



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

북태평양과 북대서양의 열대저기압 활동과 관련된
해양·대기 인자와 ENSO 영향의 해역별 차이

濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同科程

羅 仁 彩

2016年 2月

북태평양과 북대서양의 열대저기압 활동과 관련된
해양·대기 인자와 ENSO 영향의 해역별 차이

지도교수 문 일 주

나 인 채

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2015年 12月

나인채의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ (印)

위 원 _____ (印)

위 원 _____ (印)

제주대학교 대학원

2015年 12月

The difference of oceanic and atmospheric
indices and ENSO effect related to tropical
cyclone activities according to north Pacific and
north Atlantic Ocean

In Chae Na
(Supervised by professor Il-Ju Moon)

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

2015. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Marine Meteorology
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of tables and figures	ii
Abstract	v
1. 서론	1
2. 자료 및 분석 방법	3
2.1. 자료	3
2.2. 분석 방법	4
3. 북서태평양, 북동태평양, 북대서양의 주요진로지역 특징	7
3.1. 주요진로지역과 주요생성지역의 ACE와의 상관도	8
3.2. ENSO와 태풍활동	11
4. 해역별 E-L MPR 특징	13
4.1. 북서태평양의 E-L MPR 특징	13
4.2. 북동태평양의 E-L MPR 특징	15
4.3. 북대서양의 E-L MPR 특징	17
5. 북서태평양, 북동태평양, 북대서양의 대기, 해양인자 특징	18
5.1. 해역별 ACE의 경향	18
5.2. 해역별 대기, 해양인자 선별	20
6. 해역별 다중회귀모형	29
6.1. 다중공선성	29
6.2. 해역별 다중회귀식	32
7. 요약 및 결론	42
참고문헌	45

List of Tables and Figures

Table 1. The results of correlation between ACE and SST, MSLP, and vertical wind shear in Main Passage Region and Prime Genesis Regions of Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic. ...	7
Table 2. Classification of strong El Niño and La Niña.	13
Table 3. The results of Shapiro Wilk test.	17
Table 4. The results of Wilcoxon rank sum test.	19
Table 5. The results of Main Passage Region and Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region correlation for SST, MPI, Tmix60, Tmix80, Tmix105, Tmix120 and OHC in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.	24
Table 6. The results of Main Passage Region and Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region correlation for MSLP, GH, RH and VWS in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.	25
Table 7. The total genesis frequency and category three, four and five genesis frequency. ..	26
Table 8. The results of selection factor in Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region of Western North Pacific.	27
Table 9. The results of selection factor in Main Passage Region and E-L Main Passage Region of Eastern North Pacific.	28
Table 10. The results of selection factor in Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region of North Atlantic.	30
Table 11. The results of Main Passage Region variance inflation factor in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.	32
Table 12. The results of Prime Genesis Region variance inflation factor in Western North Pacific and North Atlantic.	33
Table 13. The results of E-L Main Passage Region variance inflation factor in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.	34

Table 14. Correlation coefficient of Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.	37
Table 15. The results of final factor in Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region of Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.	38
Fig. 1. The typhoon track in Northern Hemisphere (1979~2014).	3
Fig. 2. The monthly mean frequency of genesis TC in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic(1979~2014).	4
Fig. 3. The density of tropical cyclone in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Dash blue line indicates Main Passage Region and red line indicates Prime Genesis Regions.	7
Fig. 4. Correlation spatial pattern of SST and ACE (a) Western North Pacific (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Green lines indicates areas where the difference is statistically significant at the 5% confidence level.	9
Fig. 5. Standardize timeseries of Niño 3.4 index and ACE in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Blue lines indicates ACE and red line is Niño 3.4 index from NOAA CPC.	10
Fig. 6. Composite of Vertical wind shear for TC genesis (a) Strong El Niño and (b) Strong La Niña. Red point indicates when the TC genesis location strong El Niño and blue point strong La Niña.	11
Fig. 7. Track density of Western North Pacific (a) Total, (b) El Niño, (c) La Niña and (d) El Niño - La Niña. Dash blue line indicates Main Passage Region and red line indicates Prime Genesis Region and solid green line indicates E-L Main Passage Region.	13
Fig. 8. Track density of Eastern North Pacific (a) Total, (b) El Niño, (c) La Niña and (d) El Niño - La Niña. Dash blue line indicates Main Passage Region and solid green line indicates E-L Main Passage	

Region.	15
Fig. 9. Frequency location box plot of El Niño and La Niña in Eastern North Pacific (a) General El Niño, (b) General La Niña, (c) Strong El Niño, (d) Strong La Niña, (e) 1997, 2002 El Niño and (f) 1984, 1985 La Niña.	16
Fig. 10. Frequency location Quantile–Quantile plot of El Niño and La Niña in Eastern North Pacific (a) General El Niño, (b) General La Niña, (c) Strong El Niño, (d) Strong La Niña, (e) 1997, 2002 El Niño and (f) 1984, 1985 La Niña.	18
Fig. 11. Track density of North Atlantic (a) Total (b) El Niño (c) La Niña and (d) El Niño - La Niña. Dash blue line indicates Main Passage Region and red line indicates Prime Genesis Region and solid green line indicates E-L Main Passage Region.	20
Fig. 12. The time series of ACE from Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic. Red lines indicates WNP and blue lines is ENP and green lines NA. ● indicates El Niño and ■ is neutral ▲ is La Niña.	21
Fig. 13. Monthly mean velocity potential anomalies JJASON in 2014. Turquoise soliding indicates divergent and brown soliding indicates convergence and red marker is TC genesis location.	22
Fig. 14. Component analysis of ACE (a) Correlation of ACE and frequency, intensity, duration and (b) bar plot in Western North Pacific	28
Fig. 15. Component analysis of ACE (a) Correlation of ACE and frequency, intensity, duration and (b) bar plot in Eastern North Pacific.	29
Fig. 16. Component analysis of ACE (a) Correlation of ACE and frequency, intensity, duration and (b) bar plot in North Atlantic.	31
Fig. 17. Main Passage Region multi regression model in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Red line indicates observaion and blue line indicates multi regression result	

	using select factor.	35
Fig. 18.	Prime Genesis Region multi regression model in (a) Western North Pacific and (b) North Atlantic. Red line indicates observaion and blue line indicates multi regression result using select factor.	36
Fig. 19.	E-L Main Passage Region multi regression model in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Red line indicates observaion and blue line indicates multi regression result using select factor.	36
Fig. 20.	Composite of select factor for WNP TC genesis (a) MPI anomaly in El Niño (b) MPI anomaly in La Niña (c) 850hPa GH anomaly in El Niño (d) 850hPa GH anomaly in La Niña (e) VWS anomaly in El Niño (f) VWS anomaly in La Niña. Red point indicates when the TC frequency location El Niño and blue point La Niña. Green box indicates E-L Main Passage Region.	39
Fig. 21.	Standardize timeseries of ACE and longitude in Western North Pacific. Red lines indicates ACE and blue line is longitude.	40
Fig. 22.	Composite of select factor for ENP TC genesis (a) T60 anomaly in El Niño (b) T60 anomaly in La Niña (c) MSLP anomaly in El Niño (d) MSLP anomaly in La Niña (e) 850hPa RH anomaly in El Niño (f) 850hPa RH anomaly in La Niña. Red point indicates when the TC frequency location El Niño and blue point La Niña. Green box indicates E-L Main Passage Region and blue dash box indicates Main Passage Region.	42
Fig. 23.	Composite of select factor for NA TC genesis (a) SST anomaly in El Niño (b) SST anomaly in La Niña (c) 500hPa RH anomaly in El Niño (d) 500hPa RH anomaly in La Niña (e) VWS anomaly in El Niño (f) VWS anomaly in La Niña. Red point indicates when the TC frequency location El Niño and blue point La Niña. Green box indicates E-L Main Passage Region and red dash box indicates	

Prime Genesis Region.	43
Fig. 24. The timeseries of ACE and multi regression model result in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Red lines indicates observation and blue line is multi regression model result using select factor.	44
Fig. 25. Flow diagram of key correlations. Flow diagram showing a total research summary of the key correlations.	45

Abstract

The purpose of this study is to define areas having a high correlation with the annual variability of the Tropical Cyclone(TC) activities in the Western North Pacific(WNP), the Eastern North Pacific(ENP) and the North Atlantic(NA). Also, oceanic and atmospheric factors, which are highly related with TC activities for each ocean basin, were selected and then possibility of predicting annual TC activities was examined using the selected factors over defined areas. In order to analyze TC activities, the Accumulated Cyclone Energy(ACE) was used as the index in consideration of duration, intensity and frequency of TC. The factors having an influence on ACE consist of the Sea Surface Temperature(SST), the Mean Sea Level Pressure(MSLP) and the Vertical Wind Shear(VWS). Overall, correlations between the ocean/atmospheric factors within the Prime Genesis Regions(PGR) and the Main Passage Region(MPR) where ACE/TC frequently pass by was insignificant. Based on existing studies suggesting that the El Niño-Southern Oscillation(ENSO) has influence on establishment and development of tropical cyclones, the El Niño-La Niña Main Passage Region(E-L MPR) was additionally analyzed in order to sort and compare the factors showing high correlations per each sea area. Concerning E-L MPR in WNP, it is neither SST nor VWS in MPR that has an influence on the magnitude of ACE. It is rather the outbreak location of TC that counts as an influence. In ENP, the reason that oceanic and atmospheric factors of MPR show a high correlations with ACE is different by ocean basin. from other sea areas, the chance of TC reaching land is small due to the influence of trade wind. Therefore, the influence of ENSO on the establishment of TC is small as well. As for NA, SST in PGR, 500hPa RH and VWS show high correlation with ACE. The Multiple Regression Equation(MRE) was used to sort ocean/atmospheric factors having a high correlation per each sea area. In WNP, the factors of E-L MPR showed 0.74(correlation) with ACE. In ENP, the factors of MPR showed 0.76(correlation). In NA, the factors of PGR showed 0.61(correlation). Such results are considered to make significant contributions to the prediction of ACE.

Key words: TC, ACE, MPR, PGR, E-L MPR, WNP, ENP, NA, ENSO, MRE

1. 서론

열대저기압(Tropical Cyclone, TC)은 사회, 경제에 막대한 피해를 줄 수 있는 기상현상이다. 이러한 피해를 경감시키기 위해서는 정확한 TC활동 예측이 필요하며 이를 위한 예측 기술 연구가 지속적으로 이루어져야한다. 그 중에서 예측인자 선정과정은 TC활동을 예측하는데 필수적이다.

TC활동을 나타내는 누적태풍에너지(Accumulated Cyclone Energy, ACE)는 TC의 지속기간, 강도, 빈도가 모두 고려된 인자이다. ACE가 크다는 것은 TC의 파괴력이 커져 해당년도에 TC활동이 왕성함을 의미하므로 ACE는 TC활동의 추이를 분석할 수 있는 중요한 지수이다. ACE의 영향을 미치는 인자들은 해면기압(Mean Sea Level Pressure, MSLP), 하층수증기, 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST), 연직바람시어(Vertical Wind Shear, VWS) 이외에도 (Goldenberg et al., 2001) 기후인자를 이용하여 역학적으로 설명하는 연구가 있어 왔다.

미국 NOAA의 CPC(Climatic Prediction Center)와 NHC(National Hurricane Center)는 엘니뇨 남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO), SST, 대서양 수십년진동(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)를 예측인자로 이용하여 해당년도의 ACE를 확률론적 방법으로 예측하고 있다. ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서는 고도별 지위고도, 온도, 바람장을 이용하여 ACE뿐만 아니라 TC발생과 진로를 예측한다. TSR(Tropical Storm Risk)은 통계모델 기반인 예측 모델을 통해 8월~9월 예측된 Niño 4 SST와 7~9월 카리브해 지역의 무역풍 예측값을 사용하여 ACE를 전망하고 있다(Lea and Saunders, 2006). 상하이 태풍 연구소(Shanghai Typhoon Institute, STI)는 연간 TC 발생빈도, 강도, ACE를 발표하며 동인도양 SST 변동, 남서태평양 SST 변동, Niño 3.4지역 SST, 적도서태평양의 연직시어를 예측인자로 사용한다.

콜로라도 대학교에서는 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI), 대서양의 SST, 사헬 지역의 강수량, 준2년진동(Quasi Biennial Oscillation, QBO)의 예측인자로 구성된 회귀식을 이용하여 ACE 전망을 하고 있고(Gray, 1984). 홍콩시립대학교는 예측인자로 북대서양진동(North Atlantic Oscillation,

NAO), Niño 3.4지수, 티벳고기압 월별 지수들을 이용하고 있다(Chan et al., 2000). 플로리다 주립대학교(Florida State University, FSU)에서는 시간지연 방법을 사용하여 1000, 850, 500, 200hPa 동서 및 남북바람, 지위고도, 기온, 상대습도, MSLP의 예측인자들을 사용하고 있다.

최근 연구에 따르면 SST보다 수심에 따른 혼합된온도(Tmix60, Tmix80, Tmix105, Tmix120)가 TC 강화에 좋은 환경을 만들었으며(Lin et al., 2013) 해양열용량(Ocean Heat Content, OHC) 또한 TC 강도변화와 상호관계를 가지고 있다고 밝혀졌다(Wada and Usui, 2007). 해양과 대기를 고려한 최대잠재강도(Maximum Potential Intensity, MPI)는 TC 성장에 필요한 에너지 한계를 가리키는 인자로 이를 통해 TC의 최대강도 추이를 설명하였고 주요생성지역(Prime Genesis Regions, PGR)을 정의하여 9월의 SST와 ACE와의 상관관계가 높다고 하였다(Emanuel, 1999, 2005). Pun et al.(2013)은 위성이 측정한 고도자료를 통해 북서태평양 주요발달지역(Main Development Region, MDR)을 정의하여 이 지역의 환경에 따라 최근 TC 강도 변화가 일어났음을 밝혔다. 이렇게 기관 및 학계에서 이용하는 예측인자들은 다양한 대기, 해양인자들이 많이 쓰이고 있지 않고 각 해역별로 TC활동과 상관관계가 높은 지역의 정의가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 북서태평양(Western North Pacific, WNP), 북동태평양(Eastern North Pacific, ENP), 북대서양(North Atlantic, NA)에서 열대저기압(Tropical Cyclone, TC)활동의 연 변동성과 상관관계가 높은 세부 지역을 찾고 해양, 대기인자를 해역별로 선별하여 TC활동과의 관련성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 2장에서는 본 연구에서 사용된 해양, 대기인자들의 변수들과 분석방법을 서술하였다. 3장에는 WNP, ENP, NA의 주요진로지역(Main Passage Region, MPR)를 통해 해양, 대기인자의 상관관계를 분석하였다. 4장에서는 TC 발달지역을 정의하기 위한 엘니뇨와 라니냐의 MPR의 차이를 통한 특징을 분석하였다. 5장에서는 해역별 해양, 대기인자들의 특징을 서술하였다. 6장에서는 해역별 다중회귀식을 산출하여 ACE와의 변동성을 분석하고 7장에서는 본 연구의 내용을 요약하고 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 자료

본 연구에서 북서태평양해역에 대한 열대저기압정보는 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 최적경로(Best Track)를 이용하였다. 이 자료는 6시간 간격으로 위도, 경도, 최대중심풍속등이 정리되어 있다. RSMC보다 JTWC의 자료를 선택한 이유는 최근 북서태평양에서의 RSMC와 JTWC 자료의 강도를 분석한 결과 차이가 컸던 원인으로 1977~1983년 기간의 자료가 위성자료 참조유무에 따라 달라짐을 보인바가 있어 1979~2014년까지의 JTWC자료를 이용하였다(Kang and Elsner, 2012). 북동태평양과 북대서양해역은 국립허리케인센터(National Hurricane Center, NHC) TC 최적경로를 바탕으로 1979년부터 2014년까지의 기간의 자료를 이용하였다. Fig. 1은 연구의 타겟이 되는 북서태평양, 북동태평양, 북대서양의 사피르-심프슨 등급(Saffir- Simpson Scale)에 따른 TC경로이다.

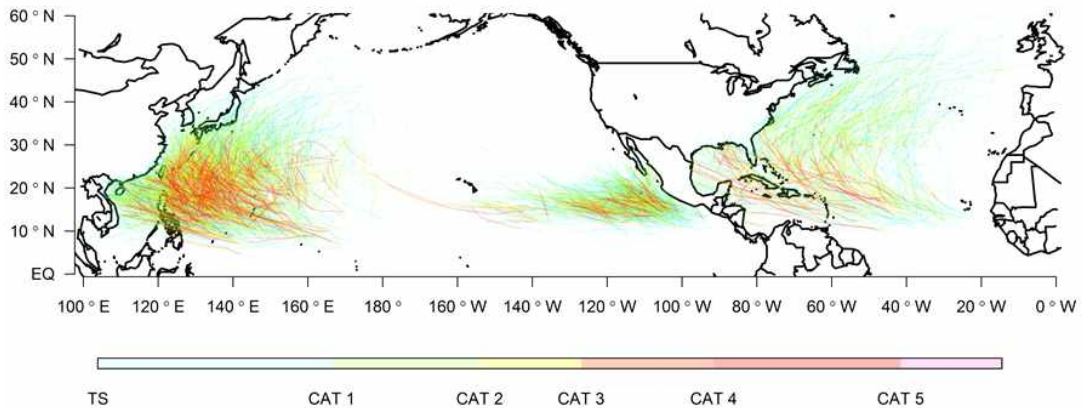
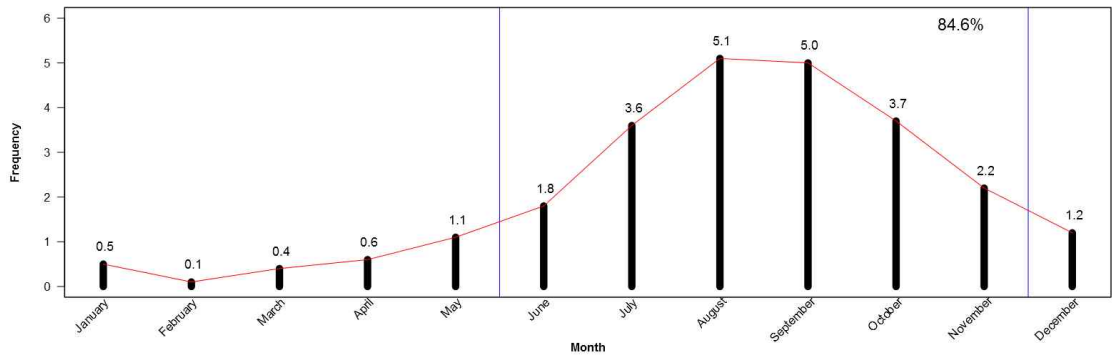


Fig. 1. The typhoon track in Northern Hemisphere (1979~2014).

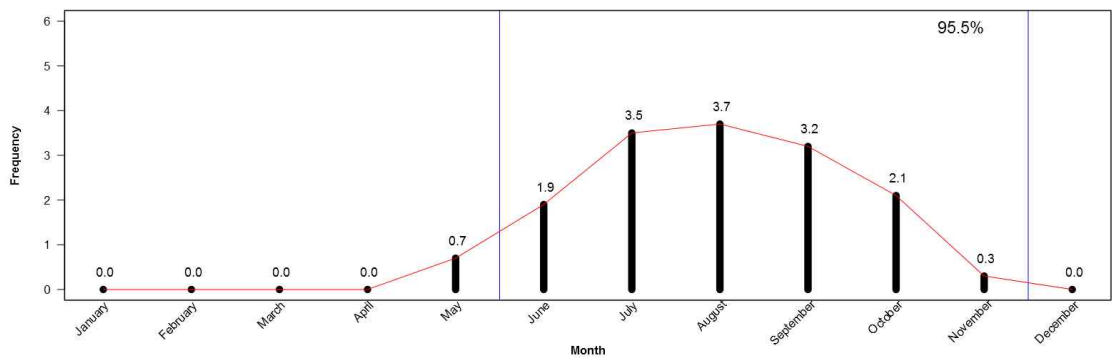
2.2 분석 방법

ACE의 계산을 위해 TC활동 기준은 해역별 월별 발생빈도를 통해서 결정하였다.

(a)



(b)



(c)

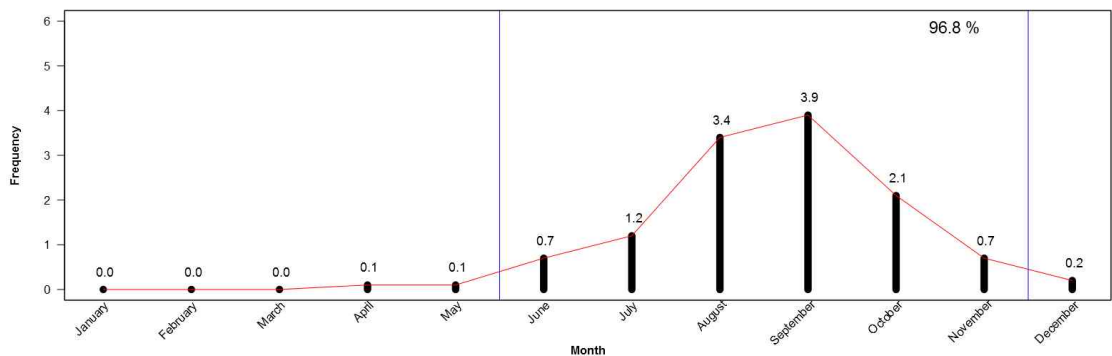


Fig. 2. The monthly mean frequency of genesis TC in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic(1979~2014).

1979~2014년동안 북서태평양은 6월에서 11월까지의 TC수는 전체의 84.6%, 북동태평양은 95.5%, 대서양은 96.8%로 발생되어(Fig. 2) TC가 발생하는 월을 대표한다고 보아 6월에서 11월까지의 달을 TC활동 시즌이라고 정의하여 ACE를 계산하였다. ACE의 계산은 해당년도 TC활동 시즌에서 6시간간격의 풍속을 제곱합하여 계산된다(2.1).

$$Accumulated\ Cyclone\ Energy\ (ACE) = \int_0^{\tau} V_{max}^2 dt \quad (2.1)$$

사용된 대기장의 자료는 ECMWF_Interim로 월단위로 재분석되어 있고 수평해상도가 $0.7^{\circ} \times 0.7^{\circ}$, 연직으로 37층의 고도장으로 정리되어있다. 해양장은 ECMWF Ocean Reanalysis System 4로 월단위자료이며 해상도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 이고 42층의 깊이로 되어있다. 분석된 해양인자로써 SST는 해양, 대기 열교환을 통해 TC강도에 영향을 주된 요소(Schade and Emanuel, 1999)라 할 수 있고 해양열용량(Ocean Heat Content, OHC) 또한 TC 강도변화와 상호관계를 가지고 있어(Wada and Usui, 2007) 선택하게 되었다. 또한 해당깊이(m)의 평균해수온도(Tmix60, Tmix80, Tmix105, Tmix120)는 SST보다 TC의 강화에 대해 안정되어 설명할 수 있다고(Lin et al., 2013) 밝혀진바 있어 추가적으로 분석하였다. 해양열용량(Ocean Heat Content, OHC)은 해수깊이를 해수온도 $26^{\circ}C$ 이상까지 깊이의 수온을 누적합하여(Leipper and Volgenau, 1972) 계산된다(2.2). ρ 는 $1.026g/cm^3$ 로써 평균 해양 밀도를 뜻하며 C_p 는 $1cal/g^{\circ}C$ 로써 정압비열을 가르킨다.

$$Ocean\ Heat\ Content\ (OHC) = C_p \int_0^{D26} \rho [T(z) - 26] dz \quad (2.2)$$

대기인자는 해면기압(Mean Surface Level Pressure, MSLP), 연직바람시어(Vertical Wind Shear, VWS), 925hPa, 850hPa, 500hPa 상대습도(Relative Humidity, RH), 925hPa, 850hPa, 500hPa 지위고도(Geopotential Height, GH), MPI를 이용하였다. MPI는 Emanuel(1999) 이론식에 따르면(2.3) 대류가용잠재에너지(Convective Available Potential Energy, CAPE)는 실제 온도의 연직 프로파일 뿐만 아니라 온도, 압력 및 습도의 함수로서

부력의 누적을 말하기 때문에 CAPE는 TC 성장에 필요한 에너지로 정의된다.

CAPE*는 최대풍속의 범위 내에서 공기덩어리의 CAPE값이고 각 격자에서 PI(Potential Intensity)의 계산에 사용되는 변수는 SST, 기압별 온도와 비습이며 이를 통해 연직 프로파일을 만들어 MPI를 산출한다.

$$\text{Maximum Potential Intensity}(MPI) = \frac{SST - T_0}{T_0} \frac{C_K}{C_D} (CAPE^* - CAPE) \quad (2.3)$$

3. 북서태평양, 북동태평양, 북대서양의 주요진로지역 특징

3.1 주요진로지역과 주요생성지역의 ACE와의 상관도

ACE와 TC가 많이 지나가는 지역과 상관성을 보기 위해 각 해역별 진로밀도를 나타내었다(Fig. 3.). 북서태평양의 주요진로지역 (Main Passage Region, MPR) 지역은 (13°N~27°N, 110°E~150°E), 북동태평양의 MPR 지역은 (12°N~22°N, 125°W~100°W), 북대서양의 MPR 지역은 (17°N~35°N, 95°W~58°W)으로 정의하였다.

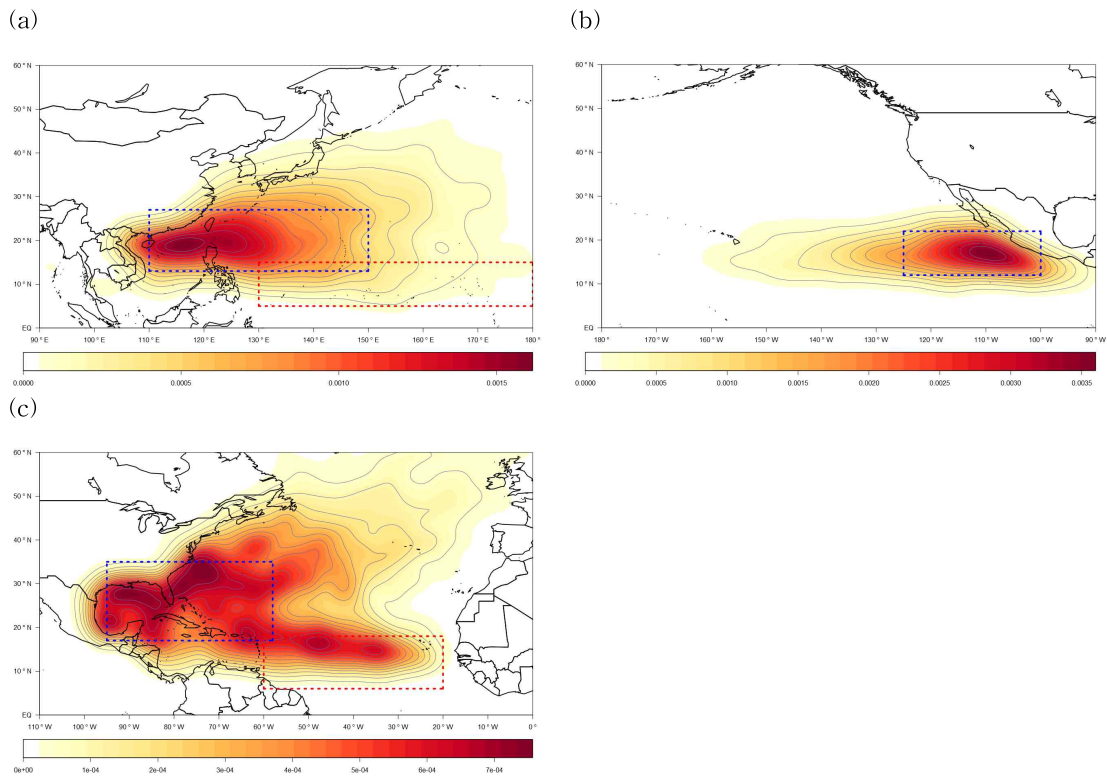


Fig. 3. The density of tropical cyclone in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Dash blue line indicates Main Passage Region and red line indicates Prime Genesis Regions.

Emanuel(2005)은 주요생성지역(Prime Genesis Region, PGR)으로 북서태평양은 (5°N~15°N, 130°E~180°E), 북대서양은 (6°N~18°N, 60°W~20°W)으로 정의하였다. MPR과 PGR 지역의 주된 인자로 사용되는 SST, MSLP, VWS와의 상관관계를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The results of correlation between ACE and SST, MSLP, and vertical wind shear in Main Passage Region and Prime Genesis Regions of Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.

Factor	Region	WNP	ENP	NA
SST-ACE	MPR	-0.51**	0.51**	0.23
	PGR	-0.06		0.39*
MSLP-ACE	MPR	-0.24	-0.52**	-0.34*
	PGR	-0.35*		-0.34*
VWS-ACE	MPR	-0.05	0.09	0.05
	PGR	-0.59**		-0.59**

Significance at ** 99 and * 95 percent level

북서태평양에서의 MPR SST는 -0.51의 음의 상관, MSLP와 VWS는 95% 신뢰수준에서 유의하지 않았고 북동태평양에서의 MPR SST는 0.51, MSLP는 -0.52, VWS는 유의하지 않는 상관성을 보였다(Table 1). 북대서양에서의 MPR SST와 VWS는 유의하지 않았고 MSLP는 -0.34의 음의 상관을 보였다. Emanuel(2005)이 정의한 북서태평양에서의 PGR SST는 유의하지 않았고 MSLP는 -0.35, VWS는 -0.59의 상관도를 보였다. 북대서양에서의 PGR SST는 0.39, MSLP는 -0.34, VWS는 -0.59의 상관도를 보였다. 해역별로 상관도가 PGR과 MPR에서 다르게 나타나는 원인을 찾기 위해 6월에서 11월의 SST와 ACE의 해역별 상관분포도이다(Fig. 4).

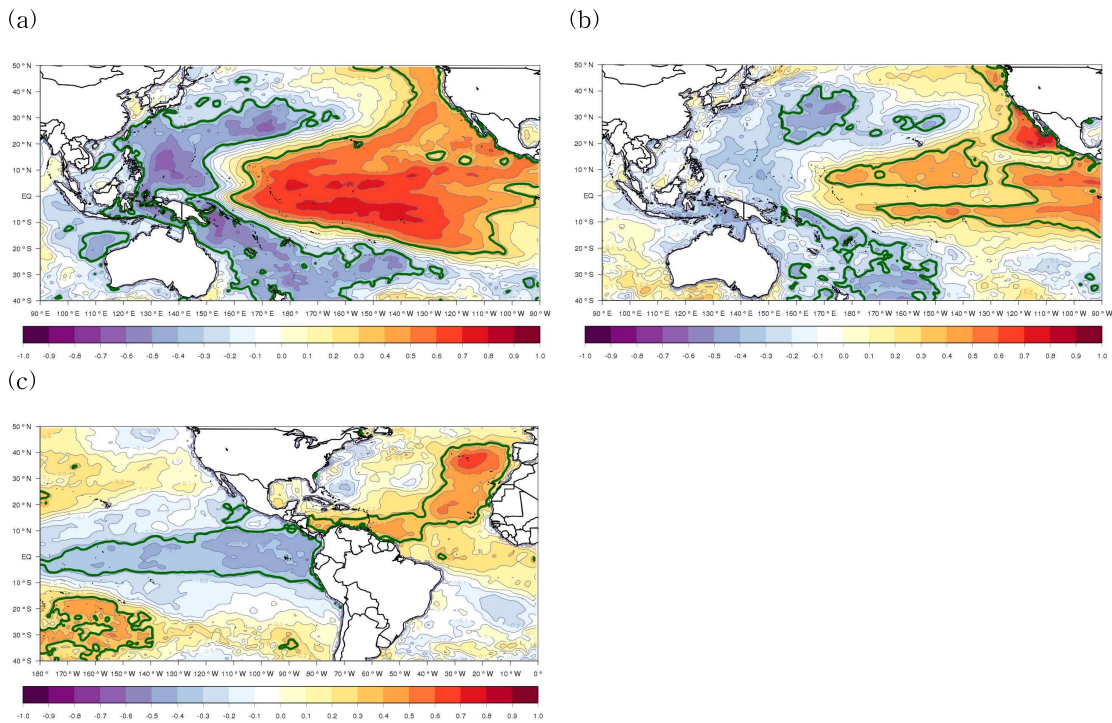


Fig. 4. Correlation spatial pattern of SST and ACE (a) Western North Pacific (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Green lines indicates areas where the difference is statistically significant at the 5% confidence level.

Fig. 4는 해역별로 1979년부터 2014년 기간의 SST와 ACE와의 상관분포를 보여준다. 95% 신뢰수준에서 유의한 양의 상관을 보이는 동태평양에서의 SST의 경년변동이 서태평양과 비교하여 크기 때문에 이 지역에서의 SST 변화는 TC생성에 영향을 주는 역학적인 요인을 조절할 수 있다. 상관계수의 공간적인 분포는 ENSO와 관련된 변동성을 반영하므로 해역별 ACE와 ENSO와의 상관성을 보기 위해 Niño 3.4 지수와 ACE를 표준화하여 시계열을 나타내었다(Fig. 5).

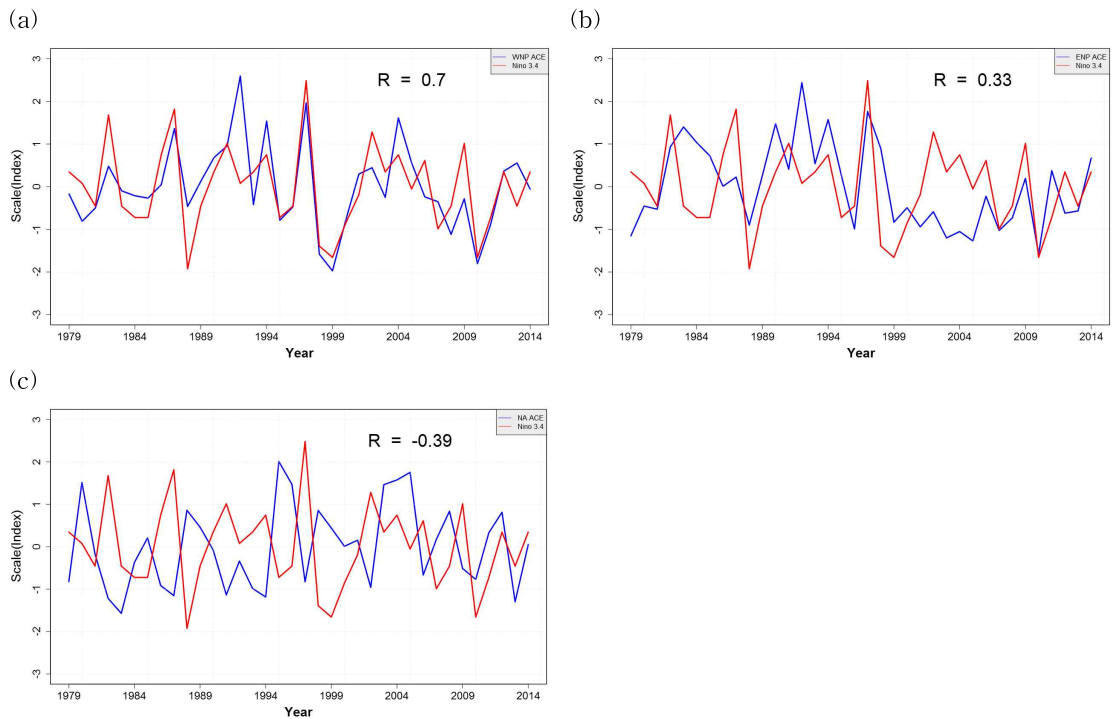


Fig. 5. Standardize timeseries of Niño 3.4 index and ACE in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Blue lines indicates ACE and red line is Niño 3.4 index from NOAA CPC.

파란색 선은 각 해역별 TC시즌의 ACE를 나타낸 것이고 빨간색 선은 NOAA CPC Niño 3.4 지수를 나타냈다. 북서태평양에서는 ACE와 Niño 3.4의 상관관계는 0.7의 양의 상관, 북대서양에서는 -0.39 의 음의 상관이 나타났고 이는 95% 신뢰수준으로 유의하다. 동태평양에서는 0.33의 양의 상관관계가 나타났지만 유의하지 않았다. 이를 통해 WNP와 NA의 ACE는 ENSO와 관련이 있음을 알 수 있다.

3.2 ENSO와 태풍활동

ENSO는 열대 태평양에서 일어나는 해수면 온도와 해면기압의 변동으로 인한 대기-해양 순환의 변화로 나타나는 현상이며 각각의 해역별로 ENSO와 관련되어 많은 연구들이 있어왔다(Chan, 2000).

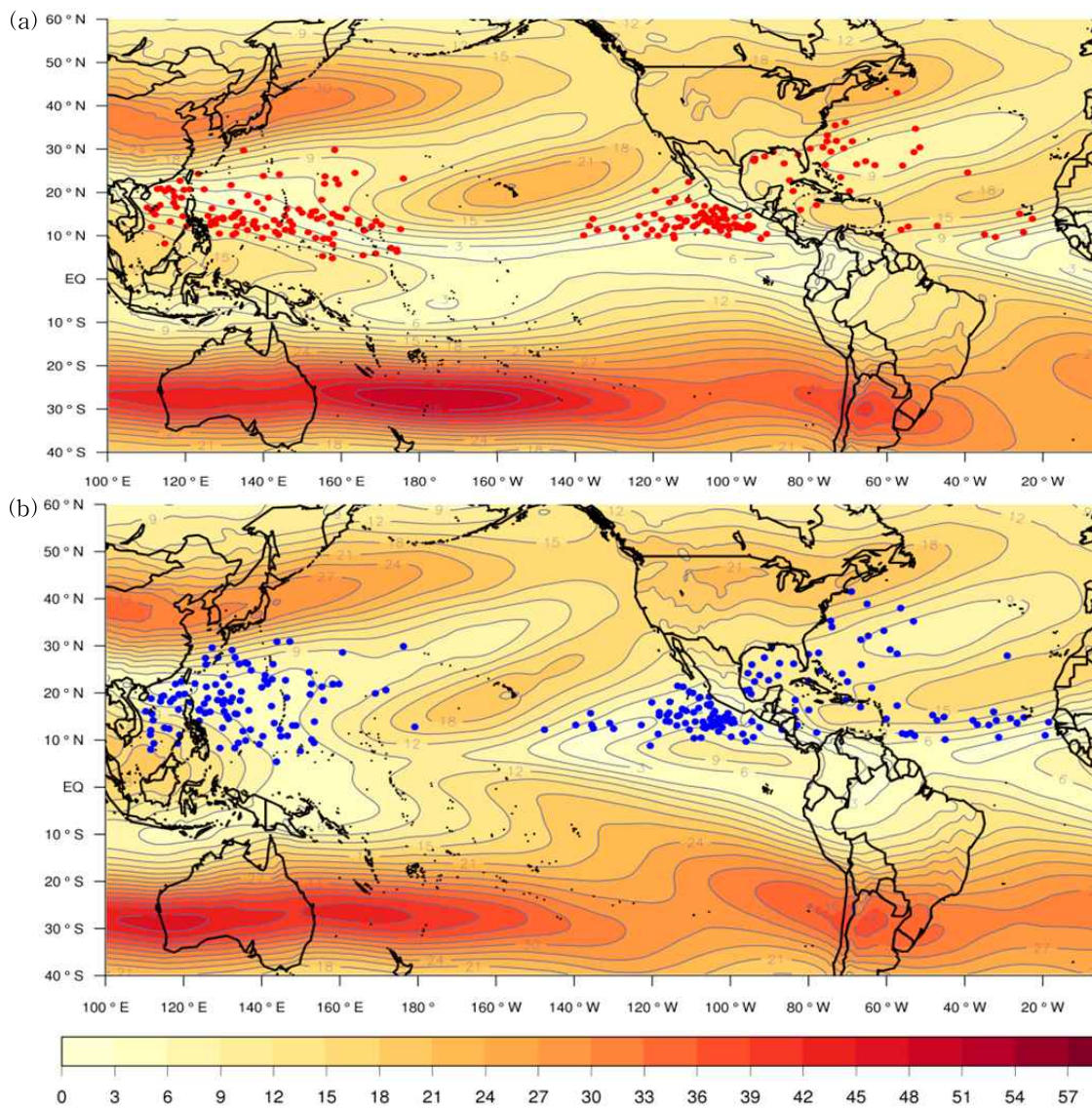


Fig. 6. Composite of Vertical wind shear for TC genesis (a) Strong El Niño and (b) Strong La Niña. Red point indicates when the TC genesis location strong El Niño and blue point strong La Niña.

Fig. 6은 엘니뇨(a)와 라니냐(b) 시기의 VWS의 분포장이며 빨간색 점은 엘니뇨시기에 TC발생위치, 파란색 점은 라니냐시기의 발생위치이다. 북서태평양에서는 엘니뇨시기에 남동쪽으로 TC가 발생하고, 라니냐시기에는 북서쪽으로 이동한다는 (Dong 1988; Wang and Chan 2002)연구와 일치한다. 이것은 북서태평양에서 편서풍과 몬순 기압골 동쪽 확장(Lander, 1994), VWS의 감소가(Clark and Chu 2002) 기여했기 때문으로 밝혀진바 있다.

4. 해역별 E-L MPR 특징

4.1 북서태평양의 E-L MPR 특징

WNP에서 TC활동의 영향을 주는 것은 태풍이 지나가는 주변환경이 아니라 TC 발생 위치가 중요하다. 이는 육지쪽에서 많이 발생하는 경우 TC활동의 기여도가 없기 때문에 남동쪽에서 TC가 발생해야 발달도 하고 지속기간도 길어지게 된다. 그런 위치를 유도 하는 것은 ENSO이다.

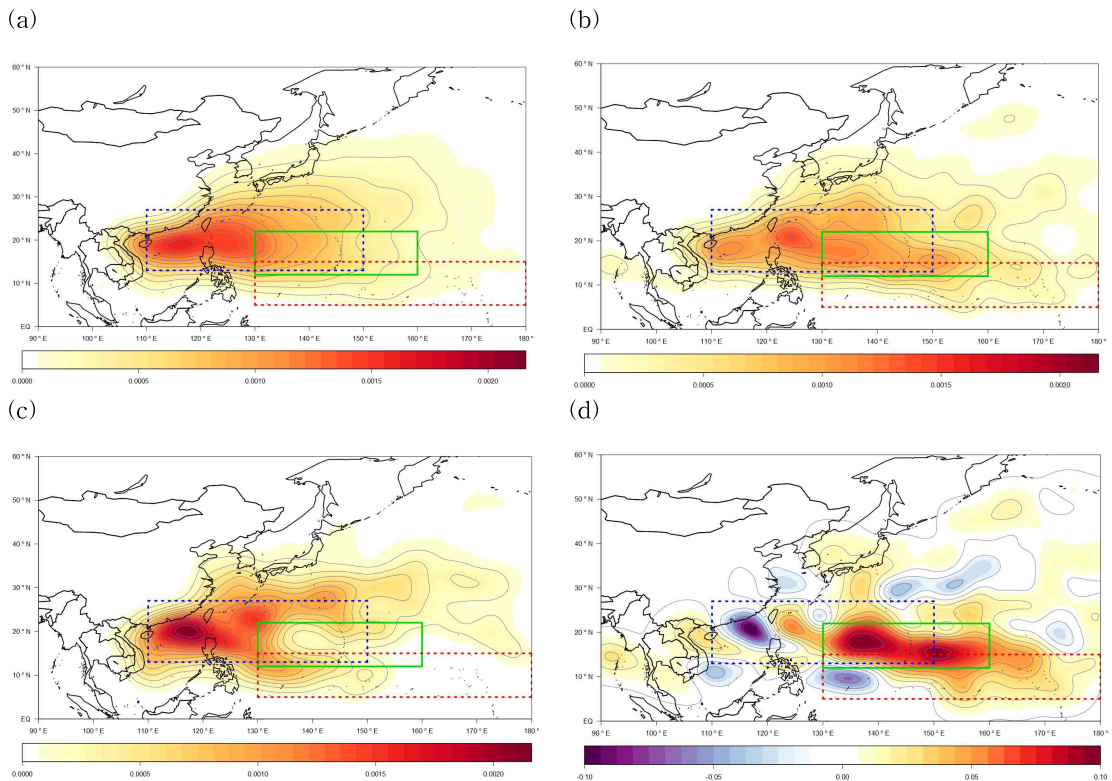


Fig. 7. Track density of Western North Pacific (a) Total, (b) El Niño, (c) La Niña and (d) El Niño - La Niña. Dash blue line indicates Main Passage Region and red line indicates Prime Genesis Region and solid green line indicates E-L Main Passage Region.

Fig. 7은 북서태평양에서의 전체진로밀도분포(a), 엘니뇨시기의 진로밀도분포 (b), 라니냐시기의 진로밀도분포(c), 엘니뇨시기와 라니냐시기의 차이를 나타낸 진로밀도분포(d)이다.

Table 2. Classification of strong El Niño and La Niña year.

Type	Year
El Niño	1982, 1987, 1991, 1997, 2002
La Niña	1984, 1985, 1988, 1998, 1999

엘니뇨와 라니냐의 기준은 엘니뇨 감시해역의 Niño 3.4 (5°N~5°S, 170°W~120°W) 지역의 해수면 온도 편차가 5개월 이상 0.8°C 이상을 유지할 경우 엘니뇨, -0.8°C 이하를 유지할 경우 라니냐라고 정의하였다(Table 2). 파란색 점선은 MPR이고 빨간색 점선은 PGR이다. 엘니뇨해와 라니냐해의 차이로 나타낸 박스는 E-L MPR(El Niño-La Niña Main Passage Region)로 녹색실선으로 나타내었고 범위는 (12°N~22°N, 130°E~160°E)으로 정의하였다. WNP의 진로밀도 분포로 보면 엘니뇨시기에는 아시아쪽으로 상륙하는 TC가 많고 라니냐시기에 중국으로 상륙하는 TC가 많다는(Wang and Chan 2002)연구와 일치한다.

엘니뇨 시기에는 무역풍이 약해져 적도의 동서순환이 약화되고 따뜻한 물이 평년보다 남동쪽에 위치하게 되어 평년에 비해 서풍이 강하게 나타나, 저기압성회전이 발생하는 지역이 남동쪽에 위치하게 된다. 이로 인해 엘니뇨 시기는 TC가 평년에 비해 남동쪽에서 발생하는 경향을 보이고(Chia *et al.*, 2002) 라니냐 시기에는 TC의 발생구역이 북서쪽에 치우친다(Chan, 1985). 북서태평양에서 엘니뇨해의 TC는 좀 더 강한 강도로 오랫동안 지속되는 경향이 있고(Camargo *et al.*, 2005), TC의 진로가 평년보다 일본쪽으로 휘어지게 된다(Saunders *et al.* 2000; Elsner and Liu 2003; Wu *et al.* 2004).

4.2 북동태평양의 E-L MPR 특징

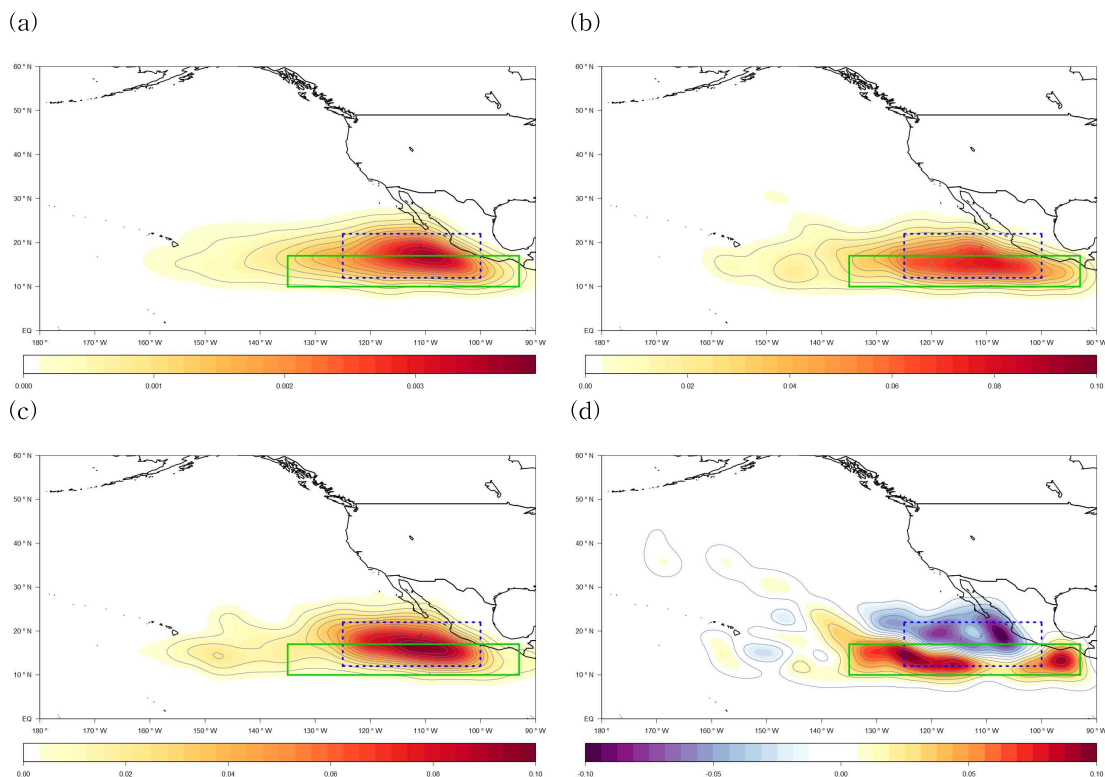


Fig. 8. Track density of Eastern North Pacific (a) Total, (b) El Niño, (c) La Niña and (d) El Niño - La Niña. Dash blue line indicates Main Passage Region and solid green line indicates E-L Main Passage Region.

Fig. 8은 북동태평양에서의 전체진로밀도분포(a), 엘니뇨시기의 진로밀도분포(b), 라니냐시기의 진로밀도분포(c), 엘니뇨시기와 라니냐시기의 차이를 나타낸 진로 밀도분포(d)이다. 파란색 점선은 MPR이고 녹색실선은 E-L MPR (10°N~17°N, 135°W~93°W)으로 정의하였다. 북동태평양에서의 진로밀도 분포로 보아 라니냐해는 멕시코 서쪽해안으로 상륙하는 TC가 많고 엘니뇨해는 중앙태평양쪽으로 이동하는 TC가 많다. 북동태평양에서의 TC활동은 북대서양의 TC활동이 약할 때 증가되는 경향을 보이고 (Elsner and Kara 1999) 엘니뇨시기에 강한 TC가 증가를 하며(Gray and Sheaffer 1991), 서쪽으로 이동하는 경향이 있다(Irwin and Davis 1999). 또한 엘니뇨시기인 겨울철 이후 2~3 시즌 뒤에 북동태평양해역의 열이 방출되어 TC가 강화 되는 이유로 해양수송 메커니즘의 지연으로 인해 적도 표층에서 열저장소가 만들어져 강한 TC의 형성에 유리한 추가적인 열을 공급하기 때문인 것으로 밝혀졌다(Jin et al., 2014).

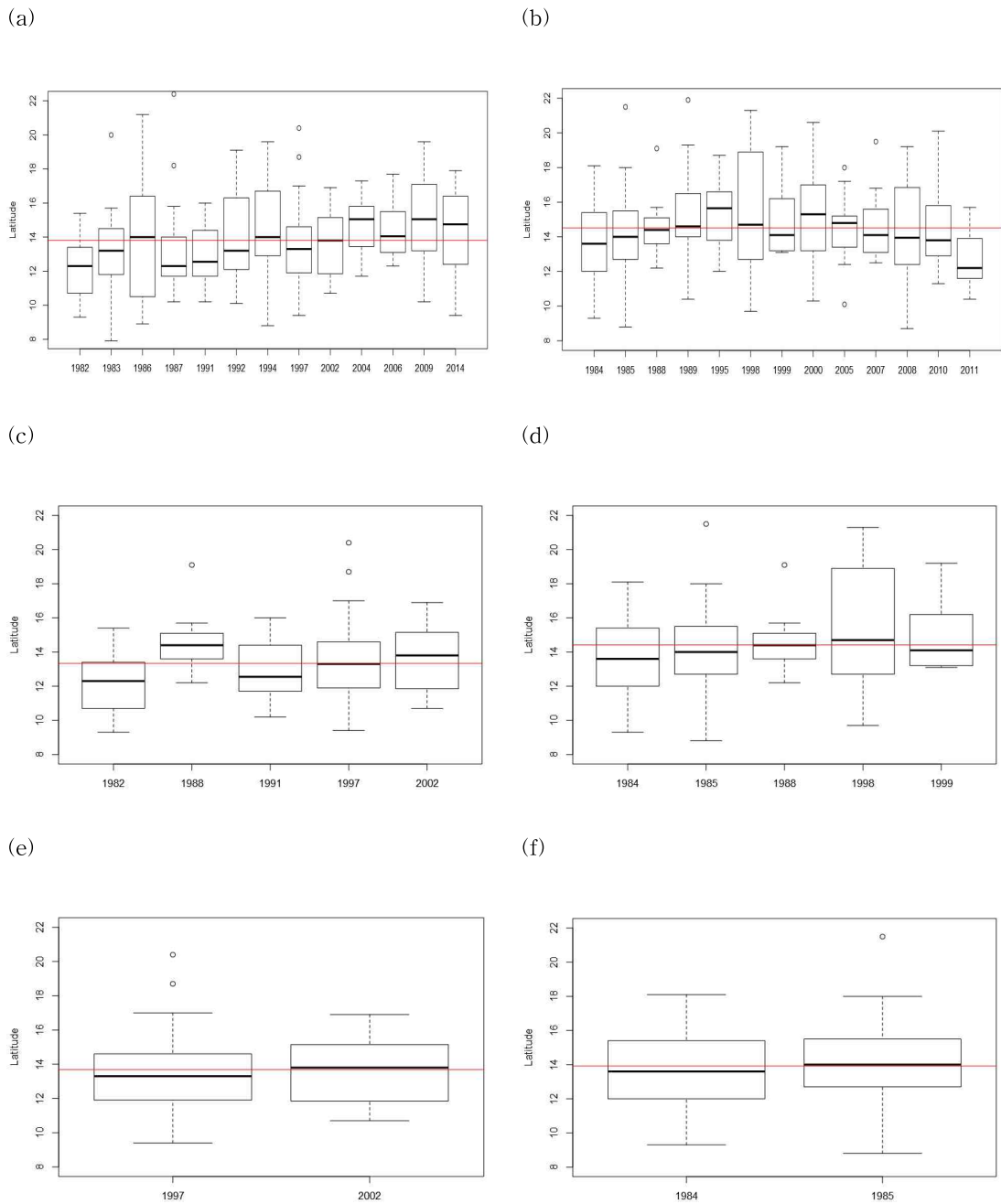


Fig. 9. Frequency location box plot of El Niño and La Niña in Eastern North Pacific (a) General El Niño, (b) General La Niña, (c) Strong El Niño, (d) Strong La Niña, (e) 1997, 2002 El Niño and (f) 1984, 1985 La Niña.

북동태평양에서는 엘니뇨시기일때보다 라니냐시기일 때 더 높은 위도에서 발생한다. 이런 현상이 유의한지를 알아보기 위해 모수기법과 비모수기법을 선택하는 방법인

Shapiro 검증을 하였다. 추가적으로 엘니뇨해인 1997년과 2002년 그리고 라니냐해인 1984년과 1985년이 위도별 분포가 비슷하기 때문에 이 사례도 추가적으로 분석하였다(Fig.9).

Table 3. The results of Shapiro Wilk test.

Classification	p-value
General El Niño	0.02
General La Niña	0.05
Strong El Niño	0.05
Strong La Niña	0.09
1997, 2002 El Niño	0.08
1984, 1985 La Niña	0.81

Shapiro Wilk test는 정규성 검증으로 p-value가 0.1보다 작을 때 90%신뢰수준으로 정규성을 기각하게 된다. 일반적인 엘니뇨와 라니냐, 강한 엘니뇨와 라니냐, 1997년과 2002년의 엘니뇨는 비정규 분포를 보인다(Table 3).

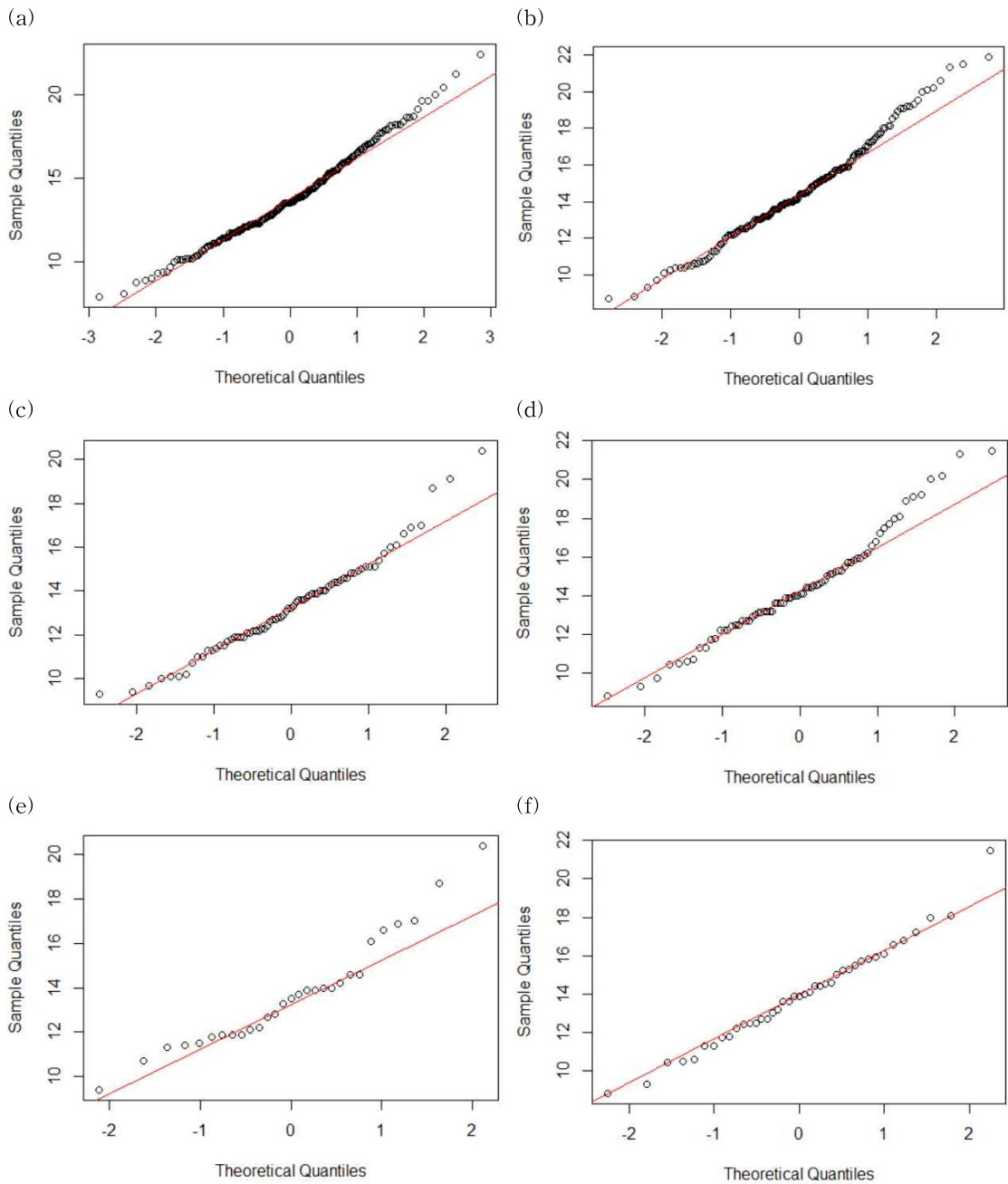


Fig. 10. Frequency location Quantile-Quantile plot of El Niño and La Niña in Eastern North Pacific (a) General El Niño, (b) General La Niña, (c) Strong El Niño, (d) Strong La Niña, (e) 1997, 2002 El Niño and (f) 1984, 1985 La Niña.

이를 시각적으로 확인하기 위해 Quantile-Quantile plot으로 각각의 시기와 위도별 태풍발생위치가 정규분포에 근접하는지 확인하였다(Fig.10). Q-Q plot은 경험분포와 이론적분포가 서로 근접하게 분포하면 정규분포를 띠며 멀어지면

정규분포를 띠지 않는다고 분석한다. 1984년과 1985년의 라니냐시기의 위도별 분포를 제외하고 분석된 사례가 비정규분포를 띠었다.

Table 4. The results of Wilcoxon rank sum test.

Classification	p-value
General El Niño and General La Niña	0.005
Strong El Niño and Strong La Niña	0.007
1997, 2002 El Niño and 1984, 1985 La Niña	0.563

윌콕슨 순위합 검정의 가설은 두 개의 집단의 분포가 차이가 없다는 가정을 한다. 동태평양의 일반적인 엘니뇨와 일반적인 라니냐의 위도별 분포와 강한 엘니뇨와 강한 라니냐의 위도별 분포는 p-value가 0.05이하로써 이러한 가설을 기각한다. 1997년과 2002년의 엘니뇨와 1984년과 1985년의 라니냐의 위도별 분포는 유의하지 않았다 (Table 4). 엘니뇨시기와 라니냐시기의 위도별 분포는 차이가 있고 일반적인 라니냐시기와 강한 라니냐시기가 일반적인 엘니뇨시기와 강한 엘니뇨시기보다 북쪽으로 움직이는 진로특성을 보인다(Fig.8).

4.3 북대서양의 E-L MPR 특징

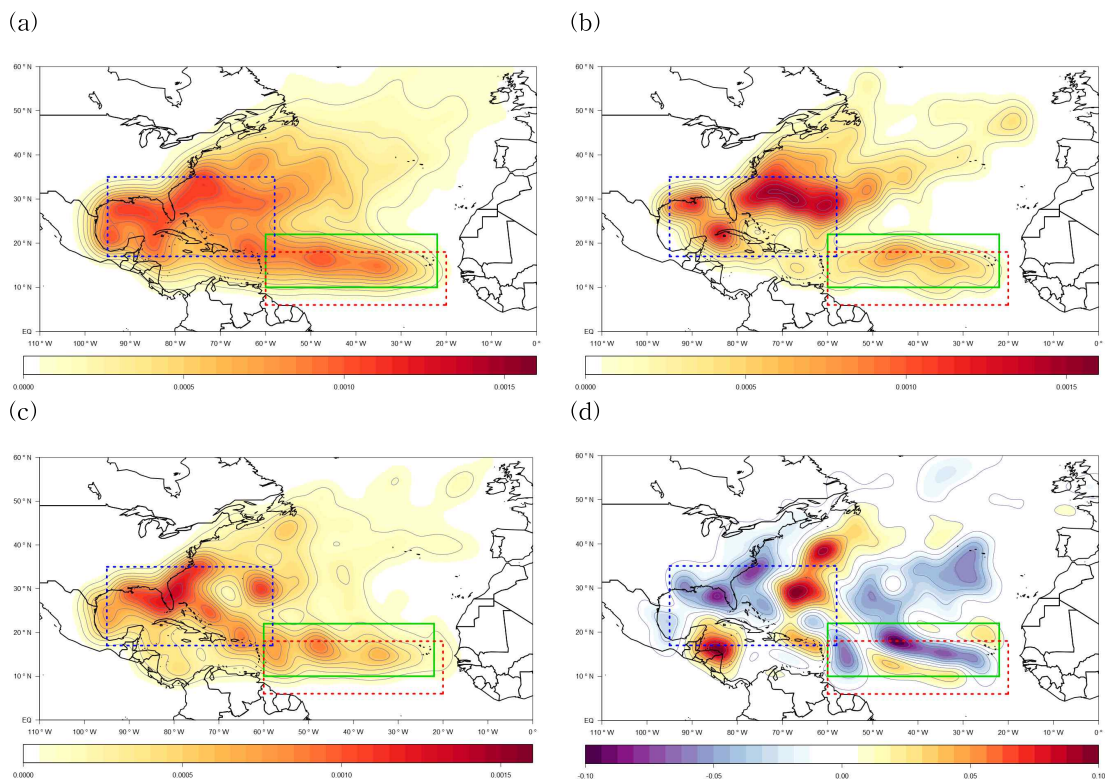


Fig. 11. Track density of North Atlantic (a) Total (b) El Niño (c) La Niña and (d) El Niño - La Niña. Dash blue line indicates Main Passage Region and red line indicates Prime Genesis Region and solid green line indicates E-L Main Passage Region.

Fig. 11는 북대서양에서의 전체진로밀도분포(a), 엘니뇨시기의 진로밀도분포(b), 라니냐 시기의 진로밀도분포(c), 엘니뇨시기와 라니냐시기의 차이를 나타낸 진로밀도분포(d)이다. 파란색 점선은 MPR이고 빨간색 점선은 PGR, 녹색실선은 E-L MPR이다. 북대서양의 E-L MPR은 (10°N~22°N, 60°W~22°W)으로 정의하였다. 북대서양의 라니냐시기에는 저위도에서 발생하여 움직이는 TC가 많고 엘니뇨시기에는 육지주변으로 발생하여 이동하는 TC가 많다. 이러한 ENSO 현상은 미국에 상륙하는 TC 수(Bove et al. 1998; Pielke and Landsea 1999), TC 강도(Landsea et al. 1999), 발생지역(Elsner and Kara 1999) 에도 영향을 미친다. 푸에르토리코 주변과 남미대륙 북동부해안에서 아프리카 해안에 이르는 적도대의 8~9월 수온이 1°C 오를 때마다 TC 빈도와 강도를 합친 활동은 49% 증가했으며 카테고리 3 이상의 TC 수는 45% 증가함을 보였다(Saunders and Lea 2008). 이 지역은 본 연구에서 정의한 녹색실선의 지역과 유사한 특징을 보인다.

5. 북서태평양, 북동태평양, 북대서양의 대기, 해양인자 특징

5.1 해역별 ACE의 경향

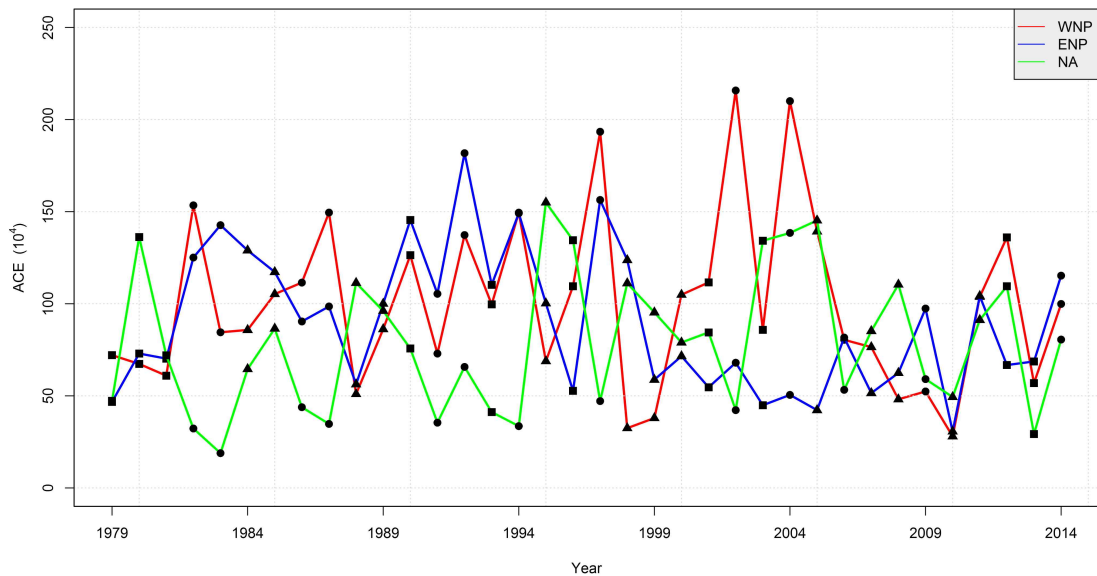


Fig. 12. The time series of ACE from Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic. Red lines indicates WNP and blue lines is ENP and green lines NA. ● indicates El Niño and ■ is neutral ▲ is La Niña.

Fig. 12은 엘니뇨해와 라니냐해, 중립으로 나누어서 구별한 ACE의 시계열이다. 빨간색점은 엘니뇨시기, 파란색점은 라니냐, 녹색점은 중립이다. 북서태평양에서의 엘니뇨시기에는 ACE가 커지고 라니냐에는 작아지는 현상이 뚜렷하게 보이고 북대서양은 엘니뇨시기에는 ACE가 작아지고 라니냐에는 커지는 현상이 뚜렷하게 보였다. 북동태평양의 ACE는 엘니뇨, 라니냐에 따라 뚜렷하게 나타나지 않음은 Fig. 5에서 Niño 3.4지수와 ACE와의 상관관계가 유의하게 나오지 않았기 때문이다. 북서태평양과 북대서양의 TC활동이 반대가 되는 이유는 상층의 발산장으로 설명할 수 있다. Fig. 13은 2014년 6월에서 11월까지의 평균 상층 발산장 편차이다. 청록색은 평년보다 상층에서 발산을 나타내고 갈색은 평년보다 수렴이 일어남을 보여준다. 6월과 7월에는 상층 발산구역인 북서태평양과 북동태평양에서 TC가 발생되었고 대서양은 상층에 수렴이 있기 때문에 TC발생이 일어나질 않았다.

9월에는 북서태평양과 북동태평양에서 강한 상층발산이 일어나 TC발생의 우호환경이 만들어졌다. 10월에는 북서태평양의 상층에서 강한 수렴이 일어나 TC생성이 억제되었고 북동태평양과 북대서양에서 TC가 생성되었다.

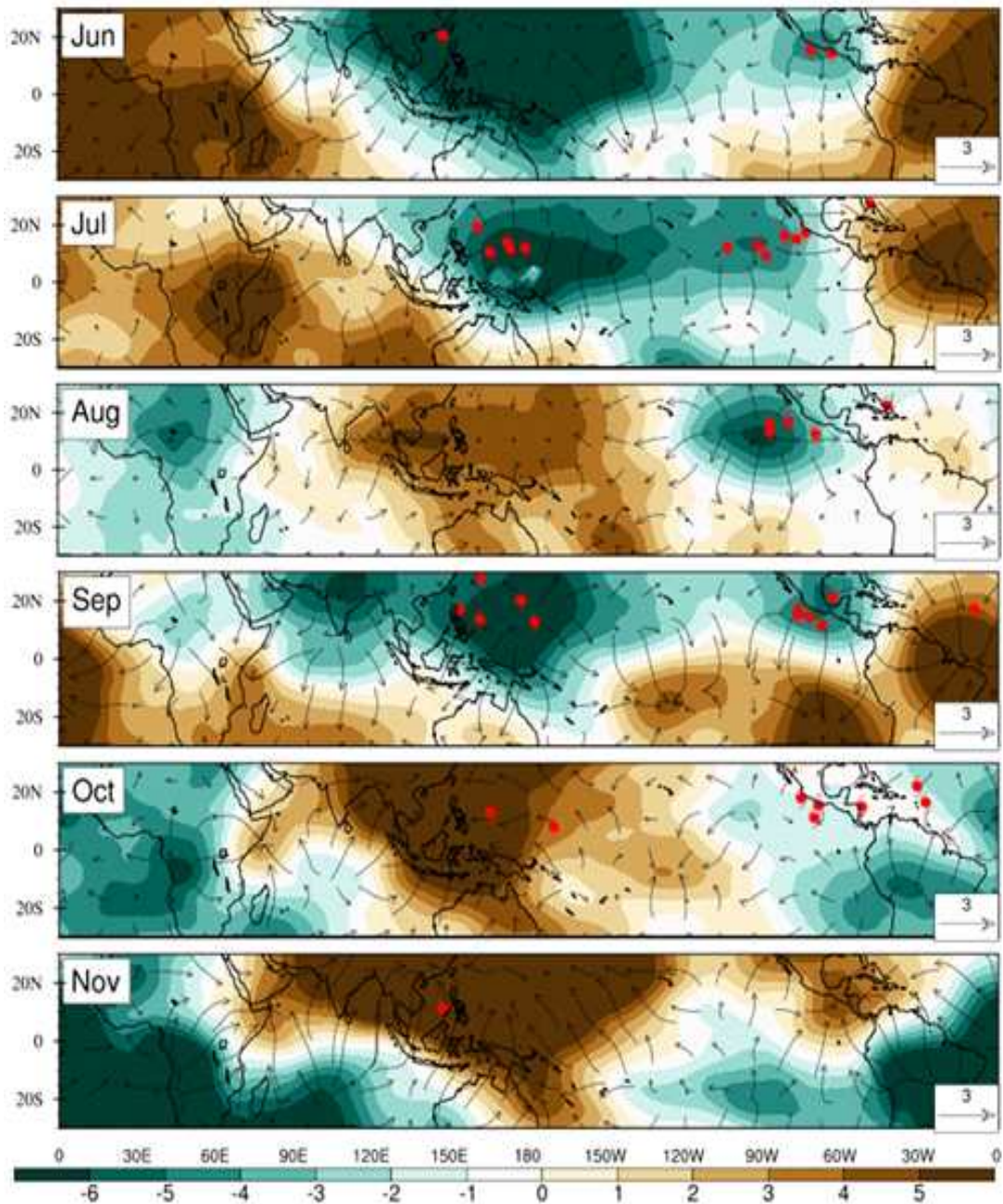


Fig. 13. Monthly mean velocity potential anomalies JJASON in 2014. Turquoise soliding indicates divergent and brown soliding indicates convergence and red marker is TC genesis location.

5.2 해역별 대기, 해양인자 선별

해역별 대기, 해양인자 선별을 위해 MPR, PGR, E-L MPR지역과 SST, MPI, Tmix60, Tmix80, Tmix105, Tmix120, OHC, MSLP, GH, RH, VWS와 ACE와의 상관관계를 구하였다(Table 5,6). 상관관계를 구할때는 95%이상 유의한 수준만 고려하였다. WNP의 해양인자에서는 얇은수심의 수온에서 깊은수심의 수온으로 갈수록 높은 상관도를 보였으며 그 중에서 MPI와 OHC가 높았다. ENP는 중층수온인 Tmix80과 Tmix105가 높은 상관도를 보였고 NA에서는 깊은수심의 수온보다 얇은수심의 수온으로 갈수록 상관성이 있었으며 MPI의 경우 0.51로써 다른 해양인자보다 높았다.

WNP의 대기인자에서는 고층의 지위고도보다 낮은층의 지위고도가 높은 상관도를 보였으며 MSLP가 -0.53으로 높은 상관도를 나타냈다. 이러한 음의 상관은 TC가 주로 발생하는 지역에서 나타나며 북서태평양에서 MSLP가 낮고 저기압성 아노말리가 분포할 때 TC발생 빈도가 많아진다는 것을 의미한다. ENP에서는 중층대기인 500hPa의 RH는 상관도가 매우 낮았으며 850hPa RH는 0.55로 높은 상관성을 보였다. 이는 ENP의 TC는 매우 강한 태풍이 카테고리 3이상의 태풍이 북서태평양보다 낮은 빈도로 발생하기 때문이다(Table 7). NA의 VWS는 MPR과 E-L MPR 보다 PGR에서 -0.59의 높은 상관도가 나타났다. PGR에서는 TC가 발생하기 좋은 환경임을 시사해주나 다른 인자들의 PGR은 전부 낮은 상관성을 보였다.

Table 5. The results of Main Passage Region and Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region correlation for SST, MPI, Tmix60, Tmix80, Tmix105, Tmix120 and OHC in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.

Factor	Region	WNP	ENP	NA
SST-ACE	MPR	-0.51**	0.51**	0.23
	PGR	-0.06		0.39*
	E-L MPR	-0.54**	0.36*	0.41**
MPI-ACE	MPR	-0.6**	0.5**	-0.09
	PGR	-0.12		0.5**
	E-L MPR	-0.61**	0.28	0.51**
Tmix60-ACE	MPR	-0.45**	0.62**	0.11
	PGR	-0.36*		0.35*
	E-L MPR	-0.57**	0.53**	0.35*
Tmix80-ACE	MPR	-0.45**	0.61**	0.11
	PGR	-0.49**		0.31*
	E-L MPR	-0.59**	0.54**	0.32*
Tmix105-ACE	MPR	-0.47**	0.6**	0.08
	PGR	-0.55**		0.26
	E-L MPR	-0.59**	0.53**	0.28
Tmix120-ACE	MPR	-0.47**	0.59**	0.07
	PGR	-0.57**		0.25
	E-L MPR	-0.58**	0.52**	0.26
OHC-ACE	MPR	-0.56**	0.62**	0.04
	PGR	-0.58**		0.33*
	E-L MPR	-0.63**	0.57**	0.33*

Significance at ** 99 and * 95 percent level

Table 6. The results of Main Passage Region and Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region correlation for MSLP, GH, RH and VWS in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.

Factor	Region	WNP	ENP	NA
MSLP-ACE	MPR	-0.24	-0.52**	-0.34*
	PGR	-0.35*		-0.34*
	E-L MPR	-0.54**	-0.45**	-0.39*
500hPa GH -ACE	MPR	-0.29	-0.08	-0.08
	PGR	-0.04		-0.1
	E-L MPR	-0.26	-0.06	-0.1
850hPa GH -ACE	MPR	-0.3	-0.28	-0.33*
	PGR	-0.3		-0.22
	E-L MPR	-0.53**	-0.4*	-0.28
925hPa GH -ACE	MPR	-0.27	-0.37*	-0.34*
	PGR	-0.33*		-0.28
	E-L MPR	-0.53**	-0.42**	-0.33*
500hPa RH -ACE	MPR	-0.32*	0	0.23
	PGR	0.07		0.34*
	E-L MPR	-0.2	-0.04	0.42**
850hPa RH -ACE	MPR	-0.18	0.55**	0.19
	PGR	-0.09		-0.04
	E-L MPR	-0.17	0.01	-0.02
925hPa RH -ACE	MPR	-0.14	0.26	0.16
	PGR	0.17		0.18
	E-L MPR	-0.09	-0.19	0.22
VWS-ACE	MPR	-0.05	0.09	0.05
	PGR	-0.59**		-0.59**
	E-L MPR	-0.54**	-0.23	-0.5**

Significance at ** 99 and * 95 percent level

Table 7. The total genesis frequency and category three, four and five genesis frequency.

Year	Total genesis frequency			Cat3,4,5 genesis frequency		
	WNP	ENP	NA	WNP	ENP	NA
1979	17	10	9	6	2	2
1980	18	14	11	8	3	2
1981	23	15	11	4	1	3
1982	21	18	6	10	5	1
1983	21	19	4	6	8	1
1984	26	18	12	8	6	1
1985	21	22	11	4	5	3
1986	21	16	6	6	3	0
1987	21	18	7	11	4	1
1988	23	13	12	6	1	3
1989	26	17	11	7	4	2
1990	26	19	14	7	6	1
1991	25	13	8	10	4	2
1992	30	25	6	12	6	1
1993	24	14	9	7	7	1
1994	30	18	7	11	4	0
1995	24	10	19	7	3	5
1996	24	8	13	8	2	6
1997	26	17	8	10	7	1
1998	16	13	14	5	6	3
1999	18	9	12	3	2	5
2000	22	16	15	6	2	3
2001	24	15	15	10	1	4
2002	20	12	12	8	4	2
2003	18	15	13	9	0	3
2004	23	11	15	11	3	6
2005	20	14	28	9	0	7
2006	18	17	10	8	4	2
2007	20	10	15	7	1	2
2008	21	15	16	5	2	5
2009	20	18	9	6	4	2
2010	13	6	19	4	2	5
2011	15	11	20	6	5	4
2012	22	15	18	9	3	2
2013	26	16	13	11	1	0
2014	14	19	8	6	7	2
Sum	777	536	436	271	128	93
Percent				34.9	23.9	21.3

전체적으로 WNP와 NA는 E-L MPR이 MPR과 PGR보다 높은 상관성을 보였으며 ENP는 MPR이 E-L MPR과 PGR보다 높은 상관관계를 보였다. 이는 ENP의 ACE는 Niño3.4 SST와 상관관계가 작게 나타났고 육지로 상륙하는 TC가 적기 때문이다.

Table 8. The results of selection factor in Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region of Western North Pacific.

Ocean	Factor	Correlation
MPR	MPI	-0.6**
	OHC	-0.56**
	SST	-0.51**
	500hPa RH	-0.32*
PGR	Tmix120	-0.57**
	OHC	-0.58**
	MSLP	-0.35**
	VWS	-0.59**
E-L MPR	MPI	-0.61**
	OHC	-0.63**
	850hPa GH	-0.53**
	VWS	-0.54**

Significance at ** 99 and * 95 percent level

WNP에서 MPR, PGR, E-L MPR에서 상관관계가 높게 나타나는 해양, 대기인자를 선별한 결과, MPR에서는 MPI, OHC, SST, 500hPa RH이고 PGR은 Tmix120, OHC, MSLP, VWS이며 E-L MPR은 MPI, OHC, 850hPa GH, VWS가 선정되었다(Table 8). WNP에서는 다른지역보다 E-L MPR에 있는 해양, 대기인자들이 상관관계가 높았던 것은 WNP에서 ENSO 시그널이 지배적이고 WNP의 ACE의 성분분석 결과 ACE는 강도와 지속기간이 상관관계가 높았다. 이는 엘니뇨때 태풍의 생성이 남동쪽에 발생되어 강도와 지속기간이 커짐으로 ACE와의 상관도가 높았기 때문이다. 엘니뇨, 중립, 라니냐시기를 구별하여 빈도,

강도, 지속기간의 분포를 보면 WNP에서는 강도와 지속기간이 차이를 보인다 (Fig. 14).

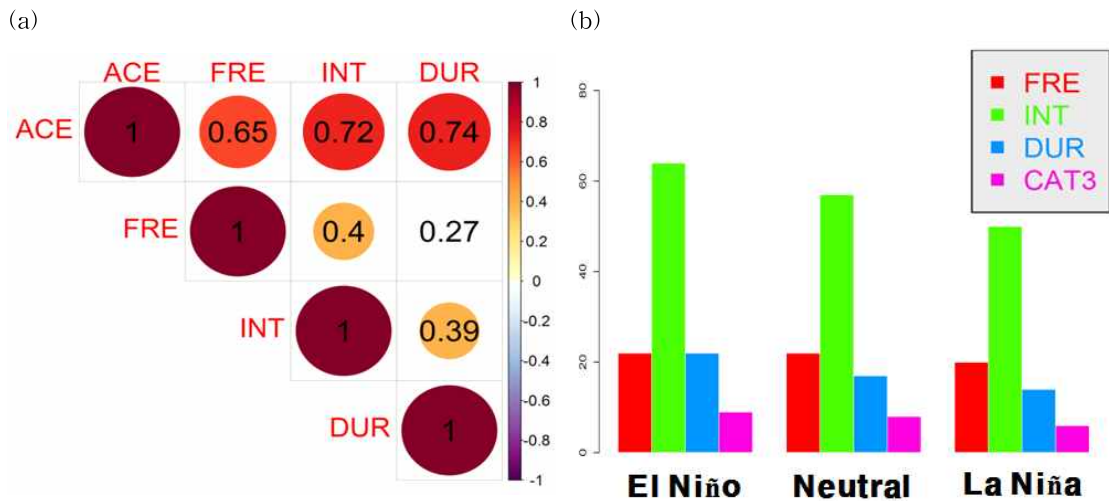


Fig. 14. Component analysis of ACE (a) Correlation of ACE and frequency, intensity, duration and (b) bar plot in Western North Pacific.

Table 9. The results of selection factor in Main Passage Region and E-L Main Passage Region of Eastern North Pacific.

Ocean	Variable	Correlation
MPR	Tmix60	0.62**
	OHC	0.57**
	850hPa RH	0.55**
	MSLP	-0.52**
E-L MPR	Tmix80	0.54*
	OHC	0.57**
	MSLP	-0.45**
	925hPa GH	-0.42**

Significance at ** 99 and * 95 percent level

ENP에서 MPR, E-L MPR에서 상관도가 높게 나타나는 해양, 대기인자를 선별한 결과, MPR에서는 Tmix60, OHC, 850hPa RH, MSLP이고 E-L MPR은

Tmix80, OHC, MSLP, 925hPa GH가 선정되었다(Table 9). ENP의 ACE의 성분분석 결과 ACE는 빈도와 지속기간이 상관관계가 높았다(Fig. 15). 이는 WNP와는 다르게 ENP에서는 엘니뇨때 태풍이 서쪽으로 더 멀리 이동하여 지속기간이 길어지고 태풍의 빈도도 라니냐때보다 더 많아지기 때문이다. ENSO의 영향으로 WNP와 ENP의 태풍의 반응이 다를 것을 보였다.

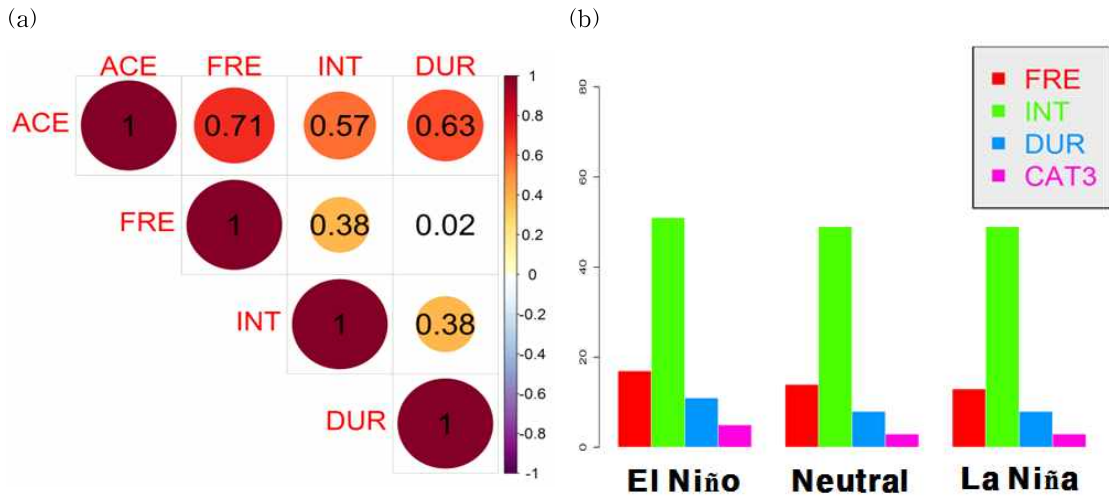


Fig. 15. Component analysis of ACE (a) Correlation of ACE and frequency, intensity, duration and (b) bar plot in Eastern North Pacific.

Table 10. The results of selection factor in Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region of North Atlantic.

Ocean	Variable	Correlation
MPR	925hPa GH	-0.34*
	850hPa GH	-0.33*
	MSLP	-0.34*
PGR	SST	0.39*
	MPI	0.5**
	500hPa RH	0.34*
	VWS	-0.59**
E-L MPR	MPI	0.51**
	500hPa RH	0.42**
	MSLP	-0.39*
	VWS	-0.49**

Significance at ** 99 and * 95 percent level

NA에서 MPR, PGR, E-L MPR에서 상관관계가 높게 나타나는 해양, 대기인자를 선별한 결과, MPR에서는 925hPa GH, 850hPa GH, MSLP이고 PGR은 SST, MPI, 500hPa RH, VWS이며 E-L MPR은 MPI, 500hPa RH, MSLP, VWS가 선정되었다(Table 10). MPR과 E-L MPR보다 PGR에 있는 해양, 대기인자들이 상관관계가 높게 분석된 이유로, PGR은 태풍이 주로 발생하는 지역이고 ACE의 성분분석을 했을 때 빈도와 강도가 상관관계가 높았기 때문으로 분석되었다. NA에서도 ENSO의 영향을 받기 때문에 엘니뇨, 중립, 라니냐의 시기에 따라 ACE에 영향을 끼치는 빈도와 강도의 구분이 뚜렷하다(Fig. 16). NA의 해양, 대기인자들은 Gray(1984, 1991)가 주장한 태풍의 발생에 중요한 물리적 요소로 상층과 하층 대류권 사이의 연직바람시어, 해양 열에너지, 중층대류권 상대습도 등의 인자와 일치한다.

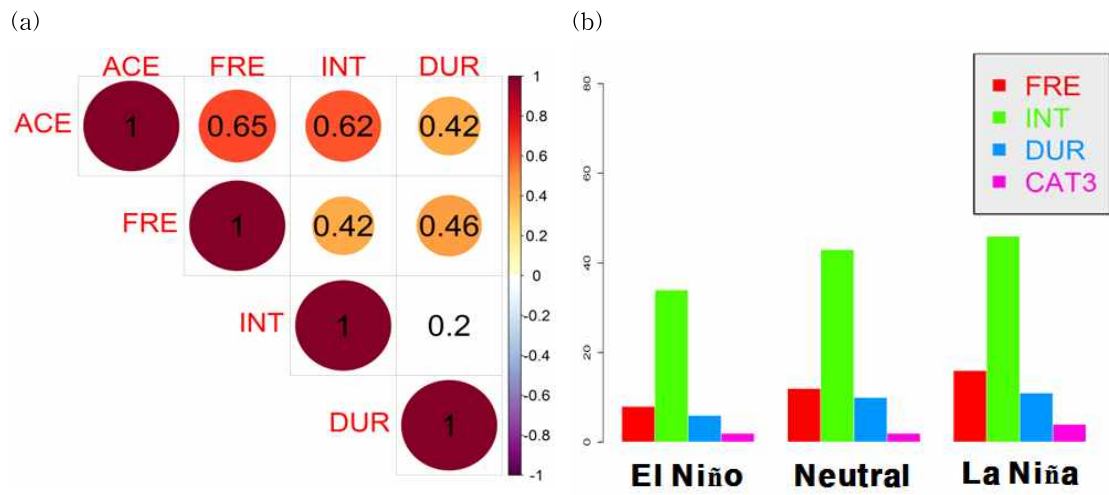


Fig. 16. Component analysis of ACE (a) Correlation of ACE and frequency, intensity, duration and (b) bar plot in North Atlantic.

6. 해역별 다중회귀모형

6.1 다중공선성

분산팽창지수(Variance Inflation Factor, VIF)는 최소자승법(Ordinary Least Squares, OLS) 회귀분석에서 다중공선성(multicollinearity)의 정도를 정량화하기 위해 사용된다(6.1).

$$VIF = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (6.1)$$

다중공선성은 독립변수끼리의 강한 상관관계로 인해 임의의 독립변수가 다른 변수를 통해서 설명 될 수 있다는 뜻으로 회귀분석에서 설명변수들 간의 다중적인 상관관계를 뜻한다. R^2 값은 OLS 회귀분석에서 흔히 말하는 설명 분산이고 Myers(1990)은 VIF 값이 10 이상이라면 다중공선성으로 인한 문제가 있음을 의미하며, VIF 값이 5이상이면 주시해야할 정도의 문제가 있음을 의미한다.

Table 11. The results of Main Passage Region variance inflation factor in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.

Ocean	Factor	VIF
WNP	MPI	5.99
	OHC	6.08
	SST	7.57
ENP	500hPa RH	2.95
	Tmix60	6.24
	OHC	7.87
	850hPa RH	1.12
NA	MSLP	1.87
	925hPa GH	2571.10
	850hPa GH	638.57
	MSLP	704.09

최종 선정된 MPR의 해역별 인자중에서 VIF가 5이하인 작은 인자들을 선별하고 1개부터 3개에서 4개까지의 다중회귀식을 만들어 설명분산이 가장 크게 나올수 있는 인자들을 선정하였다. WNP에서는 4개 인자들 중에 다중공선성으로 인해서 OHC, MPI, SST가 상관관계가 높아 OHC와 SST를 제거하여 최종적으로 MPI와 850hPa GH를 선별하였다. ENP에서는 Tmix60과 OHC가 상관관계가 높아 OHC를 제거하여 Tmix60, 850hPa RH, MSLP를 선택하였고 NA에서는 MSLP를 최종적으로 선정하였다(Table 11).

Table 12. The results of Prime Genesis Region variance inflation factor in Western North Pacific and North Atlantic.

Ocean	Factor	VIF
WNP	Tmix120	21.47
	OHC	21.017
	MSLP	1.18
	VWS	1.06
NA	SST	7.64
	MPI	8.55
	500hPa RH	1.17
	VWS	2.19

PGR에서도 동일한 방법으로 인자들을 선별한 결과, WNP는 Tmix120, OHC가 상관관계가 높아 OHC를 제거하여 Tmix120, MSLP, VWS가 선택되었고 NA에서는 SST와 MPI가 상관도가 높아 SST, 500hPa RH, VWS를 최종적으로 선정하였다(Table 12).

Table 13. The results of E-L Main Passage Region variance inflation factor in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.

Ocean	Factor	VIF
WNP	MPI	3.84
	OHC	4.637
	850hPa GH	1.53
	VWS	2.01
ENP	Tmix80	4.38
	OHC	9.81
	MSLP	63.97
	925hPa GH	47.18
NA	MPI	2.22
	500hPa RH	1.22
	MSLP	2.31
	VWS	2.01

WNP의 E-L MPG는 MPI, OHC가 상관관계가 높아 OHC를 제거하여 최종적으로 MPI와 850hPa GH, VWS를 선별하였고 ENP에서는 Tmix80과 OHC가 상관관계가 높아 OHC를 제거하고 MSLP와 925hPa GH 중 MSLP를 제거하여 Tmix80, 925hPa GH를 선택하였다. NA에서는 4개의 인자 모두 VIF가 5이하이기 때문에 4개부터 1개까지 가장 설명력이 좋은 인자를 선출한 결과 MPI, 500hPa RH, MSLP, VWS를 최종적으로 선별하였다(Table 13).

6.2 해역별 다중회귀식

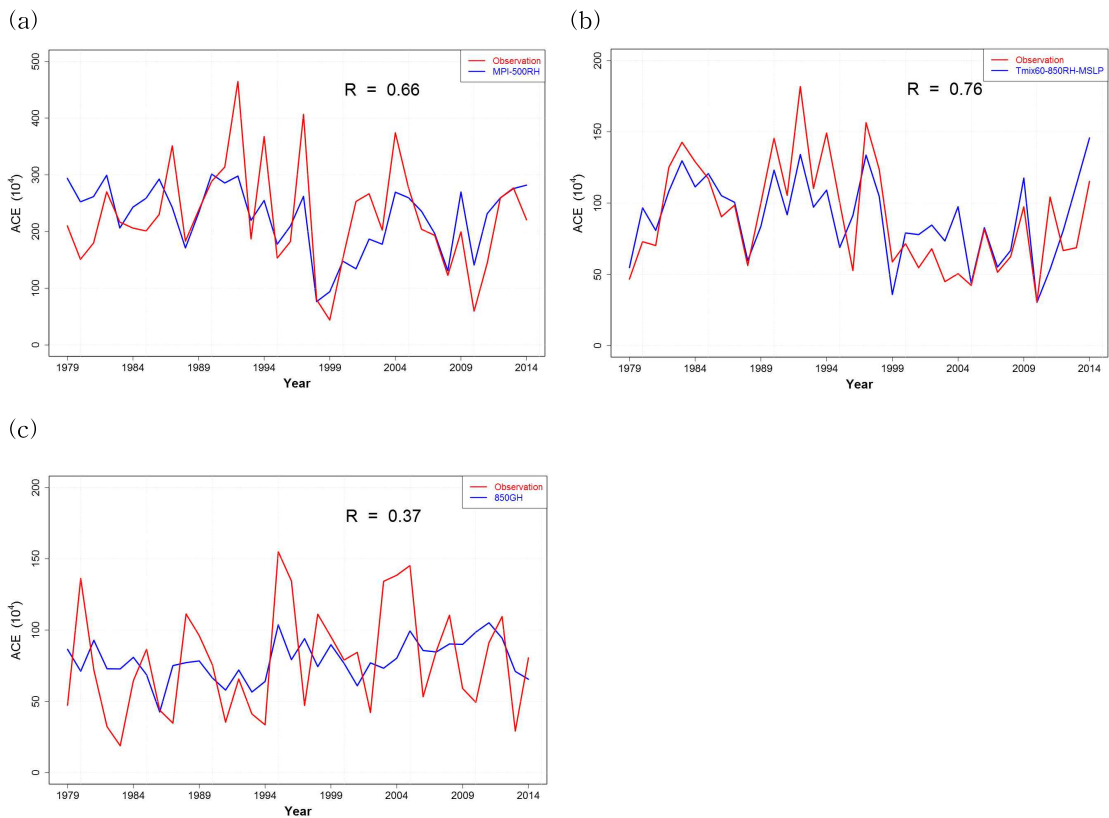


Fig. 17. Main Passage Region multi regression model in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Red line indicates observaion and blue line indicates multi regression result using select factor.

MPR에서 선정된 인자들을 이용하여 해역별 다중회귀식을 비교한 결과, WNP에서는 0.66, ENP에서는 0.76, NA에서는 0.37의 상관도를 보였다(Fig. 17). ENP가 WNP와 NA보다 상관관계가 높음은 태풍이 많이 지나가는 환경이 TC활동에 영향이 큰 것으로 분석되었다.

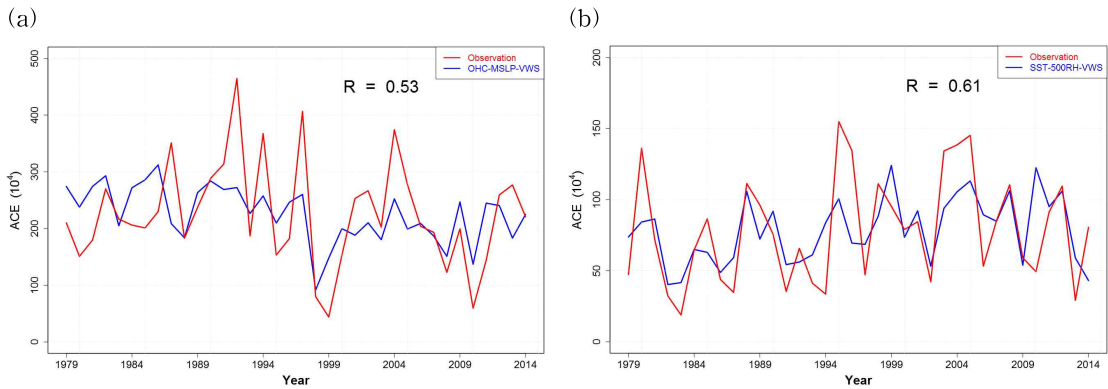


Fig. 18. Prime Genesis Region multi regression model in (a) Western North Pacific and (b) North Atlantic. Red line indicates observaion and blue line indicates multi regression result using select factor.

PGR에서 선정된 인자들을 이용하여 해역별 다중회귀식을 비교한 결과, WNP에서는 0.53, NA에서는 0.61의 상관도를 보였다(Fig. 18).

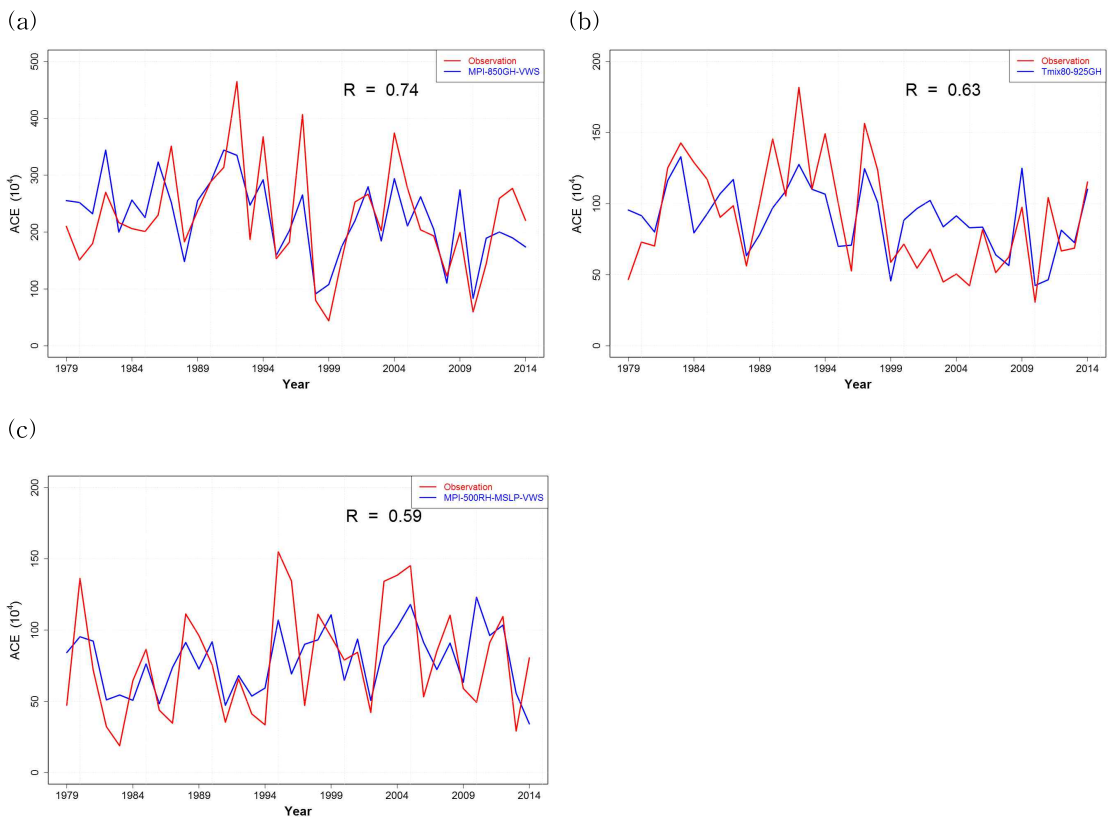


Fig. 19. E-L Main Passage Region multi regression model in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Red line indicates observaion and blue line indicates multi regression result using select factor.

E-L MPR에서 선정된 인자들을 이용하여 해역별 다중회귀식을 비교한 결과, WNP에서는 0.74, ENP에서는 0.63, NA에서는 0.59의 상관도를 보였다(Fig. 19). E-L MPR은 WNP가 ENP와 NA보다 상관관계가 높음은 ENSO로 인한 태풍 발생위치가 남동쪽으로 발생되어 ACE의 기여도가 달라지기 때문으로 분석되었다.

Table 14. Correlation coefficient of Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region in Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.

Ocean	Region	Correlation
WNP	MPR	0.66**
	PGR	0.53**
	E-L MPR	0.74**
ENP	MPR	0.76**
	E-L MPR	0.63**
NA	MPR	0.37*
	PGR	0.61**
	E-L MPR	0.59**

Significance at ** 99 and * 95 percent level

MPR, PGR, E-L MPR중에 ACE 변동성을 가장 잘 설명할 수 있는지를 비교하기 위해 해역별 상관계수를 나타내었다(Table 14). WNP에서는 E-L MPR지역이 0.74로 ACE와의 상관도가 가장 높음은 WNP의 ACE는 강도와 지속기간이 ACE와 상관도가 높아 태풍 발생위치가 남동쪽에서 발생하는 것이 중요하다(Fig. 17). 태풍 발생위치는 ENSO로 인해 조절됨이 밝혀진바 있고 WNP에서 ACE는 ENP와 NA와 달리 Niño3.4 지수와 상관도가 높아 ENSO의 영향이 크기 때문에 E-L MPR이 MPR과 PGR보다 상관계수가 높았다.

ENP에서는 0.76으로 MPR이 컸던 이유로, 육지의 영향을 많이 받는 WNP와

NA와 달리 무역풍으로 인해 서쪽으로 이동하기 때문에 육지의 영향을 거의 받지 않기 때문으로 분석되었다. 또한 태풍발생위치가 ENSO의 영향에 관계없이 거의 유사한 위치에서 발생한다. ENP의 ACE는 빈도와 지속기간과 상관도가 큰 발생위치가 비슷하므로 많이 발생하는 것이 ACE의 기여도가 높기 때문이다.

NA는 PGR에서 0.61, E-L MPR에서 0.59로 나타났다. 이는 NA의 주로 태풍이 생성되는 지역과 ENSO가 영향을 받는 지역이 유사하기 때문에 상관계수가 비슷하게 나타난 것으로 분석되었다.

Table 15. The results of final factor in Main Passage Region, Prime Genesis Region and E-L Main Passage Region of Western North Pacific, Eastern North Pacific and North Atlantic.

Ocean	Region	Factor
WNP	E-L MPR	MPI
		850hPa GH
		VWS
ENP	MPR	Tmix60
		850hPa RH
		MSLP
NA	PGR	SST
		500hPa RH
		VWS

북서태평양, 북동태평양, 북대서양의 상관관계가 높은 지역과 해양, 대기인자들을 최종적으로 선별하였다(Table 15).

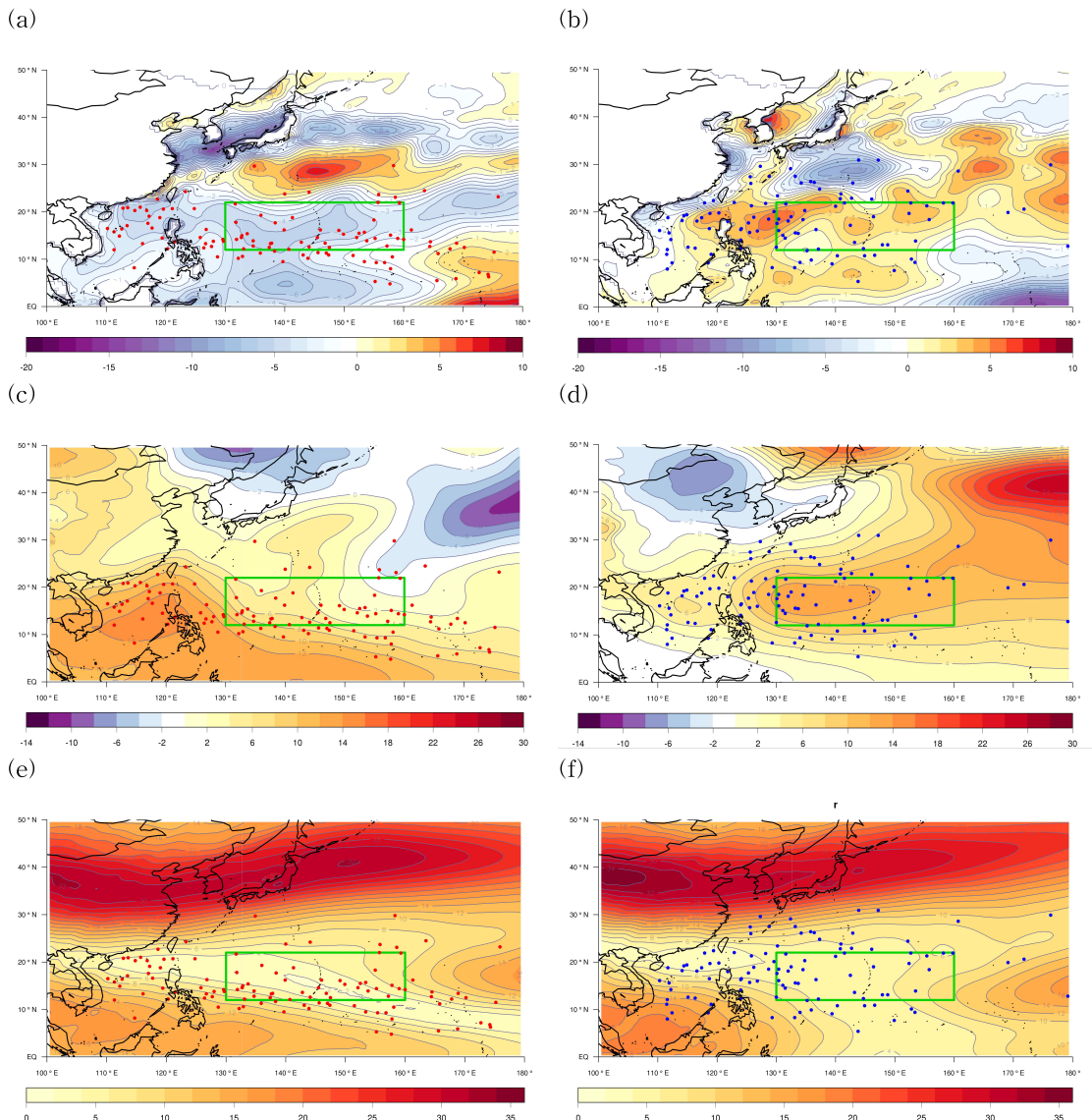


Fig. 20. Composite of select factor for WNP TC genesis (a) MPI anomaly in El Niño (b) MPI anomaly in La Niña (c) 850hPa GH anomaly in El Niño (d) 850hPa GH anomaly in La Niña (e) VWS anomaly in El Niño (f) VWS anomaly in La Niña. Red point indicates when the TC frequency location El Niño and blue point La Niña. Green box indicates E-L Main Passage Region.

북서태평양에서 엘니뇨, 라니냐를 구별한 선별된 인자 중 MPI의 평균장을 살펴보면, 엘니뇨시기에 중앙태평양으로 Warm pool이 이동하여 MPI가 중앙태평양쪽에 평년보다 커지고 라니냐시기에는 반대로 나타난다. Warm pool의 이동으로 인해 E-L MPR의 아노말리의 차이가 엘니뇨, 라니냐시기일 때 뚜렷하게 보인다. 엘니뇨시기일때의 850hPa GH의 분포를 보면 북서태평양 고기압이 평년

보다 낮아서 중위도 방향으로 상륙할수 있게 유리한 환경이 되어있고 태풍의 발생 지역도 850hPa GH가 높은지역보다는 낮은 지역에 발생분포가 나타난다. E-L MPR 또한 라니냐시기보다는 엘니뇨시기일 때 850hPa GH가 낮다. VWS는 엘니뇨시기에 몬순기압골의 확장으로 10이하의 VWS가 저위도쪽으로 넓게 분포하여 태풍이 남동쪽에 발생할수 있는 용이한 환경이 형성되어 있으며 라니냐시기는 엘니뇨시기보다 북서쪽에서 발생할 수 있다. 따라서 엘니뇨시기일 때 태풍의 발생이 남동쪽으로 발생함으로써 지속기간이 길어짐에 따라 해양의 열에너지를 공급받기 때문에 ACE가 커지게 된다.

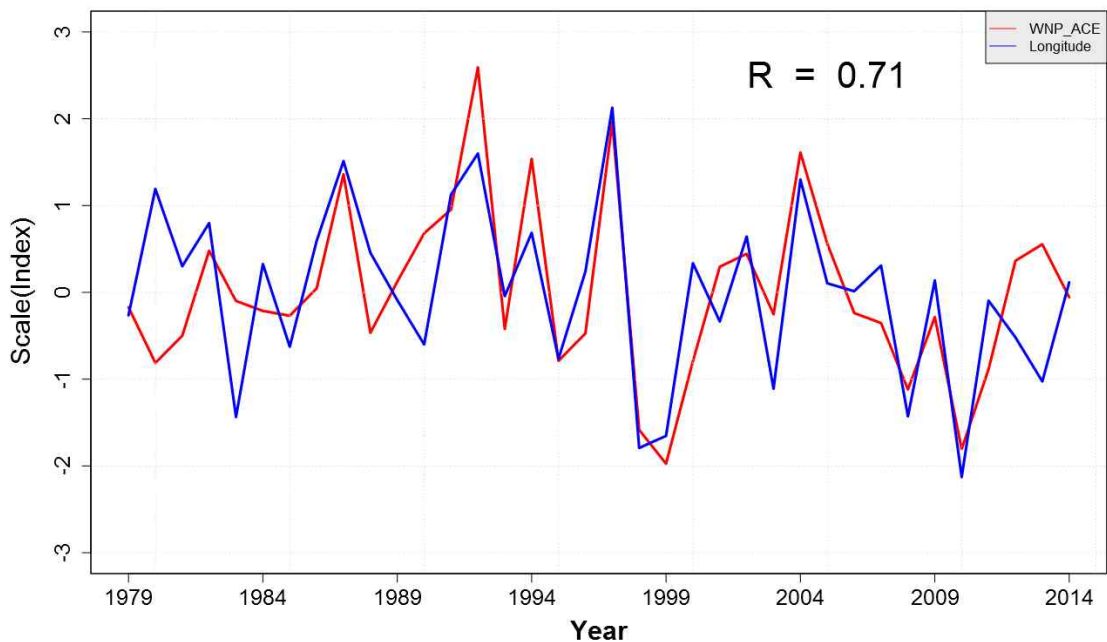


Fig. 21. Standardize timeseries of ACE and longitude in Western North Pacific. Red lines indicates ACE and blue line is longitude.

Fig.21은 북서태평양의 ACE와 평균 경도를 표준화하여 상관관계를 나타낸 시계열이다. 경도가 커짐에 따라 ACE도 같이 커지고 있으며 0.71의 양의 상관관계를 보인다. 이는 95% 신뢰수준에서 유의한 상관을 나타낸다.

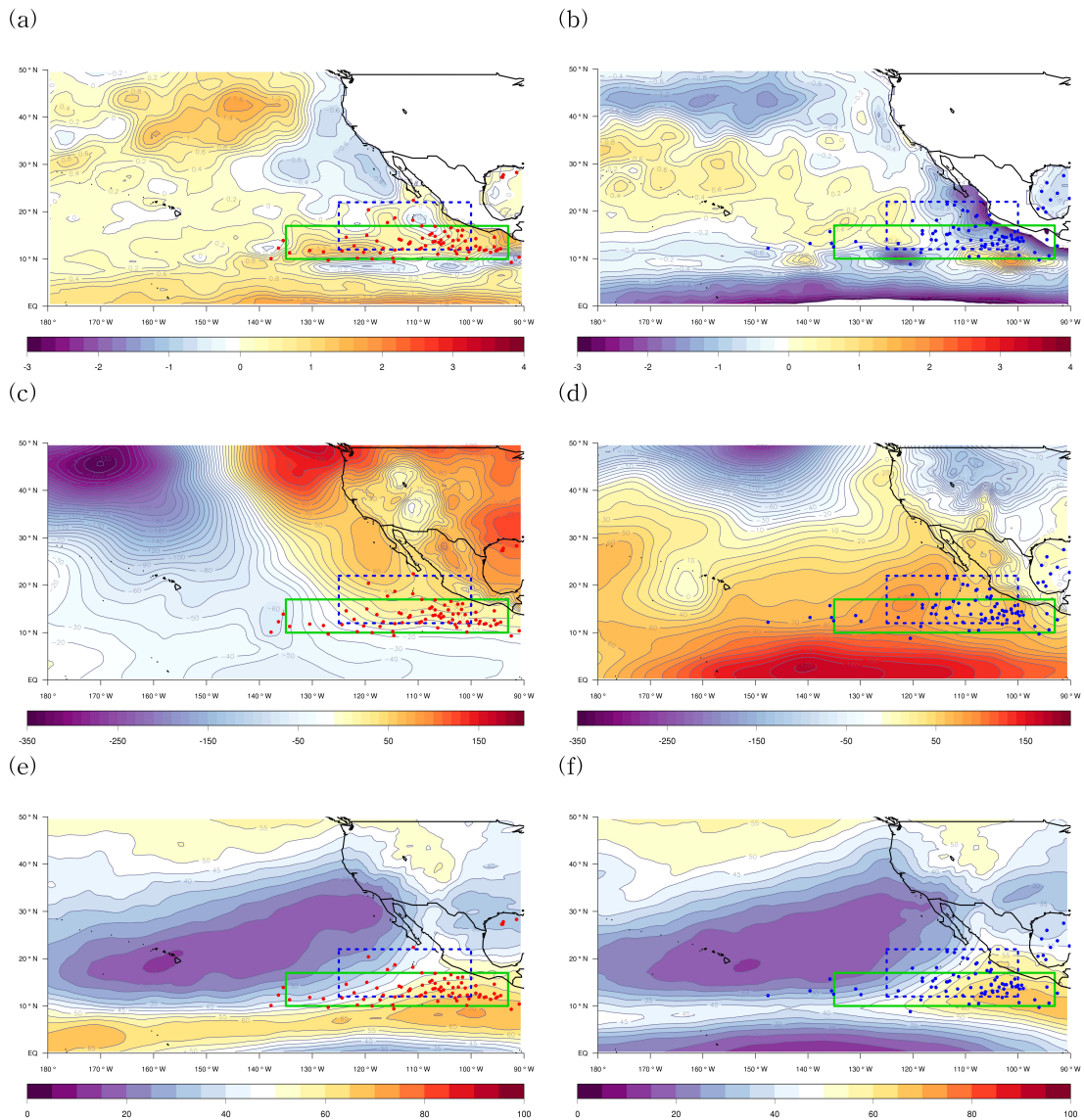


Fig. 22. Composite of select factor for ENP TC genesis (a) T60 anomaly in El Niño (b) T60 anomaly in La Niña (c) MSLP anomaly in El Niño (d) MSLP anomaly in La Niña (e) 850hPa RH anomaly in El Niño (f) 850hPa RH anomaly in La Niña. Red point indicates when the TC frequency location El Niño and blue point La Niña. Green box indicates E-L Main Passage Region and blue dash box indicates Main Passage Region.

북동태평양에서 엘니뇨, 라니냐를 구별한 선별된 인자 중 Tmix60의 평균장을 살펴보면, 엘니뇨시기에 MPR의 Tmix60이 평년보다 커지고 라니냐시기에 평년보다 작아진다. 이로 인해 태풍의 발생도 엘니뇨시기일때는 서쪽으로 멀리서 발생되어 이동할 수 있는 환경이 이루어지고 라니냐시기일때는 평년보다 Tmix60이

낮아져 엘니뇨시기일때보다 해양에너지원이 줄어들기 때문에 북동쪽에서 주로 발생하게 된다. 엘니뇨시기일때의 MSLP의 분포를 보면 북태평양 고기압의 중심이 평년보다 낮아짐으로 인해 태풍의 진로가 서쪽으로 이동이 용이한 환경을 만들어주고 라니냐시기일때는 그 반대의 환경을 보인다. 이는 동태평양과 중앙 태평양에 평년보다 수온이 높아져 대기순환의 변화에 따라 MSLP의 분포가 바뀌게 된다. 850hPa RH는 엘니뇨시기에 동태평양의 수온이 높아짐에 따라 MPR지역의 상대습도가 높아지고 서쪽으로 높은 상대습도의 확장으로 태풍이 좀 더 서쪽으로 이동하도록 호조건의 환경이 만들어진다. 라니냐시기일때는 육지근처에서 발생하는 빈도가 많아 강하게 발달할 수 없기 때문에 약한 강도가 나타나게 된다(Fig.22).

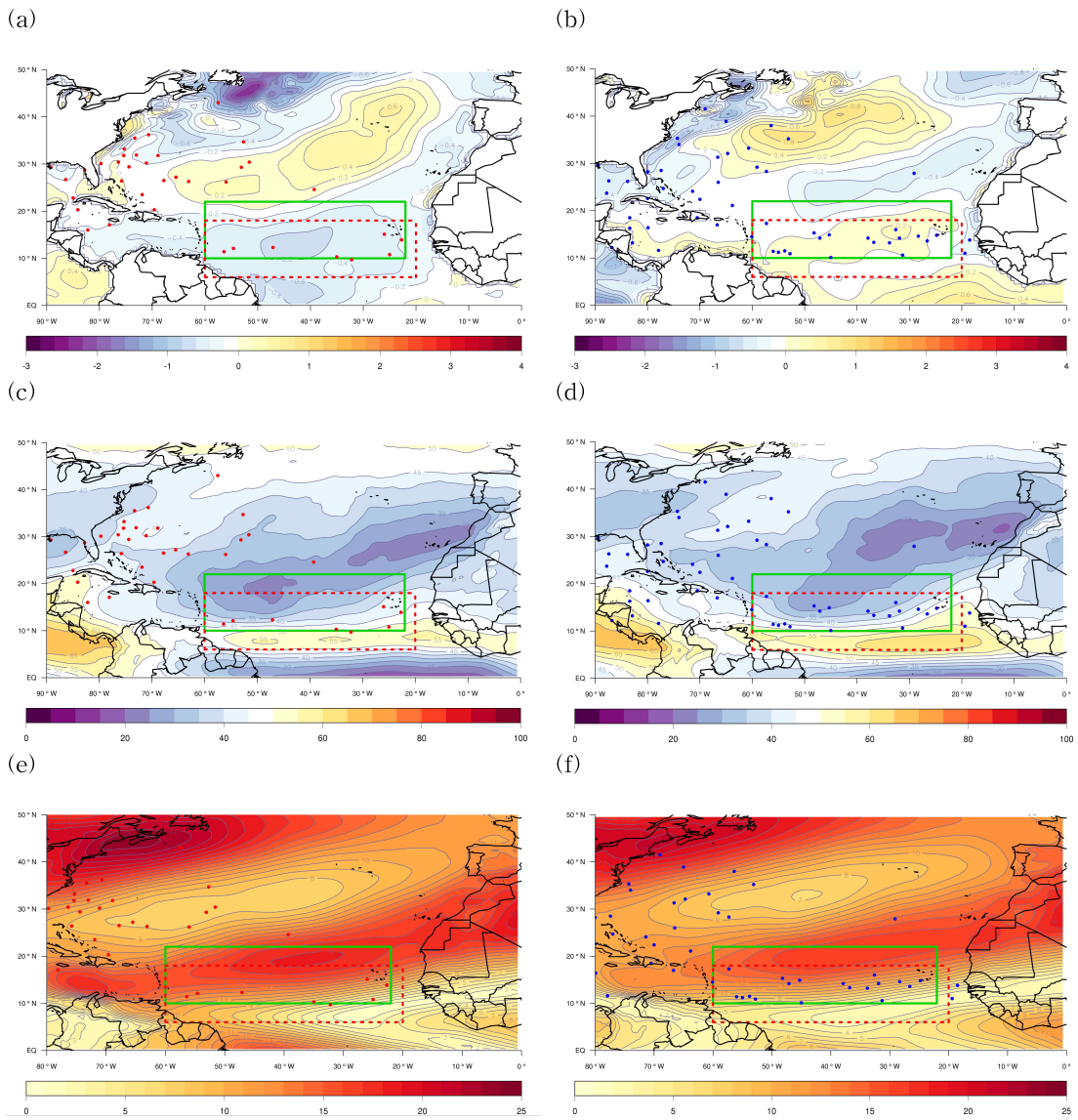


Fig. 23. Composite of select factor for NA TC genesis (a) SST anomaly in El Niño (b) SST anomaly in La Niña (c) 500hPa RH anomaly in El Niño (d) 500hPa RH anomaly in La Niña (e) VWS anomaly in El Niño (f) VWS anomaly in La Niña. Red point indicates when the TC frequency location El Niño and blue point La Niña. Green box indicates E-L Main Passage Region and red dash box indicates Prime Genesis Region.

북대서양에서 엘니뇨, 라니냐를 구별한 선별된 인자 중 SST의 평균장을 살펴 보면, 엘니뇨시기에 PGR에서 평년보다 SST가 낮아지고 라니냐시기일때는 높아져 라니냐시기에 강도가 더 강한 태풍이 생성될 수 있게 용이하다. 엘니뇨시기 일때의 500hPa RH의 분포를 보면 라니냐시기일 때 수온이 높음에도 불구하고

PGR의 상대습도가 높다는 것은 포화수증기량도 커지고 수증기량은 더 커진다는 것을 의미한다. 많은 수증기량으로 인해 강한 태풍이 형성 될 수 있는 환경이 만들어진다. VWS는 라니냐시기에 10이하의 VWS가 PGR에 넓게 분포하여 태풍이 발생할수 있는 용이한 환경이 형성되어 있으며 엘니뇨시기는 라니냐시기보다 VWS이 크기 때문에 발생되기 어렵다. 북대서양의 선별한 인자들은 Gray(1984, 1991)가 태풍의 발생에 중요한 물리적 요소와 동일하다(Fig.23).

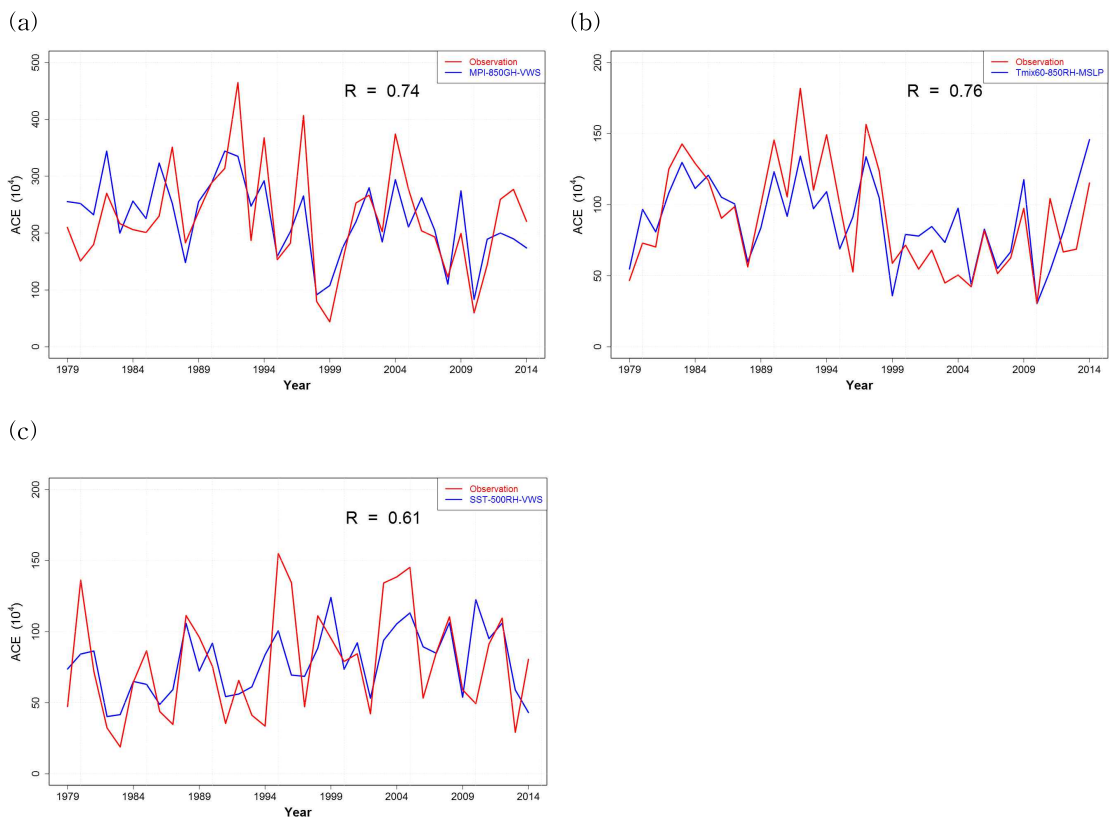


Fig. 24. The timeseries of ACE and multi regression model result in (a) Western North Pacific, (b) Eastern North Pacific and (c) North Atlantic. Red lines indicates observation and blue line is multi regression model result using select factor.

해역별로 선별된 해양, 대기인자를 통한 최고의 멀티 모델을 요약하면 WNP에서는 0.74, ENP에서는 0.76, NA에서는 0.61의 상관관계를 보였다(Fig.24).

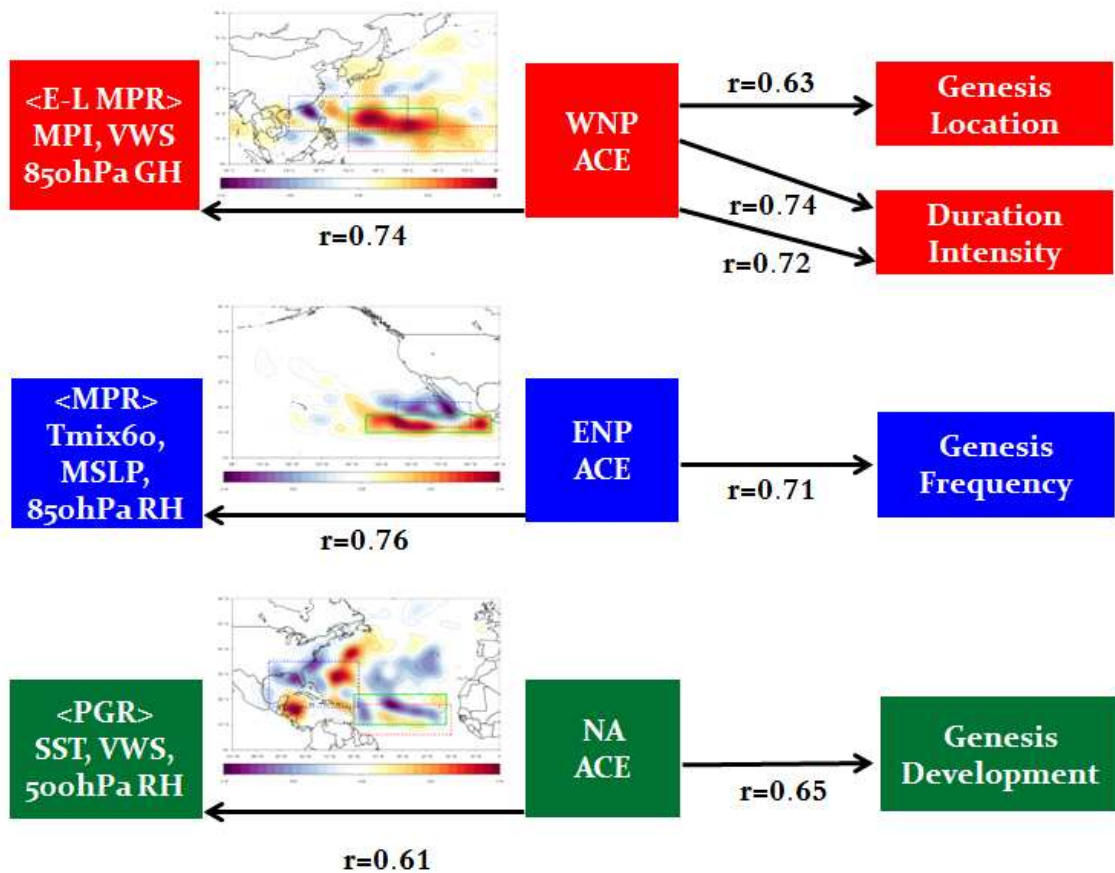


Fig. 25. Flow diagram of key correlations. Flow diagram showing a total research summary of the key correlations.

북서태평양에서의 ACE는 지속기간과 0.74, 강도와 0.72의 상관관계를 보인다. 엘니뇨시기일 때 태풍발생위치가 남동쪽에 생김으로써 지속기간과 강도가 커짐에 따라 ACE에 영향을 미치기 때문이며 이러한 위치(경도)에 따른 ACE의 상관도는 0.63의 양의 상관을 보였다. WNP의 ACE와 관련이 깊은 지역은 E-L MPR이고 MPI, VWS 850hPa GH를 이용한 회귀식과 ACE는 0.74의 상관도를 보였다. 동태평양에서의 ACE는 발생빈도와 0.71의 상관관계를 보임은 무역풍의 영향으로 서쪽으로 태풍이 이동을 하기 때문에 육지의 영향을 북서태평양과 북대서양에 비해 적게 받는다. 이로 인해 태풍의 발생 갯수가 많을수록 ACE가 커진다. ENP의 ACE와 관련이 깊은 지역은 MPR이고 Tmix60, MSLP, 850hPa RH를 이용한 회귀식과 ACE는 0.76의 상관도를 보였다. 북대서양에서의 ACE는 빈도와 0.65, 강도와 0.62의 상관관계를 보였다. 이는 태풍의 발생과 발달을 할 수 있는

PGR이 관련이 깊었고 SST, VWS, 500hPa RH를 이용한 회귀식과 ACE는 0,61의 상관도를 보였다(Fig.25).

7. 요약 및 결론

본 연구에서는 북서태평양, 북동태평양, 북대서양에서 열대저기압 (Tropical Cyclone, TC) 활동과 관련된 해양, 대기인자와 엘니뇨 남방진동 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 영향의 해역별 차이의 특성을 살펴보고자 하였다.

TC 활동을 분석하기 위해 TC의 지속기간, 강도, 빈도가 모두 고려된 지수인 누적태풍에너지 (Accumulated Cyclone Energy, ACE)를 사용하였다. 각 해역별로 태풍이 많이 지나가는 지역인 주요진로지역 (Main Passage Region, MPR)과 주로 태풍이 생성되는 지역인 주요생성지역 (Prime Genesis Region, PGR), ENSO의 영향을 받는 지역인 E-L MPR에 대해 해수면온도 (Sea Surface Temperature, SST), 해양열용량 (Ocean Heat Content, OHC), 수직혼합온도 (Tmix60, Tmix80, Tmix105, Tmix120), 최대잠재강도 (Maximum Potential Intensity, MPI), 해면기압 (Mean Sea Level Pressure, MSLP), 연직바람시어 (Vertical Wind Shear, VWS), 500hPa, 850hPa, 925hPa 상대습도 (Relative Humidity, RH), 지위고도 (Geopotential Height, GH)를 이용하여 ACE와 해양, 대기인자와의 상관관계를 조사하였다.

북서태평양에서의 ACE와 세가지 구성요소들간의 상관관계를 분석해보면 지속기간과 0.74, 강도와 0.72의 상관관계를 보였다. 이러한 높은 상관관계는 엘니뇨 시기일때 태풍발생위치가 남동쪽에 생김으로써 지속기간과 강도가 커짐에 따라 ACE에 영향을 미치기 때문으로 분석되었다. 실제로 태풍발생위치 (경도)와 ACE의 상관도는 0.71의 높은 양의 상관을 보였다. 한편 북서태평양의 ACE와 관련이 깊은 지역은 E-L MPR로 나타났고 이 지역에 대해 평균된 MPI, VWS 850hPa GH를 이용한 회귀식과 ACE는 0.74의 상관도를 보였다.

북동태평양에서의 ACE와 세가지 구성요소들간의 상관관계를 분석해보면 빈도와 0.71의 상관관계를 보였다. 이러한 높은 상관관계는 무역풍 영향으로 대부분의 태풍들이 서쪽으로 이동하여 북서태평양과 북대서양과 달리 태풍의 지속기간과 강도가 ACE에 크게 기여하지 않기 때문이다. 태풍의 발생 갯수가 많을수록

북동태평양의 ACE가 커지는 것으로 분석되었다. 북동태평양의 ACE와 관련이 깊은 지역은 MPR로 나타났고 이 지역에 대해 평균된 Tmix60, MSLP, 850hPa RH를 이용한 회귀식과 ACE는 0.76의 상관도를 보였다.

북대서양에서의 ACE와 세가지 구성요소들간의 상관관계를 분석해보면 빈도와 0.65, 강도와 0.62의 상관관계를 보였다. 이는 TC발생과 관련된 주요생성지역(PGR)과 관계가 깊었으며 이 지역과 관련된 인자는 SST, VWS, 500hPa RH로써 Gray(1984)가 제시한 태풍의 발생에 중요한 물리적 요소와 동일하다 이들 인자와 PGR을 이용한 회귀식과 ACE는 0.61의 상관도를 보였다. E-L MPR에서도 0.59의 상관관계를 보임은 PGR과 E-L MPR의 위치가 비슷하였고 PGR 또한 ENSO의 영향을 유의하게 받는 것을 내포하고 있다. 하지만 동태평양과 북대서양은 북서태평양보다 ENSO와의 상관관계가 낮기 때문에 다른 메커니즘의 후속연구가 필요하다.

향후 ENSO 뿐만 아니라 다른 기후 메커니즘으로 인한 지역을 설정하여 예측 인자 발굴이 필요하고 TC활동과 해양, 대기인자와의 선별된 예측인자들은 ACE 통계모델 결과를 뒷받침하는 근거로 활용가능하며 장기적인 변화를 대응하는데 필요한 자료가 될 것이라 사료된다.

참고문헌

- Bove, M. C., J. B. Elsner, C. W. Landsea, X. Niu, and J. O'Brien, 1998: Effect of El Niño on U.S. landfalling hurricanes, revisited. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2477–2482.
- Camargo, S. J., and A.H. Sobel, 2005: Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *J. Climate*, 18, 2996–3006.
- Chan, J. C. L., 1985: Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon. *Mon. Wea. Rev.*, 113, 599–606.
- Chan, 2000: Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events. *J. Climate*, 13, 2960–2972.
- Chia, H. H., and C. F. Ropelewski, 2002: The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the northwest Pacific. *J. Climate*, 15, 2934–2944.
- Clark, J. D., and P. Chu, 2002: Interannual variation of tropical cyclone activity over the central North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 403–418.
- Dong, K. Q., 1988: El Niño and tropical cyclone frequency in the Australian region and the North-western Pacific. *Aust. Meteor. Mag.*, 36, 219–255.
- Elsner, J. B., and A. B. Kara, 1999: *Hurricanes of the North Atlantic: Climate and Society*. Oxford University Press, 488 pp.
- Elsner, J. B., and K. B. Liu, 2003: Examining the ENSO–typhoon hypothesis. *Climate Res.*, 25, 43–54.
- Emanuel, 1999: Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, 401(6754), 665–669.
- Emanuel, 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686–688.
- Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Núñez, A. M., & Gray, W. M. (2001). The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293(5529), 474–479.

- Gray, W. M., 1984: Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1669–1683.
- Gray, and J. D. Sheaffer, 1991: El Niño and QBO influences on tropical cyclone activity. *Teleconnections Linking Worldwide Anomalies*, M. H. Glantz, R. W. Katz, and N. Nicholls, Eds., Cambridge University Press, 257–284.
- Irwin, R. P., and R. Davis, 1999: The relationship between the Southern Oscillation Index and tropical cyclone tracks in the eastern North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2251–2254.
- Jin, F. F., Boucharel, J., & Lin, I. I. (2014). Eastern Pacific tropical cyclones intensified by El Niño delivery of subsurface ocean heat. *Nature*, 516(7529), 82–85.
- JTWC, cited 2015: Joint Typhoon Warning Center best track data site. [Available online at http://www.usno.navy.mil/NOOC/nmfc-ph/RSS/jtwc/best_tracks/.]
- Kang, N. Y., and Elsner, J. B (2012). Consensus on climate trends in western North Pacific tropical cyclones. *Journal of Climate*, 25(21), 7564–7573.
- Lander, M. A., 1994: An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 636–651.
- Landsea, R. A. Pielke Jr., A. M. Mestas-Nuñez, and J. A. Knaff, 1999: Atlantic basin hurricanes: Indices of climatic changes. *Climatic Change*, 42, 89–129.
- Leipper, D. and D. Volgenau, 1972: Hurricane heat potential of the gulf of mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 2, 218–224.
- Lin, I. I., Black, P., Price, J. F., Yang, C. Y., Chen, S. S., Lien, C. C., ... & D'Asaro, E. A. (2013). An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1878–1882.
- Myers, R. H, 1990: *Classical and modern regression with applications* Vol. 2. Belmont, CA:Duxbury Press.
- NHC, cited 2015: National Hurricane Center best track data site. [Available online at <http://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat/>.]
- Pielke, R. A., Jr., and C. W. Landsea, 1999: La Niña, El Niño and Atlantic hurricane damages in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 2027–2033.

- Pun, I. F., I. I. Lin, and M. H. Lo, 2013: Recent increase in high tropical cyclone heat potential area in the Western North Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4680–4684.
- Saunders, M. A., R. E. Chandler, C. J. Merchant, and F. P. Roberts, 2000: Atlantic hurricanes and NW Pacific typhoons: ENSO spatial impacts on occurrence and landfall. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1147–1150.
- Saunders, M. A., and A. S. Lea, 2008: Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature*, 451(7178), 557–560.
- Wang, and J. C. L. Chan, 2002: How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. *J. Climate*, 15, 1643–1658.
- Wu, M. C., W. L. Chang, and W. M. Leung, 2004: Impacts of El Niño– Southern Oscillation events on tropical cyclone land falling activity in the western North Pacific. *J. Climate*, 17, 1419–1428.

감사의 글

“최선은 한계가 아니다.” 처음 대학교에 왔을 때 학부 교수님께서 해주신 말씀이 저를 있게 해준 삶의 지표가 된 듯합니다. 최선을 다한 결과가 좋지 않더라도 다시 도전할수 있게 긍정적인 생각을 일깨워 주어 석사과정을 마칠 수 있게 되었습니다. 그동안 많은 가르침과 도움을 주신 소중한 분을 떠올리면서 감사의 말을 전하려고 합니다.

먼저 지도 교수이신 문일주 교수님께 진심으로 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 바쁘신 와중에도 늦은 시간 학교에 오셔서 논문 지도를 해주시지 않았으면 아마도 중도포기를 하지 않았을까 하는 생각이 듭니다. 교수님의 열정이 해양기상학 실험실과 선배님들을 이 자리에 있도록 하지 않았나 싶습니다. 그리고 졸업 논문 심사를 해주신 최광용 교수님과 변건영 박사님께 감사를 드립니다. 기초의 중요성을 알려주신 강기룡 박사님, 기상학이라는 학문에 흥미를 느끼도록 해주셨고 막히는 문제마다 해결책을 알려주시는 강남영 박사님, 좋은 말씀과 격려를 해주신 신동현 센터장님께 감사드립니다.

저의 졸업 논문이 나오기까지 많은 분들의 도움을 받았습니다. 그 분들의 도움이 없었다면 저의 인생은 어떤 길로 나아갔을지 모를 일입니다. 석사 과정 동안 거침없는 지적과 번뜩이는 아이디어를 알려주신 성훈이형, 프로그램 코딩의 고수이자 멘토이신 이우정 연구사님, 항상 따뜻하게 말씀해주시는 원성희 연구사님, 다양한 사고적인 생각을 알려주시는 민영이형, 자상하신 문현이형, 학부때부터 같이 공부해온 철이, 똑똑한 철민이, 분위기 메이커인 영윤이, 철이 짝꿍 태경이, 착하고 운동이 필요한 유현이, 예의 바른 혜지, 머리 좋은 태윤이, 내 동기인 유정이, 활달한 승용이, 섬세한 지희, 계속 귀찮게 해서 미안한 희주, 옆에서 믿고 바라봐 주는 상희에게 고마움을 전합니다.

타지에 있는 저를 믿어주시고 걱정해주시는 부모님과 예쁘고 착한 내 동생 소연이와 항상 의지가 되는 매제에게 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 타지에 있어도 힘들때마다 같이 놀아준 성준이와 기종이, 항상 미안한 맑음이, 재치있는 영훈이에게 고마운 마음을 전하며 항상 열심히 하고 은혜를 잊지 않는 사람이 되도록 하겠습니다.