

수도권 지역에서의 고해상도 지형과 지면피복자료에 따른 수치모의 민감도 실험

박성화 · 지준범* · 이채연

한국의국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단

(접수일: 2015년 3월 4일, 수정일: 2015년 3월 31일, 게재확정일: 2015년 4월 22일)

Sensitivity Test of the Numerical Simulation with High Resolution Topography and Landuse over Seoul Metropolitan and Surrounding Areas

Sung-Hwa Park, Joon-Bum Jee*, and Chaeyon Yi

Weather Information Service Engine, Hankuk University of Foreign Studies, Gyeonggi-do, Korea

(Manuscript received 4 March 2015; revised 31 March 2015; accepted 22 April 2015)

Abstract The objective of this study is to evaluate the impact of the high resolution topographies and landuses data on simulated meteorological variables (wind speed at 10 m, temperature at 2 m and relative humidity at 2 m) in WRF. We compare the results with WRF simulation using each resolution of the topographies and landuses, and with 37 AWS observation data on the Seoul metropolitan regions. According to results of using high-resolution topography, WRF model gives better topographical expression over domain. And we can separate more detail (Low intensity residential, high intensity residential, industrial or commercial) using high resolution landuses data. The result shows that simulated temperature and wind speed are generally higher than AWS observation data. However, simulation trend with temperature, wind speed, and relative humidity are similar to observation data. The reason for that is that the high precipitation event occurred in CASE 1 and 2. Temperature have correlation of 0.43~0.47 and standard deviation of 2.12~2.28°C in CASE 1, while correlation of more than 0.8 and standard deviation of 3.05~3.18 m s⁻¹ in CASE 2. In case of wind speed, correlation have lower than 0.5 and Standard Deviation of 1.88~2.34 m s⁻¹ in CASE 1 and 2. In statistical analysis shows that using highest resolution (U01) results are more close to the AWS observation data. It can be concluded that the topographies and landuses are important factor that affect model simulation. However, the tendency to always use high resolution topographies and landuses data appears to be unjustified, and optimal solution depends on the combination of scale effect and mechanisms of dynamic models.

Key words: High resolution topographies and landuses, WRF, Seoul metropolitan areas

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 집중호우, 폭설, 가뭄 및 폭

염 등의 위험기상은 인구와 산업이 밀집된 도시지역에서 인적, 물질 피해가 집중되어 나타나고 있다. 도시지역은 주변지역과 달리 인구, 교통량, 고밀·고층화된 건축물 및 연료소비, 도로와 같은 인위적인 요인으로 인하여 에너지수지, 공기의 흐름, 지표의 거칠기 등의 특유의 기상현상이 있다. 이를 이해하기 위하여 도시에서의 기상현상을 예측하는 다양한 연구들이 진행되어 왔다(Landsberg, 1970; Olfe and Lee,

*Corresponding Author: Joon-Bum Jee, Weather Information Service Engine, Hankuk University of Foreign Studies, 81, Oedae-ro, Mohyeon-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 449-791, Korea.
Phone : +82-70-4617-3764, Fax : +82-31-321-6470
E-mail : rokmcjib717@gmail.com

Table 1. Descriptions of the digital Elevation Model (DEM) and landuse.

Resolution	Digital Elevation Model	Land use
3600 m × 3600 m (S01)	USGS	USGS
900 m × 900 m (R01)	USGS	Korea Land Cover
90 m × 90 m (T01)	SRTM	National Geographic Institute (1:50,000)
30 m × U30 m (U01)	National Geographic Institute	National Geographic Institute (1:25,000)

1971; Garstang et al., 1975; Oke, 1982; Draxler, 1986; Lin and Smith, 1986; Oke, 1987; Baik et al., 2001; Shepherd et al., 2002; Kim and Baik, 2005; Kim et al., 2008; Choi et al., 2013). 특히 파리, 마르세유, 솔트레이크, 바젤 등 세계 다양한 도시에서의 난류 및 열역학적 구조 특성 등에 대한 많은 관측 연구를 수행하였다(Dupont et al., 1999; Allwine et al., 2002; Mestayer et al., 2005; Rotach et al., 2005). 또한, 수치모형에서 도시의 특성을 반영할 수 있는 다양한 지표 모수화 방법들을 적용하여 도시 건물과 인공열을 고려하여 지붕, 벽, 도로의 지면 온도, 도시경계층 높이 및 열플럭스 등을 추정하는 연구들이 진행되고 있다(Lee et al., 2011).

도시지역 기상 수치모형에서 지형과 지면 피복자료는 정확한 기상예측을 위한 중요한 입력 요소들이고, 도시와 같이 복잡하고 다양한 지역의 현실적 표현을 위해서는 보다 높은 해상도를 가지는 자료가 요구된다.

수치모형에서 지형은 지역적인 순환에 영향을 미쳐 강수가 나타나는 지역, 바람의 흐름, 기온의 분포 등을 변화시키는 중요한 요소이며, 지면 피복자료는 지면과 대기 사이의 에너지 및 물 평형 등에 영향을 주어 국지 및 지역기후를 변화시키는 데 중요한 역할을 한다(Kabat et al., 2002; Taylor et al., 2002).

De Meij and Vinuesa (2014)는 이탈리아 북쪽지역에서 고해상도의 지형과 지면피복자료를 적용한 WRF 수치모형 실험 결과, 도시의 높은 마찰력과 거칠기의 영향으로 풍속은 낮게, 기온은 높게 추정하였다. Zhang (2014) 등은 홍콩에서 해상도에 따른 지형을 이용하여 WRF 모의한 결과, 온도와 상대습도가 고해상도의 지형자료를 이용하였을 때 관측 값에 더 유사하였으며, 수치모형 수행에서 지형자료의 해상도가 중요한 역할을 한다고 하였다.

Grossman-Clarke (2010) 등과 Lin (2008) 등은 미국의 피닉스와 대만의 북쪽지역에서 WRF/UCM 모형을 사용하여 적절한 지면 피복자료가 하층대기의 온도에 영향을 준다고 하였고, 하원실과 이재규(2011)는 WRF 모형의 지면 피복자료 개선을 통해 영동지역 해풍 발달의 모의 결과를 개선할 수 있음을 보였다. 서범근(2010) 등은 WRF 모형을 이용하여 기존의 지면 피복자료를 개선하여 현실적으로 반영하였을 때, 지상 바

람이 관측 값에 가까워진다고 하였다.

수치모의 성능에 대한 지형자료 해상도의 영향에 대한 많은 연구가 진행이 되었으나, 지형자료와 지면 피복자료와 같이 해상도가 다른 자료를 이용한 수치모의에 대한 연구는 부족한 실정이다. 수치모의의 성능을 향상시키기 위해서 각기 다른 해상도를 가지는 지형 및 지면 피복자료를 동시에 이용한 규모에 따른 효과를 이해하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 수치모형 실험을 통하여 서울 지역에서의 해상도별 지형자료와 지면 피복자료에 따른 특성을 분석하였으며, 실제 관측자료와 비교하여 도시에서의 기상 특성에 대하여 논하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 연구대상지역

연구대상지역은 서울지역으로 한강이 가로지르고 있으며 남쪽과 북쪽으로 산악이 있고 주변지역에는 주거를 위한 신도시가 위치하고 있다. 서울을 포함한 수도권지역은 1960년대 이후 인구집중과 도시화로 인해 자연훼손, 열섬현상 등의 문제를 야기하고 있으며, 지역에 따라 개발 정도의 차이가 나타나고, 토지이용 형태가 상이하여 녹지의 규모 및 분포특성이 다양하게 나타나고 있다.

2.2 지형 및 지면피복자료

지형자료와 피복자료는 해상도에 따라 S01 (3600 m × 3600 m), T01 (900 m × 900 m), S01 (90 m × 90 m), 그리고 R01 (30 m × 30 m)로 나누었다. S01의 경우 3600 m 해상도로 미국 지질조사원(USGS)에서 제작된 수치고도모형자료(DEM)와 33개로 분류된 지면피복자료를 사용하였다(Loveland et al., 2000). R01은 900 m 해상도로 수치모형자료는 USGS, 지면피복자료는 한반도 지면피복(Korea Land Cover: KLC) 분류체계를 (Kang et al., 2007) USGS 33개 분류체계로 재분배하여 사용하였다. T01은 90 m 해상도로 항공우주국(NASA)의 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 자료(CGIAR-CSI, 2012)와 국립지리원에서 제공되는 대분류 토지이용자료를 사용하여 33개로 재분배하여 사용하였다. 마지막으로 T01은 30 m 해상도로 국립지

Table 2. Specification of landuse categories from USGS 33.

Category	Specification	Category	Specification
1	Urban and Built-Up Land	18	Wooded Wetland
2	Dryland Cropland and Pasture	19	Barren or Sparsely Vegetated
3	Irrigated Cropland and Pasture	20	Herbaceous Tundra
4	Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture	21	Wooded Tundra
5	Cropland/Grassland Mosaic	22	Mixed Tundra
6	Cropland/Woodland Mosaic	23	Bare Ground Tundra
7	Grassland	24	Snow or Ice
8	Shrubland	25	Playa
9	Mixed Shrubland/Grassland	26	Lava
10	Savanna	27	White Sand
11	Deciduous Broadleaf Forest	28	Unassigned
12	Deciduous Needleleaf Forest	29	Unassigned
13	Evergreen Broadleaf Forest	30	Unassigned
14	Evergreen Needleleaf Forest	31	Low Intensity Residential
15	Mixed Forest	32	High Intensity Residential
16	Water Bodies	33	Industrial or Commercial
17	Herbaceous Wetland		

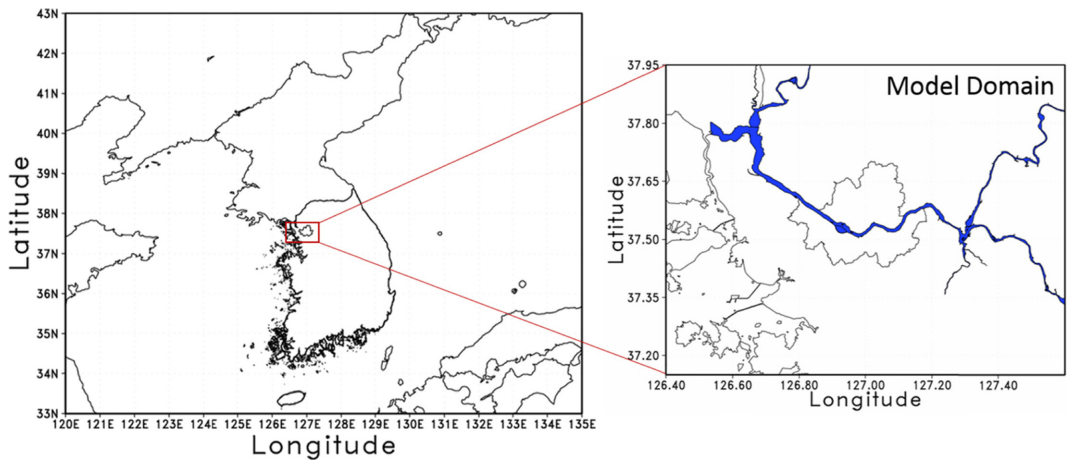


Fig. 1. Model domain for numerical simulation using the WRF model.

리원에서 제공되는 지형자료와 중분류 토지이용자료를 USGS 33개 분류체계로 재분류하여 이용하였다 (Table 1). USGS 33개 분류의 지면피복 (Table 2)에서 32는 도시의 건물의 밀도에 따라 분류된 도시지역으로 구분된다. 지면피복자료에서 33은 공업 또는 상업 지역으로서 서울 주변에 발달한 신도시 또는 공업지역, 그리고 30 이하로 분류된 곳은 산림, 나대지 또는 하천 등의 지역으로 도시화가 이루어지지 않은 지역이 서울 주변으로 나타나고 있다 (Jee and Choi, 2014).

2.3 수치모의

본 연구에서 사용한 수치모델은 미국의 NCAR

(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 중규모 모델인 WRF (Weather Research and Forecasting, Skamarock et al., 2008) V3.6이며, 비정역학 모형으로 미세규모, 중규모 기상현상을 적절히 모의한다. 수도권 지역에 대한 수치모의를 위해 초기 입력자료는 기상청에서 제공하는 12 km의 UM 지역 모델 예측장을 이용하였고 고해상도 지형고도 및 지면피복의 민감도 실험을 위하여 500 m 간격으로 211 (동서) × 181 (남북)의 수평격자를 설정 (Fig. 1)하여 고해상도 수치모의를 수행하였다. 연직 층은 50개의 층으로 구성하였고 미세물리과정은 YSU 방안 (Hong et al., 2006), 지면모델과 land surface는 Pleim (Xiu and

Table 3. Configuration of WRF for numerical simulation.

	Configuration	Case
Horizontal grids	211 × 181	
Horizontal resolution (m)	500 × 500	0000 UTC 06 Aug. 2013~0000
Initial Boundary Condition	UM Regional Model Forecast Field (12 km, KMA)	UTC 07 Aug. 2013 (CASE 1)
Vertical grid	50 layer	
	YSU microphysics	0000 UTC 10 Aug. 2014~0000
	Pleim Surface layer	UTC 11 Aug. 2014 (CASE 2)
Physics option	Pleim Land surface	
	ACM2 Planetary layer	
	RRTM & Dudhia Radiation	

Table 4. Specifications of AWS stations, KMA in this study area.

Station Number	Location	Altitude	Remarks
108	37.571 126.966	85.800	Urban
116	37.445 126.964	622.370	Rural
400	37.513 127.047	59.580	Urban
401	37.489 127.016	35.530	Urban
402	37.556 127.145	56.900	Urban
403	37.512 127.097	53.620	Urban
404	37.550 126.843	79.100	Rural
405	37.530 126.878	9.730	Urban
406	37.666 127.029	55.500	Urban
407	37.621 127.097	52.050	Urban
408	37.585 127.060	49.380	Urban
409	37.585 127.087	40.210	Urban
410	37.494 126.918	33.800	Urban
411	37.552 126.903	25.490	Urban
412	37.570 126.941	100.630	Rural
413	37.542 127.081	52.540	Urban
414	37.612 126.999	125.900	Urban
415	37.520 126.976	32.620	Urban
416	37.611 126.934	67.580	Urban
417	37.466 126.900	41.480	Urban
418	37.525 126.939	10.660	Rural
419	37.552 126.987	266.440	Rural
420	37.626 126.960	454.940	Rural
421	37.547 127.039	33.710	Urban
423	37.494 126.827	53.470	Urban
424	37.640 127.026	55.680	Urban
509	37.453 126.950	145.130	Rural
510	37.527 126.907	24.410	Urban
532	37.735 127.075	72.000	Urban
540	37.634 126.892	100.000	Rural
541	37.653 127.149	28.000	Urban
546	37.435 127.259	119.370	Urban
569	37.582 127.157	24.000	Rural
572	37.421 127.125	28.720	Rural
589	37.702 126.790	58.000	Urban
590	37.440 127.002	44.350	Rural
649	37.472 126.751	31.000	Rural

Pleim, 2001) 방안, 그리고 대기경계층은 ACM2 (Pleim and Chang, 1992)로 구성하였다(Table 3). 수치적분은 2013년 8월 6일 0000 UTC부터 8월 7일 0000 UTC까지(사례 1)와 2014년 8월 10일 0000 UTC부터 8월 11일 0000 UTC(사례 2)로 24시간 수행하였다.

2.3 사례 선정

수도권 지역에서의 해상도별 지형자료와 지면 피복 자료에 따른 수치모의 실험 결과를 실제 관측자료와 비교하기 위하여 2개의 사례를 선정하였으며, 2 m 기온과 10 m 풍속 자료를 서울을 포함한 연구지역에 37개의 관측소에서 관측된 1시간 간격의 자동기상관측(AWS) 자료와 비교 분석하였으며, 관측지점의 정보는 Table 4에 나타났다. 37개의 관측소 중에서 도시에 위치한 관측소는 25개소, 도시 이외의 지역에 위치한 관측소는 12개소로 도시에 위치한 관측소가 약 68%였다. 본 연구에서는 강수 이후 날씨가 호전되는 사례들을 선정하였다.

첫 번째 사례는 2013년 8월 6일이며 Fig. 2에는 0000 UTC의 일기도와 한반도지역의 위성영상을 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 번째 사례는 2014년 8월 10일이며 0000 UTC의 일기도와 한반도지역 위성영상은 Fig. 3과 같다. 태풍 ‘할롱’이 일본 큐슈 지역에 상륙하였고 이에 따라 태풍간접영향을 받아 동해안과 중부지역에 하층운이 분포함을 알 수 있다. 한반도 남서지역을 제외한 전역에 강수가 나타났으며, 특히 설악산지점(875)은 최대 271.5 mm, 서울지점(108)에서는 42.5 mm의 강수를 기록하였다.

3. 결 과

3.1 지형자료

Figure 4는 기상모의를 위하여 WRF 모델에 입력된

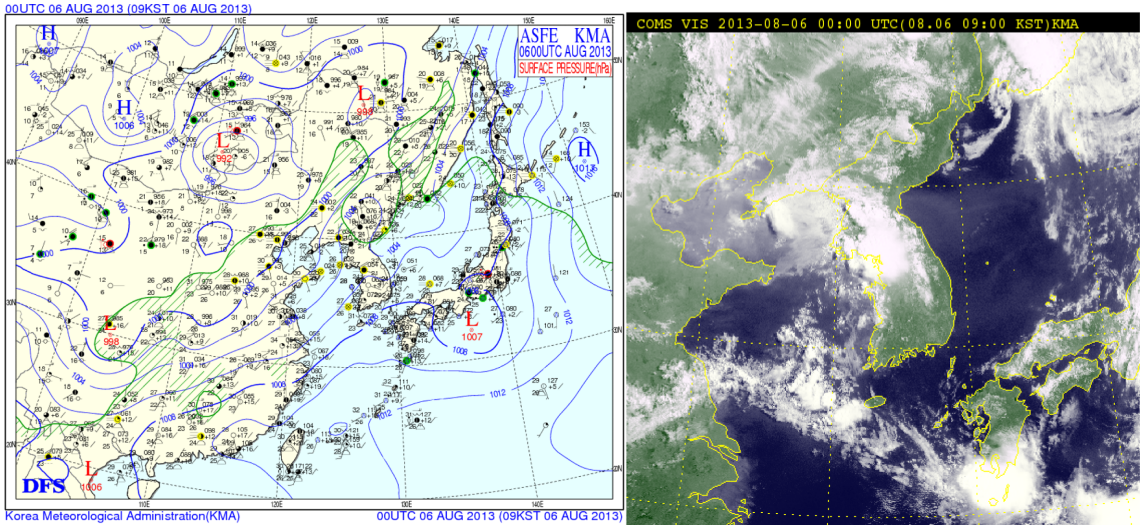


Fig. 2. Weather chart (left) and satellite image (right) at 0000 UTC 06 August 2013 (source: KMA).

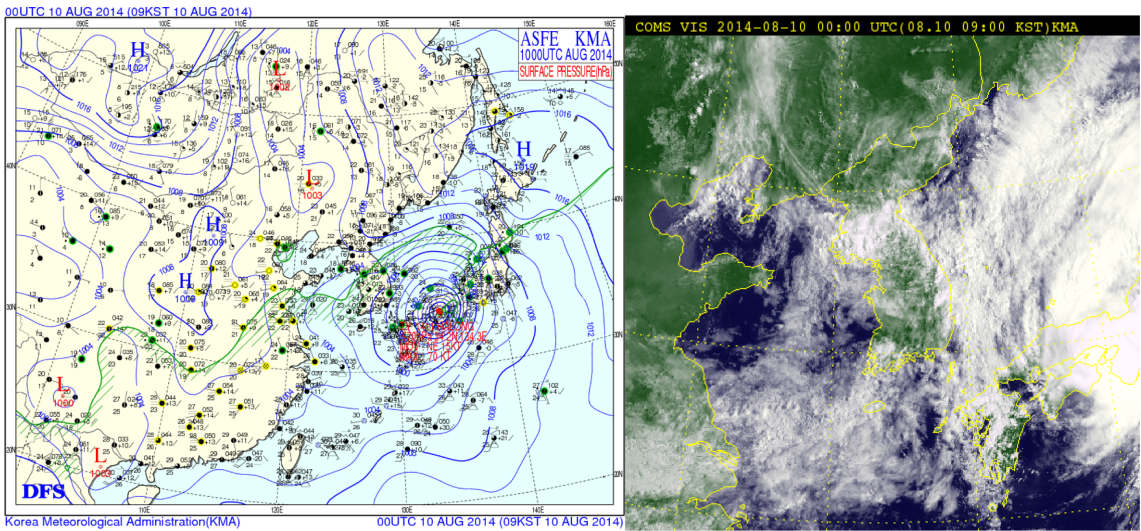


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for 0000 UTC 10 August 2014 (source: KMA).

해상도별 지형고도를 나타낸 것이다. S01, R01, T01, 그리고 U01 실험 순으로 해상도가 높아질수록 전체적으로 세밀한 지형을 나타내는 것을 알 수 있다. Figure 5는 Fig. 4에 입력된 지형고도를 이용하여 800 m 이상의 높은 지형에 대한 고도별 빈도분포를 나타낸 것이다. S01 실험의 경우 800m에서 850 m 사이의 빈도가 약 80% 나타나고 있고, 850 m에서 900 m 사이에 약 20%로 마지막 구간이 나타났다. R01, T01, 그리고 U01 실험의 해상도에서는 800m에서 1050 m 사이의 빈도가 비슷하게 나타나 S01 실험보다 더 세밀

한 지형을 나타내는 것을 볼 수 있다.

3.2 지표이용도 자료

Figure 6은 WRF 모델에 입력된 해상도별 지표이용도이며 지형자료와 유사하게 S01 실험에서 U01 실험으로 해상도가 높아질수록 전체적으로 세밀한 토지이용 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. S01 실험의 경우 서울지역을 1번 영역으로 표현한 반면, 해상도가 높아질수록 31, 32, 그리고 33에 해당하는 도시지역을 세분화하여 표현하는 것을 알 수 있다(Table 2). 그

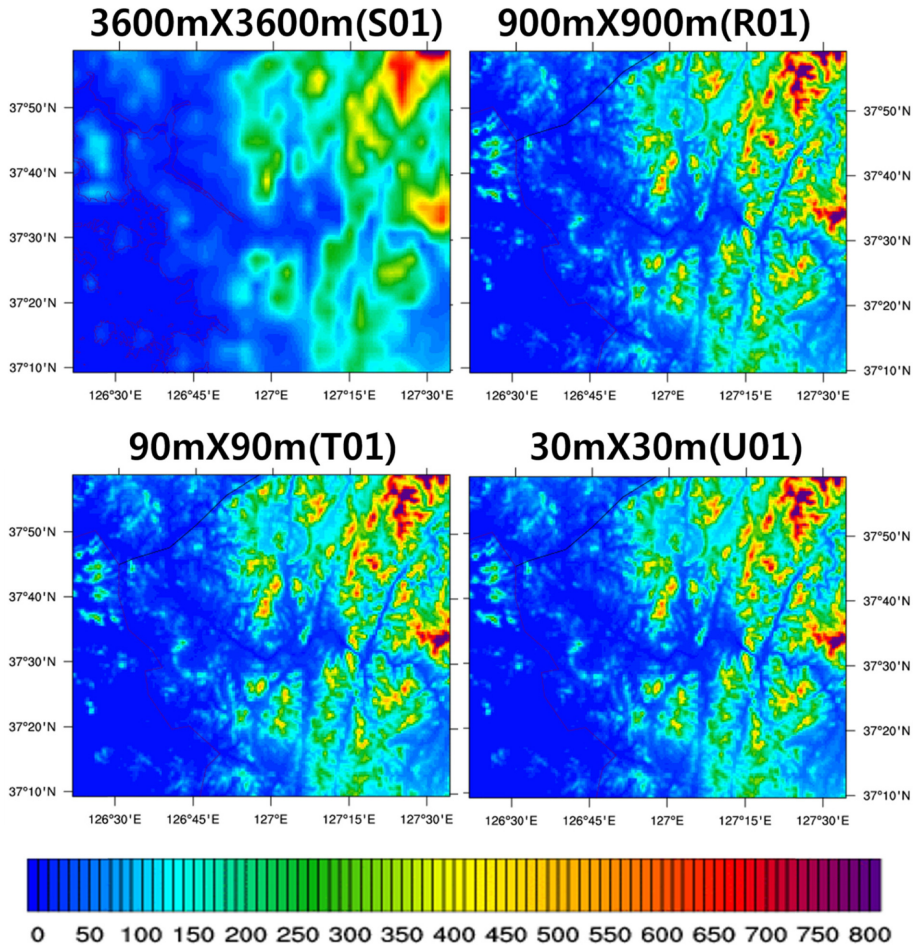


Fig. 4. Surface height (m) of WRF model domain. Each surface height is made from four different resolutions with S01, R01, T01 and U01, respectively.

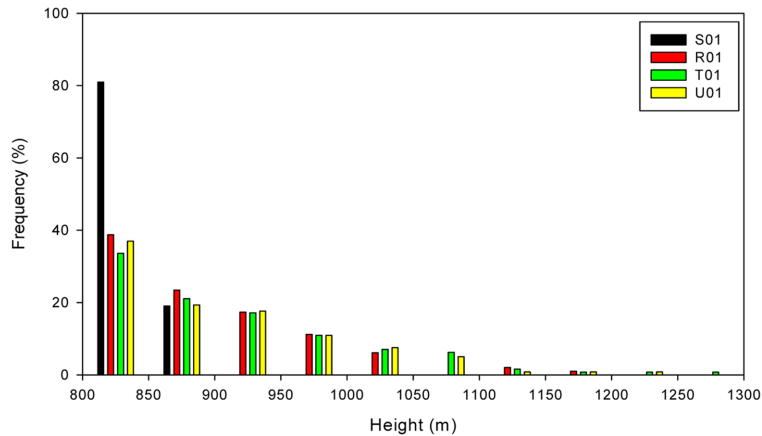


Fig. 5. Frequency distribution of height (m) over 800 m for WRF model domain. Digital Elevation Model (DEM) are S01, R01, T01 and U01 with resolution, respectively.

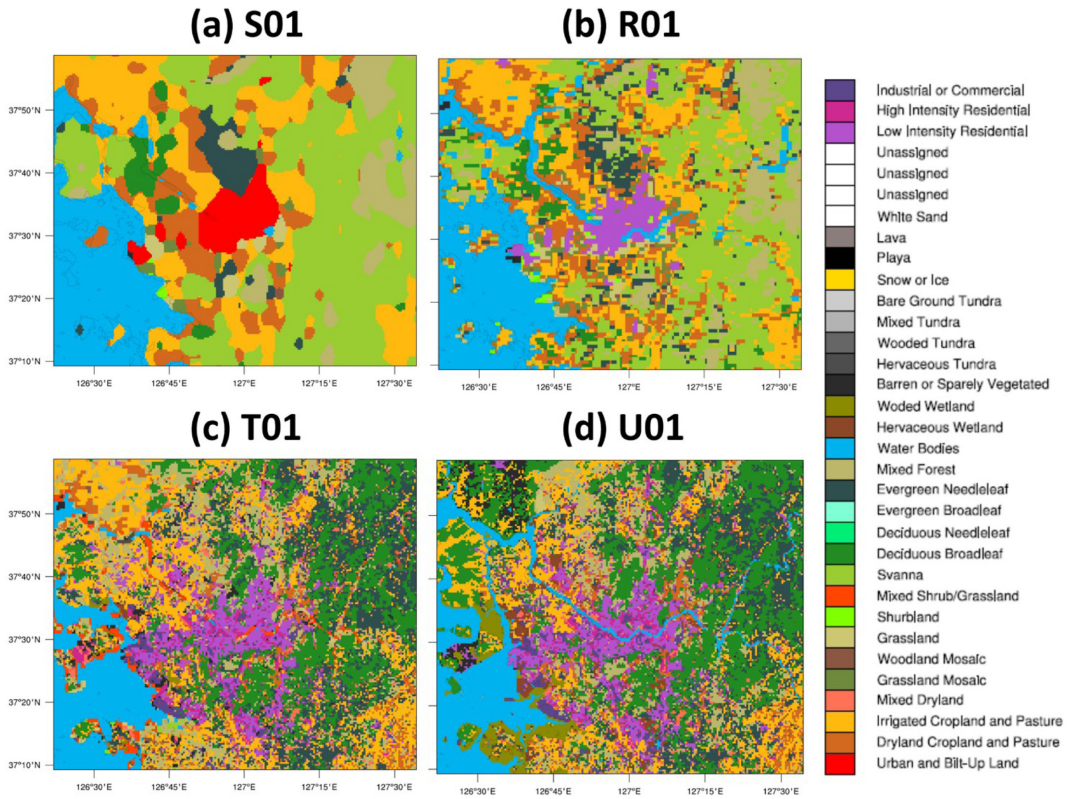


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for landuse.

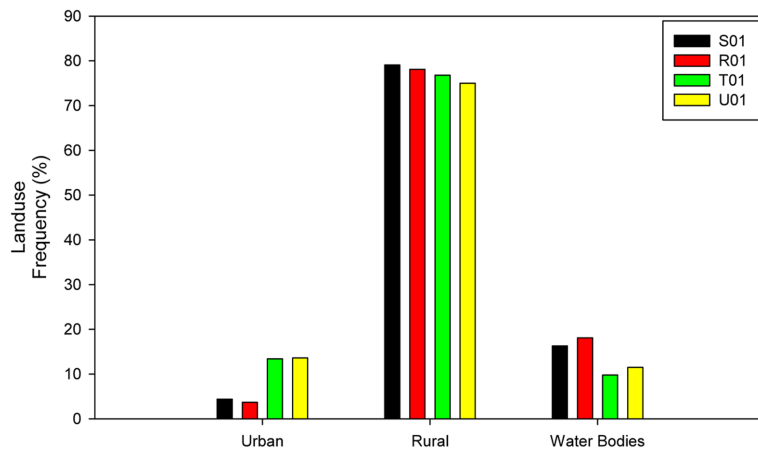


Fig. 7. Frequency distribution of urban, rural, and water bodies from landuse data with S01, R01, T01 and U01, respectively.

리고 서울 주변지역도 우리나라에 적합한 영역으로 표현함으로써 더 현실성 있게 표현할 수 있다. Figure 7은 각 해상도별 도시지역, 도시 이외의 지역, 바다 및 강 등의 물이 존재하는 지역의 비율을 나타낸 것이다. 도시지역은 S01과 R01 실험에서는 약 4%의 비

율로 나타나는 반면 해상도가 높아지는 T01과 U01 실험에서는 13% 이상을 차지하는 것을 알 수 있다. 반면 해상도가 높아질수록 도시 이외의 지역이 차지하는 비율이 줄어들었다. 물이 존재하는 지역은 S01과 R01 실험에서는 15% 이상 물이 존재하는 지역이

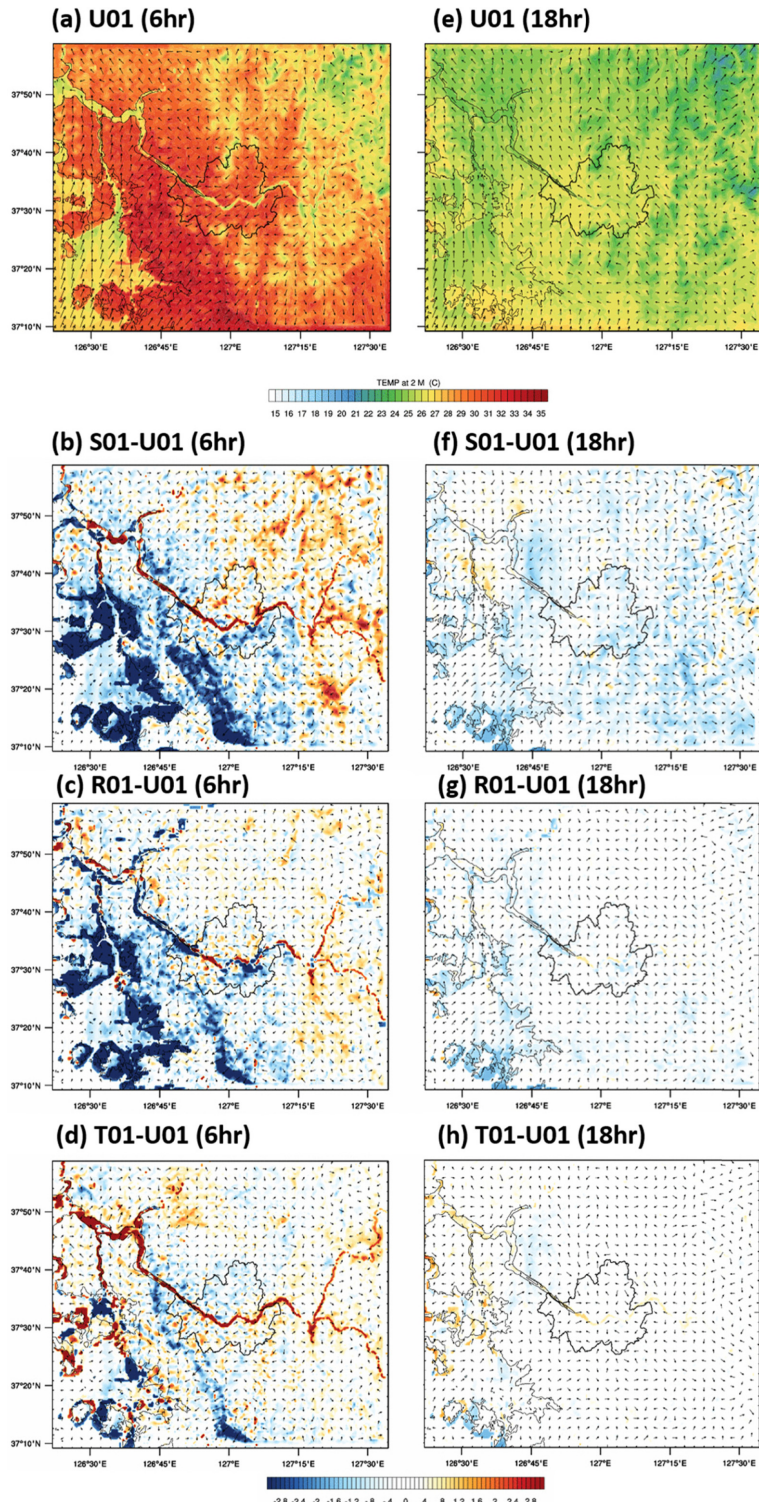


Fig. 8. Distribution of Temperature at 2 m and wind field at 10 m of U01 and difference between each experiments and U01 at 06 hr ((a), (b), (c), (d)) and 18 hr ((e), (f), (g), (h)) prediction from 0000 UTC 06 August 2013.

었고, T01과 U01 실험에서는 각각 9.8%와 11.5% 차지하였다. 전체적으로 해상도가 높아질수록 도시지역의 비율이 증가하고 도시 이외의 지역이 차지하는 비율이 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 물이 존재하는 지역의 비율은 해상도가 높아지면서 한강과 같은 지역을 상세히 표현을 하는 반면, 서해의 섬과 같은 지역이 육지로 표현하는 것을 알 수 있다.

3.3 해상도에 따른 수치모의 실험 결과

Figure 8은 2013년 8월 6일 0000 UTC부터 6시간과 18시간 예측한 U01 실험의 2 m 기온과 10 m 바람장(Figs. 8a, e), 그리고 U01 실험과 S01, R01, 그리고 T01 실험결과와의 차이를 보여준다(Figs. 8b, c, d, f, g, and h). 6시간 예측한 U01 실험에서는 전체적으로 분석영역의 남서쪽에서는 약 33°C 이상의 높은 기온과 남서풍이 불고 있으며, 분석영역 중심에 위치한 서울 지역은 전체적으로 30°C 이상의 고온이 나타났고 동풍 계열의 바람이 불고 있다(Fig. 8a). 서울지역의 바람장 분석 결과 U01 실험에서는 동풍 및 남동풍이 나타났으나, S01, R01, 그리고 T01 실험에서는 일정한 경향이 나타나지 않았다. 해상도가 높아질수록 남서 지역에 과소모의되었고 북서지역은 과대 모의되었으며, S01, R01, 그리고 T01의 실험과 U01 실험의 차이는 해상도가 높아질수록 기온의 차이가 점차 작아졌다. 그리고 U01 예측에서는 한강을 비롯한 강에서의 기온이 주변의 내륙지역보다 낮게 나타나고, 비교 실험에서는 강의 온도가 과대모의하는 경향이 나타났다(Figs. 8a, b, c, and d). 18시간 예측한 U01 실험에서는 전체적으로 남풍, 서울지역에서는 남동풍의 흐름이 나타났고 기온은 약 25~27°C로 나타났다(Fig. 8e). 비교실험의 바람은 전체적으로 지형의 영향으로 일정한 경향이 나타나지 않았으며, 기온 차이는 6시간 예측결과와 비교하였을 때 차이가 거의 나타나지 않은 것을 확인하였다(Figs. 8f, g, h, and i). 이는 지형과 지표이용도의 해상도 차이가 예측초기에 기온의 변화에 크게 영향을 주며 점차 그 효과가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 바람변화는 각 해상도에 따른 결과로 일정하게 나타나지 않았다. 이러한 바람장의 변화는 지표고도와 지면피복에 의하여 초기에 영향을 받으나 시간이 진행함에 따라 바람장 자체에 의존적이기 때문인 것으로 분석된다.

Figure 9는 2013년 8월 6일 0000 UTC부터 24시간 동안 해상도에 따른 S01, R01, T01, 그리고 U01 실험결과와 37개 지점의 AWS 관측자료의 기온, 풍속, 그리고 상대습도의 평균을 선으로 나타내었고 표준편차를 막대모의 나타낸 것이다. 수치모의된 기온의 결과는 관측자료와 비교하여 전체적으로 과대모의를 하였으나, 경향은 유사하게 나타났다. 특히 1000 UTC 이

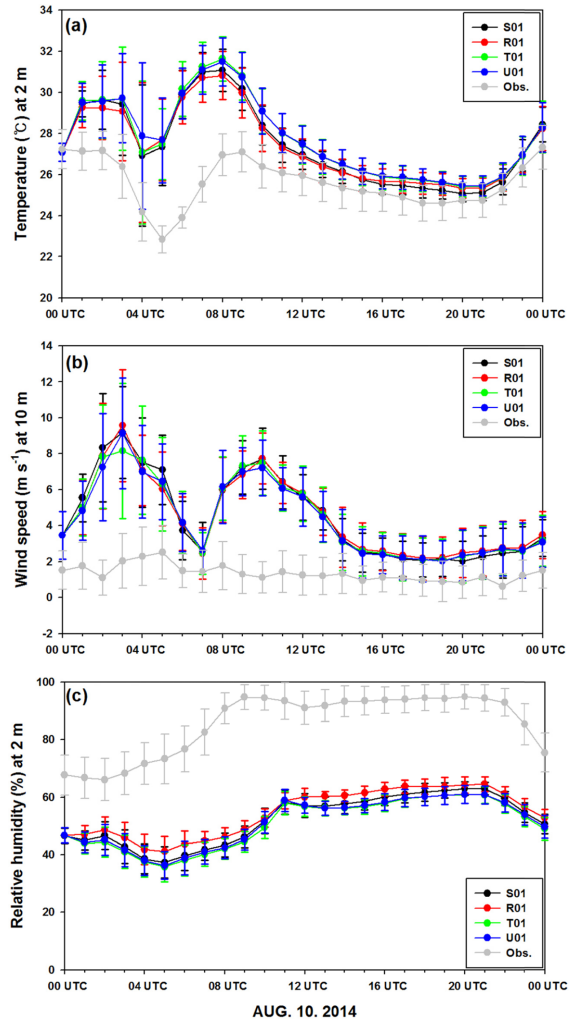


Fig. 9. Time series of (a) temperature at 2 m, (b) wind speed at 10 m and (c) relative humidity at 2 m on AWS sites from observation and simulation from 0000 UTC 6 August 2013. Line and error bar indicate average and standard deviation, respectively.

후에는 관측 값과 수치모의된 결과가 거의 비슷하게 나타났다. 이는 수치모의된 결과가 0400 UTC부터 0600 UTC까지 서울지역에 강한 강수가 있었던 부분과 과소모의하였으며, 이는 관측자료의 상대습도가 90% 이상의 값이 나타남을 알 수 있다(Fig. 9c). 풍속은 관측자료와 비교하여 전체적으로 과대모의를 하였으나, 1500 UTC 이후에는 관측 값과 수치모의된 결과가 유사하게 나타났다. 이는 수치모의된 결과가 서울지역에 강한 강수의 영향으로 풍속의 변동이 크게 나타났다고 판단된다. Table 5는 첫 번째 사례에서 AWS 관

Table 5. Statistics of temperature and wind speed obtained from AWS and WRF simulations with different resolutions in CASE 1.

Meteorological variables	Resolution	Min	Max	Mean	Standard deviation	Correlation
Temperature (°C)	S01	21.20	33.18	27.43	2.24	0.44
	R01	22.00	33.20	27.74	2.12	0.43
	T01	22.42	33.49	27.74	2.28	0.47
	U01	21.93	33.53	27.76	2.23	0.46
	Obs.	19.80	29.1	25.64	1.50	
Wind speed (m s ⁻¹)	S01	0.27	15.05	4.45	2.34	0.24
	R01	0.41	16.22	4.43	2.18	0.26
	T01	0.31	21.97	4.34	2.15	0.29
	U01	0.31	16.76	4.28	2.13	0.32
	Obs.	0	7.0	1.34	0.45	

측지점의 기온과 풍속 관측자료와 지형과 토지이용도의 해상도에 따른 수치모의 실험 결과의 통계값을 나타낸 것이다. 전체적으로 해상도가 높아질수록 평균적으로 기온은 상승하고 풍속은 감소하는 경향이 나타났다. 전체적으로 수치모의된 결과가 AWS 관측자료와 비교하여 기온과 풍속을 과대 모의하였고, 특히 U01 실험에서 상관관계가 높게 나타났다. AWS 관측자료와 수치모의 결과에서 기온은 0.43~0.47의 상관성과 2.12~2.28°C의 표준편차가 나타났고, 풍속은 0.24~0.32의 상관성과 2.13~2.34 m s⁻¹의 표준편차가 나타났다.

Figure 10은 2014년 8월 10일 0000 UTC로부터 8시간과 22시간 예측한 U01 실험의 2 m 기온과 10 m 바람장(Figs. 10a, e), 그리고 U01 실험과 S01, R01, 그리고 T01 실험과의 기온 차이를 나타내었다(Figs. 10b, c, d, f, g, and h). 8시간 예측한 U01 실험에서 전체적으로 분석영역의 서쪽에서는 북풍, 동쪽에서는 북동풍이 불고 있으며, 서울지역과 서울 남쪽 지역에 상대적으로 27°C 이상의 높은 기온분포가 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig. 10a). 서울지역의 바람장 분석결과 U01 실험에서는 북풍이 나타났으나, S01, R01, 그리고 T01 실험에서는 일정한 경향이 나타나지 않았다. U02 실험과 기온의 차이는 S01, R01, 그리고 T01 실험 순으로 남서지역에 과대모의되었고 북서지역은 과소모의되었으며, U01 실험과의 차이는 S01, R01, 그리고 T01 실험 순으로 기온의 차이가 점차 작아졌다. 그리고 첫 번째 사례와 유사하게 U01 실험에서는 한강을 비롯한 강의 영향을 적절히 모사하였으나, S01, R01, 그리고 T01 실험에서는 과대모의를 하는 경향이 나타났다(Figs. 10a, b, c, and d). 22시간 예측된 U01 실험에서 전체적으로 남풍, 서울지역에서는 남동풍의 흐름이 나타났고 기온은 약 25°C 이하로 나타났다(Fig. 10e). S01, R01, 그리고 U01 실험에서의 바람은 전체적으로 지형의 영향으로 일정한 경향이 나타나지 않았으며, 기온 차이는 8시간 예측결과

와 비교하였을 때 차이가 거의 나타나지 않은 것을 확인하였다(Figs. 10f, g, h, and i). 이는 지형과 지표이용도의 해상도 차이가 예측초기에 기온의 변화에 크게 영향을 주지만 점차 그 효과가 감소하기 때문으로 생각된다. 바람변화는 각 해상도에 따라 일정하게 나타나지 않았다.

Figure 11은 2014년 8월 10일 0000 UTC부터 24시간 동안 해상도에 따른 실험결과와 37개 지점의 AWS 관측자료의 기온, 풍속, 그리고 상대습도의 평균을 선으로, 표준편차는 막대표시로 나타낸 것이다. 37개 지점의 AWS 기온 자료와 비교하여 수치모의 결과의 경향이 전체적으로 유사하게 나타났다. 특히 0000 UTC에서 0300 UTC까지 기온이 상승한 후 0500 UTC부터 기온이 급격히 감소하였고, 2100 UTC 이후 다시 상승하는 경향을 수치모의 결과에서도 거의 유사하게 보였다. 이는 0700 UTC에서 1100 UTC까지의 나타난 강수의 영향으로 기온이 감소하는 것으로 생각된다. 이때 AWS의 상대습도는 90% 이상으로 나타났고, 수치실험의 결과는 관측자료에 비해 과소 모의하였다. 풍속은 0000 UTC부터 0700 UTC까지 점차 풍속이 증가하였으나, 수치모의된 결과는 0300 UTC까지 증가 후 0700 UTC까지 감소하였다. 0700 UTC 이후 강수의 영향으로 풍속의 변동이 크게 나타났고, 1500 UTC 이후 낮은 풍속으로 관측자료와 유사하게 나타난 것으로 생각된다. 전체적으로 관측자료에 비해 과대모의를 하였으나, 강수에 의한 풍속의 변동과 강수 이후에 나타나는 풍속의 경향이 비슷하게 나타났다(Figs. 11a, b, and c). Table 6은 두 번째 사례에서 AWS 관측지점의 기온과 풍속 관측자료와 지형과 토지이용도의 해상도에 따른 수치모의 실험 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 해상도가 높아질수록 수치모의된 기온과 풍속은 낮아지는 결과가 나타났다. 기온의 경우 상관관계가 0.8 이상의 높은 값과 3.05~3.18°C의 표준편차가 나타났으나 풍속의 결과는 0.5 이하로 상관도 낮게 나타났고, 표준편차는 1.88~2.01 m s⁻¹로 나타났

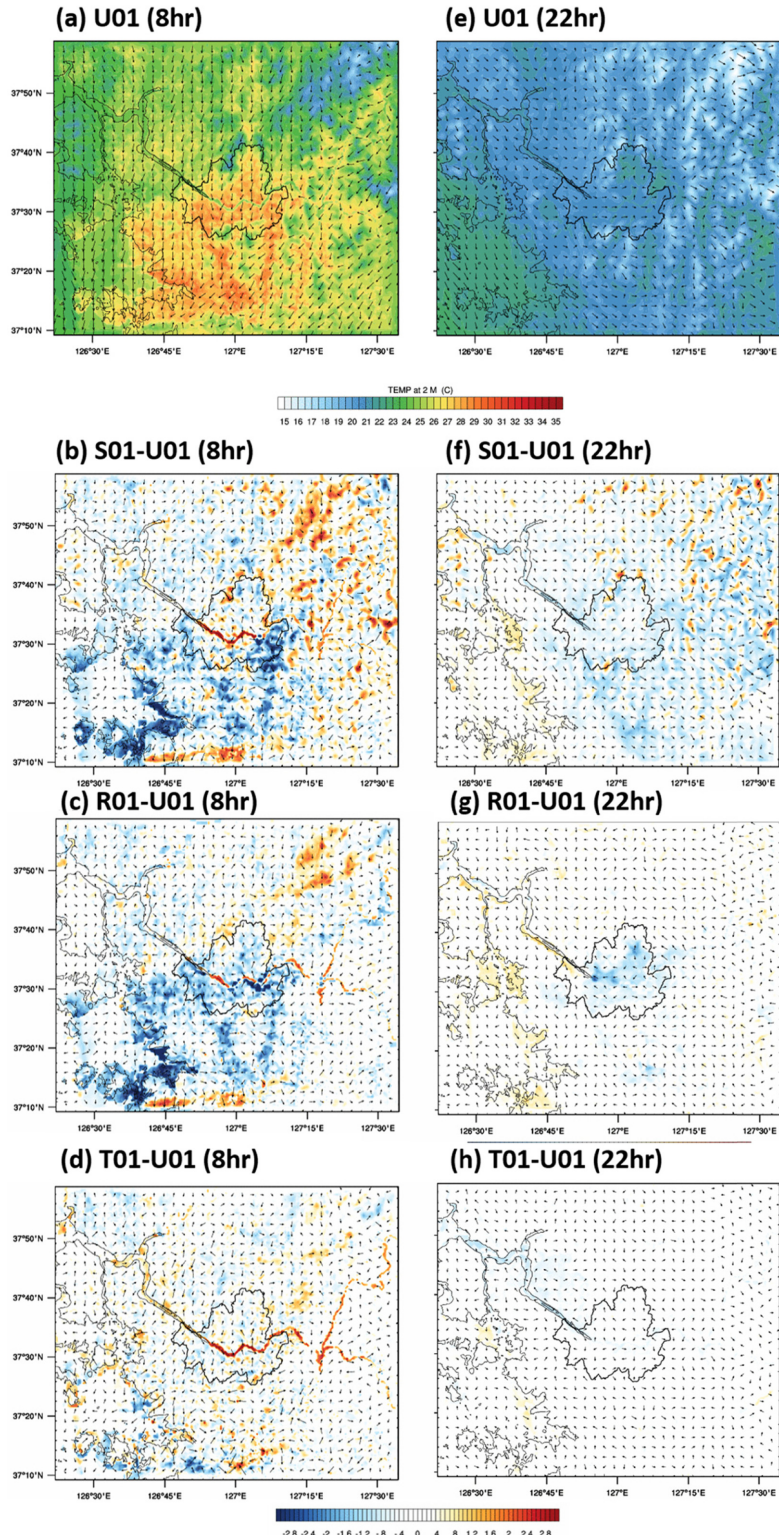


Fig. 10. Same as Fig. 8 except for at 08 hr and 22 hr prediction from 0000 UTC 10 August 2014.

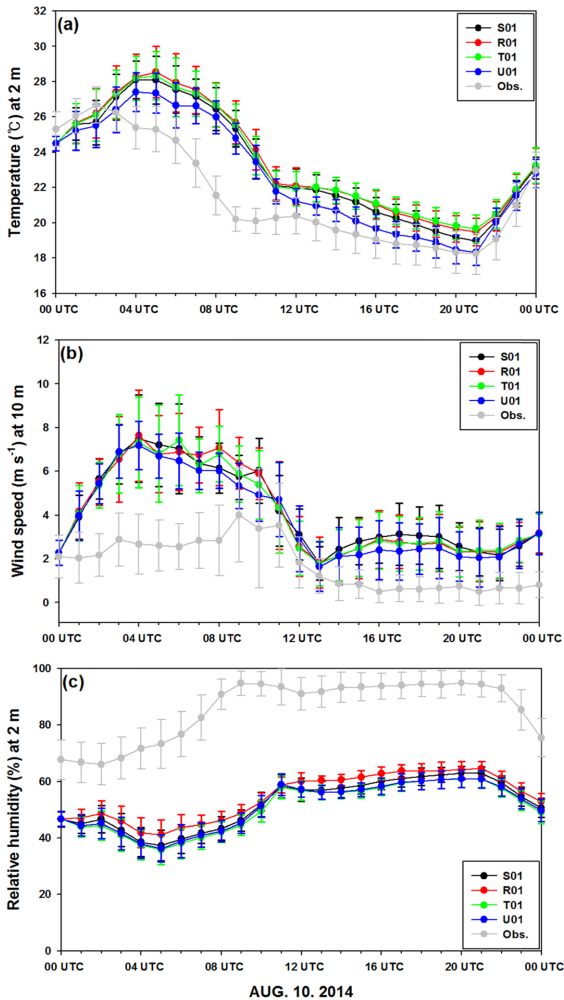


Fig. 11. Same as Fig. 9 except for 0000 UTC 10 August 2014.

다. 기온의 경우, 상관관계는 T01과 U01이 각각 0.47과 0.46으로 가장 좋았으며, 풍속의 경우 U01이 0.32

로 가장 좋았다. 이는 고해상도 지형자료를 이용한 수치모의 실험에서 강수를 유사하게 모의하는 것으로 분석된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2013년 8월 6일과 2014년 8월 10일 0000 UTC부터 24시간 수치모의 실험을 통하여 수도권 지역에서 지형과 지표이용도의 해상도에 따른 WRF 모델과 관측자료를 2개의 사례분석을 통하여 비교하였다. 지형자료와 지표이용도 분석 결과, 해상도가 높아질수록 실제 지형과 지표이용도 자료가 실제 한반도와 유사하게 나타남을 보였다. 특히 지표이용도 자료에서 수도권 지역을 도시의 건물 조밀도, 공업, 상업지역의 분류가 가능하였다.

수치모의 실험 결과, 첫 번째 사례에서는 전체적으로 각 해상도의 예측결과에서 U01의 실험과 S01, R01, 그리고 T01 실험의 차이는 해상도가 높아질수록 온도가 점차 낮게 나타났다. 서울지역 관측지점과 각 해상도별 수치모의 결과를 비교한 결과, 전체적으로 2 m 온도와 10 m 풍속의 변화경향은 유사하게 나타났다. 그러나 수치모의된 결과가 실제 강수를 충분히 모사하지 못하여 강수시간을 전후하여 변동 폭이 크게 나타났으나, 강수 후 약 6시간 이후부터 관측자료와 유사하게 나타남을 보였다. 두 번째 사례에서는 강수의 영향에 따른 기온과 풍속의 변화는 수치모의된 결과와 유사하게 나타났으나 강수가 나타나기 전에 기온은 과소모의, 풍속은 과대모의하는 것으로 나타났다. AWS 기온자료와 수치모의된 기온과의 상관성은 첫 번째 사례(0.43~0.47)보다 두 번째 사례(0.81~0.82)가 높게 나타났고, 풍속의 경우에는 상관성이 0.5 이하로 나타났다. 이는 두 번째 사례에서 강수의 모의가 적절하게 되었기 때문으로 판단된다. 두 가지 사례분석을 통하여 전체적으로 지형자료와 지표이용도의 해상도가 높아질수록 수치모의된 평균 기온과 풍속이 관

Table 6. Same as Table 5 except for CASE 2.

Meteorological variable	Resolution	Min	Max	Mean	Standard deviation	Correlation
Temperature (°C)	S01	17.91	30.38	23.29	3.14	0.81
	R01	17.07	30.51	23.63	3.15	0.82
	T01	17.13	30.52	23.59	3.05	0.82
	U01	16.90	28.92	22.73	3.18	0.82
	Obs.	16.10	29.10	21.57	2.91	
Wind speed (m s ⁻¹)	S01	0.50	12.65	4.14	1.89	0.45
	R01	0.33	12.91	4.08	2.01	0.48
	T01	0.38	12.78	4.01	1.95	0.46
	U01	0.33	9.83	3.81	1.88	0.49
	Obs.	0.00	12.70	1.76	1.12	

측자료와 가장 근접한 결과를 나타냈다. 따라서 고해상도의 지형과 지표이용도의 자료가 수치모의 실험에 영향을 미치는 중요한 요소로 판단된다. 하지만 고해상도의 자료를 사용하는 것이 항상 최적의 결과를 나타내는 것이 아닌 것으로 판단되며, 다양한 실험을 통하여 최적의 해상도를 찾는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(KMA-2012-0001). 그리고 수치모델 수행을 위한 전산자원은 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅센터의 지원을 받아 수행되었습니다(KSC-2013-C3-044).

REFERENCES

- Allwine, K. J., J. H. Shinn, G. E. Streit, K. L. Clawson, and M. Brown, 2002: Overview of URBAN 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 521-536.
- Baik, J.-J., Y.-H. Kim, and H.-Y. Chun, 2001: Dry and moist convection forced by an urban heat island. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 1462-1475.
- CGIAR-CSI, 2012: SRTM 90m Digital Elevation Data. <http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>.
- Choi, Y. J., S. L. Kang, J. K. Hong, S. Grimmond, and K. J. Davis, 2013: A next-generation Weather Information Service Engine (WISE) customized for urban and surrounding rural areas. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, ES114-ES117.
- De Meij, A., and J. F. Vinuesa, 2014: Impact of SRTM and corine land cover data on meteorological parameters using WRF. *Atmos. Res.*, **143**, 351-370.
- Dupont, E., L. Menut, B. Carissimo, J. Pelon, and P. Flamant, 1999: Comparison between atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment. *Atmos. Environ.*, **33**, 979-994, 1999.
- Draxler, R. R., 1986: Simulated and observed influence of the nocturnal urban heat island on the local wind field. *J. Climate Appl. Meteorol.*, **25**, 1125-1133.
- Garstang, M., P. D. Tyson, and G. D. Emmitt, 1975: The structure of heat islands. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 139-165.
- 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.
- Ha, W. S., and J. G. Lee, 2011: WRF sensitivity experiments on the choice of land cover data on an event of sea breeze over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **214**, 373-389 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Jee, J.-B., and Y.-J., Choi, 2014: Conjugation of landsat data for analysis of the land surface properties in capital area. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **35**, 54-68.
- Kabat, P., and Coauthors, 2002: *Vegetation, water, humans and the climate change: A new perspective on an interactive system*. Springer, Heidelberg, Germany, 566 pp.
- Kang, J.-H., M.-S. Suh, and C.-H. Kwak, 2007: Comparison of the land cover data sets over Asian region: USGS, IGBP, and UMD. *Atmosphere*, **17**, 159-169 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-H., and J.-J. Baik, 2005: Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *J. Appl. Meteorol.*, **44**, 593-605.
- _____, S.-B. Ryoo, J.-J. Baik, I.-S. Park, H.-J. Koo, and J.-C. Nam, 2008: Does the restoration of an inner-city stream in Seoul affect local thermal environment?. *Theor. Appl. Climatol.*, **92**, 239-248.
- Landsberg, H. E., 1970: Man-made climate changes. *Science*, **170**, 1265-1274.
- Lee, S. H., S. W. Kim, W. M. Angevine, L. Bianco, S. A. McKeen, C. J. Senff, M. Trainer, S. C. Tucker, and R. J. Zamora, 2011: Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas Air Quality Study 2006 field campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2127-2143.
- Lin, C. Y., F. Chen, J. Huang, W. C. Chen, Y. A. Liou, W. N. Chen, and S. C. Liu, 2008: Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. *Atmos. Environ.*, **42**, 5635-5649.
- Lin, Y.-L., and R. B. Smith, 1986: Transient dynamics of airflow near a local heat source. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 40-49.
- Loveland, T. R., B. C. Reed, J. F. Brown, D. O. Ohlen, Z. Zhu, L. Yang, and J. W. Merchant, 2000: Development of a global land cover characteristics data base and IGBP GISCover from 1 km AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, **18**, 1251-1277.
- Mestayer, P. G., and Coauthors, 2005: The urban boundary-

- layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): Set-up and first results. *Bound.-Layer Meteor.*, **114**, 315-365.
- Oke, 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **108**, 1-24.
- _____, 1987: Boundary Layer Climates. 2nd ed. Routledge, 435 pp.
- Olfe, D. B., and R. L. Lee, 1971: Linearized calculations of urban heat island convection effects. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 1374-1388.
- Pleim, J. E., and J. S. Chang, 1992: A non-local closure model for vertical mixing in the convective boundary layer. *Atmos. Environ.*, **26**, 965-981.
- Rotach, M. W., and Coauthors, 2005: BUBBLE-an urban boundary layer meteorology project. *Theor. Appl. Climatol.*, **81**, 231-261.
- Seo, B.-K., J. Y. Byon, and Y. J. Choi, 2010: Sensitivity evaluation of wind fields in surface layer by WRF-PBL and LSM parameterizations. *Atmosphere*, **20**, 319-332 (in Korean with English abstract).
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125 pp.
- Shepherd, J. M., H. Pierce, and A. J. Negri, 2002: Rainfall modification by major urban areas: observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J. Appl. Meteorol.*, **41**, 689-701.
- Taylor, C. M., E. F. Lambin, N. Stephenne, R. J. Harding, and R. L. H. Essery, 2002: The influence of land use change on climate in the Sahel. *J. Climate*, **15**, 3615-3629.
- 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.
- Zhang, C., H. Lin, M. Chen, and L. Yang, 2014: Scale matching of multiscale Digital Elevation Model (DEM) data the Weather Research and Forecasting (WRF) model: a case study of meteorological simulation in Hong Kong. *Arab. J. Geosci.*, **7**, 2215-2223.