Atmosphere. Korean Meteorological Society Vol. 23, No. 4 (2013) pp. 527-538 http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2013.23.4.527 pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

기 술 노 트 (Technical Note)

CMIP5 Historical 시나리오에 근거한 WRF를 이용한 한반도 중심의 동북아시아 상세기후

안중배¹⁾ · 홍자영^{1),*} · 서명석²⁾

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부, ²⁾공주대학교 대기과학과

(접수: 2013년 9월 30일, 게재확정일: 2013년 10월 23일)

Present-Day Climate of the Korean Peninsula Centered Northern East Asia Based on CMIP5 Historical Scenario Using Fine-Resolution WRF

Joong-Bae Ahn¹⁾, Ja-Young Hong^{1),*}, and Myung-Suk Seo²⁾

¹⁾Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea ²⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

Abstract In this study, climate over Korea based on the Historical scenario induced by HadGEM2-AO is simulated by WRF. For this purpose, a system that can be used be for numerical integration over the Far East Asian area of the center of the Korean Peninsula with 12.5 km-horizontal resolution was set-up at "Haebit", the early portion of KMA Supercomputer Unit-3. Using the system, the downscaling experiments were conducted for the period 1979-2010. The simulated results of HadGEM2-AO and WRF are presented in terms of 2 mtemperature and precipitation during boreal summer and winter of Historical for the period 1981~2005, compared with observation. As for the mean 2 m-temperature, the general patterns of HadGEM2-AO and WRF are similar with observation although WRF showed lower values than observation due to the systematic bias. WRF reproduced a feature of the terrainfollowing characteristics reasonably well owing to the increased horizontal resolution. Both of the models simulated the observed precipitation pattern for DJF than JJA reasonably, while the rainfall over the Korean Peninsula in JJA is less than observation. HadGEM2-AO in DJF 2 mtemperature and JJA precipitation has warm and dry biases over the Korean Peninsula, respectively. WRF showed cold bias over JJA 2 m-temperature and wet bias over DJF precipitation. The larger bias in WRF was attributed to the addition of HadGEM2-AO's bias to WRF's systematic bias. Spatial correlation analysis revealed that HadGEM2-AO and WRF had above 0.8 correlation coefficients except for JJA precipitation. In the EOF analysis, both models results explained basically same phase changes and variation as observation. Despite the difference in mean and bias fields for both models, the variabilities of the two models were almost similar with observation in many respects, implying that the downscaled results can be effectively used for the study of regional climate around the Korean Peninsula.

Key words: WRF, HadGEM2-AO, regional climate, historical, northern East Asia

^{*}Corresponding Author: Ja-Young Hong, Division of Earth Environmental System, Pusan Notional University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geunjeong-gu, Busan 609-735,

Korea. Phone : +82-51-514-1932, Fax : +82-51-515-1689

E-mail : hongja0627@pusan.ac.kr

1. 서 론

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) 4차 보고서(4th Assessment Report, AR4)에 따르면 최 근 급속히 진행되는 지구 온난화의 원인으로 추정되 는 이상기상의 증가로 인하여 전세계적으로 기상재해 가 증가하고 있으며 이에 따른 경제적·산업적 피해 도 증가하고 있다. 기후변화는 시간 및 공간적으로 다 양하게 진행되고 있기 때문에 국가차원의 대응 및 적 응 대책이 필요하며, 이를 위해 신뢰성 높은 정보가 필요하다. 또한, 지역적으로 기후변화 영향 및 취약성 이 상이하게 나타나므로 시·공간적으로 상세한 자료 산출이 필요하다.

최근 IPCC는 향상된 기후변화 자료 생산을 위한 국제표준 온실가스 배출 시나리오(Representative Concentration Pathways, RCP)를 산정하고, 이를 기반 으로 Coupled Model Intercomparison Project phase 5(CMIP5)를 진행하였다. 국립기상연구소는 이 프로젝 트에 연계되어 Hadley Centre Global Environmental Model version 2 - Atmosphere and Ocean(HadGEM2-AO)을 이용하여 과거(Historical) 및 미래 전망(RCP2.6, 6.0, 4.5, 8.5) 자료를 생산하였다(Baek *et al.*, 2011). 따라서 이를 활용하여 한반도 지역에서의 상세기후 자료를 제시할 필요가 있다.

지금까지 다양한 지역기후모델을 활용하여 동아시 아지역 및 한반도 주변 지역에 대한 기후 예측능력을 평가하고 개선하는 연구(e.g., Park et al., 2005; Kim and Hong, 2010)들이 다양하게 진행되어 왔으며, IPCC AR4 시나리오 모의 결과를 기반으로 한 기후변화 예 측 자료 생산과 분석연구(e.g., Boo et al., 2005; Hori and Ueda, 2006)가 이루어져 왔다. Ahn et al.(2010)은 접합대순환모형으로 모의된 이산화탄소 배증시의 기 후자료를 기반으로 지역기후모델인 Weather Research and Forecasting(WRF)(Skamarock et al., 2008)를 활용 하여 한반도 상세 기후를 생산하고, 농업기후지수 변 화에 대한 연구와 같은 기후변화 시나리오 분석에 관 한 연구를 수행한 바 있다. 또한 Oh et al.(2011)은 COordinated Regional climate Downscaling EXperiment (CORDEX) 동아시아 지역에서 전지구모델 자료를 Regional Climate Model version 4(RegCM4)에 경계조 건으로 처방하여 50 km 해상도의 상세 지역기후 모 의성능에 대하여 연구하였고, Hong and Chang(2012) 은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Regional Spectral Model(RSM)을 이용하여 스 페트럴 너징에 따른 CORDEX 동아시아 지역의 민감 도 실험을 실시한 바 있다. Hong et al.(2013)은 RegCM4를 이용하여 RCP 시나리오에 따른 동북아시 아 지역의 자료를 생산하고 현재기후(1986~2005)의

한국기상학회대기 제23권 4호 (2013)

모의능력을 살펴보았다. 이들의 연구 결과에 의하면 모델 결과는 지형 및 지리적 특성에 따른 공간분포를 대체로 잘 모의하지만 기온과 강수의 경우 음의 오차 가 있음을 언급하였다. Choi *et al.*(2011) 또한 Oh *et al.*(2011)과 유사한 실험을 Seoul National University Regional Climate Model(SNURCM)과 WRF를 이용하 여 수행하였으며, 두 모델이 관측과 높은 공간상관을 보이지만 분석 영역에서 북위 40도를 중심으로 음의 오차를 보임을 제시하였다.

미래 기후 전망을 제시하기 이 전에 모델이 관측과 비교하여 과거 및 현재의 기후를 어느 정도의 수준으 로 모의하는지를 평가하는 연구가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 지역규모모델인 WRF을 이용 하여 CMIP5에 근거한 한반도 지역의 상세 기후변화 및 전망자료를 생산하기 위한 시스템을 구축하고 이 시스템으로 생산된 자료에 대한 분석을 관측 및 전지 구모델 자료와 비교하여 제시하였다. 본 연구를 통해 서 제시될 결과는 향후 RegCM4 등 또 다른 3개의 지역기후 모형들의 결과와 연합하여 앙상블 예측 결 과로써 제시될 예정이다. 2장에서는 본 연구에 사용 된 자료 및 실험방법에 대해 기술하였으며, 3장에서 는 전지구 모델과 지역규모 모델에 의해 분석영역에 대하여 모의된 결과를 비교하였다. 마지막으로 요약 및 토의는 4장에 제시하였다.

2. 자료 및 실험 방법

본 연구에서는 기상청 기상연구소에서 HadGEM2-AO를 이용하여 Historical에 대하여 생산한 자료를 WRF의 경계장 및 초기장으로 처리하였다. 여기서 Historical은 과거 및 현재 기후 적분을 의미하며 CO₂, N₂O, CH₄와 같은 온실가스나 바이오매스 등을 고려 하여 모델 적분시 관측자료를 입력값으로 넣어 생산 된 자료이다(Meinshausen *et al.*, 2011). HadGEM2-AO 의 대기모델 수평해상도는 1.875°×1.250°, 시간해상 도는 6시간 간격이며 윤년은 고려하지 않고 한 달을 30일(1년은 360일)로 적분하여 생산된 모의자료를 WRF의 초기장 및 경계장으로 사용하였다. HadGEM2-AO의 구성에 대한 자세한 설명은 Collins *et al.*(2011) 를 참고하면 된다.

본 연구에 사용된 WRF의 버전은 3.4로 일 최고기 온, 일 최저기온, 10 m 최대 동서바람, 10 m 최대 남 북바람 등 극단변수들을 생산할 수 있다. WRF를 이 용한 지역규모 영역은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 한 반도를 중심으로 일본과 중국 일본을 포함하는 영역 이다. 지도투영법은 Lambert-Conformal을 사용하고 지 형해상도는 5 m 자료를 적용한다. 수평격자 간격은 12.5 km이고 격자수는 201 × 180이며 기준 경도 및 위

528



Fig. 1. The domain and terrain height [m] of WRF.

Table 1. The details of WRF configuration.

| | East Asia |
|-----------------------|-------------------------------|
| Horizontal demensions | 201×180 |
| Horizontal resolution | $12.5 \times 12.5 \text{ km}$ |
| Vertical resolution | 28 (Eta) levels |
| Reference latitude | 37.5° |
| Reference longitude | 127.5° |
| Map projection | Lambert Conformal |

도는 각각 37.5°와 127.5°이다(Table 1).

적분에 사용된 물리과정 중 구름물리 과정은 WRF Single-Moment 3-class(WSM3) scheme(Hong *et al.*, 2004)을 사용하며, 적운 모수화는 Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004)을 사용한다. 장과 복사와 단과복사에 대 해서는 National Center for Atmospheric Research (NCAR) Community Atmospheric Model(CAM) scheme (Collins *et al.*, 2002)을 사용하고, 지표층에는 Monin-Obukhov similarity(Jiménez *et al.*, 2012) 이론을 적용 한다. 그리고 지면은 Noah Land Surface Model(Chen and Dudhia, 2001)을 적용하며, 행성 경계층은 Yonsei University scheme(Hong *et al.*, 2006)을 사용한다(Table

Table 2. WRF physical schemes used in this study.

2). 난류와 혼합에 대한 과정과 에디 계수는 본 실험 에서 적용하지 않는다. 적분 간격은 60초이며, 복사 물리과정의 계산간격은 30분이고, 적운 물리과정의 계 산은 5분으로 설정하여 한 시간 간격 자료를 생산한다. WRF의 경우 윤년을 고려하며, 1년을 360일로 설정 하여 적분하는 것은 불가능하기 때문에 HadGEM2-AO의 매년 360일 자료를 365일이나 366일로 내삽해 야 한다. 따라서 HadGEM2-AO의 자료를 NCAR Command Language(NCL)와 Grid Analysis and Display System(GrADS)을 이용하여 내삽하고, Formular Translator(FORTRAN)를 이용하여 지표 및 기압층 ascii 자료를 WRF의 입력자료 형식인 intermediate 파일로 변환한다. 적분 기간은 1979년부터 2010년까지 32년 으로 초기 2년은 모델의 스핀업 기간으로 간주하여 분석에 사용하지 않는다. 본 연구의 분석지역은 HadGEM2-AO와 WRF에 의해 생산된 한반도를 포함 한 극동 아시아(117°E~138°E, 29°N~46°N)이다. 분석 기간과 변수는 1981~2005 여름(6월부터 8월까지의 평 균, JJA)과 겨울(12월부터 다음해 2월까지의 평균, DJF)의 2m 평균 기온 및 강수이며, 관측 및 전지구 모델과 지역규모 모델에 의해 모의된 결과와 비교했 다. 모델들의 모의결과를 비교하기 위하여 사용된 고 해상도 관측자료는 Climatic Research Unit(CRU) 3.2 (Harris et al., 2013)의 0.5° 간격 기온과 강수이다. CRU의 해양 지역은 결측값으로 처리되어 육지 지역 만 자료 값이 있기 때문에 관측과 비교를 위하여 모 델 자료의 해양 지역 자료 또한 결측값으로 처리하여 분석하였다.

3.결 과

3.1 평균과 오차

Figures 2와 3은 각각 관측(CRU v3.2)과 모델 (HadGEM2-AO, WRF)의 기온과 강수에 대한 여름 및 겨울 평균장이다. 각 그림의 오른쪽 상단에 위치한 숫 자는 분석 영역의 육지 평균값을 의미한다. 여름 평 균 관측 기온은 북위 40도 이하 중국 지역과 35도 이 하 일본 일부 지역에서 24℃ 이상을 보인다(Fig. 2).

| Physics | Schemes | References |
|---|-----------------------------------|--|
| Microphysics | WSM3 | Hong et al. (2004) |
| Longwave Radiation Shortwave Radiation | CAM | Collins et al. (2002) |
| Surface Layer | Monin-Obukhov similarity | Jiménez et al. (2012) |
| Land Surface | Noah | Chen and Dudhia (2001) |
| Planetary Boundary Layer Cumulus | Yonsei University Kain-Fritsch | Hong <i>et al.</i> (2006) Kain (2004) |



Fig. 2. From June to August (JJA) and from December to next year February (DJF) mean climatologies of temperature at 2 m [°C] for the 1981~2005 period for observation, HadGEM2-AO and WRF historical simulations.



Fig. 3. Same as Fig. 2 except for precipitation $[mm day^{-1}]$.

중국 등베이 지방 일부 지역(118°E~126°E, 40°N~46°N) 은 같은 위도의 다른 지역보다 높은 기온을 나타낸다. 북위 40도 이하 한반도는 위도에 따라 18~24°C의 분 포를 보이며, 개마고원과 높은 산맥이 이 위치한 북 위 40~42도 지역에서는 동일한 위도의 다른 지역보 다 낮은 12~15℃이다. 일본에서는 바다에 인접한 지

한국기상학회 대기 제23권 4호 (2013)

역은 높은 온도를 보이며 내륙 지역은 상대적으로 낮 은 온도를 나타낸다. 해양을 제외한 육지의 분석 영 역 여름 평균 기온은 22.0°C이다. 겨울의 관측 기온 은 여름보다 위도에 따른 분포가 뚜렷하게 나타난다. 북위 35도 이하 지역은 겨울 평균 영상이며, 그 이상 지역은 영하이다. 여름과 동일하게 개마고원을 포함 한 인근 지역은 같은 위도 다른 지역보다 낮으며, 북 위 40도 이상의 동중국 지역은 상대적으로 따뜻한 분 포를 보인다. 분석 영역의 겨울 평균 기온은 -5.4°C이다.

HadGEM2-AO는 관측보다 낮은 해상도로 인해 한 반도를 본래 영토보다 넓게 설정하고 제주도를 해양 으로 적용한다. HadGEM2-AO에 의해 모의된 영역 내 육지의 여름 기온은 22.7°C로 관측 평균값보다 다소 큰 값을 가진다. 한반도 여름 기온은 관측과 유사한 값을 보인다. 중국 동남부 및 동북부 지역(118°E~126°E, 40°N~46°N)의 여름 기온을 관측에 비해 넓고 높게 모 의한다. 그리고 관측에서 나타나는 일본 지역에서의 내륙-해안 온도 분포 특징을 HadGEM2-AO는 나타내 지 못한다. 하지만 HadGEM2-AO는 고온 지역과 저 온 지역이 나타나는 위치를 대략적으로 잘 모의하는 것으로 판단된다. 겨울 평균 기온의 경우, HadGEM2-AO는 위도에 따른 변화 분포를 잘 보인다. 그리고 관 측과 동일하게 한반도 해양지역이 내륙지역보다 높은 기온을 나타낸다. 북위 44도 이상 지역의 기온은 -18°C 이하로 관측보다 낮게 모의한다. 하지만 HadGEM2-AO는 해상도가 낮아 지리적인 특징에 따른 온도변화 는 잘 나타내지 못한다. HadGEM2-AO에 의해 모의 된 겨울 평균 기온은 -6.2°C로 관측보다 낮다.

WRF에 의해 생산된 자료는 고해상도이기 때문에 지역 및 고도에 따른 기온 분포를 관측보다 더 상세 하게 모의한다. 또한, WRF는 HadGEM2-AO과 달리 제주도를 육지로 나타낸다. WRF의 여름 기온의 경우 HadGEM2-AO에서 나타나지 않았던 한반도 북부 및 러시아 해안지역의 기온을 동위도대의 다른 지역보다 상대적으로 낮게 잘 나타낸다. 그리고 한반도 중남부 에 위치한 산맥에 따른 기온 분포도 잘 보인다. 중국 동남부의 27℃ 이상의 높은 기온을 보이는 영역은 관 측보다 좁게 모의한다. 그리고 WRF의 일본 지역 분 포는 관측과 유사하게 해양 지역이 내륙 지역보다 높 은 기온 분포이다. WRF의 겨울 기온 역시 관측과 유 사하게 한반도 중부 이남 해양 지역이 내륙 지역보다 높은 형태를 보인다. 북위 40도 이상 지역에서는 관 측보다 기온이 낮지만 등온선의 간격 및 모습이 관측 과 유사하다. 분석 영역 육지 평균 기온은 -8.2℃로 관측보다 낮다. 이로써, WRF에 의해 모의된 여름과 겨울 기온이 관측 및 HadGEM2-AO에 비해 낮게 모 의하지만, 지형에 의한 변화는 잘 나타냄을 알 수 있다. 강수의 경우 동아시아 여름 몬순의 영향(e.g., Qian et al., 2002; Chang, 2004; Chen et al., 2004)으로 겨 울보다 여름에 많은 양이 나타난다(Fig. 3). 여름 평균 육지 강수 관측은 5.4 mm day⁻¹이다. 북위 40도 이하 의 대부분 지역에서 5 mm day⁻¹ 이상의 강수량을 보 이며, 특히 한반도 남부 지역과 일본 규슈 지역에서 9 mm day⁻¹ 이상의 많은 강수량을 보인다. 겨울 관측 강수량의 경우 북위 35도 이하 한반도 및 일본 지역 에서 2 mm day⁻¹ 이상이다. 북위 35도 이상의 대부분 지역에서는 1 mm day⁻¹ 이하의 작은 값을 보인다. 북 위 35도 이상 지역인 일본 일부 지역(132°E~138°E, 35°N~37°N)에서는 3~8 mm day⁻¹의 많은 강수량을 나 타낸다. 겨울 평균 육지 강수량은 0.8 mm day⁻¹이다. 강수량은 대체적으로 낮은 위도에서 높은 위도 방향 으로 갈수록 작은 분포를 나타낸다.

HadGEM2-AO는 한반도 지역의 많은 강수량을 잘 모의하지 못하지만, 분석 영역 일본 지역의 여름 강 수 특징은 잘 나타낸다. 여름 평균 육지 강수량은 4.4 mm day⁻¹로 관측보다 다소 작은 값이다. HadGEM2-AO의 겨울 육지 강수는 평균 1.2 mm day⁻¹로 관측과 유사한 값이다. 관측과 동일하게 북위 37도 이하 지역에서 그 이상 지역보다 상대적으로 많은 강수량을 보인다. 그 리고 일본 이시카와 지역(136°E~138°E, 35°N~37°N)의 강수 특징도 잘 나타낸다. HadGEM2-AO는 겨울 강 수를 여름 강수보다 잘 모의하는 것으로 판단된다.

WRF에 의해 모의된 여름 육지 강수 평균은 5.9 mm day⁻¹로 관측과 비슷하다. 지역적으로 중국 북위 32도 이하 동남부 지방의 강수는 관측 및 HadGEM2-AO보 다 많이 모의한다. 그리고 HadGEM2-AO에서는 잘 모 의하지 못한 한반도 여름 강수를 지리적 특징에 따라 관측과 유사하게 모의함을 알 수 있다. 게다가 관측 및 HadGEM2-AO와 동일하게 대부분의 일본 분석 지 역에서 강수를 6 mm day⁻¹ 이상으로 모의한다. WRF 는 겨울 평균 육지 강수량을 관측보다 2배 이상 많이 모의한다. 이는 한반도 강원도 지역 및 일본 지역에 서 관측보다 많은 강수량을 모의하기 때문이다. 북위 40도 이상의 지역의 겨울 강수는 관측과 동일하게 1 mm day⁻¹ 이하로 나타난다.

모델에 의해 모의된 평균값과 관측 평균과의 차이 를 정량적으로 비교하기 위하여 오차를 제시하였다. 모델에 의해 생산된 자료는 관측과 동일한 격자로 변 환하여 오차를 구하였다. HadGEM2-AO은 여름에 대 부분 지역에서 양의 오차를 보이며, 해안 지역은 음 의 오차를 나타낸다(Fig. 4). 그리고 한반도 서해안 및 남해안 지역은 음의 오차를 보이는 반면, 한반도 내 륙은 양의 오차를 나타낸다. HadGEM2-AO의 겨울 기 온은 중국 및 러시아 지역에서 음의 오차이고, 한반 도와 일본에서 양의 오차이다. 그리고 한반도 북부 지 역(126°E~130°E, 39°N~42°N)의 기온은 여름과 겨울



Fig. 4. Biases in JJA and DJF temperature at 2 m [°C] climatology for HadGEM2-AO and WRF against the observation.

모두 관측보다 따뜻하게 모의된다.

WRF의 여름 기온 오차의 경우 HadGEM2-AO와 반 대로 한반도를 포함한 대부분의 지역에서 음의 값을 나타낸다. WRF의 겨울 기온의 오차는 한반도 서해안 지역과 일본 지역에서는 양의 오차를 보인다. 또한 분 석 지역의 러시아 및 중국 해안 지역에서도 양의 오차 를 나타내며, 그 외 내륙 지역에서는 음의 오차를 보 인다. 그리고 HadGEM2-AO의 여름과 겨울에 한반도 북부 지역에서 나타났던 3℃ 이상의 양의 오차가 WRF 에서는 그 크기가 다소 줄어들거나 음의 오차로 나타난다. HadGEM2-AO의 여름 강수는 북위 40도 이하 지역 에서 대부분 음의 오차를 나타내며, 특히 북위 35도 이하 한반도 및 일본 지역에서 관측보다 5 mm day⁻¹ 이상 적은 음의 오차를 보인다(Fig. 5). 하지만 겨울 강수의 경우 HadGEM2-AO는 북위 35도 이하 지역에

서 양의 오차를 보이며 그 외의 지역은 관측과 상당 히 유사한 값이다. 이로써 HadGEM2-AO는 강수량이 적은 지역(여름 북위 40도 이상 지역, 겨울 북위 35

한국기상학회대기 제23권 4호 (2013)

도 이상 지역)의 강수는 잘 모의함을 알 수 있다.

WRF의 여름 강수는 한반도에서는 음의 오차를 보 이며, 오차의 크기는 HadGEM2-AO보다 작게 나타난 다. 그리고 한반도를 제외한 대부분 지역에서는 양의 오차이다. 여름 강수에서 분석 영역 전반적으로 음의 오차를 나타냈던 HadGEM2-AO와 달리 WRF는 지역 적인 차이를 보인다. WRF의 겨울 강수는 북위 40도 이상 지역에서 관측과 비슷한 강수량을 모의하여 오 차가 작다. 하지만 한반도 해안 지역과 분석 일본 지 역 및 북위 35도 이하 지역에서는 대부분 양의 오차 를 나타낸다. 따라서 WRF는 관측 및 HadGEM2-AO 에 비해 겨울 강수를 과대 모의함을 알 수 있다.

3.2 변동성 평가

Figure 6은 Suh *et al.*(2012)의 Fig. 4에 제시된 산 포도와 유사한 Standard deviation-Correlation-Root mean square error(SCR) 다이어그램으로 표준 편차 (standard deviation), 상관계수(correlation coefficient),



Fig. 5. Same as Fig. 4 except for precipitation $[mm day^{-1}]$.

평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)를 각각 가로축, 세로축, 원의 크기로 나타낸다. 표준 편 차는 관측과의 차이 비교를 위하여 정규 표준 편차 (normalized standard deviation)로 분석하였다. 그리고 상관계수는 시간 또는 공간 상관계수로 구할 수 있으 며, 본 연구에서는 공간 상관계수를 적용하였다. 그림 에서 파란색 원은 HadGEM2-AO, 빨간색 원은 WRF 를 의미한다.

여름 기온의 경우 HadGEM2-AO와 WRF는 비슷한 크기의 공간 상관계수와 RMSE를 보인다(Fig. 6a). HadGEM2-AO과 WRF의 여름 기온 정규 표준 편차 값은 1.2 이상으로 서로 비슷하다. 두 모델의 겨울 기 온은 관측 자료와 1에 가까운 높은 공간 상관관계를 보인다. 그리고 RMSE는 HadGEM2-AO와 WRF 모두 3.6 이상으로 여름 기온의 RMSE보다 큰 값이다. 두 모델의 겨울 기온 표준 편차 또한 관측보다 다소 크 며, 그 값은 WRF가 HadGEM2-AO보다 크다.

여름 강수는 HadGEM2-AO가 WRF보다 높은 공간

상관관계와 작은 RMSE를 보인다(Fig. 6b). 그리고 정 규 표준 편차 또한 WRF보다 HadGEM2-AO가 관측 과 유사한 정도의 값을 나타낸다. 겨울 강수는 두 모 델 모두 0.8 이상의 상관관계이고, 이는 여름 강수의 경우 보다 높은 상관성을 보인다. 겨울 강수의 RMSE 는 WRF가 HadGEM2-AO보다 2배 이상 큰 값을 나 타낸다. HadGEM2-AO의 겨울 강수는 관측보다 작은 변동성을 가지며, WRF의 겨울 강수는 관측보다 다소 큰 편차이다.

3.3 EOF 분석

Figures 7과 8은 각각 관측과 두 모델의 여름 및 겨 울 기온과 강수에 대한 Empirical Orthogonal Function (EOF) 공간장이다. 각 그림 상단의 숫자는 각 공간장 에 대한 설명 변동을 의미한다. 관측의 여름 기온의 EOF 첫 번째 모드는 전체 변동의 69.1%를 설명하며 모든 영역에서 음의 값이다(Fig. 7a). 여름 기온의 EOF 두 번째 모드의 변동성은 11.3%이며 북위 40도를 기



Fig. 6. The SCR diagram of (a) temperature at 2 m and (b) precipitation averaged over JJA and DJF for HadGEM2-AO (blue) and WRF (red). The number in figure and size of circle indicate RMSE.

준으로 북으로는 음의 값이고, 남으로는 양의 값이다. HadGEM2-AO의 여름 기온 EOF 첫 번째 모드의 퍼 센트 변동은 관측보다 작지만 공간장은 관측과 동일 하게 음의 값을 보인다. HadGEM2-AO의 여름 기온 두 번째 모드의 경우 관측보다 다소 큰 값이며, 북위 40도를 기준으로 음과 양의 대비가 관측보다 뚜렷하게 나타난다. WRF의 여름 기온 EOF 모드는 HadGEM2-AO와 상당히 유사한 모습이다. 그리고 각 EOF 모드 의 퍼센트 변동은 관측과 비슷한 값을 나타낸다. 관 측, HadGEM2-AO, WRF의 겨울 기온의 EOF 공간장 은 여름의 경우와 동일하게 첫 번째 모드에서 음의 값을 나타내며, 분석 영역의 북쪽에서 최고이고, 남쪽 으로 향할수록 최저이다(Fig. 7b). 이는 재분석 자료 를 이용하여 북동아시아(100°E~140°E, 30°N~60°N) 1957~2006 겨울 기온의 첫 번째 EOF를 제시한 Wang et al.(2010)의 결과와 유사하다. 겨울 기온의 EOF 두

한국기상학회대기 제23권 4호 (2013)

번째 모드 또한 여름 기온의 두 번째 모드와 동일하 게 북위 40도 기준 납북으로 양과 음의 값이다. 하지 만 고유 벡터 값은 여름의 경우보다 큰 값을 나타낸 다. 겨울 기온의 각 EOF 모드의 퍼센트 변동값은 WRF가 관측과 유사한 값을 보이며, HadGEM2-AO는 관측보다 작거나 큰 값을 나타낸다.

관측 여름 강수의 EOF 첫 번째 모드는 Fig. 3의 여 름 강수 평균장에서 강수량이 많은 북위 37도 이하 한반도 및 일본 남부 지역에서 강한 음의 고유 벡터 값을 나타낸다(Fig. 8a). 그리고 관측 여름 강수의 두 번째 모드는 한반도에서 강한 양의 값을 보인다. 이 EOF 두 모드는 각각 전체 변동의 32.2%와 15.4%를 설명한다. HadGEM2-AO의 여름 강수 EOF 첫 번째 모드는 음의 영역을 관측보다 낮은 위도에서 나타내 고, 양의 값을 관측보다 크게 나타낸다. 이는 전체 변 동의 23.2%를 설명하며 변동값은 관측보다 다소 작 안중배 · 홍자영 · 서명석



Fig. 7. The first two EOF modes of (a) JJA and (b) DJF temperature at 2 m for observed data, HadGEM2-AO and WRF.

다. HadGEM2-AO의 여름 강수 두 번째 EOF 공간장 은 한반도에서 강한 양의 값을 보이고, 관측과 유사 한 모습과 변동값을 나타낸다. 하지만 중국과 일본 지 역의 고유 벡터 값은 관측보다 크다. WRF의 경우 EOF 첫 번째 모드와 두 번째 모드 모두 관측과 유사 한 모습이지만, 값은 관측보다 강한 고유 벡터를 나 타난다. 관측 겨울 강수의 EOF 첫 번째 모드는 모든 영역에서 음의 값을 보인다(Fig. 8b). 이는 겨울 평균 강수량(Fig. 3)이 상대적으로 많은 한반도 남부 해안 지역과 일본 분석 영역에서 양의 고유 벡터 값을 나 타냄을 알 수 있다. 그리고 관측 겨울 강수의 EOF 두 번째 모드는 한반도 중부 이하 지역에서 음의 값이다. HadGEM2-AO의 겨울 강수 첫 번째 EOF는 전체 변 동의 42.1%를 설명하고 이는 관측보다 작은 값이다. 그리고 HadGEM2-AO는 겨울 강수 첫 번째 EOF 공 간장의 한반도에서 HadGEM2-AO는 관측보다 작은



Fig. 8. Same as Fig. 7 except for precipitation.

값을 보인다. HadGEM2-AO의 겨울 강수 두 번째 EOF 는 관측과 유사한 모습이다. WRF의 겨울 강수 EOF 공간장은 관측의 EOF와 유사한 모습을 보이지만, 고 유 벡터 값은 관측보다 크다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청 기상연구소의 HadGEM2-AO

한국기상학회 대기 제23권 4호 (2013)

로 생산된 전지구 Historical 시나리오 자료를 기반으 로 WRF 모델을 활용하여 한반도 상세기후 자료를 생 산하였다. 이를 위하여 기상청 슈퍼컴퓨터 3호기 초 기분 "해빛"에 한반도 중심의 극동아시아 영역에 대 하여 12.5 km의 horizontal resolution으로 integration 할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이 시스템으로 1979~ 2010 기간에 대해서 적분을 실시하였다. 본 연구에서 는 Historical 1981~2005의 여름 및 겨울 기온과 강수

536

에 대한 HadGEM2-AO와 WRF의 평균, bias, EOF 등 을 분석함으로써 모의시스템의 결과를 제시하였다.

기온의 경우 HadGEM2-AO와 WRF가 관측과 유사 한 패턴을 보이며 WRF는 관측보다 낮은 값을 보이 지만 수평격자가 증가함에 따라 지형에 따른 변화 모 습은 상세히 모의한다. 그리고 강수 평균은 여름보다 겨울에 관측과 유사한 패턴을 보이며 HadGEM2-AO 는 한반도 여름 강수를 관측보다 작게 나타낸다. 오 차의 경우 HadGEM2-AO는 한반도 지역에서 여름 기 온과 강수에 음의 오차를 나타내고, 겨울 기온에 양 의 오차를 보이며 겨울 강수에는 관측과 큰 차이를 보이지 않는다. WRF는 한반도 여름 기온에 음의 오 차를 보이고 겨울 기온에 양의 오차를 나타낸다. WRF 의 여름 강수는 한반도에서 음의 값이고, 겨울 강수 는 양의 값이다. WRF의 오차 값이 HadGEM2-AO보 다 지역에 따라 큰 변동을 보인다. 이는 HadGEM2-AO에 의해 생산된 자료의 오차가 WRF 적분에 반영 되어 WRF가 가지고 있는 오차에 더해져 HadGEM2-AO보다 큰 오차가 나타나는 것으로 사료된다. 또는 저해상도인 HadGEM2-AO에서는 격자 평균되어 상쇄 되었던 오차가 고해상도 WRF에서 상세하게 모의되 어 오차의 범위가 커진 것일 가능성도 있다.

공간 상관분석은 여름 강수를 제외하고 HadGEM2-AO와 WRF가 0.8 이상의 상관계수 값을 나타낸다. EOF의 경우 두 모델의 기온 및 강수의 첫 번째 및 두 번째 EOF 공간장은 관측과 동일한 모습이다. 그 리고 EOF 변동의 최고값이 나타나는 지역은 다소 차 이가 있지만, 전체 변동을 설명하는 값은 관측과 유 사하다. 또한 첫 번째 및 두 번째 EOF 공간장은 한 반도 지역에서 WRF가 HadGEM2-AO보다 관측과 비 슷한 고유 벡터 크기 및 모습을 보이며, 지역적 특성 도 잘 나타냄을 알 수 있다. 이는 두 모델 모두 평균 및 오차에서 관측과 차이를 보이지만, 변동성은 관측 과 유사한 것을 의미한다.

따라서 WRF에 의해 모의된 한반도 상세 기후 자 료를 RCP 시나리오에 의해 생산된 기후 전망 자료 의 현재 기후 및 표준 실험으로 사용하기에 충분히 타당하다고 판단된다. 본 연구를 통해서 제시된 결과 는 향후 RegCM4 등 또 다른 3개의 지역기후 모형 들의 결과와 연합하여 앙상블 예측 결과로써 제시될 예정이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012-3083)의 지원으로 수행되었으며, 이 연구에 기상청 슈 퍼컴퓨터가 활용되도록 지원해준 기상청 슈퍼컴퓨터 운영과에 감사합니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., J.-Y. Hong, and K.-M. Shim, 2010: Agro-climate indices changes over the korean peninsula in CO₂ doubled climate induced by atmosphere-oceanland-ice coupled general circulation model. *Korean J. Agr. Forest Meteor.*, **12**, 11-22 (in Korean with English abstract).
- Baek, H.-J., C.-H. Cho, W.-T. Kwon, S.-K. Kim, J.-Y. Cho, and Y. Kim, 2011: Development strategy for new climate change scenarios based on RCP. *Climate Change Res.*, 2, 55-68 (in Korean with English abstract).
- Boo, K.-O., W.-T. Kwon, and J.-K. Kim, 2005: Vegetation changes in the regional surface climate over East Asia due to global warming using BIOME4. *Il Nuovo Cimento*, 27, 317-327.
- Chang, C.-P., 2004: *East Asian Monsoon*, World Scientific, 564 pp.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced landsurface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Chen, T.-C., S.-Y. Wang, W.-R. Huang, and M.-C. Yen, 2004: Variation of the East Asian Summer Monsoon Rainfall*. *J. Climate*, **17**, 744-762.
- Choi, S.-J., D.-K. Lee, and S.-G. Oh, 2011: Regional climate simulations over East-Asia by using SNURCM and WRF forced by HadGEM2-AO. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **32**, 750-760 (in Korean with English abstract).
- Collins, W. D., J. K. Hackney, and D. P. Edwards, 2002: An updated parameterization for infrared emission and absorption by water vapor in the National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model. J. Geophys. Res., 107, 1-20. doi:10.1029/2001JD001365.
- Collins, W. J., and Coauthors, 2011: Development and evaluation of an Earth-system model - HadGEM2. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **4**, 997-1062, doi:10.5194/ gmdd-4-997-2011.
- Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn, and D. H. Lister, 2013: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.3711.
- Hong, S.-Y., and E.-C. Chang, 2012: Spectral nudging sensitivity experiments in a regional model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 48, 457-463.
- _____, J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A Revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103-120.

- Hong, S.-Y., S.-K. Oh, M.-S. Suh, D.-K. Lee, J.-B. Ahn, and H.-S. Kang, 2013: Future climate changes over North-East Asian region simulated by RegCM4 based on the RCP scenarios. *J. Climate Res.*, 8, 27-44 (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.
- Hori, M. E., and H. Ueda, 2006: Impact of global warming on the East Asian winter monsoon as revealed by nine coupled atmosphere-ocean GCMs. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03713, doi:10.1029/2005GL024961.
- Jiménez, P. A., J. Dudhia, J. F. González-Rouco, J. Navarro, J. P. Montávez, and E. García-Bustamante, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 898-918.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteorol., 43, 170-181.
- Kim, E.-J., and S.-Y. Hong, 2010: Impact of air-sea interaction on East Asian summer monsoon climate in WRF. J. Geophys. Res., 115, D19118, doi:10.1029/ 2009JD013253.
- Meinshausen, M., and Coauthors, 2011: The RCP greenhouse gas concentrations and their extension from 1765 to 2300. *Climatic Change*, **109**, 213-241.
- Oh, S.-G., M.-S. Suh, D.-H. Cha, and S.-J. Choi, 2011:

Simulation skills of RegCM4 for regional climate over CORDEX East Asia driven by HadGEM2-AO. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **32**, 732-749 (in Korean with English abstract).

- Park, I.-H., S.-Y. Hong, and W.-T. Kwon, 2005: Characteristics of East-Asia regional climate simulated by RegCM3. *Proceeding of Spring meeting of KMS*, 254-255.
- Qian, W., H.-S. Kang, and D.-K. Lee, 2002: Distribution of seasonal rainfall in the East Asian monsoon region. *Theor. Appl. Climatol.*, **73**, 151-168.
- 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. DOI: 10.5065/D68S4MVH.
- Suh, M.-S., S.-G. Oh, D.-K. Lee, D.-H. Cha, S.-J.Choi, C.-S. Jin, and S.-Y. Hong, 2012: Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea. *J. Climate*, 25, 7067-7082.
- Wang, B., Z. Wu, C.-P. Chang, J. Liu, J. Li, and T. Zhou, 2010: Another look at interannual to interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The Northern and Southern temperature modes. J. Climate, 23, 1495-1512.