

## 중/도시규모 기상모델을 이용한 고층건물군이 연안도시기상장에 미치는 영향 수치모델링

### Numerical Modeling for the Effect of High-rise Buildings on Meteorological Fields over the Coastal Area Using Urbanized MM5

황 미 경 · 오 인 보<sup>1)</sup> · 김 유 근\*

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>울산대학교 환경보건센터  
(2012년 4월 26일 접수, 2012년 7월 26일 수정, 2012년 9월 5일 채택)

Mi-Kyoung Hwang, In-Bo Oh<sup>1)</sup> and Yoo-Keun Kim\*  
*Division of Earth Environmental System, Pusan National University*  
<sup>1)</sup>*Environmental Health Center, University of Ulsan*  
(Received 26 April 2012, revised 26 July 2012, accepted 5 September 2012)

#### Abstract

Modeling the effects of high-rise buildings on thermo-dynamic conditions and meteorological fields over a coastal urban area was conducted using the modified meso-urban meteorological model (Urbanized MM5; uMM5) with the urban canopy parameterization (UCP) and the high-resolution inputs (urban morphology, land-use/land-cover sub-grid distribution, and high-quality digital elevation model data sets). Sensitivity simulations were performed during a typical sea-breeze episode (4~8 August 2006). Comparison between simulations with real urban morphology and changed urban morphology (i.e. high-rise buildings to low residential houses) showed that high-rise buildings could play an important role in urban heat island and land-sea breeze circulation. The major changes in urban meteorologic conditions are followings: significant increase in daytime temperature nearly by 1.0°C due to sensible heat flux emitted from high density residential houses, decrease in nighttime temperature nearly by 1.0°C because of the reduction in the storage heat flux emitted from high-rise buildings, and large increase in wind speed (maximum 2 m s<sup>-1</sup>) during the daytime due to lessen drag-force or increased gradient temperature over coastal area.

**Key words** : uMM5, Urban canopy parameterization, Meteorological modeling, Sea breeze, High-rise buildings

---

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

## 1. 서 론

최근 대도시내부에 대단위주거단지 개발을 위한 뉴타운(new town) 조성 사업으로 단기간 내에 도시 구조가 바뀌고 있으며, 특히 건물 고층화현상이 뚜렷하다. 통계청자료(KOSIS)에 의하면 부산지역은 20층 이상의 고층건물이 서울지역의 80.3% 수준이며, 연안지역을 중심으로 고층화가 나타나는 특징을 보인다. 이에 따라 부산 연안 뉴타운지역(해운대)의 도시열섬을 비롯한 도시고유의 기상/기후변화가 관측되었다(오인보 등, 2008). 하지만 고층건물군이 도시순환계에 미치는 영향에 대한 정량적 평가를 위해서는 도시건물효과를 정확히 고려할 수 있는 기상수치모델링의 적용이 요구된다.

기상학적으로 고층건물군은 거칠기길이 또는 항력의 변화로 직접적으로 도시유동장의 변화를 유도할 수 있으며, 복사 갇힘 및 그림자 효과 등은 캐노피층 에너지수지의 변화 및 열환경에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 건물의 최대 2~5배까지 발달하는 도시거칠기층은, 도시구조물변화에 따라 해풍유입층에 영향을 미쳐 복잡한 도시순환계를 형성할 수 있다. 더불어 도시열섬효과는 해풍의 강화 및 육풍의 약화 등 직접적 해륙풍순환계 변화로 대기오염확산에 영향을 미칠 수 있다(Lin *et al.*, 2008). 다시 말해 다양한 도시건물효과는 해풍의 발달 및 침투에 중요한 인자로(Martilli, 2003), 도시기상장 진단 시 반드시 고려되어야 할 요소이다.

이를 위해 중규모모델에 도시캐노피모수화방안(Urban Canopy Parameterization, UCP)을 적용하여 도시기상장 모사능력을 개선하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Otte *et al.* (2004)는 UCP가 적용된 도시형MM5(urbanized Mesoscale Model, uMM5)를 이용하여 기존 MM5에 보다 향상된 도시기상장을 모의할 수 있었음을 제시한 바 있다. Salamanca *et al.* (2011)는 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델에 다양한 UCP를 적용하여 모사능력을 비교하였으며, Miao *et al.* (2009)는 UCP를 적용하여 도시열섬 모사능력이 향상되었음을 제시한 바 있다. 한편 Holt and Pullen (2007)는 WRF 기상모델에 도시캐노피층 세분화(단일층/다층)에 따른 도시기상장 모사능력을 비교하였다. Taha (2008) 또한 uMM5를 이용

하여 미국 California 지역의 도시열섬을 모사하고, 광화학모델을 이용하여 열섬 완화가 오존농도 감소에 중요한 영향을 미침을 보였다.

국내에서는 Byon *et al.* (2010)은 서울지역을 대상으로 WRF-UCM(Urban Canopy Model)을 적용하여 도시기상장을 진단하여 도시열섬 모사능력에 상당한 진전을 보였음을 제시하였다. Hwang *et al.* (2010)는 부산지역의 건물군 분포를 GIS(Geographic Information Systems)를 통해 재생산하고, 건물효과를 중규모 기상모델에 고려함으로써 더욱 정확한 도시기상장을 재연하였다. 한편 Yeo *et al.* (2009)은 도시기후 시뮬레이션시스템을 이용하여 건물높이/면적에 따라 기상요소가 달라질 수 있음을 제시한 바 있다. 이는 도시기상장 발달 및 변화에 건물군의 영향이 상당함을 시사하는 것으로, 특히 연안지역에 형성된 고층건물군이 연안기상시스템에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 uMM5를 이용하여 상세 건물군이 모두 고려된 수치실험과 고층건물군을 일반저층주거군으로 변조한 수치실험을 수행하여 고층건물군의 기상학적 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이는 도시화의 영향을 파악할 수 있는 연구로서 도시개발 및 환경관리 정책 결정에 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 수치모델링 방법

본 연구에서는 부산지역을 대상으로 해풍 수치모델링을 위해 PSU/NCAR MM5의 도시형 버전(uMM5; urbanized MM5)을 이용하였다. 이는 MM5 version 3.5에 도시캐노피모수화(Urban Canopy Parameterization, UCP)가 추가되어 도시구조물들에 의한 역학적/열역학적 효과가 추가된 모델이다. 역학적 효과는 운동방정식과 TKE(Turbulent Kinetic Energy)방정식의 개선을 통해 도시구조물들에 의한 항력 및 TKE의 증가를 고려하였다. 열적 효과는 온도방정식과 지표 에너지수지를 통해 모수화되었으며, 에너지수지에 도시 내 빌딩들 사이의 복사 갇힘과 그림자 효과가 고려되었다. 모델에 대한 자세한 개요 및 모수화 방안은 Dupont *et al.* (2004)와 Hwang *et al.* (2010)에 자세히 제시되어 있다.

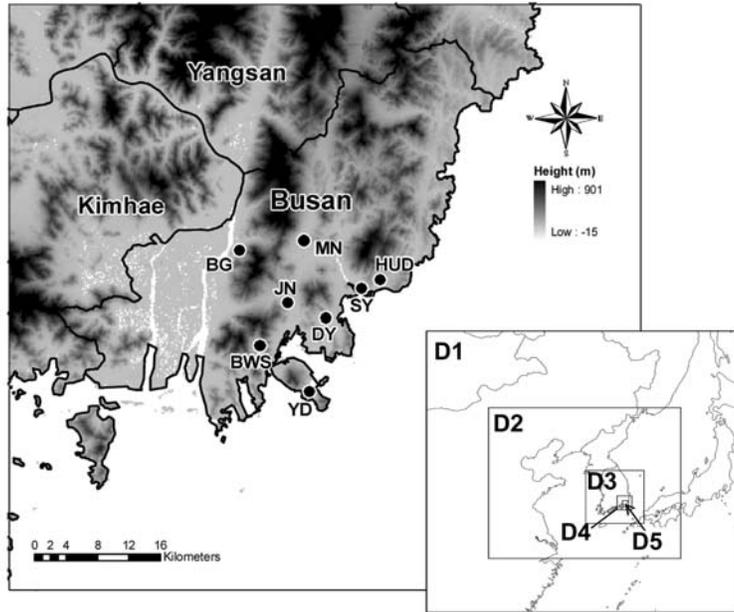


Fig. 1. Topographic map including locations of meteorological sites (BWS: Busan weather station, MN: Myeongnyun, BG: Bukgu, JN: Jin, SY: Suyeong, HUD: Haeundae, DY: Daeyeon, and YD: Yeongdo) and five horizontal domains for uMM5 simulation (lower right).

Table 1. Morphology classifications used for uMM5.

Urban subcategory	Function and height of building (Ellefsen's, 1991)	Average building height (m)/ Artificial surface fraction (%)
0	Non-urban areas	
1	Urban areas (by land use classification) not included in Ellefsen's study	3/30
2	Commercial ribbon development Residential house Older commercial ribbons	low to medium rise less than five stories
3	Residential apartments and row houses Apartments and abutted-wall houses Industrial/storage Residential apartments and row houses Industrial/storage	low to medium rise less than four stories medium rise
4	Shopping centers Houses Truck-related industrial/storage Modern commercial ribbon development	low rise low rise low rise low rise
5	Administrative and cultural	low to high rise
6	Commercial offices and retail Apartments and hotels	low to high rise four or more stories high
7	Commercial offices	high rise

모델링 영역은 총 5개로, 동아시아를 포함하는 첫 번째 영역 (81 km 격자간격)부터 부산지역을 포함하는 마지막 영역 (1 km 격자간격)으로 구성된다(그림

1). 마지막 영역은 하부 100 m 내에 6개 층 (1, 3, 6, 12, 27, 63 m)으로 세분화하여 건물군 효과를 상세히 고려하였다. 모델링 사례기간은 2006년 8월 3일부터

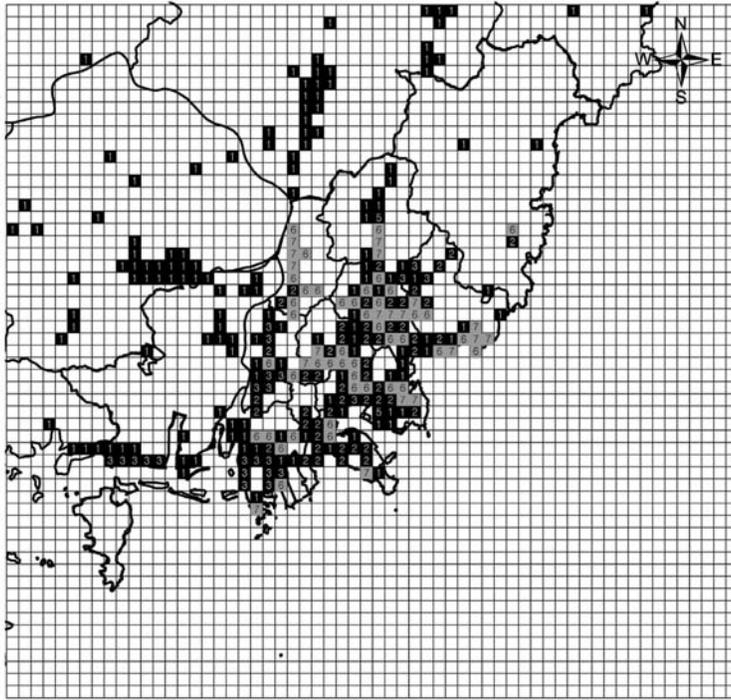


Fig. 2. Urban terrain zone in Busan. White and gray color represent non-urban and high-rise building areas, respectively.

8일간이며, 부산지역은 북태평양 고기압의 가장자리에 위치해 중관기압경도가 매우 약했다(포항고층기상대의 850 hPa 풍속,  $3 \text{ m s}^{-1}$  이하). 자세한 uMM5 모델링 수행방법은 Hwang *et al.* (2010)에 제시되어 있다.

uMM5에서는 건물군의 특성(높이 및 용도)을 고려한 도시하부카테고리 입력정보를 요한다(표 1). 본 연구에서는 부산지역의 각 지번별 건축물 대장을 바탕으로 부산지역의 3차원 건축물 분포를 재연하여 입력자료를 구축하였다. 본 실험에서는 도시하부카테고리 중 고층건물군에 속하는 하부카테고리 6과 7을 부산지역의 가장 일반적인 분포인 하부카테고리 2(5층 이하의 일반저층주거군)로 변조시킴으로써 고층건물의 효과를 제거하였으며(그림 2), 이후 본문에서 변조지역으로 지칭하였다. 참고로 하부카테고리 6과 7은 모델 내에 모수화를 통해 도시의 공간적 구조변화(건물군의 높이 및 건물이 차지하는 면적)가 기상 모델에 재입력되었다(표 1 참조). 실제 모든 건물군

을 고려한 수치실험을 uMM5<sub>base</sub>로 명하고, 고층건물군을 변조한 수치실험을 uMM5<sub>modi</sub>로 명하였다. 여기서 변조 도시하부카테고리에 따라 해풍 및 해풍전선의 구조변화는 다양하게 나타날 것으로 사료되며, 본 연구에서는 도시의 일반적인 카테고리 2로 변조한 것에 한정됨을 명시한다.

### 3. 도시 기상장 변화

#### 3.1 지점별 변화

건물군 변조 영향을 정량적으로 살펴보고자, 모델링 기간(2006년 8월 4일~8일) 동안 AWS 관측지점을 중심으로 MB (Mean Bias error), RMSE (Root Mean Square Error), Vector R (Vector correlation coefficients)을 계산하여(표 2), 두 실험결과를 통계적으로 분석하였다(표 3). 두 실험의 바람벡터 상관계수(Vector R)는  $0.88 \pm 0.05$ 로 바람벡터는 큰 변화를 나타내지

**Table 2. Definition of the traditional evaluation statistical measures.**

Mean Bias error	$MB = \overline{a_{mod} - a_{obs}}$
Root Mean Square Error	$RMSE = [\overline{(a_{mod} - a_{obs})^2}]^{0.5}$
Vector correlation coefficients (Vector R)	$R = (S_{u_1v_2} + S_{v_1v_2}) / [(S_{u_1}^2 + S_{v_1}^2) + (S_{u_2}^2 + S_{v_2}^2)]^{-0.5}$ here, $S_u^2 = \sum (u_i - \bar{u})^2 / n$ ; $S_{uv}^2 = \sum (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) / n$ ; $\bar{u} = \sum u_i / n$

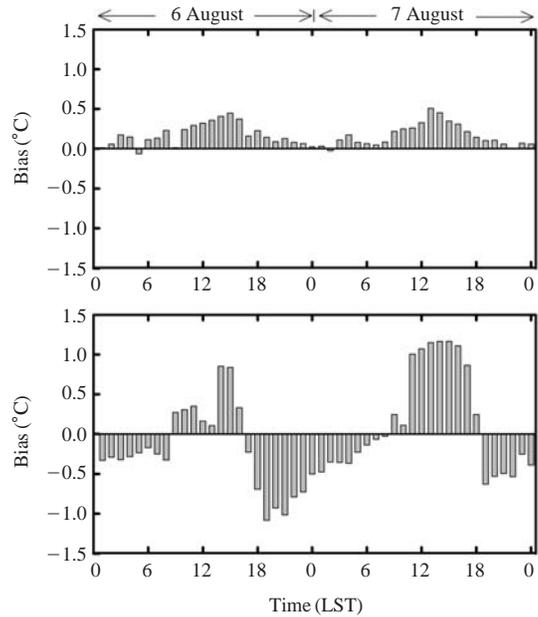
**Table 3. MM5<sub>base</sub> and uMM5<sub>modi</sub> performance statistics for each station during the entire modeling period.**

Station	Wind vector R	MB/RMSE	
		Temperature (°C)	Wind speed (m s <sup>-1</sup> )
BWS	0.83	0.24/0.42	-0.51/1.09
SY	0.92	0.10/0.62	-0.30/0.88
YD	0.83	-0.08/0.40	-1.21/1.79
HUD	0.86	0.28/0.59	-0.03/1.02
DY	0.93	0.20/0.55	-0.07/0.83
JN	0.90	0.29/0.51	0.02/0.76
MN	0.85	0.36/0.79	0.10/0.89
BG	0.81	0.33/0.63	-0.36/0.96

않았다. 한편 전 모델링 기간 동안 기온과 풍속의 평균적인 변화는 각각 +0.6±0.13°C, -1.0±0.33 m s<sup>-1</sup> 이었으며, RMSE는 각각 0.56°C, 1.02 m s<sup>-1</sup>을 나타내어 도시기상장에 유효한 변화가 있음을 알 수 있었다. 참고로 관측자료와 모델링 (uMM5<sub>base</sub>) 결과의 비교 검증은 Hwang *et al.* (2010)에 자세히 기술되어 있다.

지형적으로 뚜렷한 차이를 나타내는 해운대 (HUD) 지역 (x, y=39, 31)과 서면 (JN) 지역 (x, y=31, 33)을 중심으로 기온 및 풍속의 변화량 (uMM5<sub>modi</sub>-uMM5<sub>base</sub>)을 집중분석하였다 (그림 3, 4). 여기서 해운대 지역은 부산연안에 위치하고 고층대단지 아파트가 밀집한 대표적 뉴타운지역이며, 서면지역은 부산의 대표적 도심으로 주위에 높은 산들이 둘러싸인 골에 위치한 지점이다. 모델링 기간 중 상대적으로 약한 중관력 하에 해풍이 가장 뚜렷하게 관측된 8월 6~7일을 집중분석하였으며, 특히 6일의 경우 모델링 기간 중 가장 뚜렷한 해풍이 관측되었다.

두 실험의 기온차를 살펴보면 (그림 3), 전반적으로 연안의 해운대보다 서면도심에서 기온변화가 뚜렷하였다. 구체적으로 살펴보면, 해운대는 일출 후부터 오



**Fig. 3. Diurnal variation of difference in temperature between uMM5<sub>modi</sub> and uMM5<sub>base</sub> at HUD (upper) and JN (lower) during 6~7 August 2006.**

후 (1300~1500 LST)까지 기온증가 (최대 약 +0.5°C)를 나타내고 야간에는 온도변화 폭이 거의 0°C에 가까웠다. 한편 서면은 주간에는 기온상승 (양의 값)을 보인 반면, 야간에는 기온하강 (-0.4~-1.0°C)이 뚜렷하게 나타났다.

풍속변화를 살펴보면 (그림 4), 변조지점을 중심으로 풍속 증가 (해운대와 서면이 각각 +0.5 m s<sup>-1</sup>, +0.4 m s<sup>-1</sup>)가 나타났다. 먼저 해풍이 가장 뚜렷했던 6일 1400 LST경, 해운대에서 최대 +2.3 m s<sup>-1</sup> (200%) 증가가 모의되어 모델링 기간 중 가장 큰 변화를 보였다. 반면 서면은 정오경 풍속 증가폭이 오히려 감소하는 특징을 나타내었는데, 이는 수렴지역이 형성되면서 대기정체가 있었기 때문이다. 7일의 경우, 종관적으로 상안풍 (onshore) 영향 하에 풍속 증가폭이 감소하는 특징을 보였으며, 특히 해운대 지역은 오후 전시간대에 약한 풍속증가 (+0.5 m s<sup>-1</sup> 이하)가 나타났다.

종합적으로 살펴보면, 고층건물군을 저층일반주거군으로 변조함으로써 전반적으로 주간 기온 상승과 야간 기온 하강이 나타났으며, 풍속은 온도경도 증

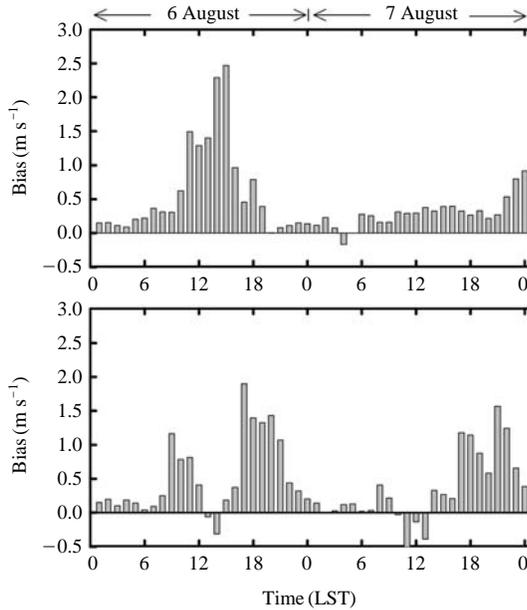


Fig. 4. The same as Fig. 3, but for wind speed.

가에 따라 주간을 중심으로 강화되는 특징을 나타내었다. 지점별로 살펴보면, 해운대의 경우 연안에 위치하여 건물군변조가 기온에 미치는 영향은 상대적으로 작은 반면, 항력 감소 및 온도경도 증가로 해풍의 풍속 증가가 뚜렷이 나타났다. 이는 연안 건물군이 해풍순환계 모사에 있어 정확히 고려되어야 함을 시사한다. 한편 서면의 경우 고층건물군 제거에 따른 야간의 도시열섬 약화가 뚜렷이 나타나 고층건물군 변조에 의해 도시 환기능력이 개선된 것으로 분석된다.

### 3.2 기온 및 바람의 공간적 변화

그림 5는 uMM5<sub>modi</sub>의 기온/바람장을 제시하고 기온 및 풍속의 변화(uMM5<sub>modi</sub>-uMM5<sub>base</sub>)를 각각 제시하였다. 여기서 해풍이 가장 뚜렷하게 관측된 6일을 중심으로 나타내었으며, 고층건물군의 제거효과를 고려해 50m 기온 및 바람장 분포를 분석하였다.

건물군을 변조한 경우, 0500 LST에 도시열섬은 잔존하나 변조지역을 중심으로 그 강도가 약화되는 특징을 보였다. 특히 도심을 중심으로 최대 0.5°C 감소가 나타났으며, 이는 고층건물에 의한 저장열 감소가 중요한 영향을 미쳤다. 한편 바람의 경우 전반적으로 육풍이 강화되는 모습이며 특히 연안지역을 중심으

로(수영(SY) 인근연안에 최대 +0.6 m s<sup>-1</sup>) 풍속이 강화되었다. 최하층은 각 격자별 건물면적이 증가하여(하부카테고리 7을 2로 변조한 경우, 15% → 30%) 풍속이 감소되는 반면, 50m 부근은 고층건물이 제거(항력 소멸)되어 풍속이 증가될 수 있기 때문이다.

이후 일출 후 0900 LST에는 해풍발달과 함께 연안 및 도심을 중심으로 기온상승이 나타나며, uMM5<sub>base</sub>와 비교해보면 해운대(HUD)와 북구(BG) 지점을 중심으로 0.5°C 이상 기온상승이 나타났다. 연안의 온도경도 증가를 의미하며 결과적으로 이는 연안 해풍전선발달에 영향을 미칠 수 있음을 예상할 수 있다. 풍속의 변화를 살펴보면, 0500 LST에 비해 풍속강화 정도가 커졌으며, 특히 uMM5<sub>base</sub> 실험에 비해 고층건물군이 밀집되어 있었던 서면(도심)을 중심으로 최대 1.2 m s<sup>-1</sup> 증가가 나타났다. 이는 앞서 제시한 바와 같이, 건물군변조에 따른 온도경도의 증가와 항력 감소로 풍속 강화가 나타난 것으로 분석된다.

1200 LST에는 uMM5<sub>base</sub> 실험에서 모의된 기온보다 최대 0.9°C 증가가 나타났으며, 이후 도시캐노피 내의 에너지수지와 관련하여 추가적인 분석을 수행하였다. 한편 풍속의 경우, 특징적으로 해운대(HUD)와 북구(BG) 인근을 중심으로 풍속증가(최대 +1.6 m s<sup>-1</sup>)가 뚜렷하게 나타났다. 하지만 uMM5<sub>base</sub>와 비교해 수렴역의 이동이 나타나지 않았는데, 이는 서부산지역의 강화된 바람은 내륙지역의 서풍과 결합하고, 이는 도심에서 동풍(해풍)과 수렴역을 형성하였기 때문이다.

특징적으로 해풍전선후면의 풍속약화가 극지적으로 나타났다. 이는 해풍전선후면의 변조지역을 중심으로 기온증가가 나타나, 연안내륙지역의 온도경도 감소로 풍속약화가 유도된 것으로 사료된다. 하지만 고층건물군을 일반저층주거군으로 변조한 결과로 한정되며, 이후 고층건물군을 다른 하부카테고리로 변조한 다각적인 수치모의가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

1600 LST는 고층건물군의 제거에 따라 기온 및 풍속 변화가 부산전역으로 확장되는 특징을 보이며, 특히 도시 풍상측과 풍하측의 변화에 주목할 만하다. 연안지역의 경우 +1 m s<sup>-1</sup> 이상 풍속 강화가 나타났으며, 이는 대기환기능력의 강화 및 상대적으로 낮은 기온의 지속적인 해풍유입으로 연안지역의 기온하강에 중요한 영향을 미친 것으로 분석된다. 한

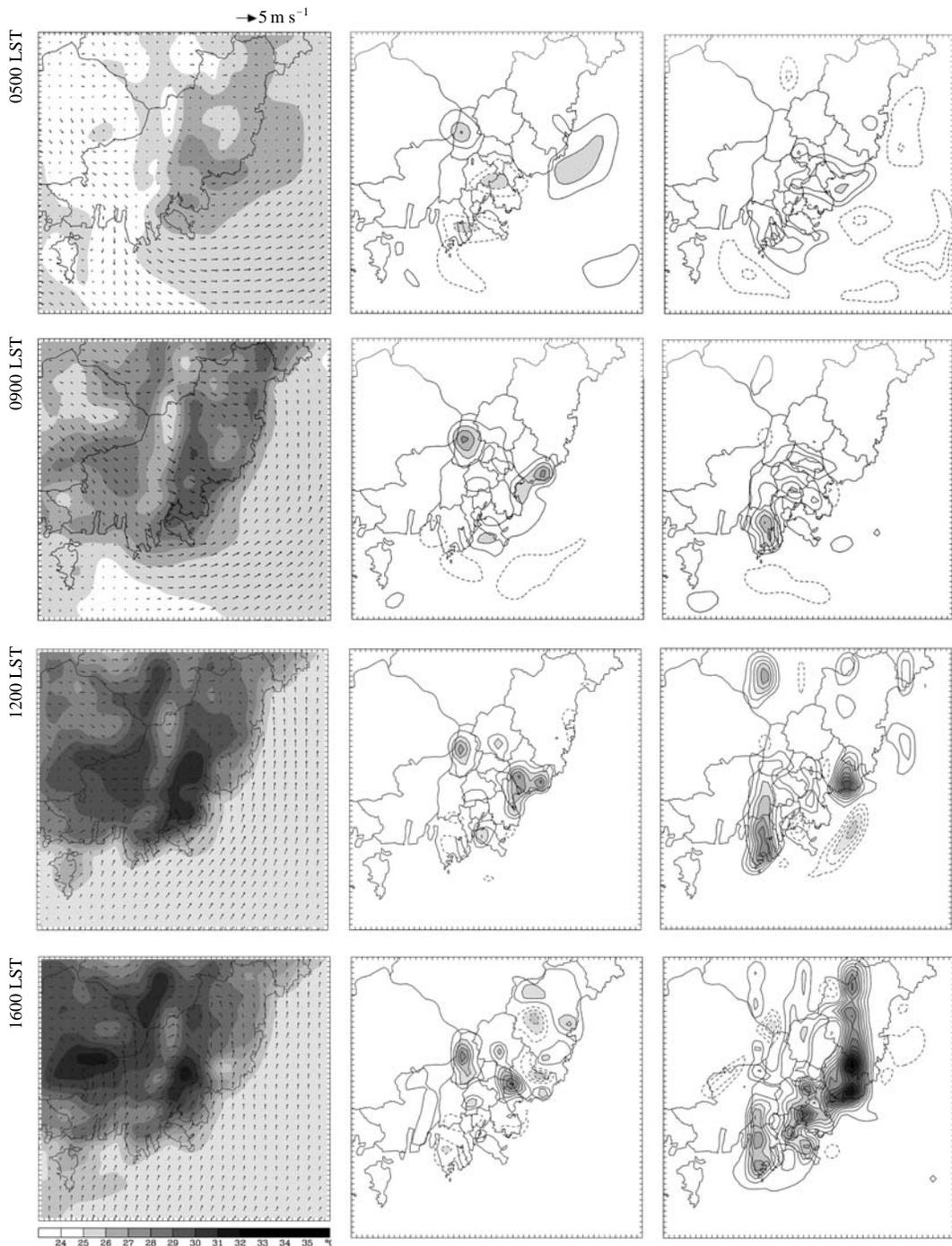


Fig. 5. Horizontal temperature (interval: 1°C) and wind (arrows, every second grid point) fields for uMM5<sub>modi</sub> (left panels) on 6 August 2006. Differences in temperature (interval: 0.2°C, middle panels) and wind speed (interval=0.2 m s<sup>-1</sup>, right panels) results of uMM5<sub>modi</sub> minus uMM5<sub>base</sub>. Full and dashed contours express positive and negative value, respectively.

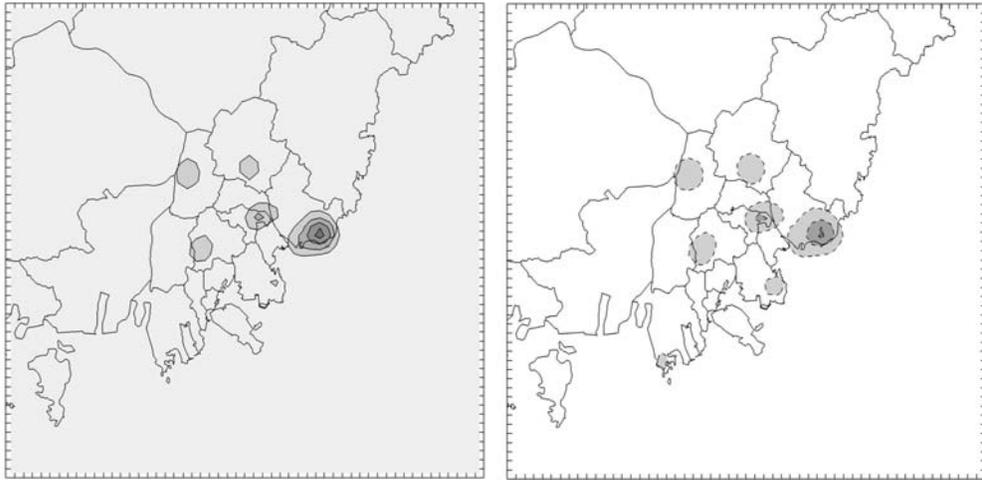


Fig. 6. Horizontal distribution for differences in sensible heat flux (interval= $25 \text{ W m}^{-2}$ ; left) and storage heat flux (interval= $50 \text{ W m}^{-2}$ ; right) between  $uMM5_{\text{modi}}$  and  $uMM5_{\text{base}}$  at 1200 LST on 6 August 2006, respectively. Full contours express positive value, dashed contours negative value, respectively.

편 도심의 수렴역 강화 및 도심으로부터의 온기류 이류로 풍하측의 기온상승이 유도된 것으로 사료된다. 그리고 해운대를 중심으로 풍속강화( $+2 \text{ m s}^{-1}$  이상)가 더욱 뚜렷하며, 장산(해운대 북쪽)을 넘은 후 down-slop wind의 강화가 나타남을 확인할 수 있다.

일몰 후 1900 LST는 공간적으로 0500 LST와 유사한 분포를 나타내었으며(그림 생략), 도심 고온역은 잔존하나 변조지역을 중심으로 기온하강(약  $-1^{\circ}\text{C}$ )과 국지적 풍속강화(약  $+0.4 \text{ m s}^{-1}$ )가 나타나는 모습이다. 즉 단파복사의 감소와 함께 저장열의 감소가 유도됨으로써 결과적으로 새벽시간대와 마찬가지로 고온역 약화가 유도된 것으로 이후 열수지 분석에서 구체적으로 제시하였다.

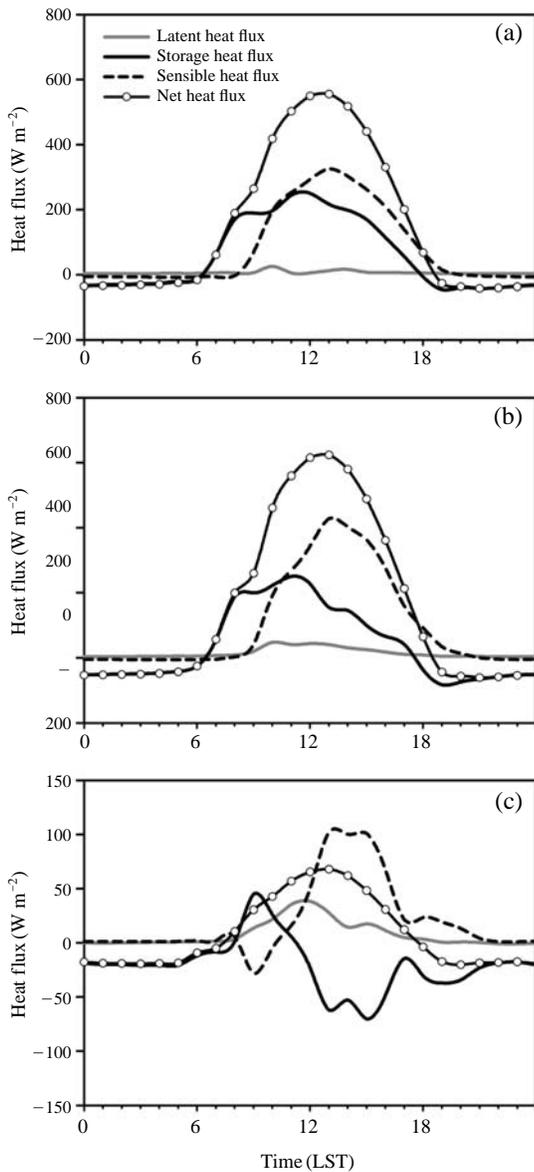
6일의 고층건물군 변조에 따른  $uMM5_{\text{modi}}$ 의 변화 모습을 결과를 요약하면, 먼저 새벽에는 도심과 연안을 중심으로 기온하강(도심에서 최대  $-0.5^{\circ}\text{C}$ )으로 고온역 약화와 함께 풍속강화(연안역에서  $+0.4 \text{ m s}^{-1}$ )가 나타났다. 이는 고층건물군 변조로 도시열섬효과가 완화될 수 있음을 의미하는 것으로 그 분석의 의미가 크다. 한편 주간 경우 국지적으로(특히 변조지역을 중심으로) 약  $1^{\circ}\text{C}$ 의 기온상승이 나타났으며, 풍속은 연안을 중심으로 더욱 강화되기 시작하며 해풍침투와 함께 부산전역으로 확대되는 모습을 보였다. 특히 해운대를 중심으로 그 변화폭이  $+2 \text{ m s}^{-1}$  이상

이 나타나 연안 고층건물군이 해풍침투에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 도시캐노피층 에너지수지 변화

고층건물군 변조에 따른 주간 기온상승 원인을 자세히 살펴보기 위해 2006년 8월 6일의 1200 LST의 현열속, 저장열속의 공간적 분포를 나타내었다(그림 6). 여기서 잠열속의 변화는 잠열 및 그 변화량이 거의  $0 \text{ W m}^{-2}$ 에 가까워 생략하였다. 변조지점을 중심으로 주간 동안 현열속 증가 및 저장열속의 감소가 뚜렷하게 나타났으며, 특히 하부카테고리 7의 변조지점을 중심으로 해운대에서 그 변화폭이 가장 크게 나타났다.

해운대를 중심으로 각 실험별 에너지수지 일변화(그림 7a와 7b)와 두 실험의 변화량(그림 7c)을 분석하였다. 먼저  $uMM5_{\text{base}}$ 의 경우(그림 7a), 순열수지는 0700 LST부터 1800 LST까지 양의 값을 나타내었으며, 현열속과 저장열속이 주요 요소로 작용하고 잠열속은 앞서 제시하였듯이 도심지의 경우 거의  $0 \text{ W m}^{-2}$ 에 가까운 값을 나타내었다. 특징적으로 저장열속은 일출 후 지표 가열전이라도 바로 증가하기 시작하는 특징을 보인다. 이는 SLAB 모델(도시캐노피를 고려



**Fig. 7. Diurnal variation of surface energy budget for uMM5<sub>base</sub> (a), uMM5<sub>modi</sub> (b) and difference between uMM5<sub>modi</sub> and uMM5<sub>base</sub> (c) at HUD on 6 August 2006.**

하지 않은 지표모델)은 충분한 지표가열 후 현열속을 통해 기온증가가 유도되는 것과 달리, SM2-U (3D)는 도시캐노피의 건물축열 및 복사간섭을 고려함으로써 (Dupont *et al.*, 2004) 이와 같은 결과가 얻어

진 것이다. 저장열속은 1200 LST경에 최고값(250.7 W m<sup>-2</sup>)을 나타내고 점차 감소하는 경향을 나타내며, 현열속은 1300 LST에 최고값(325.8 W m<sup>-2</sup>)을 나타내었다.

uMM5<sub>modi</sub> 일변화(그림 7b)는 uMM5<sub>base</sub> 결과와 분포는 유사하나, 두 실험의 차(그림 7c)를 보면 주/야간의 고층건물군이 열속에 미치는 영향을 정량적으로 알 수 있다. 먼저 야간의 경우, 현열 변화량은 거의 0 W m<sup>-2</sup>에 가까운 반면, 저장열은 음의 값(저장열의 감소, -25 W m<sup>-2</sup>)이 나타났다. 즉 야간의 저장열 감소는 도시건물군으로부터 배출되는 열의 감소를 의미하며, 결과적으로 야간의 기온감소를 유도한 것으로 설명할 수 있다.

한편 주간(1200 LST)의 경우, 도시캐노피층 내부로 유입된 순복사량의 증가가 나타났으며 특히 현열속의 증가가 뚜렷하다(1300 LST, 최고 +102.1 W m<sup>-2</sup>). 이는 도시하부카테고리 변화에 따른 반사도 감소와 건물군의 면적증가가 주원인으로 분석된다. 반면 저장열속은 주간에 뚜렷한 감소를 나타내었다. 이것은 고층건물군의 제거에 따른 복사 갇힘(trapping)효과 및 구조물의 저장열속 감소로 인한 것으로 해석된다(Lemonsu and Masson, 2002). Fisher *et al.* (2005)는 COST-715 프로젝트에서 고층건물지역, 도시, 도시외곽 등에서 열속에 대한 연구를 통해 고층건물에서는 저장열이 현열에 비해 높은 값을 보이는 반면, 일반도시지역은 현열이 저장열에 비해 200 W m<sup>-2</sup> 이상 높은 값을 보임을 제시하였고, 이는 본 연구 결과와 유사한 분포를 나타내어 모델결과의 신뢰성을 뒷받침할 수 있다. Lemonsu and Masson (2002) 또한 Paris의 town 지역을 대상으로 여름철 주간(1200 LST)에 현열이 약 200 W m<sup>-2</sup>을 보인 반면, 저장열은 두 배 이상의 높은 값을 보임을 제시하였다. 본 연구에서는 저장열속의 감소는(도시에서 잠열속은 거의 0 W m<sup>-2</sup>에 가까우므로) 현열속의 증가로 보상되며 이는 도시기상장 변화에 중요한 영향을 미친 것으로 사료된다.

열속의 변화를 정리하면, 고층건물군의 제거에 따라 저장열속은 감소한 반면, 현열속은 증가하는 특징을 보였다. 일변화를 살펴보면, 주간(0800~1800 LST)까지 열속의 순변화량은 현열속의 증가에 따라 양의 값을 나타낸 반면, 야간에는 저장열 감소에 따라 열속의 순변화량은 작은 음의 값을 보였다. 결과적으로 주야간의 열속변화를 통해 고층건물군 변조

에 따라 주간 기온상승 및 야간의 도시열섬약화를 설명할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 도시 고층건물군이 연안도시 기상장에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 도시형 중규모모델(uMM5, urbanized MM5)의 적용과 함께 모델 입력자료로 요구되는 고해상도 지표면 자료(도시구조물, 지형 등)를 생성 및 사용하였다. 실험(모델링)은 부산지역을 대상으로 해풍발달이 뚜렷하게 나타난 2006년 8월 4~8일 동안 이루어졌고, 도시구조물의 인위적 변조(고층건물군을 일반저층주거군으로 바꿈)에 따른 모델값의 변화를 분석하였다. 특히 연안도시의 대표적인 기상현상인 해풍이 뚜렷하게 발달한 6일을 중심으로 기온, 바람, 캐노피에너지수지 변화를 중점적으로 파악하였다.

모델링 결과, 도시지표의 고층건물군이 저층주거군으로 변화함에 따라 지표상태가 변화한 지역을 중심으로 기온과 풍속의 유의한 변화가 나타났다(RMSE는 각각  $0.5 \sim 0.8^\circ\text{C}$ ,  $0.8 \sim 1.8 \text{ m s}^{-1}$ ). 하지만 이러한 변화는 모델링 분석기간(3일) 동안 국지적으로 차이가 있었고 종관풍과 연계된 지역의 바람 변화가 주된 원인으로 작용하였다. 특히 해풍현상이 뚜렷한 6일의 경우 대부분의 모델링 영역(주로 지표상태가 바뀐 지역)에서 야간의 기온이 뚜렷하게 감소하였고( $-0.4 \sim -1.0^\circ\text{C}$ ), 주간 풍속이 강해졌다(최대  $2 \text{ m s}^{-1}$ ). 이는 고층건물군의 제거에 따른 건물군의 저장열속의 감소와 항력감소가 주된 원인이다. 지표상태의 변화로 나타난 또 다른 변화는 주간 기온상승으로 3일 모두 이러한 현상이 저층주거군으로 바뀐 지역 부근으로 나타났다. 이는 저장열속의 변화보다는 건물밀도의 증가(15% → 30%)로 인한 현열속의 증가가 주된 원인으로 해석된다.

연안 뉴타운지역(해운대)과 도심지역(서면)을 집중 분석한 결과, 해운대지역은 주간 기온 상승과 풍속 증가가 뚜렷하였다(육지의 기온상승은 해양과의 온도경도를 크게 하여 해풍의 풍속을 강화시킨). 이는 복잡연안지역 바람장 모델링에 있어 연안 건물군이 모델입력자료로 정확히 고려되어야 함을 시사한다. 반면 서면지역은 야간에 뚜렷한 기온 감소가

나타나는 것이 특징이다. 이는 도시열섬 완화로 볼 수 있었고 도심 고층건물군이 야간 기온변화에 중요한 인자임을 보여주었다.

본 연구에서는 연안도시의 고층건물군은 도시기상장(기온, 바람)에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다. 최근 가속화된 도시화에 따른 연안지역의 지표면 변화(고층건물군 형성)는 주요 기상인자의 변화를 가져올 것으로 판단된다. 향후 도시기후변화에 대응하고 대기질의 적절한 관리를 위해서는 건물군의 제어와 적절한 도시계획 정책이 장기적인 관점에서 마련되어야 할 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER\_2012-6140)의 지원 및 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2010-355-C00121)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 오인보, 김유근, 강윤희, 조영순(2008) 부산지역 최근 10년간(1998~2007년)의 기온 및 풍속의 변화, 환경과학회 가을학술발표회 발표논문집, 37-38.
- Byon, J.-Y., Y.-J. Choi, and B.-G. Seo (2010) Evaluation of urban weather forecast using WRF-UCM (Urban Canopy Model) over Seoul, Atmosphere, 20, 13-26. (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.
- Fisher, B., S. Joffre, J. Kukkonen, M. Piringer, M. Rotach, and M. Schatzmann (2005) COST-715 "Meteorology applied to urban air pollution problems", Final Report, CEC Publication EUR, Luxembourg.
- 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.
- Hwang, M.-K., Y.-K. Kim, O.-B. Oh, and Y.-H. Kang (2010) High-resolution simulation of meteorological fields over the coastal area with urban building, Journal

- of Korean Society for Atmospheric Environment, 26, 137-150. (in Korean with English abstract)
- Lemonsu, A. and V. Masson (2002) Simulation of a summer urban breeze over Paris, *Boundary-Layer Meteorology*, 104, 463-490.
- Miao, S., F. Chen, A.L. Margaret, M. Tewari, Q. Li, and Y. Wang (2009) An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 484-501.
- 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.
- Salamanca, F., A. Martilli, M. Tewari, and F. Chen (2011) A study of the urban boundary layer using different urban parameterization and high-resolution urban canopy parameters with WRF, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50, 1107-1128.
- 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.
- Yeo, I.-A., J.-J. Yee, and S.-H. Yoon (2009) Analysis on the effects of building coverage ratio and floor space index on urban climate, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 29, 19-27. (in Korean with English abstract)