

통합모형을 이용한 토지피복변화와 도시 모수화 방안에 따른 지상 기온 모의성능 민감도 분석

홍선옥^{1)*} · 변재영¹⁾ · 박향숙¹⁾ · 이영곤¹⁾ · 김백조²⁾ · 하종철¹⁾

¹⁾국립기상과학원 응용기상연구과, ²⁾국립기상과학원 관측예보연구과

(접수일: 2018년 10월 22일, 수정일: 2018년 12월 21일, 게재확정일: 2018년 12월 22일)

Sensitivity Analysis of Near Surface Air Temperature to Land Cover Change and Urban Parameterization Scheme Using Unified Model

Seon-Ok Hong^{1)*}, Jae-Young Byon¹⁾, HyangSuk Park¹⁾, Young-Gon Lee¹⁾,
Baek-Jo Kim²⁾, and Jong-Chul Ha¹⁾

¹⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Observation and Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 22 October 2018; revised 21 December 2018; accepted 22 December 2018)

Abstract This study examines the impact of the urban parameterization scheme and the land cover change on simulated near surface temperature using Unified Model (UM) over the Seoul metropolitan area. We perform four simulations by varying the land cover and the urban parameterization scheme, and then compare the model results with 46 AWS observation data from 2 to 9 August 2016. Four simulations were performed with different combination of two urban parameterization schemes and two land cover data. Two schemes are Best scheme and MORUSES (Met Office Reading Urban Surface Exchange Scheme) and two land cover data are IGBP (International Geosphere and Biosphere Programme) and EGIS (Environmental Geographic information service) land cover data. When land use data change from IGBP to EGIS, urban ratio over the study area increased by 15.9%. The results of the study showed that the higher change in urban fraction between IGBP and EGIS, the higher the improvement in temperature performance, and the higher the urban fraction, the higher the effect of improving temperature performance of the urban parameterization scheme. 1.5-m temperature increased rapidly during the early morning due to increase of sensible heat flux in EXP2 compared to CTL. The MORUSES with EGIS (EXP3) provided best agreement with observations and represents a reasonable option for simulating the near surface temperature of urban area.

Key words: Unified Model, urban parameterization, land-cover change, surface energy balance

1. 서 론

최근 세계 인구의 50% 이상이 도시에 거주하고 그 비율은 지속적으로 증가하여 2030년에는 도시인구가

전세계 인구의 60%를 넘길 것으로 전망하고 있다 (United Nations, 2014). 특히 도시 폭염이나 도시 홍수 등 도시지역에서 발생하는 기상재해는 그 피해가 크며 따라서 도시지역에 대한 정확한 예측이 필요하다.

수치모델의 도시지역 정확도를 향상시키기 위해서는 도시지역 기상현상의 정확한 파악이 필요하며 도시 특성을 보다 현실적으로 반영해야 한다. 특히 수치모델의 지면경계조건으로 사용되는 토지피복자료를 정확하게 적용하는 것은 수치모델의 모의성능에 큰

*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

영향을 미친다(Kang and Suh, 2011; Chen et al., 2014; Park et al., 2015). 수치모델에서 알베도, 방출율, 거칠기 길이, 열관성 등의 지표면 특성인자는 토지피복에 의해 결정된다. 토지피복자료는 지면과 지표면 근처의 대기 사이의 에너지 및 물 평형 등과 관련이 있으며 모델의 모의능력에 영향을 준다. 도시지역의 경우 교외지역과 다른 지표특성을 갖기 때문에 실제에 가까운 토지피복자료를 사용하는 것은 도시지역의 수치 모의능력을 크게 향상시킨다. Chen et al. (2014)은 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델 (Skamarock et al., 2008)을 사용하여 야간 위성영상자료로 생성한 현실적인 도시피복이 지표면 근처 기온 모의 성능을 개선한다는 것을 중국 항저우지역의 폭염사례를 통해 보였다. Kang and Suh (2011)는 동아시아 지역을 대상으로 지면모델 Met Office Surface Exchange Scheme II (MOSES II)의 토지피복자료를 개선하였다. 그 결과 지면과 대기 사이의 에너지 균형, 바람, 지표면 온도 및 기온의 모의수준을 향상시켰다. Park et al. (2015)은 수도권지역을 대상으로 최신 고해상도 토지피복자료를 적용하는 것이 WRF 모형의 지상 바람과 기온의 모의 성능을 향상시킴을 확인하였다. Grossman-Clarke et al. (2010)은 미국 피닉스 지역을 대상으로 WRF/UCM (Urban Canopy Model) 모형을 통해 적절한 토지피복자료가 지표 부근 온도에 영향을 준다고 하였다.

기상청은 국지규모의 기상을 예보하기 위해 국지에 보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)을 현업 운영 중이다. 국지에보모델의 지면경계조건으로 적용된 토지피복자료 IGBP (International Geosphere and Biosphere Programme)는 전지구 영역에 대해 1 km 해상도이며 National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR)의 1992년부터 1993년까지 관측자료로 구축되었다. IGBP는 한반도의 대부분을 사바나(savanna)로 분류하고 수십 년 사이에 급격히 변화된 토지피복을 제대로 반영하지 못하는 문제점을 드러내고 있다(Kang et al., 2007). 따라서 도시화 등으로 인한 토지피복 변화를 반영할 수 있도록 최신의 고해상도 토지피복자료를 적용하는 것이 필요하다.

중규모 모델에서 도시지역의 형태 및 지표면의 다양성을 반영하기 위해 여러 도시 모수화 방안이 개발되고 수치모델에 적용되어 왔다(Oleson et al., 2008; Chen et al., 2011). 도시 모수화 방안은 도시를 하나의 판으로 고려하는 Slab 모형(Best, 2005; Best et al., 2011), 도시 캐노피를 고려한 2차원 형태의 모형(Grimmond and Oke, 1999; Kanda et al., 2005, Porson et al., 2010a, 2010b), 도시 캐노피 내 연직 층에 따라

single-layer (Masson, 2000; Kusaka et al., 2001)와 multi-layer 모형 등이 있다. 도시 모수화 방안 중 도시 내의 식생과 도시 형태를 고려하여 알베도를 모수하는 방안은 이를 적용하지 않은 경우와 비교할 때 모의 성능이 높다고 평가된다(Best and Grimmond, 2015). 적절한 도시 모수화 방안을 선택하는 것은 도시지역의 기온과 풍속, 강수의 모의성능에 영향을 미친다(Byon et al., 2010; Lee and Min, 2016). Byon et al. (2010)은 WRF-UCM을 사용하는 것이 풍속의 모의 정확도를 향상시키는 것을 보였다. Li and Bou-Zeid (2014)는 WRF를 사용하여 열적 거칠기 길이에 대한 매개화가 추가된 PUCM (Princeton UCM)를 적용하는 것이 주간 위성관측과 비교하여 표면온도의 바이어스를 1.5°C 감소시킨다고 하였다.

통합모델의 도시 모수화 방안으로는 도시형태를 단순한 판으로 가정하는 Best scheme과 도시의 건물 형태를 고려한 Met Office-Reading Urban Surface Exchange Scheme (MORUSES)이 있다. Porson et al. (2010b)은 멕시코시티에서 관측한 자료로 MORUSES의 에너지 수지를 검증한 결과 모의 정확도가 Best scheme에 비해 향상되었음을 보였다. 그러나 기상청이 현업 운영 중인 LDAPS의 도시 모수화 방안은 Best scheme이며, 우리나라 관측 자료를 활용한 MORUSES 검증과 활용 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 수도권 지역에서 최신의 토지 피복자료와 MORUSES 도시 모수화 방안이 사용되었을 때 통합 모델의 기온 모의 성능을 평가하고 토지피복자료와 도시 모수화 방안에 따른 통합모델의 민감도를 기온 일변화와 지표 에너지 수지에 대해 분석하여 하는 것이다.

2. 자료 및 실험방법

2.1 자료

2.1.1 토지피복자료

통합모델과 결합된 Joint U.K. Land Environment Simulator (JULES) 지면모델은 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. 여기서 C3 초지는 온대지역 식물로 지구상의 95% 정도가 여기에 속한다. C4 초지는 열대 혹은 아열대성 식물을 의미한다. 작물 중 옥수수, 사탕수수 등이 C4 초지로 버나 밀 등은 C3 초지로 분류된다. 관목(shrubs)은 2 m 미만의 낮은 수목을

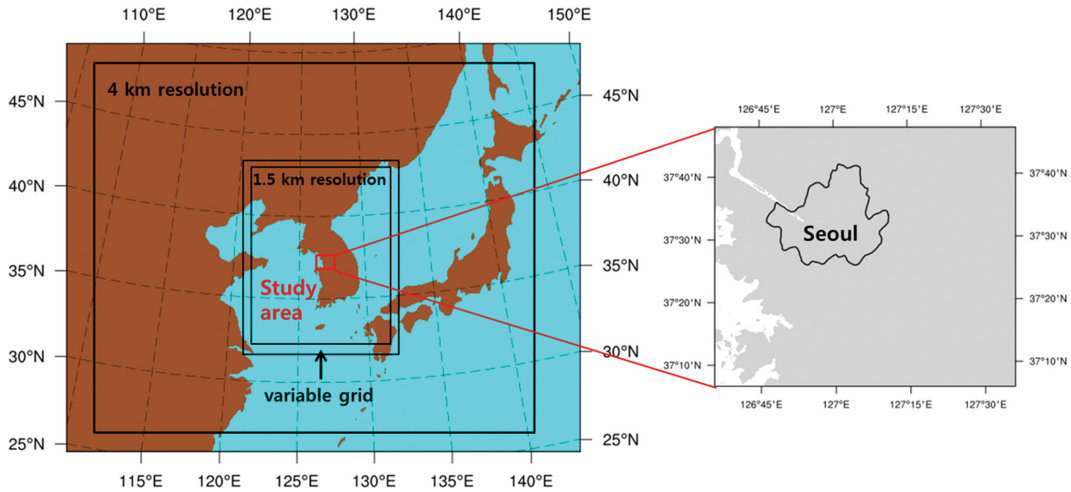


Fig. 1. Domain for Unified Model simulation and study area.

말한다.

본 연구에서는 한반도의 현실적인 토지피복변화를 JULES 지면모델에 반영하기 위해 우리나라 환경부 환경공간정보시스템에서 제공하는 2007년 중분류 토지피복자료인 EGIS (Environmental Geographic information service)를 이용하였다. EGIS는 남한영역에 대해 SPOT5 위성자료로 제작된 5m의 고해상도 자료로 주거지역에서 해양수 까지 총 22개 지면유형으로 이루어져있다(Park et al., 2007). EGIS를 통합모델의 지면경계조건으로 입력하기 위해 Unnikrishnan et al. (2016)을 참고하여 통합모델의 9가지 토지피복 유형으로 재분류하였다.

2.1.2 관측자료

모델검증에 사용된 AWS 관측지점은 연구영역에 내에 위치하고 사례기간 동안 기온의 결측이 없고 산간에 위치한 지점을 제외하기 위해 관측지점의 해발고도가 100 m 이하인 46개 지점의 AWS 1.5-m 기온 관측자료를 검증에 활용하였다. 관측지점의 위치는 Fig. 4b에 나타내었다. 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 수치모델설계

본 연구에서는 서울을 포함한 수도권 지역을 대상으로 지상 기온에 미치는 중요한 요소인 (1) 토지피복자료, (2) 도시 모수화 방안에 대해서 에너지 수지와 기상인자의 민감도 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 수치모델은 통합모델 버전 10.1이고, 모델영역

은 Fig. 1에 나타내었다. 수평과 연직 격자체계는 각각 Arakawa C-grid와 Charney-Philips 체계를 terrain-following hybrid-height 좌표계를 사용한다(Davies et al., 2005). 수평해상도는 가변격자체계를 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. 실험은 통합모델에서 기본적으로 사용중인 Best scheme과 IGBP의 토지피복자료를 기준실험인 CTL로 하고, 지면정보를 EGIS 자료로 변경하여 적용한 실험(EXP1), 도시 모수화 방안을 MORUSES으로 적용한 실험(EXP2), 마지막으로 도시 모수화 방안과 지면정보를 MORUSES와 EGIS 자료로 바꾸어 적용한 실험(EXP3)의 총 4가지로 구성하였다(Table 1). EGIS 자료를 적용한 실험의 경우 남한영역에만 자료가 존재하는 EGIS의 특성상 남한영역 이외 영역은 기존의 IGBP 토지피복자료를 적용하였다.

Table 1. Summary of numerical experiments.

Experiment	CTL	EXP1	EXP2	EXP3
Model	UM 10.1			
Resolution (Horizontal Grid EW x NS)	1.5 km (1188 × 1148)			
Urban Parameterization Scheme	Best	Best	MORUSES	MORUSES
Land-use/Land-cover data	IGBP	EGIS	IGBP	EGIS
Integration Period	2016. Aug. 2. 0300 LST~9. 0300 LST			
Initial and Boundary data	KMA GDAPS			

사례기간은 통합모형에서 도시피복변화와 도시 모수화 방안이 지상 기온에 미치는 효과를 보기 위해 강수가 없고 운량과 풍속이 낮은 기간을 선정하였다. 사례기간은 고기압 영향하의 비강수기간인 2016년 8월 2일부터 9일이다. 이 기간의 평균풍속은 약 1.4 m s⁻¹, 운량은 3.4이며 폭염주의보와 폭염특보가 발효되었다. 수치모의는 2016년 8월 2일 0300 LST부터 8월 9일 0300 LST까지로 7일간 수행되었다. 민감도 실험과 관측검증을 실시한 연구 영역은 서울과 수도권 지역을 포함하는 126.6~127.6°E, 37.1~37.8°N 영역이다.

2.3 도시 모수화 방안

통합모형의 도시 모수화 방안은 Best Scheme과 MORUSES가 있으며 통합모형에서는 기본적으로 도시를 간단한 형태인 판으로 간주하는 Best Scheme이 사용된다. 반면 MORUSES는 도시의 건물 형태를 2차원으로 건물의 높이(H)와 도로의 폭(W), 건물과 도로 폭의 합(R)을 고려한 도시 모수화 방안이다. 도시 형태변수인 건물높이(H), 건물 외관비(H/W), 건물이 반복되는 비(W/R)를 통해 지표특성변수인 방출률, 알베도, 열용량, 거칠기 길이를 계산한다. MORUSES에 관한 자세한 설명은 Porson et al. (2010a)에 기술되어 있다. 도시형태변수는 모델의 각 격자의 도시비율(f_u , urban land-use fraction)을 통해 도시형태변수들을 산출하는 Bohnenstengel et al. (2011)의 경험식과 Grimmond and Souch (1994)의 식을 사용하였고 그 식은 다음과 같다.

$$\lambda_p = 22.88f_u^6 - 59.47f_u^5 + 57.75f_u^4 - 25.11f_u^3 + 4.33f_u^2 + 0.19f_u \quad (1)$$

$$\lambda_f = 16.41f_u^6 - 41.86f_u^5 + 40.39f_u^4 - 17.76f_u^3 + 3.24f_u^2 + 0.06f_u \quad (2)$$

$$H = 167.41f_u^5 - 337.85f_u^4 + 247.81f_u^3 - 76.37f_u^2 + 11.48f_u + 4.48 \quad (3)$$

$$\frac{H}{\bar{W}} = \frac{\pi\lambda_f}{2(1-\lambda_p)} \quad (4)$$

$$\frac{W}{R} = 1 - \lambda_p \quad (5)$$

식 (1)-(3)은 평면적지수(λ_p)와 앞면적지수(λ_f), 건물 높이(H)는 각 격자 내 도시지표의 비율을 통해 계산할 수 있다. 이 경험식은 런던지역의 건물 자료를 바탕으로 생성되어 서울지역의 건물 구조 형태의 특성을 구현하지 못하는 한계가 존재한다. 서울지역의 건물형태정보를 생성하는 과정이 복잡하고 실제 도시 건물 자료를 바탕으로 생성한 경험식은 현재 Bohnenstengel et al. (2011)의 경험식이 유일하여 본 연구에서는 이 경험식을 사용하였다.

3. 결 과

3.1 토지피복변화

토지피복자료에 따른 지상기온 변화에 대한 민감도 분석을 위해 IGBP와 EGIS의 9가지 토지피복유형의 차이를 제시하였다. Figures 2, 3와 Table 2는 IGBP와 EGIS의 9가지 토지피복유형의 공간분포와 그 비율을 나타낸 것이다. 열대성 식물을 나타내는 C4 초지는 기존 IGBP 자료가 24.0%로 분류한 것에 비해 EGIS 자료를 적용한 경우 4.5%로 낮게 나타났으며, 이는 Kang et al. (2007)가 IGBP의 문제점으로 제시한 우리나라의 높은 사바나의 비율이 EGIS에서 개선된 것으로 보인다. 도시는 IGBP에서 6.1%로 나타났지만 EGIS에서는 21.9%로 15.9% 증가하였다. 활엽수와 침엽수의 비율은 각각 9.4%, 5.8% 증가하였다(Table 2). 서울시의 동쪽지역은 C4 초지가 활엽수와 침엽수로 변경되었으며, 서울시의 서쪽과 남쪽의 영역에서는 C3 초지가 도시로 바뀌어 도시의 영역이 확장되었다(Fig. 3d). Figure 4a는 검증에 사용된 46개 관측지점에 대해 IGBP와 EGIS의 도시비율을 산점도로 나타낸 것이다. IGBP에서 EGIS로 변경하였을 때 대부분의 관측지점에서 도시비율이 증가하였다. 그러나 18(용산),

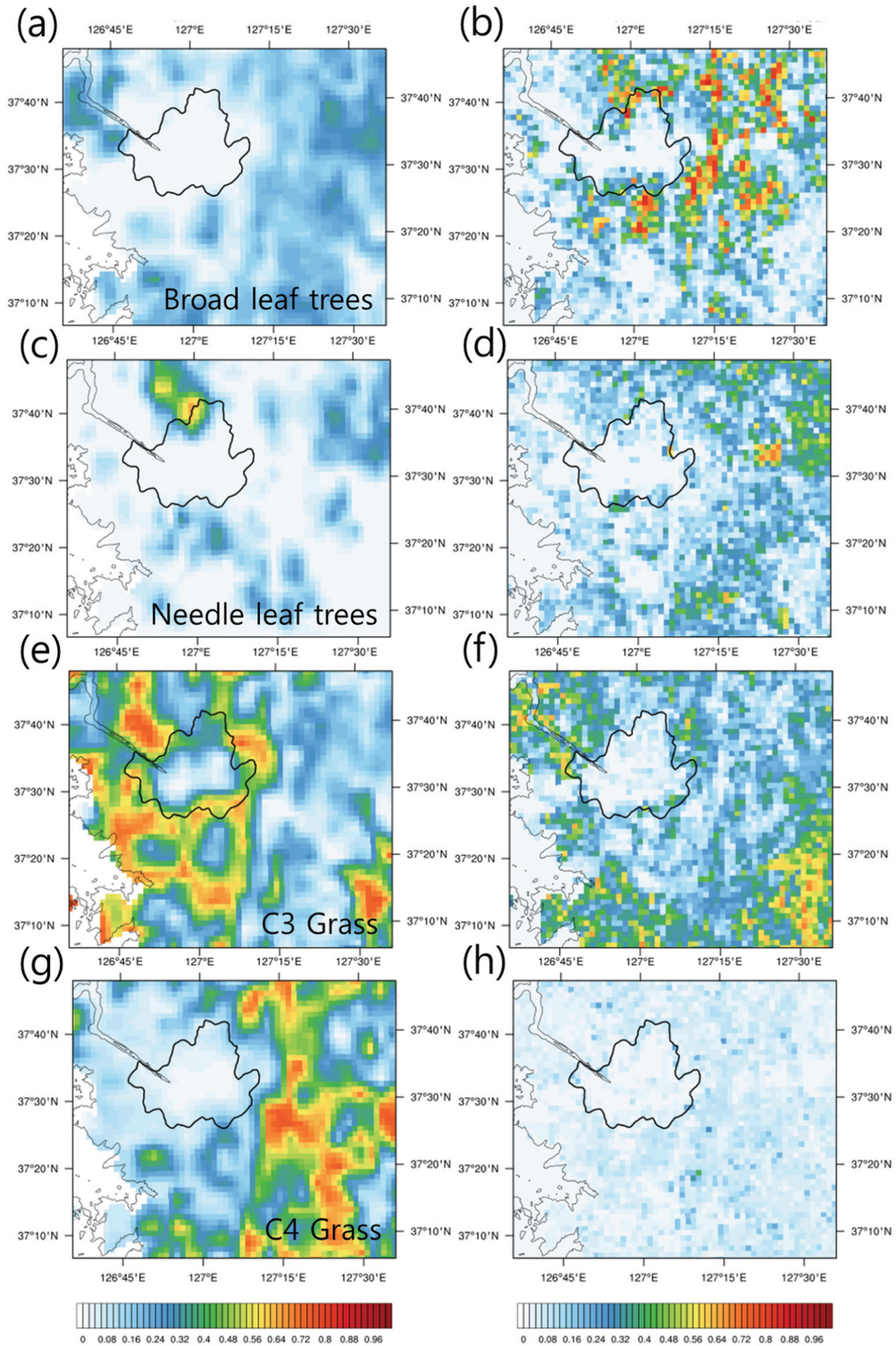


Fig. 2. Surface type fractions of (a, b) broad leaf trees, (c, d) needle leaf trees, (e, f) C3 grass, and (g, h) C4 grass. Left and right panels are derived from the IGBP and EGIS data, respectively (126.6~127.6°E, 37.1~37.8°N).

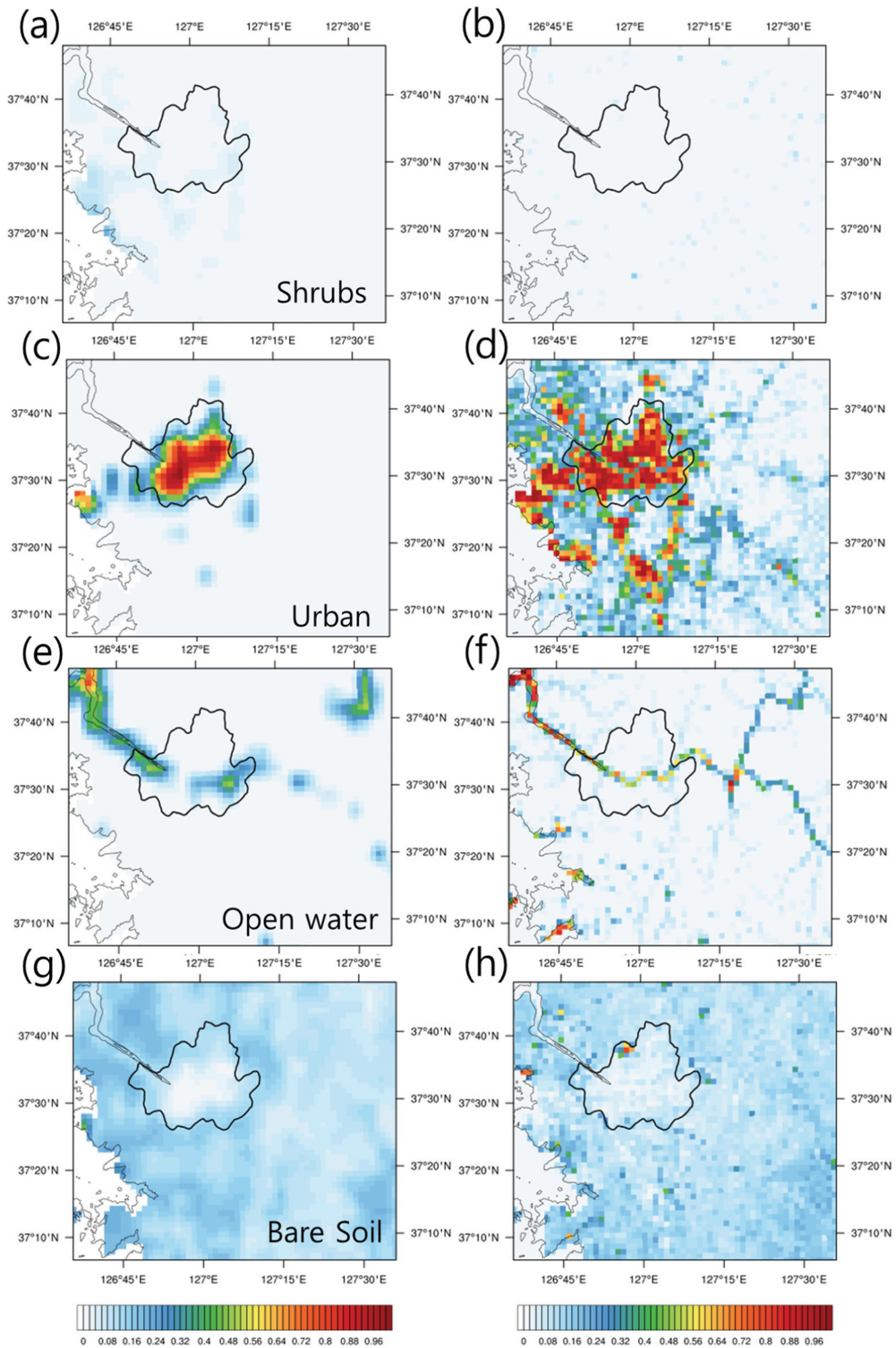


Fig. 3. Surface type fractions of (a, b) shrubs, (c, d) urban, (c, f) inland water, and (g, h) bare soil. Left and right panels are derived from the IGBP and EGIS data, respectively (126.6~127.6°E, 37.1~37.8°N).

Table 2. Area average fraction of surface types over Seoul metropolitan for IGBP and EGIS data and differences between IGBP and EGIS (i.e., EGIS minus IGBP).

Surface type	IGBP (%)	EGIS (%)	EGIS-IGBP (%)
1 Broad leaf trees	10.2	19.6	9.4
2 Needle leaf trees	6.8	12.6	5.8
3 C3 grass	30.5	19.2	-11.4
4 C4 grass	24.0	4.5	-19.6
5 Shrubs	0.8	0.4	-0.4
6 Urban	6.1	21.9	15.9
7 Inland water	3.2	3.9	0.7
8 Bare soil	10.7	9.5	-1.2
9 Land ice	0	0	0

21(한강), 22(성동), 46(현충원) 지점의 경우 도시 비율이 감소하였다. 이는 고해상도의 토지피복자료를 사용으로 인해 한강이 뚜렷하게 적용되어서 한강 주변의 지점에서 내륙수가 증가하고 도시가 감소했기 때문이다(Fig. 4b).

3.2 관측 검증

민감도 실험에 앞서 CTL 실험 결과와 AWS 관측 자료를 통해 기온 검증을 실시하였다. Figure 5는 전체 모의기간에 대해 46개 AWS 지점들의 기온 관측 값과 각 실험의 1.5-m 기온에 대한 평균과 RMSE의 일변화를 나타낸 것이다. CTL의 경우 전체적인 일변화 경향을 잘 만족하고 있으나, 일출(0600 LST)부터

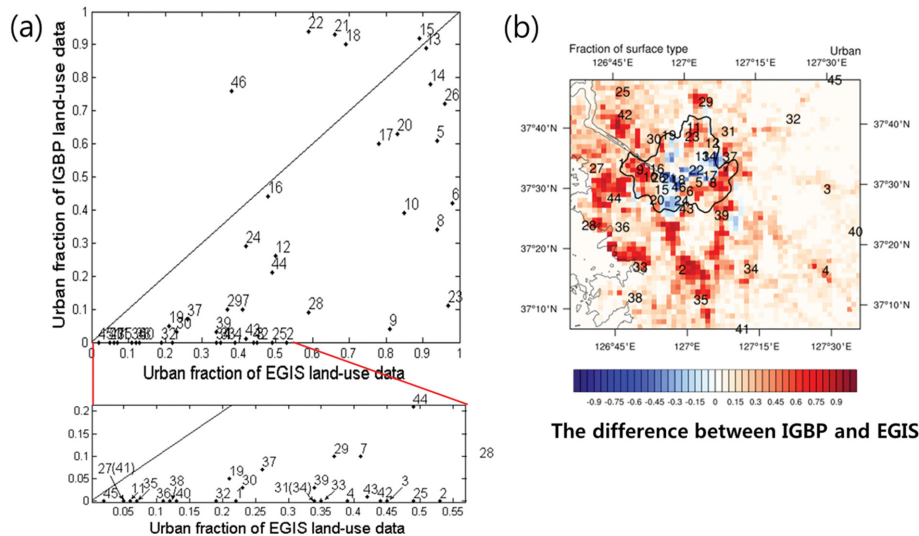


Fig. 4. (a) Scatter plot of IGBP versus EGIS urban land-use fractions and (b) Spatial distribution of the difference between IGBP and EGIS urban land-use fractions with AWS station numbers.

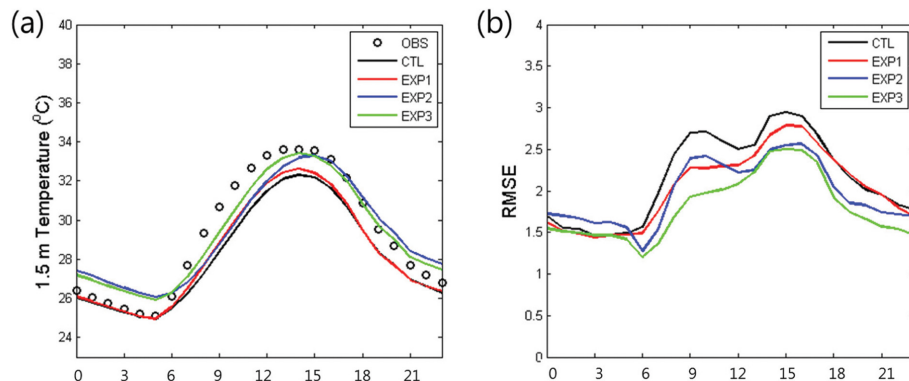


Fig. 5. Diurnal variation of (a) mean and (b) RMSE of the 1.5-m temperature for CTL, EXP1, EXP2, and EXP3 simulation for the entire period.

일몰(2000 LST)까지 과소모의하는 경향이 나타났다. 기온 RMSE는 0300 LST에서 1.5°C, 1500 LST에서 3°C 정도로 야간보다 주간에 오차가 큰 것을 볼 수 있다. EXP1의 경우 IGBP에서 EGIS로 변경 후 1500 LST에서 0600 LST까지 기온이 모두 약 1°C 상승하여 주간에는 관측값과 잘 일치하지만, 0000 LST부터 0500 LST 동안은 EGIS를 적용한 실험이 기온을 과대 모의하는 경향이 보였다. MORUSES를 적용한 EXP2이 Best scheme을 적용한 CTL실험에 비해 오전시간의 기온상승이 빠르게 나타났다. 그 결과 EXP2가 CTL에 비해 0600 LST부터 1700 LST까지 기온의 모의 성능이 개선된 것을 확인할 수 있었다. EXP3의 경우 CTL에 비해 약 1°C 상승하여 관측값과 더욱 일치한다. 새벽시간(0000 LST-0500 LST)의 경우 EXP3가 CTL에 비해 기온을 과대 모의하는 경향이 있으나, 0600 LST부터 2300 LST까지 RMSE가 크게 감소하여 EXP3의 전체적인 RMSE가 크게 감소하였다.

전 지점의 평균 RMSE를 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Model evaluation statistics for 1.5 m temperature (°C) during 2-9 August 2016.

Experiment	MBE	RMSE
CTL	-1.11	2.27
EXP1	-0.01	2.05
EXP2	-0.94	2.12
EXP3	0.00	1.88

CTL의 경우 2.27°C, MBE는 -1.11°C로 나타났고, EXP1의 RMSE가 2.05°C로 EGIS 적용한 실험의 모의 성능이 IGBP를 적용한 실험인 CTL보다 높았다. MORUSES를 적용한 EXP2의 RMSE는 2.12°C로 나타나 CTL보다 EXP2 실험의 기온 모의성능이 상대적으로 높았다. 토지피복변화와 도시 모수화 방안에 대한 4가지 실험 중 MORUSES와 EGIS를 동시에 적용한 EXP3의 RMSE가 1.88°C로 관측과 가장 일치하였다.

토지피복변화와 도시 모수화 방안에 따른 지점별

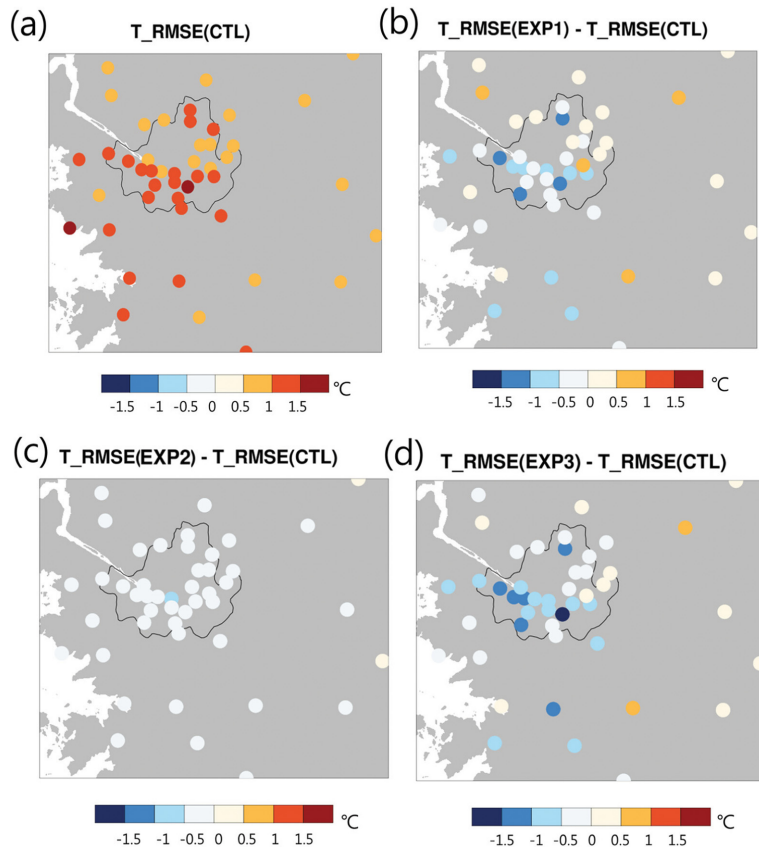


Fig. 6. Spatial distribution of (a) 1.5-m temperature RMSE for CTL, the difference of 1.5-m temperature RMSE between CTL and (b) EXP1, (c) EXP2, and (d) EXP3.

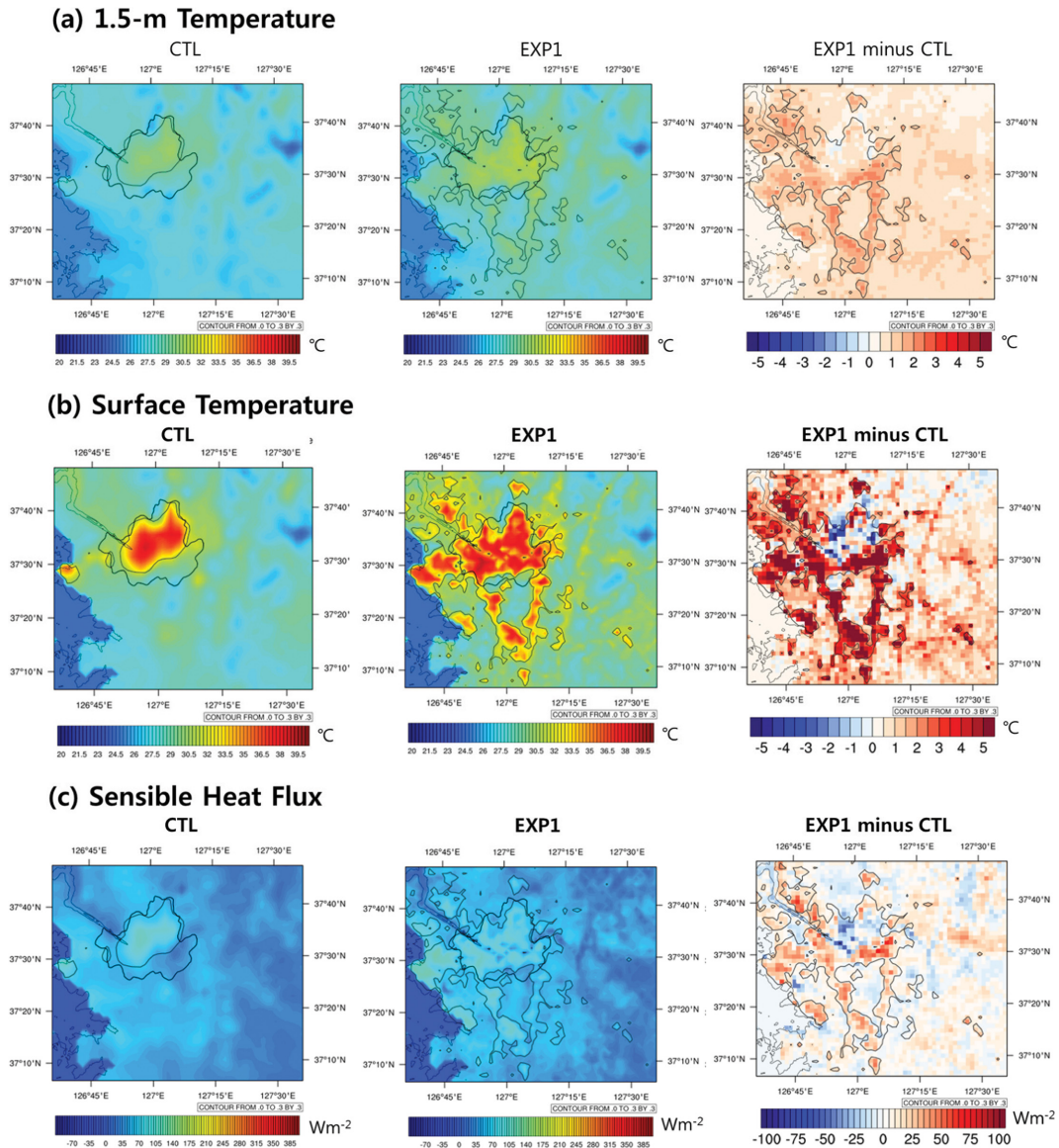


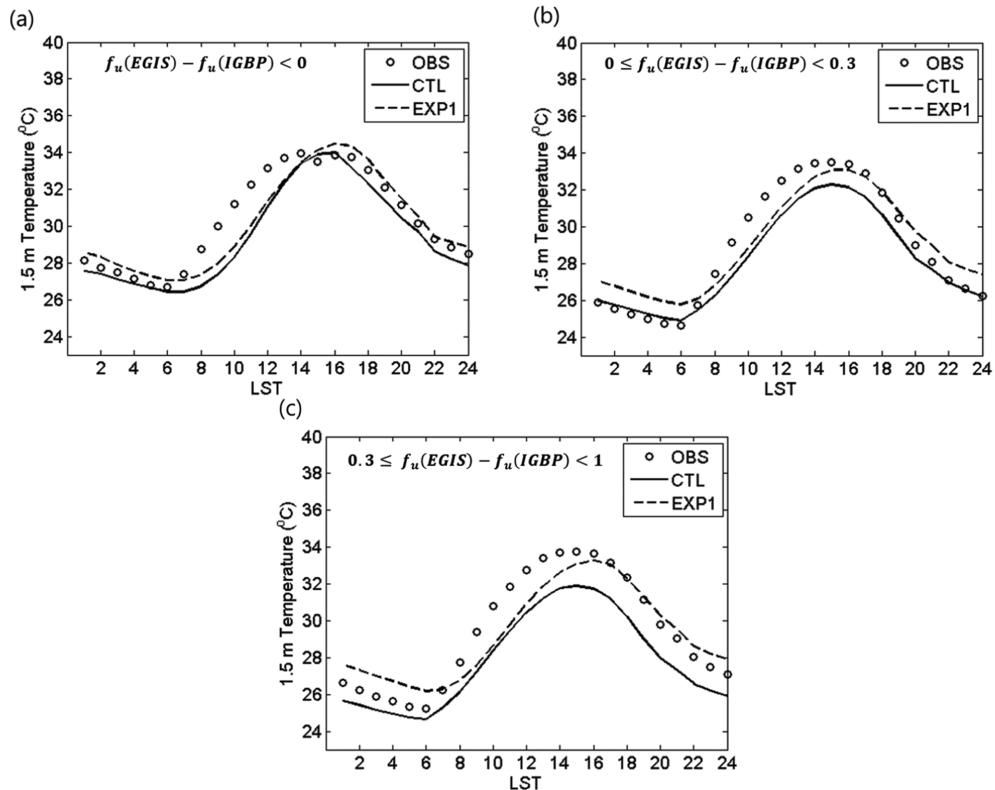
Fig. 7. Spatial distribution of (a) 1.5-m temperature, (b) surface temperature, and (c) sensible heat flux for CTL (left), EXP1 (middle), and EXP1 minus CTL (right), respectively. The spatial distribution is averaged for the entire period of simulation. The thin black contour in CTL, EXP1, and EXP1 minus CTL means over 30% of urban fraction using EGIS data. The thick contour in CTL, and EXP1 means the administrative boundary of Seoul.

RMSE를 살펴보기 위해 지점별 RMSE의 공간분포를 Fig. 6에 제시하였다. CTL의 경우 서울남부 지역의 오차가 크게 나타나며, 서울시의 동쪽에 위치한 교외지역은 낮은 오차를 보인다. EGIS 토지피복을 적용한 EXP1과 CTL 사이의 기온 RMSE 차이를 나타낸 Fig. 6b에서는 서울 중심지역에 대해 기온의 RMSE가 0.5°C 이상 크게 개선된 것을 볼 수 있으나, 서울의 동쪽에

위치한 교외지역은 모의성능이 떨어진 것을 볼 수 있다. MORUSES 도시 모수화 방안을 적용한 EXP2과 CTL의 기온 RMSE 차를 나타낸 Fig. 6c에서는 대부분의 지점에서 0°C 이하 -0.5°C 이상으로 EXP2의 기온 RMSE가 개선되었다. 토지피복변화와 도시 모수화 방안을 모두 적용한 EXP3의 경우 서울시의 동쪽에 위치한 교외지점을 제외하고 서울을 포함한 수도권지

Table 4. RMSE of 1.5 m temperature ($^{\circ}\text{C}$) for CTL and EXP1 with different urban fraction change category between IGBP and EGIS.

Category	Description	The number of stations	CTL	EXP1	EXP1-CTL
A	$f_u(\text{EGIS}) - f_u(\text{IGBP}) < 0$	5	0.69	0.55	-0.13
B	$0 \leq f_u(\text{EGIS}) - f_u(\text{IGBP}) < 0.3$	23	1.48	1.41	-0.07
C	$0.3 \leq f_u(\text{EGIS}) - f_u(\text{IGBP}) < 1$	18	1.57	1.38	-0.19

**Fig. 8.** Mean diurnal variation of simulated 1.5-m temperature ($^{\circ}\text{C}$) over observation site of (a) Category A ($f_u(\text{EGIS}) - f_u(\text{IGBP}) < 0$), (b) Category B ($0 \leq f_u(\text{EGIS}) - f_u(\text{IGBP}) < 0.3$), and (c) Category C ($0.3 \leq f_u(\text{EGIS}) - f_u(\text{IGBP}) < 1$) with observation for the entire period of simulation. ' f_u ' describes the fraction of urban land-use of IGBP and EGIS cover within the model grid box for each station.

역에서 기온의 RMSE가 개선된 것을 볼 수 있다.

3.3 토지피복변화 민감도 분석

토지피복변화에 의한 기온의 변화를 살펴보기 위해 토지피복자료를 EGIS로 변경한 EXP1 실험과 CTL 실험의 기온 결과를 비교하였다. Figure 7은 전체 모의 기간동안의 1.5-m 기온과 지면온도, 현열속의 평균을 공간분포로 나타낸 것이다. Figure 7a는 CTL과 EXP1의 1.5-m 기온과 두 실험간의 1.5-m 기온차이며, 토지피복자료가 IGBP에서 EGIS로 변경하였을 때 1.5-m 기온 모의 결과가 도시비율이 증가한 구역에 대해

최대 2°C 까지 증가하였다. Figure 7b는 CTL과 EXP1의 지면온도와 두 실험 간의 지면온도 차이이다. CTL에 비해 EXP1의 지면온도가 최대 5°C 까지 증가하였고, 한강과 서울북부지역의 경우는 약 4°C 정도 감소하였다. 그 이유는 토지피복의 해상도가 높아지면서 한강과 도시에 인접한 숲, 초지 등이 더 상세하게 구분되어 상대적으로 도시비율이 감소하였기 때문이다 (Fig. 4b). 현열속의 공간분포를 나타낸 Fig. 7c에서도 도시비율이 증가한 곳은 현열속이 높아지고, 도시비율이 감소한 구역은 현열속이 낮아진 것을 알 수 있다. 한강과 서울 북부지역의 경우 지면온도가 낮아졌

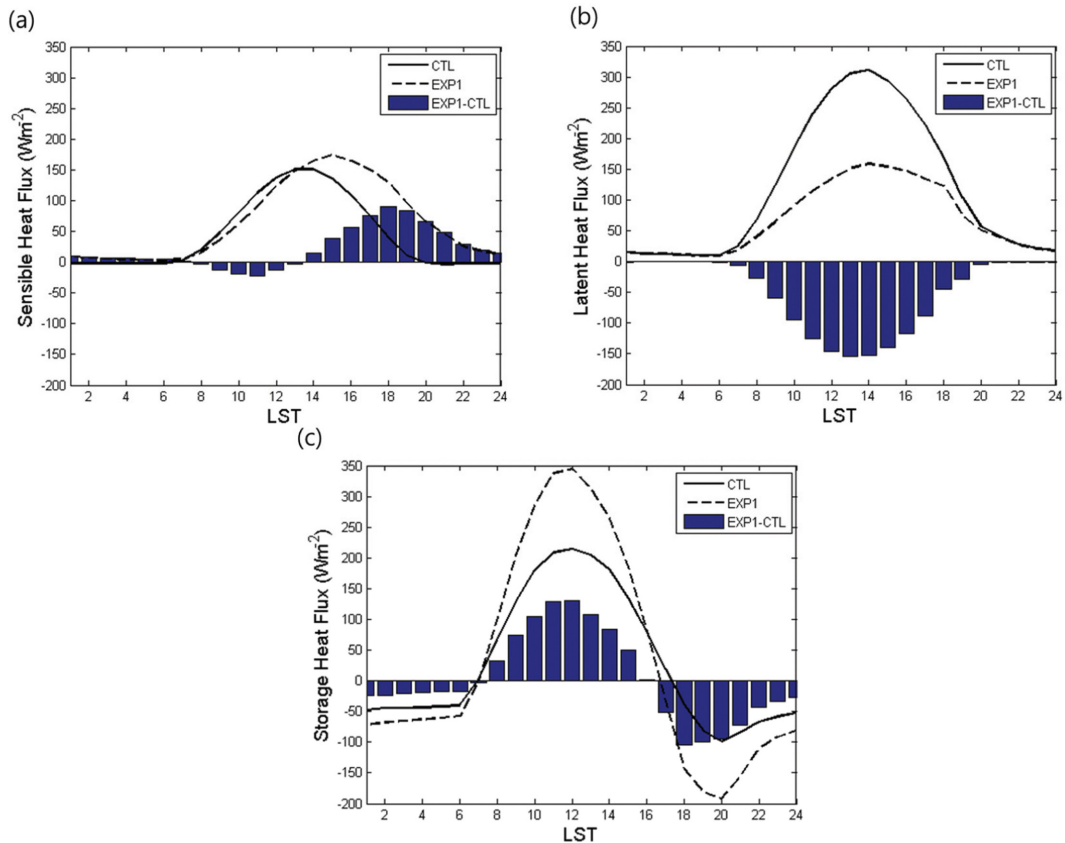


Fig. 9. Diurnal variation of (a) sensible heat flux, (b) latent heat flux, and (c) storage heat flux for CTL (solid line) and EXP1 (dashed line) for the entire period on the observation site of Category C ($0.3 \leq f_u(EGIS) - f_u(IGBP) < 1$).

으나, 현열속 또한 낮아져 지면에서 대기로의 열전달이 적기 때문에 1.5-m 기온은 두 실험간의 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 7a).

토지피복변화에 따른 기온의 개선 원인을 분석하기 위해 IGBP와 EGIS 사이의 도시피복 비율의 변화에 따라 Table 4와 같이 3가지 카테고리리로 분류하여 CTL과 EXP1 실험의 기온 RMSE를 나타내었다. 카테고리 A는 IGBP에서 EGIS로 변화하였을 때 도시 비율이 낮아진 지점, 카테고리 B는 도시비율이 0 이상 0.3 이하로 증가한 지점 그리고 카테고리 C는 도시비율이 0.3 이상 상승한 지점을 나타낸다. 카테고리 C의 경우 CTL의 1.57°C에서 EXP1의 1.38°C로 기온의 RMSE가 0.19°C 감소하였으며, 그 감소폭이 3가지 카테고리 중 가장 크게 나타났다. Figure 8은 각 카테고리에 대한 평균 기온 일변화를 나타낸 것이다. 카테고리 A의 경우 EXP1의 도시비율이 CTL보다 줄어든 경우이나 기온이 오히려 EXP1이 상승한 것을 볼 수 있다. 이는 모델의 각 격자의 도시비율 만이 기온에 영향을 미치는 것이 아니라 주변 격자의 영향을 받는

것을 판단된다. 카테고리 B의 경우 기온이 최대 약 0.6°C 증가하였고, 카테고리 C의 경우 최대 1.5°C 증가하였으며, 이는 도시비율의 변화가 클 수록 기온 상승이 크다는 것을 나타낸다. 카테고리 B에서 CTL의 경우 최고기온을 과소 모의 하는 경향이 EXP1에서는 완화 되었으며, 야간 기온은 EXP1이 CTL보다 과대 모의 하는 경향을 보인다. 카테고리 C에서는 EXP1이 CTL의 주간 과소모의를 해결하여 관측치와 잘 맞는 모습을 보인다.

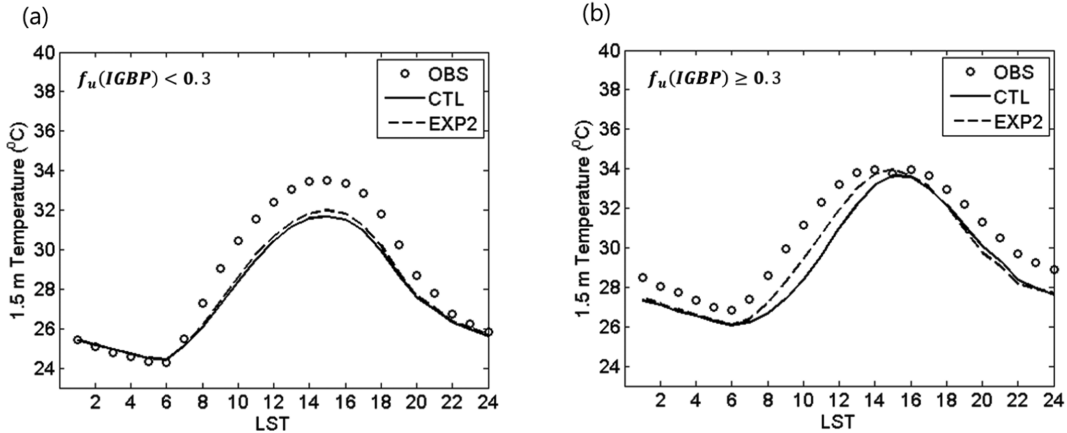
토지피복변화가 1.5-m 기온에 미치는 영향을 상세히 설명하기 위해 CTL과 EXP1의 실험결과에서 카테고리 C에 해당하는 도시의 비율이 0.3 이상 증가한 18개의 관측지점의 에너지 수지의 일변화를 제시하였다(Fig. 9). 이는 전체 모의 기간에 대해 평균한 일변화 값이며, 에너지 수지 방정식은 다음과 같다.

$$R_N = H + H_L + H_G + \Delta H_S \quad (5)$$

여기서 R_N 은 순복사속이고, H 와 H_L 은 현열속과 잠열속을 나타낸다. H_G 는 토양열속, ΔH_S 는 저장열속이

Table 5. RMSE of 1.5 m temperature ($^{\circ}\text{C}$) for CTL and EXP2 with different urban fraction category of IGBP.

Category	Description	The number of stations	CTL	EXP2	EXP2-CTL
1	$f_u(\text{IGBP}) < 0.3$	31	1.86	1.77	-0.09
2	$f_u(\text{IGBP}) \geq 0.3$	15	1.30	1.16	-0.14

**Fig. 10.** Mean diurnal variation of simulated 1.5-m temperature ($^{\circ}\text{C}$) over observation site of (a) Category 1 ($f_u(\text{IGBP}) < 0.3$) and (b) Category 2 ($f_u(\text{IGBP}) \geq 0.3$) with observation for the entire period of simulation. ' f_u ' describes the fraction of urban land-use of IGBP cover within the model grid box for each station.

다. 저장열속은 $C \frac{dT^*}{dt}$ 로 나타낼 수 있으며 여기서 C 는 열용량($\text{J K}^{-1} \text{m}^{-2}$), T^* 는 지면의 온도이다(Porson et al., 2010a). 도시지역의 경우 교외지역에 비해 높은 건물 등에 의해 열용량이 크기 때문에 저장열속 또한 크다. 현열 속의 경우 EXP1이 CTL에 비해 0800 LST 부터 1200 LST까지는 약 20 W m^{-2} 감소하였고, 1200 LST부터 2400 LST까지 최대 100 W m^{-2} 증가하였다 (Fig. 9a). Figure 9b는 각 실험의 잠열속의 일변화이다. EXP1은 CTL에 비해 도시비율이 증가하면서 식 생비율이 감소하기 때문에 잠열속이 최대 154 W m^{-2} 줄어든 것으로 나타났다. 이 결과는 현열속이 토지피복의 종류에 영향을 받으며 도시지역일수록 잠열이 감소하고 현열이 증가한다는 선행연구와 일치한다 (Grimmond and Oke, 2002). Figure 9c는 저장열속의 일변화이다. 저장열속의 일변화를 보면 0700 LST 부터 1600 LST는 양의 값을 1700 LST에서 0600 LST까지는 음의 값을 보인다. 이는 낮 시간 동안 저장열이 캐노피와 지면에 저장된 후 오후부터 밤사이 대기로 방출 되는 것이다. 저장열속의 폭은 캐노피와 지면에 저장되는 저장열의 양으로 볼 수 있다(Oke et al., 2017). EXP1의 경우 CTL에 비해 도시비율이 증

가하여 열용량이 커졌기 때문에 저장열속의 절대값 또한 증가하였다. 따라서 도시지표의 확장으로 열용량이 증가하면 도시지표에 저장되는 저장열도 증가한다. 저장열의 증가로 인해 Fig. 7b에서 도시 지표가 증가한 구역의 지면 온도가 증가 한 것을 알 수 있다. 따라서 도시비율의 증가로 지표의 저장열이 증가하며 지면 온도 또한 증가하기 때문에 EXP1의 1.5-m 기온이 CTL에 비해 증가한 것이다(Fig. 5a).

3.4 도시 모수화 방안 민감도 분석

도시 모수화 방안은 도시지표에 적용되는 모수화 방안으로 도시비율에 따라 그 효과가 다르게 나타난다. 따라서 도시 모수화 방안의 기온 개선 원인을 분석하기 위해 도시 모수화 방안을 MORUSES로 변경한 EXP2의 기온 RMSE와 CTL의 기온 RMSE를 도시비율이 0.3 이하인 지점(카테고리 1)과 도시비율이 0.3 이상인 지점(카테고리 2)로 분류하여서 Table 5에 나타내었다. 카테고리 1의 경우 CTL의 1.86°C 에서 EXP2의 1.77 로 0.09 의 개선효과를 보였으며, 카테고리 2의 경우 CTL의 1.3°C 에서 EXP2의 1.16°C 으로 RMSE가 0.14°C 감소하였다. 두가지 카테고리에 대한 전체기간의 기온 일변화를 Fig. 10에 나타내었다. 카테고리 1의 경우 CTL에 비해 EXP1이 주간에 약 0.1°C 기온이 상승하였으며, 카테고리 2의 경우 0600 LST에

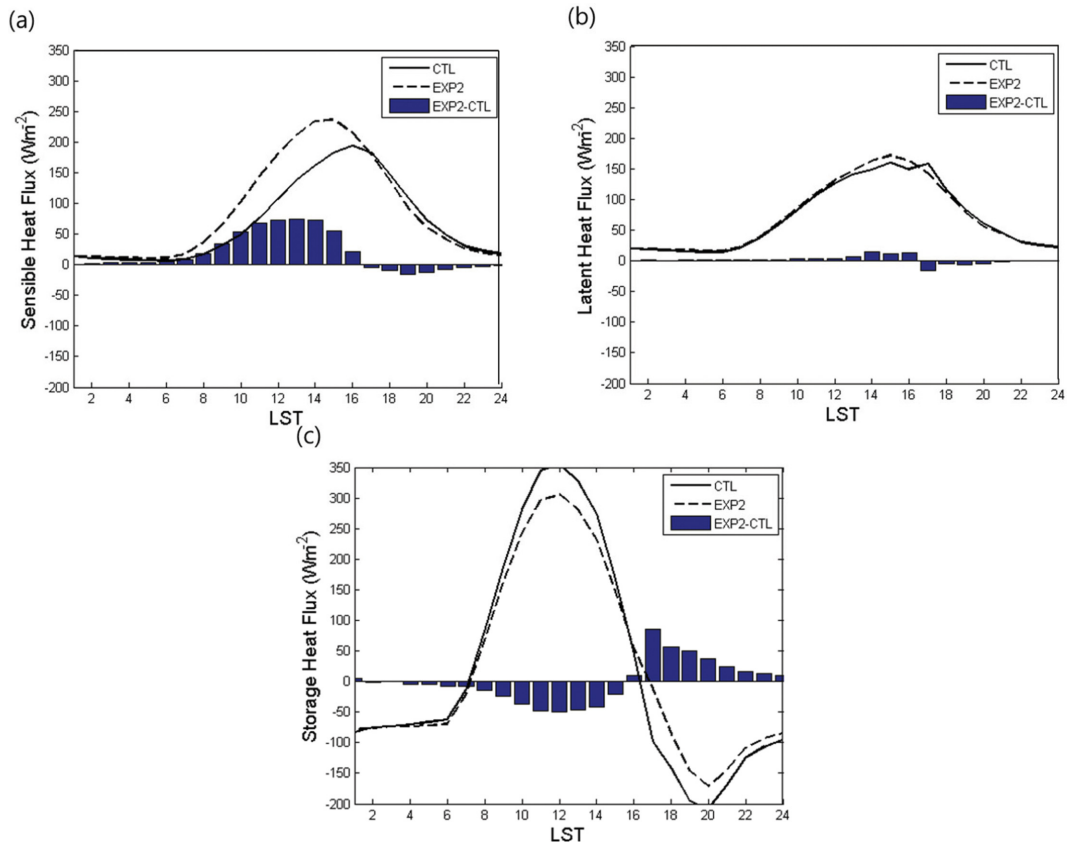


Fig. 11. Diurnal variation of (a) sensible heat flux, (b) latent heat flux, and (c) storage heat flux for CTL (solid line) and EXP2 (dashed line) for the entire period on the observation site of Category 2 ($f_u(IGBP) \geq 0.3$).

서 1500 LST 사이에 최대 $1^{\circ}C$ 가량 상승하였다. 이는 MORSES에 의한 기온 모의 성능의 개선은 도시 비율이 높은 지점에서 오전 시간에 현저함을 나타낸다.

도시 모수화 방안에 따른 에너지 수지변화를 살펴 보기 위해 도시비율이 0.3 이상인 카테고리 2에 대해 CTL과 EXP2의 에너지 수지의 일변화를 Fig. 11에 나타내었다. MORSES가 Best scheme에 비해 현열속과 기온의 최대값이 나타나는 시간이 빨라졌으며, 현열속의 최대값이 약 $75 W m^{-2}$ 증가하였다(Fig. 11a). MORSES를 적용한 실험에서 오전의 현열속의 상승 속도가 Best scheme에 비해 빨라진 만큼 지면에서 대기로의 열 수송이 커져 기온도 빠르게 상승한 것으로 나타났다. 잠열속의 경우 두 실험간의 차이가 거의 없다(Fig. 11b). 통합모델의 도시지표는 잠열속을 계산하지 않고 각 격자에 존재하는 식생에 의해 잠열속이 계산된다. 따라서 도시 모수화 방안은 식생지표에는 영향을 주지 않기 때문에 잠열속은 차이가 없는 것이다. Figure 11c는 저장열속의 일변화로 주간에는 약 $50 W m^{-2}$ 감소하였고, 야간에는 최대 $90 W m^{-2}$ 증가하

였다. 이는 지면에 저장되고 방출되는 양이 줄어든 것을 의미한다. 그 이유는 MORSES의 경우 열용량(C)이 $0.21 \times 10^6 J m^{-2} K^{-1}$ 로 기존 Best scheme의 $0.28 \times 10^6 J m^{-2} K^{-1}$ 보다 낮아졌기 때문에 열용량과 비례하는 저장열속이 EXP2에서 CTL에 비해 감소한 것이다. 또한 저장열속으로 소모되는 에너지가 적어 EXP2의 현열속이 0600 LST에서 1400 LST까지 빠르게 상승하고 그 후 CTL에 비해 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다(Fig. 11a). 따라서 EXP2의 오전시간 1.5-m 기온이 CTL에 비해 오전에 빠르게 증가하는 것은 현열속의 변화가 영향을 미친 것을 알 수 있다(Fig. 10b).

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 도시 모수화 방안과 토지피복변화가 지상 기온의 모의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 통합모델 내의 도시 모수화 방안인 Best scheme과 MORSES의 민감도 실험과 통합모델의 기존 토지피복자료 IGBP와 새롭게 구성한 최신의 고해상도 EGIS

토지피복자료를 적용한 민감도 실험을 수행하였다. 민감도 분석을 위해 2016년 8월 2일 0300 LST부터 8월 9일 0300 LST의 사례기간 동안 4가지 실험(CTRL, EXP1, EXP2, EXP3)을 수행하여 서울 수도권 지역 46개 지점의 관측자료와 비교 검증하였다. 또한 도시 비율과 도시비율변화에 따라 카테고리를 분류하여 성능을 비교하였으며, 모의 성능의 개선 원인을 제시하기 위해 각 실험에 대한 에너지 수지 변화 분석을 실시하였다.

토지피복자료를 IGBP에서 EGIS로 변경하였을 경우 연구영역에 대해 도시비율이 약 15.9% 증가하였다. 토지피복변화 민감도 실험 결과 EGIS를 적용한 EXP1 실험에서 IGBP를 적용한 CTL 실험에 비해 도시비율이 증가한 지역을 따라 지표온도가 증가함을 보였다. 도시비율증가 폭이 클수록 기온 또한 증가하는 것으로 나타났다. 그 원인은 도시비율이 증가하면서 지면의 열용량을 증가시키고, 열용량에 비례하는 저장열을 증가시키기 때문이다. 따라서 CTL에 비해 EXP1이 1.5-m 기온을 높게 모의 하여 관측값과의 오차가 줄어들었다. 전체 모의기간동안 평균 RMSE는 CTL이 2.27°C, EXP1이 2.05°C로 나타났다.

도시 모수화 방안 민감도 실험에서는 Best scheme를 적용한 CTL보다 MORUSES를 적용한 EXP2의 경우 기온 RMSE가 2.27°C에서 2.12°C로 감소한 것을 확인할 수 있었으며, 도시비율이 0.3 이하인 지점보다 0.3 이상인 지점들에서 기온 개선 효과가 뚜렷하게 나타났다. 도시비율이 0.3 이상인 지점들에 대해서 CTL에 비해 EXP2가 오전에 현열속이 빠르게 상승하고 최대값이 약 70 W m^{-2} 더 높게 나타났다. 이는 지면에서 대기로의 열 전달이 증가했다는 것으로 따라서 1.5-m 기온 또한 현열의 영향을 받아 오전시간의 기온 상승이 빨랐고 그 결과 관측과 좀더 일치하였다. MORUSES와 토지피복자료 EGIS를 적용한 EXP3의 경우 CTL 실험에서 나타나는 주간의 기온 과소모의 부분을 개선하여 전체적인 기온 RMSE가 1.88°C로 가장 모의 성능이 우수하게 나타났다.

본 연구에서는 현실적인 토지피복자료를 모델에 반영하여 도시비율의 변화에 따른 기온 성능 개선 효과를 정량적으로 보였으며, 도시지역에 대해 토지피복변화와 도시 모수화 방안에 따른 에너지 수지 변화를 통해 기온 성능의 원인을 파악하였다. 또한 적절한 토지피복자료와 도시 모수화 방안을 선택하는 것이 지상의 기온 모의에 미치는 영향이 크다는 것을 시사한다. 그러나 본 연구에서는 한 사례를 통해 지상 기온 검증만을 수행하였으며, 추후 강수일 등 다양한 기상 조건 사례에 대한 검증과 에너지수지 검증을 통해 도시 모수화 방안의 매개변수들의 최적화가 필요하다. 향후 도시지역의 보다 정확한 기온 모의를 위해

MORUSES의 도시형태변수를 계산에 사용된 경험식과 인공열을 우리나라에 맞게 적용할 필요가 있다. 또한 수도권지역의 도시화에 의한 수도권 지역의 열섬 강도 변화 등의 활용 연구를 수행할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원 기술개발연구」 “응용기상기술 지원 및 활용연구 (KMA2018-00621)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Best, M. J., 2005: Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. *Bound.-Layer Meteor.*, **114**, 91-109.
- _____, and C. S. B. Grimmond, 2015: Key conclusions of the first international urban land surface model comparison project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 805-819, doi:10.1175/BAMS-D-14-00122.1.
- _____, and Coauthors, 2011: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description - Part 1: Energy and water fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 677-699.
- Bohnenstengel, S. I., S. Evans, P. A. Clark, and S. E. Belcher, 2011: Simulations of the London urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1625-1640.
- 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).
- 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 modeling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. 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. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 689-719.
- Grimmond, C. S. B., and C. Souch, 1994: Surface descrip-

- tion for urban climate studies: A GIS based methodology. *Geocarto Int.*, **9**, 47-59.
- _____, and T. R. Oke, 1999: Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **38**, 922-240.
- _____, and _____, 2002: Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a Local-scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS). *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **41**, 792-810.
- Grossman-Clarke, S., J. A. Zehnder, T. Loridan, and C. S. B. Grimmond, 2010: Contribution of land use changes to near-surface air temperatures during recent summer extreme heat events in the Phoenix metropolitan area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 1649-1664, doi:10.1175/2010JAMC2362.1.
- 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 Meteor.*, **116**, 423-443.
- Kang, J.-H., and M.-S. Suh, 2011: Impacts of land surface boundary conditions on the short-range weather forecast of UM during summer season over East-Asia. *Atmosphere*, **21**, 415-427 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, and C.-H. Kwak, 2007: A Comparison of the land cover data sets over Asian region: USGS, IGBP and UMD. *Atmosphere*, **17**, 159-169 (in Korean with English abstract).
- 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 Meteor.*, **101**, 329-358.
- Lee, Y.-H., and K.-H. Min, 2016: Impact of urban canopy and high horizontal resolution on summer convective rainfall in urban area: A case of Rainfall Events on 16 August 2015. *Atmosphere*, **26**, 141-158, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.141 (in Korean with English abstract).
- Li, D., and E. Bou-Zeid, 2014: Quality and sensitivity of high-resolution numerical simulation of urban heat islands. *Environ. Res. Lett.*, **9**, 055001, doi:10.1088/1748-9326/9/5/055001.
- 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 Meteor.*, **94**, 357-397.
- Oke, T. R., G. Mills, A. Christen, and J. A. Voegt, 2017: *Urban Climates*. Cambridge University Press, 546 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).
- Park, S.-H., J.-B. Jee, and C. Yi, 2015: Sensitivity test of the numerical simulation with high resolution topography and landuse over Seoul metropolitan and surrounding areas. *Atmosphere*, **25**, 309-322 (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 in the MetUM. Part II: Validation against observations and model intercomparison. *Quart. J. Roy. Meteor. 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. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1514-1529, doi:10.1002/qj.668.
- 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 Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 125 pp.
- United Nations, 2014: *World Urbanization Prospects: The 2014 revision, Highlights*. United Nations, 27 pp.
- Unnikrishnan, C. K., B. Gharai, S. Mohandas, A. Mangain, E. N. Rajagopal, G. R. Iyengar, 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 Unified Model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 1989-2010.
- Wilson, D. R., and S. P. Ballard, 1999: A microphysically based precipitation scheme for the UK Meteorological Office Unified Model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1607-1636.