

서울지역의 고해상도 WISE-WRF 모델의 지표면 거칠기 길이 개선에 따른 민감도 분석

지준범^{1)*} · 장민¹⁾ · 이채연¹⁾ · 조일성²⁾ · 김부요³⁾ · 박문수¹⁾ · 최영진¹⁾

¹⁾한국의국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단, ²⁾강릉원주대학교 복사위성연구소,
³⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2015년 12월 10일, 수정일: 2016년 1월 15일, 게재확정일: 2016년 1월 15일)

Sensitivity Analysis of the High-Resolution WISE-WRF Model with the Use of Surface Roughness Length in Seoul Metropolitan Areas

Joon-Bum Jee^{1)*}, Min Jang¹⁾, Chaeyeon Yi¹⁾, Il-Sung Zo²⁾, Bu-Yo Kim³⁾,
Moon-Soo Park¹⁾, and Young-Jean Choi¹⁾

¹⁾Weather Information Service Engine, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

²⁾Research Institute of Radiation & Satellite, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

³⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 10 December 2015; revised 15 January 2016; accepted 15 January 2016)

Abstract In the numerical weather model, surface properties can be defined by various parameters such as terrain height, landuse, surface albedo, soil moisture, surface emissivity, roughness length and so on. And these parameters need to be improved in the Seoul metropolitan area that established high-rise and complex buildings by urbanization at a recent time. The surface roughness length map is developed from digital elevation model (DEM) and it is implemented to the high-resolution numerical weather (WISE-WRF) model. Simulated results from WISE-WRF model are analyzed the relationship between meteorological variables to changes in the surface roughness length. Friction speed and wind speed are improved with various surface roughness in urban, these variables affected to temperature and relative humidity and hence the surface roughness length will affect to the precipitation and Planetary Boundary Layer (PBL) height. When surface variables by the WISE-WRF model are validated with Automatic Weather System (AWS) observations, NEW experiment is able to simulate more accurate than ORG experiment in temperature and wind speed. Especially, wind speed is overestimated over 2.5 m s^{-1} on some AWS stations in Seoul and surrounding area but it improved with positive correlation and Root Mean Square Error (RMSE) below 2.5 m s^{-1} in whole area. There are close relationship between surface roughness length and wind speed, and the change of surface variables lead to the change of location and duration of precipitation. As a result, the accuracy of WISE-WRF model is improved with the new surface roughness length retrieved from DEM, and its surface roughness length is important role in the high-resolution WISE-WRF model. By the way, the result in this study need various validation from retrieved the surface roughness length to numerical weather model simulations with observation data.

Key words: Roughness length, WISE-WRF model, wind speed, friction speed, Automatic Weather System (AWS)

*Corresponding Author: Joon-Bum Jee, Weather Information Service Engine, Hankuk University of Foreign Studies, Gyeonggi-do 25457, Korea.
Phone: +82-70-4617-3764, Fax: +82-31-321-6470
E-mail: rokmcjib717@gmail.com

1. 서 론

지표면은 인간 활동의 터전으로서 지구대기와 가장 가깝게 인접하여 위치하며, 직접적으로 대기의 흐름과 지표면의 에너지를 상층으로 전달한다. 특히, 지표면 위의 인공 구조물과 식생 등에 의한 지표면의 특성변화는 열적인 특성 변화와 대기의 마찰력 변화를 일으켜 대기의 흐름을 바꾸는 등 기상에 미치는 영향은 다양하다. Oke (1987)는 지표면의 마찰력은 대기 경계층의 하부에 집중되어 나타나며, 지표면의 마찰력에 의한 역학적 혼합은 지표면과 인접한 접지경계층에서 일어나고 풍속은 고도에 따라 대수함수로 증가됨을 밝혔다.

지표면의 거칠기 길이(roughness length)는 모델과 관측자료를 이용하여 지표면과 대기사이의 열, 운동량, 물의 교환과 대기 경계층의 특성을 결정하는데 사용되고 있으며(Sud et al., 1988; Raupach, 1992; Reijmer et al., 2004; Kanda et al., 2007; Chen et al., 2011; Salamanca et al., 2011; Cao and Lin, 2014), 도시기상 연구에서는 도시 열섬과 오염물질의 확산 등에 사용되고 있다(Bornstein, 1968; Vukovich, 1971; Barlag and Kuttler, 1991; Bottema, 1996; Gál and Sümeghy, 2007; Hidalgo et al., 2010; Loridan and Grimmond, 2012; Ryu et al., 2013). 또한 거칠기 길이는 바람장(풍향과 풍속), 운동량, 거칠기층, 경계층 고도, 난류 강도 등 대기의 흐름과 관련성이 높아 도시 경계층 연구에 적용되었다(Raupach, 1992; Grimmond and Oke, 1999).

그리고 최근 컴퓨터와 지도작성 기술 등의 발달로 지표면 표고모델과 고해상도 위성영상을 활용하여 넓은 지역을 대상으로 지표특성을 모수화하는 연구가 수행되고 있다(Ratti and Richens, 1999; Priestnall et al., 2000; Ratti et al., 2006; Steiniger et al., 2008). 그러나 대부분의 지표면 거칠기는 대표성 있는 소규모 연구 대상지 등을 고려하여 구축되어 시간적 공간적 범위가 제한되었다(Landsberg, 1981; Grimmond and Souch, 1994; Voogt and Oke, 1997; Grimmond and Oke, 1999). 마찬가지로 국내에서는 지표면 거칠기에 대하여 연구가 진행되었으나 특정 지역에 제한적으로 수행되었다(Lee and Park, 1997; Ha et al., 1998; Yoo et al., 2010; Yi et al., 2015). 또한 기상수치모의를 위한 수치모델은 지표이용도별로 구축된 지표면 거칠기를 이용하여 수치실험에 적용되고 있으며, 고해상도 수치모의를 위해서는 정교하고 정확한 지표특성자료의 구축이 중요하다(Andréand Blondin, 1986; Hu et al., 2010; Wang et al., 2010; Salamanca et al., 2011; Cao and Lin, 2014; Park et al., 2015).

따라서 본 연구에서는 서울을 중심으로 구축된 고해상도 지형고도, 지표이용도 그리고 지표면 거칠기를

이용하고(Park et al., 2015; Yi et al., 2015) 기상수치모의를 통하여 민감도를 분석하였다. 먼저 지표면 거칠기 길이를 수치모의에 적용하기 위하여 지표특성자료에 대한 분석을 실시하였고 수치모의를 수행하였다. 그리고 예측된 결과를 분석하여 지표면 거칠기 길이의 특성에 따른 기온, 바람장 등의 변화를 분석하여 현실적인 지표특성 모수의 적용을 분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 지표면 거칠기 길이

지표면 거칠기 길이(z_0)의 산출은 풍속 관측을 통한 방법과 Geographic Information System (GIS) 자료를 이용하는 방법이 있다(Grimmond and Oke, 1999). 풍속관측을 이용한 방법은 고도별 풍속 관측자료의 분포를 이용하여 Monin-Obukhov 상사이론(Monin and Obukhov, 1954)을 기초하여 이론적인 z_0 를 구한다. 일반적인 고도별 평균 풍속($U(z)$)은 식 (1)과 같다.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \times \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \quad (1)$$

여기서 k 는 칼만 상수(von Karman's constant, 0.41), u_* 는 마찰계수, z_d 는 지표면 구조물 등의 영면변위(Zero plane displacement; 풍속이 0 ms^{-1} 이 되는 고도)이다. 이 식은 지표면이 균질하며 대기의 안정도가 중립을 가정한다. GIS 자료를 이용하여 지표면 거칠기 길이를 산출하는 방법은 다양한 관측자료(항공, 위성, 라이다 등)를 이용하여 구축된 GIS DB를 활용한다. 지표면을 구성하는 구조물의 기하학적 모양과 크기에 대한 결과를 이용하여 평균높이(z_H), z_H 와 평면비 λ_p 그리고 z_H , λ_p , $\lambda_p(z_H)$ 와 풍압을 받는 건물 옆면적비) 등을 적용하여 계산한다(Raupach, 1992; Macdonald et al., 1998; Dong et al., 2003; Ratti et al., 2006; Ng et al., 2011).

건물이 포함된 서울 전역에 GIS 자료를 이용한 방법을 적용하여 지표면 거칠기를 산출하였다(Yi et al., 2015). GIS 자료는 안전행정부의 건물 자료와 국토지리정보원의 지점정보 그리고 항공 LiDAR의 고도자료를 적용하여 고도자료를 구축하였다. Macdonald et al. (1998)에 의해 제안된 영면변위와 거칠기 길이 산출 식을 이용하였다. 영면변위(z_d)는 식 (2)와 같이 계산되고 산출된 영면변위를 이용하여 식 (3)과 같이 거칠기 길이(z_0)를 산출하였다.

$$z_d = (1 + \alpha^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1)) \times Z_H \quad (2)$$

$$z_0 = \left[\left(1 - \frac{z_d}{Z_H}\right) \exp\left\{ - \left[0.5 \beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{Z_H}\right) \lambda_F \right]^{0.5} \right\} \right] \times Z_H \quad (3)$$

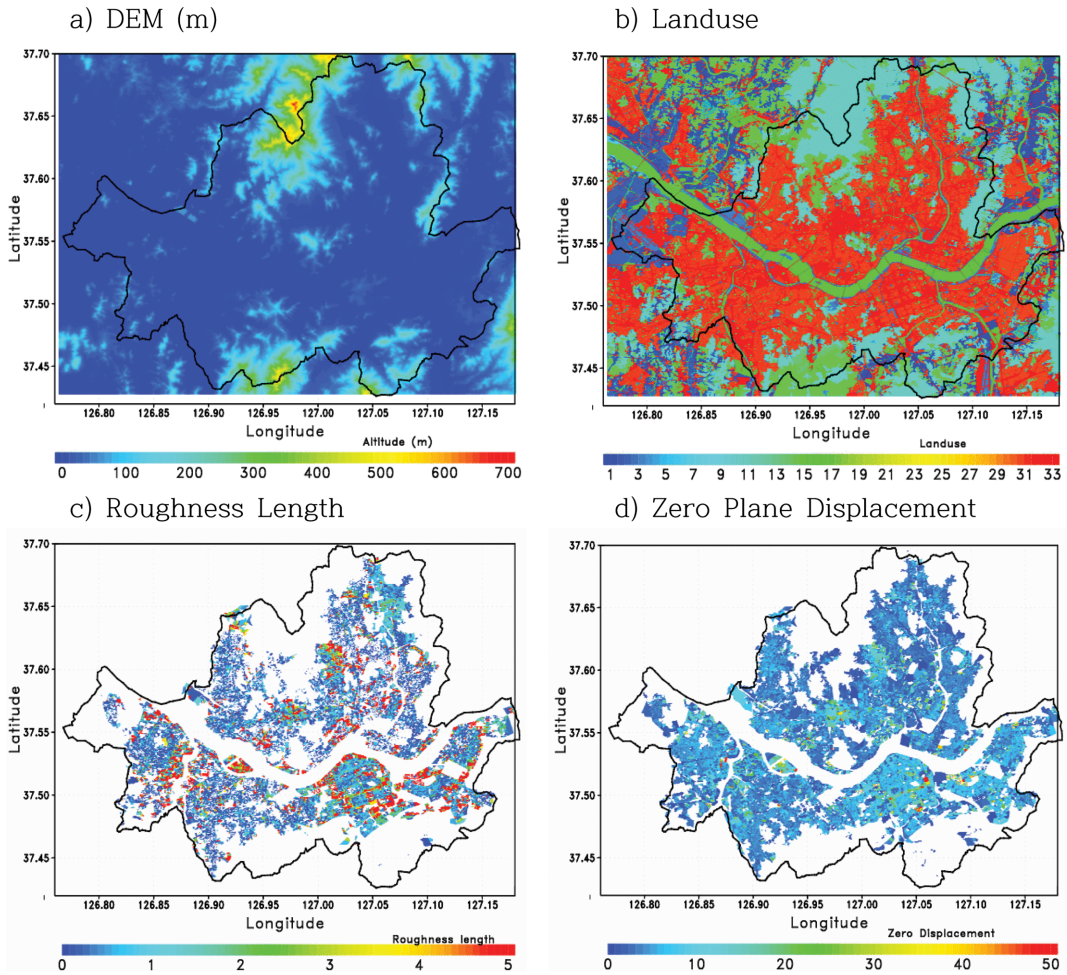


Fig. 1. DEM, landuse, roughness length and zero plane displacement on Seoul and surrounding area with 30 m × 30 m resolutions.

여기서 λ_p 는 옆면적비(0~1 사이의 값)이고 경험상수인 k (0.4), C_D (1.2), α (4.43), β (1.0)은 Macdonald et al. (1998)이 제안한 상수들을 적용하였다 (Yi et al., 2015). Figure 1은 서울을 포함한 수도권의 지형고도, 지표이용도, 지표면 거칠기 그리고 영면변위를 나타낸 것으로 수평해상도는 30 m × 30 m이다. 각각의 지표특성자료는 지표이용도별로 빈도와 평균값과 최대값을 Table 1에 정리하였고 WRF 모델에서 사용되고 있는 지표이용도별 지표면 거칠기를 마지막 열에 나타내었다. 지표이용도의 분류체계는 United States Geological Survey (USGS) 33개 분류이고 도시를 세분하여 저밀도 주거지, 고밀도 주거지 그리고 공업 또는 상업지역으로 분류된다. 그러나 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 지형특성자료들은 서울을 중심으로 구축되었기 때문에 계산된 지표면 거칠기 길이를 모델의 도메

인 전체에 적용하는 것은 제약이 있을 수 있다. 수치 모델에 적용된 세분화된 각각의 도시 분류들은 지표면 거칠기 길이가 80 cm로 동일하게 적용되나 GIS 자료를 이용한 경우 다른 값들 가지며, 그 값이 기준과 비교하여 대체로 크게 계산되었다. 도시에 해당되는 지표이용도 분류 31~33에서 기준에 80 cm로 지표면 거칠기는 동일하였으나 새롭게 계산된 지표면 거칠기는 각각 237 cm, 155 cm, 124 cm이었고 특히, 지표이용도 분류 31(저밀도 주거지)의 지표면 거칠기는 기준보다 157 cm 크게 나타났다.

2.2 실험 설계

본 연구에서 사용한 수치모델은 미국의 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 중규모 모델인 Weather Research and Forecasting

Table 1. Frequency and average (maximum) of Roughness length with landuse from Fig. 1 and WRF v3.6.1.

Landuse (USGS 33category)	Frequency (%)	z_0 (cm) (max)	z_0 (cm; LANDUSE.TBL in WRF v3.6.1)
2 (Dryland Cropland and Pasture)	0.74	38 (2,878)	15
3 (Irrigated Cropland and Pasture)	0.14	13 (563)	10
4 (Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture)	2.32	150 (4,790)	15
5 (Cropland/Grassland Mosaic)	0.03	8 (1,699)	14
6 (Cropland/Woodland Mosaic)	0.01	50 (86)	20
7 (Grassland)	0.04	68 (266)	12
11 (Deciduous Broadleaf Forest)	3.21	51 (3,138)	50
14 (Evergreen Needleleaf Forest)	0.54	27 (1,635)	50
15 (Mixed Forest)	1.96	72 (4,130)	50
16 (Water Bodies)	0.51	0.01 (1)	0.01
17 (Herbaceous Wetland)	4.52	197 (7,612)	20
19 (Barren or Sparsely Vegetated)	0.01	1(1)	1
31 (Low Intensity Residential)	46.74	237 (9,005)	80
32 (High Intensity Residential)	24.78	155 (7,612)	80
33 (Industrial or Commercial)	14.45	124 (5,333)	80

Table 2. Model configuration for WRF simulation.

Configuration	Domain 1
Horizontal grids	336 × 286
Grid spacing (m)	1000
Land use & Topography data resolution	30 s (900 m)/USGS 33 category
Numerical Model	WRF v3.6.1
Initial Boundary Condition	UM Regional Model Forecast Field (KMA) MET office OSTIA SST NCEP FNL soil moisture and temperature
Vertical grid	50 layers/Top 50 hPa
Integral time	3 s
Radiation	Goddard longwave scheme/Goddard short wave
Microphysics	WSM 6 class
Surface layer	Monin-Obukhov (Janjic, 2002) scheme
Land surface	Unified Noah LSM
Planetary Boundary layer	Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme
Cumulus	-

(WRF, Skamarock et al., 2008) v3.6.1이며, 비정역학 모형으로 미세규모, 중규모 기상현상을 적절히 모의한다. 도시기상 예측에 적합하도록 설정된 WISE-WRF 모델(Park et al., 2015)을 사용하였으며, 자료동화를 제외고 모델시스템을 구성하여 모델시스템 자체에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 수도권 지역에 대한 수치모의를 위해 초기 입력 및 경계자료는 기상청에서 운영 중인 UM 지역모델 예측장(12 km 해상도)과 유럽 Met office의 OSTIA SST(5 km 해상도, Donlon et al., 2011) 및 National Center for Environmental Prediction Final Analysis (NCEP FNL)의 토양 수분 및 토양 온도(100 km 해상도)를 이용하였다. WISE-WRF의 도메

인 구성은 1 km × 1 km 해상도로 구성되며, 서울을 포함한 수도권지역을 대상영역으로 구성하였다. 모델의 연직층은 50개의 층으로 구성하였고 미세물리과정은 YSU 방안(Hong et al., 2006), 지면모델과 land surface는 Pleim (Xiu and Pleim, 2001) 방안, 그리고 대기경계층은 ACM2 (Pleim, 2007)로 구성하였다(Table 2).

도시에 해당되는 지표면 이용도(31~33)의 지표면 거칠기 길이는 WISE-WRF 모델의 초기설정인 80 cm를 기준실험(ORG)을 수행하였다. 그리고 도시 지표이용도에 대하여 지표면 거칠기를 1, 10, 50, 100, 200, 300 cm로 변화시켜 실험하였으며, 2.1절의 GIS 기반의 지표면 거칠기 길이를 지표이용도별로 적용하여

Table 3. Experiment design for WRF simulation.

Experiment	Roughness Length (cm)
300	300 (Urban category 31, 32, 33)
200	200 (Urban category 31, 32, 33)
100	100 (Urban category 31, 32, 33)
050	50 (Urban category 31, 32, 33)
010	10 (Urban category 31, 32, 33)
001	1 (Urban category 31, 32, 33)
ORG	LANDUSE.TBL in WRF v3.6.1
NEW	z_0 in Table 1

실험(NEW)하였다(Table 3 참조). 선정된 사례들에 대하여 각각 모의를 수행하였고 예측된 결과는 AWS에 관측된 변수들과 비교 및 분석하였다.

2.3 사례 선정

수도권 지역에서의 지표면 거칠기에 따른 수치모의 실험을 위하여 3개의 사례를 선정하였다. 실험을 위하여 선택된 사례들은 대체로 맑았던 사례와 구름 및 강수가 있었던 사례이며, 구름 및 강수의 영향에 따른 기상상태를 고려하여 풍속, 기온 및 강수의 영향

을 분석하고자 하였다.

첫 번째 사례는 2013년 8월 6일 0000 UTC부터 8월 7일 0000 UTC까지이며, Fig. 2에는 0000 UTC의 일기도(Fig. 2(a))와 한반도지역의 위성영상(Fig. 2(d))을 나타내었다. 서울을 비롯한 수도권지역에는 고기압과 일본 남쪽의 저기압의 영향을 받고 있음을 알 수 있고, 이로 인하여 수도권을 비롯한 중부지역과 남서해안 및 제주도 남쪽에 하층운이 분포하고 있음을 알 수 있다.

두 번째와 세 번째 사례는 2014년 8월 9일 0000 UTC부터 8월 11일 0000 UTC이며 일기도와 한반도지역 위성영상은 Fig. 2에 (b), (c) 그리고 (e), (f)와 같다. 태풍 ‘할롱(Halong)’이 일본 큐슈 지역에 상륙하였고 이에 따라 태풍간접영향을 받아 동해안과 중부지역에 하층운이 분포함을 알 수 있다. 한반도 남서지역을 제외한 전역에 강수가 나타났으며, 특히 설악산지점(지점번호 875)은 최대 271.5 mm, 서울지점(지점번호 108)에서는 42.5 mm의 강수를 기록하였다. 두 번째 사례는 태풍의 영향이 적고 맑은 날이 유지되다가 흐린 날씨로 변화되었고, 세 번째 사례는 강수가 시작되어 많은 강수가 있었던 사례이다.

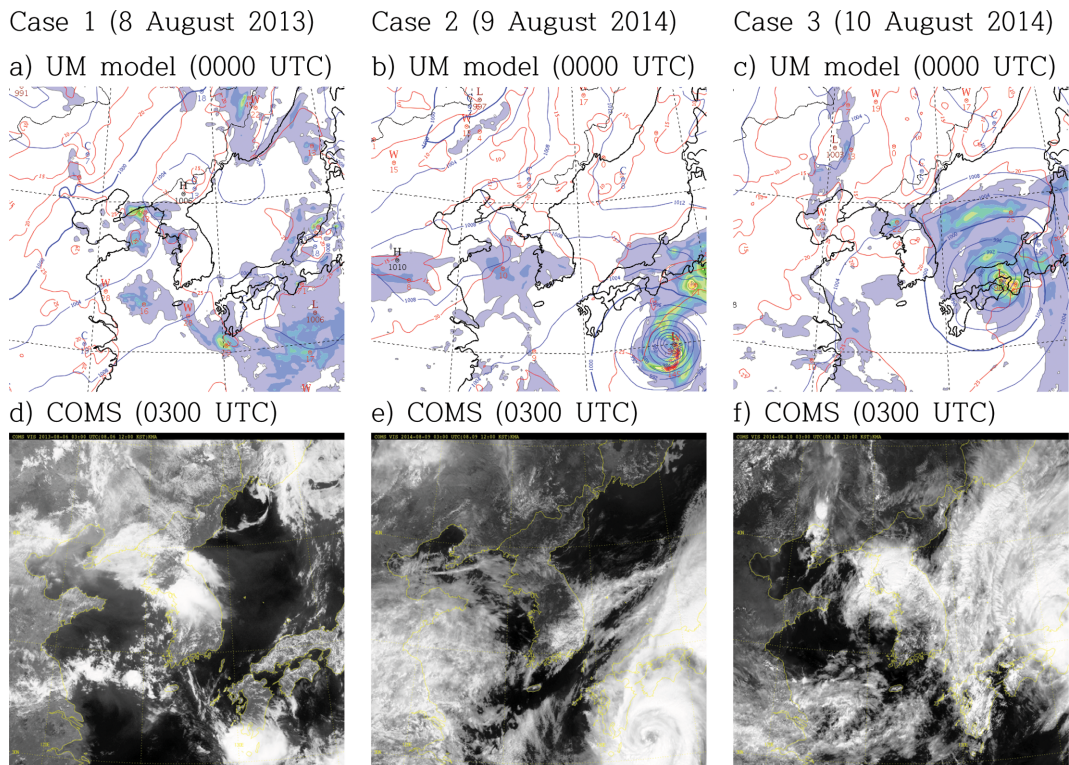


Fig. 2. Forecast field of UM regional model (0000 UTC) and COMS visible images (0300 UTC). Left, middle and right panels represented case 1 (8 August 2013), case 2 (9 August 2014) and case 3 (10 August 2014), respectively.

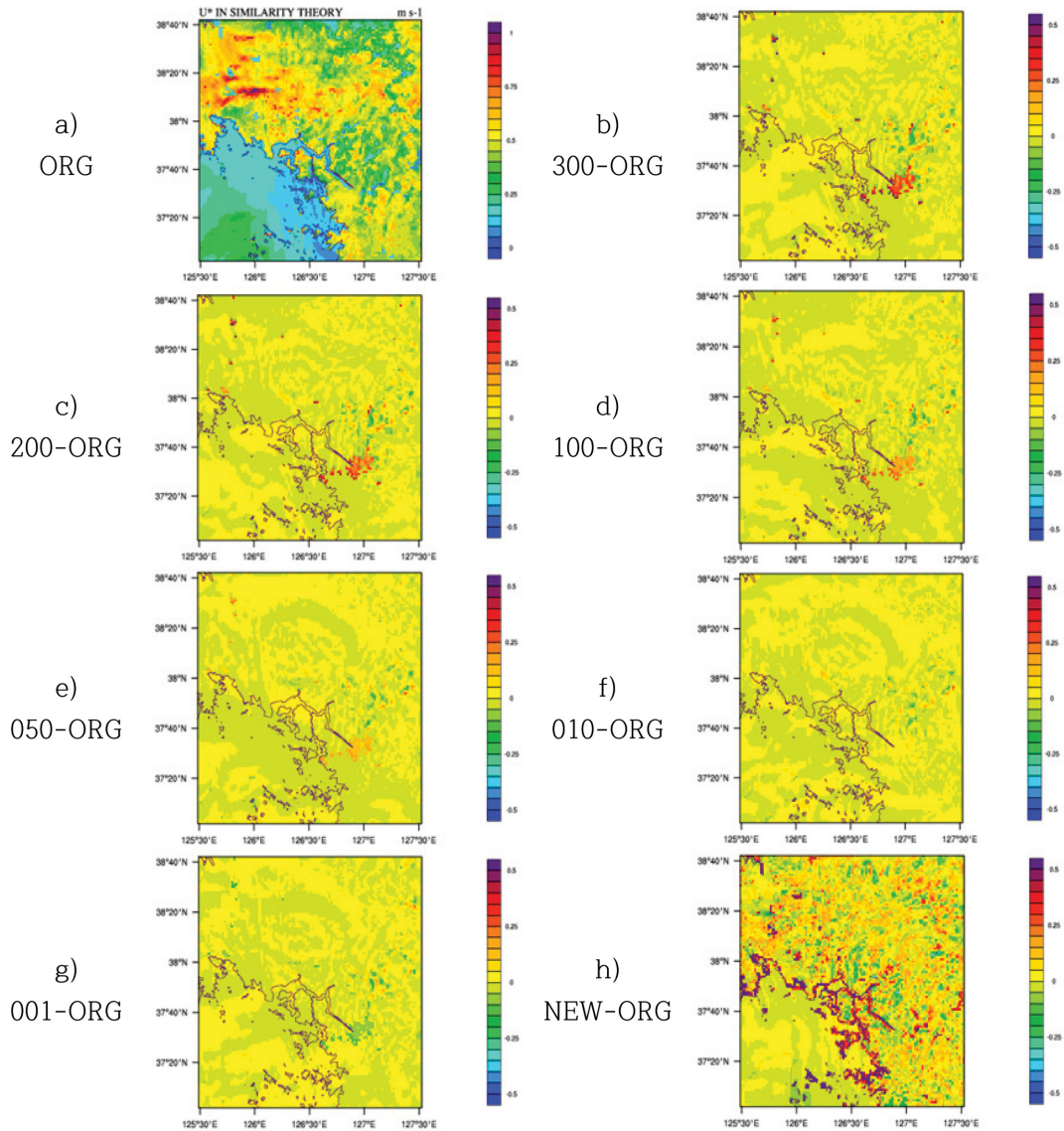


Fig. 3. Distribution of U^* (friction speed) from Monin-Obukhov similarity of ORG and differences between experiments and ORG at 03 hr from 0000 UTC 6 August 2013. Experiments are represented 300 cm, 200 cm, 100 cm, 50 cm, 10 cm, 1 cm and NEW by z_0 , respectively.

선정된 사례들에 대하여 WISE-WRF 모델을 이용하여 24시간 예측하였으며 1 km × 1 km 해상도의 예측결과를 분석하였다. 지표면 거칠기 길이에 따른 민감도를 분석하기 위하여 마찰속도, 기온, 풍속, 경계층 고도 등 변수들의 분포를 비교하였다. 또한, 모델 예측된 모델 결과는 수도권 지역의 103개 AWS 지점에서 1시간 간격으로 관측된 2 m 기온, 상대습도와 10 m 풍속 및 강수량 자료를 이용하여 통계 분석하였다.

3. 결 과

3.1 수치모의 결과

2.1절의 지표면 거칠기 자료를 이용하여 2.2절의 실험설계에 적용하였고, 이를 2.3절의 사례를 통해 수치모의를 Fig. 3은 지표면 거칠기에 대하여 WISE-WRF 모의에서 계산된 마찰속도(U^*)를 나타낸 것이다. U^* 는 Monin-Obukhov 상사이론(Monin and Obukhov, 1954)에 의거하여 계산된 값으로 WISE-WRF 모델에

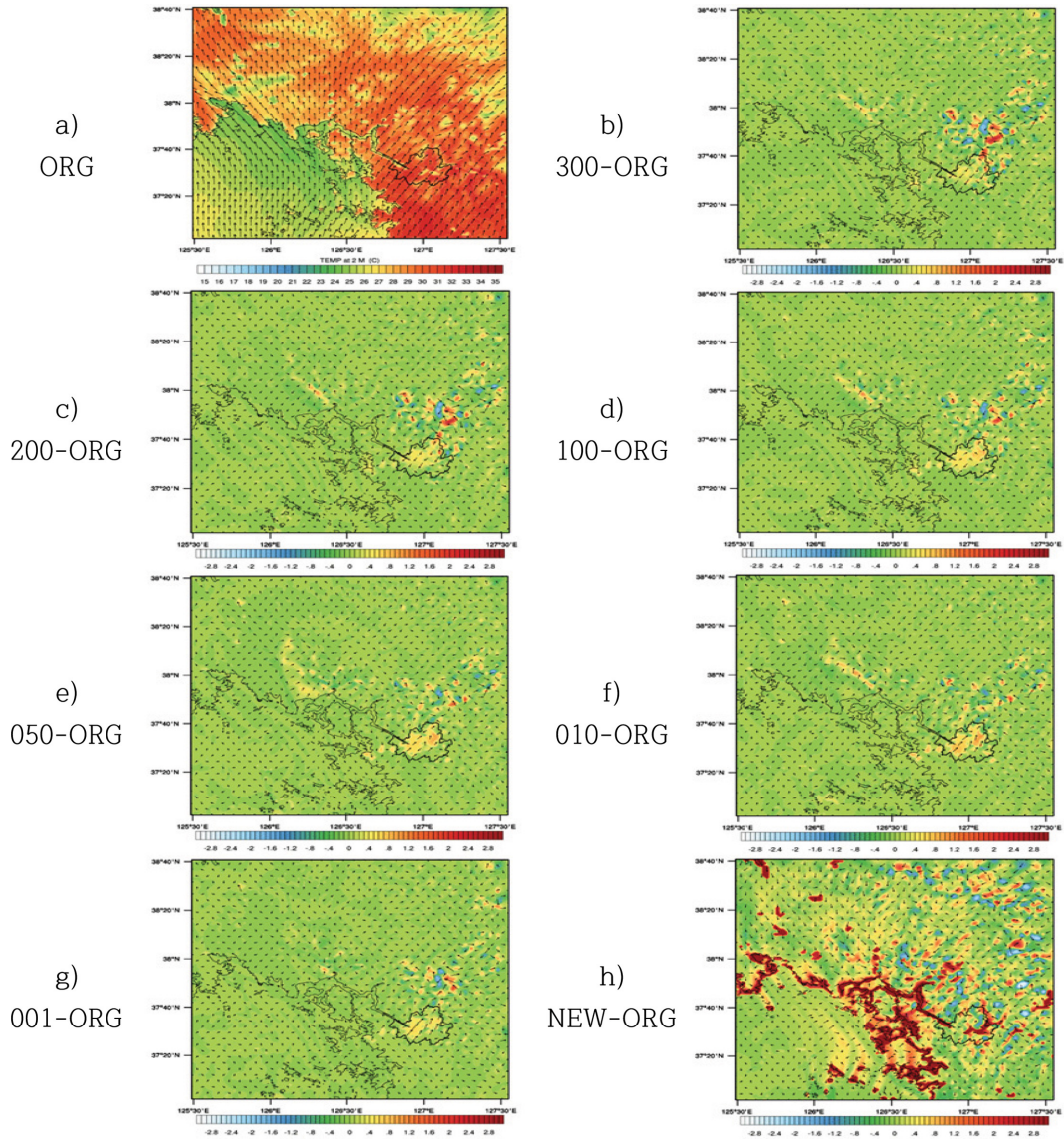


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for temperature at 2 m and wind field at 10 m.

서 정의된 지표면 거칠기 길이에 의존적으로 계산된다. 해양과 같이 거칠기 길이가 작은 곳에서 작은 값으로 나타나고 있으며, 산악이 위치한 북쪽에서 큰 값이 분포되고 있다. WISE-WRF 모델의 ORG와 비교하여 도시의 지표면 거칠기가 클수록 높은 마찰속도가 계산되게 되어 서울을 중심으로 편차가 크게 나타난다. 그리고 WISE-WRF 모델의 지표면 거칠기보다 작은 50 cm 이하의 거칠기 길이일 때 마찰속도는 더 작게 계산된다. 그러나 새로이 계산된 지표면 거칠기 길이인 NEW 실험에서는 지표이용도별로 지표면 거

칠기 길이가 새롭게 정의되었기 때문에 해안과 하천으로 분류된 영역 주변으로 마찰속도의 차이가 크게 나타나고 있다.

Figure 4에서 2 m 기온과 10 m 바람장의 모의 결과는 ORG 실험과 비교하여 지표면 거칠기 길이의 차이가 큰 실험들에서 풍하측인 서울의 북동쪽에 기온의 변화가 크게 나타났으며, 지표면 거칠기 길이가 줄어들수록 그 차이가 줄어들었다. 또한 바람장의 변화는 남서풍이 있었으나 지표면 거칠기 길이가 클 때는 바람장이 약화되거나 북동풍으로 바뀌다가 지표면

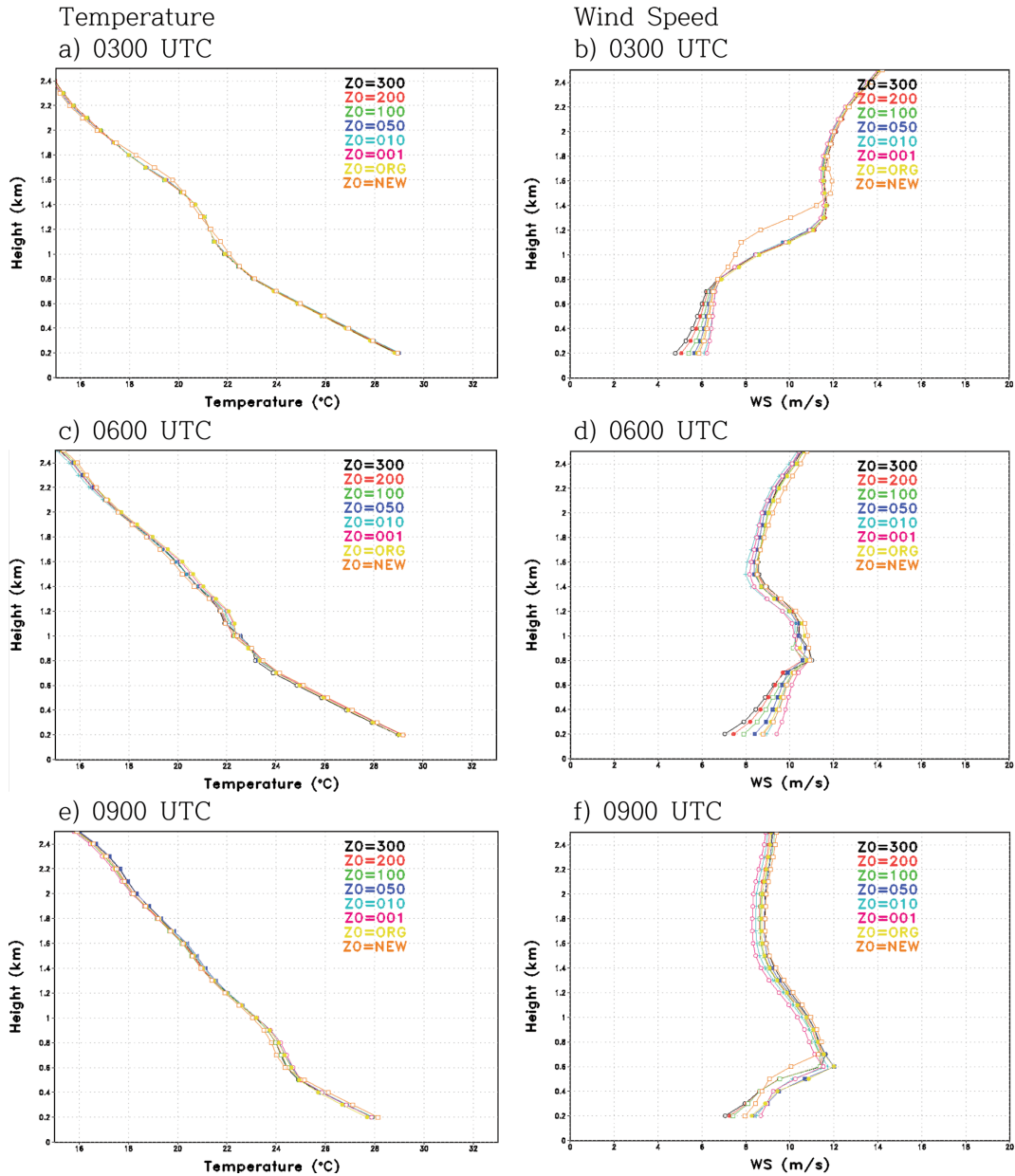


Fig. 5. Vertical profile of Temperature and Wind Speed of all experiments on Seoul site (35.57°N, 126.97°E) simulated at 03 hr, 06 hr, 09 hr prediction from 0000 UTC 6 August 2013. Experiments are represented 300 cm, 200 cm, 100 cm, 50 cm, 10 cm, 1 cm, ORG (= 80 cm) and NEW by z_0 , respectively.

거칠기 길이가 작아지면서 남서풍이 강화되는 것을 볼 수 있다. 그러나 NEW 실험에서는 지표면 거칠기 길이의 차이 큰 해안과 하천 주변 등에서 기온이 급격하게 증가되었고 서울을 중심으로 북서풍이 약화되었다.

연직 기온과 풍속의 분포를 서울 관측소 위치에 대

하여 살펴보았을 때 기온의 분포차이는 적었으나 NEW 실험의 경우 지표면 근처의 기온이 상승하는 것으로 나타났다. 풍속은 지표면 근처에서 변화가 크게 나타났다(Fig. 5). 지표면 거칠기 길이가 클수록 풍속은 약화되었고 ORG 실험의 경우 50 cm와 10 cm 사이의 풍속이 나타났으며, NEW 실험은 ORG 실험과 유사한

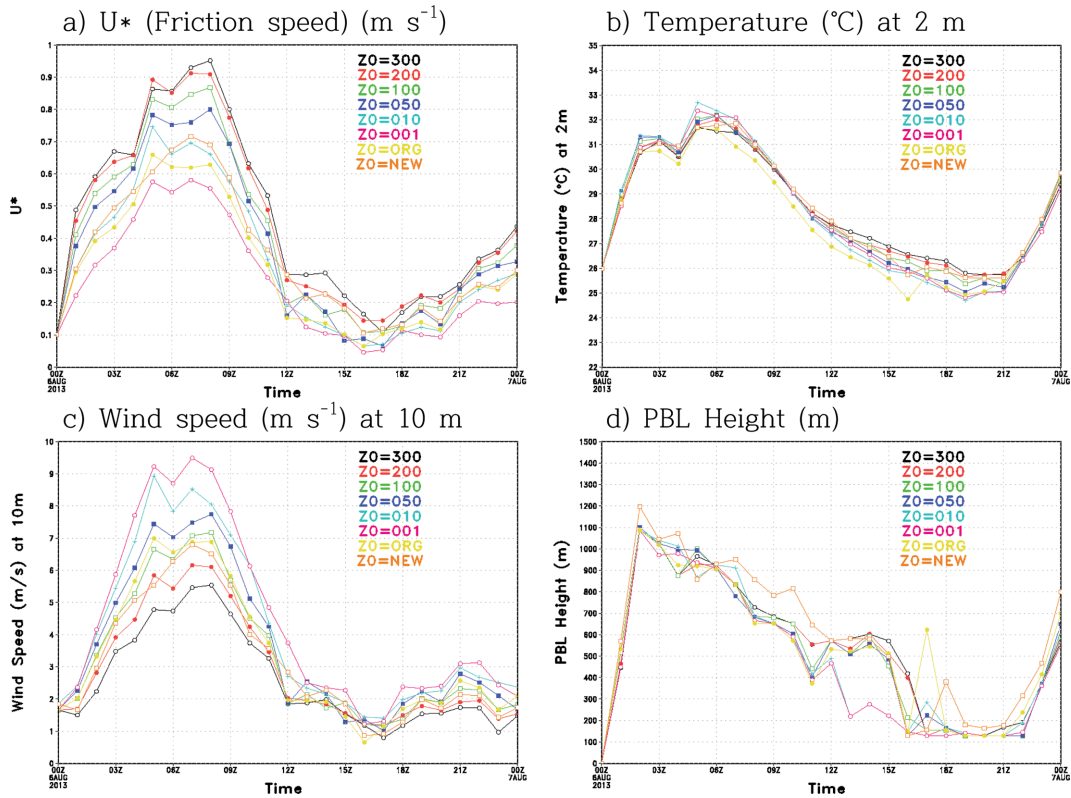


Fig. 6. Timeseries of U^* (friction speed), temperature at 2 m and wind speed at 10 m and PBL height on Seoul site (35.57°N, 126.97°E) simulated 24 hr from 0000 UTC 6 August 2013.

풍속이 나타났다. 이러한 지상 근처의 풍속차이는 상층으로 갈수록 작아져 1 km 이상에서는 주풍의 풍속이 나타났다. 이러한 이유는 지표면의 거칠기 길이에 의한 풍속의 약화가 지표에서 멀어질수록 영향력이 적어져 혼합층 이내에서 영향력 때문으로 분석된다.

서울 관측소를 기준으로 마찰속도, 2 m 기온, 10 m 풍속 및 PBL 고도의 시계열을 살펴보았다(Fig. 6). 마찰속도와 풍속은 초기시간부터 지표면 거칠기 길이에 의존적으로 나타났다. 지표면 거칠기 길이가 큰 실험일수록 마찰속도는 강하게 나타났고 풍속은 약하게 나타났고, ORG 실험은 050과 100 실험 사이의 값으로 나타났다. NEW 실험은 100과 200 실험 사이의 값으로 모의되고 있으나 그 패턴의 변화가 심하게 나타났다. 기온의 경우는 초기에는 그 차이가 뚜렷하지 않았으나 12시간 이후의 모의에서 차이가 뚜렷이 나타났다. 지표면 거칠기 길이가 큰 실험에서 기온이 크게 나타났고 ORG 실험은 100 실험과 유사하게 모의되었으며, NEW 실험은 001 또는 010보다 낮은 기온을 모의하였다. PBL 고도는 오전시간에 급격히 증가된 후 0200 UTC 이후에 감소하기 시작하였고 실험들

사이에 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다. 그러나 NEW 실험의 경우 다른 실험과 일 변화경향은 유사하였으나 높은 PBL 고도를 기록하였다.

사례들에 대한 실험들에 대하여 모의 3시간 후의 변수별(지표면 온도, 2 m 기온, 상대습도, 10 m 풍속, PBL 고도, 강수량) 수평 분포와 서울 관측소를 중심으로 동서방향(37.57°N), 남북방향(126.97°E)의 변수별 차이를 분석하였다. 실험 1 (Fig. 7)과 3 (Fig. 9)은 흐리고 강수가 있었던 사례로 지표면 거칠기 길이에 따른 실험의 결과 기상변수와와의 관계는 지표면온도, 풍속 등에서 뚜렷이 나타나고 있으나 그 외의 변수와는 구름의 분포 등 다른 기상변수에 의존적인 것으로 분석된다. 특히, NEW 실험의 경우 다른 실험과는 다르게 해안선과 하천주위에서 ORG 실험과 큰 차이가 나타난다. 이는 지표면 거칠기 길이가 전체적으로 다르게 적용되었기 때문에 그와 관련된 기상변수들이 바뀌기 때문인 것으로 분석된다. 실험 2는 대체로 맑았던 사례이며, 지표면 거칠기 길이와 지표면 온도, 2 m 기온, 상대습도, 10 m 풍속 등에서 뚜렷한 관계성이 보이는 것으로 판단된다(Fig. 8). 지표면 거칠기 길이

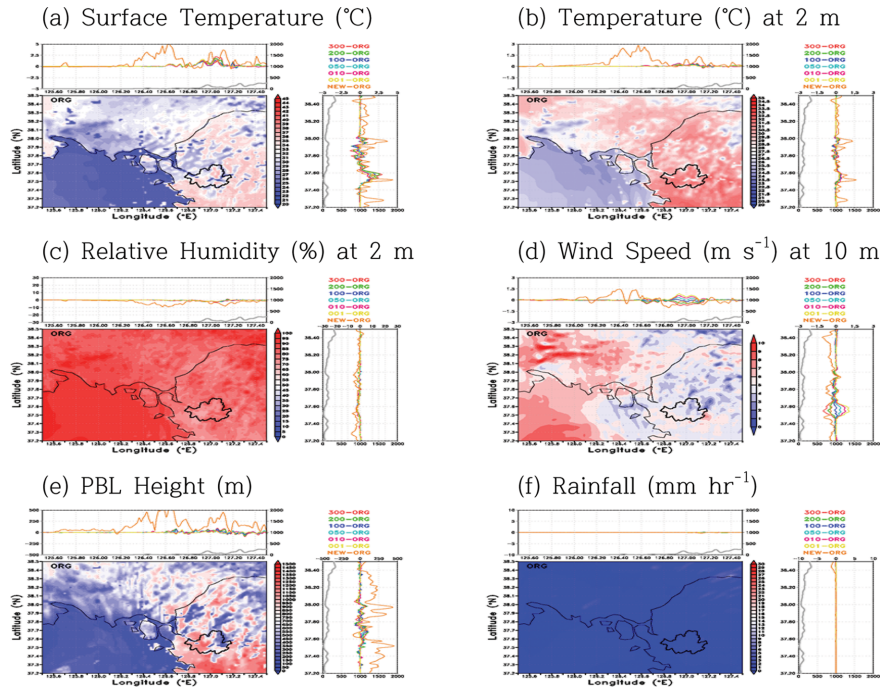


Fig. 7. Spatial distribution and zonal (37.57°N) and meridional (126.97°E) plot of meteorological variables simulated 3 hr from 0000 UTC 6 August 2013. Meteorological variables contain insolation, surface temperature, temperature at 2 m, relative humidity at 2 m, wind speed at 10 m, PBL height and rainfall, respectively.

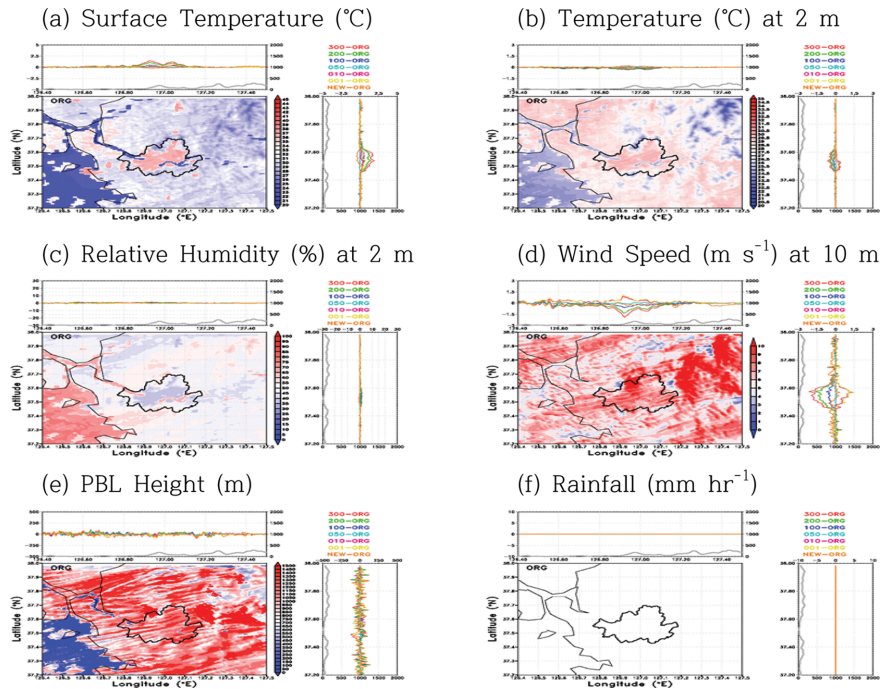


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for Case 2 (from 0000 UTC 9 August 2014).

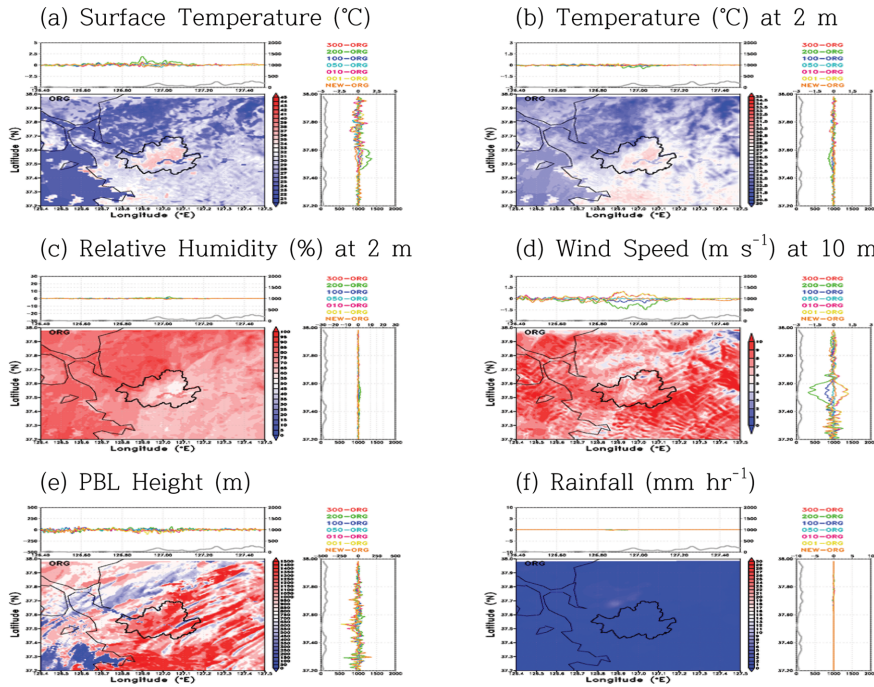


Fig. 9. Same as Fig. 7 except for Case 3 (from 0000 UTC 10 August 2014).

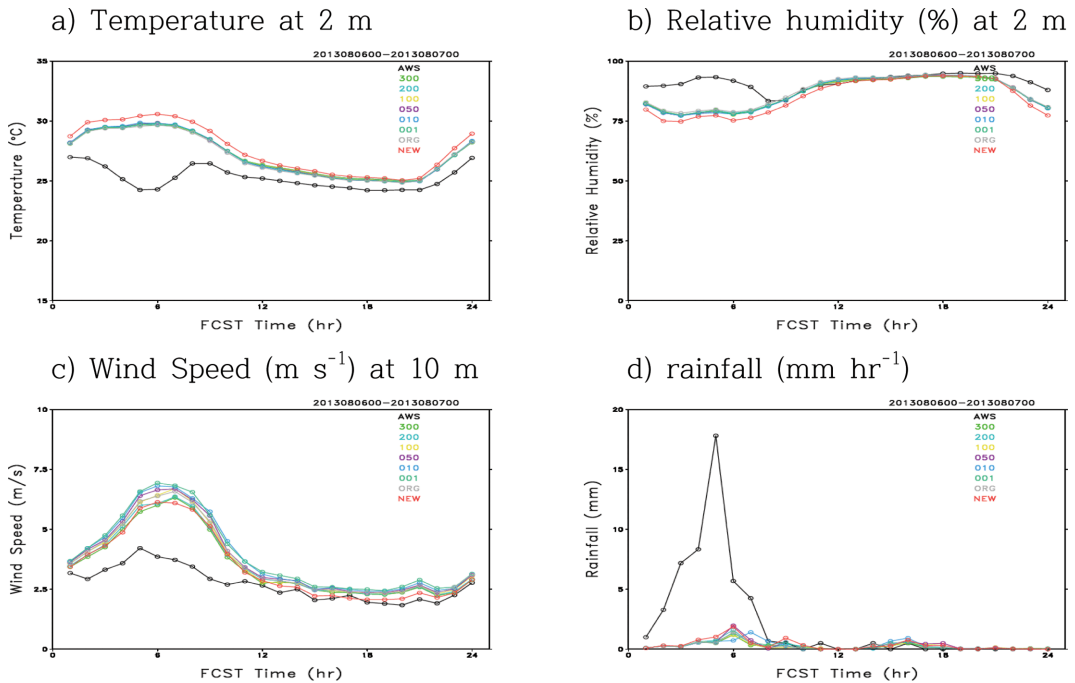


Fig. 10. Timeseries of temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 2 m, relative humidity (%) 2 m, wind speed (m s^{-1}) at 10 m and rainfall (mm hr^{-1}) with time averaged 103 AWS stations in Seoul metropolitan area by all experiments simulated 24 hr from 0000 UTC 6 August 2013.

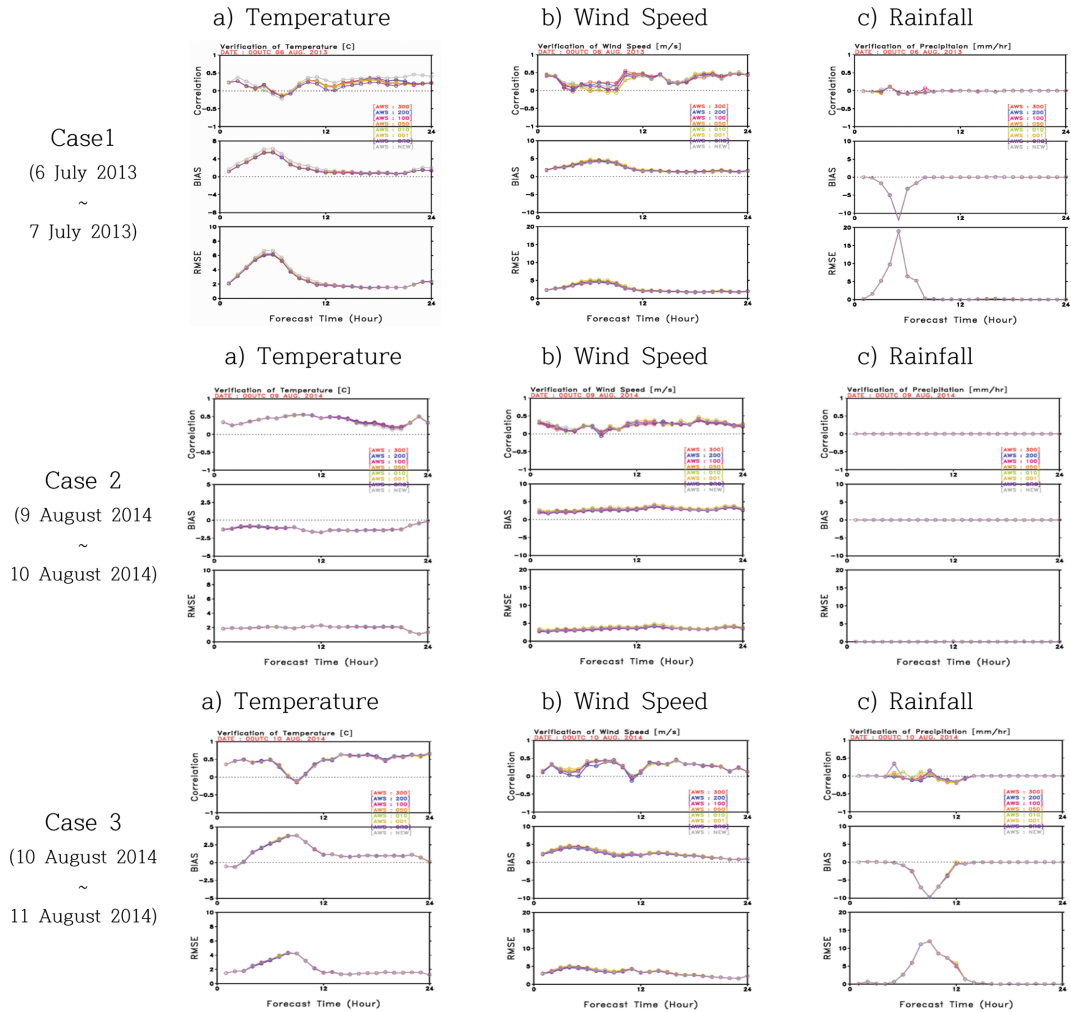


Fig. 11. Temporal statistics of temperature at 2 m, wind speed at 10 m and rainfall between all experiments and observation with 103 AWS stations in Seoul metropolitan area for 3 cases.

가 증가됨에 따라 지표면온도는 상승, 2 m 기온 하강, 2 m 상대습도 감소, 풍속은 감소되는 관계성이 나타났고 지표면 거칠기 길이가 감소됨에 따라 반대의 관계성이 나타났다. 또한 NEW 실험은 지표면 거칠기 길이가 작은 010과 유사한 관계성이 나타났으며, 실험 1, 3과 마찬가지로 다른 실험과 달리 그 편차가 해안과 하천 근처에서 크게 나타났다.

3.2 모의결과 검증

세 가지 사례에 대한 WISE-WRF 모델의 예측결과는 수도권지역의 103개 AWS 관측자료와 비교하여 통계 분석하였다. 먼저, 사례 1의 모의 결과를 2 m 기온, 10 m 풍속, 2 m 상대습도, 강수량 관측과 비교하였다(Fig. 10). 수치모의 결과 전체적으로 2 m 기온은

과대 모의하였고, 2 m 상대습도는 과소 모의, 풍속은 과대 모의하였고 강수량은 과소 모의하였다. 수치모의 초반에 강수가 있었으나 약한 강수모의로 기온은 감소를 전혀 모의하지 못하였다. 상대습도의 경우는 모델에서 2 m 상대습도의 경우 수증기 혼합비의 급격한 감소로 상대습도를 표제대로 표현하지 못하기 때문에 변화경향만을 보았을 때 초기의 상대습도 증가를 따라 가지 못하고 있으나 후반의 경향은 유사하다. 풍속의 경우 과대 모의하였으나 변화경향은 유사하게 나타났다. 강수의 경우도 정량적인 강수량은 다르나 강수시간 등의 정성적인 강수는 유사한 경향으로 나타났다. NEW 실험은 다른 실험과는 유사하나 상대습도와 기온의 편차는 크게 나타났고 풍속과 강수의 편차는 작았다.

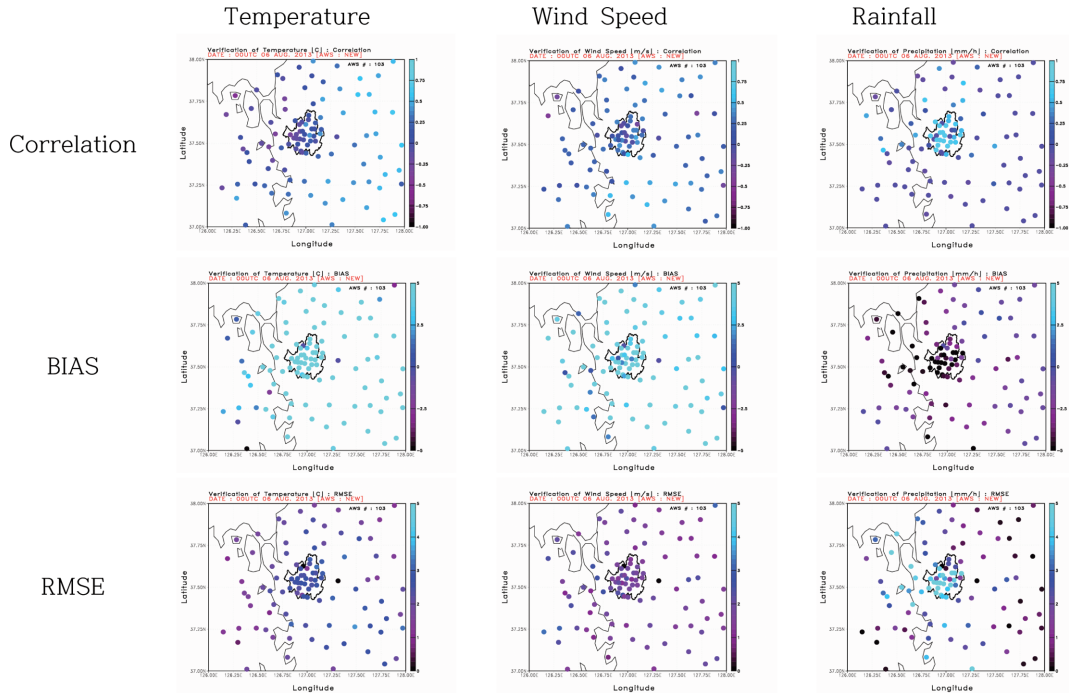


Fig. 12. Spatial statistics of temperature at 2 m, wind speed at 10 m and rainfall between NEW and observation with 103 AWS stations in Seoul metropolitan area from 0000 UTC 6 August 2013 to 0000 UTC 7 August 2013.

세 가지 사례의 2 m 기온, 풍속, 강수에 대하여 상관계수, 편차, 평균제곱근오차(RMSE; Root Mean Square Error) 및 편이(bias)의 통계분석을 하였다(Fig. 11). 모의초기 2 m 기온의 과대모의한 시간대에서 상관계수가 급격히 감소하였고 편차가 2.5°C 이상 그리고 RMSE가 4°C 이상 나타났으며, 사례 1과 2에서 NEW 방법의 편차가 크게 계산되었다. 풍속도 대체로 초기시간에 상관계수가 작았고 편차, RMSE가 크게 나타났다. 강수량의 경우 초기 강한 강수에서 상관성이 급격히 감소하였고 편차와 RMSE가 크게 계산되었다.

Figure 12에서 공간 통계분석의 결과 NEW 방법은 대체로 양의 상관성이 나타났으나 2 m 기온의 경우 서울 내의 지점과 서울의 북서쪽 지점들에서 음의 상관성이 나타났다. 2.5°C 이상 양의 편차가 나타났고 3°C 이하의 RMSE가 나타났다. 풍속의 경우는 서울 내부에서 큰 음의 상관성이 나타났고 2.5 m s⁻¹ 이하의 양의 편차가 나타났고 2 m s⁻¹ 이하의 RMSE가 나타났다. 강수의 경우 서울 내부에서는 양의 상관성이 있었으나 서울 외곽의 수도권 지역에서는 음의 상관성이 나타났고 서울 내부를 중심으로 5 mm hr⁻¹의 음의 편차가 나타났으며, RMSE는 4 mm hr⁻¹ 이상이였다.

지표면 거칠기 길이와 상관성이 높은 풍속에 대하여 사례별 통계값을 Table 4에 정리하였다. 그리고 강

수가 있었던 사례(사례 1, 3)의 경우 대체로 지표면 거칠기가 클 때 풍속의 상관성이 높고 편차와 RMSE가 작았다. 그리고 맑은 사례(사례 2)의 경우 지표면 거칠기가 작을수록 관측과 상관성은 높았으나 편차와 RMSE는 지표면 거칠기가 클수록 관측과 유사한 결과를 보였다. NEW 방법은 대체로 상관성은 ORG 방법과 비슷하였으나 편차, RMSE가 ORG 방법보다 모든 사례에서 개선되었다.

4. 요약 및 결론

모델에서 지표유형별 지표면 거칠기 길이는 지표면 마찰, 난류강도와 규모, 풍속 등에 영향을 미친다 (Landsberg, 1981; Ng et al., 2011). 그러나 기상수치모의 연구에서는 모델에서 제공하고 있는 조건표를 그대로 적용하여 모의를 수행할 수밖에 없는 실정이다. 따라서 도시기상정보 생산을 위한 기상모델의 개선 연구로서 도시기상에서 활용할 수 있는 수치지도 기반의 도시 지표면 거칠기 길이를 수치모델에 적용하고, 이를 통한 기상모의의 결과를 분석하였으며 특히, 지표면 거칠기 길이와 기상변수 사이의 관계성을 분석하였다.

WISE-WRF 모델을 이용한 기상수치모의 결과, 마

Table 4. Statistics of wind speed at 10 m between all experiments and observation with 103 AWS stations in Seoul metropolitan area from three cases. Shaded values are highest statistics values.

CASE	z_0	Statistics		
		Correlation	BIAS ($m s^{-1}$)	RMSE ($m s^{-1}$)
Case 1 (6 July 2013~ 7 July 2013)	300	0.42	2.05	2.55
	200	0.42	2.11	2.60
	100	0.43	2.19	2.70
	050	0.43	2.28	2.79
	010	0.42	2.37	2.88
	001	0.41	2.42	2.94
	ORG	0.42	2.41	2.71
	NEW	0.42	1.97	2.50
Case 2 (9 August 2014~ 10 August 2014)	300	0.39	2.53	3.02
	200	0.39	2.63	3.10
	100	0.40	2.78	3.23
	050	0.40	2.89	3.33
	010	0.40	3.16	3.58
	001	0.39	3.17	3.60
	ORG	0.40	2.88	3.33
NEW	0.40	2.85	3.29	
Case 3 (10 August 2014~ 11 August 2014)	300	0.55	2.12	2.84
	200	0.55	2.12	2.84
	100	0.55	2.28	2.97
	050	0.55	2.36	3.06
	010	0.56	2.51	3.22
	001	0.56	2.53	3.22
	ORG	0.55	2.35	3.05
NEW	0.55	2.31	3.01	

찰속도(U^*)는 Monin-Obukhov 상사이론에 의거하여 계산된 값으로 지표면 거칠기 길이에 의존적으로 계산되었다. 기온과 풍속은 ORG 실험과 비교하여 지표면 거칠기 길이의 차이가 큰 실험들에서 풍속측인 서울의 북동쪽에 기온의 변화가 크게 나타났고 지표면 거칠기 길이가 줄어들수록 그 차이가 줄어들었다.

사례 1과 3은 흐리고 강수가 있었던 사례로 지표면 거칠기 길이에 따른 실험의 결과 기상변수와의 관계는 지표면온도, 풍속 등에서 뚜렷이 나타나고 있으나 그 외의 변수와는 구름의 분포 등 다른 기상변수에 의존적인 것으로 분석된다. 실험 2는 대체로 맑았던 사례이며 지표면 거칠기 길이와 지표면 온도, 2 m 기온, 상대습도, 10 m 풍속 등에서 뚜렷한 관계성을 보였다.

WISE-WRF 모델의 예측된 변수들의 시계열을 분석하면, 마찰속도와 풍속은 초기시간부터 지표면 거칠기 길이에 의존적이었고 지표면 거칠기 길이가 큰 실험에서 마찰속도는 강하게 나타났으며 풍속은 약하게 나타났다. ORG 실험은 050과 100 실험 사이에서 변화하였고 NEW 실험은 100과 200 실험 사이의 값으

로 모의되었으나 변화가 심하였다.

수도권 103개 AWS 관측된 평균 2 m 기온, 10 m 풍속, 2 m 상대습도, 강수량 관측과 비교하였을 때 2 m 기온은 과대 모의하였고 2 m 상대습도는 과소 모의되었고 풍속은 과대 모의하였으며 강수량은 과소 모의하였다. 풍속은 대체로 초기시간에 상관관계가 낮았고 편차와 RMSE가 크게 나타났다. 강수량은 초기 강한 강수에서 상관성이 급격히 감소하였고 편차와 RMSE가 컸다. 공간 통계분석의 결과 풍속의 경우는 서울 내부에서 음의 상관성이 나타났고 $2.5 m s^{-1}$ 이하의 양의 편차와 $2 m s^{-1}$ 이하의 RMSE가 나타났다. 흐리고 강수가 있었던 사례에서 대체로 지표면 거칠기가 클 때 상관성이 높았고 편차가 작았으며 RMSE는 작았다. 맑았던 사례 2의 경우 지표면 거칠기가 작을수록 관측과 상관성은 높았으나 편차와 RMSE가 컸다. NEW 방법은 대체로 상관성은 가장 높게 나타났고 편차와 RMSE는 ORG 방법과 비교하여 작았다.

지표면 거칠기 길이의 변화에 따른 수치모의 결과는 풍속의 변화와 밀접한 관계성이 있었고 풍속의 변화에 기온, 습도 등의 변화에 기인되어 강수의 위치

와 강수량에 변화가 있었다. AWS 관측자료를 이용하여 검증한 결과 새롭게 개선된 방법에 의하여 더 정확한 기온 및 풍속을 모의할 수 있었다. 따라서 현실에 맞는 실측자료를 통하여 모델의 알베도, 지표면 습윤도, 방출률 등의 지표면 특성자료의 개선이 필요한 것으로 분석된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다 (KMIPA-2012-0001-1).

REFERENCES

- André, J. C., and C. Blondin, 1986: On the effective roughness length for use in numerical three-dimensional models. *Boundary-Lay. Meteorol.*, **35**, 231-245.
- Barlag, A. B., and W. Kuttler, 1991: The significance of country breezes for urban planning. *Energy Build.*, **15**, 291-297.
- Bornstein, R. D., 1968: Observations of the urban heat island effect in New York City. *J. Appl. Meteorol.*, **7**, 575-582.
- Bottema, M., 1996: Roughness parameters over regular rough surfaces: Experimental requirements and model validation. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **64**, 249-265.
- Cao, M., and Z. Lin, 2014: Impact of urban surface roughness length parameterization scheme on urban atmospheric environment simulation. *J. Appl. Math.*, **2014**, Article ID 267683, doi:10.1155/2014/267683.
- Chen, F., S. Miao, M. Tewari, J. 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. *J. Geophys. Res.*, **116**, D12105, doi:10.1029/2010JD015533.
- Dong, Z., X. Liu, H. Wang, and X. Wang, 2003: Aeolian sand transport: a wind tunnel model. *Sediment. Geol.*, **161**, 71-83.
- Donlon, C. J., M. Martin, J. D. Stark, J. Roberts-Jones, E. Fiedler, and W. Wimmer, 2011. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA). *Remote Sens. Environ.*, **116**, 140-158, doi:10.1016/j.rse.2010.10.017.
- Gál, T., and Z. Sümegehy, 2007: Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications. *Acta Clim. ET Chorol.*, **2007**, 40-41.
- Grimmond, C. S. B., and C. Souch, 1994: Surface description for urban climate studies: a GIS based methodology. *Geocarto Int.*, **9**, 47-59.
- _____, and T. R. Oke, 1999: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **38**, 1262-1292.
- Ha, K. J., A. S. Suh, and H. S. Chung, 1998: The application of satellite data to land surface process parameterization in ARPS model. *J. Korean Assoc. Geog. Inform. Stud.*, **1**, 99-108.
- Hidalgo, J., V. Masson, and L. Gimeno, 2010: Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **49**, 889-901.
- Hong, S. Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Weather Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Hu, X., J. W. Nielsen-Gammon, and F. Zhang, 2010: Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **49**, 1831-1844.
- Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model. NCEP Office Note No. 437, 61 pp.
- Kanda, M., M. Kanega, T. Kawai, R. Moriwaki, and H. Sugawara, 2007: Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **46**, 1067-1079.
- Landsberg, H. E., 1981: *The Urban Climate*. Academic Press, 285 pp.
- Lee, Y.-H., and S.-U. Park, 1997: Modification of boundary layer by a change of surface roughness. *J. Korean Meteorol. Soc.*, **33**, 445-456.
- Loridan, T., and C. S. B. Grimmond, 2012: Characterization of energy flux partitioning in urban environments: links with surface seasonal properties. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **51**, 219-241.
- Macdonald, R. W., R. F. Griffiths, and D. J. Hall, 1998: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- Monin, A. S., and A. M. Obukhov, 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, **151**, 163-187.
- Ng, E., C. Yuan, L. Chen, C. Ren, and J. C. Fung, 2011: Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong. *Landscape. Urban Plan.*, **101**, 59-74.
- Oke, T. R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Methuen, Inc., 435 pp.
- 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.
- Pleim, J. E., 2007: A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **46**, 9, 1383-1395.
- Priestnall, G., J. Jaafar, and A. Duncan, 2000: Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems*, **24**, 65-78.
- Ratti, C., and P. Richens, 1999: Urban texture analysis with image processing techniques. In *Computers in Building*. Springer, 49-64 pp.
- _____, S. Di Sabatino, and R. Bitter, 2006: Urban texture analysis with image processing techniques: wind and dispersion. *Theoretical and Appl. Clim.*, **84**, 77-99.
- Raupach, M., 1992: Drag and drag partition on rough surfaces. *Boundary-Lay. Meteorol.*, **60**, 375-395.
- Reijmer, C. H., E. van Meijgaard, and M. R. van den Broeke, 2004: Numerical studies with a regional atmospheric climate model based on changes in the roughness length for momentum and heat over Antarctica. *Boundary-Lay. Meteorol.*, **111**, 313-337.
- Ryu, Y. H., J. J. Baik, K. H. Kwak, S. Kim, and N. Moon, 2013: Impacts of urban land-surface forcing on ozone air quality in the Seoul metropolitan area. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 2177-2194.
- Salamanca, F., A. Martilli, M. Tewari, and F. Chen, 2011: A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **50**, 1107-1128.
- 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, 113 pp.
- Steiniger, S., T. Lange, D. Burghardt, and R. Weibel, 2008: An approach for the classification of urban building structures based on discriminant analysis techniques. *Transactions in GIS*, **12**, 31-59.
- Sud, Y. C., J. Shukla, and Y. Mintz, 1988: Influence of land surface roughness on atmospheric circulation and precipitation: a sensitivity study with a general circulation model. *J. Appl. Meteorol.*, **27**, 1036-1054.
- Voogt, J. A., and T. R. Oke, 1997: Complete urban surface temperatures. *J. Appl. Meteorol.*, **36**, 1117-1132.
- Vukovich, F. M., 1971: Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex. *Mon. Weather Rev.*, **99**, 919-926.
- Wang, W., C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H.-C. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, and X. Zhang, 2010: Weather Research & Forecasting, ARW Version 3 Modeling System User's Guide. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, Boulder, Co, Natl. Center. Atmos. Res., 350 pp.
- Xiu, A., and J. E. Pleim, 2001: Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 192-209.
- Yi, C., T. H. Kwon, M. S. Park, Y. J. Choi, and S. M. Ahn, 2015: A study on the roughness length spatial distribution in relation to the seoul building morphology. *Atmosphere*, **25**, 339-351.
- Yoo, J., J. K. Hong, H. Kwon, J. H. Lim, and J. Kim, 2010: On estimation of zero plane displacement from single-level wind measurement above a coniferous forest. *Korean Agric. Forest Meteorol.*, **12**, 45-62.