

## 2014년 하계 청미천 특별관측 농경지에서의 고해상도 대기모의

송지애, 이승재\*, 강민석, 문민규  
국가농림기상센터

### High-Resolution Atmospheric Simulations in Cheongmicheon Farmland During the Summer 2014 Special Observation Period

Jiae Song, Seung-Jae Lee\*, Minseok Kang, Minkyu Moon  
*National Center for Agro-Meteorology*

#### I. 서 언

우리나라의 농경지 면적은 약 1,691천ha로 국토의 약 17%를 차지하고 있다 (통계청, 2014). 2015년 6월 3일자 기상청 보도 자료에 따르면 2015년 한반도 전국 누적 강수량은 평년대비 84%였으며, 중부 지역(서울·경기와 강원도)은 평년대비 57%의 극심한 가뭄이 발생하여 많은 농가들이 작물 피해를 입었다. 기후 변화로 인해 한반도 기온이 상승하고, 국지적 기상 이변 발생 빈도가 높아지는 요즘과 같은 상황에서, 정부와 지자체들은 농작물 재배적지 변화에 효율적으로 대응하고, 가뭄, 폭설, 우박 등 기상 이변으로 인한 농작물 피해를 최소화하기 위하여 다방면으로 노력을 기울이고 있다. 특히 오늘날은 개별 농가들에게 실제적인 도움을 줄 수 있도록, 집수역 규모나 필지 단위 규모 등 시공간적으로 매우 상세한 농업기상 정보의 제공을 요구하고 있다. 이를 가능케 하기 위해서는 고해상도의 지상 관측망 및 원격탐사 정보와 더불어 농경지대에 특화된 고해상도 수치모델 시스템의 운용이 필수적이다.

국내에서는 2012년부터 시작된 차세대 도시·농림융합 스마트기상서비스 개발 사업 (Choi *et al.*, 2012)을 통해 농림지 맞춤형 고해상도 수치모델링 연구가 1단계 3차년도인 2014년부터 수행 중에 있다. Lee *et al.*(2014)은 이 사업을 통해 경기도 포천 산림지에 고해상도 지형 자료를 장착한 WRF(Weather Research and Forecasting) 시스템을 구축하고, 산림지에서의 이산화탄소 순환을 이해하기 위하여 국지대기 모의결과를 분석하였다. Song *et al.*(2015)은 동일 지역에 대해 고해상도 지표피복 자료와 Noah-MP 지면 모형을 도입하여 추가적인 분석을 수행한 바 있다. 도시농림 연구사업 밖에도 Lee *et al.*(2015)은 경북 봉화 산림지에 WRF 모형과 MUKLIMO 모형을 수행하여 이 지역의 산림 재해 예방 및 대응을 위한 산림 미기상 예측시스템을 구축한 바 있다. 그러나 농경지에 대해서는 관측장비 및 가용 실측자료가 부족하고 농경지의 비균질성 등으로 인해 고해상도 수치모델링 연구가 아직도 매우 부족한 실정이다 (Choi *et al.*, 2015; Oh *et al.*, 2015).

본 연구에서는 2014년 8월 21일부터 9월 11일까지 약 20일 동안 집중관측(Moon *et al.*, 2015)

\* Correspondence to : sjlee@ncam.kr

을 실시한 경기도 청미천 농경지대에 대하여 고해상도 WRF-NoahMP 시스템을 적용하고, 국지 대기모의 성능을 간략히 살펴보고자 한다.

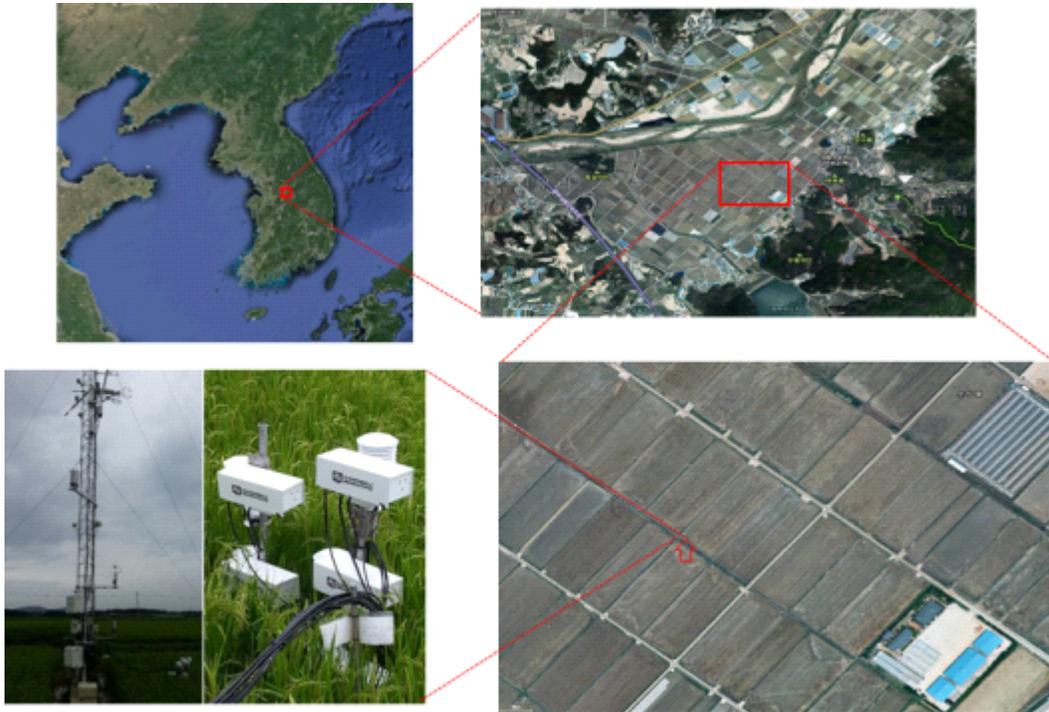


Fig. 1. Cheongmicheon Farmland site in Korea (CFK) on 20 August 2014.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 관측자료 및 분석 방법

특별관측은 2014년 8월 21일부터 9월 11일까지 경기도 청미천 유역 내에 위치한 논에서 약 20일에 동안 이루어 졌다. CFK (Cheongmicheon Farmland site in Korea; 37° 9' 35" N, 127° 39' 10"E, 141 m a.s.l.)의 삼차원 풍향풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)와 개회로 가스분석기(EC150, Campbell Scientific Inc.)는 지면으로부터 9-m 고도에 설치되어 있으며, 벼 식생(관측 기간의 식생 높이는 약 0.7m 임)과 지면 상태, 영면변위 등을 고려하였을 때의 해당 관측기기의 고도는 약 8.5-m이다(Fig. 1). 프로파일 시스템(AP200, Campbell Scientific Inc.)을 이용하여 이산화탄소, 수증기, 기온을 높이별로 측정하였고 설치 높이는 지면으로부터 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 3, 5, 9 m 이다. 본 연구에서는 모형의 10-m 기온 및 바람을 8.5-m 관측기온 및 바람과 우선 비교하였다. 또한 모형의 2-m 기온은 1-m 관측기온과 3-m 관측기온의 평균과 비교하였다. 모델-관측 간 검증을 위해 Bias, RMSE (root mean square error), r (correlation coefficient)의 통계 값을 사용하여 모든 모델 도메인에 대해 산출하였다.

## 2.2. 수치모형 및 모의실험

본 연구에서 사용한 수치모델은 WRF V3.6.1로서, 모델의 초기 및 경계 자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)의 FNL (Final) 분석장을 이용하였다. 모델 도메인의 중심은 청미천 부근의 경기도 여주시 점동면 뇌곡리에 위치한 CFK 사이트 이다(Fig. 1). 도메인 구성과 모델 역학 및 물리과정은 Lee *et al.*(2014)의 연구를 따르며, 수평격자 간격이 각각 21870m, 7290m, 2430m, 810m, 270m, 90m인 6중 양방향 등지격자로 구성하였다. 연직 층수는 38 층으로서, 지표면에서부터 50hPa까지에 이른다.

모델의 물리과정으로는 Dudhia 단과복사 방안(Dudhia, 1989), RRTM 장과복사 방안(Mlawer *et al.*, 1997), WRF 단일모멘트 6-class 미세물리 방안(Hong and Lim, 2006), New Kain-Fritsch 적운 모수화 방안(Kain and Kain, 2004), YSU 경계층 방안 (Hong *et al.*, 2006), Monin-Obukhov-Janjić 접지층 방안(Monin and Obukhov, 1954, Janjić, 1996, Janjić, 2002), Noah-MP 지면 모형(Niu *et al.*, 2011)을 사용하였다. 어미격자를 제외한 모든 등지격자 영역에서는 적운 모수화 과정을 사용하지 않고 구름 과정을 명시적으로 분해하도록 하였다. 수치모의는 Noah-MP의 옵션 중에서 식생 역학(dynamic vegetation)을 포함하지 않은(off) HIMP\_0와 식생역학을 포함한(on) HIMP\_1로 각각 수행하였다. 가용 전산 자원의 운용을 최대한 간단히 하고 자료 처리를 단순화시키기 위하여, 사례기간에 대해 8일 동안의 모델 적분 결과들을 상호 연결시켜 전체 기간에 대한 모의 결과를 구성하였다(예로, Lee *et al.*, 2013).

## 2.3. 지형 및 토지피복 자료

모델에서의 지형과 토지피복 자료는 모의 결과에 매우 중요한 역할을 한다. Park and Kim (2011)에 따르면 간척 사업으로 인한 토지이용의 변화가 계절에 따라 온도, 바람, 알베도에 영향을 주는 것을 보였으며, Seong *et al.*(2013)은 산불 모의에 있어 가장 중요한 요소인 연료(토지피복)와 지형 자료의 해상도에 따른 민감도 및 오차를 분석한 바 있다. 시공간적으로 큰 규모인 지역기후 연구에서도 지면피복 자료의 효과는 중요한 것으로 보고되고 있다(예로, Lee and Berbery, 2012; Lee *et al.*, 2013a and b).

Fig. 2와 Fig. 3은 청미천 지점을 중심으로 한 다중 도메인 격자의 지형 자료와 토지피복 자료의 모습이다. 첫 번째부터 세 번째 도메인까지는 WRF 모형에 기본적으로 장착되어있는 30" USGS 자료를 사용하였으며, 네 번째부터 여섯 번째 도메인까지는 각각 국토지리정보원과 환경부에서 개발한 1/3" 수치지형고도 자료와 토지이용 자료를 적용하였다. 첫 번째부터 세 번째까지의 도메인(Fig. 2(a)-(c)와 Fig. 3(a)-(c))에서보다 네 번째에서 여섯 번째까지의 도메인(Fig. 2(d)-(f)와 Fig. 3(d)-(f))의 지형과 토지피복 자료가 더 조밀하고 상세하게 표현되고 있음을 볼 수 있다. 또한 WRF에 기본적으로 장착되어있는 USGS 토지이용 카테고리들 사용하면 우리나라 대부분이 초원(Savanna)으로 잘못 인식되지만, 새로운 지형 및 토지피복 자료를 사용하면 실제에 보다 더 가까운 토지피복을 갖게 됨을 알 수 있다. 관측타워가 위치한 지점은 대부분 논인 농경지대에 위치해 있어 평평한 들판과 같으며(Fig. 1), 모델 토지피복은 이 지점을 관개 농경지

혹은 목초지(irrigated cropland or pasture) 형태로 분류하고 있으므로, 타워 근처의 지세와 토지이용도가 모델의 지표피복 체계에서 비교적 잘 표현되었다 할 수 있다.

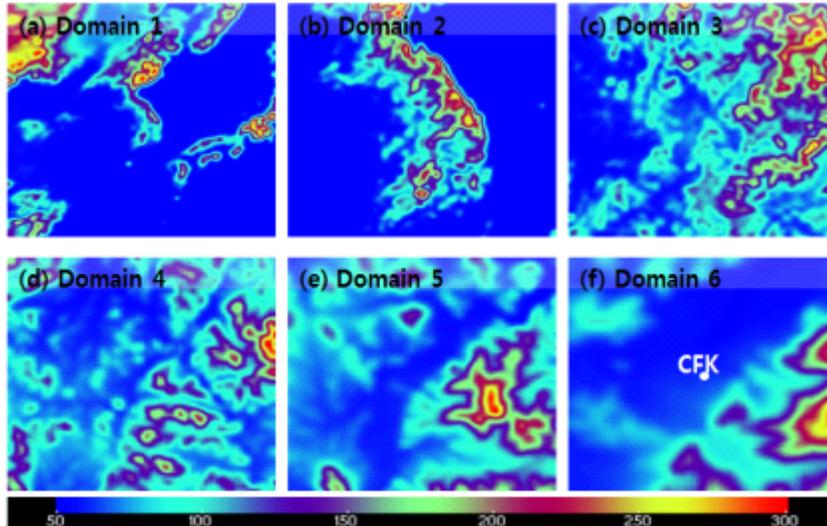


Fig. 2. Model domains and topography (unit: meter).

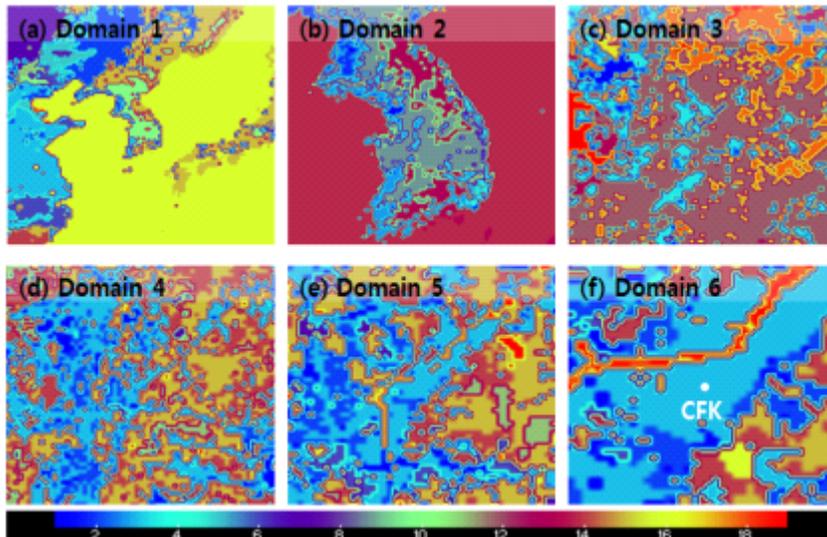


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for model land-cover type.

### III. 예비 결과 및 분석

Fig. 4는 청미천 특별관측 기간 동안 8.5-m 고도 관측기온과 10-m 고도 모델기온(도메인 6)의 시계열 자료이다. 모델의 기온 모의는 관측 기온을 대체적으로 잘 따라가고 있는 것으로 보이며, 9월 10일 00 KST에 하루 만에 최저 온도가 약 8°C 급격하게 떨어지는 현상도 잘 포착해 내고 있다. 또한 모델은 약 0.3~0.6도의 온난 편차를 보였는데, 새벽 최저기온 시점에서 더욱 그러

한 경향이 있었다(Table 1). 일부 구간(8월 24일 12시~25일 12시, 9월 2일 12시~9월 4일 00시)에서는 모델과 관측의 차이가 크게 나타났는데, 이는 모델의 적분 시간이 길어짐에 따라 정확도의 감소 및 당일의 현상 예측가능성과 어느 정도 관련이 있는 것으로 분석된다.

식생역학을 off한 HIMP\_0 실험은 낮 최고기온을 과대 모의하는 경향을 보이며, 식생역학을 on한 HIMP\_1 실험은 HIMP\_0보다 관측에 더 가깝게 다가가는 결과를 보였다. 이는 식생역학을 on했을 때 모델의 엽면적지수가 2.3에서 3.2로 약 0.9정도 커짐에 따라 증발산이 증가하고 지면 온도가 감소했기 때문으로 분석된다. 통계 값을 살펴보면, HIMP\_1 실험은 모든 도메인에서 HIMP\_0 실험보다 Bias, RMSE 값이 향상되고, r 값 또한 HIMP\_0 실험 보다 관측-모델 간 상관관계가 개선되는 것으로 나타났다(Table 1).

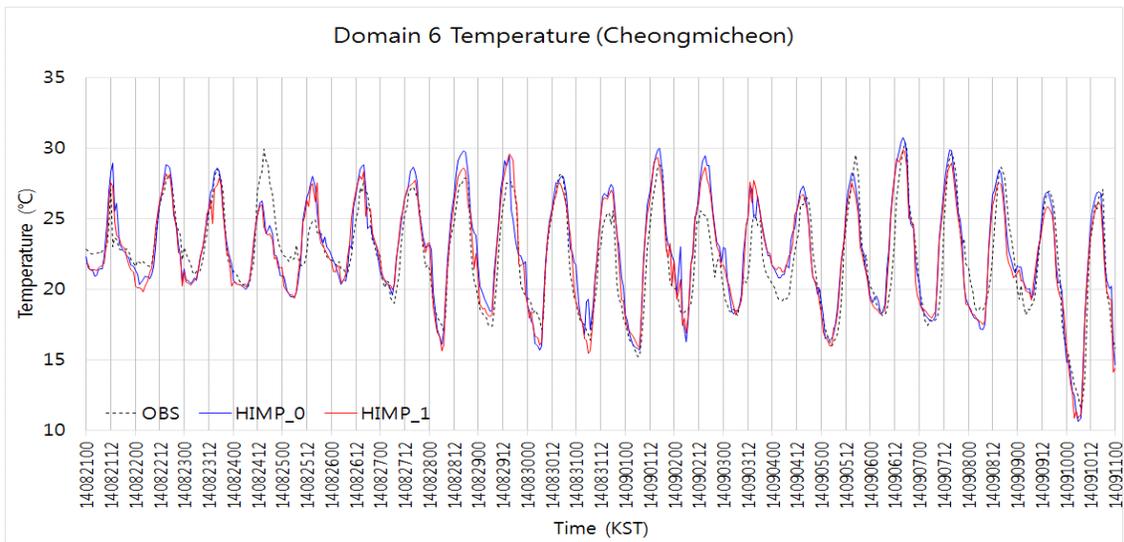


Fig. 4. Time series of the simulated(10-m) and observed(8.5-m) temperature in domain 6. HIMP\_0 = WRF + NoahMP without dynamic vegetation; HIMP\_1 = WRF + NoahMP with dynamic vegetation.

Table 1. Bias, root mean square error, and correlation for 10-m model and 8.5-m observed temperature in all model domains

bias	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5	Domain 6
HIMP_0	0.264	0.511	0.625	0.587	0.562	0.559
HIMP_1	-0.022	0.226	0.330	0.297	0.269	0.261
RMSE	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5	Domain 6
HIMP_0	1.690	1.742	1.765	1.747	1.779	1.790
HIMP_1	1.631	1.648	1.646	1.628	1.651	1.656
r	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5	Domain 6
HIMP_0	0.891	0.890	0.896	0.901	0.898	0.896
HIMP_1	0.893	0.893	0.898	0.903	0.901	0.901

Fig. 5는 청미천 특별관측 기간에 대한 10-m 모델기온과 8.5-m 관측기온(Fig. 5(a)), 그리고 2-m 모델기온과 2-m 관측기온(Fig. 5(b))의 평균 일변화 그림이다. Fig. 5(a)의 수치모의 기온은 HIMP\_0 실험과 HIMP\_1 실험 모두에서 6시에 최저온도가 나타나고, 15시에 최고온도가 나타나지만, 관측기온은 최저온도가 7시에 나타나고, 최고온도가 16시에 나타난다. 즉, 수치모의 값이 관측 값에 비해 한 시간 정도 일찍 최저, 최고 기온을 표현하고 있는 것이다. 지표의 영향을 더 강하게 받는 2-m에서의 일변화를 살펴보면(Fig. 5(b)), 수치모의 값과 관측 값 모두 최저, 최고기온이 나타나는 시각이 각각 6시, 15시로 일치한다. 10-m 기온모의가 2-m 기온모의에 비해 관측과의 시간적 위상 차를 보이는 것은 YSU 경계층 방안이 갖는 혼합층의 조기 성장 및 과대 성장 특성과 관련이 있을 수 있으며(Lee and Kawai, 2011), 최근 고해상도에서의 아격자규모 난류 모의를 통해 이를 개선한 Shin and Hong(2015)의 접근법을 시도해 볼 필요가 있다.

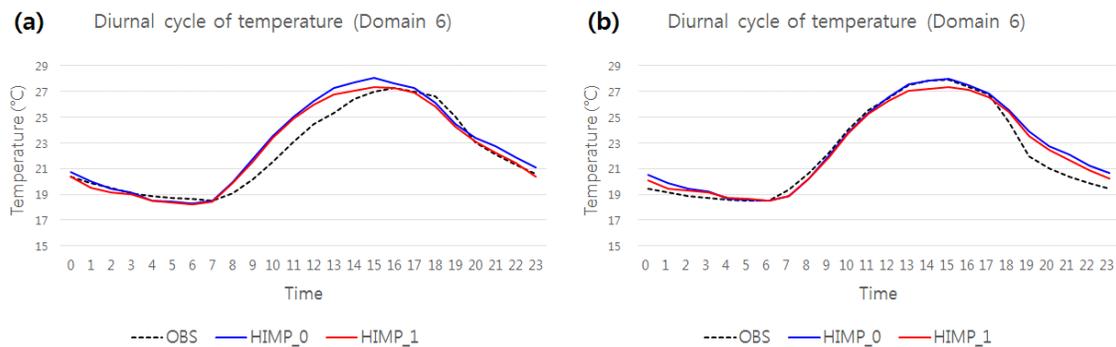


Fig. 5. Diurnal cycle of (a) 10-m and (b) 2-m temperature in domain 6.

U 성분과 V 성분의 바람벡터에 대한 8.5-m 관측 값과 10-m 모델 값(도메인 6)의 시계열을 비교해 보면, U 성분과 V 성분 모두 대체로 모델이 바람을 과대모의 하는 경향을 보였으며, 패턴도 기온에 비해 관측과 상이한 결과를 보였다(그림 생략). 바람벡터 오차인 RMSVE는 0에 가까울수록 관측 값에 가깝게 다가감을 의미하는데, 각 도메인에 대해 약 2.2~3.0의 값을 보여 현장에서 실측된 바람장이 모델에서는 정확하게 모의되기 힘들음을 보여 주고 있다(Table 2). 이는 바람 변수가 온도에 비해 모델 예측성이 떨어지는 변수임을 다시 확인시켜 주는 결과이며, 이러한 단점은 WRF 수치모형을 비롯한 모든 격자모형들이 공통적으로 가지고 있는 문제점이기도 하다. 한편, 식생역학을 포함한 HIMP\_1 실험은 식생역학을 포함하지 않은 HIMP\_0에 비해 바람의 모의 성능이 다소 개선됨을 보여주었다. 이는 NoahMP 모형에 탑재되어 있는 식생역학 옵션이 우리나라 농경지 부근의 기온 및 바람 모의에 개선을 가져올 수 있는 가능성을 시사하며, 보다 다양한 사례와 장기간에 걸친 추가적인 실험을 통해 그 효과를 더욱 면밀히 분석할 필요가 있다.

Table 2. Root mean square error for 10-m wind

RMSVE	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5	Domain 6
HIMP_0	2.192	2.302	2.477	2.769	2.920	2.987
HIMP_1	2.200	2.285	2.450	2.745	2.920	2.978

## 감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(153-3100-3133-302-350).

## 인용문헌

- Choi, S. W., S.-J. Lee, J. Kim, B.-L. Lee, K. Kim, and B. C. Choi, 2015: Agrometeorological observation environment and periodic report of Korea Meteorological Administration: current status and suggestions. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **17**(2), 144-155.
- Choi, Y. J., and Coauthors, 2012: The WISE Project. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*, 20-21.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **46**, 3077-3107.
- Hong, S.-Y. and J.-O. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society* **42**, 129-151.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* **134**, 2318-2341.
- Janjić, Z. I., 1996: The surface layer in the NCEP eta model. *The 11th Conference on Numerical Weather Prediction*, Norfolk, Va, USA, August 1996.
- Janjić, Z. I. 2002: Nonsingular implementation of the MellorYamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model, *NCEP Office Note* 437.
- Kain, J. S. and J. Kain, 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology* **43**, 170-181.
- Lee, S.-J., and H. Kawai, 2011: Mixing depth estimation from operational JMA and KMA wind-profiler data and its preliminary applications: examples from four selected sites. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **89**, 15-28.

- Lee, S.-J., and E. H. Berbery, 2012: Land Cover Change Effects on the Climate of the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology* **13**, 84-102.
- Lee, S.-J., and E. H. Berbery, and D. Alcaraz-Segura, 2013a: Effect of Implementing Ecosystem Functional Type Data in a Mesoscale Climate Model. *Advances in Atmospheric Sciences* **30**(5), 1373-1386.
- Lee, S.-J., E. H. Berbery, and D. Alcaraz-Segura, 2013b: The Impact of Ecosystem Functional Type Changes on the La Plata Basin Climate. *Advances in Atmospheric Sciences* **30**(5), 1387-1405.
- Lee, S.-J., J. Kim, M. S. Kang, and Bindu Malla-Thakuri, 2014: Numerical Simulation of Local Atmospheric Circulations in the Valley of Gwangneung KoFlux Sites. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**, 244-258. (In Korean with English abstract)
- Lee, S.-J., J. Lee, S. J. Greybush, M. Kang, and J. Kim, 2013: Spatial and temporal variation in PBL height over the Korean Peninsula in the KMA operational regional model. *Advances in Meteorology*, Volume 2013 (2013), Article ID 381630, 16 pages.
- Lee, S., Y. Choi, J. Jung, M. Won, and G.-H. Lim, 2015: Development of optimal modeling system for analyzing mountain meteorology, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**, 165-172. (In Korean with English abstract)
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research* **102**, 16663-16682.
- Monin, A. S. and A. M. Obukhov, 1954: Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloe atmosfery. *Trudy Geofizicheskogo Instituta, Akademiya Nauk SSSR* **24**, 163-187.
- Moon, M. K., M. S. Kang, B. Malla-Thakuri and J. Kim, 2015: Biases in Storage Fluxes Estimated from a Single-level CO<sub>2</sub> Concentration over a Rice Paddy. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*, 142-143.
- Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Mitchell, K.E., Chen, F., Ek, M.B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M. and Xia, Y., 2011: The community Noah land surface model with multi-parameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research* **116**(D12): D12109
- Oh, G. L, S.-J. Lee, B. C. Choi, J. Kim, K. Kim, S. W. Choi, and B.-L. Lee, 2015: Quality Control of Agro-meteorological Data Measured at Suwon Weather Station of Korea Meteorological Administration. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(1), 25-34.
- Park, S. K., J. H. Kim, 2011: A Study on Changes in Local Meteorological Fields due to a Change in Land Use in the Lake Shihwa Region Using Synthetic Land Cover Data and High-Resolution Mesoscale Model. *Atmosphere* 405-414. (In Korean with English abstract)
- Seong, J. H., S. O. Han, J. H. Jeong, and K. H. Kim, 2013: Study on sensitivities and fire area errors in WRF-Fire simulation to different resolution data set of fuel and terrain, and surface wind. *Atmosphere* **23**, 485-500. (in Korean with English Abstract)

- Shin, H. H., and S.-Y. Hong, 2015: Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Monthly Weather Review* **143**, 250-271.
- Song, J., S.-J. Lee, J. Kim, 2015: Effects of high-resolution topography/land-cover data and the Noah-MP land surface model on WRF atmospheric simulation in the valley of Gwangneung KoFlux sites. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*, 109-110.
- 통계청, 2014: 농업면적통계. 발간등록번호 11-1240000-000540-10. pp.110.