



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

CMIP5 모델을 이용한 북태평양지역의  
미래 열대저기압 활동 변화 전망

濟州大學校 大學院

해양기상학 협동과정

이 철

2017년 2월

碩士學位論文

CMIP5 모델을 이용한 북태평양지역의  
미래 열대저기압 활동 변화 전망

濟州大學校 大學院

해양기상학 협동과정

이 철

2016년 12월

# CMIP5 모델을 이용한 북태평양지역의 미래 열대저기압 활동 변화 전망

지도교수 문 일 주

이 철

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.

2016년 12월

이 철의 이학 석사학위 논문을 인준함.

심사위원장 \_\_\_\_\_(인)

위 원 \_\_\_\_\_(인)

위 원 \_\_\_\_\_(인)

제주대학교 대학원

2016년 12월

# Future projection of changes in tropical cyclone activity over North Pacific using CMIP5 models

Cheol Lee

(Supervised by professor Il-Ju Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science

2016. 12

This thesis has been examined and approved.

Interdisciplinary Program in Marine Meteorology  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 목 차

List of Figures	iii
List of Tables	v
Abstract	vi
1. 서론	1
2. 연구 방법	4
2.1. CMIP5 모델 및 자료	4
2.2. RCP 시나리오	7
2.3. 최대잠재강도	7
2.4. 연직윈드시어	8
2.5. 열대저기압활동예측	9
3. CMIP5 모델 성능 평가	11
3.1. 대기인자 성능평가	11
3.2. 해양인자 성능평가	16
4. CMIP5 모델 및 재분석자료 과거기간 모의	18
4.1. 해수면온도	18
4.2. 연직윈드시어	21
4.3. 최대잠재강도	25
5. CMIP5 모델 미래전망	28
5.1. 해수면온도	28
5.2. 연직윈드시어	30
5.3. 최대잠재강도	32
6. 열대저기압 활동지수	34

6.1. 회귀분석을 위한 지역설정 .....	34
6.2. 과거기간 검증 및 미래전망 .....	36
7. 요약 및 결론 .....	40
8. 참고문헌 .....	43

## List of Figures

- Fig. 1. Relative root-mean square error (RMSE) calculated from the 1981-2005 climatological seasonal cycle of the CMIP5 historical simulations over western north pacific ( $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ). A relative performance is displayed, with blue shading indicating performance being better and red shading worse, than the median of all model results. A diagonal split of a grid square shows the relative error with respect to the reference data set (Ref.1, obs data, lower right triangle, Table 1) and the alternate data set (Ref. 2, reanalysis data, upper left triangle, Table 2). White boxes are used when data is not available for the given model and variable or no alternate data set has been used. The figure shows that performance varies across CMIP5 models and variables, with some models comparing better with observations for one variable and another model performing better for a different variable. .... 14
- Fig. 2. Same as Figure 1. But for region is Eastern North Pacific ( $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\sim 300^{\circ}\text{E}$ ). .... 15
- Fig. 3. Sea Surface Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for CMIP5 multi model ensemble (MME, top), reanalysis data ensemble (OBS, middle) and difference MME and OBS (bottom) over North pacific of the end of 20th century (1981~2005). .... 19
- Fig. 4. Sea Surface Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datas over North pacific of the end of 20th century (1981~2005). .. 20
- Fig. 5. Tropical cyclone tracks over North pacific of the end of 20th century (1981~2005). .... 21
- Fig. 6. Vertical Wind Shear (m/s) for CMIP5 multi model ensemble (MME, top), reanalysis data ensemble (OBS, middle) and difference MME and OBS (bottom) over North pacific of the end of 20th century (1981~2005). .... 23
- Fig. 7. Vertical Wind Shear (m/s) for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datas over North pacific of the end of 20th century (1981~2005). .. 24



Fig. 8. Maximum Potential Intensity (m/s) for CMIP5 multi model ensemble (MME, top), reanalysis data ensemble (OBS, middle) and difference MME and OBS (bottom) over North pacific of the end of 20th century (1981~2005). .....	26
Fig. 9. Maximum Potential Intensity (m/s) for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datas over North pacific of the end of 20th century (1981~2005). .....	27
Fig. 10. Changes in sea surface temperature (°C) for 10 CMIP5 models and multi model ensemble for RCP 8.5 scenario over North pacific between the periods of 2075~2099 from 1981~2005. ....	29
Fig. 11. Changes is vertical wind shear (m/s) for 10 CMIP5 models and multi model ensemble for RCP 8.5 scenario over North pacific between the periods of 2075~2099 from 1981~2005. ....	31
Fig. 12. Changes in maximum potential index (m/s) for 10 CMIP5 models and multi model ensemble for RCP 8.5 scenario over North pacific between the periods of 2075~2099 from 1981~2005. ....	33
Fig. 13. Upper/lower panels are correlation observed PDI with each variables for NCEP reanalysis data over North Western Pacific and North Eastern Pacific respectively. First column is MPI and second column is VWS. Number in the black box means correlation OBS PDI with NCEP each variables data. ....	35
Fig. 14. Caculated PDI (Power Dissipation Index, (m/s) <sup>3</sup> ) for Observation data (OBS) and NCEP reanalysis (NCEP) data. Upper panel is western north pacific and lower panel is eastern north pacific. Black, Red lines mean OBS and NCEP respectively. Each lines are 4-years moving average. ....	37
Fig. 15. Same as Fig. 16. But Black, Red lines mean OBS and multi model ensemble respectively. ....	37
Fig. 17. Changes in new caculated PDI (Power Dissipation Index, (m/s) <sup>3</sup> ) for CMIP5 multi model ensemble. Black, Red, blue lines mean the end of 20 <sup>th</sup> , the end of 21 <sup>st</sup> and deference of the end of 20 <sup>th</sup> between the end of 21 <sup>st</sup> respectively. The lines are 4-years moving average. ....	37

## List of Tables

Table 1. Model name, institute, and resolution of atmosphere / ocean model. .....	5
Table 2. Reanalysis data name, institute, and resolution of atmosphere / ocean model. ....	6
Table 3. Observationally-Based Reference Data Sets. ....	12
Table 4. Choose the CMIP5 models for atmosphere variable by ESMValTool. Separated RMSE +0.4 up/ down over WNP and ENP. ....	15
Table 5. Correlation between reanalysis data with CMIP5 models. ....	17
Table 6. Choose the CMIP5 models for ocean variable. Separated correlation reanalysis data with CMIP5 models over WNP and ENP respectively. .....	17
Table 7. Correlation observed PDI with calculated multi regression PDI for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datas over north pacific from the of 20th century. ....	38
Table 8. Finally CMIP5 models selected for the future projections. ....	38
Table 9. Mean of new calculated PDI of each periods and difference of the end of 21st between the end of 20th. Unit is (m/s) <sup>3</sup> . ....	39

# Abstract

Global warming plays an important role on environmental of the tropical cyclone (TC). Understanding the tropical cyclone formation factor based on climate change is very important in future tropical cyclone activity. In this paper, the projection of TC activity based on power dissipation index (PDI) is investigated using 10 Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) global climate models, 2 reanalysis data and Joint Typhoon Warning Center (JTWC) best-track data. The simulation for future projection is based on the one (8.5) representative concentration pathways (RCP) scenario from 2075 to 2099 and compared with historical PDI from 1981 to 2005 over the North Pacific. In order to project changes in the future activities of TCs, we evaluated performance of the 10 CMIP5 models for environmental factors of TC.

In the end of 21<sup>st</sup> century, CMIP5 multi model ensemble simulated sea surface temperature (SST), vertical wind shear (VWS), maximum potential index (MPI) and the other climate conditions which influence the PDI, show increasing or decreasing patterns in their temporal changes. However, these patterns were different regionally.

In order to predict TC's activity based on PDI, we developed multi regression equation using environmental factor of TC and project the future TC's activity (PDI) after verification observation data. The PDI value over the Western North Pacific (WNP) is larger than that over the Eastern North Pacific (ENP) in historical period. At the end of 21<sup>st</sup> century, over (WNP) SST/MPI is expected to increase while VWS decrease due to global warming. Such climate conditions are favorable for increasing of PDI but different results are projected over ENP.

## 1. 서론

지구상에서 가장 파괴적인 기상현상 중에 하나인 열대저기압(Tropical cyclone)은 최근 수십 년 동안 강풍, 홍수 및 폭풍 해일을 통해 많은 경제적 손실과 사상자를 초래하였다(Zhang et al., 2009). IPCC 4차 평가보고서(IPCC AR4, 2007)는 지난 반세기동안 지구 표면온도 상승의 대부분이 인위적 온실가스농도의 증가로 인해 열대저기압 형성지역에서 해수면온도 증가에 크게 기여했을 가능성이 있다고 보고하였다. 최근 IPCC 5차 평가보고서(IPCC AR5, 2013)에서도 지구온난화로 인한 기후변화는 미래에 극한 기후를 발생시킬 것으로 경고하고 있다. 특히 기후변화는 열대저기압 발생 및 발달에 관련된 환경인자들을 변화시키고 있음을 강조하였다. 이러한 이유로 미래의 기후변화가 열대저기압 활동에 어떤 영향을 미칠지에 대한 연구는 최근 많은 과학자들에게 관심의 대상이 되고 있다(Bengtsson et al., 2007; Emanuel et al., 2008; Chan, 2009; Knutson et al., 2010). 그리고 많은 선행연구에서는 지구온난화에 의해 열대저기압의 강도가 증가할 것이라고 예측하고 있다(Emanuel, 1987; Emanuel, 2008; Zhao et al., 2009; Knutson et al., 2010; Kim et al., 2011). Knutson et al. (2001)과 Knutson and Tuleya (2004)는 수치실험을 통해 미래 온난화 환경에서 북대서양 허리케인의 강도가 증가함을 보고하였다.

열대저기압의 발생과 강도에 영향을 미치는 요소에는 해수면온도, 수온 약층의 깊이, 대기의 안정도, 연직윈드시어, 상대습도 등이 선행연구에서 제시되었다(Demaria et al., 2001). 과거 20세기 동안 지구온난화로 인한 기후변화는 열대저기압의 활동과 관련된 환경인자들에 직접적인 영향을 미쳤고, 그 결과로 열대저기압의 발생 빈도와 위치, 그리고 강도 및 파괴력 등의 변화를 초래한 것으로 보고되고 있다(Webster et al., 2005). 이러한 환경 인자들의 변화는 열대저기압의 발생지점과 강도에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 사회, 경제적인 피해를 줄이기 위해서 미래예측은 필수적이다.

잠재생성지수(Genesis potential Index, GPI)의 변화를 사용하여 미래 열대저기압의 변화를 연구한 선행연구(Zhang et al., 2010; Emanuel, 2013)에 의하면 20세기 대비 21세기에 열대저기압 활동이 잦아질 것이라고 전망하였다.

Camargo et al. (2007b)는 잠재생성지수의 실제 열대저기압 발생빈도의 연변동에 대한 모의 성능을 판단하기 위해 해역별로 상관도 분석을 수행한 결과, 북반구 여름철에 열대저기압 활동이 가장 활발한 북서태평양에서는 신뢰하기 어려운 수준의 낮은 상관도를 나타냈으며, 북동태평양에서는 매우 강한 양의 상관관계가 있다고 보고하였다. 또한, 잠재생성지수를 구성하고 있는 대표적인 열역학적 환경인자인 최대잠재강도가 북서태평양의 열대저기압 발생지역에서 음의 상관도를 보이고 있었다(Chan, 2009). 이와 더불어 최대잠재강도를 구성하는 모든 환경인자들은 북서태평양에서만 음의 상관관계를 갖고 있다고 보고하였다. 특히, 전지구 기후모델의 지역상세화 기법을 통해 미래 열대저기압 활동을 모의한 Emanuel (2008)에서는 21세기 말에 남반구에서는 열대저기압 발생이 줄어들지만 파괴력과 폭풍 강도는 증가하는 반면, 북서태평양에서 발생빈도가 증가한다고 보고하였다. 하지만 잠재생성지수는 전지구 규모와 북서태평양에서는 열대저기압 발생지역과 큰 상관도가 없다고 알려져 있다(Emanuel, 2010). 또한, 열대저기압 감지알고리즘을 사용하여 14개의 CMIP5 모델을 사용하여 미래 열대저기압 활동에 대해 모의한 Camargo (2013)에서는 열대저기압 트랙에 대해서 지형학적 패턴의 결합의 원인으로 미래 열대저기압 빈도의 강력한 변화를 감지 못한 한계점을 보인다.

열대저기압의 활동을 나타내는 지수로는 발생빈도, 지속시간(Landsea, 1993), 강도(Simpson, 1974; Webster et al., 2005)와 누적 폭풍 에너지(Accumulated Cyclone Energy, 이하 ACE, Bell et al., 2000), 그리고 폭풍의 파괴력 지수(Power Dissipation Index, 이하 PDI) 등이 있다. 특히, 열대저기압의 강도, 수명 및 연간 빈도수를 모두 고려한 ACE나 PDI는 열대저기압의 활동을 대표하는 지수로 널리 사용된다. 한 예로 Emanuel (2005)는 연평균 누적 된 PDI의 분석결과를 이용하여 1970년대 중반 이후 북서태평양 및 북대서양 유역에서 열대저기압의 활동이 증가하는 경향을 나타낸다고 보고하였다.

따라서 본 연구의 목적은 선행연구에서의 한계를 보완하기 위해 열대저기압 활동지수와 상관도가 높은 환경인자들을 사용하여 미래 열대저기압의 활동을 예측하고자 한다. 10개의 CMIP5 모델과 RCP시나리오 중 현재와 같은 고농도의 탄소배출 시나리오인 RCP8.5를 사용한다. 게다가 선행연구에서는 CMIP5 모델

에 대한 특별한 검증이 이루어지지 않았다. 따라서 미래 예측에 대한 불확실성을 줄이기 위해 열대저기압 인자들에 대해 과거 재분석자료와의 검증을 실시하여 미래 예측에 사용할 CMIP5 모델을 선정하는 엄격한 과정을 거친다. 물론, 지구 온난화로 인해 북태평양의 열대저기압 빈도가 증가할 것이라는 전망은 특히 논란의 여지가 있지만 해수면 온도의 상승을 비롯하여 다른 인자들의 변화에 따른 열대저기압의 강도가 변화하는 부분에 대해서는 문제가 없어 보인다. 기후변화에 따른 열대저기압 발생인자 변화와 함께 북태평양 해역의 열대저기압의 강도, 빈도, 지속기간이 포함된 PDI를 이용하여 미래 열대저기압의 활동을 전망한다. 연간 축적된 PDI를 이해와 더불어 과거자료를 통해 북태평양에서의 PDI와 열대저기압 환경인자들 사이의 회귀분석을 통해 새로운 관계식을 구하고 이를 사용하여 미래 열대저기압의 활동 변화에 대해 초점을 두었다.

## 2. 연구방법

본 연구는 IPCC 5차 보고서에 사용된 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; Taylor et al., 2012) 모델 10종을 사용하고 (Table 1) 현재 및 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, 이하 RCP, Moss et al., 2010) 시나리오 4종 중 RCP8.5 시나리오 (Riahi et al., 2007)를 사용하였다. 우선, NCEP 재분석 자료와 ERA-Interim 재분석자료를 사용하여 20세기 말 기간동안의 CMIP5 모델 10종의 성능을 비교하고 미래전망에 적합한 모델을 선별 한 후 미래전망을 실시하였다. 이 자료를 바탕으로 20세기 말 (1981~2005년) 대비 21세기 말 (2075~2099년)의 각 25년간의 7~10월의 기후 값을 비교하여 열대저기압 환경인자의 미래 장기적분 결과를 전망하고 분석하였다. 연구에 사용된 모델 및 자료, RCP시나리오, 열대저기압 환경인자에 대해 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1. CMIP5 모델 및 자료

본 연구에서는 사용된 CMIP5모델과 격자정보는 Table 1에 제시한다. CMIP5 모델은 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, <http://pcmdi9.llnl.gov>) CMIP5 다운로드 센터에서 다운로드 가능하다. CMIP5 모델 10종은 대기-해양 상호작용을 하는 결합모델을 선택을 하였다 (Table 2). 또한, 20세기 말 기간의 CMIP5 10종 모델의 성능검증을 위해 재분석 데이터 2종을 사용하였다. 사용된 자료는 NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996)와 ERA-Interim (Dee et al., 2011) 재분석자료를 사용하였다. 각 모델 및 재분석자료의 격자와 연직 층이 같지 않음을 고려하며 대기, 해양 모두  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (180 latitude  $\times$  360 longitude)로 내/외삽을 통해 재격자화하여 분석에 사용하였다. 또한, 열대저기압 활동과 관련된 관계식을 찾기 위해 JTWC-Best Track (Joint Typhoon Warning Center)자료를 사용하여 관측된 PDI를 계산하였다.

Table 1. Model name, institute, and resolution of atmosphere / ocean model.

Model name	Center, Country	Atmosphere Resolution (lat. × lon.)	Ocean Resolution (lat. × lon.)
Access1.0	Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia	1.25° × 1.875°	1° × 1°
CanESM2	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, Canada	2.79° × 2.81°	1.14° × 0.94°
GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2° × 2°	0.33° × 1°
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	2° × 2.5°	1° × 1.25°
HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research/ Korea Meteorological Administration, Korea	1.875° × 1.25°	1° × 1~1/3°
HadGEM2-ES	UK MetOffice Hadley Centre, United Kingdom	1.875° × 1.25°	1° × 1~1/3°
MIROC5	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan	1.4° × 1.4°	0.5~1.4° × 1.4°
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany	1.865° × 1.875°	1.5° × 1.5°
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	1.2° × 1.12°	0.5° × 1°
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norway	1.9° × 2.5°	1.125° × 1.125°



Table 2. Reanalysis data name, institute, and resolution of atmosphere / ocean model.

Reanalysis data name	Center, Country	Atmosphere Resolution (lat. × lon.)	Ocean Resolution (lat. × lon.)
NCEP/NCAR	National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/ National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA	2.5° × 2.5°	1° × 1°
ERA-Interim	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Europe	2.5° × 2.5°	1° × 1°

## 2.2. RCP시나리오

4개의 시나리오로 알려진 RCP시나리오는 RCP2.6 (Van Vuuren et al., 2007), RCP4.5 (Clarke et al., 2007), RCP6.0 (Hijioko et al., 2008), RCP8.5 (Riahi et al., 2007)가 있다. RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력정도를 의미하는 양으로서 단위는  $Wm^{-2}$ 이다. RCP2.6 시나리오는 강력한 탄소절감정책이 사용된 저배출 시나리오로서 화석연료에 의존하는 많은 에너지를 바이오 에너지로 대체시키기 위해 농경지가 많이 증가한다. RCP4.5 및 6.0 시나리오는 중배출 시나리오이며 탄소절감정책이 어느 정도 실현되는 시나리오이다. 모두 RCP2.6 시나리오보다 약간 더 많은 에너지를 사용하는데 RCP6.0 시나리오는 화석연료의 사용경향이 있는 반면 RCP4.5 시나리오는 청정에너지를 사용하여 화석연료에 덜 의존한다. 본 연구에 사용된 RCP8.5 시나리오는 탄소절감정책을 사용하지 않고 현재 처럼 산업활동을 계속 이어가는 고배출 시나리오이며, 높은 인구성장률과 기술발전율 가정하므로 RCP시나리오 중에 가장 많은 에너지가 집중되어 CO<sub>2</sub>의 방출량이 가장 많다. 그리고 화석연료가 에너지원으로 쓰이고 높은 인구증가율을 뒷받침하기 위해 식량 생산량이 증가하는 시나리오이다.

## 2.3. 최대잠재강도

열대저기압의 최대잠재강도 (Maximum Potential Intensity, MPI)는 열대저기압이 이론적으로 도달할 수 있는 풍속의 최대강도  $((m/s)^2)$ 를 표현한다 (Emanuel, 1999). 최대잠재강도가 크게 나타난다는 것은 열대저기압의 최대 풍속이 강력해 진다는 것을 의미하기 때문에 각 해역별로 발생하는 열대저기압의 강도에측에서 유용하게 사용할 수 있다. 잠재적인 강도는 열대저기압을 하나의 열기관으로 가정을 하고, 열대저기압의 대기 경계층에서 기계적 소산에 의해 균형을 이루도록 해양에서의 증발되는 열량에 열역학 효율을 곱한 에너지 순환을 기반으로 달성할 수 있는 최대강도이며, 다음과 같은 식으로 표현한다

(Emanuel, 1999).

$$V^2 = \frac{SST - T_0}{T_0} \frac{C_k}{C_D} (k^* - k) \quad (2.1)$$

식(2.1)에서  $V$ 는 최대풍속,  $C_k$ 와  $C_D$ 는 엔탈피와 모멘텀의 교환계수이다.  $SST$ 와  $T_0$ 는 해수면과 열대저기압의 꼭대기에서의 온도,  $k^*$ 와  $k$ 는 해수면과 경계층주변에서의 포화공기의 상대 엔탈피이다.

#### 2.4. 연직윈드시어

연직윈드시어 (Vertical Wind Shear, VWS)는 850hPa과 200hPa사이의 연직 바람시어로 일반적으로 강한 연직바람시어는 열대저기압 발달을 억제한다고 알려져 있다 (Gray, 1968; Merrill, 1988; Zhang and Tao, 2013). 또한, 연직윈드시어는 열대저기압의 강도예측에 매개변수로 사용되며 (Demaria and Kaplan, 1994) 다음과 같은 방법으로 계산한다.

$$VWS = \sqrt{(U_{200} - U_{850})^2 + (V_{200} - V_{850})^2} \quad (2.2)$$

$U_{200}$ 와  $U_{850}$ 는 각각 200hPa와 850hPa에서의 동서바람성분,  $V_{200}$ 과  $V_{850}$ 는 200hPa와 850hPa에서의 남북바람성분을 뜻한다.

## 2.5. 열대저기압 활동 예측

일반적으로 열대저기압 활동에 대한 척도로 열대저기압의 강도, 빈도, 지속기간이 포함된 열대저기압 활동지수(Power Dissipation Index, 이하 PDI)를 꼽을 수 있으며 Emanuel (2005)이 제시한 열대저기압의 최대풍속을 사용하여 다음과 같이 표현하였다(식 2.3).

$$PDI \equiv \int_0^{\tau} V_{\max}^3 dt \quad (2.3)$$

여기서  $V_{\max}$ 는 최대풍속,  $\tau$ 는 지속시간이며 단위는  $(m/s)^3$ 이다. 본 연구에서는 CMIP5모델의 기후값을 사용하여 미래 열대저기압 활동의 전망을 하기 위해 다중회귀분석(Multi Regression analysis)을 통해 새로운 PDI 계산식을 만들어 미래에 대한 예측 하였다. 회귀분석이란 둘 또는 그 이상의 변수들 간에 존재하는 관련성을 분석하기 위하여 관측된 자료에서 이들 간의 함수적 관계를 통계적 방법으로 구하고 어떤 독립변수가 주어졌을 때 이에 따른 종속변수를 예측하는 통계적 기법이다. Xu and Wang (2014)에 의하면 열대저기압의 강도는 최대잠재강도와 연직바람시어에 의해 설명될 수 있다고 보고하였으며, 연직바람시어는 값이 감소할수록, 해수면온도에 큰 영향을 받는 최대잠재강도는 값이 클수록 열대저기압 발생과 발달에 호조건이 된다.

하지만 북동태평양은 최대잠재강도와 PDI와 통계적으로 상관도가 없거나 유의하지 않다는 Chan (2009)에 따라 연직윈드시어만을 이용하여 계산하였다. 게다가 북동태평양의 경우 태풍의 주요 발생구역( $10^{\circ}N \sim 25^{\circ}N$ ,  $110^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$ )에서 연직윈드시어가 99%이상의 신뢰도를 가진 강한 음의 상관도를 보이고 있었다. 즉, 다른 환경인자들에 비해 연직바람시어의 대기인자만이 태풍발생빈도 변동에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 또한, 미래에 대한 PDI값은 존재하지 않기에 상기에 제시한 열대저기압과 높은 상관도를 가진 환경인자들을 사용하고 열대저기압 활동을 계산하기위해 다음과 같은 두가지의 회귀식을 만들었다.

$$PDI_W = aVWS + bMPI + c \quad (2.4)$$

$$PDI_E = aVWS + b \quad (2.5)$$

$PDI_W$ 와  $PDI_E$ 는 각각 북서태평양과 북동태평양의 PDI를 나타내며,  $a, b, c$ 는 각 지역에서의 관측된 PDI와의 다중회귀분석을 통하여 계산된 상수이다.  $a, b, c$ 의 상수를 계산할 때 사용된 PDI는 관측값으로 계산된 PDI 사용하였다. 또한, 본 연구에 사용된 자료는 CMIP5 모델의 월평균 자료이며 연변동이 아닌 전반적인 기후값과 열대저기압과의 연관성을 살펴보고자 이동평균을 통해 알아보았다. 2~7년의 이동평균을 통해 새로운 회귀식으로 계산된 PDI와 관측값으로 계산된 PDI와의 상관도를 비교하여 가장 높은 상관도를 보인 4년 이동평균한 값으로 분석을 진행하였다.

### 3. CMIP5 모델 성능 평가

열대저기압 활동의 미래전망을 위해 CMIP5 모델을 20세기 말(1981~2005년) 7~10월 기간 동안의 재분석자료와 비교를 통해 모델을 평가하였다. 평가방법은 대기인자와 해양인자를 구분하여 실시하였다. 미래전망을 위한 모델 선정은 다음과 같이 이루어졌다. 대기인자에 대한 성능평가를 하여 얻은 모델과 해양인자에 대한 성능평가를 하여 얻은 모델, 그리고 최종적으로 PDI의 미래전망에 대해서는 과거기간동안의 관측된 PDI와 CMIP5모델간의 PDI에 대한 전반적인 상관도를 통해 선택된 모델과의 교차검증에 의해 선택되었다. 최종적으로 선정되는 모델은 6장 Table 8에 제시한다.

#### 3.1. 대기인자 성능평가

CMIP5모델의 대기인자의 검증방법은 ESMValTool (Earth System Model eValuation Tool, Eyring et al., 2016)을 사용하였다. 상기 방법은 최첨단 기후모델 평가방식을 통일시키는 목적에 의해 개발된 진단 틀이다. ESMValTool는 목적에 따라 평가하는 방법이 다양하지만 본 연구에서는 IPCC AR5 Chapter 9. Evaluation Climate Models에서 사용한 CMIP5모델 평가 방법 중 관측자료와의 RMSE (Root Mean Square Errors)를 이용하여 CMIP5모델 성능 평가하는 방법(IPCC AR5, Chapter 9, Fig. 9.7, Gleckler et al., 2008)을 선택하였다.

Table 3. Observationally-Based Reference Data Sets.

Variable I.D.	Description	Unit	Reference1/Reference2	Levels
ta	Temperature	°C	ERA-Interim/NCEP-NCAR	200,850hPa
ua	Zonal wind	m/s	ERA-Interim/NCEP-NCAR	200,850hPa
va	Meridional wind	m/s	ERA-Interim/NCEP-NCAR	200,850hPa
hus	Specific Humidity	kg/kg	AIRS/ERA-Interim	400hPa
psl	Mean sea level pressure	hPa	ERA-Interim	
tos	Sea surface temperature		ERA-Interim/NCEP-NCAR	

다음은 Table 3에 제시된 변수에 대한 관측기반의 데이터를 사용하여 RMSE를 계산한다. 각 모델은 기본적인 보조자료(관측값)와 대체자료(재분석자료)를 모두 사용하는 방법이다. 주어진 필드(변수)  $f$ 와 보조자료  $r$ 에 대해  $N$ 개의 RMSE를 계산한다. 결과는 과도하게 영향을 주는 비정상적으로 에러를 가진 모델을 보호하기 위해 평균값보다는 중앙값을 사용한다. 주어진 모델을  $m$ , 변수를  $f$  보조자료를  $r$ 로 하며 다음과 같이 정의한다.

$$E'_{mfr} = \frac{E_{mfr} - \bar{E}_{fr}}{\bar{E}_{fr}} \quad (3.1)$$

본 연구에 필요한 북태평양 해역에 대해서 20세기 말(1981~2005년) 7~10월 열대저기압 발생기간에 대해 Table 3에서 제시한 변수들의 CMIP5 모델과 관측값과의 비교를 통한 RMSE를 나타내었다(Figs. 1~2). 그림의 다양한 색은 에러의 크기를 나타낸다. 행(row)에 변수이름(Table 3) 및 열(column)에 모델이름(Table 1)이 표시되도록 정렬한다. 각 격자 사각형에서 보조자료 1(왼쪽 위 삼각형) 및 보조자료 2(오른쪽 아래 삼각형)은 보조자료 세트에 대한 상대오차를 표시하기 위해 대각선으로 분할된다. 각 패널에서 맨 왼쪽 두 열은 멀티모델 앙상블 평균 및 중앙값 필드에 대한 결과를 나타낸다. 파란색 음영은 참고 데이터와 관련하여 모델이 일반적인 모델보다 더 나은 경우를 나타내고 붉은색의 음영은 반대를 나타낸다. 흰색 사각형은 모델 데이터를 사용할 수 없음을 나타낸다. 만약, 모델 선정에 대해 너무 엄격한 방법을 적용했을 시(예, RMSE가 0이하인 모델을 선택) 미래전망을 위해 사용할 모델의 수가 급격히 적어지기 때문에 본 연구에서의 모델선정은 하위 20%를 제외한 나머지 모델은 선정하는 것으로 하였다.



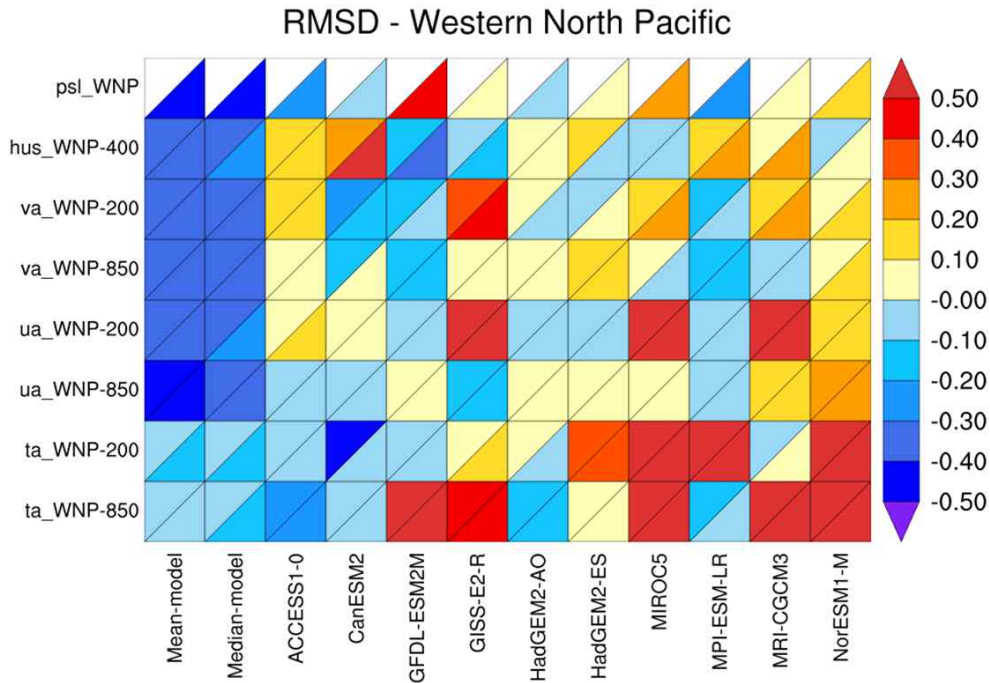


Figure 1. Relative root-mean square error (RMSE) calculated from the 1981-2005 climatological seasonal cycle of the CMIP5 historical simulations over western north pacific ( $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ ). A relative performance is displayed, with blue shading indicating performance being better and red shading worse, than the median of all model results. A diagonal split of a grid square shows the relative error with respect to the reference data set (Ref.1, obs data, lower right triangle, Table 1) and the alternate data set (Ref. 2, reanalysis data, upper left triangle, Table 2). White boxes are used when data is not available for the given model and variable or no alternate data set has been used. The figure shows that performance varies across CMIP5 models and variables, with some models comparing better with observations for one variable and another model performing better for a different variable.

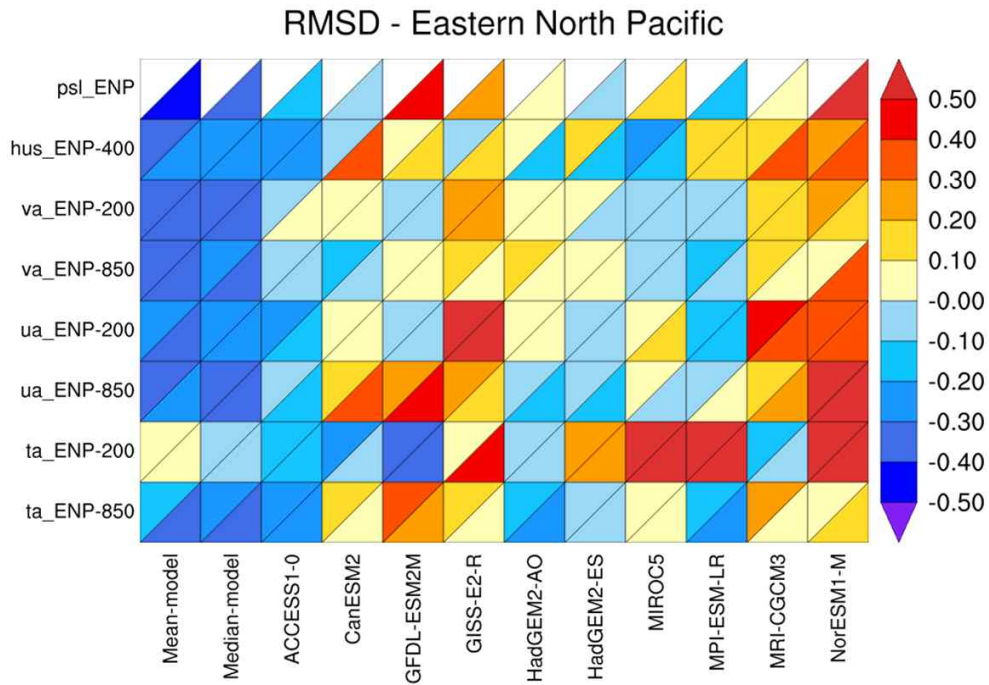


Figure 2. Same as Figure 1. But for region is Eastern North Pacific ( $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\sim 300^{\circ}\text{E}$ ).

Table 4. Coose the CMIP5 models for atmosphere variable by ESMValTool. Separated RMSE +0.4 up/down over WNP and ENP.

RMSE	< 0.4	> 0.4	
WNP	ACCESS1-0	CanESM2	
	GFDL-ESM2M	GISS-E2-R	
	HadGEM2-AO	HadGEM2-ES	MIROC5
	MPI-ESM-LR	MRI-CGCM3	
	NorESM1-M		
ENP	ACCESS1-0	CanESM2	
	GFDL-ESM2M	GISS-E2-R	
	HadGEM2-AO	HadGEM2-ES	NorESM1-M
	MIROC5	MPI-ESM-LR	
	MRI-CGCM3		

### 3.2. 해양인자 성능평가

ESMValTool의 단점 중 하나는 해양인자에 관한 검증이 부족하다는 점이다. IPCC AR5에서는 CMIP5 모델에 대해 해양변수를 평가하였지만, 전 지구적인 평균값을 구하였기 때문에 본 연구에서처럼 7~10월 기간 동안의 북태평양해역에 대한 평가가 이루어지지 않았다는 점에서는 부족한 면이 있다. 따라서 북태평양해역의 20세기 말 7월~10월 기간 동안에 재분석자료 2종에 대한 앙상블과의 상관도를 통하여 모델을 선정하는 방법을 사용하였다.

Table. 5에서는 북태평양해역에서의 재분석자료와의 상관도를 보여준다. 해양변수에 대한 모델 선정은 서태평양은 상위 30%, 동태평양은 상위 50%를 기준으로 선택하였다. 선택한 모델은 Table 6에 제시하였다.

Table 5. Correlation between reanalysis data with CMIP5 models.

	Model	Correlation	Model	Correlation
WNP	ACCESS1-0	0.94	CanESM2	0.71
	GFDL-ESM2M	0.6	GISS-E2-R	0.78
	HadGEM2-AO	0.87	HadGEM2-ES	0.76
	MIROC5	0.98	MPI-ESM-LR	0.25
	MRI-CGCM3	0.79	NorESM1-M	0.93
ENP	ACCESS1-0	0.6	CanESM2	0.51
	GFDL-ESM2M	0.24	GISS-E2-R	0.62
	HadGEM2-AO	0.52	HadGEM2-ES	0.53
	MIROC5	0.65	MPI-ESM-LR	0.11
	MRI-CGCM3	0.63	NorESM1-M	0.73

Table 6. Choose the CMIP5 models for ocean variable. Separated correlation reanalysis data with CMIP5 models over WNP and ENP respectively.

Corr.	> 0.7		< 0.7
WNP	ACCESS1-0	CanESM2	
	GISS-E2-R	GFDL-ESM2M	
	HadGEM2-AO	HadGEM2-ES	MPI-ESM-LR
	MIROC5	MRI-CGCM3	
	NorESM1-M		
Corr.	> 0.5		< 0.5
ENP	ACCESS1-0	CanESM2	
	GISS-E2-R	HadGEM2-AO	GFDL-ESM2M
	HadGEM2-ES	MRI-CGCM3	MPI-ESM-LR
	MIROC5	NorESM1-M	

#### 4. CMIP5 모델 및 재분석자료 과거기간 모의

CMIP5 모델 10종과 재분석자료 2종에 관하여 각 모델 및 환경변수별로 20세기 말 7~10월 기간의 수평장을 표출하였다(Figs. 3~9). 비록 3장에서의 CMIP5 모델 평가 및 선정과정이 있다 하더라도 CMIP5 모델은 각각의 특성이 존재하기 때문에(IPCC AR5. Chapter9) 재분석자료와의 관계를 살펴보는 것이 필요하다. 따라서 CMIP5 모델의 평균값과 재분석자료와의 아노말리 분석은 필수적이다.

##### 4.1. 해수면온도(Sea Surface Temperature)

열대저기압의 강도에 해수면온도가 중요하다는 것은 잘 알려져 있다(Palmen, 1948; Miller, 1958; Comiso et al., 2015). 해수면 상층 온도가 열대저기압 강화의 속도와 지속시간을 설정함으로써 평균 수명 및 강도를 제어한다(Mei et al., 2015). 지난 20세기 말의 해수면 온도분포와 열대저기압 트랙을 통해 형성 및 발달지역을 추정할 수 있다(Figs. 3~5). 또한 해수면온도는 MPI 계산 시 필수불가결한 요소로 작용되고 있으며 NCEP자료 기준으로 북서태평양 해수면온도와 MPI와의 상관도가 약 0.7정도로 매우 높게 나타나고 있음을 확인하였다.

10개의 CMIP5 모델 앙상블 결과와 재분석자료는 공간적 분포는 비슷하게 모의하지만 중앙태평양해역부근에서 CMIP5 모델이 낮게 모의하며, 북동태평양해역에서 CMIP5 모델이 높게 모의하는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 이는 CMIP5 모델에서 열대저기압을 모의할 때 재분석자료에 비해 북동태평양에서 잦은 형성 및 강도, 빈도가 더 크게 모의할 가능성이 있다는 것을 시사한다.

CMIP5 10개 모델과 2개의 재분석자료에 대한 20세기 말 평균의 해수면온도를 살펴 본 결과 북동태평양해역보다는 북서태평양해역의 해수면온도가 높게 모의하는 것은 모두 같은 양상을 보였지만, 온도분포의 크기는 달랐다(Fig. 4). 이는 북동태평양해역보다 북서태평양해역에서 열대저기압의 발생, 빈도가 잦고 강도에도 밀접한 관계가 있을 것으로 예상된다.

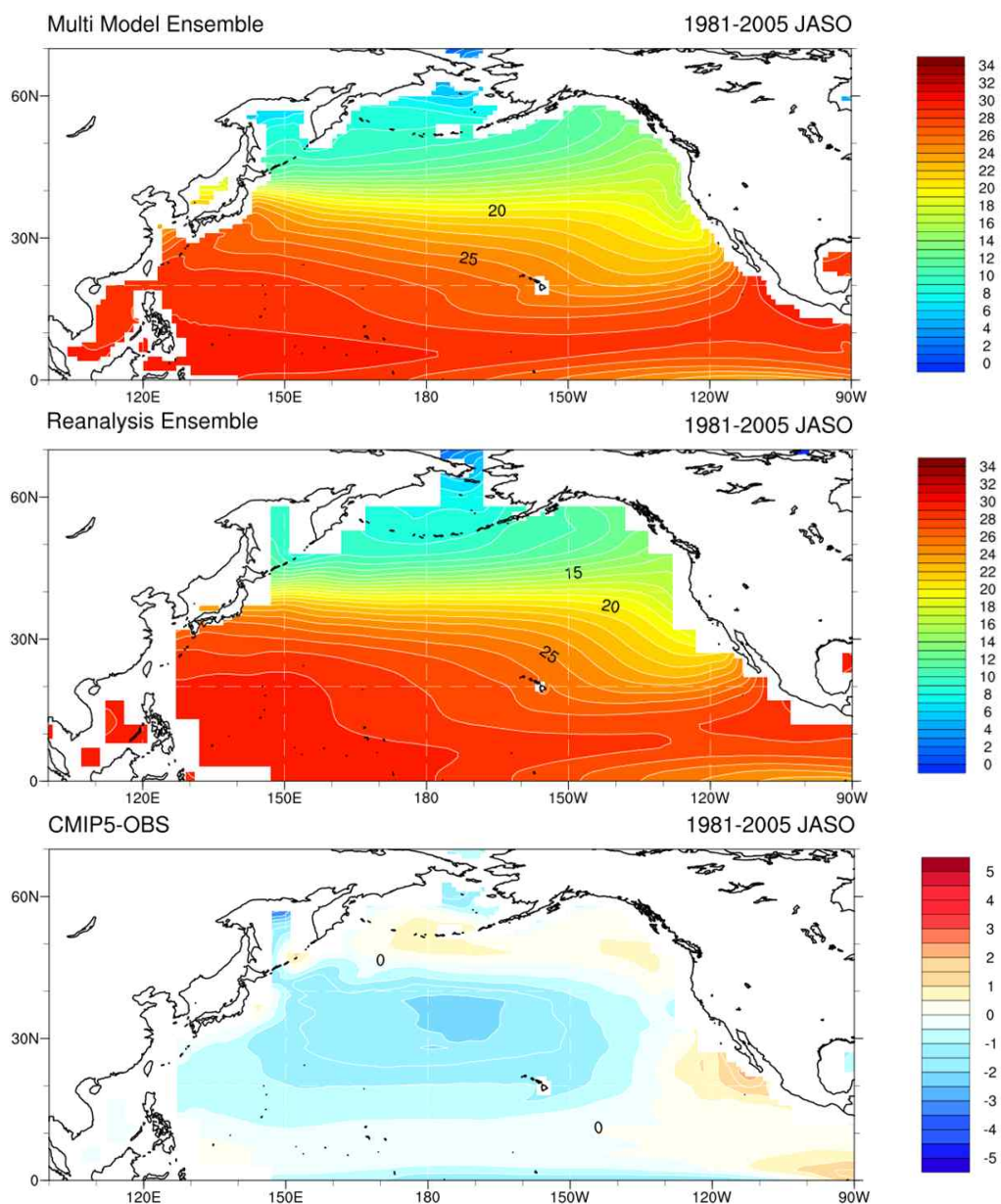


Figure 3. Sea Surface Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for CMIP5 multi model ensemble (MME, top), reanalysis data ensemble (OBS, middle) and difference MME and OBS (bottom) over North pacific of the end of 20<sup>th</sup> century (1981~2005).

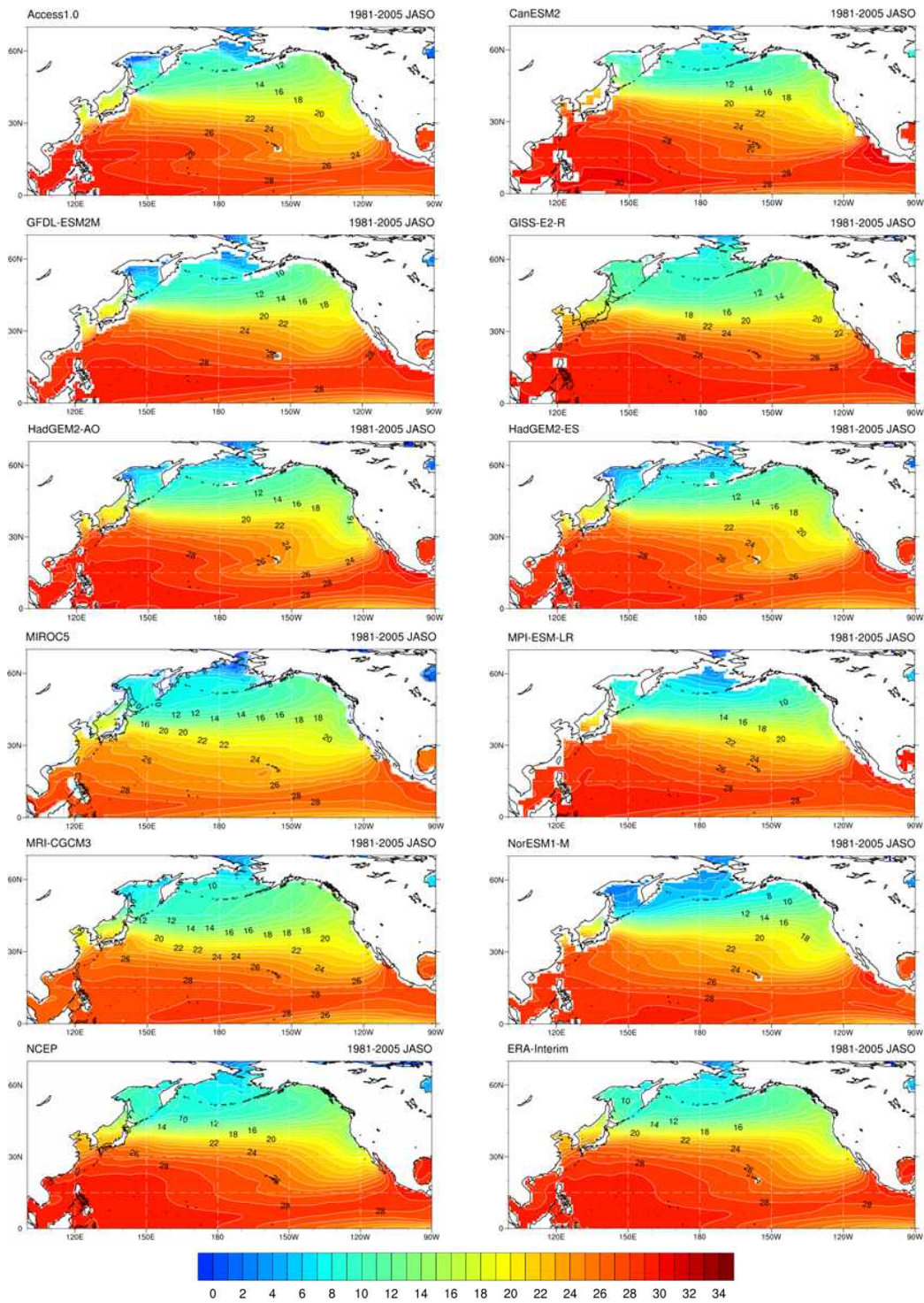


Figure 4. Sea Surface Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datasets over North Pacific of the end of 20<sup>th</sup> century (1981~2005).

## 4.2. 연직윈드시어 (Vertical Wind Shear)

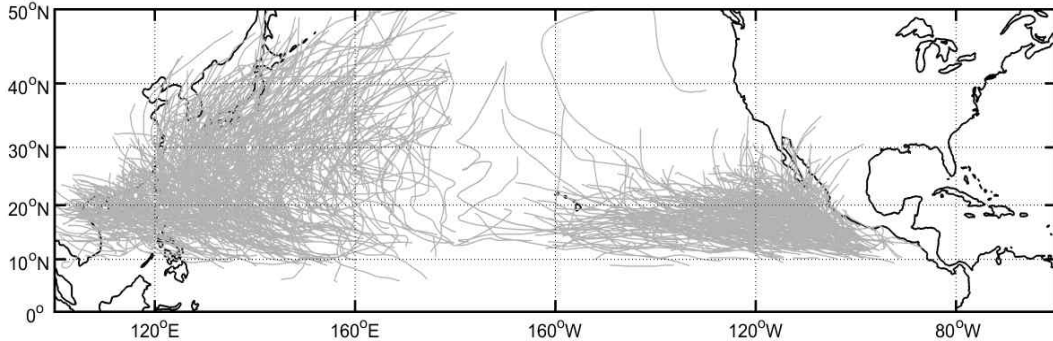


Figure 5. Typhoon track over North pacific of the end of 20<sup>th</sup> century(1981~2005). The data based on JTWC-Best track.

연직윈드시어는 열대저기압 형성뿐만 아니라 구조와 강도변화와 관련하여 가장 중요한 동적 매개변수 중 하나이다(Wang and Wu, 2004). 일반적으로 강한 연직윈드시어는 열대저기압의 발생 및 강화에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Gray, 1968; DeMaria and Kaplan, 1999; Demaria et al., 2005; Riemer et al., 2010). 지난 25년간 열대저기압 발생 및 트랙과 비교하여 살펴 보았을 때(Fig. 5) 주변보다 높은 연직바람시어가 발생한 30°N~50°N, 120°E~180°E 부근과 15°N~30°N, 180°E~240°E에서는 열대저기압의 발생보다는 소멸하는 위치에 해당된다. 상대적으로 연직윈드시어가 약한 지역에서 열대저기압의 형성과 발달하는 것을 알 수 있다.

CMIP5 앙상블에서는 재분석자료 앙상블 결과에 비해 북태평양 대부분의 해역에서 크게 모의하는 것을 알 수 있다(Fig. 6). 이는 4.1절에서의 해수면온도와 의 연관성을 살펴볼 때, CMIP5 모델의 열대저기압 강도에 관한 모의는 관측보다 낮을 수 있다는 것을 시사한다. 게다가 북태평양지역의 열대저기압 주된 발생 및 활동지역에서 재분석자료보다 높게 모의하는 것은 이를 설명하기 충분하다.

10개의 CMIP5 모델과 2개의 재분석자료에 대한 연직윈드시어는 상기에 언급한 지역에서 비슷한 분포를 보이고 있지만 모델마다 격차가 크다(Fig. 7). 특히, GISS-E2-R모델에서는 북태평양 중위도에서 다른 모델에 비해 상대적으로



큰 연직윈드시어를 나타내고 있는데 3장의 모델성능평가의 바람 변수에서 좋지 않은 평가를 받은 모델이다.

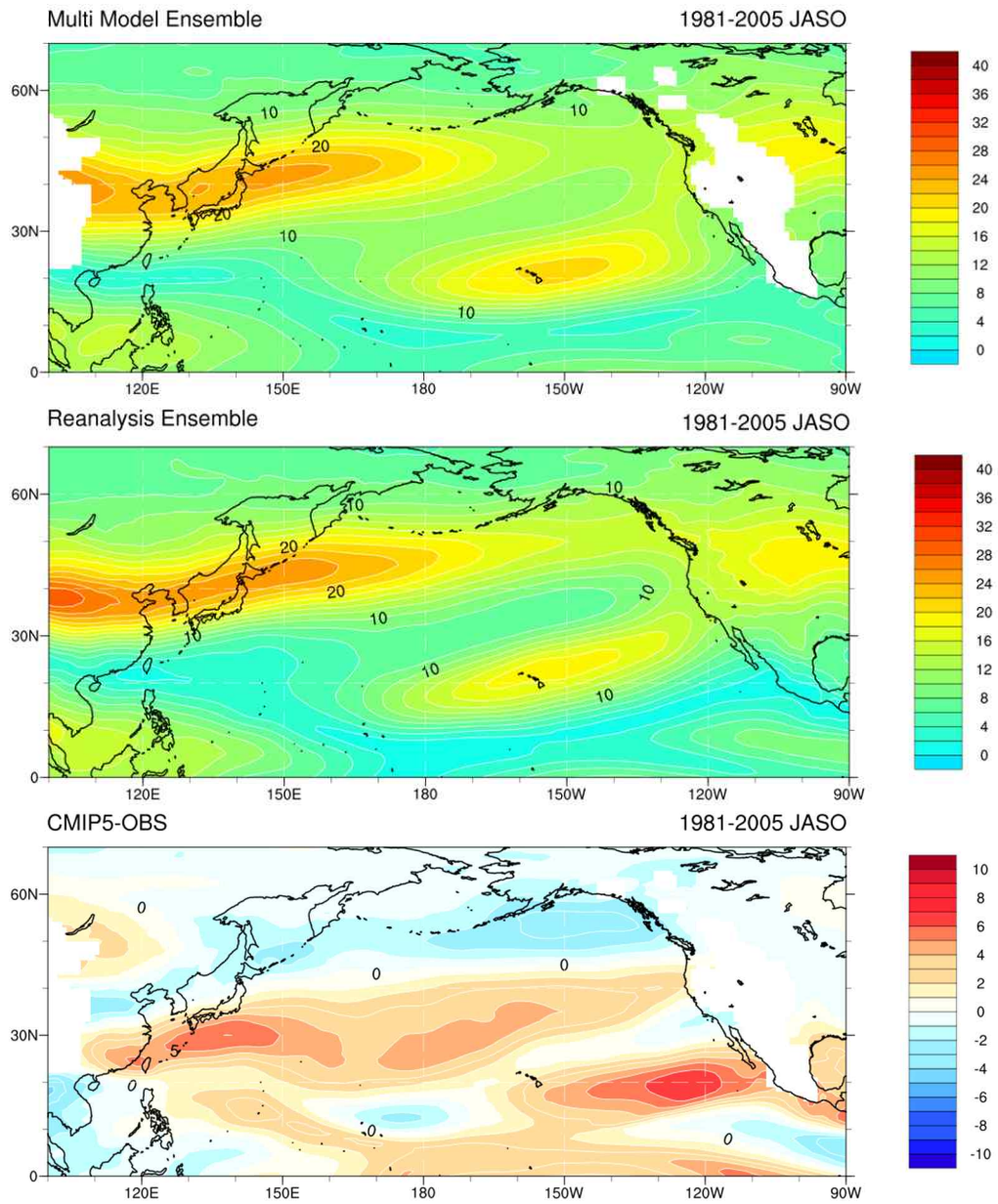


Figure 6. Vertical Wind Shear (m/s) for CMIP5 multi model ensemble (MME, top), reanalysis data ensemble (OBS, middle) and difference MME and OBS (bottom) over North Pacific of the end of 20<sup>th</sup> century (1981~2005).

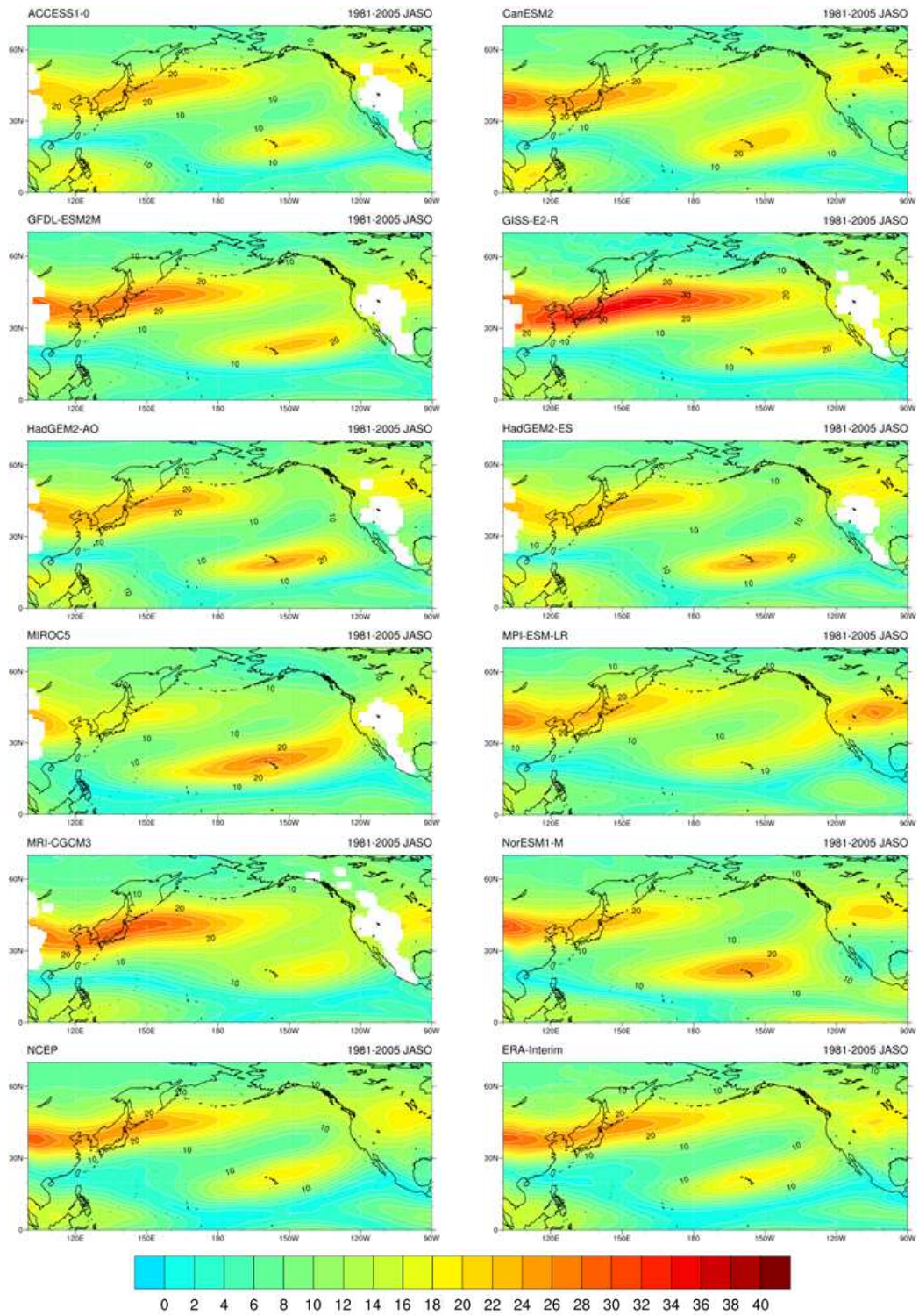


Figure 7. Vertical Wind Shear (m/s) for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datas over North pacific of the end of 20<sup>th</sup> century (1981~2005).

### 4.3. 최대잠재강도(Maximum Potential Intensity)

열대저기압은 섭씨 26도 이상의 해수면 온도와 큰 전향력, 약한 연직바람시어, 중간 대류권의 상대습도 및 대류불안정성과 같은 요인에 의해 형성이 되며, 이러한 요소는 최대잠재강도에 큰 영향을 미친다(Holland, 1997). 최대잠재강도를 개발한 Emanuel (1999)에서는 열대저기압의 강도는 더 따뜻한 해수면온도에 민감하게 반응한다고 보고하였다.

CMIP5 모델 앙상블과 재분석자료 앙상블에 대해 최대잠재강도 분포에서는 선행연구에서 보고한 바와 같이 해수면 온도가 높은 지역에서 최대잠재강도가 강하게 나타나는 것을 확인 할 수 있다(Figs. 3~4, 8~9). 또한, 이들의 차이는 4.1장에서 제시한 것처럼 북동태평양에서 해수면온도를 CMIP5모델이 크게 모의하기 때문에 최대잠재강도 역시 해수면온도 분포와 매우 흡사하다(Fig. 8). 이는 해수면온도와 최대잠재강도간의 밀접한 관련이 있다는 것을 시사한다.

10개의 CMIP5 모델과 2개의 재분석자료에 대한 최대잠재강도는 해수면온도에 따라 강도가 다름을 확인 할 수 있다(Fig. 9). 모델별로 최대잠재강도가 강하게 나타나는 지역은 달랐으나 0°N~10°N에서 강하게 모의를 하는 경향은 비슷하였다. 특히, MPI-ESM-LR모델의 경우 Table 5에서 제시하듯, 북서태평양에서 재분석자료와 가장 낮은 상관도를 갖는 모델이기 때문에 비정상적으로 강한 값을 갖는 양상을 보인다. 게다가 MRI-CGCM3 모델의 경우는 오히려 북서태평양의 열대저기압 형성 및 발달지역에서 다른 모델보다 상대적으로 낮은 값을 나타낸다.

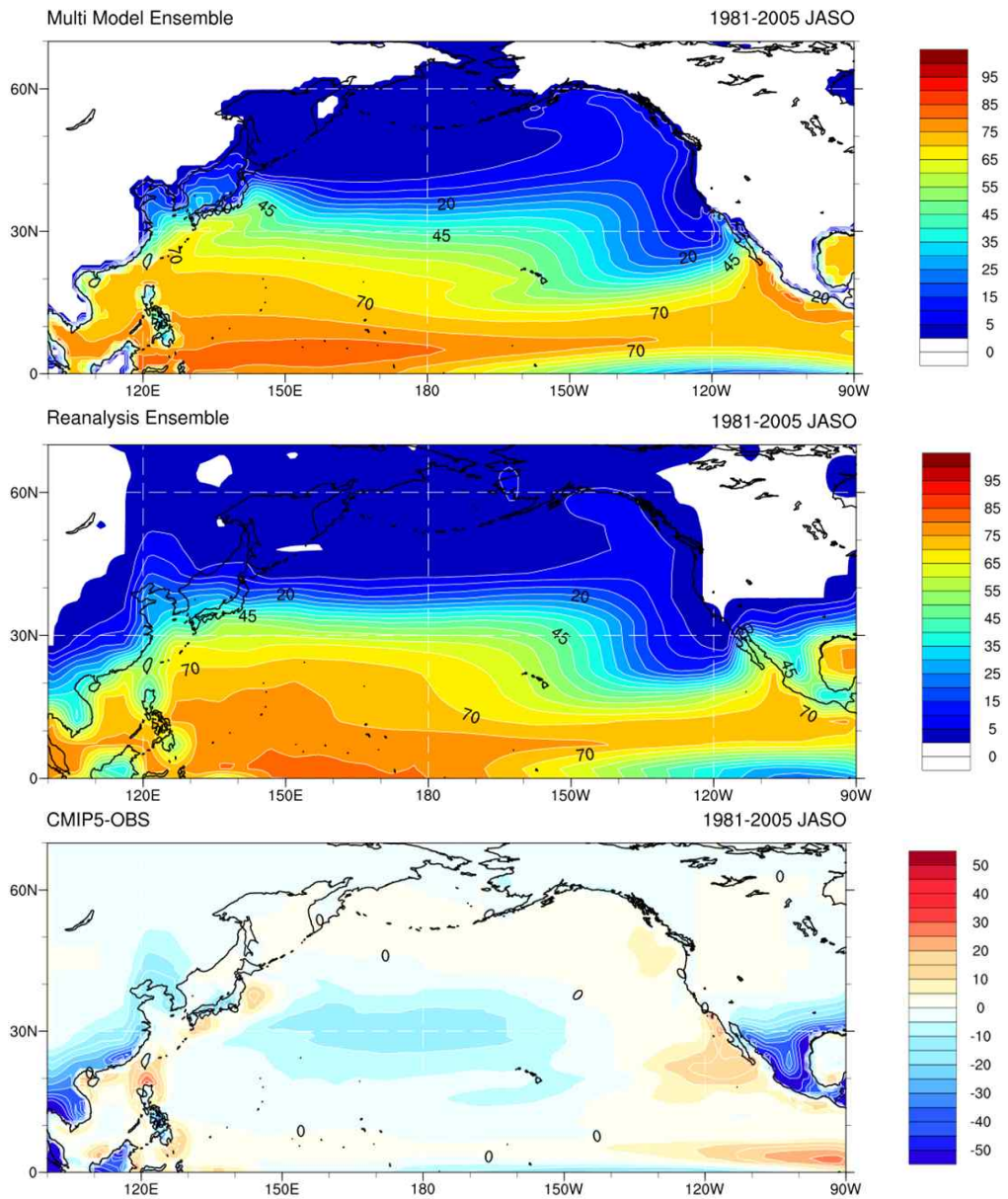


Figure 8. Maximum Potential Intensity (m/s) for CMIP5 multi model ensemble (MME, top), reanalysis data ensemble (OBS, middle) and difference MME and OBS (bottom) over North pacific of the end of 20<sup>th</sup> century (1981~2005).

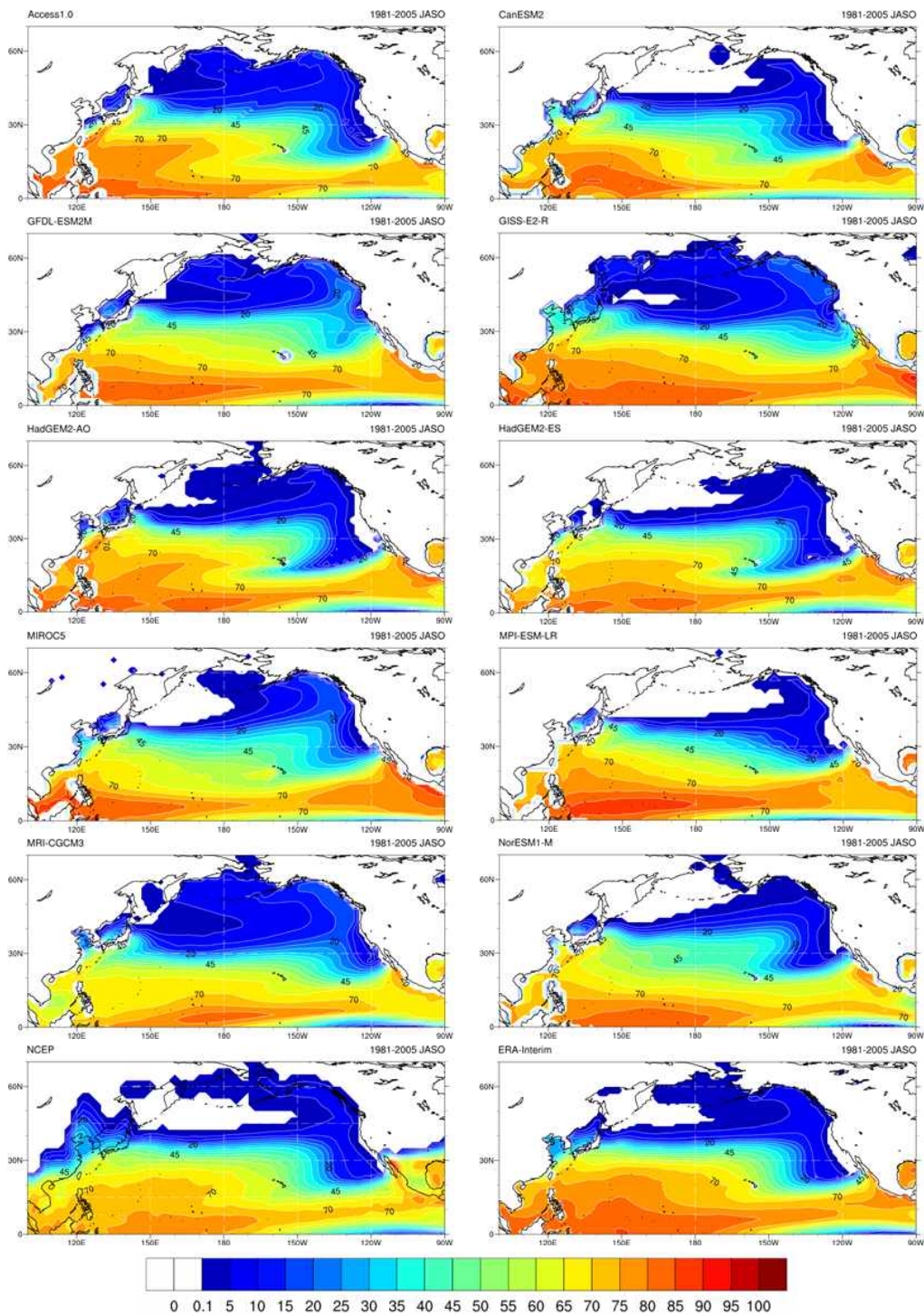


Figure 9. Maximum Potential Intensity (m/s) for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datas over North pacific of the end of 20<sup>th</sup> century (1981~2005).

## 5. CMIP5 모델 미래전망

CMIP5 모델의 미래전망은 20세기 말(1981~2005년) 대비 21세기 말(2075~2099)의 변화를 알아보기 위함이다. 따라서 각 기간의 평균대비 변화를 이해하기 위해 두 기간의 차이에 초점을 두었다. 그리고 다중모델앙상블을 통해 10개의 CMIP5 모델 전반적인 경향과 함께 지역별 강한 바이어스를 가진 모델들을 중심으로 분석하였다.

### 5.1. 해수면온도

10개의 CMIP5 모델에서의 RCP8.5 시나리오(2.2절)로 미래 기후전망을 한 결과는 IPCC 기후평가보고서에서 언급한 바와 같이 해수면 온도는 20세기 말 대비 21세기 말에 상승하는 것을 전망한다(Fig. 10). 이러한 원인은 현재에 비해 전지구 기온이 상승하고 해양에서 대기로부터의 열 흡수가 증가하기 때문일 것으로 전망된다. 그리고 고위도 지역은 적도부근보다 더 많이 상승하는데, 이는 알베도 감소로 인한 단파복사에너지의 흡수는 대기 기온상승에 큰 영향을 주며 이러한 양의 되먹임 효과(Positive feedback)가 반복하여 일어나는 것으로 추정된다. 이와 관련하여 IPCC AR5 (2013)에서는 해양온난화는 21세기 동안 계속되고 열대지역 및 북반구 아열대 지역에서 가장 강력하게 나타날 것으로 전망하였다.

ACCESS1-0, MIROC5, HadGEM2계열의 모델은 다중모델앙상블보다 전반적으로 해수면온도를 높게 모의를 하였으며 최대잠재강도의 미래전망에서 과다 모의할 것으로 예상된다.

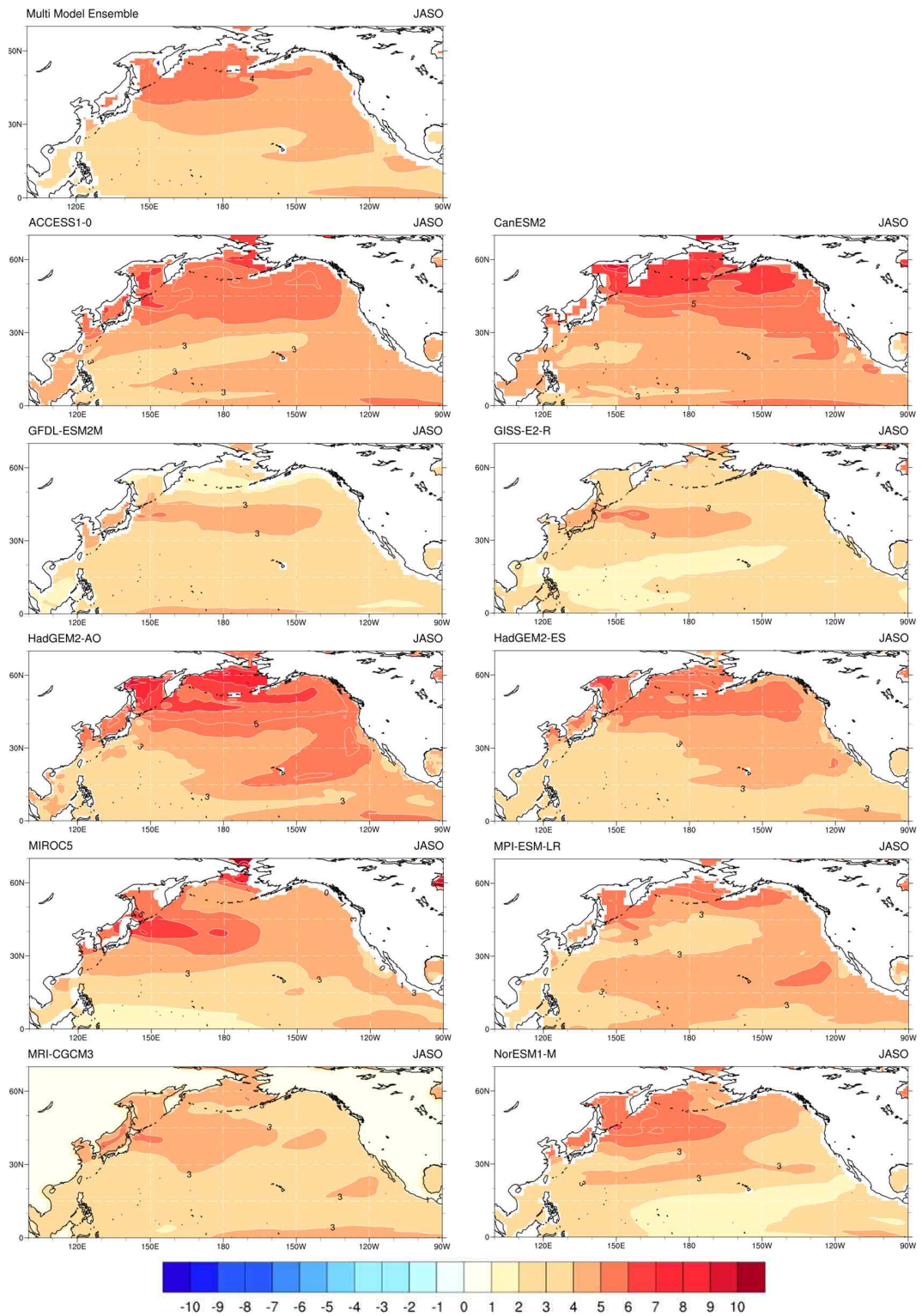


Figure 10. Changes in sea surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for 10 CMIP5 models and multi model ensemble for RCP 8.5 scenario over North Pacific between the periods of 2075~2099 from 1981~2005.



## 5.2. 연직원드시어

10개의 CMIP5 다중모델앙상블 결과에 의하면 21세기 말 연직원드시어 미래 전망은 북태평양에서의 열대저기압의 주된 발생해역(북서태평양 :  $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ , 북동태평양 :  $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ ,  $220^{\circ}\text{E}\sim 250^{\circ}\text{E}$ , Camargo et al., 2007)에서 증가하고 중앙태평양 부근에서 감소하는 모습을 나타낸다(Fig. 11). 이는 미래에 열대저기압 발생 위치가 중앙태평양( $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $180^{\circ}\text{E}\sim 210^{\circ}\text{E}$ )으로 이동하여 좀 더 강력하고 수명이 긴 열대저기압이 발생하여 강도 및 빈도, 수명과 관련된 열대저기압 강도지수가 상승하여 미래 강한 열대저기압에 대한 가능성을 제시한다. 하지만 모델간의 격차가 상당하고 ACCESS1-0, CanESM2, HadGEM2 계열의 모델은 북위 30도 이남에서 매우 강한 모델 간 편차를 보이고 있어 미래예측에는 본 환경요소만으로는 선불리 해석하기에는 불확실성이 많기 때문에 모델 성능평가에 따른 모델선택이 매우 중요하다.

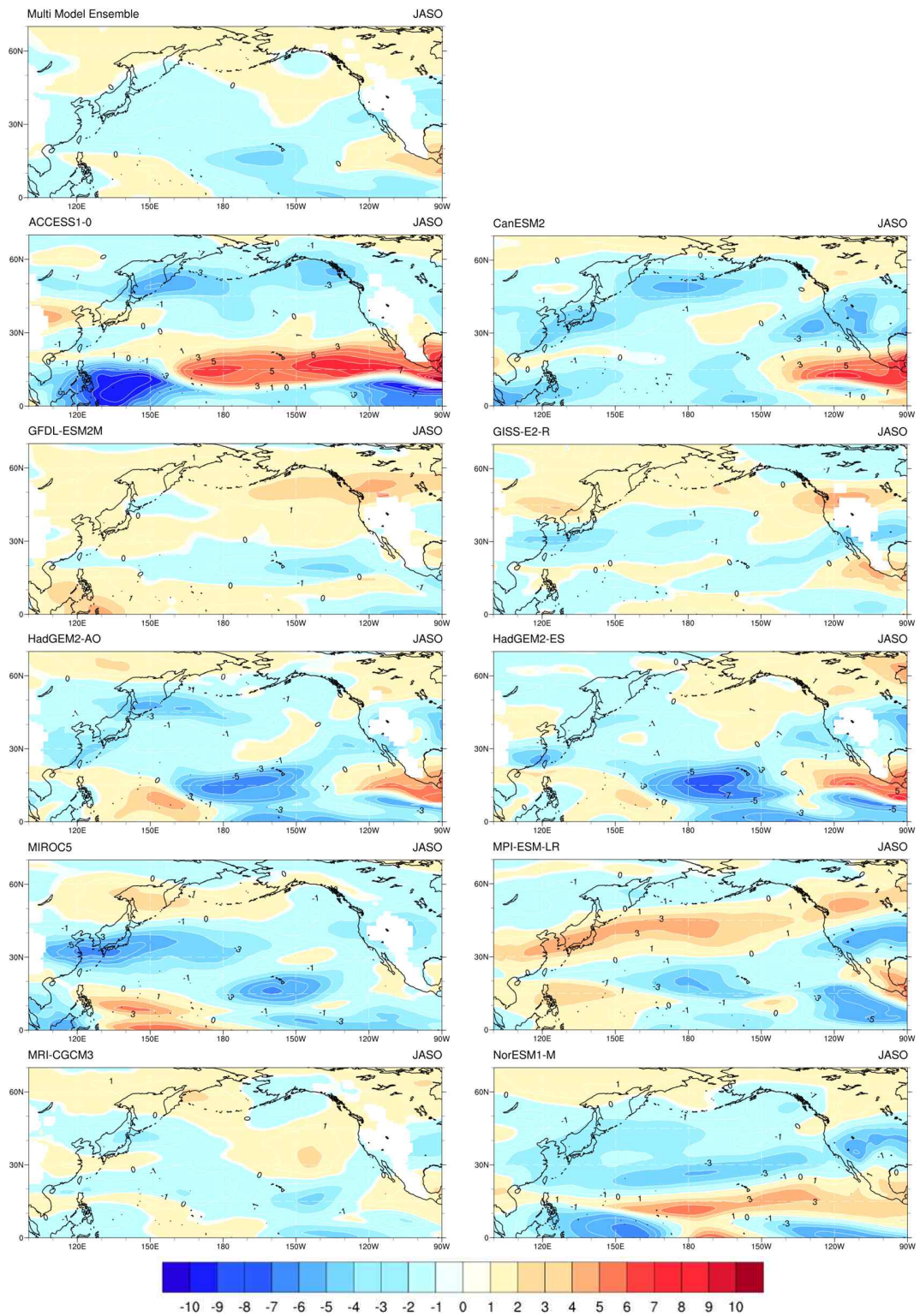


Figure 11. Changes in vertical wind shear (m/s) for 10 CMIP5 models and multi model ensemble for RCP 8.5 scenario over North Pacific between the periods of 2075~2099 from 1981~2005.

### 5.3. 최대잠재강도

CMIP5 10개 모델로 모의한 20세기 말 대비 21세기 말 최대잠재강도 ( $(m/s)^2$ )는 북태평양해역에서 증가하는 것을 전망한다(Fig. 12). 해수면온도가 상승하는 해역과 연직바람시어가 감소하는 해역에서 최대잠재강도가 증가하는 모습이 잘 나타나 있다. 그리고 북서태평양에서는 30°N이상의 해역에서, 그리고 북동태평양에서는 20°N 부근의 해역에서 최대잠재강도가 증가하는 양상은 해수면온도상승 추세와 일치한다. 최대잠재강도의 북상하는 모습은 열대저기압이 미래 해수온 상승으로 인해 현재보다 고위도 지역까지 진출 할 수 있다는 가능성을 시사한다.

최대잠재강도가 크게 증가하는 북서태평양해역에서는 ACCESS1-0과 MIROC5 그리고 북동태평양해역에서는 HadGEM2계열이 강한 편차가 나타났는데, 이들은 타 모델에 비해 높은 해수온과 약한 연직바람시어를 모의하였기 때문이다. CMIP5 모델이 모의한 최대잠재강도는 해역별로 편차가 크게 나타났으나 멀티모델앙상블 결과는 모델들의 편차가 상쇄가 된 결과이다.

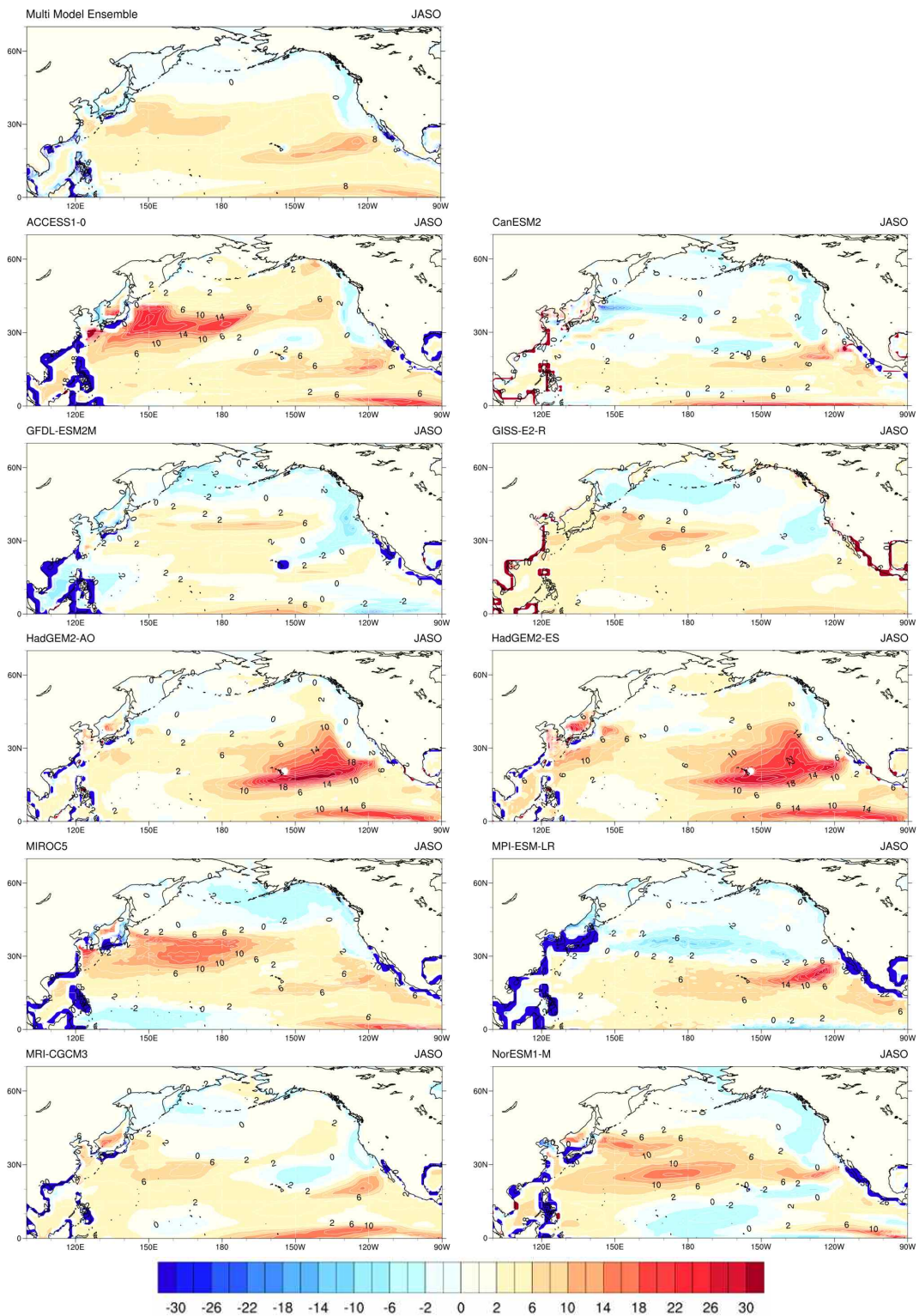


Figure 12. Changes in maximum potential index (m/s) for 10 CMIP5 models and multi model ensemble for RCP 8.5 scenario over North Pacific between the periods of 2075~2099 from 1981~2005.

## 6. 열대저기압 활동지수(PDI)

### 6.1. 회귀분석을 위한 지역설정

2.5절에서 제시한 식을 계산하기 위해 관측된 PDI와 NCEP 재분석장을 이용하여 열대저기압의 환경인자인 최대잠재강도 및 연직바람시어와의 상관도를 구하여 회귀분석에 사용할 지역을 찾고자 하였다(Fig. 13). 북서태평양에서 관측으로 계산된 PDI와 열대저기압 환경인자간의 상관도를 찾기 위해 조사한 결과, 열대저기압 주 발생구역( $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ )에서는 최대잠재강도는 음의 상관도, 연직윈드시어는 양의 상관도를 보였다. 이러한 원인은 북서태평양은 여름철 평균적인 열역학적 환경이 좋아 높은 열대저기압 발생빈도를 보이지만, 열적환경이 연 변동에 관계없이 열대저기압 발생에 호조건으로 작용하기 때문에 환경변화에 민감하게 반응하지 못하는 것으로 사료된다. 열대저기압 활동에 양의 상관도를 갖는 최대잠재강도는  $0^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$ ,  $165^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 에서 0.73의 높은 상관도를 보였으며, 음의 상관도를 갖는 연직바람시어는  $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,  $165^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$  지역에서 -0.33의 상관도를 보였다. 북서태평양 남동쪽해역은 열대저기압 형성에 민감한 지역으로(Choi et al., 2015) 열대저기압 활동에 큰 영향을 미치게 된다고 선행연구(Chan and Liu, 2004)에서 보고한 바 있으며 본 연구에서도 비슷한 해역에서 같은 결과가 나타났다. 북동태평양 열대저기압 주 발생지역( $10^{\circ}\text{N}\sim 17.5^{\circ}\text{N}$ ,  $235^{\circ}\text{E}\sim 265^{\circ}\text{E}$ )에서의 연직바람시어는 높은 음의 상관도를 나타냈으며,  $7^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $230^{\circ}\text{E}\sim 260^{\circ}\text{E}$ 에서 -0.66의 상관도를 보였다. 이러한 높은 상관도를 갖는 지역에 2.5절에서 제시한 식 2.4와 식 2.5를 적용하고, 기후적 경향 분석을 위해 각각의 열대저기압 환경인자에 4년 이동평균을 적용하여 새로운 PDI를 계산하였다.

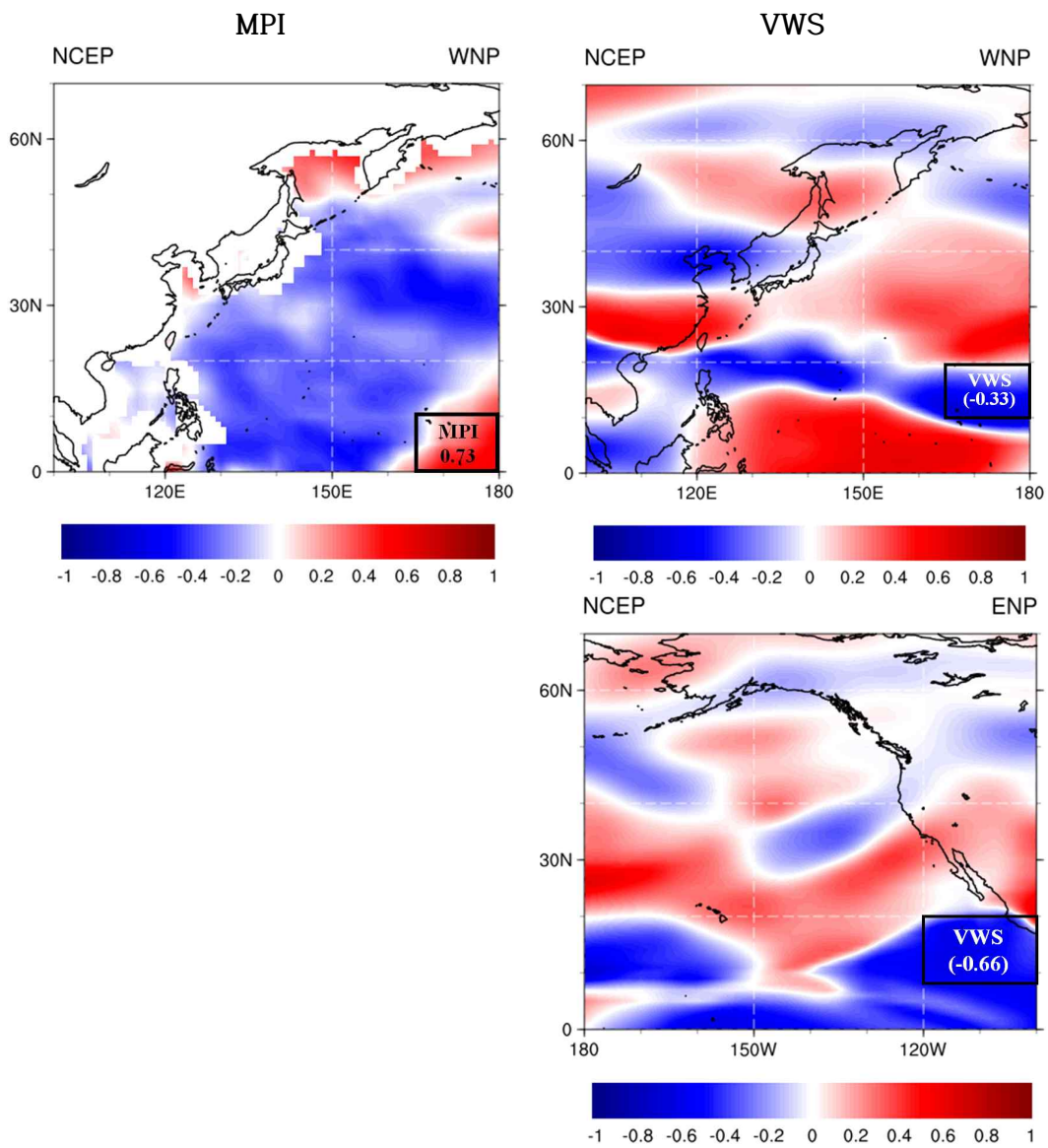


Figure 13. Upper/lower panels are correlation observed PDI with each variables for NCEP reanalysis data over North Western Pacific and North Eastern Pacific respectively. First column is MPI and second column is VWS. Number in the black box means correlation OBS PDI with NCEP each variables data.

## 6.2. 과거기간 검증 및 미래전망

관측 및 회귀분석을 통해 새롭게 만들어진 PDI는 Fig. 14에 제시하였다. 1975년부터 2004년까지의 해역별 PDI를 연구한 Wu et al. (2008)과의 비교했을 때, 본 연구에서 계산된 PDI와 비슷한 경향을 나타내었다. 특히, 북서태평양에서의 PDI의 증가와 북동태평양에서의 PDI의 감소는 일치하였다.

앞서 설정한 지역을 토대로 만들어진 NCEP 재분석자료에 대한 새로운 회귀식으로 계산된 PDI는 북서태평양에서 관측과의 0.74, 북동태평양에서 0.66로 높은 상관도를 보였다. 같은 지역에 대해 10개 CMIP5 모델 앙상블을 적용한 결과, 북서태평양에서는 0.61, 북동태평양에서는 0.51의 비교적 높은 상관도를 나타냈다 (Fig. 15). 미래전망을 위해 상기의 방법을 사용하여 20세기 말 기간의 10개의 CMIP5 모델에 적용하여 관측된 PDI와의 상관도를 조사하였다(Table 7). NCEP 재분석장과 같이 높은 상관도를 보인 모델(MRI-CGCM3)이 있는 반면, 음의 상관도가 있는 모델(GISS-E2-R)도 존재하는 것을 확인하였다. 앞서, 미래전망을 위해 3장에서 선택한 모델과 관측으로 계산된 PDI와의 상관도가 0.4이상인 모델을 교차 선정하여 Table 8에 제시하였다.

최종적으로 각 해역별로 선택한 CMIP5모델에 대해 20세기 말 대비 21세기 말 RCP8.5 시나리오를 사용한 미래 PDI는 북서태평양에서는 증가, 북동태평양에서는 감소하는 것으로 전망하였다(Fig. 17). 북서태평양에서의 열대저기압 활동은  $5.8 \times 10^7 (\text{m/s})^3$  증가하는 것으로 전망하였다(Table 9). 20세기 말 기간에 비해 약 2배정도 증가하는 원인에 대해서는 열대저기압 발생에 민감한 지역이 해수면온도 상승으로 인한 최대잠재강도 증가와 연직윈드시어의 감소로 인해 PDI의 증가에 기여하기 때문이다. 이러한 결과는 Emanuel (2013)에서 역학적 상세화 기법을 사용하여 6개의 CMIP5 모델로 모의한 결과와 비슷한 결과를 나타낸다. 북동태평양에서는 21세기 말에 오히려 열대저기압 활동이  $-2.38 \times 10^6 (\text{m/s})^3$  만큼 감소하는 것으로 전망된다(Table 9). 이는 열대저기압과 음의 상관도를 갖는 연직윈드시어가 증가하기 때문에 PDI가 감소하는 것으로 전망된다. 하지만 2090년 중반부터의 PDI의 증가에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

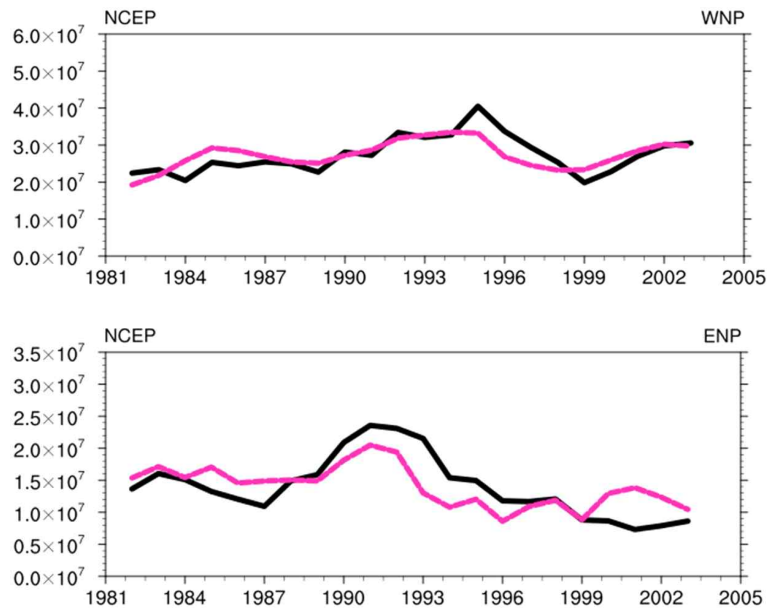


Figure 14. Calculated PDI (Power Dissipation Index,  $(\text{m/s})^3$ ) for Observation data (OBS) and NCEP reanalysis (NCEP) data. Upper panel is western north pacific and lower panel is eastern north pacific. Black, Red lines mean OBS and NCEP respectively. Each lines are 4-years moving average.

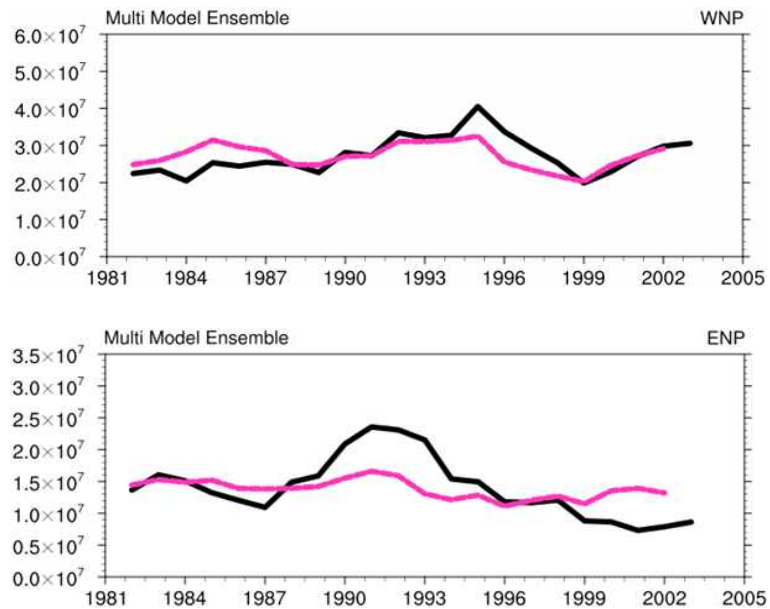


Figure 15. Same as Fig. 16. But Black, Red lines mean OBS and multi model ensemble respectively.



Table 7. Correlation observed PDI with calculated multi regression PDI for 10 CMIP5 models and 2 reanalysis datas over north pacific from the end of 20<sup>th</sup> century.

Model	WNP	ENP
NCEP	0.74	0.66
ERA-Interim	0.49	0.66
ACCESS1-0	0.51	0.52
CanESM2	0.46	0.45
GFDL-ESM2M	0.53	0.22
GISS-E2-R	0.46	-0.03
HadGEM2-AO	0.18	0.43
HadGEM2-ES	0.56	0.52
MIROC5	0.52	0.23
MPI-ESM-LR	0.2	0.32
MRI-CGCM3	0.7	0.48
NorESM1-M	0.42	0.42
Multi Model Ensemble	0.61	0.5

Table 8. Finally CMIP5 models selected for the future projections.

WNP	ACCESS1-0	CanESM2
	GFDL-ESM2M	GISS-E2-R
	HadGEM2-ES	MRI-CGCM3
	NorESM1-M	
ENP	ACCESS1-0	CanESM2
	HadGEM2-AO	HadGEM2-ES
	MRI-CGCM3	

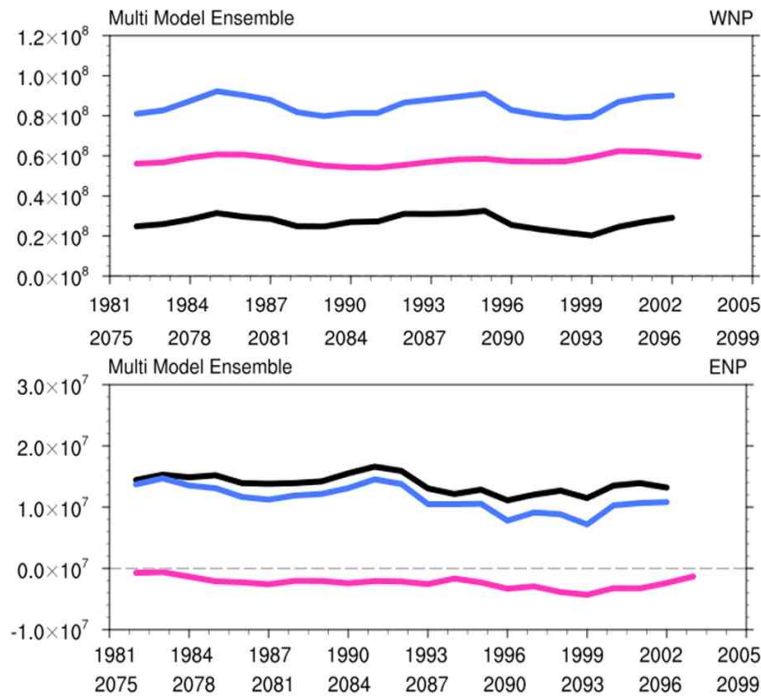


Figure 17. Changes in caculated PDI (Power Dissipation Index,  $(\text{m/s})^3$ ) for CMIP5 multi model ensemble. Black, Red, blue lines mean the end of 20<sup>th</sup>, the end of 21<sup>st</sup> and difference of the end of 21<sup>st</sup> between the end of 20<sup>th</sup> respectively. The lines are 4-years moving average.

Table 9. Mean of new calculated PDI of each periods and difference of the end of 21<sup>st</sup> between the end of 20<sup>th</sup>. Unit is  $(\text{m/s})^3$ .

Period	WNP	ENP
1981~2005	$2.71 \times 10^7$	$1.38 \times 10^7$
2075~2099	$8.5 \times 10^7$	$1.14 \times 10^7$
difference	$5.8 \times 10^7$	$-2.38 \times 10^6$

## 7. 요약 및 결론

본 연구는 지구온난화에 따른 열대저기압 환경인자들의 변화가 미래 열대저기압 활동에 미치는 영향을 살펴보았다. RCP8.5시나리오로 적분된 10개의 CMIP5 모델을 사용하여 미래 북태평양 지역의 열대저기압의 강도, 빈도, 지속기간이 포함된 활동지수(PDI)를 이용하여 미래 열대저기압 활동을 전망하였다. 미래 예측에 대한 불확실성을 줄이기 위해 열대저기압 환경인자들에 대해 10개의 CMIP5 모델과 2개의 재분석자료 및 관측값(JTWC-Best Track data)와의 검증 및 평가를 실시하여 미래예측에 사용할 CMIP5 모델을 선정하였다. 모델 선정방법은 대기인자와 해양인자를 각각 다르게 하였다. 대기인자는 IPCC AR5 (2007)에서 사용한 ESMValTool (Earth System Evaluation Tool)을 사용하여 실시하였고, 해양인자에 대해서는 재분석자료와의 상관도로 하였다.

CMIP5 모델의 모의성능을 파악하기 위해 20세기 말 기간(1981~2005년) 동안 10개의 CMIP5 모델과 2개의 재분석자료의 열대저기압 환경인자(해수면온도, 연직윈드시어, 최대잠재강도)를 비교해 보았다. CMIP5 모델앙상블 평균값과 2개의 재분석자료의 앙상블 평균값은 수평적으로 비슷한 분포를 나타냈다. 하지만 CMIP5 모델에서 해수면온도는 중앙태평양 부근에서 낮게, 연직윈드시어는 북태평양 0~40°N에서 높게 모의하였다. 이러한 결과는 최대잠재강도를 계산 시 CMIP5 모델이 재분석자료보다 낮은 강도로 모의하는 결과를 나타내는 원인이 되었다. 하지만 북동태평양 연안에서는 CMIP5 모델이 재분석자료보다 해수면온도, 연직윈드시어, 최대잠재강도 모두 높게 모의하는 결과를 보였다.

현재와 같은 지구온난화 효과가 적용된 RCP8.5시나리오로 적분된 CMIP5 모델의 미래전망에서는 20세기 말 대비 21세기 말(2075~2099)에 모든 CMIP5 모델은 해수면온도 상승을 전망한다. 열대저기압의 강도는 따뜻한 해수면온도에 민감하게 반응한다는 Emanuel (1999)의 보고와 더불어 본 연구에서도 21세기 말에 최대잠재강도가 증가하는 것으로 모의되었다. 하지만 연직바람시어는 북서태평양의 열대저기압 발생에 민감한 북서태평양 남동쪽 지역에서 감소하고 북동태평양의 열대저기압 발생지역에서는 증가하였다. 이는 새로운 회귀식을 사용하여 미래전망을 한 본 연구 결과에 직접적으로 영향을 주었다.

20세기 말 기간의 열대저기압의 발생이 잦은 북반구 여름철(7~10월)의 관측값(JTWC-Best Track)과 재분석자료(NCEP-NCAR)와의 상관분석을 실시한 결과, 북서태평양에서 열대저기압 활동에 민감한 지역은 Choi et al. (2015)에서 제시한 북서태평양 남동쪽해역과 비슷한 해역인  $0^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$ ,  $165^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 이였으며, 북동태평양에서는 열대저기압의 주 발생지역인  $7^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $230^{\circ}\text{E}\sim 260^{\circ}\text{E}$ 에서 높은 상관도를 나타내어 분석에 사용할 해역으로 선정하였다. 선정된 해역을 중심으로 열대저기압 활동지수(PDI)와 환경인자(최대잠재강도, 연직윈드시어) 사이의 회귀분석을 통해 새로운 회귀식을 만들고, 새로운 회귀식을 통해 미래 열대저기압 활동에 대해 전망하였다. 선행연구의 보고에 따라 북서태평양과 북동태평양에 대한 회귀식은 다르게 계산되었다.

20세기 말 기간동안의 새로운 회귀식으로 계산된 PDI는 관측으로 계산된 PDI와의 상관도가 0.74(북서태평양), 0.66(북동태평양)의 높은 상관도를 보였다. 같은 해역에 대해 10개의 CMIP5 모델 앙상블을 적용한 결과, 0.61(북서태평양), 0.51(북동태평양)의 상관도를 보였다. 해역별 PDI의 증감 트렌드를 살펴 보았을 때, Wu et al. (2008)에서 제시한 내용과 본 연구에서의 PDI가 일치함을 확인하였다. 또한, 각각의 CMIP5 모델로 계산한 PDI와 관측값으로 계산된 PDI값의 상관도를 조사하여 앞서 대기 및 해양인자에 대해 선택된 모델들과 교차검색을 하여 미래 전망을 위한 CMIP5 모델은 북서태평양과 북동태평양 해역에 대해 각각 다르게 선정되었다.

최종적으로 선택된 CMIP5 모델로 모의한 PDI는 북서태평양에서 증가하고 북동태평양에서 감소하는 것으로 전망하였다. 북서태평양에서의 증가원인은 열대저기압 활동 민감지역에서의 열대저기압 활동과 양의 상관도를 가진 최대잠재강도 증가와 더불어 음의 상관도를 가진 연직윈드시어의 감소에 의한 것으로 분석되었다. 또한, 북동태평양에서의 열대저기압 활동의 감소원인은 음의 상관도를 가진 연직윈드시어가 열대저기압 주 발생지역에서 증가하기 때문이다. 이러한 결과는 미래 지구온난화가 열대저기압 활동에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 하지만 역학적 상세화 기법과 6개의 CMIP5 모델, RCP8.5시나리오를 사용하여 미래 열대저기압 활동을 전망한 Emanuel (2013)에서는 21세기 (2006~2100년) 전반에 걸쳐 과거 (1950~2005년)보다 열대저기압 활동이 증가할 것이라고 보고

하였지만, 상관도가 낮은 열대저기압 발생지수를 사용하였기 때문에 북동태평양 해역에 대해서는 본 연구와 상이한 결과를 보였다. 하지만 본 연구는 모델, 방법, 기간이 다르고, 대기인자, 해양인자 및 새로운 회귀식의 검증을 통해 CMIP5 모델은 선택하고 미래전망을 하였다는 사실에 초점을 맞추어야 한다.

향후 본 연구결과의 유의성을 확보하기 위해 다양한 모델의 자료를 추가 할 필요가 있다. 3차원 해양자료를 통해 열대저기압으로 인한 해양연직순환과 더불어 그에 따른 영향분석도 해 봐야 할 것이며, 모델결과가 불연속성이 존재하는지 과거부터 21세기 말까지의 선형분석이 필요하다. 또한, 지구온난화가 지속될 가능성으로 가정한 시나리오를 사용하였기 때문에 열대저기압의 주된 활동기간이 변화 할 가능성도 염두해야 한다. 추후 새로운 모델 결과에 대한 추가 분석은 미래 열대저기압 활동변화에 대한 이해를 높이는데 기여할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- Bell, G. D., M. S. Halpert, R. C. Schnell, R. W. Higgins, J. Lawrimore, V. E. Kousky, R. Tinker, W. Thiaw, M. Chelliah, and A. Artusa, 2000: Climate assessment for 1999. *Bull Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1328
- Bengtsson, L., K. I. Hodges, M. Esch, N. Keenlyside, L. Kornblueh, J. Luo, T. Yamagata, 2007: How may tropical cyclones change in a warmer climate?. *Tellus*, **59A**, 539–561.
- Camargo, S. J., A. H. Sobel, A. G. Barnston, and K. A. Emanuel, 2007a: Tropical cyclone genesis potential index in climate models, *Tellus*, **59A**, 428–443.
- Camargo, S. J., K. A. Emanuel, and A. H. Sobel, 2007b: Use of a Genesis Potential Index to Diagnose ENSO Effects on Tropical Cyclone Genesis. *J. Clim.*, **20**, 4819–4834.
- Chan, J. C. L., and K. S. Liu, 2004: Global warming and western north pacific typhoon activity from an observational perspective, *J. climate*, **17**, 4590–4602.
- Chan, J. C. L., 2009: Thermodynamic control on the climate of intense tropical cyclones. *Proc. R. Soc.*, **465**, 3011–3021, doi:10.1098/rsoa.2009.0114.
- Choi, Y., K.-J. Ha, C.-H. Ho, C. E. Chung, 2015: Interdecadal change in typhoon genesis condition over the western North Pacific. *Clim. Dyn.* **45**, 3243–3255, doi:10.1007/s00382-015-2536-y.
- Clarke, L., J. Edmonds, H. Hachoby, H. Pitcher, J. Reilly, and R. Richels, 2007: Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations, U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research Synthesis and

Assessment Product 2.1 Sub-Rep. 2.1A.

- Cosimo J. C., G. J. P. Perez, and L. V. Stock, 2015: Enhanced Pacific Ocean Sea Surface Temperature and Its Relation to Typhoon Haiyan, *J. Enviro. Sci. and Management*, **18**(1):1–10(June 2015) ISSN 0119–1144.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Ploi, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Holm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Kohler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge–Sanz, J.–J. Morcrette, M.–K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavalato, J.–N. Thepaut, and F. Vitart, 2011: The ERA–Imterim reanalysis: congifuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553–597, doi:10.1002/qj.828.
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994: An updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, **9**, 209–220.
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1999: An updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, **14**, 326–337.
- Demaria, M., 2001: A Tropical Cyclone Genesis Parameter for the Tropical Atlantic. *American Meteorological Society*, **16**, 219–233.
- Demaria, M., M Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, **20**, 531–543.
- Emanuel, K. A, 1987: The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, **326**, 483–485, doi:10.1038/326483a0

- Emanuel, K. A. 1999: Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, **401**, 665–669.
- Emanuel, K., 2005 : Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, doi:10.1038/nature03906.
- Emanuel, K., R. Sundararajan, and J. Williams, 2008: Hurricanes and global warming. *Amer. Meteor. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-89-3-347.
- Emanuel, K. A., 2013: Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century. *PNAS*, **110**(30), 12219–12224, doi:10.1073/pnas.1301293110.
- Eyring, V., M. Righi, A. Lauer, M. Ecaldsson, S. Wenzel, C. Jones, A. Anav, O. Andrews, I. Cionni, E. L. Davin, C. Deser, C. Ehberecht, P. Friedlingstein, P. Gleckler, K.-D. Gottschaldt, S. Hagemann, M. Jukes, S. Kindermann, J. Krasting, D. Kunert, R. Levine, A. Loew, J. Makela, G. Martin, E. Mason, A. S. Phillips, S. Read, C. Rio, R. Roehrig, D. Senftleben, A. Sterl, L. H. van Ulft, J. Walton, S. Wang, and K. D. Williams, 2016: ESMValTool(v1.0) – a community diagnostic and performance metrics tool for routine evaluation of Earth system models in CMIP. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 1747–1802, doi:10.5194/gmd-9-1747-2016
- Gray, M. W., 1968: Global wiew of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 669–700.
- Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, and M. Kainuma, 2008: Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *J. Global Environ. Eng.*, **13**, 97–108.
- Holland, G. J., 1997: The Maximum Potential Intensity of Tropical Cyclones, *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2519–2541.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report



of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. 2013. Climate Change 2013, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Gleckler, P. J., K. E. Taylor, and C. Doutriaux (2008), Performance metrics for climate models. *J. Geophys. Res.*, **113**, D06104, doi:10.1029/2007JD008972.

Kalnay, E., M Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *American Meteorological Society*, **77**(3), 437–471.

Kim, H.-M., P. J. Webster, and J. A. Curry, 2011: Modulation of North Pacific Tropical Cyclone Activity by Three Phases of ENSO. *J. Climate*, **24**, 1839–1849, doi:10.1075/2010JCLI3939.1

Knutson, T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava, and M. Sugi, 2010 : Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, **3**, 157–163, doi:10.1038/ngeo779

Knutson, T. R., R. E. Tuleya, W. Shen, I. Ginis, 2001: Impact of CO<sub>2</sub> induced warming on hurricane intensities as simulated in a hurricane model with ocean coupling. *J. Climate*, **14**, 2458–2468.

Knutson, T. R., and R. E. Tuleya, 2004: Impact of CO<sub>2</sub>-induced

- warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization. *J. Climate*, **17**, 3477–3493.
- Knutson, T. R., J. L. McBride, J. Chan, K. Emanuel, G. Holland, C. Landsea, I. Held, J. P. Kossin, A. K. Srivastava, and M. Sugi, 2010: Tropical cyclones and climate change, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/NGEO779.
- Landsea, C. W., 1993: A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1703–1713.
- Merrill, R. T., 1988: Environmental influences on hurricane intensification. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1678–1687.
- Miller, B. I., 1958: On the Maximum intensity of hurricane intensification. *J. Meteo.*, **15**, 184–185.
- Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant, and T. J. Wilbanks, 2010 : The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 747–746, doi:10.1038/nature08823.
- Palmen, E. M., 1948: On the formation and structure of the tropical hurricane. *Geophysica*, **3**, 26–38.
- Pun, I., I. Lin, and M. Lo, 2013: Recent Increase in High Tropical Cyclone Heat Potential Area in the Western North Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4680–4784.
- Riahi, K., A. Gruebler, and N. Nakicenovic, 2007: Scenarios of longterm socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technol. Forecasting Soc. Change*, **74**, 887–935.

- Riemer, M., M. T. Montgomery, and M. E. Nicholls, 2010: A new paradigm for intensity modification of tropical cyclones. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 3163–3188, doi:10.5194/acp-10-3163-2010.
- Simpson, R. H., 1974; The hurricane disaster potential scale. *Weatherwise*, **27**, 169–186.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **93**, 485–498.
- Van Vuuren, D. P., M. G. J. den Elzen, P. L. Lucas, B. Eickhout, B. J. Strengers, B. van Houdt, 2007: Stabilizing green house gas concentrations at low levels : an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, **81**, 119–159, doi:10.1007/s10584-006-9172-9.
- Xu, S., and B. Wang, 2014: Enhanced western North Pacific tropical cyclone activity in May in recent years. *Clim. Dyn.*, **42**, 2555–2563, doi:10.1007/s00382-013-1921-7.
- Wang, Y., and C. C. Wu, 2004: Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes—A review. *Meteor. Atmos. Phys.*, **87**, 257–278, doi:10.1007/s00703-003-0055-6.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang, 2005: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, **309**, 1844–1846, doi:10.1126/science.1116448
- Wu, L., B. Wang, and S. A. Braun, 2008: Implications of tropical cyclone power dissipation index, *Int. J. Climatol.*, **28**, 727–731.
- Zhang, F., and D. Tao, 2013: Effects of Vertical Wind Shear on the Predictability of Tropical Cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 975–983, doi:10.1175/JAS-D-12-0133.1

- Zhang, Q., Q. Liu, and L. Wu, 2009: Tropical cyclone damages in China: 1983–2006. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 489–495, doi:10.1175/2008BAMS2631.1.
- Zhang, Y., H. Wang, J. Sun, and D. Helge, 2010: Changes in the tropical cyclone genesis potential index over the western north pacific in the SRES A2 Scenario. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**(6), 1246–1258, doi:10.1007/s00376-010-9096-1.
- Zhao, M., I. M. Held, S.-J. Lin, and G. A. Vecchi, 2009: Simulations of global hurricane climatology, Interannual variability, and Response to global warming using a 50-km Resolution GCM. *J. climate*, **22**, 6653–6678, doi:10.1175/2009JCLI3049.1