상세기후변화 시나리오에 기반한 미래 한반도 주변 지상바람 변화 연구

김진은¹ · 김가영¹ · 진천실¹ · 이동규² · 차동현¹

¹울산과학기술원 도시환경공학부 · ²기상청

(2015년 12월 9일 접수, 2015년 12월 21일 수정, 2015년 12월 24일 게재 확정)

A Study on Future Change in Surface Wind over the Korean Peninsula based on a Regional Climate Change Scenario

Jineun Kim¹ · Gayoung Kim¹ · Chun-Sil Jin¹ · Dong-Kyou Lee² · Dong-Hyun Cha¹

¹School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science & Technology

²Korea Meteorological Administration

(Received 9 December 2015, Revised 21 December 2015, Accepted 24 December 2015)

Abstract : This study investigated the future change in surface wind over the Korean Peninsula using a high-resolution climate change scenario projected by a regional climate model (RCM). In the evaluation of historical runs (1981-2010), the RCM reasonably reproduced a 30-year annual mean surface wind and it also represented climatological seasonal wind pattern properly. To examine the future change in surface wind, the results from RCP8.5 run for 30 years (2071-2100) were compared with those from historical run. Despite of slight differences among seasons, southerly differences were overall dominant. This indicated that southerly prevailing wind for summer was intensified in the future climate, while northerly prevailing wind for other seasons was reduced. The changes in the seasonal mean surface wind were significantly associated with those in the surface pressure distribution surrounding the Korean Peninsula. In the future climate, the monthly mean wind speed was reduced compared in the present climate. However, the magnitude and annual variability of the annual maximum wind speed tended to increase in the future climate.

Key Words : climate change, surface wind, regional climate model

주요어 : 기후변화, 지상바람, 지역기후모델

1. 서론

전 지구적으로 기후변화와 관련된 극한기상의 빈도와 강도가 증가하고 있다(Stocker *et al.*, 2014).

특히 한반도의 경우, 주변지역의 온난화가 전 지구 평균보다 2배 이상 빠르게 진행되고 있어 태풍, 집중호우 같은 극한기상 재해의 빈도와 강도가 증가하고 이에 따른 피해가 커지고 있다(An *et al.*,

2011). 이와 같은 기상재해뿐만 아니라, 최근 우리나라와 중국의 경제성장과 산업화로 인해 화학연료와 유해화학물질의 사용량이 증가하면서 관련된 피해가 대두되고 있다. 화학연료 사용에 의해 한반도내에서 자체적으로 발생되거나 중국에서 발생하여 한반도로 유입되는 미세먼지는 호흡기 질환과 관련하여 인체에 큰 피해를 끼치고, 유해화학물질 누출사고는 생태계 전반적으로 장기간 심각한 피해를 끼치는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 한반도에 심각한 피해를 끼치는 극한기상과 유해물질 관련 재해는 주변 지상바람의 영향을 많이 받는데 지상바람을 정확히 예측할 수 있다면 그 피해를 최소화 할 수 있다. 그리고 신뢰할 만한 미래 한반도 주변 지상바람 시나리오 자료는 극한기상과 유해물질 재해에 대한 장기적인 대응 정책 수립 시 기초자료로 활용되어 미래의 재해를 효과적으로 대비할 수 있게 한다.

미래 기후변화 시나리오 자료는 주로 전구기후모델에 의해 생산되어 다양한 분야에서 활용되고 있다. 하지만 전구기후모델은 상대적으로 저해상도의 공간분해능과 물리과정의 단순화로 인해 지역 기후를 현실적으로 재현할 수 없는 한계를 가지고 있다. 복잡한 지형을 포함한 다양한 기후 인자의 영향을 받는 한반도 주변지역에서 수백 km 해상도의 전구기후모델만으로 신뢰할 만한 상세 기후변화 예측하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 전구기후모델 자료를 지역기후모델의 경계자료로 사용하여 상세한 기후 정보를 생산하는 연구가 활발히 수행되고 있다(Suh *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2014; Hong and Ahn, 2015; Park *et al.*, 2015). Kim *et al.*(2014)은 다중 지역기후모델을 이용하여 동아시아 지역 기온과 강수의 미래 기후변화를 전망하였고, Hong and Ahn(2015)은 지역기후모델을 이용하여 한반도 여름철 강수변화를 전망하였다.

하지만, 아직까지 한반도 지역에서 지상바람의 변화에 대한 연구가 전무하다.

따라서 본 연구에서는 지역기후모델이 생산한 상세 기후변화 시나리오를 통해, 한반도 주변지역의 지상 바람을 재분석 자료와 비교하여 검증하고, 이를 기반으로 미래 지상바람의 변화를 전망하고자 한다. 다음 절부터는 본 연구에서 사용된 모델과 자료를 소개하고, 한반도 주변 지상 바람의 검증과 미래 변화에 대해 논의한다. 마지막으로 본 연구결과에서 밝혀진 결과를 요약하고, 향후 필요한 연구를 제시한다.

2. 자료 및 모델

본 연구에서 사용한 지역기후모델 SNURCM (Seoul National University Regional Climate Model)은 중규모 대기모델 MM5(fifth-generation mesoscale model)를 기반으로 지면모델, 행성경계층방안, 스펙트럴 너징 기법 등을 개선 및 적용한 모델로서 한반도를 포함한 동아시아 기후 및 극한 기후, 전지구모델 자료의 역학적 상세화 연구에 적합한 모델로 알려져 있다(Cha and Lee, 2009; Cha *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2013). 스펙트럴 너징 기법은 지역기후모델이 생산하는 소규모 정보들을 유지하면서 측면경계에서 들어오는 대규모 정보를 효과적으로 모의영역으로 받아들여 장기적분에서 기후표류를 방지한다. SNURCM은 Kain-Fritch(Kain, 2004) 적운모수화방안, Reisner II(Reisner *et al.*, 1998) 명시수분과정, CCM2(Briegleb, 1992) 복사방안, YSU(Hong *et al.*, 2006) 행성경계층 방안, NCAR CLM3(Bonan *et al.*, 2002) 지면모델을 사용하였다. 본 지역기후모델은 12.5km 수평 해상도로 한반도와 그 주변 영역에서 수행되었다. 모델 꼭대기는 50hPa이고

연직층수는 24개이다. 지상바람에 대한 SNURCM의 수행 능력을 검증하고 미래 변화를 분석하기 위하여 기상청에서 제공하고 있는 Historical과 RCP(Representative Concentration Pathway) 8.5 시나리오에 근거한 HadGEM2-AO(Hadley Centre Global Environment Model version 2-Atmosphere-Ocean coupled model) 자료를 SNURCM의 경계 자료로 처방하였다(Baek *et al.*, 2013). 여기서 지상바람은 모델의 행성경계층 물리과정에서 산출된 10m 높이의 바람을 의미한다. HadGEM2-AO 전구모델은 수평해상도 $1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 와 연직 38층의 대기모델과 수평해상도 1° 와 연직 40층의 해양모델로 구성되어있다. RCP8.5 시나리오는 RCP 시나리오 중 온실가스 증가율이 가장 높은 대표적인 고농도 시나리오로서 2100년에 복사강제력이 8.5Wm^{-2} 를 초과한다(Riahi *et al.*, 2011). Historical 실험과 RCP8.5 시나리오에 대해 각각 32년(1979~2010년)과 82년(2019~2100년) 동안 적분되었고, 안정화 기간(spun-up time)과 효율적인 분석을 위해 현재 30년(1981~2010년)과 미래 30년(2071~2100년)을 분석하였다. 또한, 지역기후모

델의 현재 지상 바람의 모의수준을 검증하기 위하여 0.75° 해상도의 ERA-Interim 재분석자료(Dee *et al.*, 2011)를 이용하였다. 이 자료는 지역기후모델의 해상도(12.5km)와 다르기 때문에 객관적인 비교를 위해 재분석자료와 지역기후모델 자료를 이중선형보간법(bilinear interpolation)을 이용하여 0.1° 해상도로 내삽하여 분석하였다.

3. 연구 결과

1) 한반도 주변 지상바람의 모의수준 검증

한반도 주변 지상바람에 대한 SNURCM의 모의성능을 검증하기 위하여 Historical 실험을 ERA-Interim 재분석자료와 비교하였다. Figure 1은 SNURCM과 재분석자료의 30년 연평균 지상바람을 나타낸 것이다. SNURCM에서 만주 지역의 저기압성 순환은 재분석자료에 비하여 약하게 모의되는 경향이 나타났다. 또한 SNURCM은 재분석자료보다 동중국해에서 동풍을 강하게 모의하였으며, 동해에서는 서풍을 약하게 모의하였

Figure 1. 30-year annual mean surface wind (ms^{-1}) for (a) ERA-Interim and (b) Historical experiment.

다. 그러나 SNURCM은 재분석자료와 비교하였을 때, 전반적인 바람패턴은 현실적으로 모의하였다. 특히, 모델은 한반도 주변의 북풍 계열의 바람을 재분석자료와 유사하게 모의하였으며, 동해안 부근 바람의 수렴 패턴도 현실적으로 모의하는 경향을 보였다.

SNURCM과 재분석자료의 30년 계절 평균 지상바람을 분석하였다(Figure 2). 재분석자료에서 한반도 주변의 풍향, 풍속은 계절별로 차이가 있는데, 봄에 서풍, 여름에 남풍, 가을과 겨울에 북풍 계열의 바람이 지배적이다. 특히 겨울철 풍속이 다른 계절보다 강하다. SNURCM은 봄철 지상 풍속을 재분석자료보다 약하게 모의하고 여름철과 겨울철 풍속을 더 강하게 모의하는 경향이 있으며, 이는 동해에서 두드러지게 나타난다. 특히 SNURCM은 봄철 동해에서 나타난 서풍을 과소 모의하는 오차를 갖고, 여름철에는 동풍을 과대 모의하는 오차를 갖는다. 그러나 SNURCM은 한반도 주변지역의 전반적인 계절별 풍향, 풍속을 재분석자료와 유사하게 모의하였다. 특히, 한반도에서 편차가 다른 지역에 비하여 상대적으로 작게 모의되었다.

재분석자료와 검증을 통하여 SNURCM이 어느 정도 지역편차를 갖지만, 전반적으로 지상 바람을 재분석자료와 유사하게 모의할 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 SNURCM이 산출한 미래 기후변화 시나리오를 한반도 미래 바람변화 연구에 활용하는 것이 합리적이라는 것을 의미한다.

2) 미래 동아시아 지상 바람의 변화

한반도 주변 지상바람의 미래 변화를 조사하기 위하여 RCP8.5 시나리오 실험(2071~2100년)과 Historical 실험(1981~2010년)의 지상바람, 해면기압, 지상온도 차이를 분석하였다(Figure 3). 미래 한반도와 주변 해양에서 남서풍 또는 서풍의 증가

가 뚜렷하다(Figure 3a). 한반도 육지에서 바람 방향의 변화는 해양과 유사하지만 강도 변화는 해양보다 뚜렷하게 작다. 이러한 미래 지상바람의 변화 패턴은 한반도 남쪽의 일본과 동중국해에서 해면기압이 증가하고, 한반도 북쪽의 만주와 연해주 부근에서 해면기압이 감소하는 패턴과 관련이 있다(Figure 3b). 미래 한반도 남쪽의 저위도 지역에서는 기압의 증가로 인하여 고기압성 순환이 강화되고, 그 영향권 가장자리에 위치하는 한반도 주변은 남서풍이 증가하게 된다. 또한 만주와 연해주 주변의 기압이 낮아져 저기압성 순환을 강화시키기 때문에 남쪽에 위치한 한반도에 서풍이 증가하게 된다. 한반도 북쪽 지역의 기압이 낮아지는 것은 Lee *et al.*(2013)과 Kim *et al.*(2014)에서 보였듯이 온난화로 인하여 고위도 지역의 지면온도가 상대적으로 높게 증가하는 것과 연관될 수 있다(Figure 3c).

상세한 미래 지상바람의 변화를 파악하기 위해서 계절 평균 지상바람과 해면기압의 미래기후와 현재기후 차이를 분석하였다(Figure 4, Figure 5). 전반적으로 해면기압이 증가된 지역의 가장자리를 따라 시계방향, 감소된 지역의 가장자리를 따라 반시계방향으로 풍향의 패턴이 형성되고, 모든 계절에서 이러한 패턴은 동일하게 나타난다. 봄철 미래와 현재 지상바람의 차이에서 동중국해와 동해의 남서풍 변화가 지배적이다. 이러한 봄철 바람의 미래 변화는 동중국과 일본에서 미래 해면기압이 상승하여 고기압성 순환이 증가하였기 때문이다. 봄철 한반도에서는 주변 해양의 바람 변화와 일치하게 남서풍 차이가 증가하지만 변화 폭은 해양에 비하여 작다. 봄철과 유사하게 여름철 한반도 주변지역에서 남서풍계열 미래 증가가 뚜렷한데 이는 일본 지역의 해면기압 증가와 연관될 수 있다. 하지만 봄철에 비하여 여름철 기압변화가 크지 않아 지상바람의 변화도 상대적으로 작다.

Figure 2. 30-year seasonal mean surface wind (ms⁻¹) for (a, c, e, g) ERA-Interim and (b, d, f, h) Historical experiment.

Figure 3. Differences in 30-year annual mean (a) surface wind (ms^{-1}), (b) sea level pressure (hPa), and (c) surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) between future (2071-2100) and present (1981-2010) climates.

가을철 미래와 현재 차이에서는 동해 지역의 해면 기압 감소로 인하여 저기압성 순환이 약하게 나타난다. 가을철 동해의 해면기압 감소는 다른 계절보다 상대적으로 높은 해수면 온도 상승과 연관될 수 있다. 반면 일본 남쪽 지역에서 서풍계열의 바람이 증가하는데, 이것은 여름철과 달리 해면기압 증가 패턴이 동중국해쪽으로 치우치고 해면기압 감소 패턴이 일본 북쪽에 위치하고 있는 것과 관련이 있다. 가을철 한반도 지역에서는 동중국해 지역의 남서풍과 동해 지역의 저기압성 순환의 복합적인 영향으로 인해 남풍과 동풍의 계열의 바람이 약하게 증가한다. 겨울철의 경우, 북위 38도 남쪽 지역에서 해면기압의 강한 증가가 나타나고, 만주 지역을 포함한 고위도 지역에서 강한 감소가 나타난다. 이는 남-북 간의 기온 경도가 줄어들어 겨울철 북고남저의 기압배치가 약해진 것으로 이해할 수 있다. 이러한 해면기압의 변화로 인하여 한반도를 포함한 황해와 동해에서 서풍이 크게 증가한다.

남한 지역 미래 지상바람의 시공간적 변화를 파악하기 위하여 30년 월평균 동서방향 바람과 남북방향 바람의 변화에 대한 시간-위도 그래프를 분석하였다(Figure 6). 동풍이 다소 증가하는 8월부터 10월까지를 제외하면 모든 달에서 남한지역은 서풍이 증가한다. 특히, 겨울철 서풍 강화가 명확한데 이러한 지상바람의 변화는 겨울철 강설량 변화에도 영향을 끼칠 수 있다. 일반적으로 겨울철 한반도 주변에서 차가운 북서풍이 상대적으로 따뜻한 황해의 해수면 위를 지나면서 생성된 구름이 호남지방의 서해안과 노령 산맥을 만나 강제 상승하여 많은 강설이 발생한다(Lee and Chun, 2003; Lee and Lee, 2006). 미래 기후변화로 인해 겨울철 서풍계열의 바람이 더욱 증가한다면 이들 지역의 강설량이 현재보다 증가할 가능성이 충분히 있다.

또한 겨울철 서풍 강화는 중국으로 유입되는 미

Figure 4. Same as in Figure 3, but for 30-year seasonal mean surface wind (ms^{-1}).

세먼지 증가에 영향을 줄 수 있다. 남북 방향 바람의 경우도 유사하게 가을철 북위 37도 북쪽의 중부지역을 제외하고 모든 달과 남한 대부분의 지역에서 남풍이 증가하는데, 특히 남부 지역의 남풍 증가가 상대적으로 크다. 미래 남한 지역($34\sim39^\circ\text{N}$, $125\sim130^\circ\text{E}$)의 월별 바람 강도 변화와 방향 변화를 Figure 7에 분석하였다. Historical 실험에서 1월의 풍속이 가장 강하고, 6월의 풍속이 가장 약하게 나타난다. 이러한 풍속의 계절변동은 RCP8.5 시나리오 실험에서도 유사하게 나타난다. 하지만 모든 달에서 풍속의 미래 월평균 값이 현재에 비하여 다소 약해진다. 풍향의 경우, Historical 실험에서 겨울철은 북서풍이 지배적이고, 여름철은 남동

풍이 지배적으로 나타난다. RCP8.5 시나리오 실험에서 이러한 계절별 풍향 변동은 4월을 제외하고 전반적으로 유사하게 나타난다. 현재 기후의 4월에는 북서풍의 영향을 받지만, 미래 기후의 4월에는 남서풍으로 방향이 바뀐다. 이것은 앞에서 언급한 것과 같이 미래 봄철 한반도 남쪽의 기압 증가가 고기압성 순환을 증가시켜 남한 지역이 4월부터 남풍 계열의 영향을 받을 수 있다는 것을 의미한다.

Figure 8은 남한 지역에서 미래 극한 지상바람의 강도 변화를 나타낸 것이다. 3시간 풍속 자료를 이용하여 남한 지역에서 연중 최대풍속을 산출하였다. 가로축은 Historical 실험과 RCP8.5 시나리

Figure 5. Same as in Figure 3, but for 30-year seasonal mean sea level pressure (hPa).

Figure 6. Time-latitude graph of differences in 30-year monthly mean (a) zonal wind (ms⁻¹) and (b) meridional wind (ms⁻¹) averaged between 125-130°E.

Figure 7. Differences in 30-year monthly mean (a) surface wind speed (ms^{-1}) and (b) surface wind direction (degree) for Historical (dashed line) and RCP8.5 (solid line) runs in South Korea.

Figure 8. Time-series of the annual maximum surface wind (ms^{-1}) for Historical (dashed line) and RCP8.5 (solid line) runs in South Korea. On x-axis, 1-30 indicate 1981-2010 in Historical run and 2071-2100 in RCP8.5 run, respectively.

오 실험의 분석기간 30년을 의미하며 각각 1981~2010년과 2071~2100년을 나타낸다. 연중 최대풍속의 평균값은 Historical 실험(20.21ms^{-1})에 비해 RCP8.5 실험(20.43ms^{-1})에서 소폭 증가한 반면,

연중 최대풍속의 표준편차는 Historical 실험(1.98)에 비해 RCP8.5 실험(2.77)에서 약 40% 증가하였다(Table 1). 더욱이 Historical 실험 전체기간동안 최대 강풍은 25ms^{-1} 까지 나타나지만, RCP8.5 실험

Table 1. Mean and standard deviation of annual maximum wind speeds for Historical (1981-2010) and RCP8.5 (2071-2100) experiments.

	Historical	RCP8.5	Change (%)
Mean (ms^{-1})	20.21	20.43	+1.10
SD	1.98	2.77	+39.9

험에서는 33ms^{-1} 까지 나타났다. 이러한 결과는 강풍의 평균적인 강도는 크게 변하지 않지만 경년변동성과 극한 강풍 강도는 크게 증가할 수 있다는 것을 의미한다. 극한 강풍 증가의 가능한 원인 중 하나는 우리나라 주변의 미래 태풍 강도 증가가 될 수 있다. 우리나라의 지상바람 극한값에 가장 큰 영향을 주는 기상현상 중 하나인 태풍은 미래 빈도 변화는 불확실하지만 강도는 증가한다는 것이 일반적이다. 예로 Lee *et al.* (2013)은 미래 한반도 주변의 태풍 강도가 해수면온도 증가와 연직바람시어의 약화로 증가하게 된다는 것을 보였다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도 주변의 지상바람 미래 변화를 분석하기 위하여 지역기후모델이 생산한 고해상도 기후변화 시나리오를 이용하였다. 미래 변화 분석에 앞서 재분석자료와의 비교를 통해 해당 지역기후모델의 성능을 평가하였다. 이후 Historical 실험을 상세화한 현재 30년(1981~2010년) 결과와 RCP8.5 시나리오를 상세화한 미래 30년(2071~2100년) 결과를 비교하여 한반도 주변지역의 미래 지상 바람의 변화를 분석하였다.

먼저, Historical 실험 결과를 ERA-Interim 재분석자료와 비교하였다. 연평균 지상바람 비교에서 SNURCM은 한반도 남해의 동풍을 강하게 모의하고 동해에서의 서풍을 약하게 모의하였지만 한

반도 주변의 북풍 계열의 바람과 동해 부근의 지상 바람 수렴을 유사하게 모의하는 등 전반적인 바람 패턴을 현실적으로 잘 모의하였다. 또한 30년 계절별 지상바람 검증에서 SNURCM은 어느 정도의 오차를 갖지만, 전반적으로 한반도 주변의 계절별 주풍대 모의를 재분석자료와 일치하게 모의하였다. 미래 한반도 주변 기압 배치와 지상온도의 변화와 연관되어 한반도 주변의 바람은 남서풍 또는 서풍이 주로 증가하는 경향을 보인다. 계절에 따른 바람 변화 차이는 크지 않고, 전반적으로 남풍 계열의 바람이 강화되는데 이는 여름철 주풍인 남풍은 미래에 강화되고, 그 외 계절의 주풍인 북풍은 약화될 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 계절별 지상바람의 변화는 한반도 주변의 기압 배치의 변화와 크게 연관되어 있다. 미래 월평균 바람 강도는 모든 월에서 다소 약해지지만 연 최대 풍속의 경년 변동성은 약 40% 증가한다. 즉, 현재에 비해 미래에 평균적인 풍속은 약해지지만, 풍속의 극값은 증가하게 된다.

이 연구를 통해 산출된 미래 지상바람의 변화 정보는 방재, 환경, 에너지 분야 등에서 활용될 수 있다. 미래 최대 풍속의 극값 증가는 내풍 설계 시 근거로 활용될 수 있고, 겨울철 서풍의 뚜렷한 증가는 중국발 미세먼지 문제의 기초정보로 활용될 수 있다. 또한, 미래 지상바람의 풍향/풍속 변화 정보는 풍력 자원 지도 작성에 활용될 수도 있다.

이 연구는 기상청 HadGEM2-AO 전구모델 시나리오를 단일 지역기후모델로 상세화한 결과를 이용하였다는 한계를 갖는다. 산출된 정보의 불확실성을 줄이기 위하여 다양한 전구모델 시나리오를 다중 지역기후모델로 상세화한 결과를 이용하는 연구를 향후 수행할 필요가 있다. 그리고 본 연구에서 지상바람 변화 원인으로 분석한 한반도 주변 기압배치의 변화는 대규모 순환 변화의 일부이기 때문에 바람 변화의 근원적인 원인에 접근하지

못하였다. 이러한 한계를 극복하기 위해 지역기후 모델 모의영역 밖의 전구모델 결과를 이용하여 더 큰 규모에서 미래 기압배치의 변화가 한반도 주변 바람변화에 끼치는 영향을 연구할 필요가 있다.

사사

이 논문은 2015년 UNIST(울산과학기술원) 연구비(1,150033.01)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- An, S.-I., Ha, K.-J., Seo, K.-H., Yeh, S.-W., Min, S.-K., and Ho, C.-H., 2011, A Review of Recent Climate Trends and Causes over the Korean Peninsula. *Climate Change Research*, 2(4), 237-251 (in Korean).
- Baek, H.-J., Lee, J., Lee, H.-S., Hyun, Y.-K., Cho, C.-H., Kwon, W.-T., Marzin, C., Gan, S.-Y., Kim, M.-J., and Choi, D.-H., 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(5), 603-618.
- Bonan, G. B., Oleson, K. W., Vertenstein, M., Levis, S., Zeng, X., Dai, Y., Dickinson, R. E., and Yang, Z.-L., 2002, The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR community climate model. *Journal of Climate*, 15, 3123-3149.
- Briegleb, B., 1992, Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR Community Climate Model. *Journal of Geophysical Research*, 97(D7), 7603-7612.
- Cha, D.-H. and Lee, D.-K., 2009, Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique. *Journal of Geophysical Research*, 114, D14108.
- Cha, D.-H., Jin, C.-S., and Lee, D.-K., 2011, Impact of local sea surface temperature anomaly over the western North Pacific on extreme East Asian summer monsoon. *Climate Dynamics*, 37(9), 1691-1705.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., and Vitart, F., 2011, The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597.
- Hong, J.-Y. and Ahn, J.-B., 2015, Changes of early summer precipitation in the Korean Peninsula and nearby regions based on RCP simulations. *Journal of Climate*, 28(9), 3557-3578.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341.
- Kain, J. S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170-181.
- Kim, G., Kim, J., Kim, C.-J., Jin, C.-S., Cha, D.-H., Suh, M.-S., and Park, S.-C., 2014, Climate Change Projections over CORDEX East Asia Domain using Multi-RCMs, *Journal of Climate*

- Research*, 9(4), 257-268 (in Korean).
- Lee, D.-K., Cha, D.-H., Jin, C.-S., and Choi, S.-J., 2013, A Regional Climate Change Simulation over East Asia. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(5), 1-10.
- Lee, J.-W., Hong, S.-Y., Chang, E.-C., Suh, M.-S., and Kang, H.-S., 2014, Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Climate Dynamics*, 42(3), 733-747.
- Lee, K. and Lee, S., 2006, The Spatial Distribution of Snowfall and its Development Mechanism over the Honam Area, *Journal of the Korean Geographic Society*, 41(4), 457-469 (in Korean).
- Lee, S. and Chun, J.-H., 2003, The Distribution of Snowfall by Siberian High in the Honam Region: Emphasized on the Westward Region of the Noryung mountain ranges, *Journal of the Korean Geographic Society*, 38(2), 173-183 (in Korean).
- Park, C.-Y., Min, S.-K., Lee, D., Cha, D.-H., Suh, M.-S., Kang, H.-S., Hong, S.-Y., Lee, D.-K., Baek, H.-J., Boo, K.-O., and Kwon, W.-T., 2015, Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia, *Climate Dynamics*, (online published).
- Reisner, J., Rasmussen, R., and Brientjes, R., 1998, Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124(548), 1071-1107.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., and Rafaj, P., 2011, RCP8.5 - A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2), 33-57.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., 2014, *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, 1535 pp.
- Suh, M.-S., Oh, S.-G., Lee, D.-K., Cha, D.-H., Choi, S.-J., Jin, C.-S., and Hong, S.-Y., 2012, Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea. *Journal of Climate*, 25(20), 7067-7082.

책임편집: 이승호

영문교열: 조창현