>1)</sup>  
*School of Earth Environmental System, Pusan National University,*  
<sup>1)</sup>*Chemical Safety & Accident Prevention Division,*  
*National Institute of Environmental Research,*  
<sup>2)</sup>*Department of Environmental Engineering, Daejeon University*

(Received 3 May 2007, accepted 21 November 2007)

### Abstract

Chemical Accident Response Information System (CARIS) which has been designed for the efficient emergency response of chemical accidents produces the real-time atmospheric fields through the Regional Atmospheric Modeling System, RAMS. The previous studies were emphasized that improving an initial input data had more effective results in developing prediction ability of atmospheric model. In a continuous effort to improve an initial input data, we replaced the land-use dataset using in the RAMS, which is a high resolution USGS digital data constructed in April, 1993, with the latest land-use data of the Korea Ministry of Environment over the South Korea and simulated atmospheric fields for developing a real-time prediction in dispersion of chemicals. The results showed that the new land-use data was written in a standard RAMS format and shown the modified surface characteristics and the landscape heterogeneity resulting from land-use change. In the results of sensitivity experiment we got the improved atmospheric fields and assured that it will give more reliable real-time atmospheric fields to all users of CARIS for the dispersion forecast in associated with hazardous chemical releases as well as general air pollutants.

**Key words** : Chemical Accident Response Information System (CARIS), Real-time atmospheric field, Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), Land-use change, Dispersion forecast

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)51-510-2291, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

미국의 9·11 항공기 테러에 이어 월드컵 테러 발생 가능성을 배제할 수 없는 가운데 2001년 11월 6일 테러대비 정부 종합대책의 일환으로 화학물질 안전관리의 필요성이 제기되었고, 2002년 월드컵 경기를 개최한 10개 경기장을 중심으로 유사시 효율적인 화학사고대응을 위해 화학물질사고 대응정보시스템(CARIS: Chemical Accident Response Information System, 김철희 등, 2003a, b; 국립환경과학원, 2002)을 국립환경과학원에 구축하여 안전하고 성공적인 월드컵 개최를 지원하였다. 이후 대상지역을 남한 전역으로 확대하여(국립환경과학원, 2005) 평상시에는 화학공단과 주요 관공서를 중심으로 대기환경을 실시간으로 감시, 통제하는 종합환경 관리체제로서의 기능을 하고 있으며, 화학물질로 인한 환경 오염사고 및 화학테러가 발생할 경우 인적, 물적 손실과 환경에 대한 피해 영향을 최소화하도록 주변 환경에 대한 피해예측 프로그램을 통해 도출된 대응 정보들을 환경, 경찰, 소방 관련 초동대응기관에 실시간으로 제공하고 있다. 실시간 기상 모델은 지금까지 슈퍼컴퓨터만이 유일한 대안으로 간주되었으나 최근의 병렬 처리 기법을 이용한 컴퓨터가 상용화되어 계산 용량의 한계 등의 기술적 문제를 크게 극복하여 고해상도 바람장 모델의 상시 운영이 가능하게 되었으며, 이에 따라 병렬 처리 cluster 환경에서 지역 및 국지 규모 대기-환경 예측 모델을 초고속으로 모의하여 그 결과를 실시간으로 제공할 수 있도록 CARIS가 구축되었다. 생산된 기상자료는 대기확산모델과 자동 연결되어 확산결과를 표출할 뿐만 아니라 사후 분석용(off-line)으로서 시간적 여유를 두고 도시규모 혹은 국소 규모의 정확한 화학물질의 대기 확산 예측을 위한 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics) 모델을 구축하여 현업 운영용 확산 시스템을 평가, 보완할 수 있도록 하였다(국립환경과학원, 2007).

특히 화학물질이 대기 중으로 노출되면 지형 조건뿐만 아니라 그 때의 기상상황이 매우 중요하게 작용하는데, 바람성분인 풍향과 풍속은 시간에 따라 수시로 변하게 되므로 실시간 기상장 예측은 3차원 바람장을 어떻게 도출하느냐와 필연적으로 연결된다. 또한 최근의 대기환경문제들이 자연현상과 함께 북

합적으로 발생하는 형태에다 개발과 도시계획 등에 따른 지형지물의 변화들로 인해 대기 유동장에 크게 영향을 주는 요소들로 부각되고 있다. 이러한 수치모델링의 규모는 대기경계층 내에 해당하는 중규모 혹은 미규모의 대기운동과 관련이 있으므로 지역규모로 발생할 수 있는 지표특성의 변화가 대기 유동장에 주는 영향(Ek *et al.*, 2003; Chen and Dudhia, 2001)과 민감하게 변화된 온도장을 통해 도시열섬이나 해륙풍순환의 강도를 예측하기도 한다(Kusaka and Kimura, 2004; Liu *et al.*, 2004; Kusaka *et al.*, 2001).

CARIS에서도 3차원 기상과 대기 확산의 예측이 그 핵심으로 작용하고 있는데, 복잡한 대기환경을 수치모의(numerical simulation)하는 데에는 무엇보다 실제 환경조건을 모델의 초기 입력자료로 설계하는 것이 중요한 작업이므로 초기 입력자료의 개선은 모델의 예측도를 향상시키는 데 크게 기여할 수 있다. 본 선행연구에서도 CARIS에서 화학물질의 대기확산 예측을 위해 상시 운영되는 예측 바람장 모델 RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)의 예측도를 향상시키기 위해 초기 입력자료들 중 SST(Sea Surface Temperature)와 GTS(Global Tele-communication Station) 자료를 모델링 지역의 특성을 반영할 수 있도록 개선시킨 바 있으며(국립환경과학원, 2005; 원경미 등, 2004), 초기 입력자료의 개선에 따른 예측도의 향상이 수치모의에서 중요한 역할을 함을 볼 수 있었다.

이러한 측면에서, 현재 CARIS에서 실시간 기상장 예측을 위해 사용 중인 RAMS의 지표면 자료들은 전반구(whole hemisphere)에 대해 1993년 4월에 완성된 것으로 이는 10년 이상 경과되어 변화된 실제의 지표면 상태를 정확히 반영하기 어렵다는 점을 감안하여, 본 연구에서는 RAMS에서 사용되는 지표면 입력자료 중 USGS(U. S. Geological Survey)에서 제공하는 토지피복도 자료를 남한영역에 대해서 환경부의 최신자료인 중분류 토지피복도(2005년 4월 완성) 자료로 대체하여 수치모델링에 사용하였으며, 이에 따른 모델링의 결과들을 고찰함으로써 실시간 기상모델의 기상장 예측도를 향상시키고자 하였다.

## 2. 최신 토지피복도 자료의 사용

토지피복도(land cover map)는 인공위성자료와 같

은 다중분광 영상자료를 이용하여 지표면의 자연상태를 숲, 초지, 콘크리트 포장 등 지표면의 물리적 상태로 분류한 지도로서, 유럽 등 선진국에서는 이미 1980년대부터 국토의 환경관리를 위한 주제도 제작에 원격탐사 기술의 하나로 널리 활용하고 있다. 또한 지표면의 비점오염원을 일정한 기준에 따라 조사, 분류하여 지도의 형태로 국토공간의 피복상태를 표현하므로 피복변화의 시계열 분석이 가능하고, 국토의 공간구조 실태를 파악하여 변환추이를 신속하게 할 수 있으며, 환경분야에서는 지역, 유역, 권역별 오염부하량과 환경용량 산출 등에 활용되고 있다(환경부, 2007).

우리나라 환경부의 토지피복도 분류체계는 환경의

특성을 반영하고 국토이용, 공간계획 등 여러 분야에서 요구하는 항목들을 반영하여 대분류, 중분류, 세분류의 3단계 피복분류체계를 가지는데, 최신자료인 중분류 토지피복분류도는 미국의 Landsat TM (Thematic Mapper)과 인도의 IRS-1C 영상을 근간으로 제작된 1:25,000 축척의 지도로서 서울, 인천, 경기의 수도권 지역에 대해 먼저 구축되었고, 이후 2005년 4월에 남한전역에 대해 구축되었다. 분류체계는 23개의 항목으로 구성되어 있으며, 대분류의 시가화/건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역 등 7개 분류항목을 중심으로 세분화하여 각 토지피복 상태에 대한 흡수도(absorptivity), 반사도(emissivity), 거칠기 길이(roughness length), 최대 수분량(mois-

**Table 1. The classifications of the land-use data using in the Korea Ministry of Environment (KMOE) and RAMS, respectively.**

KMOE				RAMS	
Great classification		Middle classification			
Urban and built up	100	Residential area	110	Urban and built up	30
		Industrial area	120		
		Business area	130		
		Amusement facilities	140		
		Traffic area	150		
		Public facilities	160		
Agriculture	200	Dryland crop field	210	Cropland	28
		Irrigation crop field	220	Irrigated crop	16
		Greenhouse cultivation field	230	Bare ground	29
		Orchard	240	Open shrubland	26
		Other cultivation field	250	Cropland	28
Forest	300	Deciduous broadleaf forest	310	Deciduous broadleaf forest	21
		Coniferous forest	320	Evergreen needleleaf forest	18
		Mixed forest	330	Mixed cover	22
Grassland	400	Grassland	410	Grassland	27
		Golf field	420		
		Other grassland	430		
Wetland	500	Inland wetland	510	Bog or marsh	17
		Coastal wetland	520		
Bare ground	600	Mine area	610	Bare ground	29
		Other bare ground	620		
Water bodies	700	Inland water bodies	710	Lakes, rivers, streams (inland)	1
		Sea water bodies	720	Ocean	0

ture availability) 그리고 단위용적 당 지표면 열적 관성(thermal inertia) 등의 물리적 성질이 적용되어 있어 도시의 바람장 및 열환경 구조의 변화를 표현하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 환경부의 중분류 토지피복도 자료를 CARIS의 기상장 예측모델인 RAMS의 초기입력 자료로 사용할 수 있도록 모델형식으로의 변환과정이 필요하였다. RAMS는 미국 남부 Florida 지역에 적용했던 해륙풍 모델(Pielke, 1974)에다 콜로라도 주립대에서 추가 개발된 구름모델과 지형변환에 의한 대기순환 모델을 결합시킨 기상모델(ATMET, 2002; Walko *et al.*, 1995)로서, 초기입력자료 중 토지피복도 자료는 약 1km의 30초 공간분해능의 USGS AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)의 Landsat TM 자료를 사용한다. 이는 지표면에서 에너지와 물수지 및 대기와의 상호작용을 추정하는 RAMS의 submodel에서 식생, 토양, 호수, 해양, 설면 등과 같은 지표면의 특성들과 각 특성들간의 작용 및 대기와의 영향들을 계산한다. 토지피복도 분류체계는 Olson의 Global Ecosystems Legend에 바탕을 두어 31개 항목의 LEAF-2 (The Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model)를 사용하는데 18개의 BATS (Biosphere Atmosphere Transfer Scheme)와 13개의 LDAS (Land Data Assimilation System) 분류로 구성된다.

우선, USGS AVHRR 분류와 환경부의 중분류 자료에 대해 RAMS에서 사용하는 분류체계로 호환분류 목록을 표 1과 같이 작성하였다. 환경부의 대분류 자료는 7가지 분류체계를 가지는데 비해, 중분류 자료는 대분류 자료를 보다 세분화시켜 23가지의 분류체계를 가지므로 중분류 자료의 사용은 RAMS에서 사용하는 31가지 분류체계에 대해 상세한 지표면 특성을 반영할 수 있도록 해준다. 여기서 중분류 자료 중 하우스재배지 (greenhouse cultivation field)는 지표면이 비닐이나 유리 등으로 덮여 있는 경우인데, RAMS에서는 하우스재배지에 대한 분류가 없으므로 잔디나 풀이 나지 않는 곳으로 분류되는 나지 (bare ground)로 매칭시켰다.

현재 환경부에서 배포하는 중분류 토지피복도 자료형식은 shape 파일 형태로 되어 있어 본 연구에서는 Arc-Info를 이용하여 30 m 해상도의 수치자료를 산출하였다. 가공에 사용된 프로그램은 ESRI에서 개

발하여 판매되고 있는 ARC/View 3.3 및 Arc/Info Workstation 9.0 버전을 이용하였으며, 최종적인 바이너리 파일 제작은 Visual C++ 6.0 버전과 Fortran language를 이용하여 개발하였다. 또한 산출된 30 m 토지피복도 자료는 모델 해상도와 동일한 1 km로 맞추기 위해 모자이크방식에 의해 1 km 간격 안에 포함되는 30 m의 토지피복 특성들 중 가장 많이 분포하는 것을 선택하였으며, RAMS 모델의 입력 형식으로서의 변환과정을 거쳐 모델의 토지피복도 입력자료를 생성하였다.

따라서 RAMS 모델의 지표면 입력자료 중 전반구에 대한 USGS 1 km AVHRR의 토지피복도 자료에 남한영역에 대해서는 환경부의 최신 토지피복도 자료로 대체하여 수치모델링에 사용하였고, 모델링결과를 관측자료들과의 검증을 통해 모델 예측도를 평가하였다.

### 3. 실시간 기상장 산출 수치모의

#### 3.1 실시간 기상장 산출과정

실시간으로 운영되는 기상정보시스템 CARIS는 화학물질의 피해범위와 피해정도 예측의 정확도를

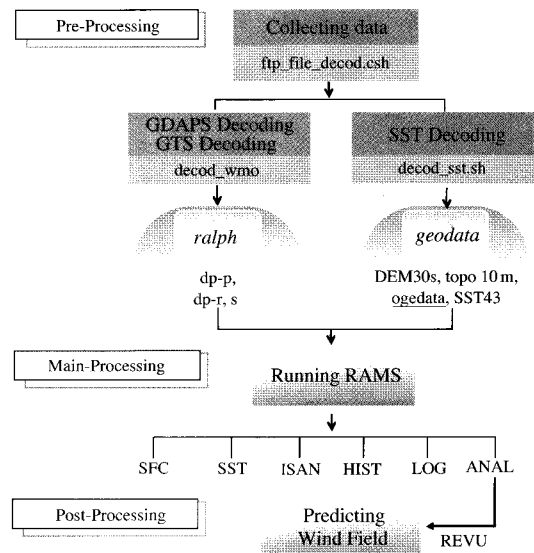


Fig. 1. A flow chart for the atmospheric field generation of CARIS predicted by RAMS.

높이기 위해 기상청의 다양한 자료를 실시간으로 수집하여 24시간 범위의 3차원 예측 기상정보를 생산한다. 실시간 기상장의 예측과정은 전처리, 주처리, 후처리과정의 3단계로 나누어진다(그림 1). 전처리 과정에서는 주처리과정을 수행하기 위한 준비단계로서, 기상청의 예측자료 GDAPS (Global Data Analysis and Prediction System), RDAPS (Regional Data Analysis and Prediction System) 및 관측 자료 AWS (Automatic Weather Station), GTS, SST 등을 전송받아 모델형식으로의 자료 변환(decoding)을 거쳐, 예보모델 RAMS를 수행할 수 있는 기상 입력자료 (ralph)와 지표면 입력자료(geodata)를 준비한다. 특히, 본 연구에서는 1993년에 구축된 RAMS의 USGS 지표면 자료들 중 토지피복도 자료(ogedata)에 대해 환경부의 최신자료로 대체한 것을 사용하였다. 주처리과정에서는 RAMS를 2단계로 수행하여 기상장을 산출하는데, 먼저 동아시아, 한반도, 남한에 관련된 예보결과를 3 km 간격의 공간 해상도로 생성하고, 이어서 남한 전역을 10개 영역으로 구분하여 10개 상세 권역에 대한 예보결과를 10개 권역 동시에 1 km 간격의 공간 해상도로 생성한다. 실행 결과는 후처리 과정에서 RAMS의 후처리 프로그램인 REVU (RAMS/HYPACT Evaluation and Visualization Utilities)를

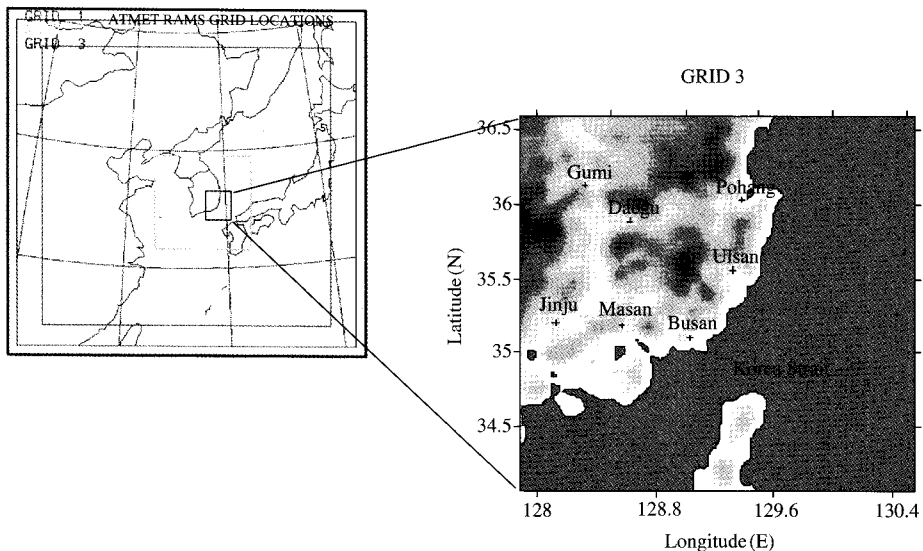
통해 필요한 기상 정보를 확보하고 결과 자료를 저장한다. 24시간 기상정보는 1일 4회 갱신되는 관측 자료를 사용하여 매시간 갱신된다.

### 3. 2 수치실험방법

RAMS를 사용하여 실시간 기상장 예측의 향상을 위한 최신 토지피복도 자료의 적용가능성을 평가하기 위해 수치실험을 수행하였다. 수치모델링은 한반도를 중심으로 3개의 동지 격자계(nested grids system)를 포함하도록 하였으며, 모델링 대상일은 2004

**Table 2. Model input parameters of RAMS used in this study.**

• Initialization time: 0000 UTC 6 Aug 2004/0000 UTC 6 Aug 2006
• Model grid structure Horizontal grid resolution: 48, 12, 3 (km) Vertical levels: 26 layers (vertical stretch ratio: 1.15) Soil layers: 11 layers Arakawa C grid (u, v, w $\frac{1}{2}\Delta x$ )
• Cumulus parameterization scheme: Kuo
• Radiation scheme: Mahrer & Pielke
• Initial atmospheric field: GDAP (Global Data Assimilation and Prediction System)
• Input dataset: DEM30s, Micro43, ogedata, topo10 m, SST43



**Fig. 2. Modeling domains with the three nested grids. The crosses in the grid 3 indicate the surface stations of KMA (Korea Meteorological Administration) for the model validation.**

년과 2006년 각각의 여름철 맑은 날 8월 6일 00 UTC 부터 8월 8일 00 UTC까지로 하였고, 초기장의 안정화를 위해 이틀째 날인 8월 7일 00 UTC부터 하루 자료를 결과분석에 사용하였다. 모델 입력변수들은 표 2에 요약되어 있다. 수치실험에서는 남한영역에 대해 RAMS에서 사용하는 USGS 1 km AVHRR자료 대신 환경부의 중분류 토지피복도 자료로 대체하여 모델링된 결과를 검토하였으며, 반영된 토지피복 특성에 따라 기상장에 주는 영향을 예측하여 실시간 기상장의 예측도 향상에 대해 평가하였다.

수치모의 대상영역은 10개의 상세 예보권역 중 경남권역을 포함하는 지역으로 선정하였으며, 본 수치실험에서는 예보영역을 동아시아, 남한, 경남권역으로 하여 3 km 공간 분해능의 결과들을 분석에 사용하였다(그림 2). 그림 2에 표시된 지역들은 수치모의 결과를 관측자료와 비교하기 위해 사용되어진 기상청의 지상기상관측소의 위치를 나타낸다. 수치모델링 결과의 비교, 검증을 위해서 관측자료와의 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error: RMSE)와 일치도

지수(Index Of Agreement: IOA), 상관계수(Correlation Coefficient: R)를 다음과 같이 계산하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (1)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}_i| + |P_i - \bar{O}_i|)^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{(\sum (P_i - \bar{P}_i)^2) \sum (O_i - \bar{O}_i)^2}} \quad (3)$$

여기서,  $P_i$ 는 각 격자점에서의 모델값,  $O_i$ 는 모델격자점에 대한 관측값을 나타내며,  $(\bar{O}_i)$ 는

$$\bar{O}_i = \frac{1}{N} \sum O_i \quad (4)$$

이다. 통계량 IOA와 R은 [0, 1] 사이의 값을 가지며 0은 전혀 일치하지 않거나 상관성이 없음을 의미하며, 1은 완벽하게 일치하거나 상관성이 큼을 의미한다.

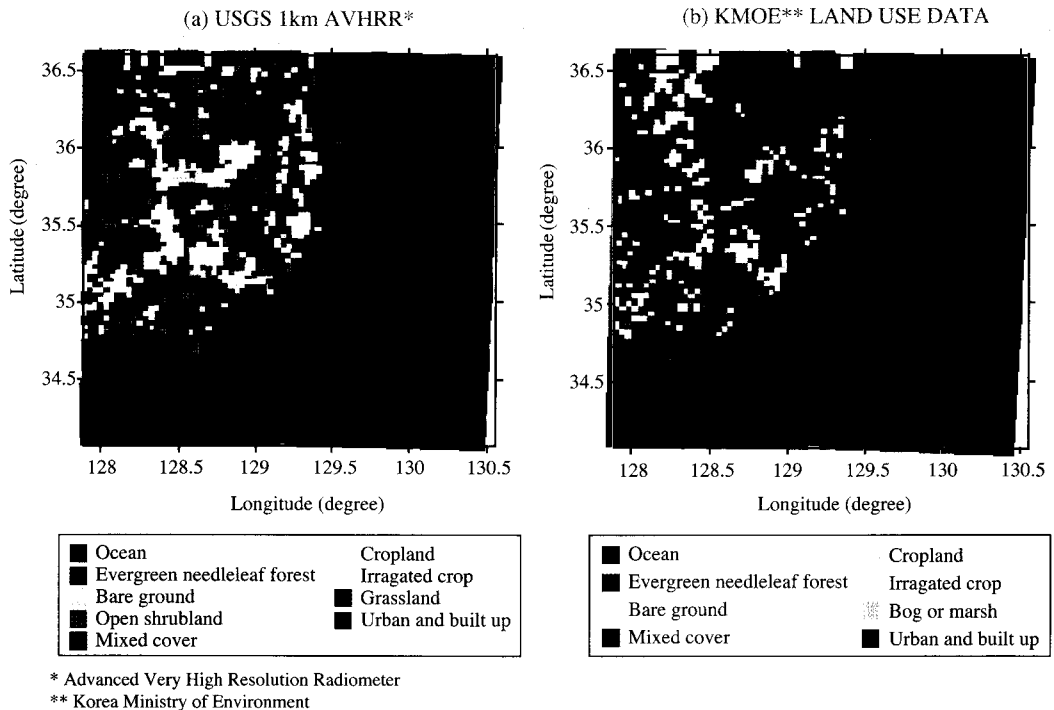


Fig. 3. The comparison between the USGS 1 km AVHRR (a) and KMOE land-use data (b) reflected through the numerical simulation of RAMS.

다. 즉, IOA는 1에 가까울수록 좋은 모델임을 나타낸다. 반면에 모델값과 관측값의 분산정도를 나타내는 RMSE는 값이 작을수록 좋은 모델이다.

### 3.3 수치모의 결과에 나타난 토지피복도 자료의 비교

본 연구에서 생성한 토지피복 입력자료의 모델 적용가능성과 지표면의 피복상태 변화에 따라 영향 받는 기상장을 평가하기 위해 수치모의시 반영된 토지피복도 특성을 비교하였다. 그림 3은 RAMS의 USGS 1 km AVHRR 자료를 사용하여 모델링한 경우 (a)와 1 km 공간 해상도의 환경부 중분류 토지피복도 자료를 사용하여 모델링한 경우 (b)에 대해 RAMS의 후처리 과정 REVU 프로그램을 통해 추출한 토지피복도 자료를 나타낸 것이다. 두 토지피복도 자료의 분류체계는 표 1의 RAMS 모델에서 사용하는 항목을 기준으로 하였다. 우선, 두 자료간의 토지피복의 변화

가 크게 나타나며, 그림 3(b)에서는 모델 형식의 변환 과정을 통해 모델링에 사용된 새로운 토지피복 자료들은 모델링에 잘 반영되어 현재의 지표면 상황을 잘 표현하고 있다. 여기서 붉은 색은 도시지역을 나타내는 것으로, 그림 2에 표시된 도심에 위치한 기상관측소들을 포함한 영역이 드러나고 있으며, 그림 3(a)의 USGS 자료에 비해 도시가 확대된 것을 볼 수 있다. 또한 USGS분류에서 대체로 농지로 반영되어 있는 부분들이 환경부 자료에서는 감소되어 있다.

### 3.4 기상장 수치모의 결과

환경부의 중분류 토지피복도 자료를 RAMS에 사용하여 예측된 기상장 수치모의 결과를 2004년 8월 7일부터 8일의 경우에 대해 지표면 부근 온도장(그림 4)과 바람장(그림 5)을 나타내었다. 해안에 인접 위치한 모델링 영역은 내륙과 해양간의 부동가열에 따른 국지순환의 영향을 잘 받는 지역으로, 낮시간

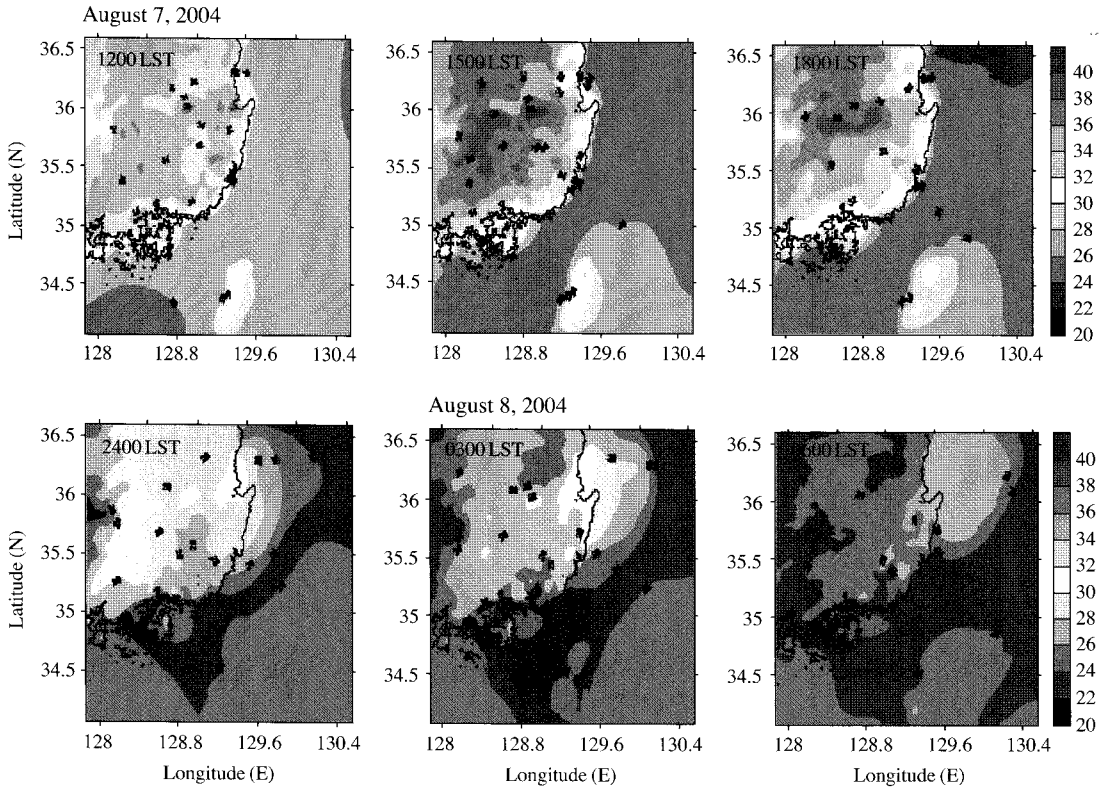


Fig. 4. Horizontal distribution patterns of temperature field simulated by RAMS using the KMOE land-use data over the grid 3.

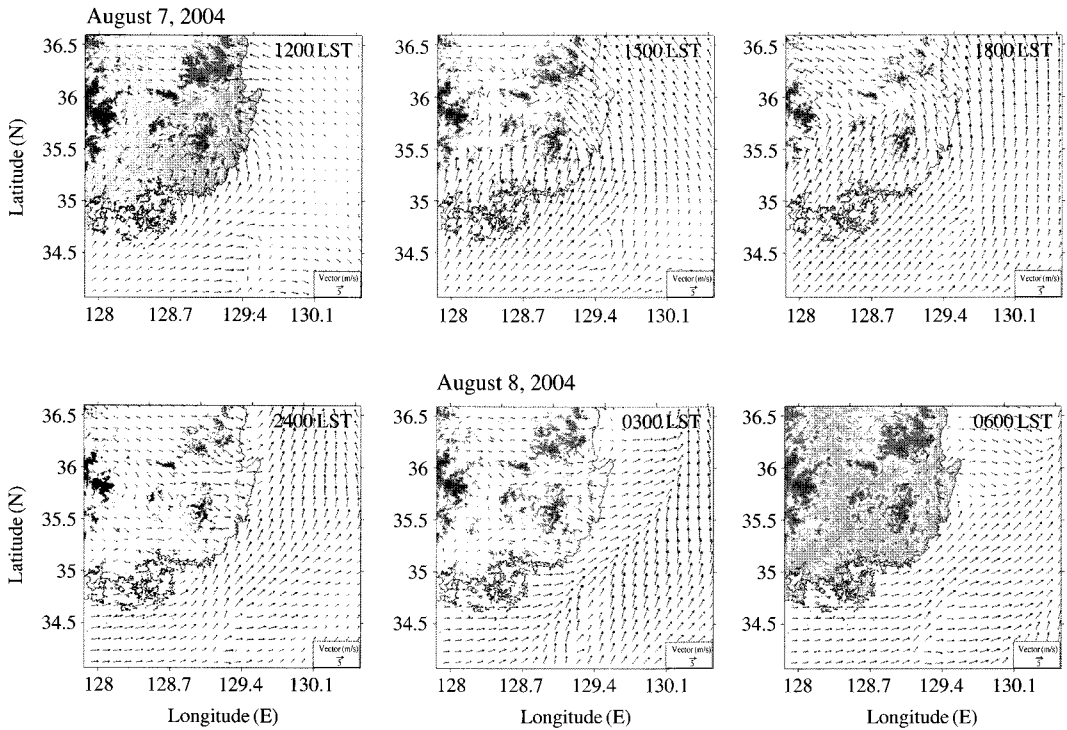


Fig. 5. The same in Fig. 4 except for wind field.

(1200 LST, 1500 LST, 1800 LST)에는 여름철 내륙지역의 가열에 따른 해풍의 발달이, 밤시간(2400 LST, 0300 LST, 0600 LST)에는 내륙지역의 냉각에 따른 육풍의 발달이 수치모의된 기상장을 통해 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 내륙지역에 속한 대구와 구미지역을 중심으로 나타나는 고온역은 오후 1500LST 경 최고 온도분포에 도달한 후 차츰 감소하지만 밤 시간에도 25°C 이상의 온도분포를 보이는데, 이는 여름철 맑은 날 도시지역에서 볼 수 있는 전형적인 열섬현상을 묘사한다 할 수 있다. 이러한 내륙의 고온 현상은 인접한 해양과의 부등가열을 더욱 유도하여 낮시간대의 풍속을 강화시키고 있다.

### 3.5 기상장 모델의 예측도 향상에 대한 검토

본 연구에서 수행한 수치모의의 결과가 실시간 기상장 모델의 예측도 향상에 미치는 영향을 검토하기 위해 지표면 부근의 기상장에 대해 모델링 영역 내 위치한 7곳의 기상청 지상기상관측소의 관측자료와 비교분석하였다. 여기서 RAMS의 USGS AVHRR 자

료를 사용하여 모델링한 경우를 Base case, 환경부 중분류 토지피복도 자료를 사용하여 모델링한 경우를 KMOE case로 하였다. 모델링 대상일 중 2004년과 2006년 각각의 8월 7일 0000 UTC부터 다음 날 8월 8일 0000 UTC까지 기온과 풍속의 시간별 변화를 그림 6과 그림 7에 나타내었고, 모델결과 검증을 위한 통계자료를 ANOVA (ANalysis Of VAriance) p-value와 RMSE, IOA, R에 대해 표 3에 제시하였다. 우선 실측자료와 예측자료의 선형적 변화가 통계적으로 유의한지를 검토하기 위해 쌍체분석(paired t-test)을 이용하여 유의한 차이의 유무를 확인할 수 있는 ANOVA p-value를 나타내었다. p-value는 [0, 1] 값을 가지며, 유의수준 95%를 기준으로 하였을 때 p-value가 0.05보다 작으면 실측자료와 예측자료가 통계적으로 유의한 차이가 있다고 한다. 즉, 0.05보다 작을수록 모델의 예측이 실측과 가까워진다고 해석된다. 본 연구에서는 사용된 검정자료의 75% 이상이 유의수준 99% (p-value ≤ 0.01)를 나타내었으며, 85% 이상이 유의수준 95% (p-value ≤ 0.05)를 나타내었는



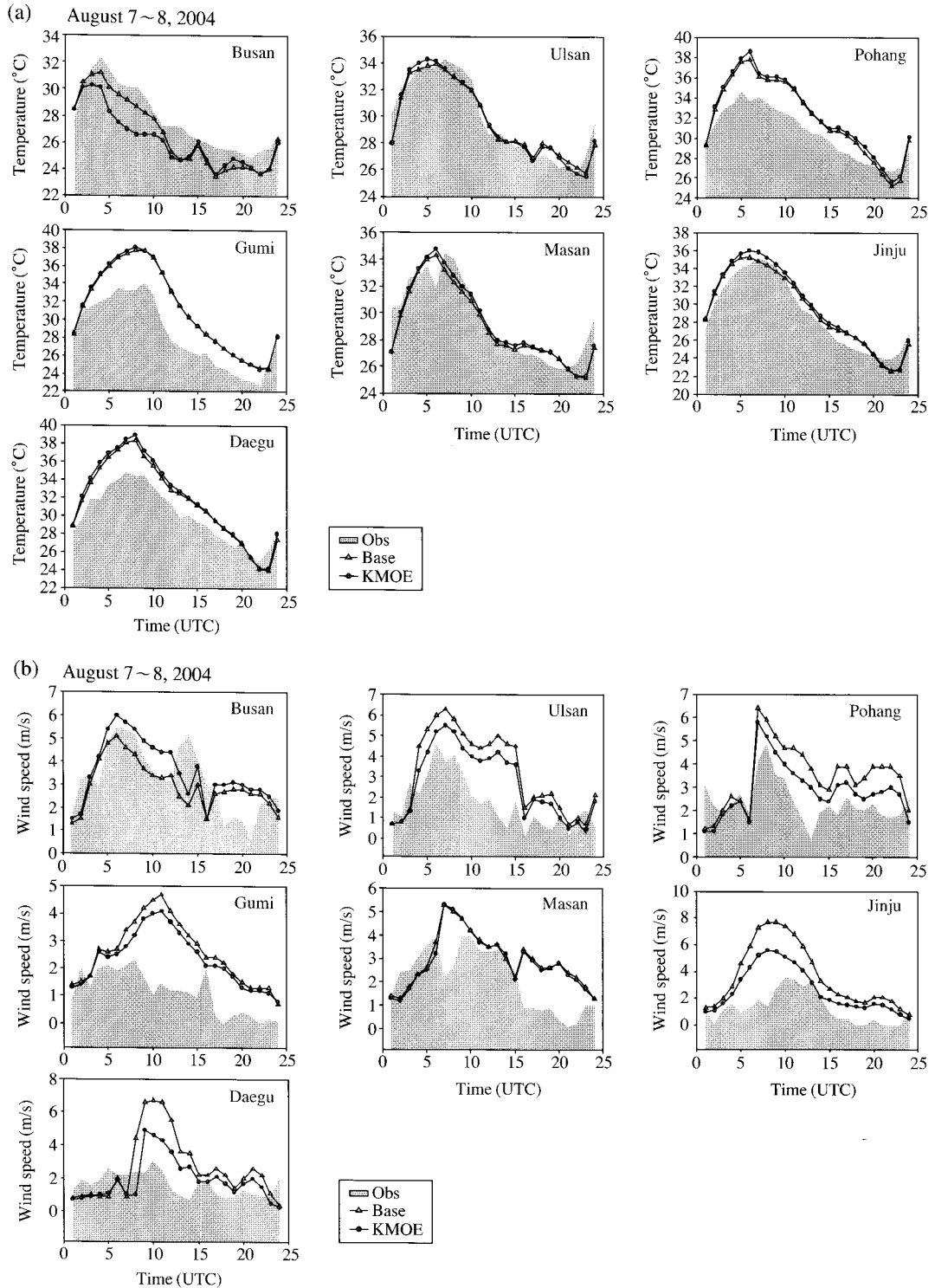


Fig. 6. Time series of air temperature (°C) (a) and wind speed (m/s) (b) for the model validation on August 7~8, 2004.

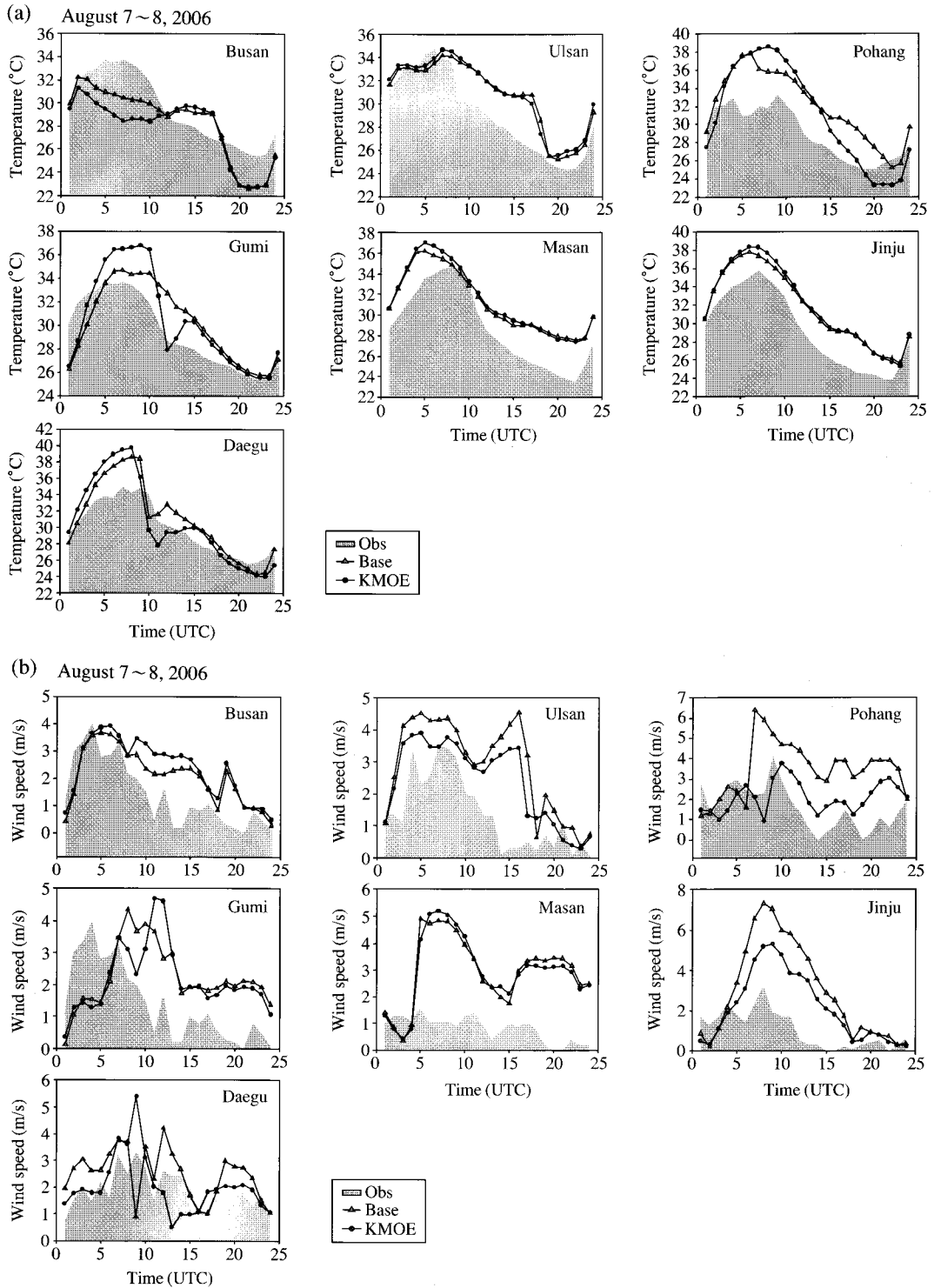


Fig. 7. The same in Fig. 6 except for 2006.

**Table 3. Summary of statistics used in the model validation.**

Case		August 7~8, 2004								August 7~8, 2006							
		Base case				KMOE case				Base case				KMOE case			
		P*	RMSE	IOA	R	P*	RMSE	IOA	R	P*	RMSE	IOA	R	P*	RMSE	IOA	R
Busan	Temperature	0.00	1.32	0.93	0.96	0.00	1.95	0.82	0.88	0.00	2.07	0.87	0.83	0.00	2.83	0.75	0.68
	Wind speed	0.00	1.21	0.73	0.57	0.00	1.17	0.78	0.65	0.30	1.10	0.77	0.69	0.22	1.38	0.69	0.60
	u-component of wind	0.00	3.85	0.20	0.44	0.00	4.30	0.17	0.29	0.00	1.91	0.39	0.83	0.00	2.17	0.34	0.78
	v-component of wind	0.00	6.35	0.11	0.83	0.00	6.80	0.10	0.83	0.00	4.31	0.17	0.75	0.00	4.44	0.16	0.73
Ulsan	Temperature	0.00	0.86	0.98	0.96	0.00	0.84	0.98	0.96	0.27	2.31	0.88	0.88	0.32	2.28	0.89	0.91
	Wind speed	0.00	2.03	0.66	0.70	0.00	1.49	0.76	0.73	0.00	1.95	0.60	0.57	0.00	1.46	0.69	0.63
	u-component of wind	0.00	2.80	0.21	0.33	0.00	2.39	0.22	0.27	0.90	2.89	0.22	0.50	0.92	2.44	0.24	0.46
	v-component of wind	0.00	6.36	0.08	0.82	0.00	6.00	0.10	0.83	0.00	4.76	0.15	0.86	0.00	4.48	0.14	0.84
Pohang	Temperature	0.00	2.11	0.89	0.97	0.00	2.35	0.87	0.97	0.00	4.07	0.76	0.85	0.00	3.94	0.78	0.88
	Wind speed	0.00	1.64	0.58	0.46	0.04	1.06	0.73	0.58	0.00	1.64	0.53	0.26	0.03	1.22	0.53	0.26
	u-component of wind	0.01	3.58	0.04	0.21	0.04	3.67	0.04	0.18	0.11	2.51	0.24	0.13	0.00	2.55	0.18	0.41
	v-component of wind	0.00	5.56	0.18	0.22	0.00	4.88	0.20	0.22	0.00	3.60	0.30	0.08	0.00	3.34	0.29	0.04
Gumi	Temperature	0.06	3.15	0.87	0.94	0.01	3.24	0.86	0.94	0.00	2.51	0.87	0.78	0.00	2.29	0.92	0.88
	Wind speed	0.01	1.76	0.45	0.52	0.03	1.49	0.48	0.52	0.00	1.74	0.28	0.02	0.00	1.68	0.30	0.02
	u-component of wind	0.00	3.81	0.13	0.11	0.00	3.74	0.12	0.01	0.04	2.74	0.21	0.68	0.01	2.93	0.19	0.60
	v-component of wind	0.02	1.58	0.60	0.74	0.04	1.32	0.65	0.73	0.00	3.00	0.10	0.23	0.00	2.96	0.10	0.19
Masan	Temperature	0.00	1.29	0.94	0.9	0.00	1.26	0.95	0.9	0.14	2.20	0.87	0.96	0.53	2.48	0.85	0.96
	Wind speed	0.00	1.48	0.63	0.47	0.00	1.46	0.63	0.46	0.00	2.12	0.62	0.01	0.00	2.08	0.63	0.06
	u-component of wind	0.00	3.49	0.15	0.40	0.00	3.52	0.15	0.41	0.00	1.82	0.26	0.49	0.00	1.96	0.26	0.58
	v-component of wind	0.00	5.38	0.02	0.78	0.00	5.31	0.12	0.77	0.09	6.16	0.08	0.73	0.06	6.08	0.08	0.72
Jinju	Temperature	0.00	1.05	0.98	0.97	0.00	1.23	0.98	0.98	0.04	2.69	0.89	0.97	0.00	2.91	0.89	0.97
	Wind speed	0.00	2.88	0.53	0.76	0.00	1.73	0.66	0.74	0.00	2.76	0.47	0.57	0.00	1.78	0.59	0.57
	u-component of wind	0.00	2.95	0.16	0.83	0.00	2.53	0.18	0.79	0.00	2.28	0.13	0.44	0.00	1.77	0.17	0.42
	v-component of wind	0.00	6.48	0.10	0.74	0.00	5.64	0.12	0.73	0.00	5.53	0.11	0.57	0.00	4.90	0.13	0.57
Daegu	Temperature	0.01	2.16	0.91	0.98	0.24	2.46	0.89	0.98	0.00	2.15	0.92	0.94	0.00	2.69	0.89	0.90
	Wind speed	0.00	2.08	0.41	0.32	0.48	1.28	0.52	0.30	0.02	1.08	0.56	0.35	0.34	0.85	0.72	0.59
	u-component of wind	0.00	3.19	0.18	0.05	0.00	2.76	0.19	0.07	0.02	1.89	0.40	0.46	0.04	2.66	0.29	0.20
	v-component of wind	0.00	4.47	0.05	0.69	0.00	3.69	0.06	0.67	0.11	2.87	1.12	0.32	0.06	2.08	0.16	0.36

P\* means ANOVA p-value.

데, 나머지 15%는 분석에 사용된 자료의 개수가 작은 것과 예측자료와 비교할 만한 관측자료의 유효성 등과 관련된 결과로 사료된다. 따라서 본 연구의 모델검증에 사용된 자료들은 통계적으로 유의성이 있다고 평가할 수 있다.

Base case와 KMOE case에 대해 비교해 볼 때, 대체적으로 기온에서의 변화보다 풍속의 변화가 좀 더 크게 나타나고 있으며 새로운 토지피복도를 사용한 KMOE case가 보다 나은 예측을 하고 있다. 그림 6(a) (2004년 8월 경우)와 그림 7(a) (2006년 8월 경우)에서 시간별 기온의 변화를 비교해 보면, Base case와 KMOE case 모두 유사하게 기온을 예측하고 있으며, 대체로 두 모델링의 결과는 실제 현상을 잘

모의하고 있다. 낮에는 Base case가, 밤에는 KMOE case가 약간 나은 예측을 보이긴 하지만, 2004년의 경우 울산, 마산, 진주지역은 IOA 0.95 이상, RMSE값이 1 전후로 지표면부근 기온의 예측도가 높은 편으로 평가할 수 있으며, 그 외 지역에서도 IOA 값이 증가하였다. 또한 시간별 풍속변화(그림 6(b)와 7(b))를 보면, 2004년 8월의 경우는 7개의 관측지점 모두, 2006년 8월의 경우는 부산지역을 제외한 모든 지점에서 USGS 토지피복도 자료를 사용한 경우보다 환경부의 중분류 토지피복도 자료를 사용한 KMOE 모델링 경우가 실제 관측자료의 경향을 잘 반영하였다. 2004년의 경우, 울산지역은 RAMS의 USGS 토지피복도 자료를 사용하였을 때 RMSE값이 2.03이었으

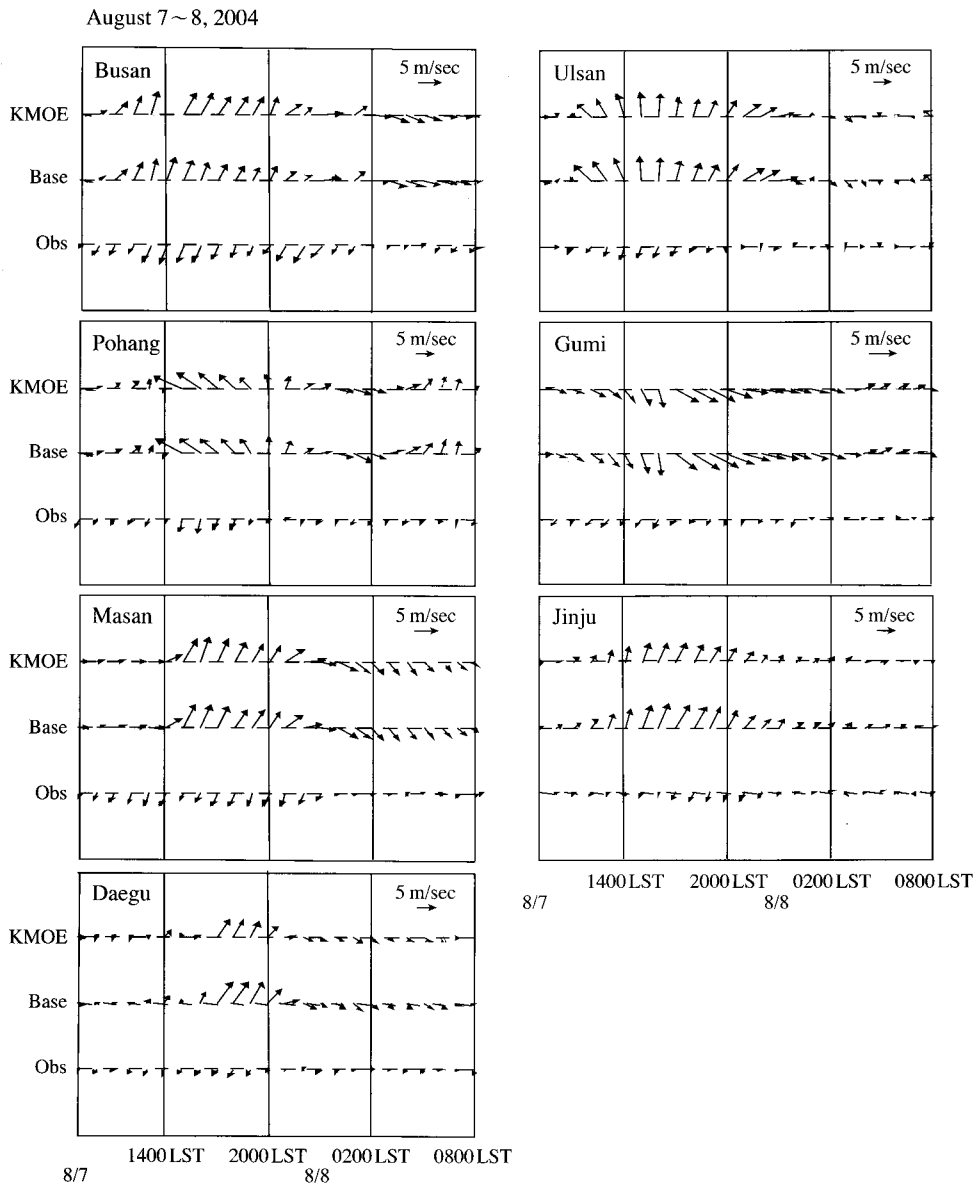


Fig. 8. Hourly wind vectors simulated and observed on August 7~8, 2004.

나 새로운 토지피복도 적용 후 1.49로, 포항지역은 1.64에서 1.06, 구미지역 1.76에서 1.49, 마산지역 1.48에서 1.46, 진주지역 2.88에서 1.73, 대구지역 2.08에서 1.28로 감소하였으며, 2006년의 경우 울산 지역 1.95에서 1.46, 포항지역은 1.64에서 1.22, 구미 지역 1.74에서 1.68, 마산지역 2.12에서 2.08, 진주지

역 2.76에서 1.78, 대구지역 1.08에서 0.85로 감소하여 상당히 향상된 예측결과를 나타내었다. 특히 2006년의 경우가 2004년에 비해 다소 과대평가되어 예측되어지는 경향이 있는데 이는 실측자료가 2 m/s 이하인 약풍인 경우가 대부분으로 모델에서는 이를 잘 묘사하지 못하지만, 두 경우 모두 풍속에 대해 Base

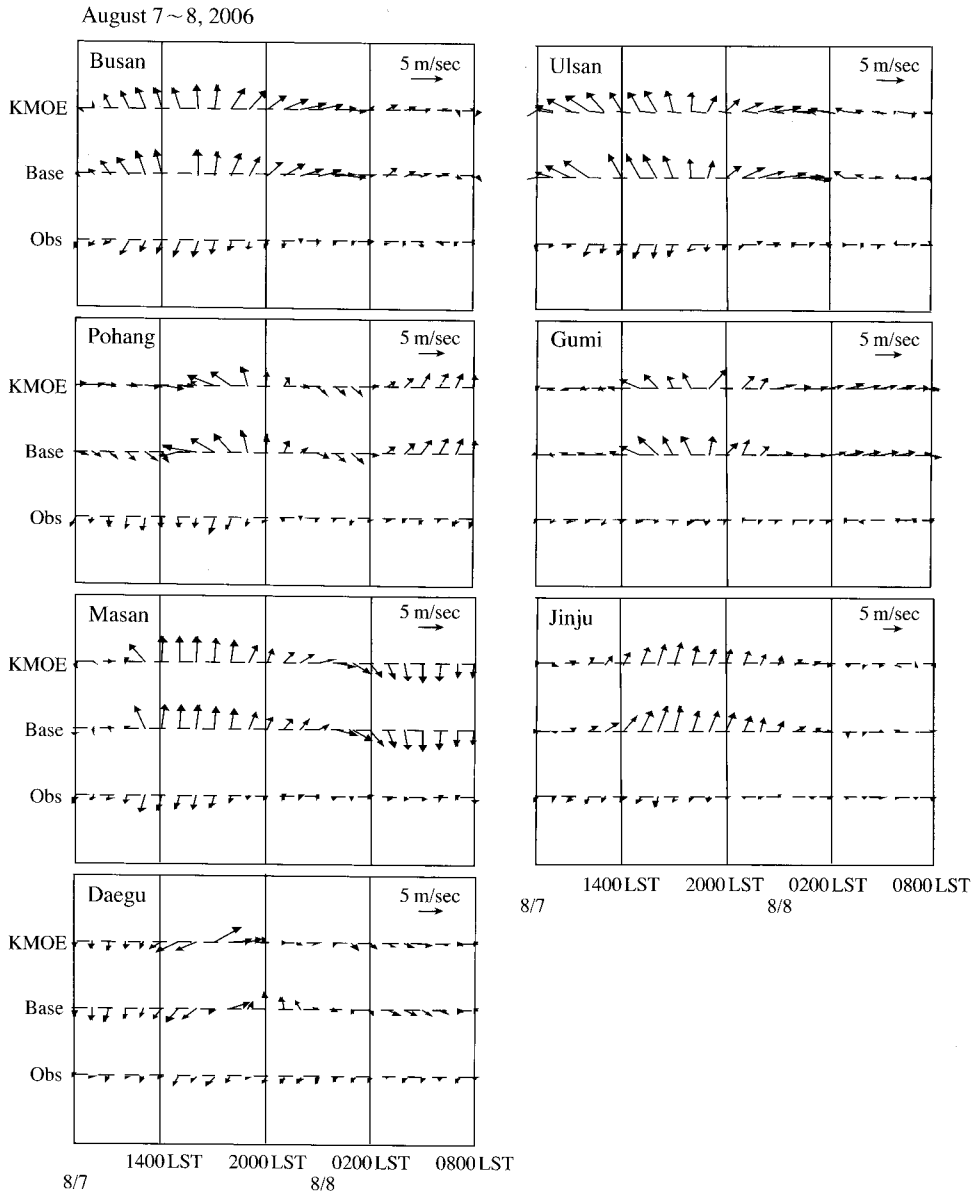


Fig. 9. The same in Fig. 8 except for 2006.

case보다 KMOE case가 보다 더 향상된 결과를 나타내었다. 시간대별로 비교하면, 대체로 화학물질의 사용과 유출 가능성이 높은 낮시간대의 수치모의 결과들이 밤시간대에 비해 좋은 결과를 보이고 있어 CARIS에서 산출하는 실시간 바람장에 대한 신뢰도를 높일 수 있으리라 본다. 표 3에서 상관성의 변화

는 크지 않지만 바람의 u와 v성분을 제외하고 두 경우 대체로 0.6 이상을 나타내고 있다. 비교적 낮은 풍속상관은 일반적으로 모델이 지상바람에 영향을 주는 복잡한 지형 및 건물효과 등을 고려하지 못하기 때문으로 해석(오현선 등, 2002)되는데, 본 연구에서도 그러한 영향을 배제할 수 없지만, 실측자료와의

비교를 통해 그 원인을 분석하였다. 그림 8과 그림 9는 수치모의 된 자료와 관측자료를 시간별로 벡터형식으로 나타낸 바람이다. 관측자료의 경우 대부분 3 m/sec 이하의 약풍에다 북동계열의 바람만 나타내고 있다. 이는 실측자료의 풍속이 약하기 때문에 도시에 위치한 관측지점에서의 바람방향에 대한 의미가 없는 것으로 나타난다. 하지만 그림 4의 온도장의 변화에 따른 그림 5의 바람장의 변화에서처럼, 실측자료보다 두 모델자료 Base case와 KMOE case에서는 그림 5에서 보인 시간별로 나타나는 풍향의 변화(예, 해륙풍 순환)를 잘 나타내고 있으며, 특히 KMOE case의 풍속이 좀 더 약화되어 관측자료에 더 접근함을 볼 수 있다.

따라서 변화된 지표면의 토지피복 상태를 CARIS의 예보 모델 RAMS에 반영하여 수치모의하였을 때, 모델의 입력 형식으로서의 변환과정을 거쳐 생성된 최신의 지표면 자료는 수치모의 결과를 통해 실제 피복상태를 잘 나타냄을 볼 수 있었고, 관측자료와 비교하였을 때 기존의 지표면 자료를 사용하였을 때보다 더욱 향상된 예측결과를 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 화학물질의 안전 관리와 사고발생 시 대책을 위해 구축된 화학물질사고 대응정보시스템 CARIS에서 화학물질의 상세 바람장 예측에 필요한 실시간 기상장 모델 RAMS의 예측도를 향상시키고자 수치모델링을 수행하였다. 수치모의는 모델링 결과에 가장 민감하게 영향을 주는 초기 입력 자료를 개선시킬 수 있도록 하였다. RAMS의 지표면 자료들이 전반부에 대해 10년 이상 경과된 과거의 자료를 사용하여 현재 변화된 실제의 지표면 상태를 정확히 반영하기 어렵다는 점을 감안하여, RAMS에서 사용하는 토지피복도 자료를 남한영역에 대해서 환경부의 최신자료인 중분류 토지피복도 자료로 대체하여 모델링에 사용하였고, 최신 토지 피복도 자료의 모델 적용가능성을 평가하였다.

RAMS의 입력자료 형식으로 변환과정을 통해 변화된 지표면의 토지피복 상태를 CARIS의 예보 모델 RAMS에 반영하여 수치모의하였을 때, 모델의 입력자료 형식으로서의 변환과정을 거쳐 생성된 최신의 지

표면 자료는 수치모의 결과를 통해 실제 피복상태를 잘 나타냄을 볼 수 있었다. 또한 최신의 토지피복 자료를 사용하여 예측된 기상장은 기온에서의 변화보다 풍속의 변화가 좀 더 크게 나타났으며, 해양에 인접위치한 모델링영역의 국지순환 특성을 잘 수치모의 하였고, 기상장 수치모델링의 결과들을 실제 관측자료들과 비교해 보았을 때 기상장의 예측도는 상당히 향상되었음을 평가할 수 있었다. 특히 시간대별로 보면, 대체로 화학물질의 사용과 유출 가능성이 높은 낮시간대의 수치모의 결과들이 밤시간대에 비해 보다 나은 결과를 보였다. 따라서 화학물질의 대기확산을 수치모의하는 데 있어서 초기 입력자료의 개선은 모델의 기상장 예측도를 향상시키는 데 크게 기여하였고, 본 연구에서 생성한 토지피복도 자료는 실시간 기상장 모델 RAMS의 초기 입력자료로 적용가능함을 볼 수 있었다.

이러한 결과는 실시간 상세 예측 기상자료를 제공하는 CARIS의 신뢰도를 보다 더 증대시킬 수 있을 것이며, 사업장이나 공단지역 등에서 취급하는 화학물질뿐만 아니라 일반오염물질에 대한 대기질 개선 정책수립 및 관리방안에 기초자료로 활용될 수 있으리라 본다. 또한 CARIS와 같은 대기환경 관리 시스템과 효과적인 대응 시스템을 통해 국가적 차원의 위험물 관리에 대한 핵심기술로 활용되어 국민의 건강과 환경을 보호할 수 있으리라 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부의 2005년 화학물질사고대응정보시스템 유지보수사업의 일환으로 진행된 것으로 연구비지원에 감사드립니다. 또한 본 연구에 사용된 shape 파일 형태의 중분류 토지피복도 자료는 환경부로부터 제공받은 것임을 밝히며, 자료제공에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 국립환경과학원 (2002) 화학물질사고대응요령 교육, 국립환경과학원 화학물질안전관리센터 유해화학물질사고대응지침서, 68pp.
- 국립환경과학원 (2005) 화학물질사고대응정보시스템 개발 3

- 차년도 보고서, 국립환경과학원 화학물질안전관리센터, 11-90.
- 국립환경과학원 (2007) 화학물질안전관리센터, <http://ccsms.nier.go.kr/>.
- 김철희, 나진균, 박철진, 박진호, 임차순, 윤 이, 김민섭, 박춘화, 김용준 (2003a) 유해화학물질 대기확산 예측을 위한 RAMS 기상모델의 적용 및 평가, 한국대기환경학회지, 19(5), 595-610.
- 김철희, 박철진, 박진호, 임차순, 김민섭, 박춘화, 천광수, 나진균 (2003b) 유해화학물질 관련 대기오염사고 대응을 위한 화학물질사고대응정보시스템 (CARIS), 환경영향평가, 2(1), 23-34.
- 오현선, 김영성, 김용준 (2002) 우리나라 국지 대기순환 모델 결과의 검증에 관한 고찰, 한국대기환경학회지, 18(1), 59-65.
- 원경미, 이화운, 정우식, 이귀옥, 김철희 (2004) 초기 입력 자료의 개선에 의한 RAMS 기상장 예측, 2004년 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 75-76.
- 환경부 (2007) 환경지리정보, <http://egis.me.go.kr/egis/>.
- ATMET (2002) 「RAMS Technical description」, RAMS Technical manual at atmospheric meteorological and environmental technology site (<http://www.atmet.com>).
- Chen, F. and J. Dudhia (2001) Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system Part I: Model implementation and sensitivity, *Monthly Weather Review*, 129, 569-585.
- Ek, M.B., K.E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grummann, V. Koren, G. Gayno, and J.D. Tarpley (2003) Implementation of Noah land-surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta mode, *Journal of Geophys. Res.*, 108(D22): No. 8851 NOV 29.
- Kusaka, H. and F. Kimura (2004) Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 67-80.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura (2001) A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, *Bound.-Layer Meteorol.*, 101, 329-358.
- Liu, Y., F. Chen, T. Warner, S. Swerdlin, J. Bowers, and S. Halvorson (2004) Improvements to surface flux computations in a non-local-mixing PBL scheme, and refinements on urban processes in the Noah land-surface model with the NCAR/A TEC real-time FDDA and forecast system, 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, 11-15 January, 2004, Seattle, Washington.
- Pielke, R.A. (1974) A three dimensional numerical model of the sea breeze over south Florida, *Mon. Weath. Rev.*, 102, 115-139.
- Walko, R.L., C.J. Tremback, R.A. Pielke, and W.R. Cotton (1995) An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios, *J. Appl. Meteor.*, 34, 9pp.