COSMO-CLM 동아시아 기후 모의성능 평가 -스펙트럴 넷징 효과 비교-

이동현 · 박창용 · 김연희 · 민승기

포항공과대학교 환경공학부

(2016년 3월 9일 접수, 2016년 3월 29일 수정, 2016년 3월 30일 게재 확정)

Evaluation of the COSMO-CLM for East Asia Climate simulations: Sensitivity to Spectral Nudging

Donghyun Lee · Changyong Park · Yeon-Hee Kim · Seung-Ki Min

School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

(Received 9 March 2016, Revised 29 March 2016, Accepted 30 March 2016)

Abstract : This study evaluates climate simulations performed over the CORDEX Phase 2 East Asia domain with a Regional Climate Model (RCM), Consortium for Small-scale Modelling (COSMO)-Climate Limited-area Modelling (CLM) (CCLM), driven by the European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) Reanalysis (ERA)-Interim reanalysis. We focus on examining the influence of spectral nudging on East Asian climate simulations by comparing a control simulation to a simulation including spectral nudging. Spatio-temporal climatology of temperature and precipitation is well reproduced by CCLM with distinct regional patterns of systematic biases. Improvement of CCLM performance on East Asian climate simulation is identified when applying a spectral nudging technique. The use of spectral nudging alleviates systematic biases existing on horizontal winds and geopotential heights during summer and winter. Stronger reduction in systematic biases is found at lower troposphere during summer, partly explaining improvement of summer precipitation over the northeast Asia. Bias and RMSE analysis shows considerable improvement occurring in both climatology and inter-annual variability of summer precipitation and winter temperature over South Korea. Results from a Taylor diagram analysis reveal that CCLM reproduces the observed spatial patterns reasonably well for both summer and winter, and that spectral nudging improves spatial pattern simulations of horizontal winds and geopotential height at 850hPa during summer.

Key Words : dynamic downscaling, East Asia, RCM, COSMO-CLM, spectral nudging

주요어 : 역학적상세화, 동아시아, 지역기후모델, COSMO-CLM, 스펙트럴 넷징

1. 서론

20세기 급속도로 진행된 산업화는 인위적인 온실기체 배출량을 증가시켜 지구온난화를 가속화하였다. 전지구적인 온난화에 따라 인류 사회 및 경제에 큰 피해를 야기할 수 있는 폭염, 호우, 가뭄과 같은 극한기후 현상 또한 지역적으로 좀더 자주 발생하며 그 강도가 증가하고 있다(Allen and Ingram, 2002; Min *et al.*, 2011; Herring *et al.*, 2015). 이러한 지역규모로 발생하는 극한기후 현상으로 인한 자연재해에 대비하고 기후변화에 효율적으로 적응 및 대처하기 위해서는 신뢰할 수 있는 지역기후모델을 이용하여 현재 기후의 모의능력을 평가하고 이를 바탕으로 한 미래 변화의 체계적인 전망이 요구된다.

우리나라를 포함한 동아시아 지역은 내륙과 해양의 상호작용으로 일어나는 몬순의 영향을 받으며 지역 내 영향뿐 아니라 그 외의 지역에서 발생하는 각기 다른 기단의 영향을 받아 계절별로 복잡한 기후현상이 일어나는 지역이다(Seo *et al.*, 2013; Hsu *et al.*, 2014; Lee and Wang, 2014; Freychet *et al.*, 2015). 각 계절별 동아시아 기후를 살펴보면, 여름에는 히말라야 지형효과로 발생한 상승기류에 의해 티벳 고원에서 발생하는 고기압과, 북태평양에서 발달하는 해양성 고기압의 영향을 받아 우리나라를 포함한 중국, 일본지역의 강수량에 영향을 준다(Wu *et al.*, 2012). 반면 겨울에는 시베리아 지역에서 발달하는 고기압과 동쪽의 알류산 저기압의 발달의 영향을 받으며, 서고동저의 기압배치로 인해 동아시아 지역은 강수가 적고 기온이 해양보다 낮게 나타나는 특성을 보인다(Jhun and Lee, 2004). Kitoh *et al.*(2013)은 인위적인 온실기체 배출량의 증가로 동아시아 및 몬순지역에서 극한현상을 일으킬 수 있는 몬순 영역, 시종일, 강도 등에 변화가 나타날 수 있음을 제시하였다. 한편 Oh

and Ha(2015)는 몬순의 복잡성을 세분화된 종관 모드들로 분류하여 분석하였으며, 관측에서 나타나는 특징적인 현상에 대한 이해를 위해서 기후모델의 모의 성능 개선 및 인위강제력으로 발생할 수 있는 미래 변화에 대한 후속연구의 필요성을 제시하였다.

세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)가 추진하는 국제 공동연구인 CORDEX(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)는 지역규모의 미래변화연구를 위해서 전지구기후모델(GCM) 자료를 경계자료로 처방하여 14개 대륙 규모를 대상으로 고해상도의 지역기후모델(RCM) 모의자료를 생산하고 상호비교하는 프로젝트이다(Giorgi *et al.*, 2009). 우리나라는 중국 및 일본과 더불어 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 5차 평가보고서 모의자료를 기반으로 한 CORDEX 동아시아 Phase 1 프로젝트에 참여했으며, 이와 관련된 선행연구들에서는 다섯 개 지역기후모델의 72년(1981~2050년) 적분자료(50km 수평해상도)를 이용하여 현재기후 모의수준 검증과 미래변화 전망의 불확실성을 평가하였다(Oh *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2015). IPCC 6차 평가보고서에 대응하기 위해 2014년부터 계획된 CORDEX 동아시아 Phase 2 프로젝트는 이전보다 고해상도(25km 수평해상도)의 실험을 수행하여 부가가치(added-value)를 확인하고, 나아가 지역규모 지구시스템모델(regional coupled Earth System Models)의 개발 및 응용의 목적으로 출범하였다(WCRP, 2014).

한정된 영역만을 대상으로 수행하는 지역기후모델에서 실험영역 밖에서 발생하는 대기순환의 영향들을 고려하기 위한 방법으로 스펙트럴 넷징(spectral nudging) 방법이 고안되었다(예: von Storch *et al.*, 2000). 최근의 지역기후모델을 이

용한 연구들은 공통적으로 스펙트럴 넷징이 지역에 따라서 모의결과를 향상시킬 수 있음을 보였다 (Feser and Barcikowska, 2012; Hong and Chang, 2012; Cha *et al.*, 2016).

본 연구에서는 CORDEX-동아시아 Phase 2 영역에 대하여 독일 기상청의 지역기후모델 CCLM을 이용하여 재분석자료를 강제력으로 처방하여 현재기후를 모의하고, 동아시아 여름 및 겨울기후의 모의수준을 스펙트럴 넷징의 영향을 중심으로 평가하였다. 2장에서는 지역기후모델과 실험설계에 관하여 설명하고, 3장에서는 지역기후모델의 동아시아 기후 모의수준을 관측 및 재분석자료와 비교하여 분석하였다. 4장에서는 본 연구의 결과를 요약하여 CCLM의 동아시아 기후 모의수준과 스펙트럴 넷징의 효과를 평가하였다.

2. 모델 및 실험 설계

1) CCLM 모델 소개

COSMO는 지역단위의 소규모 영역을 대상으로 대기 예측을 위한 비정수계(nonhydrostatic) 모델로 수치예보(Numerical Weather Prediction, NWP)와 과학적 응용(meso- β and meso- γ scale 모의)을 위해 설계되었다. 모델의 기초가 되었던 Lokal Modell(LM)은 독일 기상청(DWD)에서 개발하였으며, 1999년부터 현재까지도 이를 이용하여 수치예보를 수행하고 있다. 수치예보모델 LM은 독일과 스위스 기상청의 주관으로 1998년에 COSMO 조직이 구성되면서 명칭이 COSMO-model로 변경되었으며, 이후 지역규모 기후모델링 시스템이 추가로 구축되면서 현재의 COSMO-CLM(CCLM)에 이르게 되었다. 현재 CCLM의 시스템 개발은 CLM-Community에서 동기화, 수치화, 물리화, 내삽 및 적용, 검증 등의 다양한 실

무그룹으로 나뉘어 진행되고 있다. CCLM은 최근 동아시아의 기후 모의에도 이용되었다. Wang *et al.*(2013)은 CCLM을 이용하여 동아시아 현재 기후 모의와 미래 기후 변화에 대해 분석하였으며, Huang *et al.*(2015)은 동아시아 지역 강수 모의를 통해 CCLM이 동아시아 지역의 모의 성능이 우수함을 제시하였다.

2) 실험 설계

동아시아 현재기후를 CCLM으로 재현하기 위한 배경 강제력 자료로 수평 약 $0.7^{\circ} \times 0.7^{\circ}$ 해상도와 연직 60층 구조의 ERA-Interim(이하 ERA-I) 재분석자료를 사용하였다. Figure 1과 Table 1은 본 연구에서 사용한 모의영역과 모델의 환경설정을 보여준다. 모의영역은 중동 일부 지역을 제외한 대부분의 아시아 지역을 포함하며 수평해상도는 곡선 선형 좌표계(curved-linear coordinate)로 약 25km, 연직 좌표계는 고도에 근거한 Gal-Chen 하이브리드 좌표계로 총 35층이고, 토양층은 지표로부터 14.58m까지 총 7층으로 구성되어있다. 적분에 사용된 물리과정 중 적은 모수화는 Tiedtke scheme(Tiedtke, 1989)을, 장파 및 단파복사는 Ritter-Geleyn scheme(Ritter and Geleyn, 1992)을, 지면 및 지표 경계층은 Jacobsen and Heise(1982)의 이중 구조를 다중구조로 개정한 TERRA-ML 모델을, 행성 경계층에는 Davis and Turner scheme(Davies and Turner, 1977)을 사용하였다(Table 2). 역학코어는 Runge-Kutta scheme(Wicker and Skamarock, 2002)을 사용하였으며 적분 간격은 120초이며, 복사 물리과정의 계산간격을 30분으로, 적은 물리과정의 계산은 2분으로 설정하여 한 시간 간격까지 자료를 생산할 수 있도록 설정하였다. 적분기간은 1979년부터 2000년까지 총 22년으로 초기 2년은 모델의 스핀업(spin-up) 기간으로 간주하여 분석에서 제외하였다.

Figure 1. Model domain and geometric height above sea level (m). The larger box indicates an East Asian domain and the smaller one depicts a domain for South Korea.

Table 1. The domain and resolution of CCLM experiment.

CORDEX PHASE II East Asia	
Horizontal dimensions	396×251
Horizontal resolution	0.22°×0.22° (≅ 25 km×25 km)
Vertical resolution	35 hybrid levels
Soil level	7 levels
Lateral Boundary	15 grids
Map projection	Rotated geographical coordinates

Table 2. CCLM configurations of dynamics and physics used in this study.

CCLM		
Dynamical core	Runge-Kutta	Wicker and Skamarock (2002)
Radiations	Ritter and Geleyn	Ritter and Geleyn (1992)
Multi-Layer Soil and Vegetation Model	TERRA-ML	Jacobsen and Heise (1982)
Planetary Boundary Layer	Davis and Turner	Davis and Turner (1977)
Convection	Tiedtke mass-flux convection	Tiedtke (1989)

스펙트럴 넷징은 실험 영역 설정의 영향으로 영역의 경계조건에서 그 정보가 소실될 수 있는 규모가 큰 파동(중력과 또는 로스비파)을 제한된 영역의 지역기후모델에 반영하는 것이다. 이때 강도 조절이 중요한데, 강도가 강할 시에는 고해상도의 지역기후모델에서 부가가치로 모의하는 작은 규모의 파를 상쇄시키는 효과가 나타날 수도 있다. 본 실험에서 스펙트럴 넷징의 강도는 대기 상층부터 하층까지 가중치(weighting)을 주어 적용하는 방법(von Storch *et al.*, 2000)를 사용했으며 식 (1)과 같다.

$$\alpha_R(L_G \cap L_R) = [1 - \eta(\sigma)] \alpha_R^*(L_G \cap L_R) + \eta(\sigma) \alpha_R(L_G \cap L_R) \quad (1)$$

여기서 L_G 와 L_R 은 각각 전지구 및 지역기후모델의 장파의 레짐(regimes)을 의미하며, α_G , α_R , α_R^* 은 각각 배경강제력의 영역, 스펙트럴 넷징이 적용되는 영역, 지역기후모델의 모의영역에 해당한다. 넷징 계수 η 는 수직고도 σ 와 넷징 강도 x 에 의해 $\eta(\sigma) = x(1 - \sigma)^2$ 로 정의된다. 본 연구에서는 기존 연구(von Storch *et al.*, 2000; Cha *et al.*, 2011)의 제안을 참고하여 스펙트럴 넷징의 강도는 유지하면서 장기간 모델수행의 적분효율을 높이기 위해서, 스펙트럴 넷징의 처방간격을 10분으로 늘리고 강도를 좀더 강하게 10%로 설정하였다. 또한 스펙트럴 넷징을 적용하지 않은 실험(이하 CCLM_CTL)을 수행하여 스펙트럴 넷징이 적용된 실험(이하 CCLM_SN)의 결과와 비교 분석하였다.

3. 연구 결과

1) CCLM의 동아시아 지표 기후 모의(기온/강수)

CCLM의 동아시아 여름철 및 겨울철에 대한 기온 및 강수의 평균장 모의성능을 관측 및 재분석자료(ERA-I)와 비교하여 분석하였다. 월평균 기온 관측자료는 HadCRUT4(Morice *et al.*, 2012)로 수평해상도는 $5^\circ \times 5^\circ$ 이며, 월평균 강수 관측자료는 GPCP(Global Precipitation Climatology Project, Huffman *et al.*, 2009)로 수평해상도는 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 이다. 관측과의 비교를 위해 재분석 및 모델자료를 이중 선형 보간법(bi-linear interpolation)을 사용해 관측자료의 해상도로 내삽하여 분석하였다.

Figure 2와 3은 관측, 재분석, 모델자료의 여름과 겨울의 기온 및 강수의 20년(1981~2000년) 평균 장과 각 자료 간의 차이를 공간분포로 나타낸 것이다. 자료 간 차이 분포도의 경우 t-검정을 이용하여 통계적으로 유의한 격자(5% 유의수준)를 점으로 표시하였다. CCLM 모의결과, 여름철 기온의 공간패턴은 관측과 유사하게 모의하지만, 동아시아 지역($100 \sim 150^\circ\text{E}$, $20 \sim 50^\circ\text{N}$; Figure 1의 큰 네모 영역) 평균 시 관측보다 CCLM_CTL 실험에서 0.53°C 높게, CCLM_SN 실험에서 0.62°C 높게 모의하는 경향이 나타났다. 지역적인 차이를 분석해보면 CCLM_CTL에서 나타난 중국 북동부지역의 음의 편의와 중국 남동부, 네팔, 그리고 티벳-신장 지역의 양의 편의가 CCLM_SN 실험에서 다소 감소하였다(Figure 2a). 남한지역($125 \sim 130^\circ\text{E}$, $34 \sim 39^\circ\text{N}$; Figure 1의 작은 네모 영역)의 경우 CCLM_CTL 실험에서 -0.68°C 크기의 음의 편이가 나타났지만 CCLM_SN의 결과에서 -0.13°C 로 감소하여 스펙트럴 넷징 적용시 모의성능이 향상됨을 확인하였다.

CCLM_CTL과 CCLM_SN의 실험 모두에서

a) Surface Air Temperature

b) Precipitation

Figure 2. (a) Spatial distribution of summer (Jun-Jul-Aug) mean temperature climatology ($^{\circ}\text{C}$) from observations (OBS), ERA-I, CCLM_CTL, and CCLM_SN (upper panel) and difference patterns between CCLM_SN and CCLM_CTL, ERA-I and OBS, CCLM_CTL and OBS, and CCLM_SN and OBS (low panel). Stipples ($\cdot$) indicate grids with significant difference at 5% significance level (t-test). (b) Same as (a) except for summer mean precipitation (mm day^{-1}).

여름몬순에 의한 강수 패턴은 잘 모의되었으나 전반적인 과대모의가 나타났다(동아시아 평균 강수 편의, CCLM_CTL: $+0.38 \text{ mm day}^{-1}$, CCLM_

SN: $+0.65 \text{ mm day}^{-1}$). 우리나라 강수의 경우 CCLM_CTL 실험에서 나타났던 큰 과대모의 ($+1.79 \text{ mm day}^{-1}$)가 CCLM_SN에서 크게 줄어들

어($-0.42 \text{ mm day}^{-1}$) 스펙트럴 넷징에 따른 모의성능의 향상을 확인하였다. 이와 연관되어 CCLM_CTL에서 강수가 과대모의되었던 한반도를 포함한 동북아시아와 과소모의되었던 중국 남부 및 네팔 지역은 CCLM_SN 결과에서 편의가 크게 감소되었다. 이는 여름철 강수밴드가 관측보다 더 고위도에서 나타나던 CCLM_CTL에 비해 스펙트럴 넷징의 적용 시 관측에 더 가까운 강수밴드의 위치와 강도를 모의함을 의미한다(Figure 2b).

CCLM_CTL에서 겨울철 기온 모의는 관측 및 재분석자료와 유사한 공간 분포를 모의하였으나, 동아시아 지역에서 기온을 관측보다 낮게(-1.07°C) 모의하였으며, 특히 우리나라에서 관측보다 훨씬 낮았다(-3.61°C). CCLM_SN 결과에서 음의 편의 크기가 동아시아 지역(-0.59°C)과 우리나라(-2.59°C)에서 약간 감소하긴 하지만, 관측과 비교하면 여전히 지역별로 큰 오차가 나타난다. 스펙트럴 넷징의 영향이 크게 나타난 지역은 인도차이나 반도와 한반도 지역 등의 지역에서 나타났던 CCLM_CTL의 음의 편차가 전반적으로 줄어들어 모의성능이 향상되었다(Figure 3a).

CCLM_CTL과 CCLM_SN의 겨울철 강수 모의결과를 보면 관측에서 나타나는 공간 분포는 모델에서 유사하게 모의하지만 전반적으로 과대 모의하는 경향이 있다. 특히 대만을 포함한 동중국해와 북서태평양지역에서 모델은 관측에 비해 강수를 과대 모의하였다. 두 실험의 강수모의 차이를 보면 스펙트럴 넷징은 동아시아 지역의 전반에 걸쳐 강수 과대모의를 줄이는 효과를 가져왔으나 지역적으로는 과대모의의 강화 패턴(예, 동중국해)도 나타났다(Figure 3b). 이는 스펙트럴 넷징이 모델의 동아시아 기후 모의 성능을 전반적으로 향상시키는데 효과적이지만 그 지역과 계절에 따라 다른 패턴이 나타날 수 있음을 보여준다. 한편 재분석자료와의 차이를 살펴보면 CCLM의 기온 오

차는 경계 강제력으로 사용된 재분석자료의 특징을 반영하는 반면 강수량은 재분석자료의 영향을 크게 받지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 재분석자료의 강수량이 전지구모델을 통해 산출한 모델 값이기 때문에 관측과 차이가 크게 발생할 수 있기 때문이다(Dec *et al.*, 2011).

Figure 4는 동아시아 지역과 우리나라 육지에서 CCLM이 모의하는 계절변동성을 관측 및 재분석자료와 비교한 그림이다. 동아시아 평균 기온의 계절변동성은 CCLM_CTL과 CCLM_SN이 대체로 잘 모의하였으나 7, 8월에 양의 편차가 두 실험 모두 다른 월에 비하여 상대적으로 컸다. 동아시아 평균 강수는 두 모델에서 전 계절에 걸쳐 과대모의가 나타났으며 특히 겨울철에 컸는데 이는 위에서 살펴본 결과와 잘 일치한다. CCLM_CTL은 6월에 연중 최대 강수를 모의한 반면 CCLM_SN은 관측과 동일하게 7월에 최대값이 나타났다(Figure 4a).

CCLM_CTL의 우리나라 기온 모의성능은 전반적으로 겨울철에 음의 편이가 나타났지만 CCLM_SN에서 관측과 편이가 줄어든 것으로 나타났다. 우리나라 강수의 경우 CCLM_CTL은 겨울철을 제외하고 과대모의를 하였다. 스펙트럴 넷징이 적용된 CCLM_SN은 관측과 매우 유사한 계절변동성을 모의하였다. 특히 7월, 8월, 6월 순서로 많은 강수량이 나타나는 계절내의 강수변동 특징도 잘 재현되어 스펙트럴 넷징이 한반도 강수모의에 큰 영향을 미쳤음을 확인하였다.

CCLM의 동아시아 지역 평균 편의와 RMSE를 동아시아(해양 포함) 전체 지역과 육지지역의 결과를 비교하여 Table 3에 나타내었다. 기온과 강수의 모든 결과에서 CCLM 두 실험의 편의가 5% 유의수준에서 통계적으로 유의하였다(t 검정 기준). 스펙트럴 넷징에 따른 향상은 겨울철 기온의 편의와 여름철 강수의 RMSE에서 뚜렷하게 나타났다. 특

a) Surface Air Temperature

b) Precipitation

Figure 3. Same as Figure 2 except for winter (Dec-Jan-Feb).

히 CCLM_SN실험은 CCLM_CTL보다 동아시아 여름철 육지 강수 RMSE($-0.50 \text{ mm day}^{-1}$)가 크게 줄어들었으며, 동아시아 전 지역의 겨울철 기온의 RMSE(-0.17°C)도 큰 향상을 보였다.

다음으로 한반도 지역에 대하여 CCLM의 기온과 강수의 경년변동 모의성능을 분석하였다. Fig-

ure 5에 우리나라의 여름철과 겨울철 기온 및 강수의 시계열을 나타내었다. 스펙트럴 넷징이 처방된 CCLM_SN은 CCLM_CTL보다 한반도의 기온 및 강수의 경년변동을 관측과 더욱 유사하게 모의하였다. 관측 시계열 대비 RMSE는 여름과 겨울 모두 감소하였으며, 관측과의 상관성은 전반적

Figure 4. Seasonal cycle of monthly mean surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and precipitation (mm day^{-1}) climatology over (a) East Asia land area and (b) South Korea. HadCRUT4 and GPCP data are used as observations in temperature and precipitation, respectively. Black line and grey dotted lines indicate observations and ERA-I, respectively. Red and green lines denote CCLM_CTL and CCLM_SN results, respectively.

Table 3. Seasonal mean bias and RMSE in temperature (TAS) and precipitation (PR) over East Asia region. Smaller bias and less RMSE between CCLM_CTL and CCLM_SN are marked as bold. All bias results are statistically significant at 5% level based on t-test.

East Asia land and ocean		BIAS		RMSE	
		CCLM_CTL	CCLM_SN	CCLM_CTL	CCLM_SN
TAS ($^{\circ}\text{C}$)	Summer (JJA)	0.53	0.62	1.70	1.73
	Winter (DJF)	-1.07	-0.59	2.23	2.06
PR (mm/day)	JJA	0.38	0.65	1.77	1.69
	DJF	1.35	1.34	2.11	2.26
East Asia land only		BIAS		RMSE	
		CCLM_CTL	CCLM_SN	CCLM_CTL	CCLM_SN
TAS ($^{\circ}\text{C}$)	JJA	0.69	0.90	2.31	2.36
	DJF	-0.76	-0.32	2.66	2.58
PR (mm/day)	JJA	0.41	0.45	1.86	1.36
	DJF	0.90	0.94	1.49	1.74

Table 4. RMSE, correlation, and inter-annual variability (standard deviation normalized by observed value) obtained from seasonal mean time series of TAS and PR over South Korea during 1981-2010. Better skills (less RMSE, higher correlation, or normalized variability closer to 1) between CCLM_CTL and CCLM_SN are marked as bold.

South Korea		RMSE		CORRELATION		Normalized inter-annual variability	
		CCLM_CTL	CCLM_SN	CCLM_CTL	CCLM_SN	CCLM_CTL	CCLM_SN
TAS ($^{\circ}\text{C}$)	JJA	0.44	0.37	0.87	0.92	1.01	1.00
	DJF	0.97	0.48	0.90	0.95	1.10	1.19
PR (mm/day)	JJA	2.41	1.87	0.52	0.46	1.38	1.19
	DJF	0.61	0.25	0.12	0.93	1.15	1.04

Figure 5. (a) JJA and (b) DJF mean time series of surface air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and precipitation (mm day^{-1}) averaged over South Korea during 1981-2000 obtained from observations (black), ERA-I (grey dotted), CCLM_CTL (red), and CCLM_SN (green). HadCRUT4 and GPCP data are used as temperature and precipitation observations, respectively.

으로 향상되었고, 경년변동성 크기는 관측과 조금 더 유사하게 나타났다(Table 4). 특히 겨울철 기온과 여름철과 겨울철 강수의 경년변동 오차(RMSE)가 크게 줄어들었으며, 강수의 경년변동성 크기(경년변동 표준편차)도 큰 향상을 보였다. 이는 스펙트럴 넷징이 평균적인 기후뿐만 아니라 기후변동성 모의의 향상에도 효과적임을 의미한다.

2) CCLM의 동아시아 대기 상층 및 하층 모의 (바람 및 지위고도)

모델에서 대기 상하층의 모의성능은 배경 경계자료로 사용되었던 재분석자료(ERA-I)와 비교하여 평가하였다. Figure 6은 재분석자료와 모델의 여름철 상층(200hPa)과 하층(850hPa)의 지위고도와 바람의 여름 평균장을 나타낸다. CCLM_CTL과 CCLM_SN은 여름철 대기 하층에서 북서태평양 고기압과 대륙의 저기압 패턴과 그에 따른 몬순풍을 전반적으로 잘 모의하고 있다. 하지만 CCLM_CTL의 결과를 재분석자료와 비교해보면, 북서태평양에서 고기압성 편차와 티벳 및 신장지역에 저기압성 편차가 두드러지게 나타나며, 그에 따라 우리나라 서해 쪽으로 강한 남서풍이 유입되

어 여름철 강수를 과다하게 모의하게 된다(Figure 2). CCLM_SN의 결과는 지위고도 및 바람장에서 나타나는 북서태평양의 고기압성 편차가 약해지며 우리나라 쪽으로 유입되는 남서풍이 감소한다. 이는 스펙트럴 넷징의 효과로 인해 북서태평양 고기압의 패턴모의가 향상되면서 동아시아 및 우리나라 지역의 강수 모의성능도 함께 향상된 것으로 판단된다.

여름철 대기 상층의 모의결과, CCLM_CTL과 CCLM_SN실험은 상층 제트와 티벳 고원의 고기압을 관측과 유사하게 모의한다. 하지만 CCLM_CTL은 30°N 이북지역에서 지위고도를 높게 북서태평양에서 지위고도를 낮게 모의함에 따라, 지위고도의 남북 경도를 관측에 비해 약하게 모의하여 제트기류가 사행하는 것으로 판단된다. 스펙트럴 넷징의 적용으로 CCLM_SN실험에서 지위고도의 편차가 감소하였으며 제트류의 사행 또한 감소됨을 볼 수 있다(Figure 6b).

Figure 7은 재분석자료와 모델의 겨울철 동아시아 지역의 상·하층의 대기 순환 패턴의 평균장과 편차장을 나타낸다. CCLM_CTL과 CCLM_SN은 동아시아 지역의 겨울철 대기 순환 패턴인 알류

a) 850 hPa

b) 200 hPa

Figure 6. (a) Spatial distribution of summer mean geopotential height (m) and horizontal wind (m s^{-1}) climatology from ERA-I, CCLM_CTL, and CCLM_SN (upper panel) and difference patterns between CCLM_SN and CCLM_CTL, CCLM_CTL and ERA-I, and CCLM_SN and ERA-I (low panel) at 850 hPa level.

(b) Same as (a) except for 200 hPa level.

산 저기압과 북서풍을 모의한다. 하지만 CCLM_CTL은 알류산 저기압을 강하게 모의하고 동중국해를 포함한 서태평양의 고기압을 과대모의 하였

다. 이러한 패턴은 겨울철 동중국해를 포함한 서태평양에 강수의 과대모의를 유발한다(Figure 3 참조). CCLM_SN에서는 알류산 저기압의 과대모

Figure 7. Same as Figure 6 except for winter.

의가 약해졌지만 해양에서 나타나는 고기압성 편차는 더 넓어졌다. 대기 상층에서 CCLM_SN과 CCLM_CTL실험은 제트기류를 모의하고 있지만, 여름철과 동일하게 제트기류가 사행한다. 또한 상층의 지위고도는 해양에서 과소 모의하는 경향이

보인다. 이런 패턴의 영향으로 제트의 사행이 발생함에 따라 40–50°N 지역의 겨울철 지표기온은 과대모의, 30–40°N 지역은 과소모의 된 것으로 판단된다. 스펙트럴 넷팅의 적용으로 남동쪽 해양에서 나타난 편의가 약간 커졌으나 전체적인 바람

장 모의에서는 큰 차이가 나타나지 않았다(Figure 7b).

3) Taylor diagram을 이용한 공간패턴 모의성능 평가

CCLM의 공간패턴 모의성능을 분석하기 위하여 Taylor diagram 분석을 수행하였다. Figure 8은 여름과 겨울의 20년 기후패턴에 대한 분석 결과를

나타낸다. Taylor diagram은 공간평균 편의를 제외한 공간패턴에 대한 모델의 모의성능을 평가하며, 공간변동성 크기(관측대비 표준편차비)와 공간 상관계수가 관측에 유사할수록 기준점(Figure 8의 파란 점)에 가깝게 위치한다(Taylor, 2001). 그림에서 도형들은 각각 변수를 의미하며, 빨간색은 스펙트럴 넷징을 포함하지 않은 CCLM_CTL의 결과이고 초록색은 스펙트럴 넷징을 적용한 CCLM_SN

Figure 8. Taylor diagram for surface air temperature and precipitation (upper) and horizontal winds and geopotential height at 850 hPa (middle) and 200 hPa (bottom) during summer (left) and winter (right).

의 결과이다.

CCLM_CTL과 CCLM_SN의 지표 모의 결과는 여름철과 겨울철 기온 공간분포 모의에서 관측과 상당히 유사한 공간 변동성(표준편차비: 0.96~1.07)과 상관성(0.95~0.99)을 나타내지만, 강수에서는 공간 표준편차비가 크고(1.28~1.94), 공간 상관은 낮게(0.70~0.78) 나타났다. 스펙트럴 넷징의 적용으로 여름철 강수는 상관성이 약간 증가되었으나(+0.07), 겨울철에는 오히려 감소했다(-0.04). 850hPa 층의 모의에 있어서 겨울철 동서방향의 바람을 제외하고 공간 변동성을 과하게(1.07~2.43) 모의하였다. 스펙트럴 넷징의 효과로 겨울철 모의결과의 편차와 상관성이 향상되지 않았지만, 여름철에는 수평 바람장과 지위고도의 공간변동성이 관측과 더 유사해지고, 관측과의 공간 상관 역시 크게 향상된 것을 보여주며 이러한 결과는 앞서 설명한 Figure 6a와도 일치하는 결과이다. 200hPa층의 여름철과 겨울철 동서방향의 바람과 지위고도는 비교적 관측과 유사한 공간변동(0.93~0.98)과 공간상관(0.99~1.0)으로 우수한 모의성능을 보였다. 이에 반해 남북방향의 바람을 모의함에 있어서 큰 변동성(1.51~1.91)과 낮은 공간상관(0.72~0.88)을 보여주었으며 이는 제트류의 사행 편의패턴(Figure 7b)과 일치하는 결과이다. 향후 제트류의 편의와 연관된 몬순 순환과 강수에 대한 상세한 분석이 요구된다.

공간분포에 대한 스펙트럴 넷징 효과가 하층에 뚜렷하게 나타난 이유는 우선 모델의 편의가 여름철 하층 바람장에서 상대적으로 크게 분포하기 때문으로 보인다(Figures 6 and 7). 또한 일부분은 지형의 영향을 받는 대기하층의 특성과 균일한 패턴을 보이는 상층의 특징과 연관 있을 것으로 생각된다. 즉 상층은 바람장과 고도장이 매우 큰 공간 규모로 부드럽게 변하는 패턴을 보인 반면, 하층은 작은 공간규모의 패턴들이 나타나며, 이에 따

라 스펙트럴 넷징 효과에 따른 공간패턴의 향상이 하층에서 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 재분석자료(ERA-I)를 경계 강제력으로 처방하여 수행한 CCLM 모델의 현재기후(1981~2000년) 모의자료(CCLM_CTL)를 이용하여 동아시아 기후 모의성능을 평가하였다. 동아시아 기후 재현성능을 향상시키기 위한 방법으로 스펙트럴 넷징을 적용한 실험(CCLM_SN)을 함께 수행하였고, 두 실험의 결과를 여름 및 겨울에 대해서 지표면 기온과 강수, 850hPa와 200hPa의 바람장과 지위고도를 분석하여 CCLM 자체의 모의성능과 스펙트럴 넷징 효과를 평가하였다.

지표기온의 경우 CCLM은 관측과 유사한 패턴을 보이며 수평해상도의 증가로 지형 효과를 반영한 동아시아 기온분포를 관측보다 더 상세히 보여줄 수 있다. 또한, 스펙트럴 넷징이 적용되면서 우리나라를 포함한 동아시아 일부 지역에서 계절 평균 지표기온 모의오차가 감소했다. CCLM_CTL과 CCLM_SN은 여름과 겨울 몬순에 의한 강수 패턴을 잘 모의할 수 있었으나, 여름철에 우리나라를 포함한 동아시아와 북서태평양 지역의 강수를 전반적으로 과대 모의하는 경향이 나타났다. 스펙트럴 넷징을 적용하면 동아시아 여름철 강수 모의 오차가 육지에서 크게 감소하였으며, 우리나라 강수의 계절변동성을 관측과 더 유사하게 재현함을 확인할 수 있었다.

여름과 겨울 기후 특징이 뚜렷하게 나타나는 850hPa와 200hPa의 수평바람장과 지위고도 모의에서 CCLM 모델의 계통오차를 확인할 수 있었다. 스펙트럴 넷징(CCLM_SN)으로 관측 수평바

람장이 반영됨에 따라서 일부 지역에서의 바람장 및 지위고도의 모의오차가 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 특히 여름철 동아시아 지역의 강수 과대 모의와 연관된 북서태평양의 고기압성 편위와 티벳 및 신장지역의 저기압성 편위가 스펙트럴 넷징에 의해 감소됨이 나타났다. 또한 Taylor diagram 분석을 통해서 스펙트럴 넷징이 여름철 강수 및 850hPa의 바람장 및 지위고도의 공간패턴 모의성능을 향상시킴을 확인하였다.

결론적으로 CCLM의 동아시아 상세기후 모의 결과는 관측과 재분석자료를 비교했을 때 계절변동성 및 공간패턴을 비교적 잘 모의하나, 모델이 지닌 상하층 대기순환 오차가 지표 기온 및 강수 분포에 영향을 준 것으로 판단된다. 실험영역 밖의 수평 바람장을 스펙트럴 넷징으로 적용시킨 결과, 모델의 상하층 바람 및 지위고도의 오차가 감소하고 이에 따라 동아시아 여름철 강수와 겨울철 기온의 모의성능이 향상된 것으로 나타났다. 이는 기존 연구들(Feser and Barcikowska, 2012; Hong and Chang, 2012)에서 제시한 결과와 일치하는 결과이다. 향후 스펙트럴 넷징을 적용한 CCLM을 이용하여 전지구기후모델의 현재 및 미래 시나리오 자료를 경계 강제력으로 처방한 역학적 상세화를 수행할 계획이며, 온실기체 배출 시나리오에 따른 동아시아 몬순의 변화특성을 분석할 계획이다.

사사

본 연구는 “기후변화감시·예측 및 국가정책지원강화”의 일환으로 한국기상산업진흥원(KMIPA 2015-2082)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Allen, M. R. and Ingram, W. J., 2002, Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle, *Nature*, 419, 224-232. doi:10.1038/nature01092.
- Cha D.-H., Jin, C.-S., Moon, J.-H., and Lee, D.-K., 2016, Improvement of regional climate simulation of East Asian summer monsoon by coupled air-sea interaction and large-scale nudging, *Int. J. Climatol.*, 36, 334-345. doi:10.1002/joc.4349.
- Cha D.-H., Jin, C.-S., Lee, D.-K., and Kuo, Y.-H., 2011, Impact of intermittent spectral nudging on regional climate simulation using Weather Research and Forecasting model, *J. Geophys. Res.*, 116, D10103, doi:10.1029/2010JD015069.
- Davies, H. C. and Turner, R. E., 1977, Updating prediction models by dynamical relaxation: An examination of the technique, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103, 225-245.
- 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 der 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, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553-597.
- Feser, F. and Barcikowska, M., 2012, The influence of spectral nudging on typhoon formation in regional climate models, *Environ. Res. Lett.*, 7, 014024. doi:10.1088/1748-9326/7/1/014024.
- Freychet, N., Hsu, H.-H., Chou, C., and Wu, C.-H., 2015, Asian summer monsoon in CMIP5

- projections: A link between the change in extreme precipitation and monsoon dynamics, *J. Climate*, 28, 1477-1493. doi:10.1175/JCLI-D-14-00449.1.
- Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G. R., 2009, Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin*, 58(3), 175-183.
- Herring, S. C., Hoerling, M. P., Kossin, J. P., Peterson, T. C., and Stott, P. A., Eds., 2015, Explaining extreme events of 2014 from a climate perspective, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96(12), S1-S172.
- Hong, S.-Y. and Chang, E.-C., 2012, Spectral nudging sensitivity experiments in a regional climate model, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 48(4), 345-355. doi:10.1007/s13143-012-0033-3.
- Hsu, H.-H., Zhou, T., and Matsumoto, J., 2014, East Asian, Indochina and Western North Pacific summer monsoon - an update, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 50(1), 45-68. doi:10.1007/13143-014-0027-4.
- Huang, B., Polanski, S., and Cubasch, U., 2015, Assessment of precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-East Asia regional climate simulations, *Clim. Res.*, 64, 141-158. doi:10.3354/cr01302.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., and Gu, G., 2009, Improving the Global Precipitation Record: GPCP Version 2.1, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17808. doi:10.1029/2009GL040000.
- Jacobsen, I. and Heise, E., 1982, A new economic method for the computation of the surface temperature in numerical models, *Contrib. Atmos. Phys.*, 55, 128-141.
- Jhun, J.-G. and Lee, E.-J., 2004, A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon, *J. Climate*, 17(4), 711-726.
- Kitoh, A., Endo, H., Kumar, K. K., Cavalcanti, I. F. A., Goswami, P., and Zhou, T., 2013, Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(8), 3053-3065. doi:10.1002/jgrd.50258.
- Lee, J.-Y. and Wang, B., 2014, Future change of global monsoon in the CMIP5, *Clim. Dyn.*, 42, 101-119. doi:10.1007/s00382-012-1564-0.
- 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, *Clim. Dyn.*, 42, 733-747. doi:10.1007/s00382-013-1841-6.
- Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F. W., and Hegerl, G. C., 2011, Human contribution to more-intense precipitation extremes, *Nature*, 470(7334), 378-381.
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., and Jones, P. D., 2012, Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset, *J. Geophys. Res.*, 117, D08101.
- Oh, H. and Ha, K.-J., 2015, Thermodynamic characteristics and responses to ENSO of dominant intraseasonal modes in the East Asian summer monsoon, *Clim. Dyn.*, 44, doi:10.1007/s00382-014-2268-4.
- Oh, S.-G., Suh, M.-S., and Cha, D.-H., 2013, Impact of lateral boundary conditions on precipitation and temperature extremes over South Korea in the CORDEX regional climate simulation using RegCM4, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 49(4), 497-509.
- Park, C., 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, *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-015-2713-z.
- Ritter, B. and Geleyn, J. F., 1992, A comprehensive radi-

- ation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations, *Mon. Weather Rev.*, 120, 303-325.
- Seo, K.-H., Ok, J., and Son, J.-H., 2013, Assessing future changes in East Asian summer monsoon using CMIP5 coupled models, *J. Climate*, 26(19), 7662-7675.
- Taylor, 2001, Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192.
- Tiedtke, M., 1989, A comprehensive mass flux scheme for cumulus parametrization in large-scale models, *Mon. Weather Rev.*, 117, 1779-1800.
- von Storch, H., Langenberg, H., and Feser F., 2000, A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes, *Mon. Weather Rev.*, 128, 3664-3673.
- Wang, D., Menz, C., Simon, T., Simmer, C., and Ohlwein, C., 2013, Regional dynamical downscaling with CCLM over East Asia, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 121, 39-53. doi:10.1007/s00703-013-0250-z.
- WCRP, 2014, *Report of the first session of the CORDEX Science Advisory Team (SAT)*, WCRP Report No. 14/2014, ICTP, Trieste, Italy.
- Wicker, L. J. and Skamarock, W. C., 2002, Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes, *Mon. Weather Rev.*, 130, 2088-2097.
- Wu, G., Liu, Y., He, B., Bao, Q., Duan, A., and Jin, F.-F., 2012, Thermal controls on the Asian summer monsoon, *Sci. Rep.*, 2, 404. doi:10.1038/srep00404.

책임편집: 박창용

영문교열: 이은걸