

## 건물효과를 고려한 연안도시지역 고해상도 기상모델링

### High-resolution Simulation of Meteorological Fields over the Coastal Area with Urban Buildings

황미경 · 김유근\* · 오인보<sup>1)</sup> · 강윤희

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>울산대학교 환경보건센터

(2009년 12월 1일 접수, 2010년 1월 14일 수정, 2010년 2월 25일 채택)

Mi-Kyoung Hwang, Yoo-Keun Kim\*, In-Bo Oh<sup>1)</sup> and Yoon-Hee Kang

*Division of Earth Environmental System, Pusan National University*

<sup>1)</sup>*Environmental Health Center, University of Ulsan*

(Received 1 December 2009, revised 14 January 2010, accepted 25 February 2010)

#### Abstract

A meso-urban meteorological model (Urbanized MM5; uMM5) with urban canopy parameterization (UCP) was applied to the high-resolution simulation of meteorological fields in a complex coastal urban area and the assessment of urban impacts. Multi-scale simulations with the uMM5 in the innermost domain (1-km resolution) covering the Busan metropolitan region were performed during a typical sea breeze episode (4~8 August 2006) with detailed fine-resolution inputs (urban morphology, land-use/land-cover sub-grid distribution, and high-quality digital elevation model data sets). An additional simulation using the standard MM5 was also conducted to identify the effects of urban surface properties under urban meteorological conditions. Results showed that the uMM5 reproduced well the urban thermal and dynamic environment and captured well the observed feature of sea breeze. When comparison with simulations of the standard MM5, it was found that the uMM5 better reproduced urban impacts on temperature (especially at nighttime) and urban wind flows: roughness-induced deceleration and UHI (Urban Heat Island)-induced convergence.

**Key words** : uMM5, Urban canopy parameterization, Meteorological modeling, Sea breeze

#### 1. 서 론

최근 부산지역에서 나타난 연안지역 건물 고층화 현상은(Choi *et al.*, 2005) 도시 기상조건을 변화시킬 수 있는 중요한 원인으로 부각되고 있다. 예로 부산 지역에서 관측된 장기간의 기상자료를 분석한 결과

에 의하면 최근 국지적 고층화 현상이 집중되었던 연안지역에서 풍속약화 및 기온증가 등의 변화가 뚜렷하게 나타났다(오인보 등, 2008). 즉 건물 고층화 현상이 국지/도시규모의 기상조건에 미치는 영향에 대한 과학적 평가가 필요하며, 이는 도시생활환경 뿐만 아니라 연안 대기질변화를 이해하는데 크게 기여할 수 있다. 관측망의 한계와 고층화 현상으로 보다는 많은 관측망이 필요해진 현실을 고려해 볼 때 건물효과를 고려한 상세 수치모델링 방법 개발과 적용은

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : kimyk@pusan.ac.kr

도시기상 연구에 상당부분 진전을 가져올 수 있다.

건물효과를 기상수치모델에 적용시키기 위해서는 도시구조 및 미규모 기상인자에 대한 도시캐노피모수화방안(Urban Canopy Parameterization, UCP)이 요구되며 이에 대한 연구가 관측과 병행하여 다양하게 진행되고 있다(Grimmond, 2006). Kusaka *et al.* (2001)과 Brown and Williams (1998)는 캐노피를 단일층과 다층으로 각각 고려하여 캐노피내의 상세한 복사과정을 모사하였으며, Holt and Pullen (2007)은 중규모 모델에 단일층과 다층 UCP를 각각 적용하여 캐노피층의 세분화에 따른 도시열섬 모사능력을 진단하였다. Martilli (2003)은 이상적인 2차원 모형을 바탕으로 UCP를 이용하고, 도시효과가 해풍의 내륙침투에 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다. Otte *et al.* (2004)는 UCP로 항력접근법(drag-force approach)과 SM2-U (3D) LSM (Sub-Mesoscales Soil Model, Urbanized version (3D) Land Surface Model)이 함께 적용된 도시형MM5 (urbanized Mesoscale Model, uMM5)를 이용하여 기존의 MM5에 비해 향상된 도시기상장을 모의할 수 있었음을 제시하였다. 국내에서는 Lee *et al.* (1997)이 도시캐노피모델을 이용하여 캐노피층 내부 및 상층의 흐름을 모사한 바 있으나, 도시 내의 상세 도시구조물구조(도시구조물의 공간적 분포)에 대한 정보 부족으로 중규모기상모델 내에 도시구조가 충분히 고려되지 못했다. 최근 변재영 등(2008)은 WRF-UCM (Weather Research & Forecasting-Urban Canopy Model)을 이용하여 서울지역을 대상으로 도시캐노피모델이 기상예보향상에 미치는 영향을 분석해보고자 시도한 바 있다.

본 연구에서는 도시캐노피층 내의 건물구조, 지형과 도시피복 수치정보를 근간으로 고해상도 모델링 입력자료를 구축하고, 이를 바탕으로 uMM5 모델을 수행하여 연안지역 기온/바람장 및 캐노피층 에너지수지를 분석하였다. 기존 MM5 모델링 결과와의 비교를 통해 건물효과에 따른 기상장 변화와 모델링 정확도 개선 정도를 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 uMM5의 개요

PSU/NCAR MM5의 도시형 버전(uMM5)은 EPA-

NOAA (U.S. Environmental Protection Agency-National Oceanic and Atmospheric Administration)의 공동 연구로 개발되었으며, 본 연구에서 사용된 uMM5는 MM5 version 3.5를 기본으로 도시캐노피모수화방안(UCP)이 추가되어 도시구조물들에 의한 역학적·열역학적 효과가 추가된 모델이다. 역학적 효과는 운동방정식과 TKE (Turbulent Kinetic Energy) 방정식의 개선을 통해 도시구조물들에 의한 항력을 주고, TKE의 증가를 고려하였다. TKE는 MM5에서 제공되는 Gayno-Seaman PBL scheme (Shafran *et al.*, 2000)을 바탕으로 수정되었다(이후 Modified Gayno-Seaman PBL scheme로 언급). 열적 효과는 온도방정식과 지표에너지수지를 통해 모수화되었으며, 3차원 SM2-U (3D) LSM을 이용하여 에너지수지에 도시 내 빌딩들 사이에 복사간섭과 그림자 효과가 고려되었다. 모델에 대한 자세한 개요 및 모수화 방안은 Dupont *et al.* (2004)와 Otte *et al.* (2004)에 자세히 제시되어 있다.

도시구조는 수평적으로 빌딩협곡(canyon)과 빌딩의 비율을 통해 고려되었으며, 연직적으로 도시건물군지역은 건물의 역학적 효과를 고려하기 위해 항력접근법을 사용하였다. 여기서 항력접근법은 실제 지표면을 최하층으로 사용하며 도시캐노피 내에 격자 내 건물효과는 모수화되어 모델에 입력된다(이후 3장에서 자세히 설명). 단, 각 격자 내 건물의 부피는 고려되지 않는다.

### 2.2 모델링 영역 및 방법

모델링영역은 81 km부터 1 km 격자간격을 가지는 다섯 개로 구성된다. 분석의 주된 대상인 1 km 도메인은 부산지역을 중심으로 한 61×58 격자영역으로 설정하였다. 각 영역의 위치와 격자정보는 그림 1에 제시되어 있다. 연직으로는 마지막 도메인을 제외하고는 45개의 층(half sigma=0.998, 0.993, 0.985 (이하 생략))으로 구성하고 최고층의 기압은 100 hPa로 설정하였다. 마지막 영역은 uMM5의 건물효과를 충분히 나타내기 위해 하부 100 m 내에는 6개층(1, 3, 6, 12, 27, 63 m)을 고려하여 연직 37개 층으로 구성하였다.

모델링은 one-way nesting 방법으로 각각의 도메인을 대상으로 사례기간 동안 수행되었다. 전체 다섯 개의 영역에 대해 우선 MM5를 수행하였고, 마지막 영역의 경우는 건물효과를 자세히 고려하기 위해 uMM5 모델링을 추가로 수행하였다. 초기 및 경계조

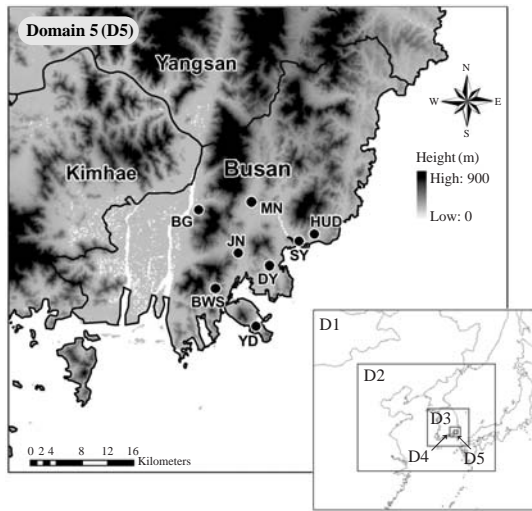


Fig. 1. Topographic map including locations of meteorological sites (BWS: Busan weather station, MN: Myeongnyun, BG: Bukgu, JN: Jin, SY: Suyeong, HUD: Haeundae, DY: Daeyeon, and YD: Yeongdo) and five horizontal domains for uMM5 simulation (lower right).

건으로는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 1도 간격 6시간 간격의 FNL(Final) 분석장을 사용하였고 NCEP에서 제공하는 GTS(Global Telecommunication System) 관측자료를 사용하여 마지막 도메인을 제외한 영역에서 4차원 자료동화를 수행하였다.

적은 모수화과정은 격자크기가 10~30 km인 중규모에 적합한 Grell cumulus parameterization을 첫 번째 영역부터 세 번째 영역까지 적용하고, 복사과정, 미세 물리과정은 전 영역에 대하여 각각 수증기, 이산화탄소, 오존 등의 상세한 흡수 스펙트럼의 효과를 나타내는 RRTM radiational scheme과 상층의 과냉각수와 눈이 서서히 녹는 효과 등이 가미된 Mixed-Phase scheme을 이용하였다. 대기경계층 물리과정과 지표모델은 네 번째 영역까지 MRF PBL scheme & Noah LSM을 사용하였으며, 마지막 영역의 uMM5와 MM5에는 Modified Gayno-Seaman PBL scheme & SM2-U(3D) LSM과 Pleim-Chang PBL scheme & Pleim-Xiu LSM을 적용하였다. 여기서 MRF PBL scheme은 혼합층 내에 역구배항의 Troen-Mahrt 모사와 K profile에 바탕을 둔 효과적인 모수화방안이며, Noah LSM은 캐노피

층 수분 뿐만 아니라 4개의 토층(10, 30, 60, 100 cm)의 토양습도 및 온도 등을 얻을 수 있다. 한편 Pleim-Chang PBL scheme은 식생캐노피를 고려한 모델로 도시캐노피모수화 방안이 고려된 Modified Gayno-Seaman PBL scheme과 비교될 수 있으며, Pleim-Xiu LSM와 SM2-U(3D) LSM 모두 ISBA(Soil, Biosphere, and Atmosphere) 모델을 바탕으로 개발되어졌으며 두 LSM 모두 각 격자의 토지피복 및 토양의 비율을 고려한다. 각 모수화 과정에 대한 자세한 개요는 NCAR(2005)에 제시되어있다.

모델 입력 자료로 사용된 토지피복자료는 EGIS(Environmental Geographic Information System) 중분류 토지피복도(축척 1:25,000)로서 23개의 범주로 구성되어 있다(<http://egis.me.go.kr/egis/>). EGIS 토지피복자료의 23개 범주를 MM5의 입력자료로 변환하기 위해 USGS 토지피복 범주인 24개로 재분류하고 격자화하여 최종 입력자료로 생성하였다. 본 연구에서는 경남지역을 포함하는 네번째 영역과 부산지역 및 인근을 포함하는 다섯번째 영역에 대하여 EGIS 토지피복도를 산출하여 지표 입력자료로 사용하였다. 마지막 다섯번째 도메인은 SM2-U(3D) LSM의 추가 입력자료를 구축하기 위해 토지피복도별 비율, 17종의 토양 종류, 토양 수분, 심층토양 온도, 식생 비율을 추가적으로 생성하였다. 위의 토지피복도별 비율은 EGIS 자료를 이용하여 24개 토지피복도가 각 격자별로 차지하는 비율을 산출하였으며 토양 종류는 USGS 토양 자료를 사용하였고, 토양 수분은 토지피복도의 함수로서 MM5에서 주어지는 하계의 대표값을 사용하였다. 식생 비율은 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 위성의 10분(약 18.5 km) 전구자료를 바탕으로 12개 식생종에 대하여 계산되었다. 지형 자료는 NASA/NGA에서 제공되는 SRTM version 2의 3초(약 90 m) 지형 DEM(digital elevation model) 자료를 이용하였다(그림 1 참조). 마지막 도메인에 대해 1 km 고해상도 자료를 생성시킴으로써 복잡한 해안선을 상세히 모사시켰고, 산악 및 골을 자세히 나타내어 지형 특성상 골을 따라 형성된 도시 내의 해륙풍 및 산곡풍 발달을 상세히 모사할 수 있도록 하였다.

### 2.3 모델링 기간 및 관측자료

건물효과의 영향을 자세히 고려하기 위해 중규모

의 기상조건이 안정되고 국지풍이 잘 발달하는 여름철 대표적인 기간을 대상으로 모델링을 수행하였다. 선택된 기간은 2006년 8월 3일부터 8일까지 총 6일간으로(초기 하루는 spin-up기간), 이 기간 동안 고기압의 영향을 지배적으로 받으며 낮 동안의 운량이 3미만으로 날씨가 맑았다. 예로 6일의 종관일기도(그림 2)에서 부산지역이 확장된 북태평양 고기압의 영

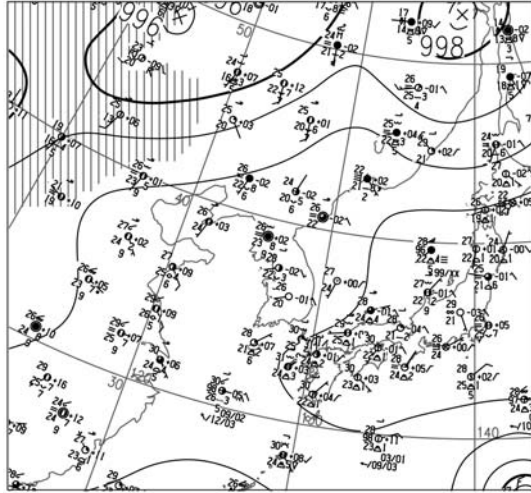


Fig. 2. Surface weather map at 0900 LST on 6 August 2006.

향을 받고 있고 우리나라 남동연안 상공의 종관기압경도가 매우 약함을 볼 수 있다. 실제로 포항고층기상대에서 관측된 850 hPa 풍속이  $3 \text{ m s}^{-1}$  이하로 풍속이 매우 약했다.

uMM5의 모사능력을 검증하기 위해 부산지역 내 위치한 자동기상관측망(Automatic Weather System, AWS) 8개 지점(그림 1 참고)에서 얻어진 지상 기상인자(풍향, 풍속, 기온) 자료를 사용하였다. 검증을 위한 통계지표는 MB(Mean Bias error)와 RMSE(Root coefficients)를 계산하여 사용하였다(표 1). 여기서 Vector R의 경우 표 1의 식에서 보듯이 풍속뿐 아니라 풍향성분을 함께 고려하여 모사정확성을 평가할 수 있다.

Table 1. Definition of the traditional evaluation statistical measures.

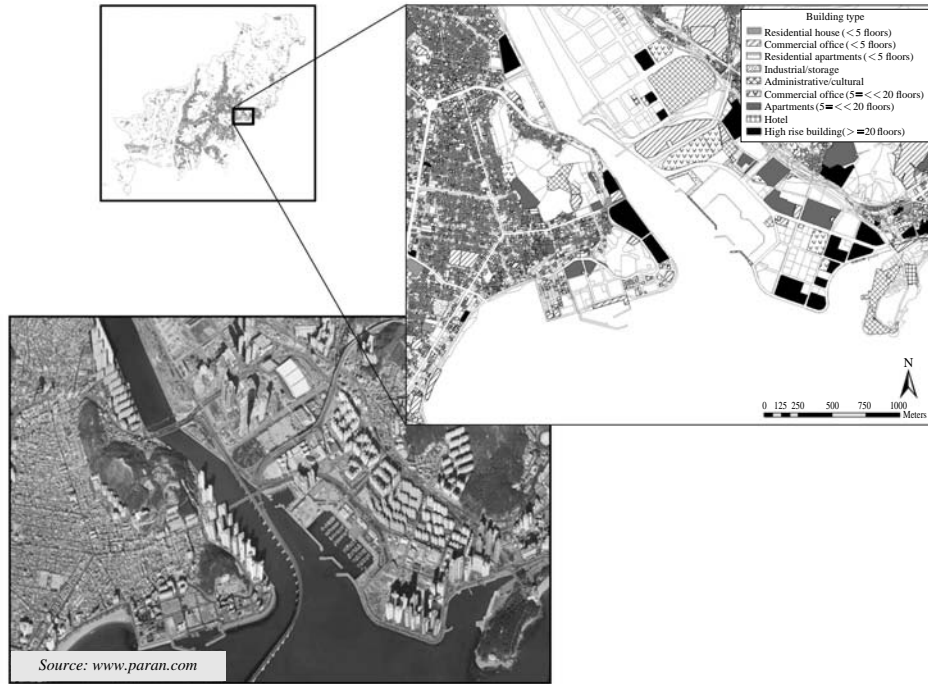
Mean bias error	$MB = \overline{a_{\text{mod}} - a_{\text{obs}}}$
Root mean Square error	$RMSE = [\overline{(a_{\text{mod}} - a_{\text{obs}})^2}]^{0.5}$
Vector correlation coefficients (Vector R)	$R = (S_{u_i u_i} + S_{v_i v_i}) / [(S_{u_i}^2 + S_{v_i}^2) + (S_{u_i}^2 + S_{v_i}^2)]^{-0.5}$ here, $S_{u_i}^2 = \sum (u_i - \bar{u})^2 / n$ ; $S_{uv}^2 = \sum (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) / n$ ; $\bar{u} = \sum u_i / n$

Table 2. Morphology classifications used for uMM5.

Urban subcategory	Function and height of building (Ellefsen's, 1991)	
0	Non-urban areas	
1	Urban areas (by land use classification) not included in Ellefsen's study	
2	Commercial ribbon development	low to medium rise
	Residential house	
	Older commercial ribbons	less than five stories
3	Residential apartments and row houses	low to medium rise
	Apartments and abutted-wall houses	less than four stories
	Industrial/storage	medium rise
4	Residential apartments and row houses	
	Industrial/storage	low rise
	Shopping centers	low rise
5	Houses	low rise
	Truck-related industrial/storage	low rise
	Modern commercial ribbon development	low rise
6	Administrative and cultural	low to high rise
	Commercial offices and retail	low to high rise
7	Apartments and hotels	four or more stories high
	Commercial offices	high rise

**Table 3. Urban canopy parameterization parameters associated with each urban subcategory.**

Urban subcategory	1	2	3	4	5	6	7
Average building height (m)	3	10	11	6	10	45	90
Canyon fraction	0.7	0.7	0.6	0.9	0.85	0.4	0.85
Max anthropogenic heat flux ( $W\ m^{-2}$ )	50	100	100	100	100	100	100



**Fig. 3. Distribution of urban buildings and aerial photography around Suyeong area in Busan.**

### 3. 상세 도시구조 재현 및 건물입력자료 생성

uMM5에서 요구되는 도시의 공간적 구조는 Ellefsen (1991)이 제시한 건물군의 용도 및 높이를 기준으로 분류된다. 모델에는 각 격자별로 도시지역은 6개의 도시하부범주(이후 하부범주로 언급)와 여기에 분류되지 않는 하부범주 1개를 포함하여 전체 7개의 하부범주로 구성된다. 각 영역에 대한 건물군의 특징은 표 2에 제시되어있다. 여기서 각 격자별로 가장 많은 면적을 차지하는 건물군을 기준으로 격자별 대표 범주로 지정하였으며, 각 하부범주는 표 3과 같이 구조물의 높이, 면적 등은 모수인자를 통해 모델 내에 도

시구조를 나타내게 된다.

본 연구에서는 부산지역의 각 지번별 건축물 대장의 395,041건(부산시, 2008년 기준)을 바탕으로 부산지역의 법정행정지번에 대한 3차원 건축물 분포를 재현하였다. 건축물은 ‘건축법시행령 [별표 1] 용도별 건축물의 종류’에 따라 28개의 범주로 분류되며, 이는 다시 건축물의 층수와 목적에 따라 상세히 분류되어 있다. 이를 uMM5의 하부범주 6개로 재분류하였다. 일례로 건축법에서 공동주택은 아파트(5층 이상), 연립주택(4층 이하), 다세대주택(4층 이하)으로 분류되어 있으며, 이는 각각 uMM5의 하부범주 6, 3, 3에 해당된다. 추가적으로 부산지역 항공사진을 통하여 보정·검증하였다(그림 3). 이와 함께 도시지역을 주거, 상

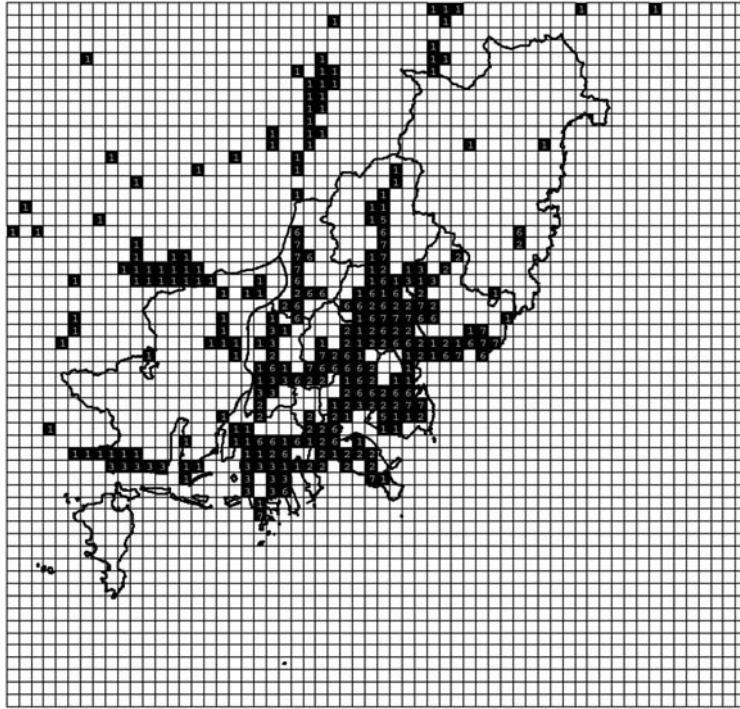


Fig. 4. Urban terrain zone in Busan. White color represents non-urban areas.

업, 공업, 녹지지역 하 세부 15개의 범주로 분류된 용도지역지구도를 함께 고려하였다. 그 결과 각 격자별 도시의 하부범주를 생성하였으며(그림 4) 이는 최종적인 uMM5의 입력자료로 사용되었다.

부산지역의 건물군 분포를 살펴보면, 일반저층주거군(하부범주 2)이 36.5%를 차지하여 가장 넓은 분포를 보였다. 또한 상대적으로 높은 건물군에 속하는 하부범주 6과 7은 연안, 도심, 골을 따라 형성되어 있으며, 전체 18%를 차지하여 상당한 분포를 보였다. 참고로 토지이용도에서 도시로 분류되지 않은 격자는 하부범주 0으로 처리하였으며, 부산외곽지역의 도시지역은 자료의 부재로 하부범주 1로 처리하였다.

uMM5에 반영되는 도시구조는 각 격자별 도시비율에 대한 각 하부범주 비율이 적용된다. 여기서 각 격자별 도시비율은 2.2절에서 제시된 EGIS 토지피복도 자료로부터 생성시켰으며, 건물정보로부터 생성된 하부범주는 격자별 도시협곡 비율 및 건물높이가 고려되어(표 3 참고) 각 수평·연직격자별로 건물구조가 얻어질 수 있다. 구체적으로 살펴보면, 일반저층주거

군(하부범주 2)은 70%의 도시협곡비율과 30%의 건물비율을 나타내는 반면, 하부범주 6과 7은 도시협곡비율이 각각 40%, 85%이고 건물비율이 각각 60%, 15%이다.

#### 4. 국지기상인자 모사능력 평가

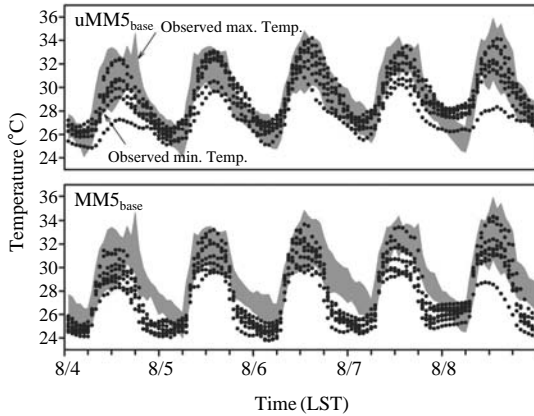
본 장에는 부산도심지의 기온, 풍향, 풍속을 중심으로 uMM5와 MM5 모델링 결과와 관측치를 비교하고 분석하였다. 모델결과는 AWS 관측고도로 초기값 적응시간(24시간)을 제외한 전 모델링기간의 시간별 자료이다.

지상 기온의 경우, MM5와 uMM5 모델값은 관측치와 각각 0.86, 0.87의 상관(R)을 보여 두 모델이 모두 관측된 기온의 시간적 변화를 잘 모사하였다(그림 5). 하지만 표 4에 제시된 시간별, 일최고·최저기온의 통계분석치(MB, RMSE)를 살펴보면, 작은 MB와 RMSE 수치를 가지는 uMM5 모델링 결과가 도시열환

**Table 4. uMM5 and MM5 performance statistics for hourly, daily maximum and minimum value for temperature and wind speed at 8 sites (Busan weather station and 7 AWS sites) during the entire modeling period.**

Statistics	Temperature (°C)			Wind speed (m s <sup>-1</sup> )		
	Hourly	Daily max.	Daily min.	Hourly	Daily max.	Daily min.
MB	-0.33 (-1.69)*	-1.39 (-2.05)	0.78 (-0.83)	0.28 (0.39)	0.66 (1.56)	0.51 (0.17)
RMSE	1.38 (2.16)	1.93 (2.37)	1.21 (1.29)	1.16 (1.27)	1.12 (2.00)	0.84 (0.51)

\*Numbers in parentheses denote the statistics for MM5 simulation.



**Fig. 5. Comparison of observed and simulated temperature during the entire modeling period. Dots indicate the simulated temperatures for each AWS station.**

경을 보다 잘 모사하고 있는 것으로 평가할 수 있다. 특징적으로 MM5의 일최저기온은 과소평가(-0.83 °C)된 반면, uMM5는 과대평가(+0.78°C)를 나타내었는데, 1800 LST 이후 두 모델의 야간 기온변화에서 그 원인을 찾을 수 있다(그림 5 참조). 이는 uMM5가 도시의 에너지를 고려함으로써 나타난 결과로 Otte *et al.* (2004)의 연구결과에도 uMM5가 야간에 매 시간마다 +1~+1.5°C 기온상승을 모의함을 보여주었다.

바람의 경우, 두 모델의 바람벡터 상관은 모든 지점에서 큰 차이없이 0.75 내외의 값을 나타내었다(표 5). 하지만 표 4와 5에 제시된 풍속에 대한 MB와 RMSE 수치는 uMM5 모델링 결과가 관측값과 보다 잘 일치함을 보여준다. 시간별 평균 자료에 대한 uMM5의 MB와 RMSE 수치는 각각 0.28 m s<sup>-1</sup>, 1.16 m s<sup>-1</sup>를 나타내었으며, 특히 일최저풍속에서는 uMM5가 MM5와 비교해 약 50% 정확도가 향상되었음을 MB와 RMSE의 비교에서 확인할 수 있다(표 4). 표 5

**Table 5. uMM5 and MM5 performance statistics for each station during the entire modeling period.**

Station	Wind vector R	Wind speed (m s <sup>-1</sup> )	
		MB	RMSE
BWS	0.79 (0.75)*	0.36 ( 0.50)	1.04 (1.10)
SY	0.75 (0.78)	-0.11 (-0.13)	0.97 (1.14)
YD	0.77 (0.85)	1.14 ( 0.85)	1.76 (1.20)
HUD	0.74 (0.69)	0.46 ( 0.46)	1.00 (1.10)
DY	0.79 (0.79)	0.63 ( 0.63)	1.10 (1.23)
JN	0.73 (0.73)	-0.49 (-0.12)	1.09 (1.16)
MN	0.74 (0.74)	-0.31 (0.19)	0.86 (1.55)
BG	0.73 (0.68)	0.42 (0.71)	1.19 (1.57)

\*Numbers in parentheses denote the statistics for MM5 simulation.

에 제시된 지점별 풍속 통계치 비교에서도 지점별 차이가 존재하나 대부분의 지점에서 기존 MM5 결과보다 향상된 모델결과를 볼 수 있다. 여기서, 풍속 정확도 향상은 기본 역학방정식(운동방정식 및 TKE 방정식)에 추가된 항이 중요한 인자로 작용한 것으로 사료된다. 구체적으로 살펴보면, 기존 MM5에서 사용되는 거칠기접근법은 모든 도시영역에 대하여 연직적으로 한 층으로 고려하여 일정한 거칠기길이 주어져 모델내에서 계산된다. 한편 uMM5에서는 건물 및 식생의 효과를 충분히 반영할 수 있는 항들의 추가와 연직으로 도시캐노피층을 다층으로 분류하여 건물에 의한 항력 등을 고려함으로써(Taha, 2008) 도시바람장의 재현력 향상에 중요한 영향을 미친 것으로 해석된다. 하지만 이는 두 모델의 PBL scheme과 LSM 모델의 차이가 포함된 것이므로, 앞서 제시한 uMM5 UCP의 원인만으로 해석하는 것은 한계가 있다. 그리고 일최저풍속의 MB는 YD지점(섬 지역)의 풍속 과대평가로 uMM5의 결과에서 오히려 더 커졌다. 이는 내륙지역의 전반적 기온상승에 의한 해양과의 온도경도 증가에 따른 연안지점의 풍속 강화와 더불어 일반저층주거군(건물비율 30%)으로 분

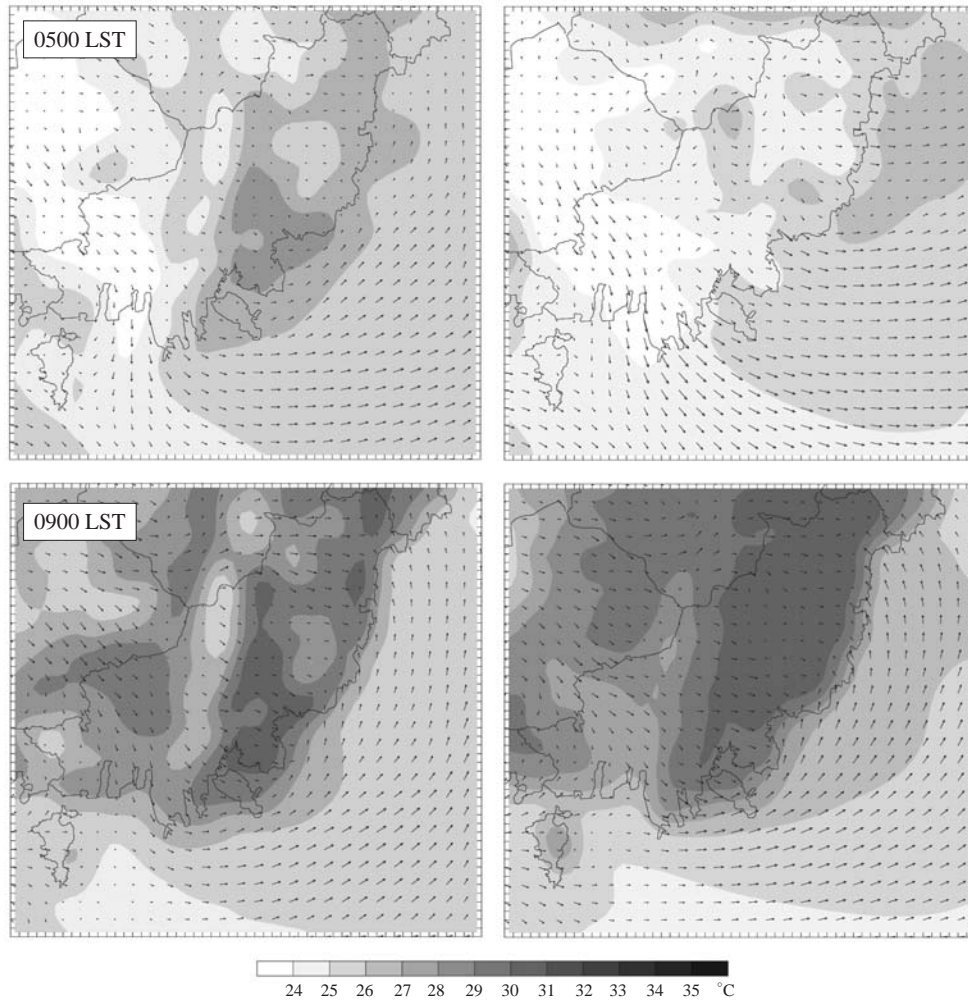


Fig. 6. Horizontal temperature (interval=1°C) and wind (arrows, every second grid point) field for uMM5 (left) and MM5 (right) on 6 August 2006.

류되어 풍속약화가 적게 모의된 결과로 사료된다.

## 5. 도시기상장

이 장에서는 uMM5에서 얻어진 도시열환경과 함께 바람장을 분석하였다. 특히 종관장이 가장 약하게 나타나(850 hPa 바람이  $3 \text{ m s}^{-1}$  이하) 모의기간 중 가장 뚜렷한 해풍발달이 존재한 6일을 집중분석하였다. 이와 함께 도시모수화방안의 추가로 uMM5에서 얻

어진 도시캐노피층 내의 에너지수지 즉, 현열속(sensible heat flux), 잠열속(latent heat flux), 저장열속(storage heat flux)을 함께 분석하였다.

### 5.1 도시 기온장 및 바람장

그림 6은 uMM5와 MM5로 계산된 온도장과 바람장을 나타내었다. 해풍의 시작, 침투와 소멸이 적절히 나타나는 시간대(0500, 0900, 1400, 1900 LST)를 중심으로 도시의 열적구조와 해풍발달 특징을 기술하였다. 분석고도는 캐노피상층 기온과 바람의 변화를



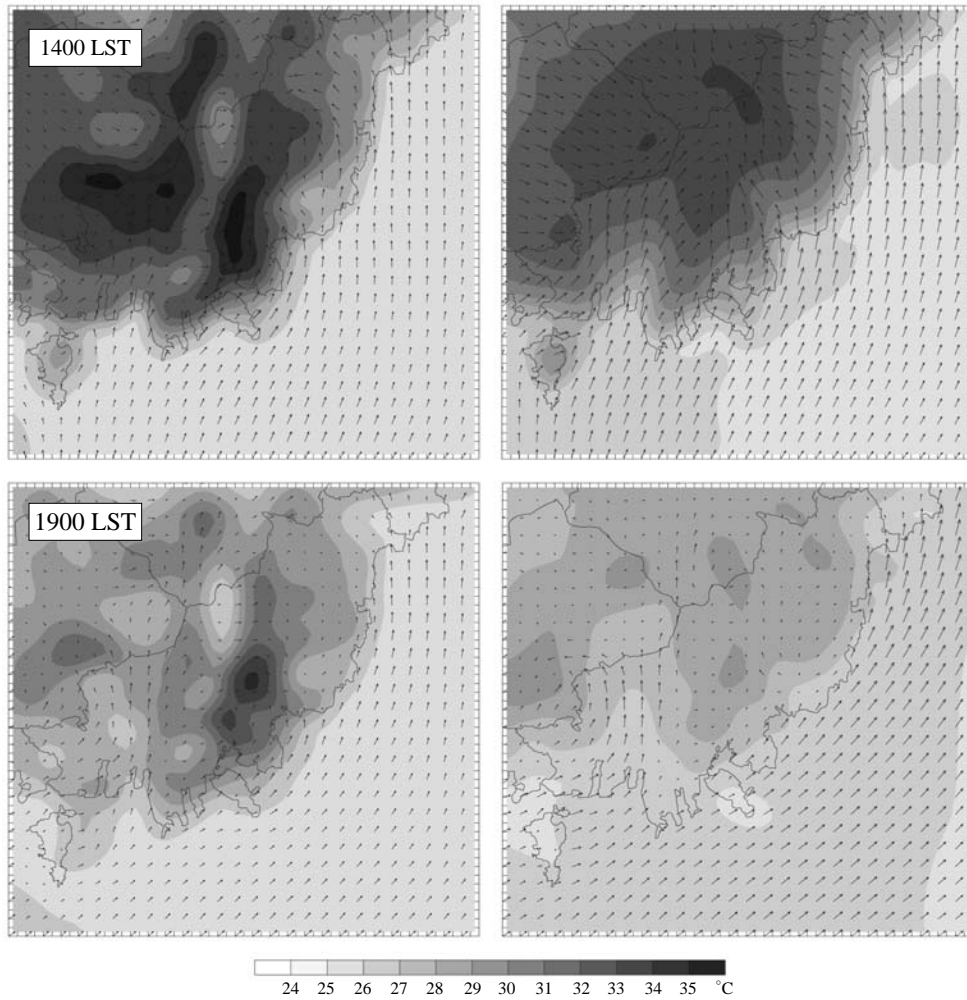


Fig. 6. Continued.

잘 고찰하기 위해 50 m로 하였다.

0500 LST의 경우 uMM5 모델링 결과는 전체적으로 내륙지역에 약한 육풍이 존재하며 서부산지역(낙동강 하구언의 저지대)을 중심으로는 뚜렷한 육풍이 나타났다. 골을 따라 형성되어 있는 부산의 도심지역(그림 1의 BWS, JN, DY지점 부근)과 연안 수영·해운대지역(그림 1의 SY, HUD지점 부근)에서는 저풍속역과 함께 도시열섬(외곽지역과 비교해 3°C 이상의 차이)이 형성되었다. MM5 결과와 비교해 보면, 내륙전역으로 기온증가 및 풍속감소가 뚜렷하며 특히 uMM5 고온역 모사지점을 중심으로 기온 및 풍속차가 최대 2°C, 2 m s<sup>-1</sup> 이상이 나타났다. 이러한 결

과는 uMM5가 도시구조의 비균질성을 잘 반영하여 바람과 기온의 국지적 차이를 잘 모사하였음을 보여주는 것이다.

일출 후 0900 LST에는 내륙지역 특히, 부산 및 주변 김해와 양산을 포함한 도시지역(그림 1, 4 참조)의 기온상승이 uMM5 모델링결과에서 뚜렷하다. 이는 5.2절에서도 설명되지만 uMM5에서 고려된 도시저장열이 그 원인으로 해석된다. MM5와 비교해보면 도시지역은 기온차가 거의 없지만 산지에는 MM5에 비해 기온하강(-1.5°C)의 기온차가 나타났다. 이는 LSM 모델의 모사특성에 기인한 것으로 분석되나 관측자료의 부재로 두 모델의 정확성을 평가하긴 어렵

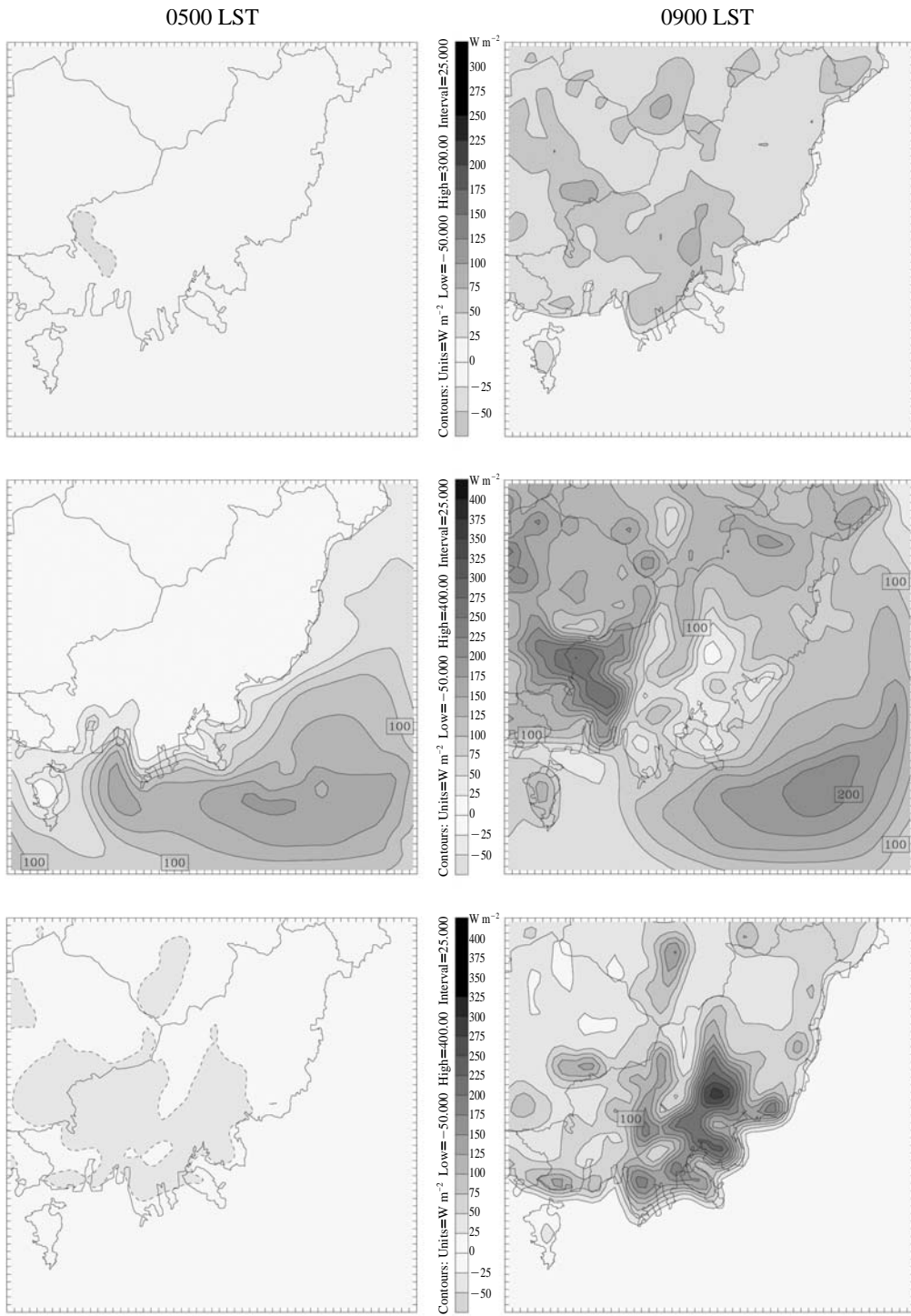


Fig. 7. Horizontal distribution of sensible heat flux (top), latent heat flux (middle), and storage heat flux (bottom) on 6 August 2006. Solid and dashed lines for positive and negative values, respectively.

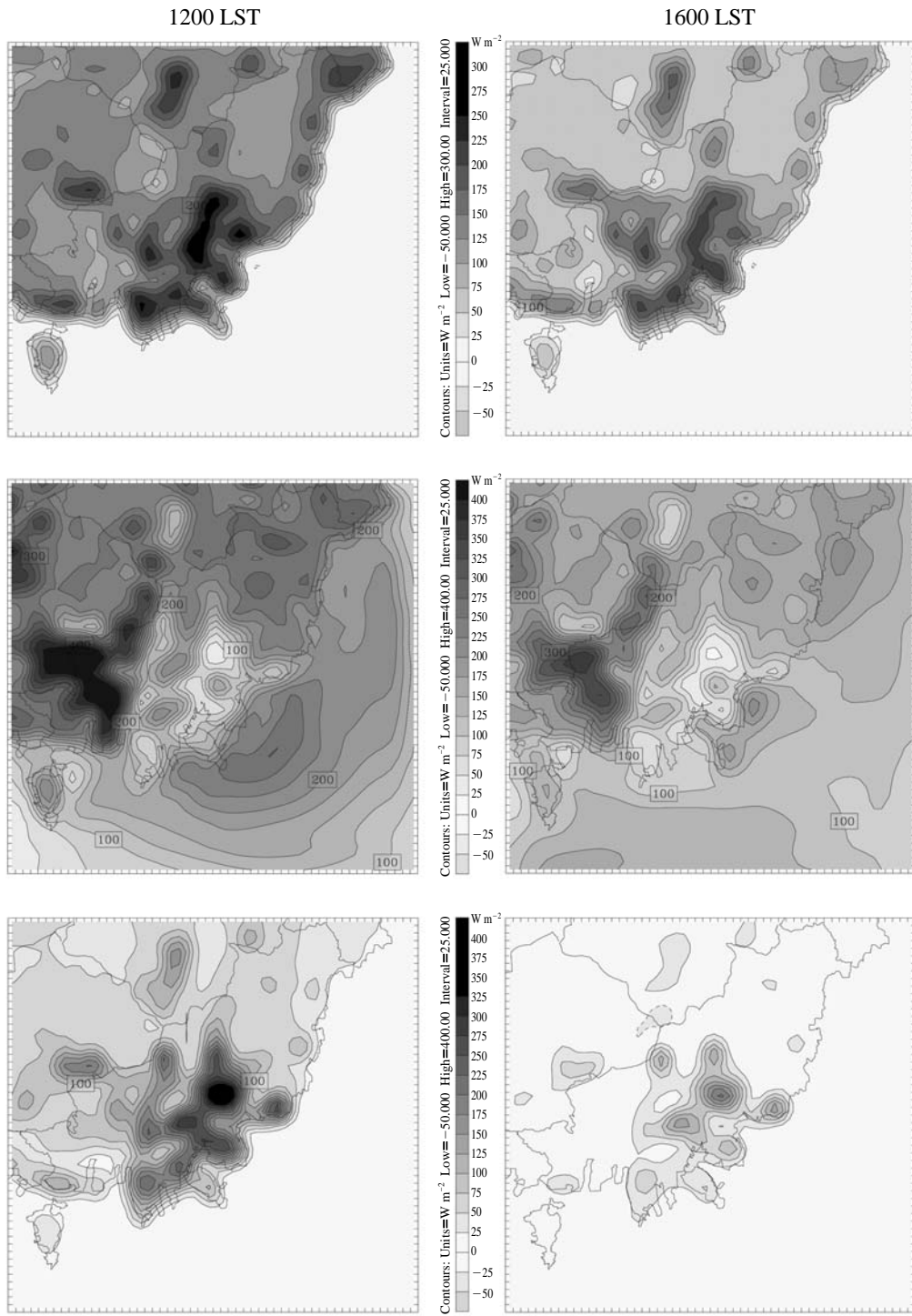


Fig. 7. Continued.

다. 한편 바람장의 경우 해안선을 따라 대기정체 및 풍향의 전환이 나타나고 해풍 발달이 시작됨을 보여 준다. uMM5 모델에서 계산된 해안선과 인접한 내륙 지역의 풍속은 다른 도시지역과 비교하여 상대적으로 약하게(약  $1 \text{ m s}^{-1}$ ) 모사되었고 MM5에 비교해 약  $1 \text{ m s}^{-1}$  이상 차이가 나타났다. 이는 연안지역을 중심으로 발달한 도시구조가 모델에 반영된 결과이다.

1200 LST 이후에는 도시지역을 중심으로 고온( $34^\circ\text{C}$  이상)이 uMM5 모델링 결과에서 뚜렷하게 나타났다(그림 생략). 수영을 비롯한 연안역에 온도경도가 증가하고  $3 \text{ m s}^{-1}$  이상의 해풍이 유입되어 부산 도심(JN, MN)을 중심으로 수렴역이 형성되었다. 서부산 연안지역에도 해풍이 약 5 km까지 진입하였고 도시하부 카테고리 입력된 격자를 중심으로 풍속 약화(최대  $-1.5 \text{ m s}^{-1}$ )가 나타났다. 반면 MM5 모델링 결과는 부산도심 수렴역이 뚜렷하지 않고 도시지역의 풍속이 상대적으로 강하게 나타났다.

1400 LST에는 오전 시간대와 비교해 두 모델링 결과의 차이를 명확히 볼 수 있다. uMM5의 경우 서부산 연안에서 유입된 해풍침투가 특징적이다. 해풍이 약 10 km 이상 내륙으로 침투하였으나 서부산 연안지역의 해풍은 지형적으로 동쪽 골을 따라 부산도심에서 수렴되어 부산 남동쪽지역의 해풍침투를 오히려 저지하는 역할을 하였다. 반면 MM5 모델링 결과는 uMM5에 비해 상대적으로 강한 풍속이 도시지역에 나타나며 수렴역이 북부산에 형성되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 두 모델의 고온역 강도 및 위치와 관련한다. uMM5 결과는 약한 풍속조건에서 부산도심(JN, MN지점), 김해, 양산 부근에 고온역이 강화된 반면, MM5는 북부산지역 및 부산외각에서 고온역이 모사되었다. 이후 1600 LST에도 uMM5는 여전히 도심지역에 수렴역을 모사하였으며(그림 생략), Oh *et al.* (2006)에서 제시한 해풍자연과 유사한 바람장 분포를 보였다.

1900 LST는 공기수렴 약화와 함께 부산을 비롯한 김해, 양산지역의 고온역이 소산되는 모습이다. 특징적으로 uMM5는 명륜지점(MN 지점)에서는 약  $31^\circ\text{C}$  이상의 고온이 잔존하고 있음을 모사하였고, 관측치( $31.6^\circ\text{C}$ )도 이와 일치한다. 이러한 초저녁의 도심 고온현상은 도시구조의 정확한 입력자료가 모델에 적용된 결과이다. 이후 2300 LST까지 도심역에 약  $29^\circ\text{C}$ 의 기온이 모의되었으며, 부산 인근 남동연안으로 도

시열의 이류 및 확산으로  $1\sim 2^\circ\text{C}$ 의 온도상승이 나타났다(그림 생략). 이는 부이자료 등의 관측자료로 검증이 요구되며, 국지적 폐순환계가 다음 날의 도시열 환경 변화에 영향을 미칠 수 있음 보여주는 결과이다.

이상과 같은 결과에서 고해상도 도시입력자료를 사용한 uMM5 모델링은 부산을 비롯한 인근외각 도시의 고온역 모사 및 복잡산악과의 불균등 가열을 모의하는 특징을 나타내었고, 앞장의 관측자료와의 비교검증에서도 나타났듯이 야간 고온현상 모사에 MM5 결과와 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 바람장은 내륙지역에 풍속약화를 모사하는 특징을 나타내었으며, 특히 도시 내 건물군에 의한 풍속약화가 뚜렷하였다.

## 5.2 도시 캐노피층 에너지수지

기온분포 및 바람장을 모사하는 데 지표 에너지수지는 아주 중요한 요소로, 상세한 도시지표특성을 바탕으로 UCP을 통해 향상된 에너지 수지를 얻을 수 있을 것이며, 이는 결국 모델의 신뢰성 향상에 중요한 요소이다. 특히 uMM5는 기본 MM5에서 제공되지 않는 도시건물군에 의한 저장열속을 함께 고려하여 도시캐노피층의 에너지수지를 모의한다. 여기서 저장열속은 도시의 3차원구조를 바탕으로 정확한 모의가 가능하며 이는 수치모델의 도시 대기경계층의 발달, 증발량, 현열속 모의를 비롯한 도시열섬 발생의 중요한 인자로 제시된다(Grimmond and Oke, 1999). 그림 7은 수치모의된 0500, 0900, 1200, 1600 LST의 현열속, 잠열속, 저장열속을 바탕으로 에너지수지를 분석한 것이다. 본 연구에서는 부산지역의 지표 에너지수지의 관측부재로 여러 선행연구에서 제시된 관측 및 수치모의 결과와 비교분석하였다.

0500 LST에 현열은 전 영역에서 거의  $0 \text{ W m}^{-2}$ 를 나타내었고, 잠열은 연안에서 해안지역에 양의 경도를 가지며 내륙지역은 현열과 마찬가지로  $0 \text{ W m}^{-2}$ 를 나타내었다. 저장열속 또한 전 영역에  $-25\sim 0 \text{ W m}^{-2}$ 의 값들이 분포하였다. 하지만 일출 후 지표 가열과 함께 0900 LST에 급격한 증가가 일어났다. 여기서 잠열속과 저장열속에 주목할 필요가 있다. 먼저 잠열속은 0500 LST에 비해 내륙지역을 중심으로 증발산 작용에 의해 양의 증가를 보였으나, 도심지의 경우 그 증가량이 적다. 즉 도시지역은 외곽지역에 비해  $50 \text{ W m}^{-2}$  이하의 낮은 수치를 나타내었다. 한편 저장열속은 도시지

역에서 현열속의 2배 이상 높은 값(최대  $275 \text{ W m}^{-2}$ )을 나타내며 특히 부산도심(JN, MN 지점)과 해운대(HUD 지점)를 중심으로 뚜렷하다. 기존의 SLAB 모델(도시캐노피를 고려하지 않은 지표모델)은 충분한 지표가열 후 현열속을 통해 기온증가가 유도되는 것과 달리, SM2-U(3D) LSM에서 도시캐노피의 건물측열 및 복사감힘을 고려함으로써(Dupont *et al.*, 2004) 얻어진 결과로 해석된다. 이상의 분포는 모델의 토지이용도가 도시지역으로 고려된 지역과 일치하며, 0900 LST의 기온분포를 뒷받침한다.

열속의 일 중 최고값을 나타낸 1200 LST의 경우, 전 내륙지역에 현열속이 급격히 증가하고 도심지역을 중심으로 뚜렷하다(최대  $275 \text{ W m}^{-2}$ ). 잠열속은 현열속과 상반된 분포를 나타낸다. 도시외곽지역(특히 서부산지역)으로 큰 증가를 보인 반면, 부산 도시지역은 0900 LST 분포와 유사하거나 약한 증가가 나타났다. 이는 서부산지역의 경우 토지이용도가 논(김해평야)으로 분류되어 하계의 높은 증발량이 고려된 결과이며, 한편 도시지역은 도시피복 즉 아스팔트 혹은 밀집된 건물군의 영향으로 잠열방출이 제한된 결과이다. 저장열은 0900 LST의 분포를 따르면서 그 값은 최대  $300 \text{ W m}^{-2}$  이상의 높은 분포를 나타내어 도시지역의 에너지수지의 약 50%를 차지하였다. 다시 말해 모델 내에서 도시구조물의 축열효과와 가열된 공기괴가 캐노피층의 간헐효과가 반영된 것이며, 이는 도시 기상모델 구축 시 필수인자로 고려되어야 함을 제시한다.

Piringer *et al.*(2002) 또한 저장열이 도시 에너지 수지에 큰 영향을 미침을 연구하였고, Masson(2000)은 Paris 도시 중심가에서 저장열이 일최고  $400 \text{ W m}^{-2}$ 에 달함을 관측을 통해 제시하였다. Grimmond and Oke(2002)는 미국 10대 도시에서 관측된 Multi-city Urban Hydrometeorological Database를 바탕으로 도시지역의 현열속, 잠열속, 저장열속의 일최고값이 각각  $120 \sim 310 \text{ W m}^{-2}$ ,  $10 \sim 235 \text{ W m}^{-2}$ ,  $150 \sim 280 \text{ W m}^{-2}$ 의 범위를 나타낸다고 하였다. 이와 비교해보면, uMM5로 수치모의된 부산지역의 현열과 저장열속은 다소 높은 범위에 속하고 잠열속은 유사한 경향을 보인다. 또한 도시의 경우, 현열속이 잠열속에 비해 높은 값을 나타내는 특징도 일치한다.

1600 LST는 점차적으로 열속 모두 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 도시지역의 경우 저장열속

(최대  $200 \text{ W m}^{-2}$ )의 경우 감소폭이 가장 크게 나타난 반면, 잠열속은 큰 변화가 나타나지 않았다. 이후 저장열속은 1800 LST 이후 도시지역을 중심으로 음의 값을 나타내었으며(최소  $-75 \text{ W m}^{-2}$ ), 현열과 잠열은 1900 LST 이후로 거의  $0 \text{ W m}^{-2}$ 에 가까운 값을 나타내었다. 여기서 Grimmond and Oke(1999)는 야간 도시열섬발생 시 저장열속이 야간에도 양의 값을 나타낼 수 있음을 제시하였으나, 본 모델링결과에서는 나타나지 않았다.

이상과 같은 결과에서 저장열속의 고려는 새벽역의 도심고온역 모사능력향상에 중요한 영향을 미친 것으로 해석되며, 평야와 산지를 포함하는 부산의 연안복잡지역은 현열과 잠열의 상세한 모사를 통해 더욱 현실적인 도시기상장 모의에 바탕이 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 도시건물효과를 고려한 상세기상장을 모의하고, 도시유동장 모사능력 개선을 평가하였다. 이를 위해 고해상도 상세입력자료(토지피복도, 지형, 도시구조물)를 구축하고, 부산지역을 대상으로 해풍발달이 뚜렷하게 나타난 2006년 8월 4~8일 동안 uMM5(urbanized MM5)를 모델링하여 기존의 MM5와 비교·평가하였다. 그 결과, 기존의 MM5에서 과소평가된 야간 일최저기온의 상승을 확인할 수 있었으며, 이는 야간도시열섬현상의 진단능력 향상으로 해석할 수 있었다. 이와 함께 도시구조가 모델에 반영됨으로서 일최고풍속 정확도는 약 50% 향상되었으며, 수평바람장의 경우 도시영역의 뚜렷한 풍속 약화를 확인할 수 있었다. 특징적으로 부산도심으로 바람의 수렴역의 형성·강화와 함께 고온역이 야간까지 잔존하는 모습이 모사되어 관측치와 잘 일치하는 모습이다. 더불어 도시캐노피 내의 에너지수지 중 저장열속 모사가 가능해진 uMM5는 기존의 국외관측에서 얻어진 수치와 유사한 크기를 나타내었고, 부산지역 집중관측을 통한 검증이 수행되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구를 바탕으로 도시구조를 고려한 도시기상장 분석이 가능해짐으로서, 향후 도시계획에 따른 도시기상장변화 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3308)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 변재영, 서범근, 이혜정, 최영진 (2008) WRF-Urban Canopy Model을 이용한 서울 지역 예보와 검증, 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 54-55.
- 오인보, 김유근, 강윤희, 조영순 (2008) 부산지역 최근 10년간 (1998~2007년)의 기온 및 풍속의 변화, 환경과학회 가을학술발표회 발표논문집, 37-38.
- Brown, M. and M. Williams (1998) An urban canopy parameterization for mesoscale meteorological models, in AMS 2nd Urban Environment Symposium, Albuquerque, NM.
- Choi, Y., Y.-K. Kong, and W.-H. Jang (2005) A comparative analysis on the locational preference of super high-rise mixed-use building in Busan -center, subcenter and coastal area-, Journal of the Architectural institute of Korea, 21, 63-72. (in Korean with English abstract)
- Dupont, S., T.L. Otte, and J.K.S. Ching (2004) Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model (MM5), Boundary-Layer Meteorology, 113, 111-158.
- Ellefsen, R. (1991) Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten U.S. cities, Energy Buildings, 15-16, 1025-1049.
- Grimmond, C.S.B. (2006) Progress in measuring and observing the urban atmosphere, Theoretical and Applied Climatology, 84, 3-22.
- Grimmond, C.S.B. and T.R. Oke (1999) Aerodynamic properties of urban areas deduced from analysis of surface form, Journal of Applied Meteorology, 38, 1262-1292.
- Grimmond, C.S.B. and T.R. Oke (2002) Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS), Journal of Applied Meteorology, 41, 792-810.
- Holt, T. and J. Pullen (2007) Urban canopy modeling of the New York City Metropolitan Area: A comparison and validation of single- and multilayer parameterization, Monthly Weather Review, 135, 1906-1930.
- 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. Boundary-Layer Meteorology, 101, 329-358.
- Lee, S.-D., I.-H. Chung, and A. Kondo (1997) Air flow above and within urban canopy, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 19, 295-304. (in Korean with English abstract)
- Martilli, A. (2003) A two-dimensional numerical study of the impact of a city on atmospheric circulation and pollutant dispersion in a coastal environment, Boundary-Layer Meteorology, 108, 91-119.
- Masson, V. (2000) A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Boundary-Layer Meteorology, 94, 357-397.
- NCAR (National Center for Atmospheric Research) (2005) PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling system Version 3, Mesoscale and Microscale Meteorology Division.
- Oh, I.B., Y.-K. Kim, H.W. Lee, and C.-H. Kim (2006) An observational and numerical study of the effects of the late sea breeze on ozone distributions in the Busan metropolitan area, Korea, Atmospheric Environment, 40, 1284-1298.
- Otte, T.L., A. Lacser, S. Dupont, and J.K.S. Ching (2004) Implementation of urban canopy parameterization in a mesoscale meteorological model, Journal of Applied Meteorology, 43, 1648-1665.
- Piringer, M., C.S.B. Grimmond, S.M. Joffre, P. Mestayer, D.R. Middleton, M.W. Rotach, A. Baklanov, K. DeRidder, J. Ferreira, E. Guilloteau, A. Karpinean, A. Martille, V. Masson, and M. Tombrou (2002) Investigating the surface energy balance in urban areas-recent advances and future needs, Water, Air, and Soil Pollution, 2, 1-16.
- Shafan, P.C., N.L. Seaman, and G.A. Gaayno (2000) Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan Ozone Study, Journal of Applied Meteorology, 39, 412-426.
- Taha, H. (2008) Episodic performance and sensitivity of the urbanized MM5 (uMM5) to perturbations in surface properties in Houston Texas, Boundary-Layer Meteorology, 127, 193-218.