

연구논문

인공열이 도시경계층에 미치는 영향

- 경인지역을 중심으로 -

구해정 · 유영희

서울대학교 지구환경과학부

(2012년 5월 3일 접수, 2012년 8월 24일 승인)

Impacts of anthropogenic heating on urban boundary layer in the Gyeong-In region

Hae-Jung Koo^{*,**} · Young-Hee Ryu^{*}

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University^{*}

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research^{**}

(Manuscript received 3 May 2012; accepted 24 August 2012)

Abstract

This study investigates the influence of anthropogenic heat (AH) release on urban boundary layer in the Gyeong-In region using the Weather Research and Forecasting model that includes the Seoul National University Urban Canopy Model (SNUUCM). The gridded AH emission data, which is estimated in the Gyeong-In region in 2002 based on the energy consumption statistics data, are implemented into the SNUUCM. The simulated air temperature and wind speed show good agreement with the observed ones particularly in terms of phase for 11 urban sites, but they are overestimated in the nighttime. It is found that the influence of AH release on air temperature is larger in the nighttime than in the daytime even though the AH intensity is larger in the daytime. As compared with the results with AH release and without AH release, the contribution of AH release on urban heat island intensity is large in the nighttime and in the morning. As the AH intensity increases, the water vapor mixing ratio decreases in the daytime but increases in the nighttime. The atmospheric boundary layer height increases greatly in the morning (0800 – 1100 LST) and midnight (0000 LST). These results indicate that AH release can have an impact on weather and air quality in urban areas.

Keywords : WRF-SNUUCM, anthropogenic heat, urban heat island, atmospheric boundary layer

1. 서론

도시화로 인해 자연 지표가 빌딩, 콘크리트, 아스팔트 등과 같은 인공구조물로 바뀐다. 이 같은 변화는 도시지역에서의 인간 활동에 의한 거주활동, 공간 형성, 교통량 등을 통하여 상당량의 인공열을 방출시키게 된다. 이러한 지표 피복 상태 변화, 인공구조물의 증가 및 인공열 배출은 도시 대기경계층의 열, 지표 수분 함유량(surface moisture availability), 운동량 등을 변화시켜 주변 지역과 구별되는 도시 특유의 기상학적·기후학적 특성을 가지게 한다. 도시와 시골간의 알베도, 열용량, 수증기, 그리고 거칠기 길이의 차이는 도시 열섬과 같은 현상의 주요 요인으로 자주 인용되며, 도시 건물의 연직구조 역시 도시 협곡에서의 복사 갇힘(trapping)을 유발하고 건물내부에 열에너지를 저장함으로써 도시 열섬에 중요한 역할을 한다(Fan and Sailor, 2005). 그러나 이러한 인공열은 도시 에너지 소비에 따라 배출되므로, 시공간적 변화 추이를 정확하게 산정하는 일이란 매우 어려운 실정이다. 하지만 최근 도시지역의 열적 영향과 관련된 인공열의 중요성(Sailor and Fan, 2004; Hamilton *et al.*, 2009)이 부각됨에 따라, 제한적이기는 하지만 인공열을 이용한 다양한 연구들이 진행되고 있다(Tarumi and Fujii, 1991; Ichinose *et al.*, 1999; Kondo and Kikegawa, 2003; Kikegawa *et al.*, 2003; Fan and Salor, 2005). 예를 들면, Ichinose *et al.*(1999)은 Tokyo 중심지역에 대한 인공열 상세 배출량 지도를 작성하여 기온에 대한 그 효과를 계산하였다. 그러나 현열/잠열 방출과 도시 캐노피 사이의 구분은 고려되지 못하였다. Kondo and Kikegawa(2003)는 일본 Tokyo Ootemachi 지역을 대상으로 한 중규모 수치실험을 통해 여름철 냉방 전력 수요에 따른 인공열이 배출될 때 일 평균 기온이 약 0.6 °C에서 1.3 °C 까지 더 증가하는 것으로 보고한 바 있다.

또한 인공열이 대기에 미치는 영향은 대기 모형에서 도시 캐노피 모수화 과정을 통해서 구현 및 표현되고 있다(Masson, 2000; Sailor and Fan,

2004; Oleson *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009; Narumi *et al.*, 2009; Krpo *et al.*, 2010; Aoyagi and Seino, 2011; Chen *et al.*, 2011; Salamanca, *et al.*, 2011; Shahmohamadi *et al.*, 2011). Narumi *et al.*(2009)은 여름철(8월)의 일본 오사카 지역을 대상으로 고해상도의 인공열 배출자료와 도시 캐노피 모형을 이용하여 도시기후의 시·공간적 특징을 모사하였다. 특히, 인공열 배출에 따른 기온 증가와 바람 분포 변화로 인하여 연안 지역에서 육풍의 시작이 지연되는 효과를 분석하였다. Krpo *et al.*(2010)은 2차원 중규모-도시 캐노피 모수화-건물 에너지 모형(Mesoscale Model-Urban Canopy Parameterization-Building Energy Model)을 이용하여 건물의 인공열 교환과정에 따른 도시 열섬과 열적난류 증가 등 도시 대기경계층에 미치는 영향을 평가하였다. Chen *et al.*(2009)은 도시 캐노피 모형 내 인공열 모수화 과정을 통해서 Hangzhou시의 인공열이 도시 미규모 및 경계층 구조에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다. 이를 통해 도시 열섬 강도에 대한 인공열의 기여도가 야간에 가장 크며, 일평균에 대한 기여도는 여름철에 약 43.6%, 겨울철에 54.4%로 나타남을 분석하여 인공열이 도시지역 고온화에 상당 부분 영향을 주는 사실을 보였다. Chen *et al.*(2011)은 중규모 수치모형 WRF-UCM을 이용한 휴스턴 지역의 2000년 8월 해륙풍 순환 사례연구를 통해 도시 강제력이 대기경계층 바람 약화에 미치는 영향을 조사하였다.

한편, 국내에서는 김유근 등(2000)이 인공열과 지표피복이 부산시의 열적 환경에 미치는 영향에 관한 연구를 진행한 바 있으며, 홍정혜·김유근(2000)이 부산지역의 지표면 변화와 인공열이 바람장에 미치는 영향에 관한 수치모형 연구를 수행한 바 있다. 그러나 우리나라 전체 인구의 약 50%에 달하는 인구 이천 만 명이 넘는 서울, 인천, 경기도 이루어진 경인지역을 대상으로 인공열이 대기에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. 최근, Lee *et al.*(2009)이 경인지역을

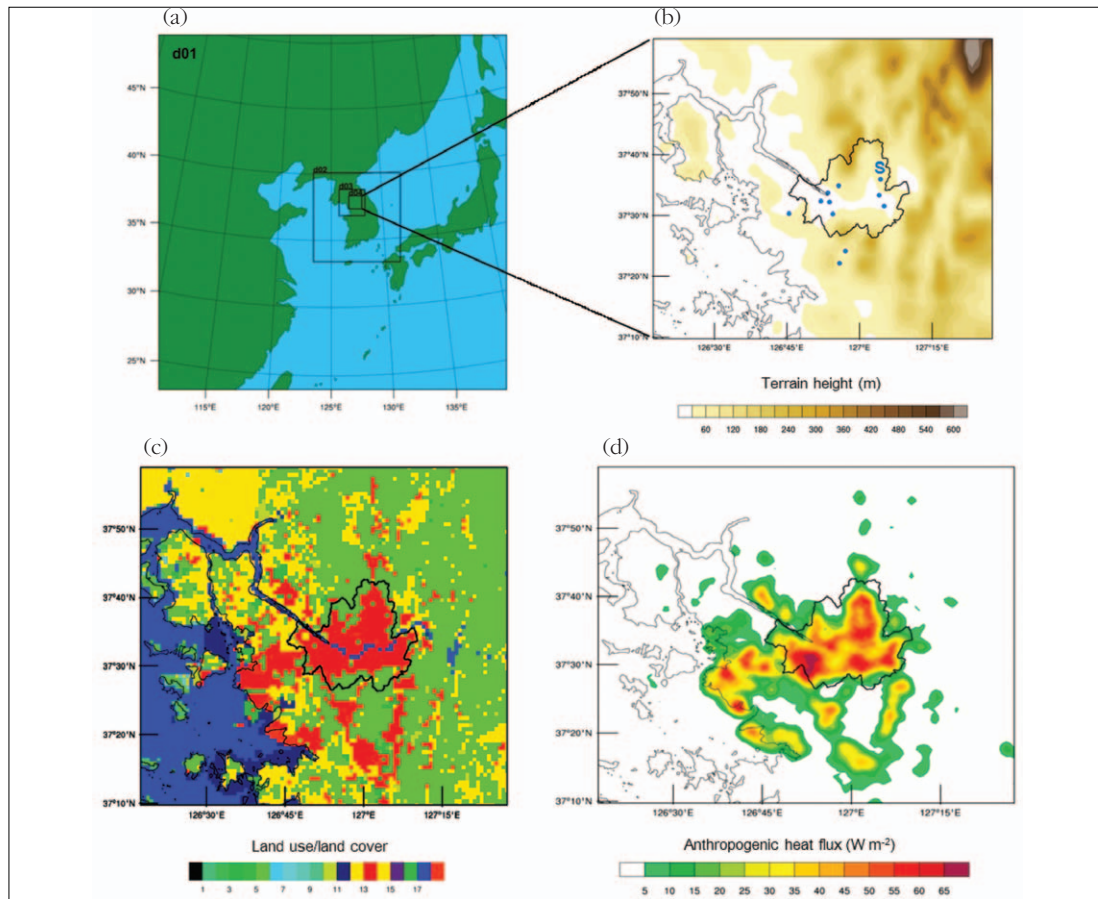


Figure 1. Configuration of the WRF model domain. (a) The four domains with the horizontal grid spacings of 27 (d01), 9 (d02), 3 (d03), and 1 (d04) km. (b) The terrain height for d04. Blue dots represent the selected 11 urban sites to validate the simulation results. (c) Modified land-use/land-cover (LULC) using 30 m GIS data for d04. (d) Anthropogenic heat flux ($W m^{-2}$) at 0900 LST.

대상으로 전력 사용, 교통, 점원 및 면원 등 4가지 형태의 에너지 소비에 관한 2002년 통계 자료를 이용하여 수평해상도 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 인 격자 형태의 인공열 배출량을 산정하였다. 아울러, Ryu *et al.*(2011)에 의해 중규모 대기 모형에 사용하기 위한 새로운 도시 캐노피 모형이 개발됨에 따라 인공열을 이용한 좀 더 현실적이고 상세한 수치모델링 연구가 가능하게 되었다.

본 연구에서는 경인지역을 대상으로 인공열이 도시 대기경계층에 미치는 영향을 중규모 수치 모형인 WRF-SNUUCM 모형을 이용하여 알아보고자 한다. 연구를 위해 2002년 에너지 소비 통계자료에 근거한 인공열 격자 자료를 SNUUCM 모형(Ryu

et al., 2011)에 입력하였다. 또한 인공열 배출 강도 변화에 따른 사례실험 연구를 통하여 인공열이 대기경계층 구조에 미치는 영향을 조사하였다.

II. 모형 및 실험 설계

1. WRF-SNUUCM 모형

본 연구에서 우리나라 경인지역에 대한 인공열 효과를 연구하기 위해 SNUUCM이 접합된 중규모 모형 WRF(Weather Research and forecasting version 3.2) 모형을 이용한다. 특히, Ryu *et al.*(2011)에 의해 새로 개발된 SNUUCM 모형은 도

Table 1. Experimental setup for the simulations.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal grid dimension	108×108	81×81	69×69	102×90
Vertical layers	43			
Horizontal grid size (km)	27	9	3	1
Time integration (h)	72 (starting from 0900 KST 01 June 2010)			
Time step (s)	60	20	6.67	1.11
Microphysics scheme	WRF Single-Moment 6-class graupel scheme			
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch		none	
Longwave radiation	RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)			
Shortwave radiation	Dudhia shortwave radiation			
PBL	MYJ (Mellor Yamada Janjic)			
Initial/boundary conditions	NCEP final analysis data (6-h intervals, 1°×1° resolution)			

시협곡의 건물 벽면 효과(즉, 해가 비치는 벽면과 그늘진 면으로 고려한다) 및 협곡방향에 상대적인 풍향이 협곡 내 풍속에 미치는 영향 등을 고려하여 복사, 열, 수증기, 그리고 운동량 플럭스에 대한 지면 경계조건을 제공한다. 그러나 이 모형에서 인공열의 실제 값이 고려되지는 않고 있다. 본 연구에서는 WRF-SNUUCM 모형에 Lee *et al.* (2009)에 의해 산정된 2002년 에너지 소비 통계자료 기반의 경인지역 인공열 격자자료를 수치모형의 격자에 맞게 입력하였다(그림 1(d)). 격자별 인공열 자료는 각 격자에서 차지하는 도시면적 비율을 고려하여 SNUUCM 모형에 입력되었다. 따라서 중규모 수치모형에 인공열 효과를 고려함으로써 국지규모의 대기경계층의 구조를 이해하는데 있어 보다 현실적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 보인다.

2. 실험설계

인공열이라는 지표의 열 강제력에 대한 대기 경계층의 반응을 평가하기 위해 WRF-SNUUCM을 이용한 사례연구를 수행하였다(표 1). 수치실험을 위한 모형 격자는 27 km(108×108), 9 km(81×81), 3 km(69×69), 그리고 1 km(102×90)의 수평 해상도를 가지며, 서울·경인지역은 계산영역의 중심에 위치한다. 연직 격자는 총 43개 층으로 모형 최하층 고도는 약 20 m이며, 모형 최상층 고도는 약 10 hPa이다. 모형의 초기조건 및 경계조건은

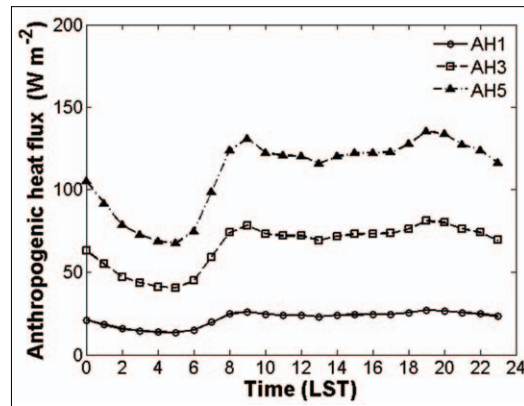


Figure 2. Diurnal variation of urban-averaged anthropogenic heat flux ($W m^{-2}$) for AH1, AH3, and AH5 simulations.

NCEP(National Center for Environmental Prediction)에서 6시간 간격으로 제공되는 수평 해상도 1°×1°의 재분석 자료를 사용하였다(Kanamitsu *et al.*, 2002). 경계층 물리과정 모수화는 MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) 방법을 이용하였다. 적운 모수화는 27 km, 9 km 격자 영역에 대해서 Kain-Fritsch 방법을 이용하였으며, Noah 지표 과정을 사용하였다. 모형에서 도시지표 분류는 주거 지역(도시 면적비: 0.815)과 산업/상업 지역(도시 면적비: 0.9)의 2개 형태로 고려되었다. 우리나라 중부지방에 위치한 경인지역은 중규모 운동뿐 아니라 해륙풍과 산곡풍에 의해 직접적으로 영향을 받기 쉬운 환경에 위치하고 있다(이상현, 2008). 본 연구에서는 서울·경인지역을 대상으로

대기경계층 특성에 미치는 인공열 배출 효과를 연구하고자 한다. 인공열 배출이 도시 경계층에 미치는 영향을 파악하기 위하여 종관강제력이 약한 즉, 종관기상관측지점에서 관측된 풍속이 5 m s^{-1} 이하이며, 운량이 2할 이하인 맑은 날을 선정하였다. 사례일은 2010년 6월 3일이며, 모형은 2010년 6월 1일 0900 KST부터 3일 동안 적분되었다. 인공열 배출을 고려하지 않은 경우(AH0)와 고려한 경우(AH1)에 대한 모형 검증을 거쳐, 인공열이 현재보다 3배(AH3), 5배(AH5)로 증가한 것으로 가정(그림 2)할 때 인공열이 주요 기상변수 및 도시 열섬, 그리고 도시 대기경계층 흐름 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

III. 결과 및 고찰

1. 모형 검증

인공열 추가에 따른 모형 검증을 위하여 경인지역에서 11개 지점의 자동기상관측소(Automatic Weather Station; 이하 AWS) 시간평균 자료를 이용하였다. 이들은 산악, 바다, 강 등으로부터 충분히 떨어져 있고 도심 지역에 주로 위치한다(그림 1(b)). 즉, 선정된 각 관측지점은 주변이 도시 피복으로 덮여 있으며 주변 지형물의 영향을 상대적으로

로 적게 받는 곳이다. 분석을 위해 모형 및 관측결과는 적분시간 38시간 30분 후인 2010년 6월 3일 0000 LST부터 2010년 6월 3일 2300 LST까지를 사용하였다. 그림 3은 총 적분기간 중 3일 째에 해당되는 2010년 6월 3일 0000 LST부터 6월 3일 2300 LST에 대한 1.5 m 고도에서 관측된 기온과 10 m 고도에서 관측된 평균풍속을 수치실험 결과와 비교한 것이다. 인공열 배출 유무에 따른 두 실험 결과 모두 관측값과 비슷한 일변화 경향을 보이고 있다. 기온(그림 3(a))은 낮 시간 동안에 두 실험 모두 관측값 보다 낮게 모의되었다. 그러나 인공열을 고려한 실험의 경우(AH1)가 인공열 배출을 고려하지 않은 경우(AH0)보다 기온이 더 높게 모의되어 주간인 경우 관측값과의 오차가 줄어들었다. 야간에 0000-0800 LST 사이에는 온도를 추가적으로 높여 관측값보다 높게 계산되었다. 한편, 인공열 배출이 없는 경우와 있는 경우만을 보면 기온의 최대값이 나타나는 주간에는 큰 기온차를 보이지 않는다. 그러나 야간의 인공열 배출이 있는 경우(AH1), 인공열 배출이 없는 경우(AH0)보다 기온 값이 약 2-3 °C 정도 높다. 풍속의 경우(그림 3(b)), 두 실험 결과 모두 관측값과 비슷한 변화를 보이거나 주간에는 전반적으로 관측값 보다 과대 모의되었으며, 야간에는 과대 및 과소 모의 특징이 모두 나타난다.

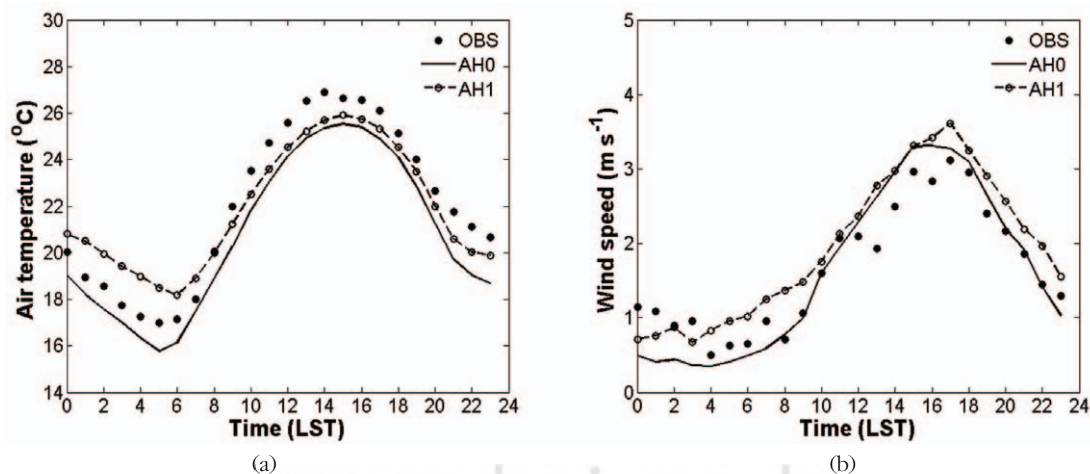


Figure 3. Diurnal variations of observed and simulated (a) air temperature ($^{\circ}\text{C}$), and (b) wind speed (m s^{-1}) near the surface averaged over the 11 urban stations on 03 June 2010.

인공열 배출을 고려한 사례에서는 주간과 야간 모두 관측값에 비해 다소 과대 모의 되었다. 인공열 배출을 고려하지 않은 사례에서는 0800-1200 LST 및 1900-2200 LST 사이(이 시간은 그림 2에서 인공열 배출이 최대가 되는 출퇴근 시간에 해당한다.)에는 관측값과 거의 일치하는 값을 보이나 주간에는 다소 과대 모의되고, 야간에는 과소 모의되고 있다. 인공열 배출을 고려하지 않은 경우가 고려한 경우보다 출퇴근 시간에 관측값과 오차가 더 작게 나타난 이유는 동 시간대의 인공열의 값이 어느 정도 과대 추산되었을 가능성이 있는 것으로 보인다. 그러나 수치실험에서 산출된 기온과 풍속의 계산 값을 각각 관측값과 비교한 결과 두 요소 모두 상관계수(r)가 0.9 이상으로 나타나 인공열을 고려한 수치 모형에서 예측된 결과의 많은 부분이 관측값을 설명해 줄 수 있을 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서 사용된 수치적 방법이 어느 정도 타당한 결과를 주는 것으로 해석할 수 있으며, 이 방법을 이용하여 인공열 배출량 변화가 대기경계층에 어떻게 영향을 미치는지 다음절에서 설명하고자 한다.

2. 인공열 증가에 따른 영향 분석

1) 기온, 풍속, 수증기 혼합비

도시 지면에 인공열이라는 열 강제력이 주어지면 대기경계층 내에서 여러 기상변수의 변화가 생길 수 있다. 그 중에서 가장 큰 영향을 받을 수 있는 주요인자는 기온과 바람, 그리고 수증기일 것이다. 그림 4는 도시지표 분류의 모든 격자에 대해 평균한 기온, 풍속, 그리고 수증기 혼합비의 일변화를 나타낸다. 그림 4(a, c, e)는 각 요소의 평균값이며 그림 4(b, d, f)는 인공열 배출강도가 1배(AH1), 3배(AH3), 5배(AH5)인 실험결과에서 인공열 배출이 없을 경우(AH0)의 결과 값의 차이를 각 요소별로 나타낸 것이다. 인공열 배출 강도가 증가함에 따라 기온은 일 중 모든 시간에 대하여 증가하는 경향을 보인다(그림 4(a)). 그러나 주간에는 인공열 배출강도가 5배까지 증가되더라도 그 변화가 0.2-1.0 °C 미만으로 크지 않으나 야간에는 기온 상승이 최대

2.7 °C 까지 나타나 인공열 배출강도에 따라 기온 상승폭이 주간보다 야간에 크다. 특히, 본 사례실험의 경우 새벽 5시에 기온의 상승이 가장 크다(그림 4(b)). 이 경우, 인공열 배출강도가 증가함에 따라 야간 고온화에 더 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 보인다. 이는 도시 에너지 수지에서 현열속이 크게 변화했기 때문으로 보인다(Kusaka *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2011). 그림 5에서 도시 에너지 수지에 대한 순복사(a), 현열속(b), 잠열속(c), 그리고 저장열속(d)을 고려할 때 인공열의 배출강도가 증가함에 따라 현열속의 변화가 가장 크게 나타난다. 현열속은 기온 변화에 가장 크게 영향을 주는 인자로서 특히, 야간에 인공열 배출이 5배인 경우(AH5), 현열속이 거의 100 W m^{-2} 까지 증가하여 지면 근처 기온을 높이는 데 주된 기여를 한 것으로 보인다. Narumi *et al.*(2009)의 연구결과에 따르면 주간에 순복사 에너지 수지에서 인공열이 차지하는 비율은 태양 복사 에너지에 비해서 매우 낮은 수준이며, 지표 근처 기온은 태양 복사 에너지에 의해 주로 상승한다. 그러나 야간의 경우 태양 복사 에너지는 거의 0이 되고, 인공열이 현열로서 주요 작용을 할 수 있음을 알 수 있다.

풍속(그림 4(c))은 기온변화와 유사하게 인공열 배출강도가 증가할 때 일 중 시간에 대하여 증가하나 0800-0900 LST와 2200-2300 LST 사이에 가장 큰 증가를 보인다(그림 4(d)). 이는 인공열의 일변화 경향과 유사하며, 이는 출퇴근 시간에 인공열 배출강도가 증가되면 풍속 증가가 나타날 수 있음을 시사한다. 또한 0000 LST에는 각 경우에 대한 풍속 값이 0.33, 0.42, 0.40, 0.36 m s^{-1} 으로 차이가 거의 없다. 이는 분석에 사용되지 않았으나 수치모형의 안정화를 위해 이를 전부터 적분된 수치 모형 결과에서 그 전날 일중 풍속이 각 실험 별로 큰 차이가 나타나지 않은 것에 기인한 것으로 보인다.

수증기 혼합비(그림 4(e)와 (f))는 기온과 풍속의 변화경향과는 조금 다른 일변화 특징을 보인다. 인공열 배출강도가 증가함에 따라 대체로 주간에는 주변에 비해 상대적으로 건조한 특징(AH5인 경우

최대 약 0.3 g kg^{-1} 감소)이 나타나며, 야간에는 상대적으로 습윤해지는 특징(AH5인 경우 최대 약

0.5 g kg^{-1} 증가)이 나타난다. 즉, 주·야간의 습윤화 및 건조화 경향이 인공열 배출강도에 비례하여

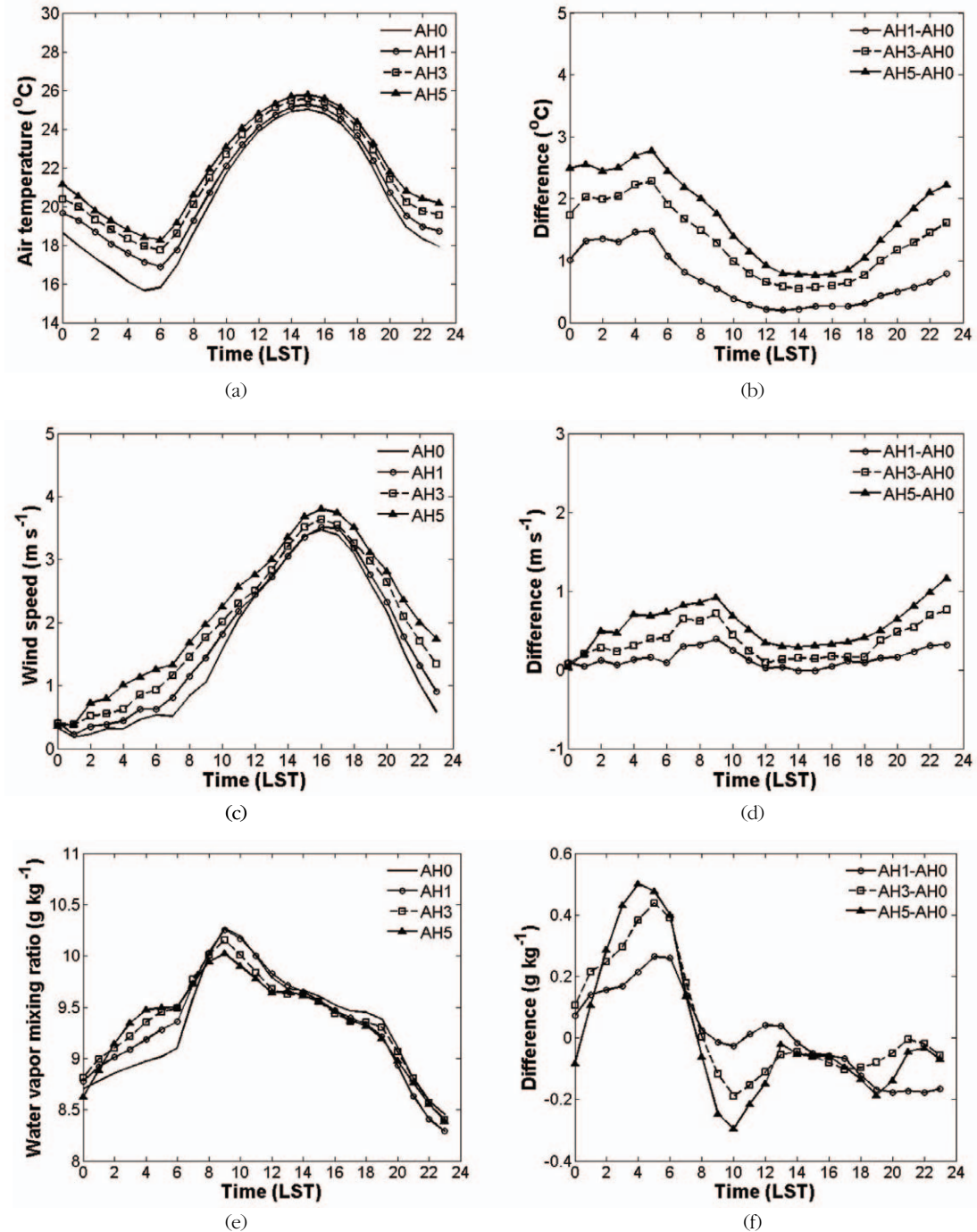


Figure 4. Comparison of diurnal variations of urban-averaged (a) air temperature, (c) wind speed, and (e) water vapor mixing ratio near the surface for AH0, AH1, AH3, and AH5 simulations. The differences in (b) air temperature, (d) wind speed, and (f) water vapor mixing ratio near the surface between the simulations.

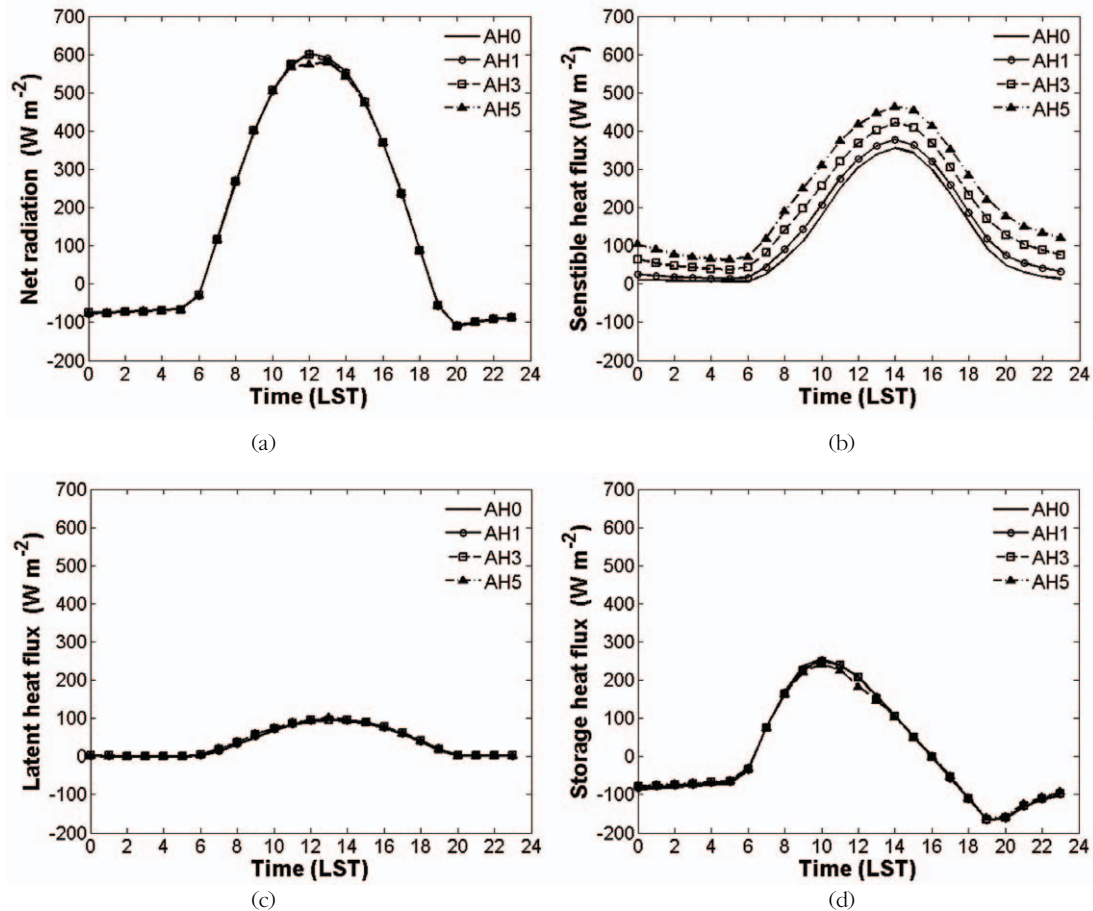


Figure 5. Diurnal variations of urban-averaged surface energy and anthropogenic heat fluxes: (a) net radiation, (b) sensible heat flux, (c) latent heat flux, (d) storage heat flux, and (e) anthropogenic heat flux near the surface for AH0, AH1, AH3, and AH5 simulations.

나타나지는 않고 있다. 비록 특정 사례일에 대한 실험결과로서 일반화시키기에는 다소 어려움이 있으나 일반적으로 알려진 도시화에 따른 지표 수분 함유량 감소 특징(Oke, 1982)과는 다른 양상을 보인다. 이에 대한 이해를 위해서는 수증기 혼합비에 영향을 주는 기상인자 및 흐름 특성에 대한 세밀한 분석이 필요해 보이며, 다음 3)절에서 지면근처의 바람장과 수증기 혼합비의 분포 특징에 대해서 기술하기로 한다.

2) 도시 열섬

앞 절에서 설명한 바와 같이 인공열의 강도가 증가함에 따라 도시의 평균기온이 증가할 수 있다. 도

시의 고온화로 인하여 주변의 시골 및 비 도시화 지역과의 기온차를 증가시켜 도시 열섬 강도에도 변화를 줄 수 있다. 표 2는 인공열 배출강도에 따른 도시 열섬 강도를 계산하여 평균적인 변화 및 주·야간의 변화 정도를 나타낸 것이다. 도시 열섬 강도는 도시와 시골간의 기온차로 정의된다. 본 연구에서 서울지역의 도시 열섬 강도를 계산하기 위해 Kim and Baik(2005)에서 시골지역으로 정의된 것과 동일하게 사능, 고양, 능곡의 AWS 지점을 시골지역으로 선정하고, 세 지점의 기온을 시간별로 평균하여 사용하였다. 위 세 지점은 서울에 인접한 지역 중에서 가장 도시화가 덜 된 지점으로서 위도의 차이로 인한 기온의 변화가 크게 없다. 또한 Kim and

Baik(2005)에서 정의된 바와 같이 한 지점만을 시골 지역으로 사용되면 관측값과의 편차가 커지게 되므로 여러 개 지점을 택하여 평균하는 방식을 취하여 시골 지역의 대푯값을 얻었다. 도시지역의 피복은 주로 건물과 도로, 아스팔트, 시멘트 등으로 이루어져 있으며, 시골지역과 비교하여 전혀 다른 지면의 거칠기, 열적 특성, 알베도, 열 함유 특성을 가진다(Fan and Sailor, 2005). 특히, 건물사이에서 일어난 복사에너지 갇힘 등에 의하여 주변지역보다 기온이 높은 도시 열섬 현상 등이 나타나게 되는 것이다. 따라서 표 2에서 제시된 바와 같이 인공열이 고려되지 않은 경우에도 도시지역의 지표 특성에 의하여 도시 열섬이 나타나며, 강도 또한 평균적으로 약 0.9 °C 정도가 나타난다. 주간과 야간으로 나누었을 때 야간에 주간보다 도시 열섬이 더 강할 뿐 아니라 인공열 배출강도 변화 실험에서도

그 경향이 더욱 두드러진다. 인공열 배출강도가 22.0 W m⁻²에서 약 110.0 W m⁻²으로 증가함에 따라 평균적으로 도시 열섬 강도는 1.4 °C에서 2.4 °C로 증가하며, 백분율로는 약 55%(AH1)에서 166%(AH5) 정도 증가한다. 한편, 인공열 배출강도는 야간의 경우 약 19.9-100.0 W m⁻²으로 주간의 24.1-120.5 W m⁻² 보다 낮다. 비록 주간에 인공열 배출강도가 야간보다 더 높으나 인공열에 의한 도시 열섬 강도 증가는 평균적으로 야간(AH1의 경우 0.9 °C 증가, AH5의 경우 2.3 °C 증가)에 주간(AH1의 경우 0.2 °C 증가, AH5의 경우 0.8 °C 증가)보다 더 높으며, 도시 열섬 강도 증가율 역시 야간(AH1의 경우 약 82% 증가, AH5의 경우 약 209% 증가)에 주간(AH1의 경우 약 33% 증가, AH5의 경우 약 133% 증가)보다 더 높게 나타난다.

그림 6은 인공열 배출강도에 따른 도시 열섬 강

Table 2. Difference of air temperature between urban and three rural stations. The names of the three stations are Sanung, Nungnok, and Goyang. Here, ΔUHII intensity (ΔUHII) represents the UHI intensity (UHII) of simulations that consider AH release minus the simulation that does not consider AH release. AHF means anthropogenic heat flux.

Case	Mean		Nighttime		Daytime	
	UHII (°C) (AHF, W m ⁻²)	ΔUHII (°C) (relative change, %)	UHII (°C) (AHF, W m ⁻²)	ΔUHII (°C) (relative change, %)	UHII (°C) (AHF, W m ⁻²)	ΔUHII (°C) (relative change, %)
AH0	0.9		1.1		0.6	
AH1	1.4 (22.0)	0.5 (55.6)	2.0 (19.9)	0.9 (81.8)	0.8 (24.1)	0.2 (33.3)
AH3	2.0 (88.1)	1.1 (122.0)	2.8 (59.8)	1.7 (154.5)	1.2 (72.3)	0.6 (100.0)
AH5	2.4 (110.1)	1.5 (166.7)	3.4 (99.7)	2.3 (209.1)	1.4 (120.5)	0.8 (133.3)

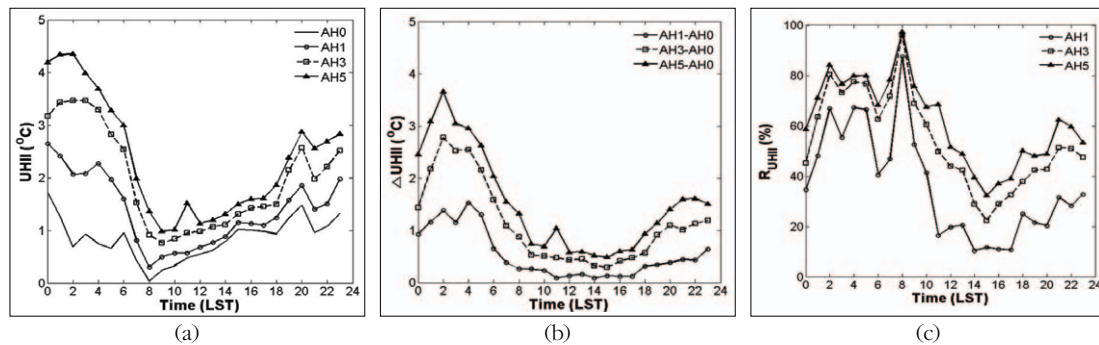


Figure 6. Diurnal variation of (a) UHI intensity, and (b, c) the contribution of anthropogenic heat fluxes to UHI, where R_{UHII} was

$$\text{calculated as } R_{UHII} = \frac{UHII_{\text{with anthropogenic heat}} - UHII_{\text{without anthropogenic heat}}}{UHII_{\text{with anthropogenic heat}}} \times 100\% \text{ from Chen et al. (2009).}$$

도의 일변화 차이 및 도시 열섬에 대한 인공열의 기여도를 나타낸다. 여기서 인공열의 기여도를 나타내는 R_{UHI} 는 Chen *et al.*(2009)이 제시한 방법을 이용하여 계산한 것이다.

$$R_{UHI} = \frac{UHI_{with anthropogenic heat} - UHI_{with out anthropogenic heat}}{UHI_{with anthropogenic heat}} \times 100\% \quad (1)$$

표 1에서 언급한 바와 같이 그림 6(a)에서 인공열 배출강도가 증가함에 따라 평균 도시 열섬 강도가 증가하며, 주간보다 야간의 도시 열섬 강도가 더 크다. 특히, 본 실험연구에서 0800 LST에는 인공열 배출이 없을 때 도시 열섬 강도가 거의 0 °C에 가깝다. 그러나 AH1의 경우 약 0.5 °C로 증가한 것을 알 수 있다. 이 때 도시 열섬 강도 증가에 대한 인공열 기여도가 약 85% 정도(그림 6(c)) 차지하여 인공열의 영향이 크게 나타난다. 또한 도시 열섬 강도는 야간(0000-0500 LST)에 크게 증가하는데, 이때 인공열 배출강도의 기여도는 AH5의 경우, 최대 80% 정도(AH1인 경우 약 40%의 기여도를 보인다)에 이른다. 따라서 야간의 도시 열섬 강도 증가에 인공열이 매우 많은 부분을 차지하며, 인공열 배출강도가 약 50.0 W m⁻² 증가하면 도시 열섬 강도가 최대 약 3.5 °C 까지 증가할 수 있다. 한편, AH5의 경우, 도시 열섬 강도가 오전 1100 LST와 오후 2000 LST에 급격히 증가한다. 이 때, 동 시간대의 인공열 배출강도가 최대가 되며, 일출과 일몰에 따

른 대기경계층의 변화가 커 도시 열섬 강도 증가와 관련이 있는 것으로 사료된다.

3) 도시 경계층의 흐름

그림 7은 인공열 배출강도 변화 실험별 대기경계층 고도 및 인공열 배출강도가 1, 3, 5배 일 때 인공열 배출이 없는 값과의 차이에 대한 일변화를 나타낸 것이다. 인공열 배출강도가 증가함에 따라 대기경계층의 고도도 증가한다. 특히, 야간에 증가폭(AH5의 경우 약 200 m 증가)이 크며, 오전 0800-1100 LST에 대기경계층 고도가 크게 증가한다(AH5의 경우 약 150-200 m 증가; 그림 7(b)). 일반적으로 일출이 일어나면 지표는 태양 복사에 의하여 급속하게 가열되고, 지면근처 대기가 불안정해지면서 상승운동이 일어난다. 여기에 오전의 추가적인 인공열 배출강도 증가로 인해 지표면 근처에서의 열적 난류가 대기의 혼합을 더욱 활발하게 만들어 대기경계층의 고도가 더욱 증가할 수 있다. 야간에 인공열 배출강도가 증가됨에 따라 대기경계층의 고도가 증가하는 것은 현열 증가에 의한 지면기온의 상승이 대기 불안정을 유도하고 혼합과 상승을 유도하기 때문으로 보인다.

위 대기경계층 고도의 일변화를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 서울의 AWS 관측지점 중 풍하측에 위치한 특정지점에서의 특징을 살펴보고자 한다.

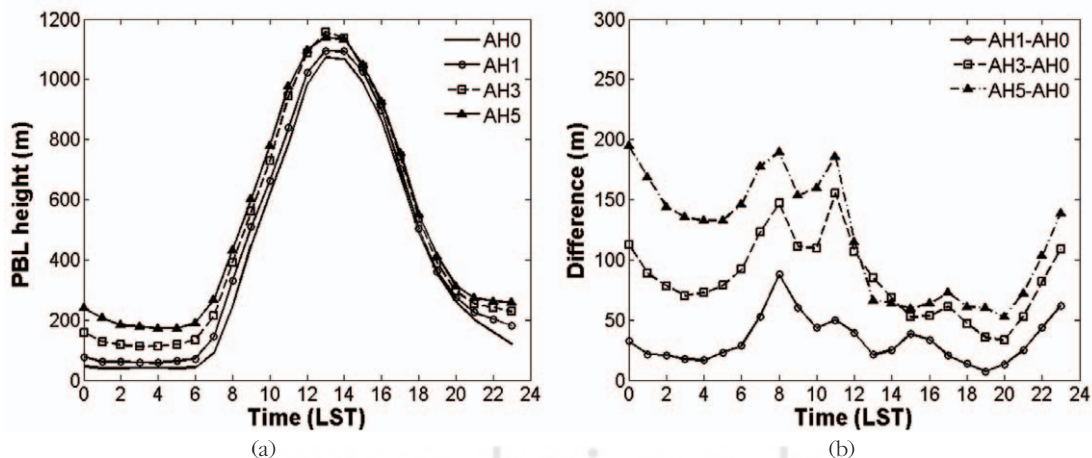


Figure 7. (a) Comparison of diurnal variation of planetary boundary layer (PBL) height according to the anthropogenic heat intensity of 0, 1, 3, 5 times of the control case. (b) represents the value of AH intensity minus no anthropogenic heat case.

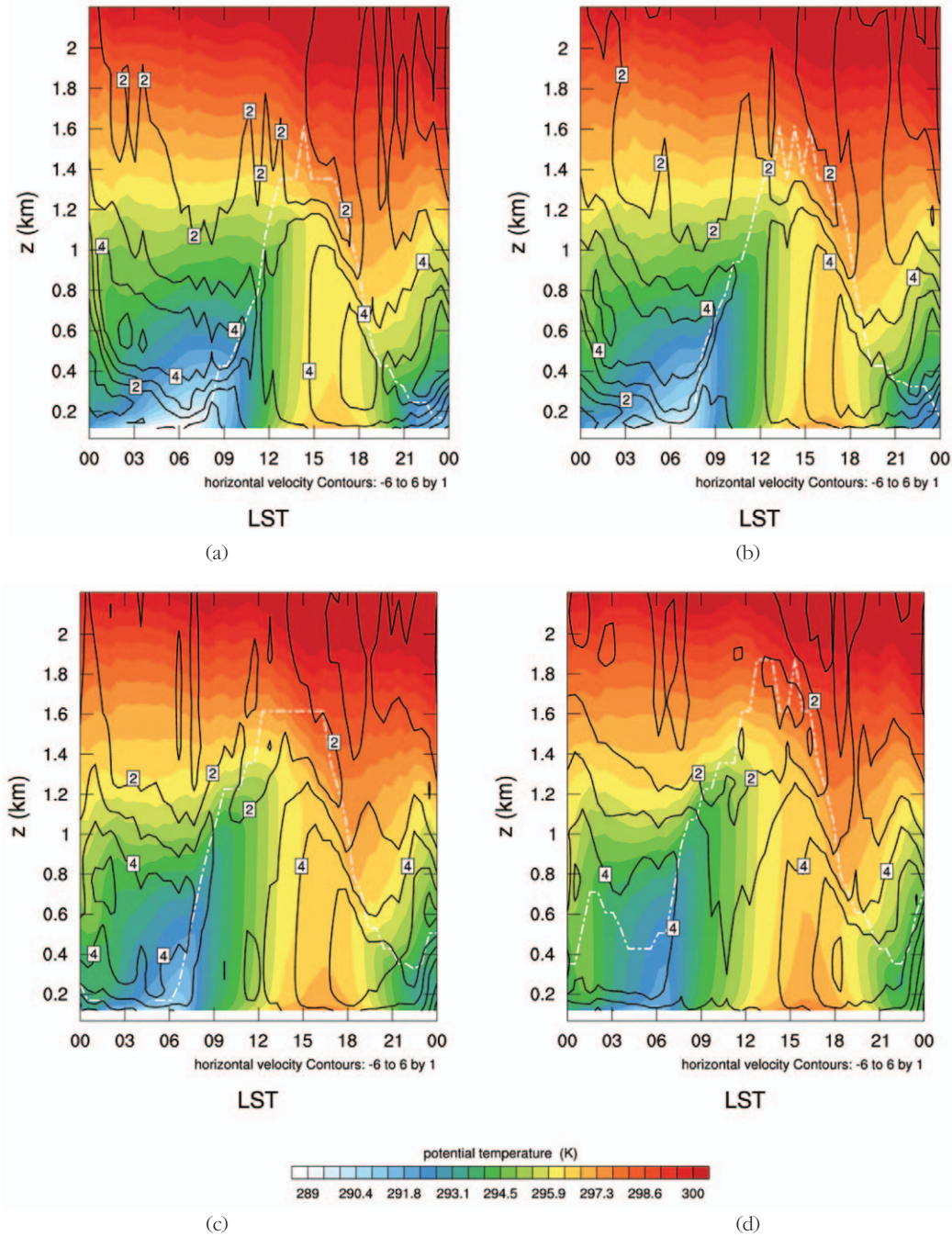


Figure 8. Diurnal variations of potential temperature (K), PBL height (m) and wind speed ($m s^{-1}$) in the vertical for (a) AH0, (b) AH1, (c) AH3, and (d) AH5 simulations, at the location of S in Figure 1(b). The potential temperature, PBL height, and wind speed are depicted as shaded color, white dotted line, and black contour line, respectively.

그림 8은 그림 1(b)에서 제시된 S지점에서의 인공열 배출강도별 온도, 대기경계층 고도, 그리고 평균 풍속의 일변화를 고도별로 나타낸 것이다. 앞서 언급

한 바와 같이 도시의 인공열 강도가 현재 상태보다 3배, 5배로 강해지게 될 경우를 가정할 때, 분석지점에서 지표면의 온위가 증가하고, 대기경계층이

1.4 km에서 1.8 km 고도까지 발달하는 것을 볼 수 있다. 평균풍속 또한 상층 고도까지 증가하며, 풍속이 증가하는 시간이 앞당겨진다. 특히, 그림 8(d)의 AH5의 경우 고도별 평균 수평풍속 분포를 보면 다른 경우와 비교하여 오전 0900 LST에서 낮 1200 LST 사이에 지표의 풍속이 갑자기 증가한다. 이는 Pennell and Lemone(1974), Lykossov(1991), 그리고 Pegahfar(2011) 등이 밝힌 바와 같이 대기경계층 부근의 증관 풍속이 평균적으로 강하게 나타나는 상황에서 하층의 풍속이 갑자기 증가할 수 있음을 시사한다. Pegahfar(2011)은 복잡한 지형을 가진 테헤란 지역의 연직 바람분포에 관한 연구를 통하여 일출과 일몰시간의 바람패턴이 급격하게 변화할 수 있음을 보인 바 있다. 따라서 본 연구에서도 해가 뜬 후 지표 인공열의 강도 증가에 따른 경계층 내부의 온위 증가 및 대기경계층 고도 증가가 대기경계층 주변의 운동량의 수송과 혼합을 유도하여 지면근처의 풍속 증가를 유도할 수 있을 것으로 보인다.

그림 9는 인공열 배출강도가 0, 1, 5배 인 경우 새벽 0300 LST의 기온(a, c, e)과 수증기 혼합비(b, d, f)를 바람장과 함께 수평분포로 나타낸 것이다. AH0(그림 9(a))의 경우, 도시화가 가장 많이 이루어진 도시중심지역에서 기온이 높으며, 주변 시골지역과의 기온 차이가 최대 약 3.0 °C 정도로 나타난다. 이는 지표피복 특징 차이에 기인한 도시효과로 볼 수 있을 것이다. 그림 9(c)의 AH1 경우, 서울 중심 부근을 중심으로 주변 지역보다 기온이 높은 지역이 나타난다(시골지역과의 기온차가 약 5.0 °C 정도로 나타난다). 지표 바람 역시 서울 중심부로 향하는 남풍 계열의 바람이 불고 인공열 강도가 5배가 된 경우 더욱 강화되어 서울 중심부근에서 수렴하는 형태를 보인다. 그림 9(e)의 AH5의 경우, 도시중심에서 높은 기온을 보이는 지역이 더욱 확대되며, 주변지역과의 기온차는 최대 약 7.0 °C 까지 나타난다. 또한 인공열 배출강도가 증가함에 따라 인천지역의 기온이 상승될 뿐 아니라 수렴대가 강화되는 분포를 보인다. 이 지역의 수렴은 인근 영

역의 풍향 변화에도 영향을 주어 서울지역에 남서풍 계열의 바람이 더욱 강화되는 것을 알 수 있다. 그림 9(c)에서 나타나던 수렴 지역이 점차 북진하면서 동풍계열의 바람과 만나 수렴하는 모습이 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이 결과는 지표에 인공열 배출강도가 증가할 때 지표 열 환경 뿐 아니라 경계층 내부의 흐름이 바뀔 수 있음을 시사한다(Zhang et al., 2011).

한편, 그림 9(b, d, f)는 같은 시각의 바람장과 수증기 혼합비에 대한 수평분포를 나타낸다. 앞서 언급한 지표 기온의 변화 및 수평바람장의 흐름과 함께 수증기의 변화도 설명할 수 있다. 그림 9(b)의 AH0의 경우, 도시 중심지역에서 주변지역보다 기온은 높으나 수증기의 양은 상대적으로 더 적은 건조한 분포를 보인다. 북한산이 위치한 서울 경계의 북쪽지역 및 관악산 등이 위치하는 분석영역의 남동지역에 수증기 혼합비가 상대적으로 높게 나타난다. 그림 9(d)의 AH1의 경우, 남동풍계열의 공기가 서울 중심지역으로 유입됨에 따라 수증기 혼합비의 분포도 변화하는 모습을 보인다. AH5의 경우(그림 9(e)), 수증기 혼합비는 서울 지역 내 남서풍 계열 바람의 강화로 인하여 서울의 북동지역 및 남동지역에서 높게 나타나고 있다. 이 결과는 수평바람의 흐름이 도시내부의 수증기 이동에도 영향을 주어 전반적으로 수증기 분포에도 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 일반적으로 도시지역 지표는 시골지역 지표에 비해 투수율이 낮고 식생의 면적이 적으며 수증기 배출이 적어서 잠열로 인한 에너지 배출이 낮게 나타난다. 이 같은 특징은 Champollion et al.(2009)의 프랑스 파리지역을 대상으로 한 대류 조건이 있는 경우 도시/시골 지표에 의한 수증기 변동성에 관한 관측 연구에서도 잘 나타난다. 이 논문 에 따르면 수증기 혼합비를 고려할 경우, 낮 동안에 도시지역이 시골지역보다 더 건조하고 야간에는 더 습해지는 현상이 나타나는 것으로 설명한다. 그 주된 이유로 증발에 필요한 도시의 수증기원이 없기 때문이며, 아직까지 명확하지는 않으나, 이른 새벽에는 이슬에 의한 수증기 감소가 적기 때문에 설

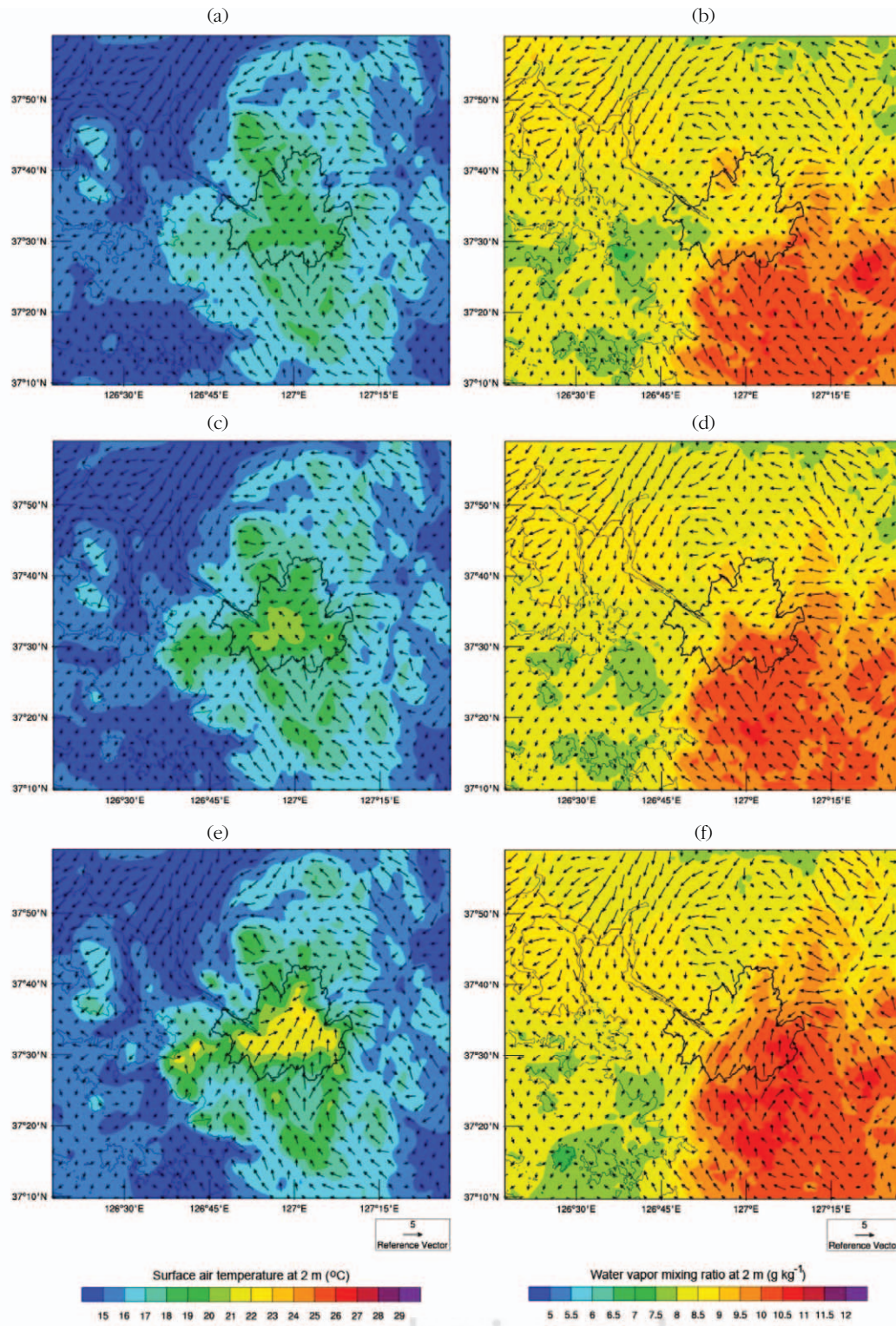


Figure 9. Distributions of surface wind and air temperature (a, c, e), and water vapor mixing ratio (b, d, f) for AH0, AH1, and AH5 simulations, respectively, at 0300 LST on 03 June 2010. The contour intervals are 1 °C for (a, c, e) and 0.5 g kg⁻¹ for (b, d, f).

명한다(Richards, 2005). 또한 야간의 도시 대기경계층이 증가함에 따라 도시 중심으로 수렴이 증가하고 주변지역으로부터의 수증기가 유입될 가능성이 있는 것으로 설명한 바 있다(Champollion *et al.*, 2009; Richards, 2005). 따라서 본 연구결과에서 나타난 인공열 배출강도 실험에서도 지면의 기온이 증가함에 따라 도시 대기경계층의 변화 및 바람장의 변화가 유도될 수 있으며, 이로 인해 수증기의 이류가 유도될 수 있는 것으로 보인다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 중규모 수치 모형인 WRF-SNUUCM 모형을 이용하여 경인지역에서 인공열이 도시 대기경계층에 미치는 영향을 모의하고 그 효과를 조사하였다. 연구를 위해 2002년 에너지 소비 통계자료에 근거한 경인지역의 인공열 격자 자료를 WRF-SNUUCM 모형에 추가하였다. 또한 사례 연구를 수행하여 인공열의 배출량 강도를 변화 시킴으로써 인공열이 대기경계층 구조에 어떠한 영향을 미치는지 고찰하였다.

2010년 6월 3일 사례실험에서 도시지역 기온과 평균풍속에 대해 수치 결과와 관측값 사이의 높은 상관관계를 보였다. 기온의 경우 주간에 관측값보다 과소 모의되기는 하였으나 인공열을 고려하지 않은 경우(AH0)보다 오차가 줄어들었다. 야간의 경우에는 인공열의 효과로 기온을 과대 모의한 특징을 보였다. 풍속의 경우에는 인공열을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 모두 관측값과 비슷한 경향을 보이거나 주간에는 다소 과대 모의되었으며, 야간에는 과대 및 과소 모의되었다. 그러나 기온과 풍속에 대한 각각의 관측값과 수치 결과 간의 상관계수(r)가 0.9 이상으로 나타나 인공열을 고려한 수치적 방법이 타당성 있는 연구 결과를 보여준 것으로 보였다.

인공열의 배출량을 현재의 수준에서 3배, 5배로 강제적으로 증가시킴으로써 인공열이 대기경계층 구조에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다. 대기

경계층의 주요 기상변수인 기온, 바람, 그리고 수증기의 일변화 특성이 인공열 배출량 증가에 따라 변화하였다. 주간에 기온은 인공열 배출강도가 5배까지 증가되더라도 그 변화가 0.2-1.0 °C 미만으로 큰 변화를 보이지 않으나 야간에는 기온 상승이 최대 2.7 °C 까지 나타나 인공열이 주간보다 야간에 더 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다. 풍속은 전반적으로 증가하나 특히 0800-0900 LST와 2200-2300 LST에 가장 크게 증가하였다. 이러한 경향은 인공열의 일변화 경향과 유사한 것으로 조사되었다. 본 사례에서 수증기 혼합비는 인공열 배출강도가 증가함에 따라 주간에는 감소하는 경향이 나타나며, 야간에는 증가하는 경향이 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 특징은 도시 순환 구조 변화에 따른 이류효과가 역할을 한 것으로 나타났다.

도시 평균기온이 증가함에 따라 주변 시골지역과 기온차가 증가하여 도시 열섬 강도 변화가 큰 것으로 분석되었다. 특히, 인공열 배출강도가 주간에 높더라도 야간에 그 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 야간에 AH5의 경우 인공열 배출강도가 약 50 $W m^{-2}$ 가 증가하면 도시 열섬 강도는 최대 3.5 °C 까지 증가된 것으로 분석되었다. 또한 대기경계층의 변화가 나타나는 일출과 일몰 이후에 그 효과가 증대될 수 있는 것으로 나타났다.

인공열 배출강도가 증가함에 따라 대기경계층의 고도가 증가하였으며 오전 0800-1100 LST에 최대 약 200 m 정도 증가하였고, 야간에도 비슷한 정도의 증가폭이 나타났다. 또한 지면의 열특성 및 흐름 특성의 변화가 나타나 대기경계층 흐름 구조에도 어느 정도 변화가 있는 것으로 나타났다. 그 중에서도 야간의 지면 기온이 증가함에 따라 도시 대기경계층의 변화 및 바람장 변화가 유도되어 수증기의 이류효과와 관련된 특징이 나타나는 것으로 분석되었다.

도시는 매우 복잡한 에너지 소비 구조와 열적 특성을 가지므로 인공열을 정량적으로 정확하게 산정하는 일과 도시 캐노피 내 흐름 특징을 상세하게 조사하는 데는 아직까지 많은 한계가 있다. 그러나 본

연구를 통해 중규모 수치 모형 WRF-SNUUCM 모형에 인공열 효과를 고려함으로써 수치 모형의 지표 경계조건으로의 적용 가능성 및 국지규모의 대기경계층의 구조를 이해하는데 있어 보다 현실적인 정보를 얻을 수 있다는 점에서 의의가 크다고 할 수 있다. 또한 이러한 정보는 향후 도시화와 인공열 증가에 따른 그 효과를 예측할 수 있을 뿐 아니라, 도시 대기질 예측 및 영향평가 연구에도 활용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- 김유근, 이화운, 홍정혜, 손은하, 2000, 인공열과 land-use가 부산시의 열적 환경에 미치는 영향 연구, 한국대기환경학회지, 16(4), 363-372.
- 이상현, 2008, 식생이 포함된 도시 캐노피 모델의 개발과 이를 위한 도시 열섬 모의, 서울대학교 자연과학대학원 박사학위청구논문.
- 홍정혜, 김유근, 지표면 변화와 인공열이 바람장에 미치는 영향에 관한 수치 시뮬레이션, 한국 대기환경학회지, 16(5), 511-520.
- Aoyagi, T., and N. Seino, 2011, A square prism urban canopy scheme for the NHM and its evaluation on summer conditions in the Tokyo metropolitan area, Japan, *Journal of Applied Meteorological Climatology*, 50, 1476-1496.
- Champollion, C., P. Drobinski, M. Haeffelin, O. Bock, J. Tarniewicz, M. N. Bouin, and R. Vautard, 2009, Water vapour variability induced by urban/rural surface heterogeneities during convective conditions, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 135, 1266-1276.
- Chen, F., S. Miao, M. Tewari, J.-W. Bao, and H. Kusaka, 2011, A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area, *Journal of Geophysical Research*, 116, D12105, doi: 10.1029/2010JD015533, 1-19.
- Chen, Y., W. M. Jiang, N. Zhang, X. F. He, and R. W. Zhou, 2009, Numerical simulation of the anthropogenic heat effect on urban boundary layer structure, *Theoretical Applied Climatology*, 97, 123-134.
- Fan, H., and D. J. Sailor, 2005, Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes, *Atmospheric Environment*, 39, 73-84.
- Hamilton, I. G., M. Davies, P. Steadman, A. Stone, I. Ridley, and S. Evans, 2009, The significance of the anthropogenic heat emissions of London's buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation, *Building Environment*, 44, 807-817.
- Ichinose, T., K. Shimodozono, and K. Hanaki, 1999, Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 3897-3909.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002, NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) *Bulletin of American Meteorology Society*, 83, 1631-1643.
- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Yoshikado, and H., Kondo, H., 2003, Development of a numerical simulation system toward

- comprehensive assessment of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban building's energy demands, *Applied Energy*, 76, 449-466.
- Kim, Y. H., and J.-J. Baik, 2005, Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul, *Journal of Applied Meteorology*, 44, 591-605.
- Kondo, H., and Kikegawa, Y., 2003, Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use, *Pure and Applied Geophysics*, 160, 317-324.
- Krpo, A., F. Salamanca, A. Martilli, and A. Clappier, 2010, On the impact of anthropogenic heat fluxes on the urban boundary layer: A two dimensional numerical study, *Boundary-Layer Meteorology*, 136, 105-127.
- Lee, S.-H., C.-K. Song, J.-J. Baik, and S.-U. Park, 2009, Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-In region in Korea, *Theoretical Applied Climatology*, 96, 291-303.
- Lykossov, V. N., 1991, The momentum turbulent counter-gradient transport in jet-like flows, *Advances in Atmospheric Sciences*, 9(2), 191-200.
- Masson, V., 2000, A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357-397.
- Narumi, D., A. Kondo, and Y. Shimoda, 2009, Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity, *Environmental Research*, 109, 421-431.
- Oke, T. R., 1982, The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24.
- Oleson K. W., G. B. Bonan, J. Feddema, M. Vertenstein, and C. S. B. Grimmond, 2008, An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities, *Journal of Applied Meteorological Climatology*, 47, 1038-1060.
- Pegahfar, N., A. A. Bidokhti, P. Zawar-Reza, and M. M. Farahani, 2011, Study of vertical wind profiles in an urban area with complex terrain (Tehran), *Journal of Earth System Science*, 120(5), 825-841.
- Pennell, W. T., and M. A. Lemone, 1974, An experimental study of turbulence structure in the fair-weather trade wind boundary layer, *Journal of Atmospheric sciences*, 31, 1308-1323.
- Richards, K., 2005, Urban and rural dewfall, surface moisture, and associated canopy-level air temperature and humidity measurements for Vancouver, Canada, *Boundary-layer Meteorology*, 114, 143-163.
- Ryu, Y.-H., J.-J. Baik, and S.-H. Lee, 2011, A new single-layer urban canopy model for use in mesoscale atmospheric models, *Journal of Applied Meteorological Climatology*, 50, 1773-1793.
- Sailor, D. J., and Fan, H., 2004, The importance of including anthropogenic heating in mesoscale modeling of the urban heat island, *Proceedings of the 84th Annual Meeting of the AMS, Symposium on Planning, Nowcasting,*

- and Forecasting in the Urban Zone, Seattle, WA, USA, January. American meteorological Society.
- 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 Meteorological Climatology*, 50, 1107-1128.
- Shahmohamadi, P., A. I. Che-Ani, K. N. A. Maulud, N. M. Tawil, and N. A. G. Abdullah, 2011, Review Article, The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance, *Urban Study Research*, 1-9.
- Tarumi, H., and S. Fujii, 1991, Conversion of exhaust heat to latent heat for the management of the thermal environment in urban areas, *Energy and Buildings*, 16(1-2), 609-616.
- Zhang, D.-L., Y.-X. Shou, R. R. Dickerson, and F. Chen, 2011, Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects along the Washington-Baltimore corridor, *Journal of Applied Meteorological Climatology*, 50, 2012-2029.

최종원고채택 12. 09. 11