

통합모델을 활용한 이류와 도시비율이 서울 수도권 지역의 도시열섬강도에 미치는 영향 분석

홍선옥* · 김도형 · 변재영 · 박향숙 · 하종철

국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2019년 7월 2일, 수정일: 2019년 8월 26일, 게재확정일: 2019년 9월 20일)

Analysis of the Effects of Advection and Urban Fraction on Urban Heat Island Intensity using Unified Model for Seoul Metropolitan Area, Korea

Seon-Ok Hong*, Do-Hyoung Kim, Jae-Young Byon, HyangSuk Park, and Jong-Chul Ha

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 2 July 2019; revised 26 August 2019; accepted 20 September 2019)

Abstract This study investigates the impacts of urban land-use fraction and temperature advection on the urban heat island intensity over the Seoul metropolitan area using the UM (Unified Model) with the MORUSES (Met Office Reading Urban Surface Exchange Scheme) during the heat wave over the region from 2 to 8, August 2016. Two simulations are performed with two different land-use type, the urban (urban simulation) and the urban surfaces replaced with grass (rural simulation), in order to calculate the urban heat island intensity defined as the 1.5-m temperature difference between the urban and the rural simulations. The land-use type for the urban simulation is obtained from Korea Ministry of Environment (2007) land-use data after it is converted into the types used in the UM. It is found that the urban heat island intensity over high urban-fraction regions in the metropolitan area is as large as 1°C in daytime and 3.2°C in nighttime, i.e., the effects of urban heat island is much larger for night than day. It is also found that the magnitude of urban heat island intensity increases linearly with urban land-use fraction. Spatially, the estimated the urban heat island intensities are systematically larger in the downwind regions of the metropolitan area than in the upwind area due to the effects of temperature advection. Results of this study indicate that urban surface fraction in the city area and temperature advection play a key role in determining the spatial distribution and magnitude of urban heat island intensity.

Key words: Unified model, urban parameterization, urban heat island intensity, urban fraction

1. 서 론

최근 도시에 거주하는 인구는 전체 인구의 50% 이상이며 그 비율은 지속적으로 증가하여 2030년에는

도시인구가 전세계 인구의 60%를 넘길 것으로 전망하고 있다(UNDESA, 2014). 도시지역의 가장 대표적인 현상은 도시가 교외지역보다 기온이 높은 현상인 도시열섬(Urban Heat Island, UHI) 현상이다. 도시열섬 현상을 일으키는 원인은 도시지역과 교외지역의 차이점에 있다. 도시지역은 교외지역에 비해서 지표의 거칠기가 증가하고 큰 열용량을 가진다(Oke, 1982; Porson et al., 2010a; Oke et al., 2017). 도시지역은 교외지에 비해 불투수성 지표가 많기 때문에 큰 보웬비

*Corresponding Author: Seon-Ok Hong, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seonbuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6773, Fax: +82-64-738-6515
E-mail: seonok0421@korea.kr

를 갖는다(Oke, 1982). 또한 높은 거칠기의 영향으로 난류혼합이 강하고, 지면의 가열이 교외지에 비해 크며, 인공열에 의한 추가적인 열이 공급되어 대기경계층으로 방출된다(Sailor, 2001). 이로 인해 도시지역은 교외지역보다 따뜻한 도시열섬현상이 발생한다. 여름의 폭염기간 동안 야간의 기온이 더욱 상승시켜 도시지역의 사람들의 건강과 삶의 쾌적도에 큰 영향을 미친다(Tan et al., 2010). 도시열섬현상과 같은 도시지역의 국지 기후를 이해하는 것은 인간의 쾌적도 향상을 목표로 하는 도시 계획 정책 결정에 도움을 줄 수 있다.

도시열섬강도는 풍속, 운량, 강수 등 다양한 기상조건에 영향을 받는다. 주로 풍속이 약하고 맑은날 도시열섬강도가 크게 나타나고, 풍속, 운량, 강수량이 증가할수록 약해지는 경향을 보이며, 주간에 비해 야간에 더 뚜렷하게 발달한다(Oke, 1982; Arnfield, 2003). 도시열섬강도는 대개 도시지역과 도시 주변의 교외지역의 기온차이로 정의된다. 대부분의 선행연구에서는 도시지역과 교외지역을 대표하는 두 지점을 통해 도시열섬강도를 계산한다. 일부 연구에서는 도시지역과 교외지역 또는 교외지역에 대해서 지점 평균하여 도시열섬강도를 계산한다(Kim and Baik, 2004; Lee and Baik, 2010). 따라서 한 도시의 열섬강도는 하나의 값으로 제시되는 되는 경우가 많다. 그러나 도시 내에는 다양한 건물과 인공피복 뿐만 아니라 공원과 녹지, 강 등의 다양한 피복이 존재한다. Hong et al. (2013)은 도시 내의 지표의 다양성을 고려할 수 있는 국지기후대를 사용하여 서울지역의 도시열섬강도의 특성을 보였다. 서울지역의 AWS에서 관측된 기온자료를 이용하여 국지기후대(Local Climate Zone, LCZ)에 따라 서울의 평균 기온과의 기온차이를 도시열섬강도로 정의하고 분석하였다. 그 결과 서울의 도시열섬강도는 고층 건물 밀집 지역(LCZ-1)과 도시 내 식생 지역(LCZ-A) 사이에 최대 4.3°C 차이가 났다. 따라서 도시열섬강도의 정의에 사용되는 도심지의 국지기후대에 따라 그 값이 상이함을 시사하였다.

최근에는 토지피복자료 중 도시 지역을 임의로 초지 혹은 농지로 대체하여, 그 온도차를 도시열섬강도로 정의하는 연구가 수행되었다. Chen et al. (2014)은 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델(Skamarock et al., 2008)을 사용하여 중국 항저우지역의 폭염사례에서의 도시열섬강도를 모의하였으며, 그 강도는 최대 1.6°C로 나타났다. Bohnenstengel et al. (2011)의 경우 통합모형을 사용하여 도시지역의 도시열섬강도와 대기경계층 높이 등을 시뮬레이션 하였으며 그 결과 도시열섬강도에 가장 크게 영향을 주는 것은 도시피복의 비율이라고 하였다.

수치모델의 지면 에너지 수치 모수화 방안은 넓은 교외지역에 대해 개발된 것으로 도시열섬에 영향을 미

치는 도시지역 에너지 수치를 모의하기가 힘들며, 도시열섬을 정량적으로 모의하기도 어렵다(Bohnenstengel et al., 2011). 따라서 수치 모델에서 도시지역의 형태 및 지표면의 다양성을 반영하기 위해 여러 도시 모수화 방안이 개발되고 수치 모델에 적용되어져 왔다(Oleson et al., 2008; Chen et al., 2011). 도시 모수화 방안의 종류로는 도시를 하나의 판으로 고려하는 Slab 모형(Best, 2005; Best et al., 2011), 2차원 혹은 3차원 형태의 모형(Grimmond and Oke, 1999; Kanda et al., 2005; Porson et al., 2010a, 2010b), 도시 캐노피 내 연직 층의 개수에 따라 단층 모형(single-layer)과 다층 모형(multi-layer) 등이 있다(Masson, 2000; Kusaka et al., 2001). 통합모형의 도시 모수화 방안으로는 도시 형태를 단순한 판으로 가정하는 Best 방법과 도시의 건물 형태를 고려한 Met Office-Reading Urban Surface Exchange Scheme (MORUSES)이 있다. Porson et al. (2010b)는 멕시코시티에서 관측한 자료로 MORUSES의 에너지 수치를 검증한 결과 모의 정확도가 Best 방법에 비해 향상되었음을 보였다. MORUSES를 활용한 서울 수도권지역의 1.5-m 기온 검증 결과 또한 Best 방법에 비해 향상되었음을 보였다(Hong et al., 2018).

본 연구에서는 도시모수화방안인 MORUSES가 적용된 통합모형을 활용하여 서울 수도권 지역의 도시열섬강도를 모의하였다. 도시열섬강도의 일변화와 공간분포에 영향을 미치는 두 가지 요소인 도시비율과 이류가 도시열섬에 미치는 영향을 파악하기 위한 도시피복을 그대로 유지한 도시실험(urban simulation)과 도시피복을 초지로 변경한 교외실험(rural simulation)을 수행하였다. 두 실험 간의 1.5-m 기온의 차이를 도시화에 의한 도시열섬강도로 정의하여 분석하였다.

2. 자료 및 실험방법

2.1 자료

2.1.1 토지피복자료

본 연구에 사용되는 통합모형은 Joint U.K. Land Environment Simulator (JULES) 지면모형을 사용하며 이 지면모형은 한 격자 내의 다양한 지면 피복을 표현할 수 있는 모자이크기법을 적용한다. JULES는 각 격자마다 활엽수(broad leaf trees), 침엽수(needle leaf trees), C3 초지(C3 grass), C4 초지(C4 grass), 관목(shrubs)의 5가지 식생지표와 도시(urban), 내륙수(inland water), 나지(bare soil), 내륙빙(land ice)의 4가지 비식생 지표로 총 9가지 유형의 토지피복을 사용한다. C3 초지는 온대지역 식물을 나타내며 지구상의 95% 정도가 여기에 속한다. C4 초지는 열대 혹은 아열대성 식물로 작물 중 옥수수, 사탕수수 등이 C4 초지로 배

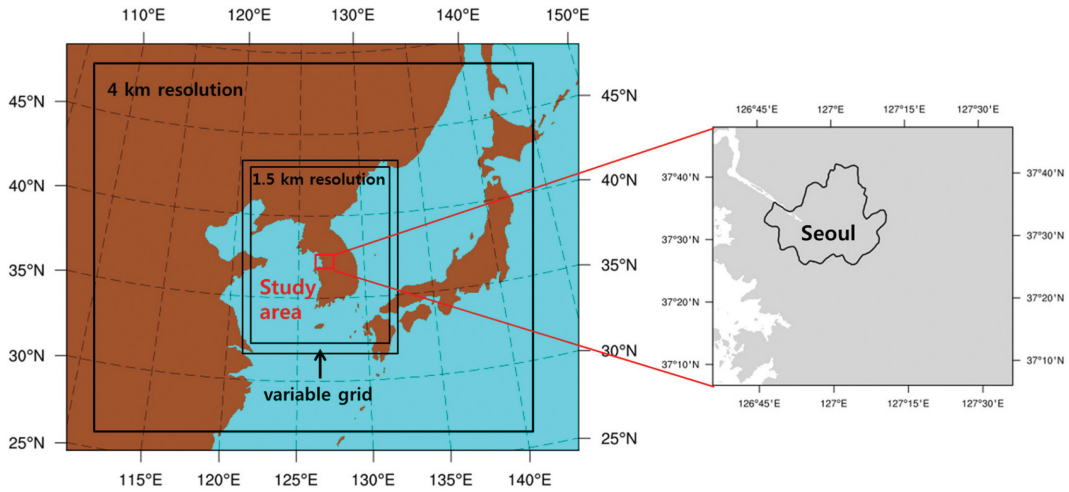


Fig. 1. The domains of the Unified Model simulations and the study area including Seoul metropolitan (126.6~127.6°E, 37.1~37.8°N).

나 밀 등은 C3 초지로 분류된다. 관목(shrubs)은 2 m 미만의 낮은 수목을 말한다. 도시비율(urban fraction, f_u)은 각 격자 내에 전체 지면 피복 중 도시가 차지하는 비율로 정의하며 그 값은 0과 1 사이로 나타났고, 값이 클수록 격자내의 도시피복의 비율이 크다는 것을 의미한다.

도시열섬강도를 현실적으로 모의하기 위해 한반도의 고해상도 토지피복변화를 JULES 지면모델에 반영하였다. 토지피복자료는 우리나라 환경부 환경공간정보시스템에서 제공하는 2007년 중분류 토지피복자료인 EGIS (Environmental Geographic Information Service)를 이용하였다. EGIS는 남한영역에 대해 SPOT5 위성자료로 제작된 5 m의 고해상도 자료로 주거지역에서 해양수 까지 총 22개 지면유형으로 이루어져 있다(Park et al., 2007). EGIS를 통합모델의 지면경계조건으로 입력하기 위해 Unnikrishnan et al. (2016)을 참고하여 통합모델의 9가지 토지피복유형으로 재분류하였다.

2.1.2 관측자료

도시열섬 분석을 위해 모델 정확도를 조사하기 위해 서울 수도권 지점의 관측자료를 통해 모델 검증 실시하였다. 검증에 사용된 자료는 총 85개의 AWS 지점이며 지점의 해발고도가 100 m 이하인 지점을 선정하였다. 도시의 비율에 따라 성능차이를 파악하기 위해 85개소의 관측지점위치에 해당하는 격자의 도시의 비율에 따라 관측지점을 5가지 카테고리로 분류한 후 모의 기간에 대해 검증하였다. 기온 검증을 위하여 Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square

Error (RMSE)를 이용하였으며, 이 검증값들은 그 값이 0에 가까울수록 모델과 관측이 유사하다는 것을 나타낸다.

2.2 수치모의설계

본 연구에서는 서울을 포함한 수도권 지역을 대상으로 도시열섬강도에 영향을 미치는 요인 중 (1) 도시피복의 비율, (2) 이류에 대해서 수치모델실험을 통해 확인하였다. 실험에 사용된 수치모델은 통합모델 버전 10.1이고, 모델영역은 Fig. 1에 나타내었다. 수평과 연직 격자체계는 각각 Arakawa C-grid와 Charney-Philips 체계를 terrain-following hybrid-height 좌표계를 사용한다(Davies et al., 2005). 수평해상도는 가변 격자체계를 적용하여 내부의 1.5 km 해상도, 외부의 4 km 해상도의 고정격자 구역과 내부에서 외부로의 1.5 km 해상도에서 4 km 해상도로 증가하는 가변 격자 구역으로 구성되어있다. 격자수는 1188(동서) × 1148(남북)로 한반도와 동아시아영역 일부를 포함하고 연직층은 70개 층이다. 통합모델에 사용되는 물리 모수화 과정들로는 미세물리과정은 Wilson and Ballard (1999), 경계층물리과정은 Lock et al. (2000)을 사용한다. 복사물리과정은 Edwards and Slingo (1996)을 지면물리과정은 JULES 지면모델(Best et al., 2011)을 사용한다. 중력파항력과정은 Webster et al. (2003)이 적용되었다. 유한차분법을 사용하고 반암시 라그랑지 방법을 이용하여 시간 적분을 수행한다.

모델의 초기장과 경계장은 기상청 전구예보모델(Global Data Assimilation and Prediction System, GDAPS) 자료를 사용한다. 통합모델에서 도시화에 의

Table 1. Summary of the numerical experiments.

Experiment	Urban simulation	Rural simulation
Model	UM 10.1	
Resolution (Horizontal Grid EW × NS)	1.5 km (1188 × 1148)	
Time step of integration	60 seconds	
Urban Parameterization Scheme	MORUSES	
Land-use/Land-cover data	EGIS	EGIS (urban land-use replaced with C3 grass)
Integration Period	2016. Aug. 2. 0300 LST~9. 0300 LST	
Initial and Boundary data	KMA GDAPS	

Table 2. Error statistics for the 1.5-m air temperature urban simulation (vs. observed) and the number of observation site according to urban fraction (f_u) category.

Urban fraction (f_u)	Category	The number of site	RMSE (°C)	MBE (°C)
$0.8 \leq f_u < 1.0$	High urban fraction (H)	18	1.28	-0.32
$0.6 \leq f_u < 0.8$	Moderate-High urban fraction (MH)	8	1.49	0.15
$0.4 \leq f_u < 0.6$	Moderate urban fraction (M)	18	1.58	0.27
$0.2 \leq f_u < 0.4$	Moderate-Low urban fraction (ML)	19	1.77	0.11
$0.0 \leq f_u < 0.2$	Low urban fraction (L)	22	1.93	-0.52
Total		85	1.66	-0.11

한 도시열섬강도 변화를 분석하기 위하여 도시의 유무에 따른 실험을 구성하였다. EGIS의 도시피복을 그대로 적용한 실험인 도시실험과 도시를 C3 초지로 변경한 교외실험을 실시하였다(Table 1). 도시열섬강도는 도시실험과 교외실험의 1.5 m 기온 모의 결과의 차이로 정의하였다. 도심지와 교외지의 기온차이로 정의되는 도시열섬강도의 경우 도심지와 교외지로 선정된 지점의 고도차에 의한 기온 변화 혹은 해안가에 위치한 도심지의 경우 해륙풍에 의한 기온 변화 등을 분리하여 분석하기 어렵다. 그러나 도시실험과 교외실험의 기온차로 도시열섬강도를 정의하는 이 방법의 장점은 지형이나 해륙풍 등에 의한 기온변화를 배제한 도시에 의해 상승되는 기온만을 분석 할 수 있다는 것이다(Bohnenstengel et al., 2011). EGIS 자료를 적용한 실험의 경우 남한영역에만 자료가 존재하는 EGIS의 특성상 남한영역 이외 영역은 기존의 IGBP 토지피복자료를 적용하였다.

사례기간은 도시열섬강도가 강하게 나타나는 고기압 영향하의 비강수기간인 2016년 8월 2일부터 9일로 선정하였다. 평균풍속은 약 1.4 m s^{-1} , 운량은 3.4이며 폭염주의보와 폭염특보가 발효된 기간이다. 수치모의는 2016년 8월 2일 0300 LST부터 8월 8일 0300 LST까지로 6일간 수행되었다. 전구예보모델에서 2016년 8월 2일 0300 LST의 초기장을 생성하였고, 6일간 한시간 단위로 경계장을 입력하였다.

3. 결 과

3.1 관측 검증

서울지역의 85개소의 AWS자료를 사용하여 2016년 8월 2일 0300 LST부터 8월 8일 0300 LST까지 모의된 도시실험에 대한 관측검증을 실시하였다. 도시비율에 따른 모델성능 차이를 분석하기 위해 85개소의 관측 지점위치에 해당하는 모델격자의 도시비율을 기준으로 5가지의 카테고리 분류하였다. Table 2는 도시비율 카테고리별 도시실험의 1.5-m 기온에 대한 RMSE와 MBE를 나타낸 표이다. 도시비율이 0.8 이상인 경우 RMSE가 1.28°C 로 가장 낮게 나타났고, 도시비율이 0.2 이하인 경우 RMSE가 1.93°C 로 가장 높게 나타났다. 도시비율이 낮은 경우 높은 기온을 과소모의하고, 낮은 기온을 과대모의하는 경향이 나타났다(Fig. 2e). 이는 도시비율이 낮은 경우 야간의 기온은 과대모의하고, 주간 기온은 과소모의 한다는 것을 의미한다. 따라서 도시열섬강도를 도시실험과 교외실험의 기온차로 정의하였을 때 도시비율이 낮은 지점에서 야간의 경우 도시열섬강도를 과대모의하고 주간의 경우 과소모의 할 가능성이 있다는 것을 보여준다. 지점 전체의 RMSE는 1.66°C , MBE는 -0.11°C 로 나타났다.

3.2 도시열섬강도의 시공간적 특성

주간과 야간의 열섬의 공간분포를 파악하기 위해

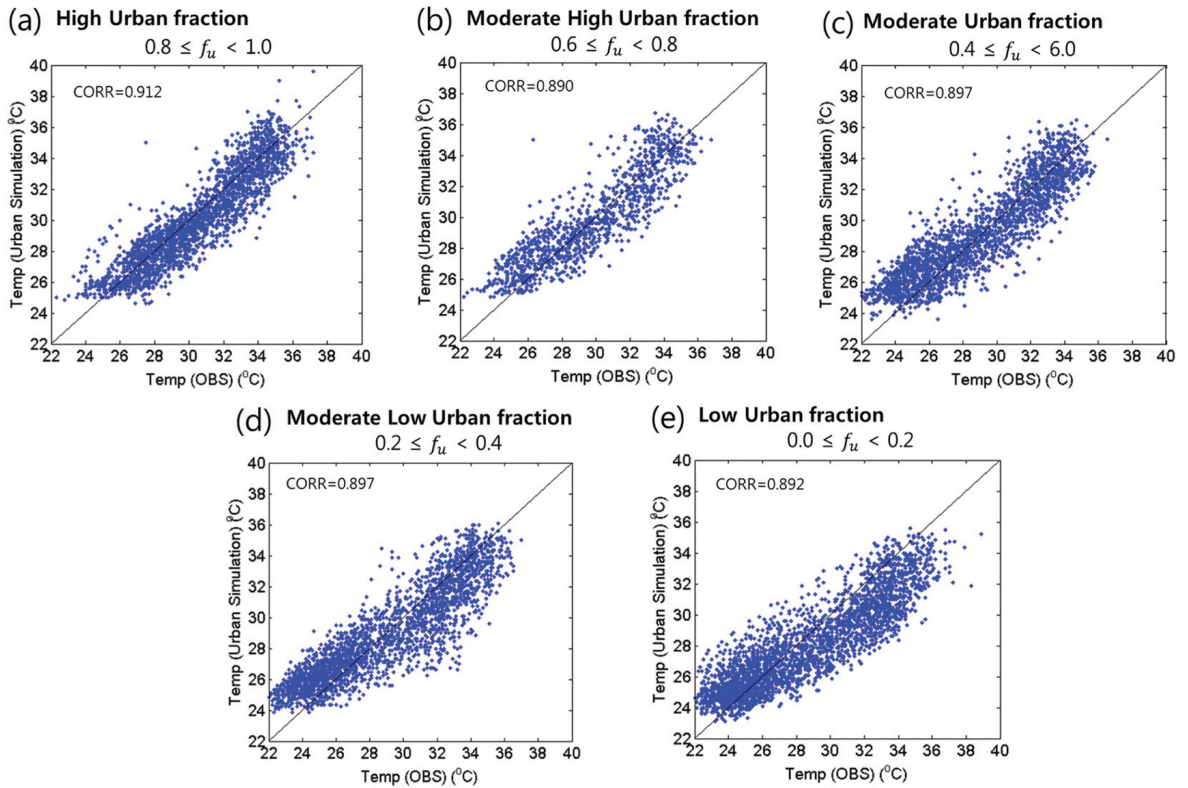


Fig. 2. The scatter plot of 1.5-m temperature between the observation and the urban simulation for (a) high urban fraction, (b) moderate-high urban fraction, (c) moderate urban fraction, (d) moderate-low urban fraction, and (e) Low urban fraction with correlation coefficient.

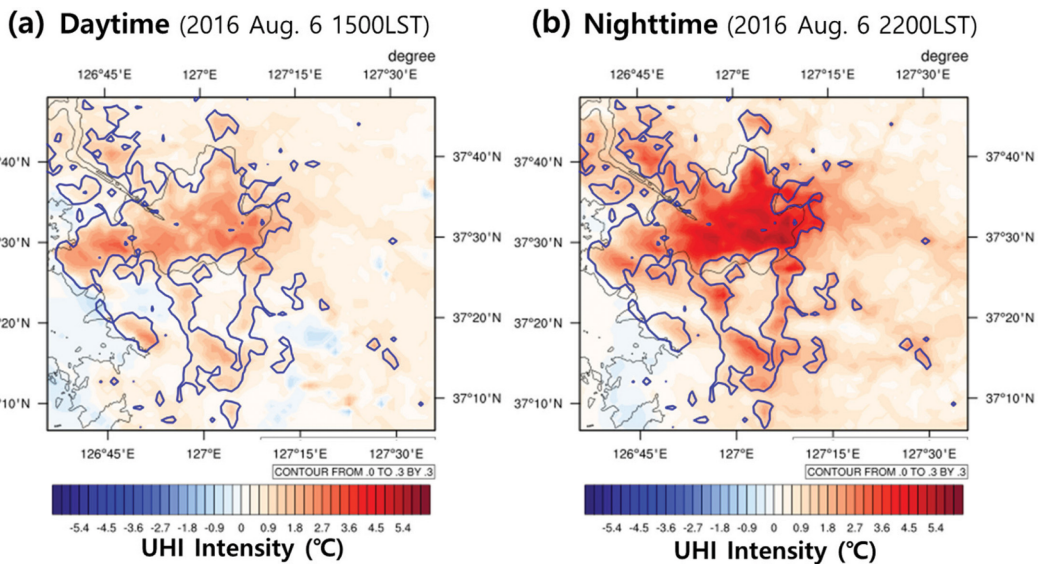


Fig. 3. Spatial distribution of UHI Intensity in (a) daytime (1500 LST) and (b) nighttime (2200 LST) on August 6, 2016. The thick blue contour indicates the area of over 30% of urban fraction.

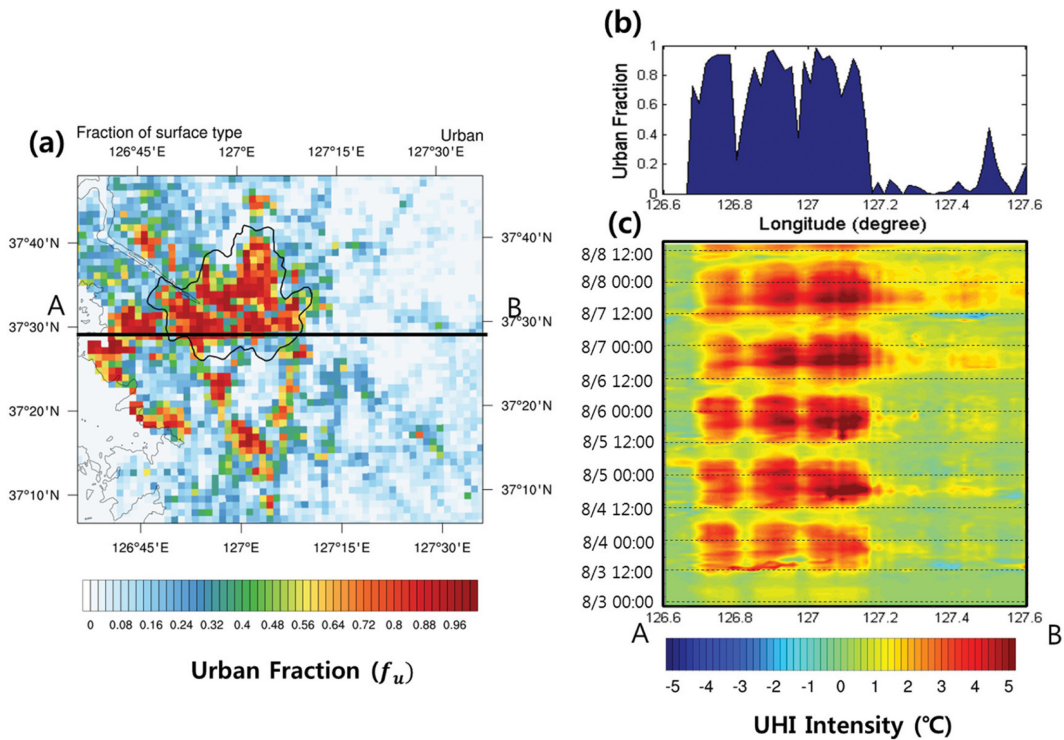


Fig. 4. (a) Distributions of EGIS urban fraction in the study area, (b) Urban land-use fraction along the west-east transect from A to B, (c) the Hovmöller plot of the UHI intensity temperatures along this west-east transect from A to B.

2016년 8월 6일 1500 LST과 8월 6일 2200 LST의 도시열섬강도의 공간분포를 Fig. 3에 나타내었다. 야간의 최대 강도가 5.5°C로 주간 최대 강도인 2.5°C보다 더 크게 나타났다. 도시비율이 30% 이상인 구역의 도시열섬강도가 도시비율이 30%이하인 영역보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. Figure 3b의 사례인 2016년 8월 6일 2200 LST의 바람은 서울 관측소 기준 서풍 2.8 ms^{-1} 이다. 가장 높은 도시열섬강도는 도심의 중심과 중심의 풍하측구역으로 나타났다.

시간에 따른 도시열섬강도의 변화를 살펴보기 위해 모의기간에 대해 서울의 도시비율이 높은 지역을 지나는 단면의 도시열섬강도를 시간에 따라 나타낸 Hovmöller 그림과 도시비율을 나타내었다(Fig. 4). 도시비율이 높은 구역인 경도 127.1°E 부근에서 도시열섬강도가 높게 나타났으며, 도시비율이 낮은 127.4°E 부근에서는 도시열섬강도가 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 주간과 야간의 도시열섬의 강도차이도 분명하게 나타났다. 그러나 Fig. 4에서 8월 6일 0000 LST 이후부터 도시 비율이 0.1 이하로 낮은 127.2°E 지점의 도시열섬강도가 약 2°C 이상으로 상승한 것을 볼 수 있다. 또한 127.4~127.6°E 부근의 도시비율이 127.2~127.4°E보다 높음에도 불구하고 도시열섬강도

는 더 낮게 모의된 것을 확인하였다. 이는 도시열섬강도는 도시비율에 따라 선형적으로 증가하나 시간에 따라 상이하게 나타나는 것은 이류의 영향으로 사료되며 자세한 논의는 3.3절에서 이루어진다.

Figure 5는 도시비율 카테고리별 도시실험과 교외 실험의 기온의 일변화와 도시열섬강도의 일변화를 나타낸 것이다. 도시비율이 높을수록 도시열섬강도가 높아지며 도시 비율이 0.2 상승할 때마다 최대 도시열섬강도가 약 0.5°C씩 상승하였다. 도시비율에 따라 최대열섬강도가 나타나는 시간이 다르게 나타났으며, 도시비율이 높을수록 최대열섬강도가 나타나는 시간이 늦어졌다. 기온이 도시 비율이 0.2 이하인 경우 최대 도시열섬강도가 19시에 1°C이고, 도시 비율이 0.8 이상인 경우 최대 도시열섬강도가 2000 LST에 나타났고 그 값은 3.2°C로 나타났다. 이는 Fig. 4의 도시열섬강도의 Hovmöller 그림에서 보인 도시비율과 도시열섬강도 간의 상관관계를 뚜렷히 나타낸 결과이다. 최대 도시열섬강도가 나타나는 시간이 도시비율이 0.8 이상인 경우 도시실험의 기온 일변화를 살펴보면 최고 기온이 34°C로 가장 높게 나타나며(Fig. 5a) 도시 비율이 클수록 열용량이 크기 때문에 기온 냉각률이 낮아 최대 도시열섬강도가 다른 낮은 도시 비율 카테

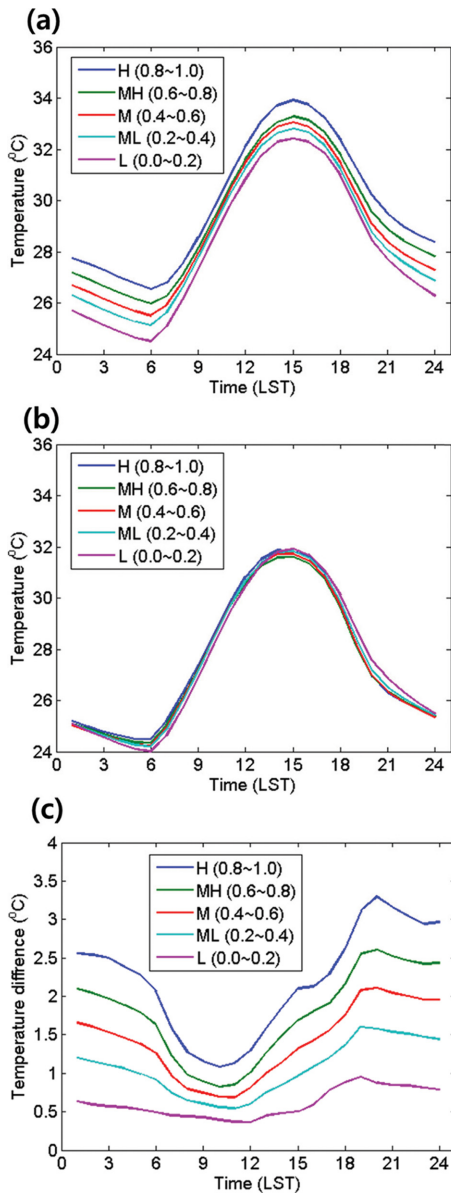


Fig. 5. Diurnal variation of the (a) 1.5-m temperature of urban simulation, (b) rural simulation, and (c) 1.5-m temperature difference between the rural and the urban simulations according to the urban fraction category in urban simulation.

고리보다 늦게 나타난 것으로 사료된다.

3.3 이류와 도시비율이 도시열섬강도에 미치는 영향

Figure 6은 도시실험의 풍속의 U성분을 Hovmöller 그림으로 나타낸 것으로, 8월 6일 0000 LST 이후에

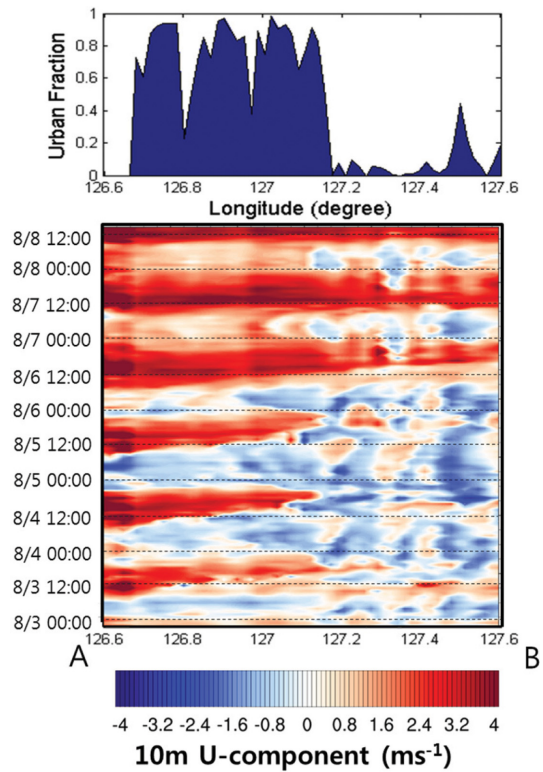


Fig. 6. The Hovmöller plot of 10-m U component ($m s^{-1}$) along the west-east transect from A to B in Fig. 4a. The red color and blue color imply the westerly wind and easterly wind, respectively.

서풍계열의 바람이 지배적인 것을 볼 수 있다. Figure 4의 도시열섬강도와 비교하였을 때 풍향에 따라서 같은 도시비율을 가지더라도 도시열섬 강도가 다른 것을 볼 수 있다. 이류가 도시열섬강도에 미치는 영향을 상세히 분석하기 위해 모의 기간 중 같은 시간대의 동풍사례와 서풍사례를 선정하였다. Figure 6을 참고하여 동풍사례는 2016년 8월 5일 0200 LST로 서풍사례는 2016년 8월 7일 0200 LST로 선정하였다. 두 사례 모두 도시열섬강도가 강하게 나타나는 야간의 풍속이 낮은 사례이다. 풍속은 서울 관측소(108번 지점)을 기준으로 모의 모의값이 동풍사례가 $2.3 m s^{-1}$ 이고, 서풍사례는 $2.8 m s^{-1}$ 이다.

도시 비율과 이류에 대한 복합적인 분석을 위하여 서울 지역을 풍상측과 풍하측에 따라 풍상측을 A구역으로 풍하측을 E구역으로 하여 총 5개의 구역(A, B, C, D, E)으로 분류하였다(Fig. 7). Figure 8은 각 구역에 대해 도시비율에 따른 도시열섬강도를 나타낸 것이며, 두 사례 모두 도시비율이 증가함에 따라 도시열섬강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 같

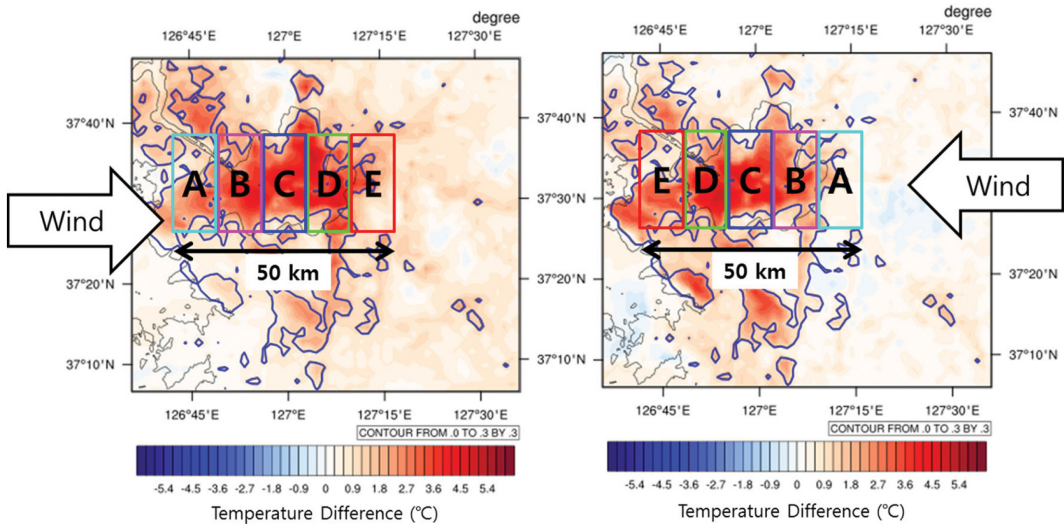


Fig. 7. Spatial distribution of the UHI Intensity for (a) a westerly wind case at 0200 LST on 7 Aug. 2016, and (b) an easterly wind case at 0200 LST on 5 Aug. 2016. The colored rectangles show the areas for which the corresponding box whiskers in Fig. 8 are plotted. The area A and E imply the upwind and downwind side of the city center, respectively.

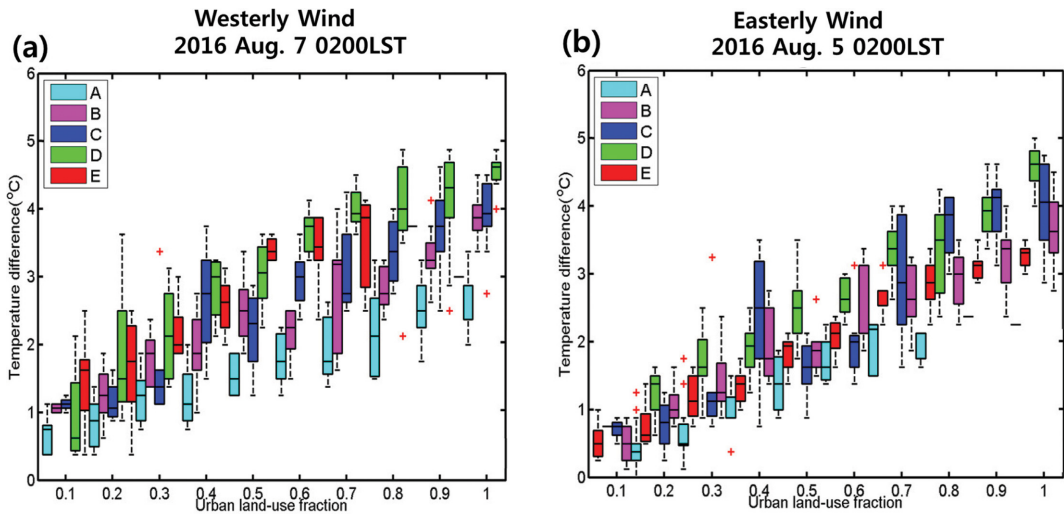


Fig. 8. Box-whisker plots showing the strength of the UHI intensity at 0200 LST on 7 Aug. 2016 and 0200 LST on 5 Aug. 2016 is dependent on the land-use fraction for all areas A-E as in Fig. 7. The color coding refers to the A-E area in Seoul. The ends of the whiskers indicate the minimum and maximum values of the UHI intensity. The bottom and the top of the boxes indicate the 25th and 75th percentiles and black lines within the box indicate the median of the UHI intensity.

은 도시비율이라도 도시비율이 높은 도시 중심의 풍상측(A구역)과 풍하측(E구역)에 따라 도시열섬강도가 상이한 것으로 볼 수 있다. 서풍사례인 Fig. 8a의 경우 같은 도시 비율일 때 풍상측인 A구역보다 풍하측에 해당하는 D, E구역에서 도시열섬강도가 더 강하게 나타났다. 그 차이는 도시비율이 0.7을 기준으로

중양값이 약 2°C 차이가 났다. 동풍사례인 Fig. 8b의 경우도 풍상측인 A구역보다 풍하측인 D구역의 도시열섬강도가 높게 나타났다. 그러나 E구역이 D구역보다 풍하측임에도 불구하고 D구역보다 도시열섬강도가 낮게 나타났다. 이는 동풍사례의 E구역이 해안도시인 인천을 포함하기 때문에 야간에 도시화로 인한

열섬강도가 낮게 모의되었다. 따라서 이류와는 별개로 해안도시의 경우 도시열섬강도가 낮다는 것을 알 수 있다.

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 도시 모수화 방안과 고해상도 토지 피복자료가 적용된 통합모델을 활용하여 도시열섬강도를 모의하고 도시열섬강도에 영향을 주는 요인인 도시의 비율과 이류에 따른 도시열섬강도의 시공간적 특성에 대해 분석하였다. 도시열섬강도가 강한 조건인 고기압하의 맑은날인 2016년 8월 2일 0300 LST부터 8월 8일 0300 LST를 사례기간을 선정하여 모델을 수행하였다. 도시화에 의한 도시열섬 강도 변화를 분석하기 위하여 도시의 유무에 따른 실험을 구성하였다. EGIS의 도시피복을 그대로 적용한 실험인 도시 실험과 도시를 C3 초지로 변경한 교외실험을 실시하였다. 도시열섬강도는 도시실험과 교외실험의 1.5 m 기온 모의 결과의 차이로 정의하였다. 도시실험 결과에 대해 서울 수도권 지역 85개 지점의 관측자료와 도시비율에 따라 5개의 카테고리를 분류하여 검증 실시하였다. 또한 서울 수도권 지역의 도시열섬강도에 대한 시공간적 특성에 영향을 미치는 요소인 이류와 도시비율에 대한 분석을 위해 풍향에 따른 도시열섬강도의 공간적 특성에 대해서 제시하였다.

도시 비율에 따라 5개의 카테고리에 따른 도시열섬강도의 일변화에서는 도시 비율이 0.2 상승할 때마다 최대 도시열섬강도가 약 0.5°C씩 상승하였다. 또한 최대열섬강도가 나타나는 시간은 도시 비율이 높을수록 늦어졌다. 도시열섬강도의 공간적인 특성은 도시비율이 높을수록 그 강도가 커지긴 하지만 이류에 영향으로 인해 도심의 중심과 중심의 풍하측 구역에서 도시열섬강도가 높게 나타났다. 도시비율과 이류에 대한 복합적인 분석을 위해 서울 수도권 지역을 5개의 구역으로 나누어서 서풍과 동풍 사례를 선정하여 풍향에 따른 도시열섬강도의 공간적인 분석을 실시하였다. 도시비율 같더라도 도시의 풍상측과 풍하측에 따라 도시열섬강도가 상이한 것으로 나타났다. 서풍사례의 경우 같은 도시 비율일 때 풍상측보다 풍하측 구역에서 도시열섬강도가 더 강하게 나타났고 그 차이는 최대 약 2°C 차이가 났다. 동풍사례에서도 서풍사례와 같이 풍상측보다는 도시의 중심에서 도시열섬의 강도가 높게 나타났으나, 풍하측에 해당하는 구역에서는 오히려 강도가 낮게 나타났다. 이는 풍하측이 해안도시인 인천을 포함하기 때문에 야간에 도시화로 인한 열섬강도가 낮게 모의되었기 때문이며 이류와는 별개로 해안도시의 경우 도시열섬강도가 낮다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 도시의 시공간적 특성에 도시비율과 이류의 영향이 뚜렷함을 보였다. 따라서 도시열섬강도 모의에서는 적절한 도시피복자료를 적용하는 것이 중요하며 풍향에 따라 도시열섬강도의 패턴이 다를 수 있다는 것을 시사한다. 그러나 본 연구에서는 짧은 기간의 사례를 통해 순간적인 풍향의 변화에 대해서만 분석을 하였으며, 추후 긴 기간에 대한 대기상태에 따른 도시열섬강도의 이류 영향 범위에 대한 상세 분석이 필요하다. 또한 도시비율과 이류 뿐만 아니라 인접해 있는 도시의 규모와 풍속이 도시열섬강도에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 수치모델의 결과를 활용하여 도시열섬강도에 영향을 미치는 요소에 대해 분석하였지만, 향후 관측 자료를 통해 도시비율과 이류에 대한 분석이 이루어질 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「생명·산업기상 기술개발」(1365003004)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arnfield, A. J., 2003: Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.*, **23**, 1-26
- Best, M. J., 2005: Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **114**, 91-109.
- _____, and Coauthors, 2011: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description - Part 1: Energy and water fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 677-699, doi:10.5194/gmd-4-677-2011.
- Bohnenstengel, S. I., S. Evans, P. A. Clark, and S. E. Belcher, 2011: Simulations of the London urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 1625-1640, doi: 10.1002/qj.855.
- Chen, F., and Coauthors, 2011: The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int. J. Climatol.*, **31**, 273-288, doi:10.1002/joc.2158.
- Chen, F., X. Yang, and W. Zhu, 2014: WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: The case study of Hangzhou City, China. *Atmos. Res.*, **138**, 364-377, doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.005.
- Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and

- regional modelling of the atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 1759-1782.
- Edwards, J. M., and A. Slingo, 1996: Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 689-719.
- Grimmond, C. S. B., and T. R. Oke, 1999: Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteorol.*, **38**, 922-940.
- Hong, J.-W., J. Hong, S.-E. Lee, and J. Lee, 2013: Spatial distribution of Urban Heat Island based on Local Climate Zone of Automatic Weather Station in Seoul metropolitan area. *Atmosphere*, **23**, 413-424 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.-O., J.-Y. Byon, H. Park, Y.-G. Lee, B.-J. Kim, and J.-C. Ha, 2018: Sensitivity analysis of near surface air temperature to land cover change and urban parameterization scheme using Unified Model. *Atmosphere*, **28**, 427-441 (in Korean with English abstract).
- Kanda, M., T. Kawai, M. Kanega, R. Moriwaki, K. Narita, and A. Hagishima, 2005: A simple energy balance model for regular building arrays. *Bound.-Layer Meteorol.*, **116**, 423-443.
- Kim, Y.-H., and J.-J. Baik, 2004: Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theor. Appl. Climatol.*, **79**, 151-164.
- 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.
- Lee, S.-H., and J.-J. Baik, 2010: Statistical and dynamical characteristics of the urban heat island intensity in Seoul. *Theor. Appl. Climatol.*, **100**, 227-237, doi:10.1007/s00704-009-0247-1.
- Lock, A. P., A. R. Brown, M. R. Bush, G. M. Martin, and R. N. B. Smith, 2000: A new boundary layer mixing scheme. Part I: Scheme description and single-column model tests. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3187-3199.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.
- Oke, T. R., 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **108**, 1-24.
- _____, G. Mills, A. Christen, and J. A. Voogt, 2017: *Urban Climates*. Cambridge University Press, 526 pp.
- 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. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 1038-1060.
- Park, J. J., C. Y. Ku, and B. S. Kim, 2007: Improvement of the level-2 land cover map with satellite image. *J. GIS Assoc. Kor.*, **15**, 67-80 (in Korean with English abstract).
- Porson, A., P. A. Clark, I. N. Harman, M. J. Best, and S. E. Belcher, 2010a: Implementation of a new urban energy budget scheme into MetUM. Part II: Validation against observations and model intercomparison. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 1530-1542, doi:10.1002/qj.572.
- _____, _____, _____, _____, and _____, 2010b: Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I: Description and idealized simulations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **136**, 1514-1529, doi:10.1002/qj.668.
- Sailor, D. J., 2001: A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *Int. J. Climatol.*, **31**, 189-199.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 125 pp.
- Tan, J., and Coauthors, 2010: The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *Int. J. Biometeorol.*, **54**, 75-84, doi:10.1007/s00484-009-0256-x.
- UNDESA, 2014: World Urbanization Prospects: The 2014 revision. Methodology Working Paper No. ESA/P/WP.238, United Nations Department of Economic and Social Affairs, 27 pp.
- Unnikrishnan, C. K., B. Gharai, S. Mohandas, A. Mangain, E. N. Rajagopal, G. R. Iyenger, and P. V. N. Rao, 2016: Recent changes on land use/land cover over Indian region and its impact on the weather prediction using Unified model. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 294-300, doi:10.1002/asl.658.
- Webster, S., A. R. Brown, D. R. Cameron, and C. P. Jones, 2003: Improvements to the representation of orography in the Met Office Unified Model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **129**, 1989-2010.
- Wilson, D. R., and S. P. Ballard, 1999: A microphysically based precipitation scheme for the UK Meteorological Office Unified Model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, 1607-1636.