Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 29, No. 2 (2019) pp. 115-129
https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.2.115
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

CORDEX-EA 지역기후모형이 모사한 한반도 주변해 기후평균 표층 바람 평가

최원근[1),2)] · 신호정[3)] · 장찬주[1),2)]*

[1)]한국해양과학기술원 해양순환기후연구센터, [2)]과학기술연합대학원대학교 해양과학과,
[3)]강릉원주대학교 자연과학연구소

(접수일: 2018년 11월 13일, 수정일: 2019년 3월 22일, 게재확정일: 2019년 4월 16일)

Evaluation of Climatological Mean Surface Winds over Korean Waters Simulated by CORDEX-EA Regional Climate Models

Wonkeun Choi[1),2)], Ho-Jeong Shin[3)], and Chan Joo Jang[1),2)]*

[1)]Ocean Circulation and Climate Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Korea
[2)]Department of Ocean Science, Korea University of Science and Technology, Daejeon, Korea
[3)]Natural Science Research Institute, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 13 November 2018; revised 22 March 2019; accepted 16 April 2019)

Abstract Surface winds over the ocean influence not only the climate change through air-sea interactions but the coastal erosion through the changes in wave height and direction. Thus, demands on a reliable projection of future changes in surface winds have been increasing in various fields. For the future projections, climate models have been widely used and, as a priori, their simulations of surface wind are required to be evaluated. In this study, we evaluate the climatological mean surface winds over the Korean Waters simulated by five regional climate models participating in Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) for East Asia (EA), an international regional climate model inter-comparison project. Compared with the ERA-interim reanalysis data, the CORDEX-EA models, except for HadGEM3-RA, produce stronger wind both in summer and winter. The HadGEM3-RA underestimates the wind speed and inadequately simulate the spatial distribution especially in summer. This summer wind error appears to be coincident with mean sea-level pressure in the North Pacific. For wind direction, all of the CORDEX-EA models simulate the well-known seasonal reversal of surface wind similar to the ERA-interim. Our results suggest that especially in summer, large-scale atmospheric circulation, downscaled by regional models with spectral nudging, significantly affect the regional surface wind on its pattern and strength.

Key words: Surface wind, regional climate, dynamical downscaling, multi-model ensemble, Korean Waters

*Corresponding Author: Chan Joo Jang, Ocean Circulation and Climate Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 385 Haeyang-ro, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea.
Phone: +82-51-664-3117 Fax: +82-51-403-4920
E-mail: cjjang@kiost.ac.kr

1. 서 론

해양에서 표층 바람은 해양과 대기 사이의 현열속, 잠열속에 영향을 줌으로써 해양과 대기의 열교환에 중요한 역할을 할 뿐만 아니라, 식물플랑크톤(Fitch and Moore, 2007), 해양 탄소저장(Swart and Fyfe, 2012), 연안 침식(Gormus et al., 2014) 등 다양한 분야에도 영향을 미친다. 따라서 기후변화와 더불어 나타나는 표층 바람 변화에 대한 연구는 해양-대기 상호작용을 통한 해류와 대기 순환의 변화를 이해하는데 뿐만 아니라 해양 생태계 및 해양공학 측면에서도 중요하다(Jang et al., 2018).

표층 바람을 포함한 기후요소의 변화를 파악하고 그 기작을 이해하는데는 기후모형이 유용한 도구로 사용되고 있다. 하지만 그동안 널리 사용되어 온 전구기후모형은 용승 지역, 산맥 등에서 상세한 지역 정보를 제대로 모사하지 못하여 지역적인 오차가 크게 나타났다(Flato et al., 2014). 지역적으로 상세한 정보를 얻기 위해서는 모형의 해상도가 충분히 조밀하여야 하는데, 컴퓨터 계산 능력이 지속해서 향상되어 왔음에도 불구하고, 수십 년에서 수백 년 이상의 장기 적분을 수행하기에는 여전히 계산 부담이 크다. 최신 기후모형으로 대표되는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제5차 평가보고서에 활용된 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5) CGCMs (Coupled General Climate Models)의 해양성분모형조차도 수평 해상도가 1° 수준에 머물렀다. 반면에 지역기후모형은 모형 계산 영역을 특정 지역으로 제한하므로 측면 경계 조건과 자료를 적절히 선택해야 하는 근본적인 한계가 있지만, 상대적으로 계산 부담이 적다. 따라서 지역기후모형을 이용한 역학적 규모축소 연구가 점점 더 활발하게 이뤄지고 있다. 특히 한반도 주변해역처럼 복잡한 해안선, 지형, 해양순환 등을 정확하게 재현하려면 고해상도 지역기후모형의 사용이 필수적이다(Jang et al., 2017).

지역기후모형을 이용하여 과거 기후변화에 관한 물리적 원인을 규명하거나 미래 기후변화를 전망하려면, 모형의 모사 능력에 관한 검증이 먼저 이뤄져야 한다. 그동안 한반도와 근해를 포함하는 지역기후모형의 바람 모사 능력을 평가한 연구로는 서울대학교 지역기후모형(SNURCM)을 이용하여 모형의 수평해상도가 한반도 상하층 바람 모사 능력에 미치는 영향이 크지 않다는 것과(Lee et al., 2008), MM5 지역모형이 한반도 주변해 해상풍의 공간 분포(Seo and Chang, 2003)를, RegCM3 지역모형이 동남아시아에 걸친 여름 남서풍(Im et al., 2006)을 잘 모사한다는 것 등이 있다. 하지만 이러한 기존 연구는, 모형 적분 및 분석 기간이 비교적 짧아 수십 년 이상의 기후변화 연구에 필요한 모형 검증 결과로써 활용하기에는 적절하지 않으며 대부분의 모형 평가 또한 몬순시스템과 관련하여 850 hPa 순환장과 육상풍에 초점이 맞춰져 있고, 해상의 경우 해면수온이나 강수량과 관련되어 바람을 부수적으로 분석한 연구가 대부분이었다(Lee et al., 2008; Nikulin et al., 2012; Kalognomou et al., 2013; Kim et al., 2014; Huang et al., 2015).

따라서 본 연구에서는 한반도 주변 해역에 초점을 맞추어 지역기후모형의 해상 표층 바람 모사 능력을 평가하고자 한다. 특히, 지역기후모형의 모사 능력은 관심 지역과 사용한 모형에 따라 그 결과가 다를 수 있기 때문에, 본 논문에서는 하나의 특정 모형을 사용하지 않고 여러 모형이 동일한 표준 실험을 수행한 지역기후모델링 국제협력사업 CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) 중 한반도 주변해를 포함하는 동아시아 영역에 대한 CORDEX-EA (East Asia) 사업에 참여한 지역모형(이하, CORDEX-EA 지역모형)을 분석하였다.

본 논문은 다음 2절에서 사용한 자료의 기간, 분석 영역 및 방법에 관해 설명하고, 3절에서 기후평균 표층 바람의 풍속, 풍향, 해면기압에 대한 CORDEX-EA 다중모형평균과 개별모형 결과를 재분석자료와 비교하여 평가하고, 모형 사이의 오차를 비교분석한 결과를 기술한다. 마지막으로 4절에서는 본 연구의 결과를 요약하고 지역기후모형의 한반도 주변해 표층 바람 모사 능력에 대한 종합적인 평가를 서술하였다.

2. 자료 및 방법

CORDEX는 지역규모에서 미래 기후변화 시나리오에 대한 상세 전망을 얻기 위한 사업으로 WCRP (World Climate Research Program)의 후원으로 운영되며, 전 세계 대륙을 14개 영역으로 나누어 표준화된 역학적 규모축소 실험을 주관한다. 본 연구에서 표층 바람을 평가하기 위해 사용한 지역기후모형 자료는 CORDEX-EA에 참여한 5개 모형의 현재기후 재현실험(reproduction) 결과이다. CORDEX-EA 현재기후 재현실험은 ERA (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis)-interim 전구재분석자료(Simmons et al., 2006; Uppala et al., 2008; Dee et al., 2011)를 초기 및 경계 조건으로 두고 지역기후모형으로 역학적 규모축소를 수행한 결과이다. ERA-interim 재분석자료는 다른 재분석자료에 비해 한반도 주변해역을 포함한 동아시아 영역에서 관측바람과 높은 상관도를 보이고(Heo et al., 2017), 수평해상도(0.75° × 0.75°)도 상대적으로 높기 때문이다. 모형 영역은 동서로는 북서태평양에서부터 인도 반도에 이르고 남북으로는 아열대 ITCZ 영역부터 몽골에 이르기까지 비

Table 1. Specifications of the regional climate models participating CORDEX-EA.

Model	Horizontal resolution	Convection scheme	PBL scheme	Spectral nudging	Reference
HadGEM3-RA	0.44°	Revised mass flux scheme	MOSES-II non-local	No	Davies et al. (2005)
RegCM4	50 km	MIT-Emanuel	Holtslag	Yes (von Storch et al., 2000)	Giorgi et al. (2012)
SNU-MM5	50 km	Kain-Fritch II	YSU	Yes (von Storch et al., 2000)	Cha and Lee (2009)
SNU-WRF	50 km	Kain-Fritch II	YSU	Yes (Miguez-Macho et al., 2005)	Skamarock et al. (2005)
YSU-RSM	50 km	Simplified Arakawa-Schubert	YSU	Yes (Kanamaru and Kanamitsu, 2007)	Hong et al. (2013)

교적 넓은 영역을 포함하며 50 km의 수평해상도를 가진다(Giorgi et al., 2009). CORDEX-EA 참여 모형은 HadGEM3-RA (Hadley Centre Global Environmental Model version 3 Regional Atmosphere) (Davies et al., 2005), RegCM4 (The Regional Climate Model version 4) (Giorgi et al., 2012), SNU-MM5 (Seoul National University Meso-scale Model version 5) (Cha and Lee, 2009), SNU-WRF (Seoul National University Weather Research and Forecasting) (Skamarock et al., 2005), YSU-RSM (Yonsei University Regional Spectral Model) (Hong et al., 2013)이며(Table 1), HadGEM3-RA를 제외하고 1000 km 이상의 광역 규모 대기 흐름의 영향을 고려하여 분광너징(Spectral nudging) 기법을 적용하였다. 분광너징은 지역모형에서 실험 영역 설정의 영향으로 영역의 경계조건에서 정보가 소실될 수 있는 장주기성분을 전구모형에서 추출하여 제한된 영역의 지역모형에 입력해주는 것이다(Lee et al., 2016). CORDEX-EA 참여 모형 중 RegCM4와 SNU-MM5 모형은 von Storch et al. (2000) 기법을 적용하였으며, SNU-WRF 모형은 Newtonian cooling에 기반한 방법을 적용하였다(Miguez-Macho et al., 2005). YSU-RSM 모형은 SSBC (The Scale-Selective Bias Correction) 방법을 적용하였는데, 대기 상층에 강한 가중치를, 하층에 약한 가중치를 두어 종관장은 전구모형을 따르면서도 지역모형의 자유도를 보장할 수 있는 방법을 사용하였다(Lee et al., 2014).

연구 기간은 모든 자료에 공통된 기간인 1989년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지 19년으로 하였다. 기후평균 풍속과 풍향을 계산하기 위해 일평균 동서 및 남북 바람 성분을 사용하였는데, 우리나라와 주변 해역에서 표층 바람은 계절에 따라 풍향과 풍속이 달라지기 때문에 좀 더 정확한 계산을 위해 월평균 자료를 이용하지 않고 일평균 자료로부터 월평균 값을 계산하였다. 연구 영역은 한반도 주변해역을 중심으로 115.5~142.5°E, 24~52°N으로 지정하였다.

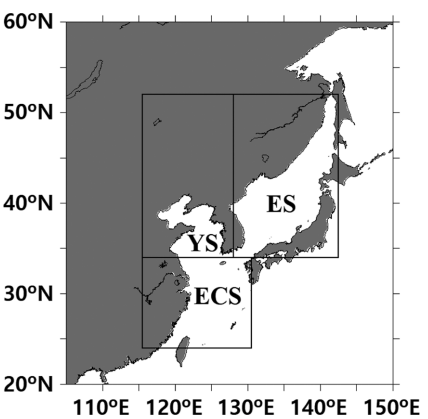

Fig. 1. Analysis domain including Korean Waters with three sub-regions: the Yellow Sea (YS), the East Sea (ES), and the East China Sea (ECS).

풍향을 분석하는 데 널리 이용되는 방법으로는 바람벡터와 바람장미를 들 수 있다. 바람벡터는 연구 영역에서 풍향 분포가 어떠한 지를 한눈에 알 수 있다는 장점이 있지만, 평균 벡터가 나타내는 방향이 실제 풍향을 나타낸다고 보장할 수 없다. 풍향이 비슷한 관심 영역을 선정하여 나타낸 바람장미가 실제 풍향에 더 가깝다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기후평균 풍향에 대한 지역기후모형의 모사 능력을 평가하기 위해 일평균 자료를 평균하여 계산한 월평균 남북/동서 바람성분으로 나타낸 바람벡터와 더불어 일평균 남북/동서 바람성분으로 구한 바람장미를 이용해 여름과 겨울 표층 풍향을 분석하였다. 또한 다음과 같이 지형적, 물리역학적 특성이 서로 다른 세 개의 해역으로 나누어 해역 평균 풍향에 대한 모사 성능을 평가하였다(Fig. 1): (1) 동해(128~142.5°E, 34~52°N), (2) 황해(115.5~128°E, 34~52°N), (3) 동중국해

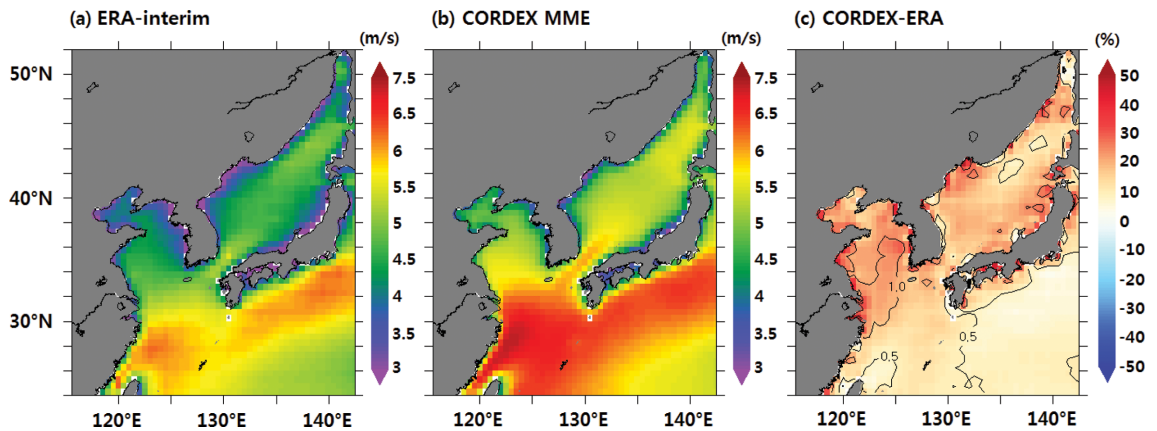

Fig. 2. Climatological mean surface wind speed during summer (JJA) averaged for 1989 to 2007 obtained from (a) ERA-interim reanalysis, (b) CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models, and (c) the MME bias against the ERA-interim reanalysis with shade in percentage (%) and contour for the absolute value. Units with contours are m s^{-1}.

(115.5~130.5°E, 24~34°N).

표층 바람 분포와 더불어 CORDEX-EA 지역모형이 모사한 표층 바람 오차의 원인을 알아보고자 계절에 따른 해면기압 분포도 평가하였으며, 연구 영역은 한반도 주변해 표층 바람에 영향을 줄 수 있는 기압 분포를 고려하여 북태평양을 포함하는 100~200°E, 10~60°N으로 지정하였다.

본 연구에서는 표층 바람에 대한 모사 성능 평가를 위해 5개 모형의 평균과 모형 각각에 대한 평가를 구분함으로써, 지역기후모형이 평균적으로 보이는 오차와 개별 모형이 보이는 오차 분포가 서로 다른 모형 사이에 얼마나 일치하는지 혹은 얼마나 다른지를 분석하고자 한다. 서로 다른 격자를 지닌 자료를 비교하기 위해 본 연구에서는 모든 자료를 편의상 이중선형 보간법(bi-linear interpolation method)을 이용하여 0.5° × 0.5°로 내삽하였고, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 해저지형자료인 ETOPO5 (Earth topography five minute grid)를 이용하여 공통 해안선을 적용하였다. ERA-interim 재분석자료는 본 연구에 사용되는 0.5° 간격의 자료를 제공하고 있지만, 실제 ERA-interim의 수평해상도는 약 80 km (T255) 이기 때문에 본 연구에서 0.75° 자료를 사용하여 재격자를 수행하여도 결과상의 큰 차이가 없을 것으로 사료된다(Berrisford et al., 2011).

3. 결 과

3.1 기후평균 풍속

3.1.1 수평 분포

여름에 ERA-interim 재분석자료는 황해와 동해에서 약 4~5 m s^{-1} 안팎의 풍속을 보이고 동중국해와 쿠로시오 해역에서는 5.5 m s^{-1} 이상의 비교적 강한 풍속 분포를 보인다(Fig. 2a). CORDEX-EA 다중모형평균은 이와 마찬가지로 황해와 동해보다 동중국해와 쿠로시오 해역에서 더 강한 풍속 분포를 보이는데, 황해와 동해에서는 약 5~6 m s^{-1}, 동중국해와 쿠로시오 해역에서는 약 6.5 m s^{-1} 이상(Fig. 2b)으로 ERA-interim에 비해 약 1 m s^{-1}(약 15%) 강하게 모사하였다(Fig. 2c). 여름 풍속이 특히 쿠로시오 해역에서 강하게 나타나는 것은 이 해역에서 해면수온이 상대적으로 높아 경계층 내 연직 혼합이 강해졌기 때문일 것으로 추정된다(Nonaka and Xie, 2003).

CORDEX-EA 다중모형평균에서 드러난 여름 풍속의 과대 모사 경향은 HadGEM3-RA를 제외한 4개 모형에서 공통으로 나타난다. 다른 모형과 달리 분광너징을 적용하지 않은 HadGEM3-RA는 동해 북부 연안, 일본 연근해 일부 해역과, 쿠로시오 해역에서 여름 표층 풍속을 ERA-interim보다 약 10%(약 0.5 m s^{-1}) 안팎으로 작게 모사하였다(Fig. 3b). 반면 RegCM4, SNU-MM5, SNU-WRF는 전반적으로 한반도 주변해 표층 바람을 약 15%(약 0.7 m s^{-1}) 이상 강하게 모사하였고(Figs. 3c, d, e) YSU-RSM은 특히 황해와 동해상에서 표층 풍속을 35%(약 1.5 m s^{-1}) 이상 강하게 모사하였다(Fig. 3f). 개별 모형의 모사 정도는 차이가 있지만 공통적으로 모든 모형이 한반도 연안을 포함한 동해, 황해에서 동중국해, 쿠로시오 해역보다 비교적 높은 풍속 차이를 보이며, 이는 % 차이뿐 아니라 절댓값 차이에서도 동일하게 나타났다.

겨울에 ERA-interim 재분석자료는 동해 북부와 쿠로시오 확장역, 대만해협에서 8 m s^{-1} 이상의 강한 풍

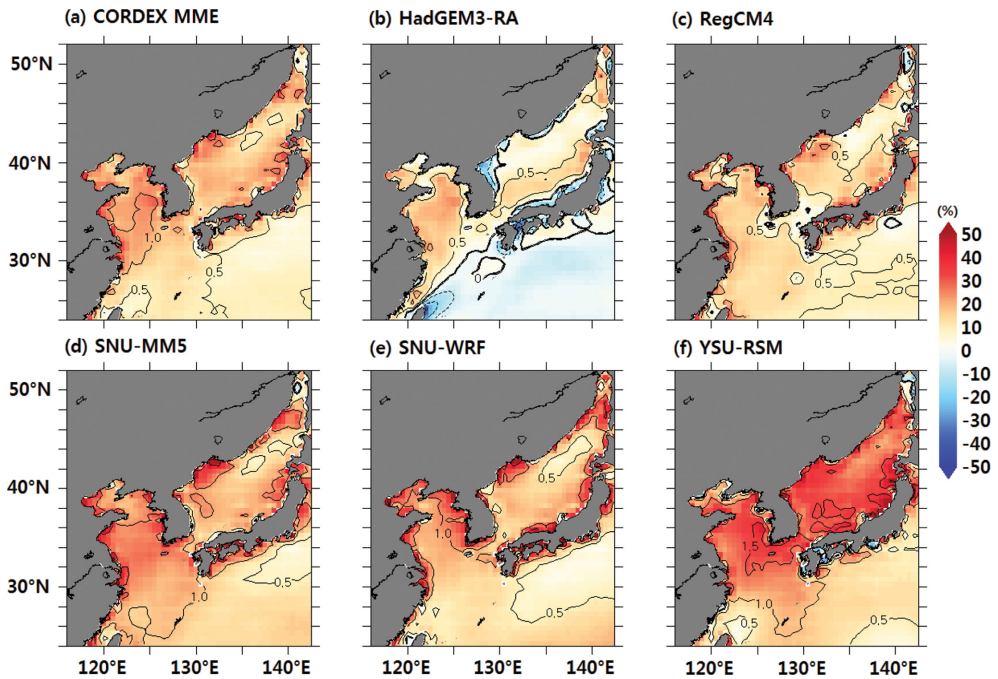

Fig. 3. Biases in climatological mean surface wind speed during summer (JJA) averaged for 1989 to 2007 obtained from (a) CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models, and (b-f) each of the ensemble members. The biases were obtained against the ERA-interim reanalysis and presented with shade in percentage (%) and with contour for the absolute value. Units with contours are m s^{-1}.

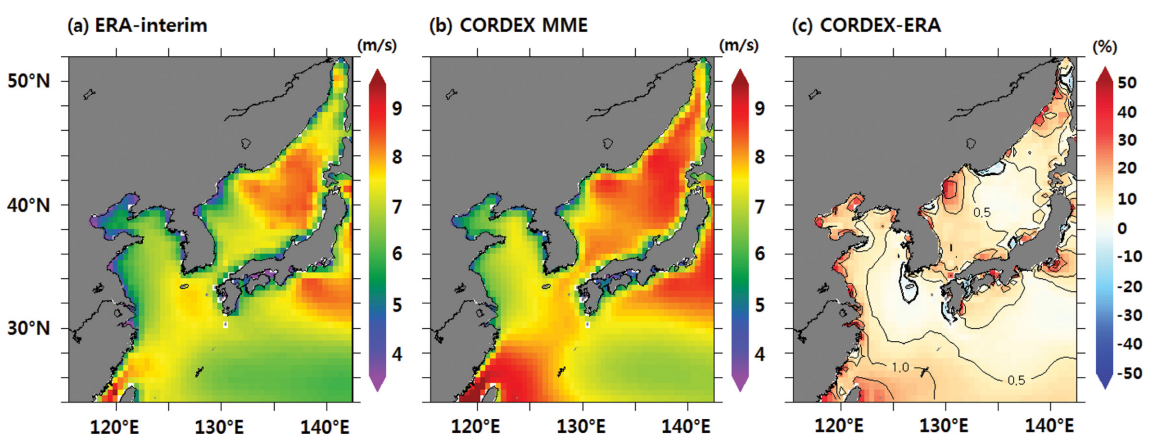

Fig. 4. Climatological mean surface wind speed during winter (DJF) averaged for 1989 to 2007 obtained from (a) ERA-interim reanalysis, (b) CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models, and (c) the MME bias against the ERA-interim reanalysis with shade in percentage (%) and contour for the absolute value. Units with contours are m s^{-1}.

속을 보이고 그 외 해역에서는 약 5.5~6.5 m s^{-1}의 상대적으로 약한 풍속을 보인다(Fig. 4a). CORDEX-EA 다중모형평균은 이와 비슷한 분포로 좀 더 넓은 해역에서 약 8.5 m s^{-1} 이상의 강한 풍속을, 그 외 해역에서는 약 7~7.5 m s^{-1}의 상대적으로 약한 풍속을 보인다(Fig. 4b). 여름과 마찬가지로, CORDEX-EA 다중모형평균은 겨울에도 ERA-interim 보다 약 0.5~1 m s^{-1} (약 8%) 이상 강한 풍속을 보이는데 이러한 과대 모사 경향은 HadGEM3-RA를 제외한 4개 모형에서 공통으로 나타난다. HadGEM3-RA는 대부분의 해역에

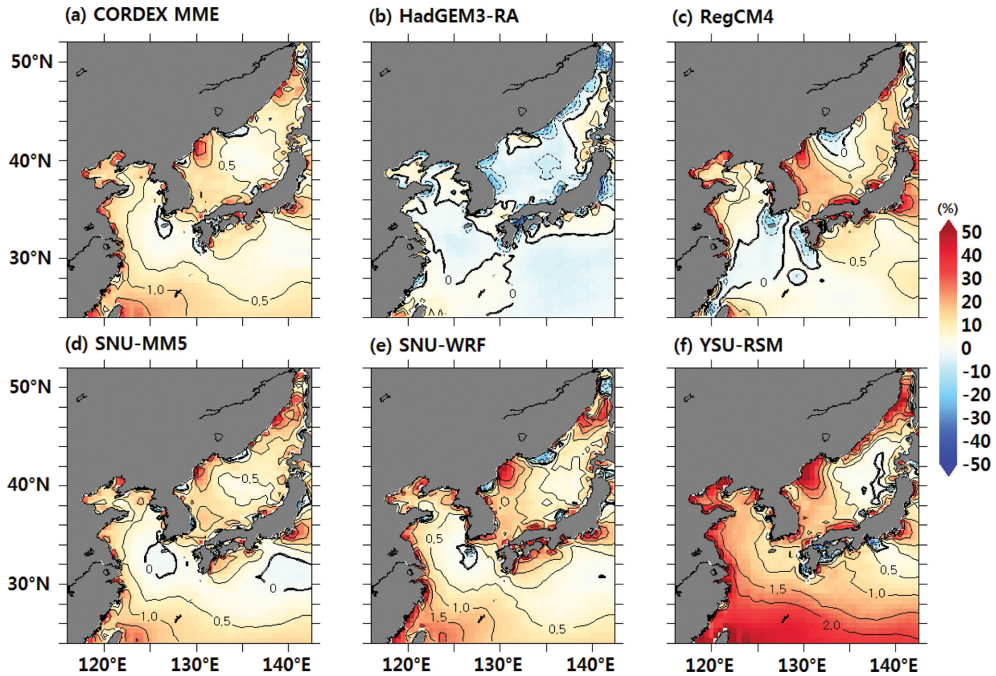

Fig. 5. Biases in climatological mean surface wind speed during winter (DJF) averaged for 1989 to 2007 obtained from (a) CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models, and (b-f) each of the ensemble members. The biases were obtained against the ERA-interim reanalysis and presented with shade in percentage (%) and with contour for the absolute value. Units with contours are m s^{-1}.

Table 2. Spatial correlation coefficients of the regional climate models against ERA-interim reanalysis data for the climatological mean surface wind speed in summer (JJA) and winter (DJF). All of the spatial correlation coefficients are statistically significant at 95% confidence level.

	HadGEM3-RA	RegCM4	SNU-MM5	SNU-WRF	YSU-RSM	MME
Summer (JJA)	0.89	0.93	0.95	0.95	0.89	0.96
Winter (DJF)	0.94	0.81	0.91	0.86	0.73	0.92

서 ERA-interim 보다 겨울 풍속을 다소 약하게 모사하였고(Fig. 5b), YSU-RSM 모형은 35%(약 2 m s^{-1}) 이상 더 강한 풍속을 보이는데 특히 30°N 이하 저위도 해역과 동쪽 연안에서 강한 풍속 오차가 더 뚜렷하게 나타난다(Fig. 5f). 풍속 절댓값 차이도 % 차이와 마찬가지로 저위도 해역과 동쪽 연안에서 강한 풍속 오차를 보였다.

CORDEX-EA 다중모형평균은 평균적으로 ERA-interim 재분석자료보다 여름에는 약 15%, 겨울에는 8% 이상 강한 표층 풍속을 보이지만 풍속의 공간 분포는 여름과 겨울 모두 상관계수가 0.9 이상으로 높은 상관도를 보인다(Table 2). 개별 모형으로는 재분석자료보다 풍속을 약하게 나타낸 것도 있지만 공간분포는 모든 모형이 여름에는 상관계수 0.89 이상, 겨울에는 0.73 이상으로 비교적 높은 상관도를 보인다(Table 2). 특히, 절대 풍속은 여름보다 겨울에 더 강하지만, 모형의 풍속 과대 모사 경향은 겨울보다 여름에 더 뚜렷하고 공간 상관도 여름에 더 높다는 점은 특기할 만하다.

3.1.2 테일러도형

CORDEX-EA 다중모형평균 및 개별모형이 모사한 동해, 황해, 동중국해 기후평균 풍속을 모형 평가에 널리 사용되는 테일러도형 분석을 이용하여 평가하였다(Fig. 6). 여름에 CORDEX-EA 지역모형은 ERA-interim 재분석자료와 상관계수 0.7 이상의 공간상관도, 0.3~1.7배 수준의 연변동 표준편차, 0.8 m s^{-1} 이하의 평균 제곱근오차를 보였는데, 개별모형에 비해

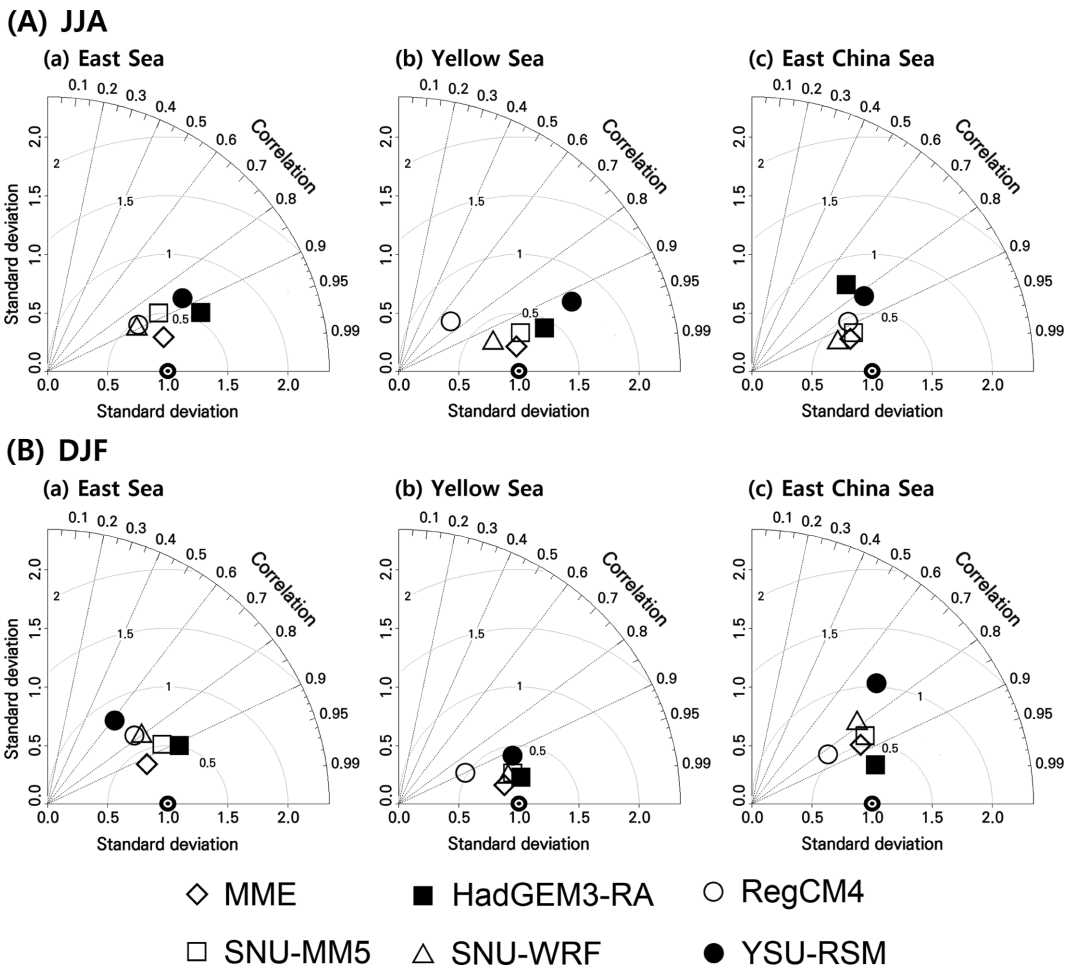

Fig. 6. Taylor diagram with spatial correlation for the climatological mean surface wind speed for 1989 to 2007 during (A) winter (DJF) and (B) summer (JJA) obtained from CORDEX-EA regional climate models against ERA-interim reanalysis data. The thick black circle on the abscissa indicate the ERA-interim reanalysis and the other symbols indicate the individual model results normalized by the ERA-interim's spatial-pattern standard deviation for each of the regions.

다중모형평균이 모든 해역에서 높은 공간상관도, 낮은 평균 제곱근오차를 보이며 상대적으로 높은 풍속 공간분포 모사성능을 보였다(Fig. 6A). 개별 모형은 풍속 수평분포 결과와 유사하게 분광너징을 적용하지 않은 HadGEM3-RA 모형과 하층에 분광너징 효과를 약하게 준 YSU-RSM 모형이 상대적으로 낮은 공간분포 모사능력을 보여, 여름 풍속 오차는 분광너징 적용에 민감한 것으로 추정된다.

겨울에도 여름과 유사하게 CORDEX-EA 지역모형이 전반적으로 상관계수 0.6 이상의 공간상관도, 0.3~2배 수준의 연변동 표준편차, 1 m s^{-1} 이하의 평균 제곱근오차를 보였다(Fig. 6B). 반면, 여름과 달리, YSU-RSM 모형은 낮은 모사성능을 보였지만 HadGEM3-RA 모형은 모든 해역에서 0.9 이상의 공간상관도, 0.5 m s^{-1} 이하의 평균 제곱근 오차를 보이며 상대적으로 높은 모사성능을 보였다.

3.2 풍향의 시공간 분포

3.2.1 계절평균 바람벡터

여름철 6~8월 평균으로 ERA-interim 재분석자료에 나타난 표층 바람은 북태평양 고기압 가장자리의 영향을 받아 동중국해에서는 남동풍이 불고 그보다 북쪽인 일본 동쪽 해상에서는 남서풍이 분다. 동중국해 남동풍은 한반도를 만나 황해상 남동풍과 동해상 남풍으로 갈라지고, 동해상 남풍은 북향하며 연해주에서 해안선을 따라 남서풍으로 바뀐다(Fig. 7a). CORDEX-

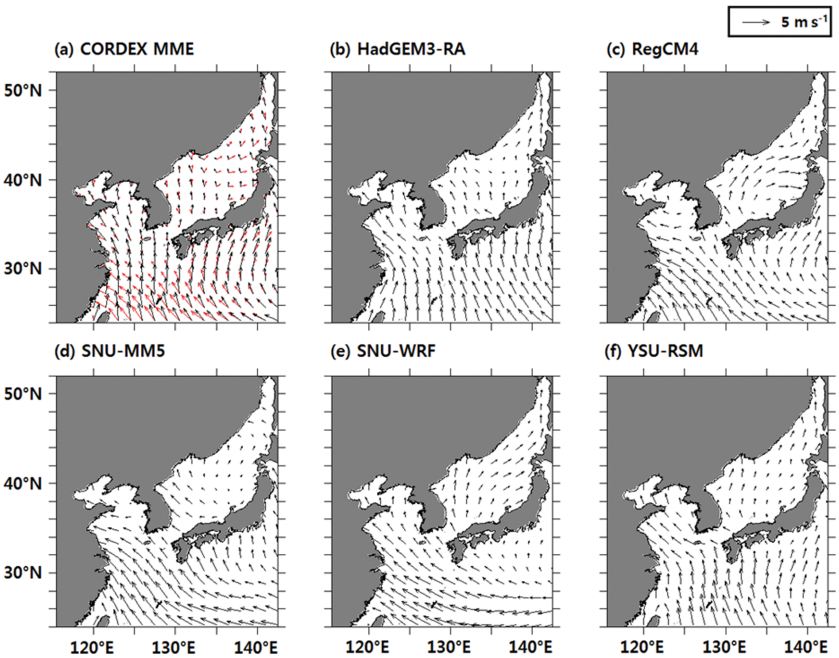

Fig. 7. Climatological mean surface wind vector during summer (JJA) averaged for 1989 to 2007 obtained from (a) ERA-interim reanalysis (red arrows), CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models (black arrows), and (b-f) each of the ensemble members. The wind vectors were calculated using monthly mean zonal and meridional winds. Units are m s^{-1}.

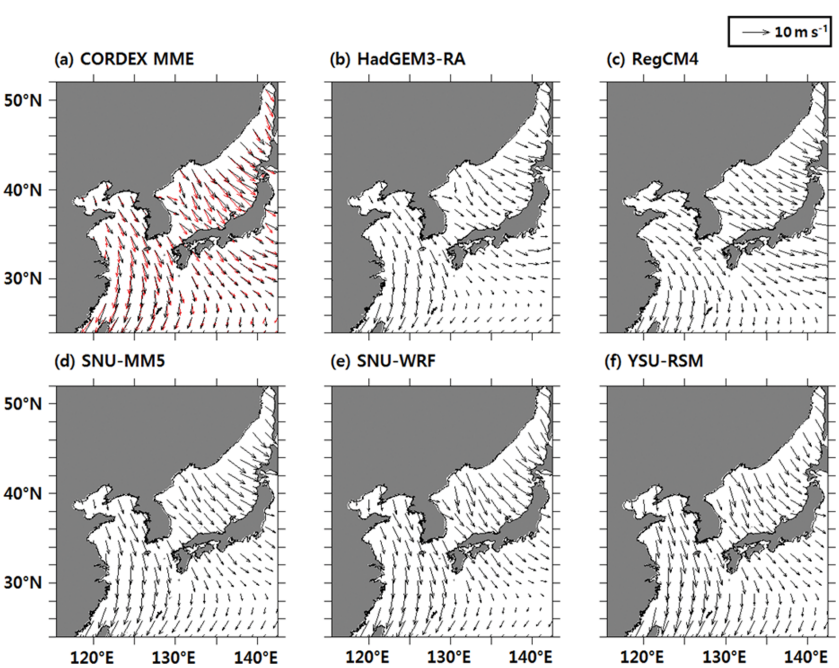

Fig. 8. Climatological mean surface wind vector during winter (DJF) averaged for 1989 to 2007 obtained from (a) ERA-interim reanalysis (red arrows), CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models (black arrows), and (b-f) each of the ensemble members. The wind vectors were calculated using monthly mean zonal and meridional winds. Units are m s^{-1}.

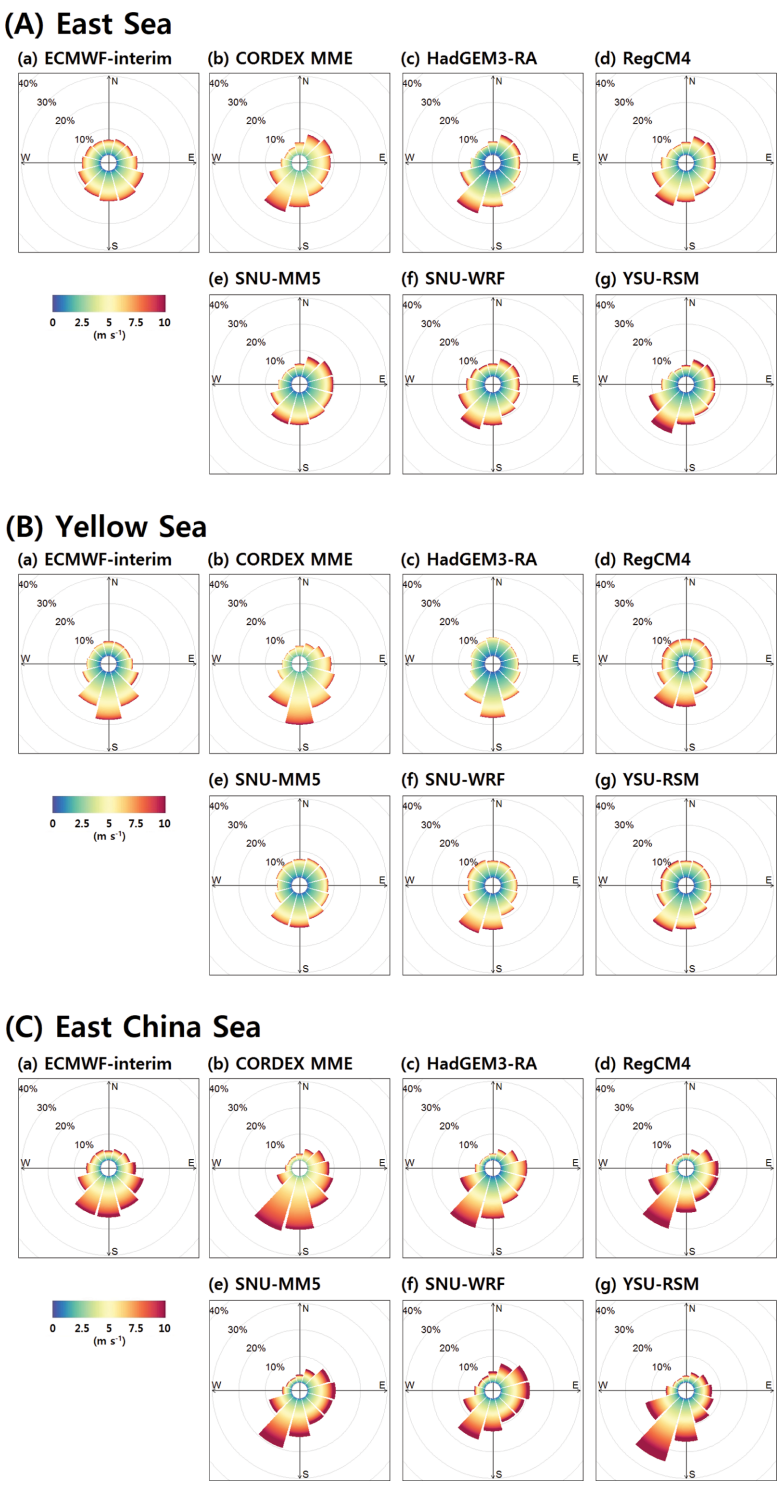

Fig. 9. Wind rose in (A) the East Sea, (B) the Yellow Sea, and (C) the East China Sea calculated with daily mean winds from 1989 to 2007 during summer (JJA): (a) ERA-interim reanalysis, (b) CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models, and (c-g) each of the ensemble members. The unit of wind speed shaded in color is m s^{-1}.

EA 지역모형은 대체로 이와 비슷한 풍향 분포를 보이지만 동중국해와 동해에서 비교적 큰 차이를 보인다(Fig. 7). 동중국해에서는 120~130°E 해역에서 HadGEM3-RA와 YSU-RSM이 남동풍보다는 남풍을 주로 모사하였으며 130~140°E 해역에서는 SNU-MM5와 SNU-WRF가 주로 동풍을 모사하였다. 동해에서 다른 모형들은 남풍이나 남서풍을 주로 나타냈지만, SNU-MM5는 남동풍을 주로 나타냈다.

겨울철 12~2월 평균으로 ERA-interim 재분석자료에 나타난 표층 바람은 동아시아 겨울몬순의 영향으로 대륙으로부터 불어오는 북서풍이 주를 이루고 120~130°E 해역에서 30°N 이남에서는 동쪽으로 갈수록 북서풍에서 북풍, 북동풍의 시계방향 흐름을 따른다(Fig. 8a). CORDEX-EA 지역모형이 동중국해와 동해에서 여름 풍향을 제대로 모사하지 못하는 것과 달리 겨울에는 한반도 주변해상에서 부는 북서풍과 북풍을 비교적 잘 모사하였다(Fig. 8). 특히 동해 130°E 부근 해상에서 북서풍이 북풍에 가깝게 변하는 데 SNU-WRF, YSU-RSM은 이러한 상세 구조를 잘 나타낸다.

3.2.2 해역별 바람장미

Figures 9, 10에 보인 바람장미는 한반도 주변해를 동해, 황해, 동중국해로 나누고 각각의 해역에서 일평균 표층 풍향을 12방위 체계로 나타낸 것이다. 12방위 체계는 북쪽부터 시계방향으로 북, 북동, 동북, 동, 동남, 남동, 남, 남서, 서남, 서, 서북, 북서로 표현된다. 바람장미로 살펴본 한반도 주변해 여름철 표층 풍향은 남동풍과 남서풍을 포함하여 계절 평균과 마찬가지로 남풍계열이 주를 이루긴 하지만 5 m s^{-1} 이하 약풍이 사방으로 불어온다. 동해에서 재분석자료는 대체로 사방에서 바람이 부는 가운데 남동풍과 남서풍을 포함하여 남풍 계열이 우세하고 남서, 서남풍보다는 남동, 동남풍이 비교적 우세한 편이지만(Fig. 9Aa), CORDEX-EA 지역모형은 모형평균이나 개별 모형 모두 비교적 뚜렷하게 주풍향이 남서풍으로 나타난다(Figs. 9Ab-f). 황해에서는 재분석자료와 모형 평균 모두 주풍향이 남풍으로 나타나고(Figs. 9Ba, b), 개별 모형으로는 HadGEM3-RA를 제외하고 남서풍이 남풍과 비슷한 수준으로 또는 더 자주 나타난다(Figs. 9Bd-g). 동중국해에서는 주풍향이 재분석자료의 경우 남풍과 남서풍으로, 모형자료의 경우는 남서풍으로 나타난다(Fig. 9C).

겨울철 풍향은, 사방에서 비교적 고르게 바람이 부는 가운데 주풍향이 계절 평균과 마찬가지로 북풍 계열로 뚜렷하지만, 동해와 황해에서는 북서, 서북풍이, 동중국해에서는 북서풍에서 북동풍이 주로 분다(Fig. 10). 동해에서 재분석자료와 모형 평균은 북서, 서북풍이 50% 이상을 차지하지만(Figs. 10Aa, b), 개별 모형은 북서풍이 줄고 대신 서풍이 늘어나는 분포를 보인다(Figs. 10Ac-g). 황해에서 재분석자료와 모형 평균의 주풍향은 동해와 마찬가지로 북서, 서북풍이지만 좀 더 북서풍쪽으로 치우쳐 있으며 북풍도 10% 이상을 차지한다(Figs. 10Ba, b), 개별 모형으로는 YSU-RSM이 이와 비슷하고 다른 모형은 북서풍의 빈도가 줄고, 서북풍의 빈도가 증가한 모습을 보인다(Figs. 10Bc-g). 동중국해에서는 재분석자료와 모형 평균이, 북서풍이 상대적으로 우세한 다른 해역에서와 달리, 북풍과 북동풍이 50% 이상을 차지하며 북서풍을 포함하면 북풍 계열 바람이 80% 이상을 차지한다(Figs. 10Ca, b). 개별 모형에서도 북풍을 중심으로 북서풍과 북동풍을 포함하는 북풍 계열 바람이 대부분을 차지하지만 대체로 재분석자료에 비해 북서풍과 북동풍뿐 아니라 서북풍과 동북풍까지 모든 북풍계열이 고른 분포를 보이며 특히 RegCM4의 경우는 서북풍에서 북동풍까지 고른 분포가 상대적으로 뚜렷하게 나타난다(Figs. 10Cc-g).

이와 같은 바람장미 결과는 앞선 바람벡터와 큰 차이를 보였다. 예를 들면 여름철 SNU-MM5의 경우 바람벡터로는 동해상에서 남동풍이 주를 이루고 연해주 해안을 따라 남서풍이 불지만(Fig. 7d), 바람장미에서는 남동풍보다 남서풍이 우세하게 나타난다(Fig. 9Ad). 황해에서 여름 평균 바람벡터는 남동풍으로 나타나 남풍이 주를 이루는 바람장미 결과와 차이를 보인다(Fig. 7). 동중국해에서 바람벡터는 모두 남동풍으로 나타나지만 바람장미는 대체로 남서풍으로 나타난다. 이러한 차이는 표층 바람을 계절 평균하는 과정에서 바람벡터에서는 강한 풍속이 나타난 풍향이 주풍향으로 나타내기 때문으로 사료된다.

3.3 해면기압 분포

해면기압 분포는 표층 바람에 지배적인 영향을 미치기 때문에 CORDEX-EA 지역모형이 모사한 표층 바람 오차의 원인을 이해하기 위해서는 해면기압 모사능력을 살펴볼 필요가 있다. 여름 해면기압은 RegCM4, SNU-MM5, SNU-WRF 모형이 ERA-interim과 유사하게 북태평양 고기압을 200°E, 35°N 부근을 중심으로 원형에 가깝게 모사하는 반면(Figs. 11a, c, d, e), HadGEM3-RA, YSU-RSM 모형은 30°N에서 저위도로, 50°N에서 고위도로 갈수록 상대적으로 북태평양 고기압의 가장자리가 확장하여 남북방향으로 평행한 기압분포를 보인다(Figs. 11b, f). 이 두 모형은 여름철 동중국해의 120~130°E 해역에서 계절평균 바람벡터를 남동풍이 아닌 남풍으로 모사하는 오차를 보였는데(Figs. 7b, f), 이는 다른 모형에 비해 30°N에서 저위도로 갈수록 상대적으로 확장한 북태평양 고

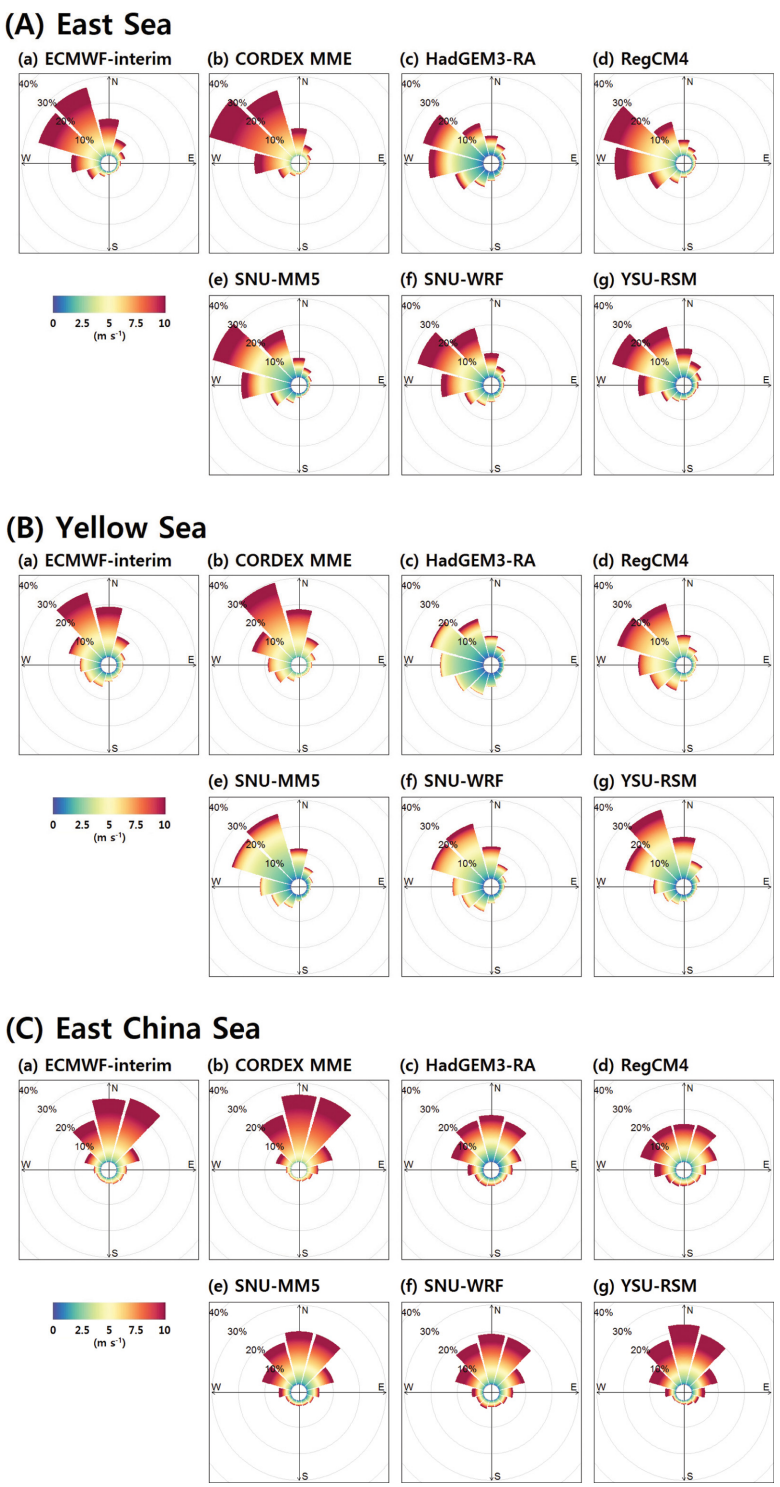

Fig. 10. Wind rose in (A) the East Sea, (B) the Yellow Sea, and (C) the East China Sea calculated with daily mean winds from 1989 to 2007 during winter (DJF): (a) ERA-interim reanalysis, (b) CORDEX-EA multi-model ensemble mean (MME) of 5 models, and (c-g) each of the ensemble members. The unit of wind speed shaded in color is m s^{-1}.

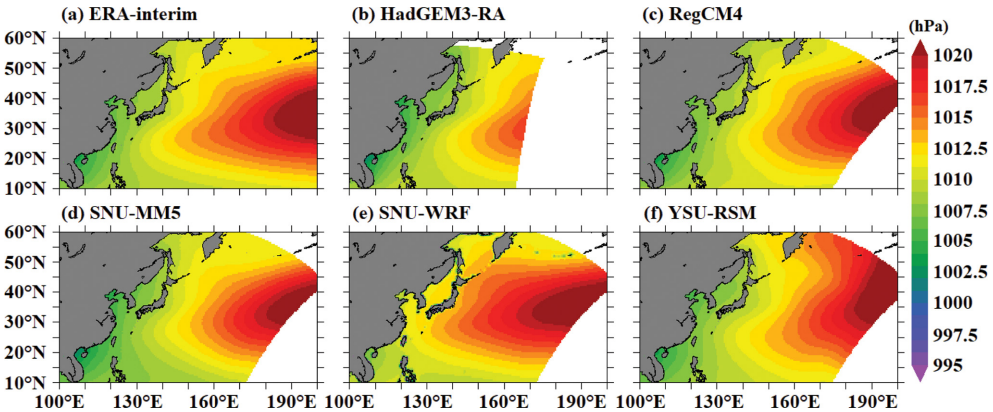

Fig. 11. Climatological mean sea-level pressure during summer (JJA) averaged from 1989 to 2007 obtained from (a) CORDEX multi-model ensemble mean (MME) of 5 models and (b-f) each of the ensemble members. The unit of sea-level pressure shaded in color is hPa.

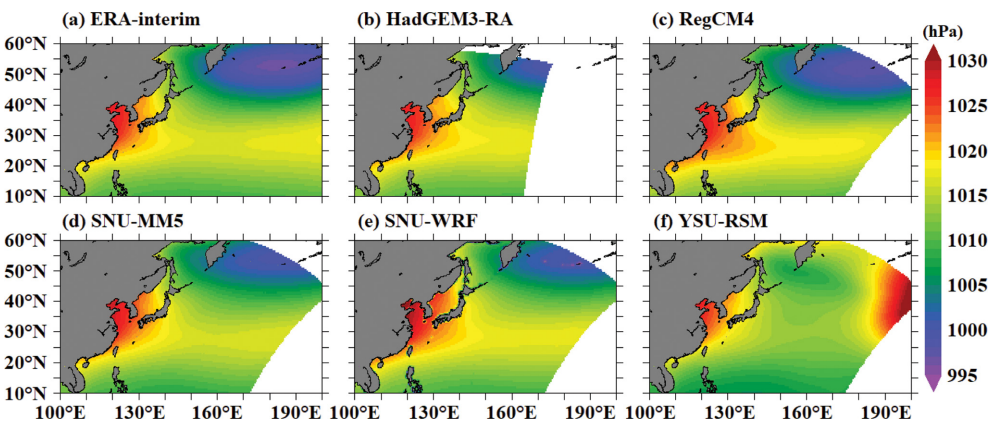

Fig. 12. Climatological mean sea-level pressure during winter (DJF) averaged from 1989 to 2007 obtained from (a) CORDEX multi-model ensemble mean (MME) of 5 models and (b-f) each of the ensemble members. The unit of sea-level pressure shaded in color is hPa.

기압의 가장자리를 따라 생기는 시계방향 순환이 여름철 동중국해의 120~130°E 해역에서 남풍이기 때문에 발생했을 가능성이 높다.

겨울 해면기압은 YSU-RSM을 제외한 모형들이 크기 차이는 존재하지만 대체로 황해에서 1025 hPa 이상의 고기압을 보이며, 북태평양에서 30°N 부근에 갈수록 기압이 증가하는 분포를 ERA-interim 재분석자료와 유사하게 모사한다. 반면 YSU-RSM은 100~140°E 에서 해면기압을 ERA-interim과 유사하게 모사하지만 180°E, 40°N에서 고기압을 보이고, 알루샨 저기압을 약하게 모사하는 등 전반적인 겨울 해면기압의 크기와 분포를 제대로 모사하지 못한다(Fig. 12).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 CORDEX-EA 지역모형의 다중모형평균과 개별 모형이 모사한 한반도 근해 표층 바람을 ERA-interim 전구재분석자료와 비교·평가하였고, 겨울과 여름에 대해 기후평균 풍속뿐만 아니라 풍향에 대해서도 분석을 수행하였다.

CORDEX-EA 다중모형평균은 계절에 상관없이 한반도 주변해 표층 풍속을 재분석자료보다 약 10~20% 또는 0.5~1 m s^{-1} 정도 크게 모사하였다. 하지만 크기 차이가 있을 뿐, 두 계절 모두 상관계수 0.9 이상의 유의한 공간 상관성을 보여 풍속의 공간 분포는 재분석자료와 유사하다고 볼 수 있다. 다중모형평균뿐만

아니라 각각의 모형으로도 CORDEX-EA 지역모형도 여름철 쿠로시오 해역의 강풍 및 겨울철 동해 외해의 강풍과 같은 표층바람 분포를 비교적 잘 모사했으며, 모든 모형의 공간상관계수도 재분석자료와 0.7 이상으로 높게 나타났다. 다만, 분광너징을 유일하게 적용하지 않은 HadGEM3-RA 모형이 재분석자료보다 동해와 동중국해 일부 해역에서 풍속을 약 10% 안팎으로 작게 모사하는 경향을 보였으며, 크기뿐만 아니라 여름 풍속 공간 분포도 비교적 큰 차이를 보였다. 분광너징의 가중치를 하층에만 약하게 준 YSU-RSM 모형은 동해와 황해의 풍속을 30% 이상 크게 모사할 뿐 아니라 여름 풍속 공간 분포도 유의미한 차이를 보였다. 전층에 분광너징을 적용한 SNU-WRF, SNU-MM5, RegCM4 모형은 비록 풍속을 15% 정도 크게 모사하지만 테일러도형을 이용한 모형 평가 결과, 0.8 이상의 높은 공간상관계수, 0.5 m s^{-1} 이하의 평균 제곱근오차를 보였다. 여러 선행연구에서 지역모형에 분광너징을 적용했을 때, 모사성능이 개선됨을 보였고(Kang et al., 2005; Miguez-Macho et al., 2005; Cha and Lee, 2009; Lee et al., 2016), 표층풍속 오차가 두드러지게 나타난 HadGEM3-RA와 YSU-RSM 모형은 분광너징을 적용하지 않거나, 하층부에 약하게 적용하였다. 따라서 두 모형에 나타난 표층풍속 오차는 분광너징과 밀접하게 연관된 것으로 추정된다. 하지만 분광너징 이외에도 개별모형의 물리역학과정, 모형수행영역, 모수화 방안이 풍속 분포 모사성능에 영향을 줄 수 있기 때문에 명확한 원인 파악을 위한 추가적인 분석이 필요하다.

풍향의 경우, CORDEX-EA 지역모형은 한반도 주변 해상에서 다중모형평균뿐 아니라 개별 모형 모두 겨울철 북서풍을 잘 모사했다. 그러나 여름에는 다중모형평균이 동중국해 남동풍과 동해 서풍을 제대로 모사하지 못했다. 다중모형평균에 나타난 이러한 여름 풍향 오차는 HadGEM3-RA와 YSU-RSM의 오차에서 비롯된 것이다. 이 두 모형은 분광너징을 적용하지 않거나 하층에만 약하게 적용한 모형으로, 지역모형에 적용된 대규모 순환 흐름 정보가 풍속뿐 아니라 풍향의 모사 정확도에도 영향을 미쳤을 가능성이 높을 것으로 사료된다. 이는 기존 연구들에서 제시한 지역모형에 분광너징을 적용했을 때 여름철 기압, 강수량, 풍속이 개선되었다는 결과와 일치한다(Cha and Lee, 2009; Lee et al., 2016).

표층바람 오차의 원인을 알아보기 위해 해면기압 분포를 살펴 보았다. 다른 모형과 달리 HadGEM3-RA, YSU-RSM 모형은 ERA-interim에 비해 여름철 북태평양 고기압의 가장자리가 30°N에서 저위도로 갈수록 확장하여, 남북방향으로 평행한 형태를 보였다. 이 두 모형은 여름철 동중국해 남동풍을 남풍으로 모사하는 오차를 보였는데, 이는 다른 모형에 비해 남북으로 평행한 형태를 보이는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 형성된 시계방향 순환이 한반도 주변해 풍향에 영향을 준 것으로 보인다. HadGEM3-RA 모형은 모형영역이 다른 모형에 비해 상대적으로 작기 때문에 측면경계 강제력이 달라짐에 따라 모형 내부의 표층바람 모사가 다른 모형과 다르게 나타났을 가능성도 있다.

결과적으로 CORDEX-EA 지역모형은 계절에 상관없이 표층 풍속을 과대모사하지만 모사한 풍속의 공간분포는 비교적 신뢰도가 높다고 할 수 있다. 지역모형의 풍속 과대모사는 상대적으로 해상도가 높아서 특정 지역에 나타나는 강풍이 재분석자료보다 오히려 현실에 가깝게 모사되었기 때문만은 아니며 CORDEX-EA 지역모형의 계통오차로 보여진다. 특히, CORDEX-EA 지역모형의 경우 ERA-interim 재분석자료에 비해 해상도가 높긴 하지만 월등히 높은 편은 아니라는 점도 감안해야 한다. 따라서 풍속의 과대모사에 대한 개선이 이루어진다면 지역기후모형을 활용한 표층 풍속의 현재기후 변동성 이해 및 미래변화 전망의 정확성을 높이는데 기여할 것이다.

CORDEX-EA 지역모형은 동일한 초기 및 경계 조건을 지니고 있음에도 불구하고, 개별모형에 따라 전체 분석기간의 평균 풍향뿐 아니라 시간에 따른 풍향 변화 또한 계절에 상관없이 차이를 보였다. 특히 모형 사이에 차이가 뚜렷하게 나타난 여름철 동중국해 풍향은 분광너징 유무에 따른 북태평양 고기압의 모사능력과 연관이 있을 것으로 추정되었다. 이는 지역모형을 이용한 표층바람 모사에서 대규모 순환 모사의 중요성을 시사한다.

감사의 글

이 연구는 한국해양과학기술원(북서태평양 순환과 기후 변동성이 한반도 주변해역 변화와 물질순환에 미치는 영향 I - 제주난류 변동성과 역할, PE99711), 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원(해양수치모델링과 지능정보기술을 활용한 해양예측 정확도 향상 연구, PM61480), 그리고 한중해양과학공동연구센터(북서태평양 기후변화 예측 및 응용 연구)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

Berrisford, P., and Coauthors, 2011: *The ERA-interim archive, version 2.0.* ERA Report Series 1, 23 pp.

Cha, D.-H., and D.-K. Lee, 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. *J. Geophys. Res.*, **114**, D14108, doi:10.1029/2008JD011176.

Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1759-1782.

Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.

Fitch, D. T., and J. K. Moore, 2007: Wind speed influence on phytoplankton bloom dynamics in the Southern Ocean Marginal Ice Zone. *J. Geophys. Res*., **112**, C08006.

Flato, G., and Coauthors, 2014: Evaluation of climate models. In T. F. Stocker et al. Eds., *Climate Change 2013: the physical science basis.* Cambridge University Press, 810-815.

Giorgi, F., C. Jones, and G. R. Asrar, 2009: Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bull.*, **58**, 175-183.

_____, and Coauthors, 2012: RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim. Res.*, **52**, 7-29, doi:10.3354/cr01018.

Gormus, K. S., S. H. Kutoglu, D. Z. Seker, I. H. Ozolcer, M. Oruc, and B. Aksoy, 2014: Temporal analysis of coastal erosion in Turkey: a case study Karasu coastal region. *J. Coast. Conserv.*, **18**, 399-414, doi:10.1007/s11852-014-0325-0.

Heo, K.-Y., T. Ha, J.-Y. Choi, K.-S. Park, J.-I. Kwon, and K. Jun, 2017: Evaluation of Wind and Wave Simulations using Different Global Reanalyses. *J. Coastal Res.*, **79**, 99-103, doi:10.2112/SI79-021.1.

Hong, S.-Y., and Coauthors, 2013: The global/regional integrated model system (GRIMs). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 219-243, doi:10.1007/s13143-013-0023-0.

Huang, B., S. Polanski, and U. Cubasch, 2015: Assessment of precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-East Asia regional climate simulations. *Clim. Res.*, **64**, 141-158, doi:10.3354/cr01302.

Im, E.-S., E.-H. Park, W.-T. Kwon, and F. Giorgi, 2006: Present climate simulation over Korea with a regional climate model using a one-way double-nested system. *Theor. Appl. Climatol*., **86**, 187-200.

Jang, C. J., H.-J. Shin, H. Jung, and C.-H. Kim, 2017: A preliminary Result on the Projection of Sea Surface Temperature in Korean Waters by Regional Climate Coupled Modelling. *Journal of Coastal Disaster Prevention*, **4**, 35-41 (in Korean with English abstract).

_____, W. Choi, H.-J. Shin, and C.-H. Kim, 2018: Future Changes in the Sea Surface Wind over the East Asian Marginal Seas Projected by Regional Climate Models. *Journal of Coastal Research*, **85**, 591-595, doi:10.2112/SI85-119.1.

Kalognomou, E.-A., and Coauthors, 2013: A diagnostic evaluation of precipitation in CORDEX models over southern Africa. *J. Climate*, **26**, 9477-9506, doi:10.1175/JCLI-D-12-00703.1.

Kanamaru, H., and M. Kanamitsu, 2007: Scale-selective bias correction in a downscaling of global analysis using a regional model. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 334-350.

Kang, H.-S., D.-H. Cha, and D.-K. Lee, 2005: Evaluation of the mesoscale model/land surface model (MM5/LSM) coupled model for East Asian summer monsoon simulations. *J. Geophys. Res*., **110**, D10105.

Kim, J., and Coauthors, 2014: Evaluation of the CORDEX-Africa multi-RCM hindcast: systematic model errors. *Clim. Dyn*., **42**, 1189-1202, doi:10.1007/s00382-013-1751-7.

Lee, D., C. Park, Y.-H. Kim, and S.-K. Min, 2016: Evaluation of the COSMO-CLM for East Asia Climate simulations: Sensitivity to Spectral Nudging. *Journal of Climate Research*, **11**, 69-85, doi:10.14383/cri.2016.11.1.69 (in Korean with English abstract).

Lee, J.-W., S.-Y. Hong, E.-C. Chang, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 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.

Lee, Y.-H., D.-H. Cha, and D.-K. Lee, 2008: Impact of horizontal resolution of regional climate model on precipitation simulation over the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **18**, 387-395 (in Korean with English abstract).

Miguez-Macho, G., G. L. Stenchikov, and A. Robock, 2005: Regional climate simulations over North America: interaction of local processes with improved large-scale flow. *J. Climate*, **18**, 1227-1246.

Nikulin, G., and Coauthors, 2012: Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *J. Climate*, **25**, 6057-6078, doi:10.1175/JCLI-D-11-00375.1.

Nonaka, M., and S.-P. Xie, 2003: Covariations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean-to-atmosphere feedback. *J. Climate*, **16**, 1404-1413.

Seo, J.-W., and Y.-S. Chang, 2003: Characteristics of the monthly mean sea surface winds and wind waves near the Korean Marginal Seas in the 2002 year computed using MM5/KMA and WAVEWATCH-III model. *J. Korean Soc. Oceanography*, **8**, 262-273 (in Korean with English abstract).

Simmons, A., S. Uppala, D. Dee, and S. Kobayashi, 2006: ERA-interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, **110**, 25-35.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Technical note NCAR/TN-4681STR, 88 pp.

Swart, N. C., and J. C. Fyfe, 2012: Ocean carbon uptake and storage influenced by wind bias in global climate models. *Nat. Clim. Change*, **2**, 47-52, doi:10.1038/nclimate1289.

Uppala, S. M., D. Dee, S. Kobayashi, P. Berrisford, and A. Simmons, 2008: Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-interim. *ECMWF Newsletter*, **115**, 12-18.

von Storch, H., H. Langerberg, and F. Feser, 2000: A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3664-3673.