



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](#)

석사학위논문

태풍 발생과 활동의 변동에 관련된
환경인자의 해석별 분석

제주대학교 대학원

해양기상학협동과정

김 지 희

2017년 2월

태풍 발생과 활동의 변동에 관련된 환경인자의 해역별 분석

지도교수 문 일 주

김 지 희

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2016 年 12 月

김지희의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ 인

위 원 _____ 인

위 원 _____ 인

제주대학교 대학원

2016 年 12 月

Investigation of interbasin environmental factors
related to variation of tropical cyclone genesis and
activity

Jihui Kim

(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

목차	i
LIST OF TABLES	ii
LIST OF FIGURES	iii
ABSTRACT	vi
1. 서론	1
2. 자료 및 방법	4
2.1 태풍의 잠재발생지수(Genesis Potential Index, GPI)	4
2.2 태풍활동 지수(Power Dissipation Index, PDI)	6
2.3 자료	8
2.4 연구 방법	9
3. 태풍발생과 관련된 환경인자 분석	12
3.1 해역별 태풍발생빈도와 환경인자 간의 상관관계	12
3.2 태풍의 주요 발생구역의 환경인자와 태풍발생빈도 간 상관도의 해역별 차이에 대한 원인 분석	22
4. 태풍활동과 관련된 환경인자 분석	27
4.1 해역별 태풍활동과 환경인자 간의 상관관계	27
4.2 태풍의 주요 활동구역의 환경인자와 PDI 간 상관도의 해역별 차이에 대한 원인분석	31
i) 북서태평양	31
ii) 북동태평양	37
5. 토의	49
6. 요약 및 결론	51
참고문헌	54

LIST OF TABLES

Table 1. Correlations between TC genesis frequency and environmental factors of GPI in the MGR of the western North Pacific, eastern North Pacific, and North Atlantic. Bold face indicates statistical significance at the 99% level.	13
Table 2. Correlations between PDI and environmental factors(vertical wind shear and sea surface temperature) in the Main Activity Region (MAR) of the western North Pacific, eastern North Pacific, and North Atlantic. Bold face indicates statistical significance at the 99% level. ..	27
Table 3. Correlations between PDI and environmental factors(vertical wind shear and sea surface temperature) in the main activity region (MAR) and high-correlation region (HCR) of the western North Pacific. Bold face (underlined) indicates statistical significance at the 99% (95%) level.	33
Table 4. Correlations between total PDI and PDI of TCs formed in each region and contribution of PDI in each region to total PDI variation. Bold face (underlined) indicates statistical significance at the 99% (95%) level.	34
Table 5. Correlations between PDI components and environmental factors in each region. Bold face (underlined) indicates statistical significance at the 99% (95%) level.	35

LIST OF FIGURES

Fig. 1. The number of tropical cyclones (NTC) over the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific, and (c) North Atlantic basins in 1970 to 2015.	9
Fig. 2. Genesis locations of tropical cyclones (TC) over the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific, and (c) North Atlantic basins in JASO (July, August, September, and October). The box is the area used to define the main genesis region (MGR) for each basin.	11
Fig. 3. Same as Fig. 2, but Power dissipation index (PDI). The box is the area used to define the main activity region (MAR) for each basin. ...	11
Fig. 4. Maps of correlation coefficients of gridded vertical wind shear with number of tropical cyclones in JASO. Box indicates the MGR each basin. Contour indicates area where the correlation is statistically significant at the 95% confidence level.	14
Fig. 5. Same as Fig. 4, but correlation between maximum potential intensity and number of TCs.	17
Fig. 6. Same as Fig. 4, but correlation between sea surface temperature and number of TCs.	17
Fig. 7. Genesis potential index climatology in JASO season. The black dots show individual genesis events over the period from 1970 to 2015, JASO.	18
Fig. 8. Annual cycle of genesis potential index and number of tropical cyclones in the MGR of the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific and (c) North Atlantic basins.	19
Fig. 9. Time series of GPI and TCs genesis frequency over the MGR of the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific, and (C) North Atlantic in JASO.	21

Fig. 10. Box plots of (a) vertical wind shear, (b) maximum potential intensity, and (c) sea surface temperature during JASO in the MGR for each basin. ‘×’ means an average these factors and ‘▲’ and ‘▼’ show the mean plus and minus the standard deviation.	23
Fig. 11. Climatological mean of vertical wind shear in JASO season. Contour and color indicate the standard deviation and mean of the vertical wind shear, respectively. Black box means the MGR for each basin.	24
Fig. 12. Maps of correlation coefficients of gridded vertical wind shear with PDI in JASO. Box indicates the MAR for each basin. Contour indicates area where the correlation is statistically significant at the 95% confidence level.	30
Fig. 13. Same as Fig. 12, but correlation between sea surface temperature and PDI.	30
Fig. 14. Same as Fig. 10, but box plots of (a) vertical wind shear and (b) sea surface temperature during JASO for each region.	36
Fig. 15. Same as Fig. 12, but correlation between maximum potential intensity and PDI. Dashed line indicates the low-correlation region (LCR, 10–20° N, 235–262°E).	37
Fig. 16. Climatological mean of (a) mixed layer depth (MLD) and (b) D26 in JASO season. Black box means the LCR.	39
Fig. 17. The spatial distribution of PDI followed the movement of TCs in JASO.	41
Fig. 18. Time series of SST at hurricane ‘HILDA’ genesis location. Black square and circle marker mean SST before the TC reaches this point and the minimum SST after the TC passed, respectively.	42
Fig. 19. Non-normal distribution in (a) SST cooling after the passing of TCs and (b) averaged PDI. Gray line means (a) correction values for SST cooling and (b) certain range of PDI mean.	44
Fig. 20. Difference of the SST in before and after experiment.	45

Fig. 21. Same as Fig. 15, but correlation between SST derived from experiment and PDI.	46
Fig. 22. Time series of PDI and SST over the MAR (left panel) and LCR (right panel). (a) and (b) are results before conducting the experiment and (c) and (d) are results after that.	46
Fig. 23. Same as Fig. 20, but difference of the MPI.	47
Fig. 24. Same as Fig. 15, but correlation between MPI derived from experiment and PDI.	48

ABSTRACT

The environmental factors related to the genesis of tropical cyclone (TC) are known as absolute vorticity, vertical wind shear (VWS), and vertical wind velocity for dynamic elements and relative humidity, sea surface temperature (SST), and maximum potential intensity for thermodynamics elements. On the basis of these factors, the genesis potential index (GPI) and various predictors have been developed and widely used in researches on TC activity. However these factors cannot exactly explain temporal variations of frequency and activity of TC as well as have different contributions to variations of TC activity according to basin. This study investigates the environmental factors affecting interannual variation of frequency and activity of TC, focusing on examining their interbasin differences, for the western North Pacific (WNP), eastern North Pacific (ENP), and North Atlantic (NA) during the boreal summer (JASO when TC activity is active) for the period 1970–2015.

Correlation coefficients of frequency of TC and components of GPI are quite different for each basin. This finding is caused by interbasin differences in the variability of atmospheric condition and the average of thermodynamic factor. Power dissipation index (PDI) meaned TC activity is the lowest correlation with VWS and SST in the WNP, but in the ENP and NA have the high correlations. Furthermore, the correlation spatial patterns are characteristic forms in the WNP and ENP. In case of the WNP, the factors in the eastern area of the main activity region (MAR) contributed greatly to the interannual variation in PDI. In the ENP, the thermodynamic factors showed a high positive correlation with the PDI, but abrupt decrease in the positive correlation was found in some part of the MAR, in which frequency

and activity of TC was concentrated. This is because monthly SST data used in this study included SST cooling effect by TC activity. Therefore, through a experiment of removal of TC-self-induced sea surface cooling from the monthly SST data, the decrease of correlation with PDI and thermodynamic factors is reduced.

Keyword : Tropical Cyclone, environmental factor, interannual variation

1. 서론

강한 비바람을 동반하는 태풍(북동태평양과 북대서양에서는 ‘허리케인’이라고 칭하지만, 본 연구에서는 ‘태풍’으로 동일하게 사용)은 사회·경제적인 영향뿐만 아니라 수많은 인명피해를 발생시키는 자연현상 중 하나이다. 해마다 태풍의 영향을 받는 나라에서는 태풍에 의한 피해를 줄이기 위하여 그 해 발생하는 태풍의 개수와 강도 등에 대한 정보를 예측하여 방재계획 수립의 기초정보로 사용하고 있다(국민안전처, 2016; Shim et al., 2011). 또한 이러한 나라들은 기후변화에 따라 태풍의 활동이 어떻게 변화할 것인가를 예측하여 장기적인 방재계획 수립에 활용하고 있다. 태풍의 발생과 활동을 장·단기적으로 예측하기 위해서는 이와 관련된 환경요인을 분석하고 이들의 변화경향을 조사하는 것이 필요하다.

태풍의 발생과 활동에 대한 연구에는 해양과 대기의 열·역학적 요소들이 예측인자로 이용되며, 그 중 가장 기본이 되는 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST)와 연직바람취어(Vertical Wind Shear, VWS) 등이 매우 중요하게 이용되고 있다. 특히 태풍발생과 관련된 일반적인 지식과 연구는 해수면온도에 크게 의존하고 있으며(Kwon, 2012), 과거에서부터 태풍의 발생과 관련된 다양한 연구에 해수면온도가 주로 이용되어왔다. 그 결과 해수면온도가 높아질수록 태풍의 발생 및 발달 과정에 많은 에너지와 수증기를 공급한다는 일반적인 이론이 형성되었으며, 실제 대서양의 해수면온도 변동에 의해 태풍발생빈도에 큰 영향을 끼친다는 연구가 보고되었다(Shapiro and Goldenberg, 1998; Landsea et al, 1999). 다시 말해, 대서양의 해수면온도가 정상해 보다 높아지는 경우에 태풍의 발생빈도 역시 증가하는 경향을 보이는 것이다. 최근에는 해수면온도의 증가에 따라 태풍의 발생빈도와 강도, 지속시간을 포함한 태풍활동 역시 증가된다는 연구 결과가 보고되고 있으며(Emanuel, 2005; Webster et al., 2005; Emanuel, 2007), 이 외에도 고온의 해수일수록 해양의 상층을 더욱 두껍게 만들기 때문에 태풍의 발생과 강도 발달에 더욱 우호적인 환경을 제공한다는 분석도 제시되고 있다(Emanuel, 1999; Shay et al., 2000; Lin et al., 2005; Lin et al., 2008; Wada, 2009; Goni et

al., 2009; Lin et al., 2009; Moon and Kwon, 2012).

열적인 환경인자 외에 태풍 형성에 중요한 영향을 미치는 대기 환경인자로는 연직바람쉬어가 대표적이다. 태풍의 구조와 강도 변화에 있어 큰 역할을 하는 연직바람쉬어는 태풍의 강도예측 연구에 주요 예측인자 중 하나로 사용되고 있으며(DeMaria and Kaplan, 1999; DeMaria et al., 2005; Knaff et al., 2005), 뿐만 아니라 태풍의 활동 변화를 설명하기 위한 환경인자로도 다양하게 이용되고 있다(Gray, 1968; DeMaria and Kaplan, 1999; Paterson et al., 2005; Zeng et al., 2010). 최근에는 북서태평양의 태풍활동과 관련하여 태풍발생빈도의 감소추세와 태풍의 이동경로 및 강도 변화에 대한 원인분석에 대기 환경인자들을 이용하여 연구되고 있으며, 그 중 연직바람쉬어의 영향이 매우 큰 것으로 보고되고 있다(Liu and Chan, 2013; Park et al., 2014; Kossin et al., 2014).

Gray (1979)는 이러한 환경인자들을 이용하여 태풍의 시·공간적인 발생 빈도를 예측할 수 있는 경험적인 지수를 개발하였다. 이후 Emanuel and Nolan (2004)은 열역학적 요소로 쓰인 환경 변수 등을 개선하여 하층의 절대와도, 중층의 상대습도, 최대잠재강도(Maximum Potential Intensity, MPI), 연직바람쉬어의 대규모 환경인자로 구성된 태풍의 잠재발생지수(Genesis potential Index, GPI)를 개발하였다. 이와 같은 지수와 환경인자들은 태풍발생과 활동에 대하여 공간적 그리고 계절적 특성을 잘 반영하기 때문에 태풍발생과 활동 예측을 위한 연구에 중요한 환경인자로 사용된다. GPI는 태풍발생빈도의 시·공간적인 예측을 위한 다양한 분석에 적용되어 왔으며, 주로 미래 태풍의 발생 변동에 관한 연구로, 다양한 기후 변화 시나리오와 기후 모델을 이용하여 미래의 태풍발생과 활동의 추이를 예측하는데 이용되고 있다(Zhang et al., 2010; Lee and Kim., 2014; Emanuel, 2013; Camargo et al., 2007a; Song et al., 2015). 이 외에도 GPI는 남방진동(ENSO; El Nino and Southern Oscillation)이 태풍의 발생빈도 및 활동에 미치는 영향(Camargo et al., 2007b; Ha et al., 2012, Kwon 2012; Kim et al., 2011)과 모델의 태풍발생 모의 성능에 대한 평가(Camargo et al., 2007a; Camargo, 2013; Kwon, 2012; Kim et al., 2015; Tian et al., 2013) 등에도 폭넓게 이용되고 있다.

GPI뿐만 아니라 다양한 환경인자들이 태풍에 관한 연구에 다양하게 쓰이고 있는 반면, 태풍의 발생 및 활동의 변동을 설명하는데 있어서 해석별로 큰 차이가

있음이 제시되었다. 이에 대하여 Camargo et al., (2007b)은 GPI의 실제 태풍발생빈도의 연변동에 대한 모의 성능을 판단하기 위해 해역별로 상관도 분석을 수행하였다. 그 결과 북반구 여름철에 태풍활동이 가장 활발한 북서태평양에서는 신뢰하기 어려운 수준의 상당히 낮은 상관도를 보이고 있었으며, 북동태평양과 북대서양에서는 여름철 동안 매우 강한 양의 상관관계를 보이고 있었다. 또한 GPI를 구성하고 있는 대표적인 열역학적 환경인자인 최대잠재강도가 북동태평양과 북대서양의 강한 태풍(최대풍속 113kt 이상)의 발생빈도와 높은 양의 상관도를 보이고 있는 반면, 북서태평양에서는 음의 상관도를 보이고 있었다(Chan, 2009). 이와 더불어 해수면온도를 비롯하여 최대잠재강도를 구성하는 환경인자들 모두 다른 해역과 달리 북서태평양에서만 음의 상관관계를 갖고 있다고 보고되었다. 태풍의 발생을 비롯하여 태풍의 활동을 나타내는 지수인 PDI (Power Dissipation Index)에 대하여 Pun et al., (2013)은 북서태평양 태풍의 주요 활동구역의 상층 해양 환경이 태풍활동에 우호적으로 변화함에 따라, 강도 높은 태풍들의 발생 빈도가 증가하게 되어 PDI가 증가하게 될 것이라고 전망하였다. 그러나 같은 연구 기간 동안 PDI는 감소추세를 보이고 있었으며, 태풍의 발생 빈도 역시 크게 감소하는 경향을 보이고 있었다(Lin and Chan, 2015).

앞선 사전연구들은 태풍에 관련된 환경인자들과 지수들이 태풍의 발생 및 활동의 변동에 대하여 명확하게 설명하지 못하였으며, 그 관계 역시 해역별로 큰 차이가 있음을 보였다. 따라서 본 연구에서는 상관관계 분석을 통해 북반구 여름철에 태풍활동이 활발한 해역을 중심으로 태풍과 관련된 환경인자가 실제 태풍의 발생빈도 및 활동의 연변동의 관계를 파악하고, 해역별로 그 상관도가 어떻게 차이가 나는지 분석하고자 한다. 또한 해역별 환경인자들과 태풍활동 변동의 상관도 분포를 통해 공간적으로 상관관계를 분석하고, 해역별로 나타나는 특징적인 형태에 대하여 원인을 조사하고자 한다. 다음 장에서는 연구에 쓰인 자료와 지수, 그리고 분석방법에 대하여 소개하였다. 3장과 4장에서는 태풍의 발생에 대한 결과와 태풍활동에 대한 결과를 각각 기술하였으며, 설명 가능한 원인에 대하여 제시하였다. 5장의 토의 부분에서는 연구 결과를 통해 논의 될 만한 사항들에 대하여 서술하였으며, 마지막 장에서는 본 연구의 요약 내용으로 구성하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 태풍의 잠재발생지수(Genesis Potential Index, GPI)

GPI는 열대저기압의 잠재적인 발생에 대하여 정량적으로 나타내는 지수로, 대규모 대기 및 해양 변수의 함수로 이루어진다. GPI는 역학적인 근거와 실험을 기반으로 하여 전지구적인 태풍발생빈도의 공간분포와 연별 주기 그리고 계절 변동 등을 모의할 수 있기 때문에, 태풍의 발생과 관련된 연구에서 널리 이용되고 있다. 본 연구는 Emanuel and Nolan (2004)에서 최초로 개발된 GPI를 개선하여 Murakami and Wang (2010)이 제시한 GPI를 사용하였다. 새롭게 제시된 GPI는 대기의 상승운동을 충분히 고려하기 위하여 기존의 식에서 500hPa의 연직바람속도 항을 추가하였다.

$$GPI = |10^5 \eta| \left(\frac{RH}{50} \right)^3 \left(\frac{MPI}{70} \right)^3 (1 + 0.1 VWS)^{-2} \left(\frac{-\omega + 0.1}{0.1} \right)$$

여기서 η 는 850hPa의 절대와도(Absolute Vorticity, AV), RH는 700hPa의 상대습도(Relative Humidity, RH), MPI는 최대잠재강도(Maximum Potential Intensity, MPI), VWS는 850hPa과 200hPa 사이의 연직바람쉬어(Vertical Wind Shear, VWS)의 크기 그리고 ω 는 500hPa의 연직바람속도(Vertical Wind Velocity, VWS)를 나타낸다. GPI는 단위 시간과 면적에 대한 열대저기압 발생빈도를 의미하지만, 값 자체는 일정한 차원을 갖지 않음을 염두에 두어야 한다(Kwon, 2012).

GPI를 구성하는 변수들은 태풍의 발생과 관련된 역학적 이론을 바탕으로 제시되었다. 먼저, 절대와도는 태풍발생에 있어 가장 기본적인 물리적 메커니즘(mechanism)으로 와도의 절대적인 값을 가리켜 말한다. 와도는 유체의 소용돌이 운동의 세기와 방향을 나타내는 벡터로, 절대와도는 지구의 회전 운동에 대한 상대 와도와 지구 자체 회전인 행성와도의 합으로 표현된다. 상대습도는 대기가 포함하고 있는 수증기의 양을 나타내는 수치로, 태풍의 생성과 발달에 주된 에너지

로 작용하게 된다. 높은 값의 중층 상대습도는 대기층의 깊은 대류 활동과 연직 혼합을 유발하며, 강수 현상에도 큰 기여를 하게 된다. 연직 바람쉬어는 태풍의 발생과 강도 변화에 있어 중요한 환경인자로 이용되어 왔다. 대기의 상하층 간의 속도 차이에 의해 계산이 되는 연직바람쉬어는 공기의 연직적인 움직임을 나타내는 척도로, 그 값이 작을수록 상하층간 공기 괴의 움직임이 상대적으로 감소하여 상승기류가 원활히 이뤄지게 되어 태풍발생과 발달에 우호적인 환경을 제시한다. 연직바람쉬어를 구하는 식은 다음과 같다.

$$VWS = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2}$$

연직바람속도 역시 대기의 상승 운동을 고려하기 위한 환경인자로 작용한다. 연직바람속도의 항이 추가되어 새롭게 제시된 GPI를 통해 기존 GPI가 열대 수렴대와 북동태평양의 태풍발생이 밀집된 해역에서 과소 모의되는 경향을 개선시킬 수 있었다(Murakami and Wang, 2010, Murakami et al., 2011). 최대잠재강도는 주어진 대기과 해양의 열적 환경에서 태풍이 발생했을 때 잠재적으로 도달할 수 있는 최대 강도를 의미하며, 이 값이 클수록 태풍발생과 발달에 좀 더 유리하게 된다(Emanuel et al., 1995). 다시 말해, 해양과 대기의 상호작용에 의해 해양으로부터 대기로의 열적 교환이 이루어지는데, 이때 태풍의 상하층 간의 온도와 수증기 차이에 의해 최대잠재강도가 결정이 된다. 열역학적인 원리에 의해 개발된 최대잠재강도 지수는 다음과 같이 표현된다.

$$MPI = \sqrt{\frac{C_k}{C_D} \frac{T_s}{T_0} (CAPE^* - CAPE)}$$

여기서 C_k 는 Enthalpy 교환 계수, C_D 는 공기 저항계수, T_s 는 해수면온도, T_0 는 평균 외기온도, $CAPE^*$ 는 주변 공기에 대해 해면에서 포화되어 상승한 공기의 대류 가능 잠재 에너지(Convective Available Potential Energy, CAPE), CAPE는 경계층 공기의 대류 가능 잠재 에너지를 말한다.

이렇듯 GPI는 태풍발생과 관련된 5가지의 환경인자들의 매개 변수로 구성이 되며, 각각의 환경인자들은 태풍발생을 잠재적으로 추정하는데 다양한 역할로 기여하고 있다. 이러한 GPI는 열대 저기압의 발생과 관련된 분석이나 모델의 태풍 모의 성능을 검증, 또는 미래 태풍발생 추이를 예측하는데 주로 이용되고 있다.

2.2 태풍활동 지수(Power Dissipation Index, PDI)

태풍의 발생에 관한 지수 이외에도 태풍의 활동을 나타내는 지수는 다양하게 개발되어 왔다. 그 중 태풍의 파괴 정도를 의미하는 PDI (Power Dissipation Index)는 1년 혹은 특정 기간에 한하여 6시간 간격마다 모든 태풍의 최대풍속을 세제곱하여 모두 더한 값으로, 다음과 같이 나타낸다(Emanuel, 2005).

$$PDI = \int_0^{\tau} V_{\max}^3 dt$$

이때 V_{\max} 는 태풍의 지속시간(τ) 동안 6시간 간격(t)의 최대풍속을 가리킨다. 즉, PDI는 태풍의 발생빈도뿐만 아니라 강도와 지속시간을 모두 고려한 지수로, 그 값이 클수록 태풍의 파괴력이 커져 그 해의 특정 해역에서 태풍활동이 활발했음을 의미한다. PDI는 과거 태풍들의 최적경로 자료를 바탕으로 현재 추세와 이와 관련된 자연 현상 혹은 환경인자를 분석하는데 주로 이용되고 있다.

PDI는 태풍의 활동을 나타내는 환경인자이기 때문에 한 해 동안 발생한 태풍의 빈도, 강도 그리고 지속시간으로 분리할 수 있다. Emanuel (2007)은 PDI를 구성하는 요소를 수식으로 정리하였으며, 이때 지속시간(D_i)은 하나의 태풍이 발생으로부터 소멸까지의 시간을 평균하여 나타낸다. 하지만 발생과 소멸 시점의 판단은 명확하지 못하기 때문에, 한 태풍의 일생동안 최대풍속(V_{smax})에 가중치를 두고 지속시간을 정의하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$D_i \equiv \frac{\int_0^{\tau} V_{\max} dt}{V_{smax}}$$

따라서 한 해 동안 발생한 N개의 태풍들의 지속시간(D)을 평균하면 Eq. (6)과 같다.

$$D \equiv \frac{1}{N} \sum_1^N D_i$$

태풍의 강도(I)는 한 해 동안의 PDI를 전체 지속시간으로 나눈 값으로 나타낸다.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_i} V_{\max}^3 dt}{\sum_{i=1}^N D_i}$$

따라서 한 해의 PDI는 태풍의 발생빈도와 지속시간 그리고 강도의 곱으로 나타낼 수 있게 된다.

$$PDI = N \times D \times I$$

이렇게 PDI의 요소를 항별로 분리하여 최근 태풍활동의 동향과 전망에 대한 분석에 다양하게 이용되고 있다(Emanuel, 2007; Lin and Chan, 2015).

2.3 자료

본 연구에서는 북서태평양을 비롯하여 북동태평양과 북대서양에서 발생한 태풍발생빈도의 변동을 분석하기 위해 미국합동태풍경고센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)와 국립허리케인센터(NOAA National Hurricane Center)에서 제공하는 최적경로 자료를 사용하였다. 두 기관에서 제공하는 태풍의 최적경로 자료는 6시간 간격으로 태풍의 위도와 경도를 포함하며, 태풍의 최대풍속과 최저기압 등 태풍의 이동에 따른 다양한 정보를 포함하고 있다.

각 해역별 GPI의 환경변수와 구성 인자 중 하나인 최대잠재강도를 계산하기 위해 격자 간격이 위·경도로 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 인 미국국립환경예측센터/기상연구센터(the National Centers for Environmental Prediction/the National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)의 월별 재분석 자료(Reanalysis 1)를 사용하였다. 또한 해수면온도는 수평격자가 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ 인 미국해양대기관리청(the National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 ERSST-V3b (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 3)의 월평균 자료와 0.25° 의 공간 해상도를 갖는 NOAA의 OISST V2 (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature Version 2)의 일(1day) 자료를 이용하였다. 본 연구에서 두 가지 해수면온도 자료를 사용한 부분에 있어서 자료에 대한 검증과정은 거치지 않았다. 이는 두 자료의 공간 해상도와 제공이 시작되는 시점이 차이가 있을 뿐, 제공되는 정보에 있어서는 크게 다르지 않다고 판단하였기 때문이다.

추가적으로 ENSO의 영향을 분석하기 위해 NCEP/NCAR에서 제공하는 Ocean Niño index (ONI)를 이용하였다. ONI는 ERSST-V4의 자료를 이용하여 엘니뇨의 현상이 뚜렷하게 나타나는 Nino 3.4 지역(5°N - 5°S , 120°W - 170°W)의 해수면온도의 편차(anomaly) 값을 3개월 이동 평균한 값으로 정의된다. 또한 해양의 연직 수온 분포를 조사하기 위해 해양 기후 자료인 WOA13 V2 (World Ocean Atlas 2013 version 2)를 이용하였다. WOA13 V2는 월별로 1° 간격의 공간해상도를 갖고 있으며, 전지구적으로 수심별 수온과 염분 등 다양한 해양 자료를 포함하고 있다.

2.4 연구 방법

본 연구는 해역별 태풍의 발생과 활동에 관련된 환경인자들이 실제 태풍의 발달 과정에서 어떠한 영향을 주며, 태풍의 발생빈도와 활동 지수의 변동과 어떠한 관계를 갖는지 알아보았다. 분석에 사용된 환경인자는 해수면온도를 비롯하여 GPI를 구성하는 요소들로부터 기여도가 상대적으로 우세한 환경인자들을 선택하여 주로 이용하였다. 연구 기간은 1970년부터 2015년이며, Fig. 1에서 보이는 바와 같이 북반구에서 태풍발생이 가장 활발한 계절인 여름철(7-10월, JASO; July, August, September and October)에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 Saffir-Simpson scale을 기준으로 열대 폭풍(TS; Tropical Storm) 등급인 최대풍속이 34knot 이상으로 발달한 태풍들을 이용하여 분석을 수행하였다 (Saffir, 2003). 우리나라에서는 일반적으로 최대 풍속이 34knot 이상인 열대저기압을 태풍으로 칭한다.

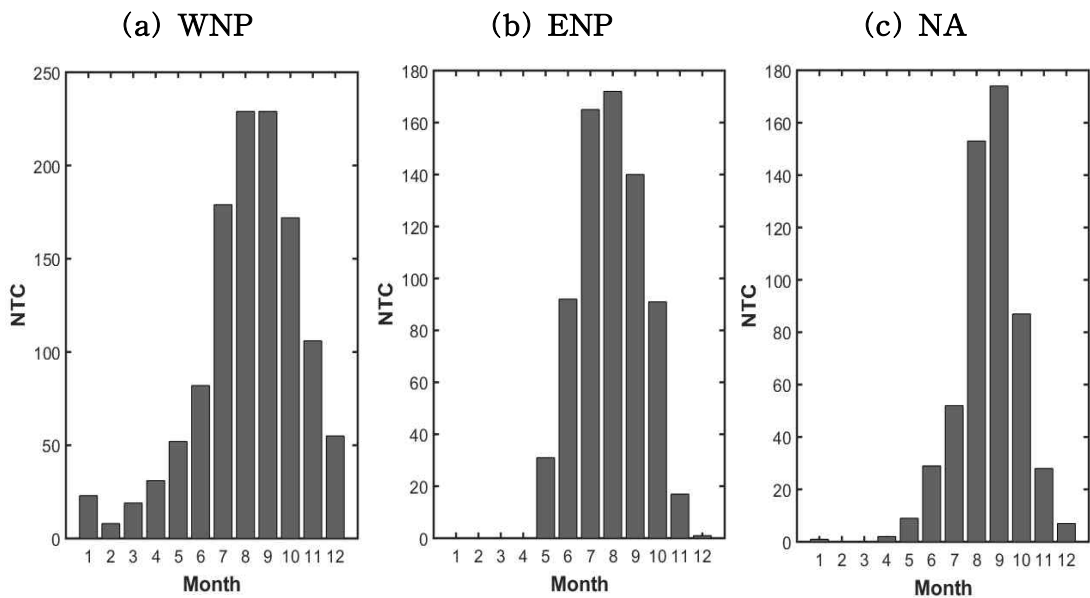


Fig. 1. The number of tropical cyclones (NTC) over the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific, and (c) North Atlantic basins in 1970 to 2015.

PDI와 환경인자들의 변동성을 확인하기 위해서는 해역별로 특정한 연구영역의 설정이 필요하다. 따라서 각 해역의 연구영역은 여름철 태풍이 주로 발생하는 지역(Main Genesis Region, MGR : 북서태평양, 110-150°E, 10-25°N; 북동태평양, 235-265°E, 10-17.5°N; 북대서양, 275-340°E, 7.5-22.5°N)과 태풍활동이 활발한 지역(Main Activity Region, MAR : 북서태평양, 125-160°E, 7-22°N; 북동태평양, 220-258°E, 13-23°N; 북대서양, 270-320°E, 15-30°N)으로 분류하여 설정하였다(Xu and Wang, 2014; Li et al., 2015; Pun et al., 2013). Fig. 2는 연구기간 동안 해역별로 여름철에 발생한 태풍들의 발생빈도 분포를 나타낸 것이며, 박스로 표시된 구역은 태풍이 주로 발생하는 구역으로 설정된 연구영역을 가리킨다. 북서태평양과 북동태평양의 경우 설정 구역 내에서 대부분의 태풍이 발생하고 있음을 알 수 있지만, 북대서양의 경우 설정구역을 벗어난 지역에서도 태풍의 발생이 활발히 이뤄지고 있었다. 하지만 선행 연구에서 북대서양의 열대 해역을 태풍의 주요 발생구역으로 설정하고, 이 지역을 중심으로 많은 연구가 진행되었기 때문에 이에 기반 하여 연구영역을 지정하게 되었다(Gray, 1984; Vimont and Kossin, 2007; Camara et al., 2010; Bruyere et al., 2012; DeMaria et al., 2001). Fig. 3은 해역별로 여름철에 발생한 태풍들을 4°×4°격자 간격으로 태풍의 이동에 따라 PDI를 누적하여 나타낸 분포로, 세 해역 모두 설정된 구역 내에서 주로 활동하고 있음을 알 수 있다. PDI는 태풍발생을 비롯하여 강도와 지속 시간이 내포되어 있으므로 태풍의 주요 발생위치보다 더 넓은 범위로 설정되었다.

이렇게 해역별로 설정한 영역에 대해서 각 환경인자들과 태풍발생 사이의 관계를 알아보기 위하여 상관도 분석을 수행하였다. 또한 태풍의 발생과 활동에 크게 기여하는 환경인자가 각 해역별로 어떠한 차이가 있는지 알아보고, 이러한 차이가 발생하는 원인에 대하여 자세히 분석하였다. 이때, 각 환경인자들 간의 상관관계에 대한 유의성을 판단하기 위해 통계적으로 95% 신뢰구간의 값을 기준으로 삼았다. 여기서 상관도 분석이 수행된 이유는 연구에 이용된 환경인자들과 태풍발생빈도 및 활동지수의 규모(scale)가 서로 다르기 때문이다. 또한 각각의 환경인자들과 태풍의 발생 및 활동의 연변동이 갖는 관계와 기여도를 알아보고자 하기 때문에 상관도 분석이 적합하다고 판단되었다.

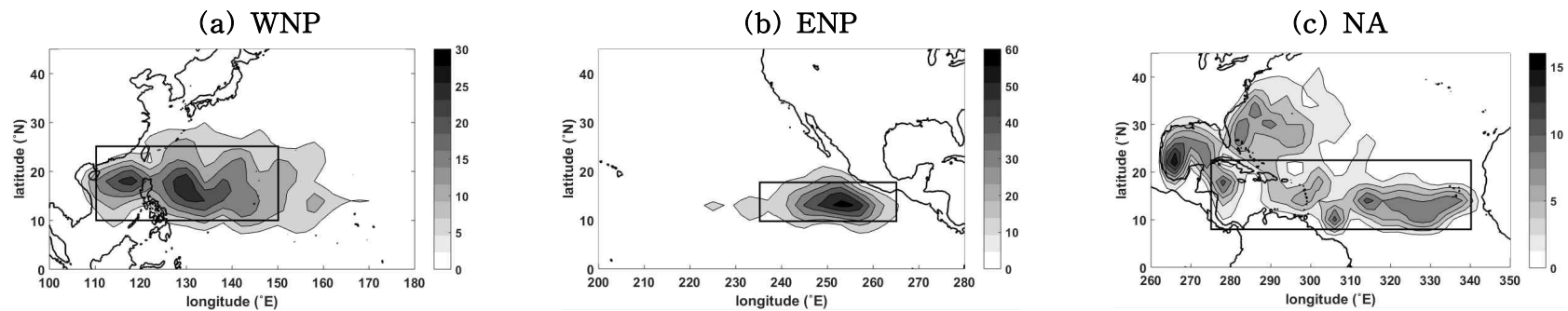


Fig. 2. Genesis locations of tropical cyclones (TC) over the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific, and (c) North Atlantic basins in JASO (July, August, September, and October). The box is the area used to define the main genesis region (MGR) for each basin.

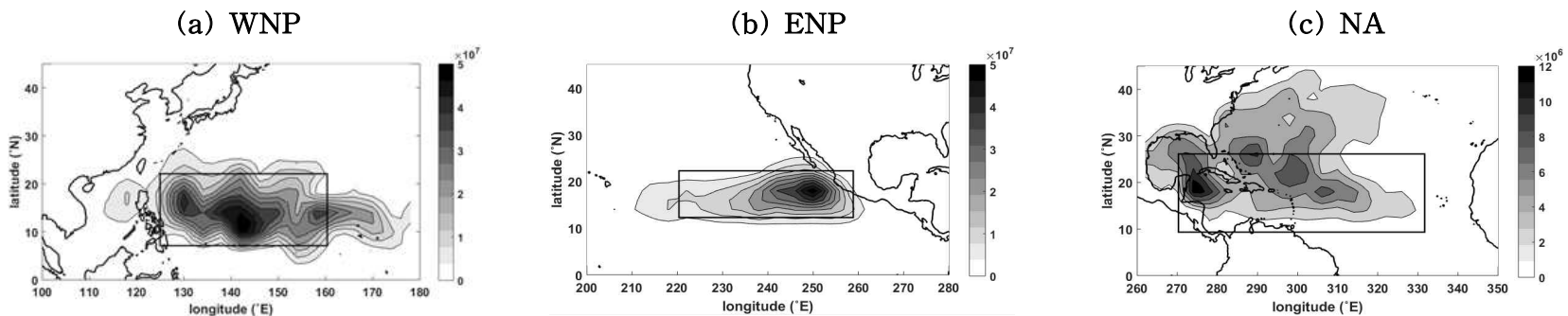


Fig. 3. Same as Fig. 2, but Power dissipation index (PDI). The box is the area used to define the main activity region (MAR) for each basin.

3. 태풍발생과 관련된 환경인자 분석

3.1 해역별 태풍발생빈도와 환경인자 간의 상관관계

각 해역별로 태풍발생이 활발한 여름철을 기준으로 실제 태풍발생빈도 변동과 환경인자들의 상관관계를 조사해 보았다(Table 1). 이때 태풍발생과 발달에 있어 연직바람쉬어와 연직바람속도는 그 값이 감소할수록 우호적인 환경이 되기 때문에, 태풍의 발생빈도와 활동과의 상관계수가 음의 값일 때 서로 유의한 관계가 있다고 할 수 있다. 북서태평양 분석 결과, GPI를 이루는 다섯 가지의 모든 환경인자들이 태풍의 주요 발생구역에서 태풍발생빈도와 아주 낮은 상관도를 보였다. 열역학적 환경인자인 상대습도와 최대잠재강도와는 작은 크기이긴 하지만 음의 값을 보이고 있었으며, 대표적인 역학적 환경인자인 연직바람쉬어와는 0에 가까운 즉, 상관관계가 없는 결과를 보였다. 따라서 GPI를 구성하는 환경인자들은 북서태평양 태풍발생빈도의 변동에 대하여 큰 영향을 미치지 못한다고 판단된다. 북동태평양의 경우 주요 발생구역에서 태풍발생빈도와 연직바람쉬어 간의 상관도가 99% 이상의 강한 음의 상관도를 보이고 있었다. 즉, 다른 환경인자들에 비해 연직바람쉬어의 대기 인자만이 태풍발생빈도 변동에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 마지막으로 북대서양의 경우, 대부분의 환경인자들이 태풍발생빈도 변동에 큰 기여를 하고 있는 것으로 나타났다. 그 중 연직바람쉬어와 최대잠재강도 두 인자가 99% 이상의 매우 강한 양의 상관도를 보이고 있었다.

더 자세한 분석을 위해 각 격자별 환경인자와 태풍발생빈도 간의 상관도를 공간적인 분포로 나타내어 조사하였다. 이 분석에 사용된 환경인자는 GPI를 구성하는 요소 중 대표적인 역학적 환경인자와 열역학적 환경인자인 연직바람쉬어와 최대잠재강도이다. 이와 더불어 최대잠재강도에 밀바탕이 되는 해수면온도 역시 상관도 분석을 수행하였다. Fig. 4는 해역별 연직바람쉬어와 태풍발생빈도 간의 상관도 분포를 나타낸 그림으로, 흰색 선이 95%이상 유의한 수준의 상관도를 나타낸다. 북서태평양의 경우 태풍이 주로 발생하는 영역 내에서 약한 양의 상관도와 음의 상관도가 남북으로 나타나고 있었다(Fig. 4a). 따라서 태풍의 주요 발생

구역 내의 상관도는 양의 값과 음의 값이 혼재 되어 있기 때문에, 북서태평양의 태풍발생빈도와 연직바람쉬어 간의 상관도가 거의 0에 가까운 것으로 보인다. 반면, 북서태평양의 동쪽 해역에서 강한 음의 상관관계를 보이고 있었으며, 이는 95%이상 유의한 수준의 결과였다. 이는 북서태평양 태풍의 주요 발생구역의 동쪽 해역에서 연직바람쉬어가 태풍발생빈도 변동에 민감하게 반응하는 것으로, 이 해역의 대기 상태가 북서태평양의 태풍발생과 밀접한 관련이 있는 것으로 예상된다. 북동태평양과 북대서양의 경우, 태풍의 주요 발생구역을 포함한 넓은 해역에서 강한 음의 상관도를 보이고 있었다(Fig. 4b,c). 따라서 두 해역 모두 태풍발생빈도와 연직바람쉬어 간의 상관도가 음의 값으로 높게 나타난 것으로 보인다. 이 결과를 통해 북동태평양과 북대서양의 연직바람쉬어는 전반적으로 넓은 해역에 걸쳐 각 해역의 태풍발생빈도의 변동에 큰 영향을 미치고 있으며, 태풍발생에 대한 기여도 역시 큰 것으로 사료된다.

Table 1. Correlations between TC genesis frequency and environmental factors of GPI in the MGR of the western North Pacific, eastern North Pacific, and North Atlantic. Bold face indicates statistical significance at the 99% level.

Factor	WNP	ENP	NA
AV	0.2199	-0.1334	0.4959
RH	-0.1718	-0.1996	0.0922
MPI	-0.1743	0.1900	0.7291
VWS	0.0054	-0.4724	-0.6864
OMG	-0.0876	0.0880	-0.2038

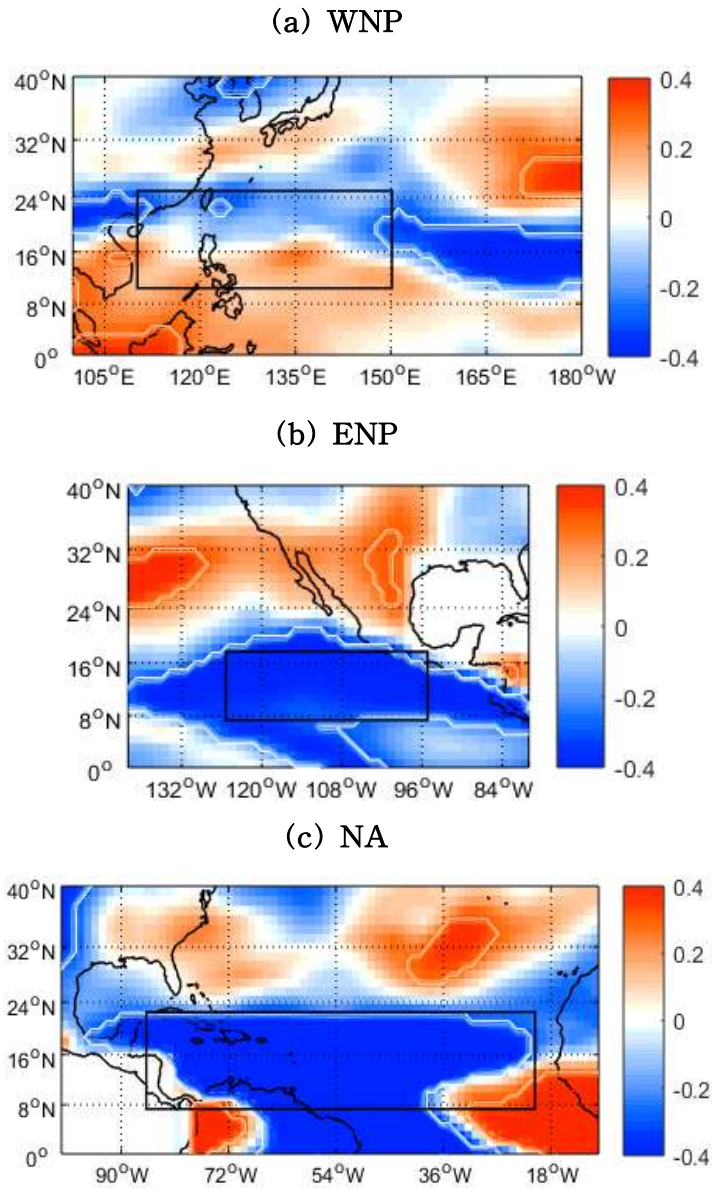


Fig. 4. Maps of correlation coefficients of gridded vertical wind shear with number of tropical cyclones in JASO. Box indicates the MGR each basin. Contour indicates area where the correlation is statistically significant at the 95% confidence level.

Fig. 5는 해역별 태풍발생빈도와 최대잠재강도 간의 상관도 분포를 나타낸 그림이다. 북서태평양의 결과를 보면, 태풍의 주요 발생구역으로 설정된 해역뿐만 아니라 일본의 동쪽 해역까지 음의 상관도가 넓게 분포되어 있다(Fig. 5a). 또한 연직바람쉬어와의 상관도 분포와 마찬가지로 태풍의 주요 발생구역의 남동쪽에서 태풍발생빈도의 변동에 대하여 최대잠재강도가 민감하게 반응하고 있는 분포를 보였으며, 그 중 일부는 95% 이상 신뢰할 수 있는 상관도가 나타났다. 북동태평양의 경우 주요 발생구역 내의 최대잠재강도와 태풍발생빈도 간의 상관도는 0.19로 매우 약한 상관관계를 보였다(Table 1). 한 가지 특징적인 것은 북동태평양 대부분의 해역에서 최대잠재강도와 태풍의 발생 빈도 간의 상관계수가 양의 값을 보이고 있었지만, 주요 발생구역으로 설정된 해역에서만 음의 상관도 분포를 보이고 있다는 점이다(Fig. 5b). 북대서양의 경우는 설정된 영역 안에서 강한 양의 상관도를 보이고 있었다(Fig. 5c). 이상의 상관도 분포에 대한 분석을 통해 북서태평양의 주요 발생구역에서 열역학적 환경은 태풍발생빈도 변동에 있어 영향력이 매우 약한 것으로 보였지만, 태풍의 발생빈도가 비교적 낮은 북서태평양의 남동쪽 해역의 열역학적 환경이 태풍발생빈도 변동에 상대적으로 높은 기여도를 보이고 있었다. 북동태평양의 주요 발생구역에서 최대잠재강도는 매우 약한 상관도를 보여 태풍의 발생빈도 변동에 비우호적으로 작용할 것으로 판단되는 반면, 북대서양의 최대잠재강도 변동은 태풍발생에 높은 기여도를 보여 태풍발생빈도의 변동에 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

최대잠재강도는 식(3)에서도 알 수 있듯이 해수면온도를 기반으로 형성된 지수이다. 각 해역의 해수면온도와 최대잠재강도 간의 상관도는 모두 99% 이상 유의한 수준으로 두 환경인자가 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다(북서태평양 $r = 0.73$, 북동태평양 $r = 0.63$, 북대서양 $r = 0.79$). 따라서 태풍발생에 일차적인 배경을 제공하는 해수면온도와 태풍발생빈도 간의 상관관계 역시 분석해볼 필요가 있다. 기존에 태풍의 주요 발생구역으로 설정한 영역내의 해수면온도와 태풍발생빈도 간의 상관도는 북서태평양에서 -0.32 로 통계적으로 95%이상 유의한 수준의 음의 상관관계를 보였으며, 북동태평양과 북대서양에서는 각각 0.29 와 0.60 의(통계적으로 각각 95%와 99% 이상으로 유의) 양의 상관관계를 보이고 있었다. 상관도의 공간적 분포를 확인하기 위해 격자별 해수면온도와 태풍발생빈도

간의 상관도를 조사하였다(Fig. 6). 북서태평양의 상관도 분포를 보면 일부 해역을 제외한 넓은 해역에서 뚜렷한 음의 상관도를 보였으며, 태풍의 주요 발생구역 뿐만 아니라 일본의 북쪽 해상까지 음의 상관도가 분포하고 있었다. 이 결과는 해수면온도가 높을수록 태풍발생에 호조건이 된다는 일반적인 이론과 반대되는 것으로, 북서태평양 태풍의 주요 발생구역의 열적 환경이 태풍발생빈도와 반대되는 경향임을 시사한다. 또한 태풍발생빈도가 높지 않은 북서태평양의 주요 발생구역의 남동쪽 해역에서 양의 상관관계를 보이는 것은, Fig. 5a와 유사한 결과로, 이 해역의 환경인자들이 북서태평양의 태풍발생빈도와 크게 관련이 있음을 나타낸다(이에 대해서는 뒷장에서 상세히 분석하였음). 북동태평양의 경우 최대잠재강도와 태풍발생빈도 간의 상관도 분포(Fig. 5b)와 유사하게, 태풍의 주요 발생구역에서 양의 상관도가 급격히 감소하는 형태를 보이고 있었다. 북대서양은 전 해역에서 양의 상관관계를 보이고 있으며, 태풍의 주요 발생구역에서 더욱 강한 양의 상관도를 보이고 있었다. 따라서 해수면온도와 같은 열적 환경 역시 북대서양 태풍의 발생변동에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

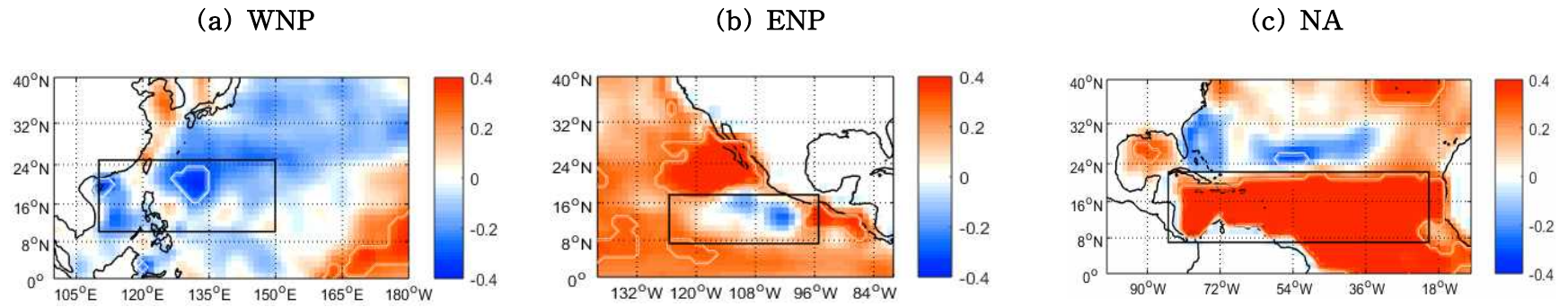


Fig. 5. Same as Fig. 4, but correlation between maximum potential intensity and number of TCs.

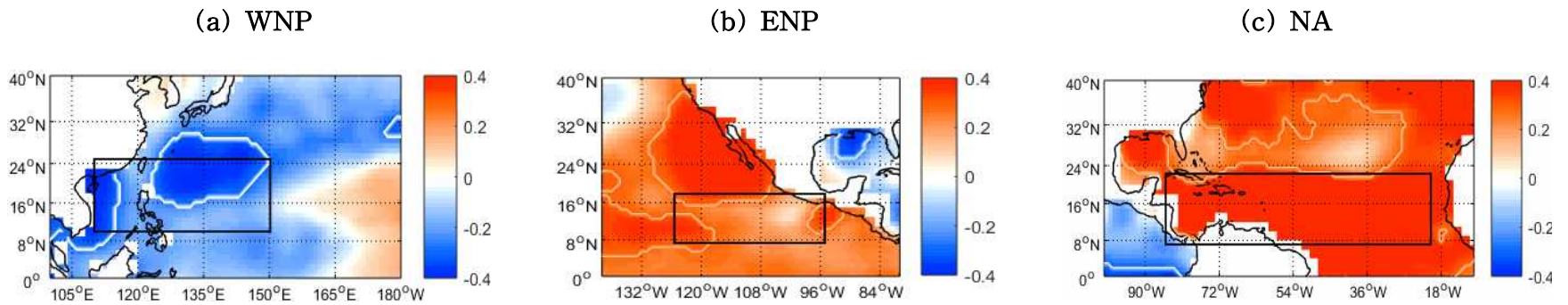


Fig. 6. Same as Fig. 4, but correlation between sea surface temperature and number of TCs.

앞선 분석을 통해 태풍의 주요 발생구역 내에서 GPI를 구성하고 있는 환경인 자들과 태풍발생빈도의 변동 간의 상관도는 해역별로 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다(Table 1). 따라서 태풍의 잠재적인 발생 가능성을 나타내는 GPI의 평가가 필요하다고 판단되어, 태풍의 발생 위치 및 빈도에 대한 GPI의 모의 성능을 해역별로 분석해 보았다. 먼저 여름철 태풍의 발생 위치의 모의 기능을 알아보기 위해 재분석장으로 계산된 GPI와 최적경로 자료에서 얻은 태풍의 발생 위치의 공간분포를 비교해보았다(Fig. 7). 북서태평양의 실제 태풍발생위치를 가리키는 검은색 점은 위도 10-20°를 중심으로 매우 넓게 분포하고 있으며, GPI의 공간 분포 역시 이와 유사한 형태를 보이고 있었다. 북동태평양의 태풍들은 비교적 연안 가까이에서 발생이 활발히 이루어지며, 서경 110°를 중심으로 발생지점이 매우 조밀하게 분포하는 것을 알 수 있다. 북동태평양 상의 GPI 역시 해안선을 따라 분포하는 형태로 실제 태풍발생 위치 분포와 매우 유사함을 알 수 있다. 북대서양의 경우 열대 해역을 중심으로 태풍의 발생 위치가 비교적 넓은 해역에 분포함을 보였으며, GPI도 유사한 공간 분포 형태를 보이고 있다. 이를 통해 GPI가 해역별로 여름철 태풍발생 위치를 잘 모의해내는 것으로 판단되었다.

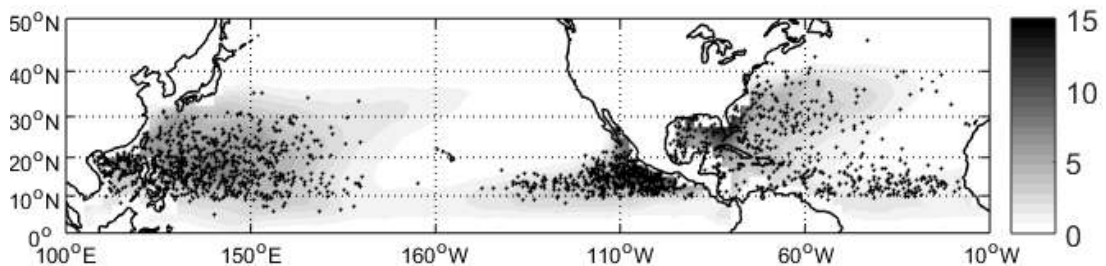


Fig. 7. Genesis potential index climatology in JASO season. The black dots show individual genesis events over the period from 1970 to 2015, JASO.

태풍의 공간적인 분포의 모의 성능과 더불어 GPI의 태풍발생빈도의 계절적인 변동 모의 정확도를 판단하기 위하여 각 해역별로 월 평균한 태풍발생빈도와 GPI의 월별 기후 값 변동을 비교해 보았다(Fig. 8). 이때 GPI는 해역별 태풍의 주요 발생구역 내의 값을 평균하여 분석에 이용하였다. 그 결과, 세 해역의 GPI 모두 여름철에 태풍발생빈도가 높아지는 추세의 경년변동을 잘 모의하고 있으며, 두 환경인자 간의 상관도는 세 해역 모두 0.9 이상으로 99% 이상 유의한 수준의 매우 강한 상관관계를 보이고 있었다. 따라서 GPI는 해역별 태풍의 발생 빈도에 대한 계절변동 역시 잘 모의하고 있음을 알 수 있었다.

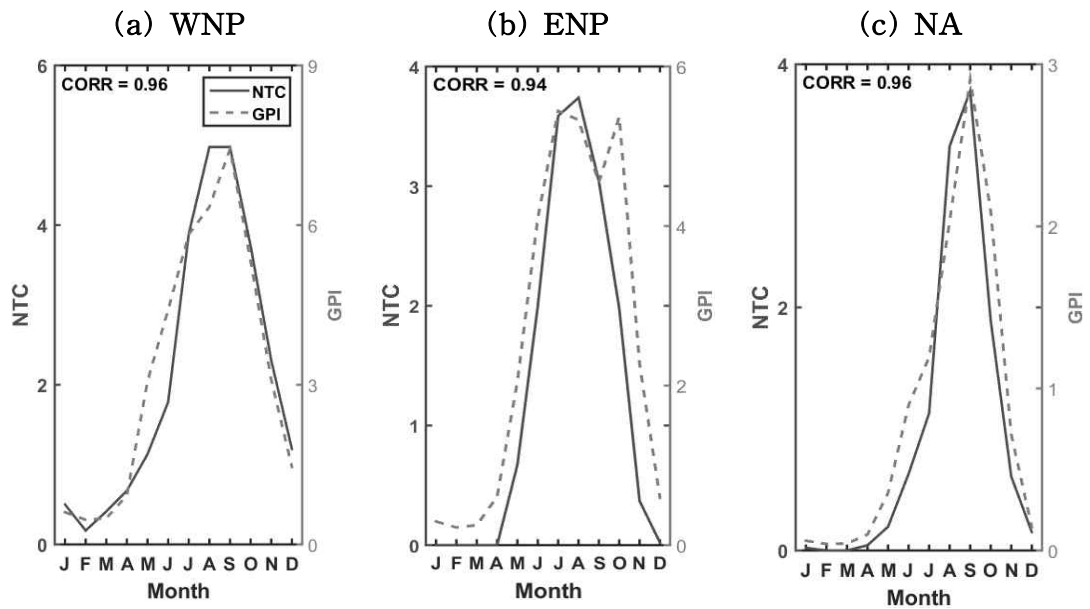


Fig. 8. Annual cycle of genesis potential index and number of tropical cyclones in the MGR of the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific and (c) North Atlantic basins.

해역별 태풍의 계절변동을 비교적 잘 모의하는 GPI가 북반구의 태풍발생이 활발한 여름철의 태풍발생빈도의 변동을 잘 모의하는지 확인하기 위해, 시계열 분석을 진행하였다(Fig. 9). 분석 결과 두 환경인자 간의 상관도는 해역별로 큰 차이를 보이고 있었다. 다시 말해, 북서태평양에서는 음의 상관도를 보이고 있었으며, 북동태평양에서는 낮은 신뢰수준의 양의 상관도, 그리고 북대서양에서는 0.7 이상의 99% 유의수준에 해당하는 강한 상관도를 보이고 있었다. 이 결과는 GPI의 환경인자들과 태풍발생빈도 간의 상관관계와 유사한 결과로, 두 요소 간의 강한 상관도를 보였던 북대서양에서는 GPI 역시 태풍발생 변동을 모의하는데 정확도가 높은 것으로 판단된다. 다시 말해, 북대서양의 태풍발생빈도의 변동은 GPI의 구성인자인 절대와도와 최대잠재강도, 그리고 연직바람쉬어와 상관관계가 매우 강했기 때문에, GPI와의 상관관계 역시 강하게 나타나는 것으로 보인다. 반면 북서태평양의 경우, GPI를 구성하는 모든 환경인자가 태풍발생빈도와 상관도가 매우 낮았기 때문에 GPI의 모의 정확도 역시 다소 낮은 것으로 사료된다. 북동태평양에서는 GPI의 환경인자 중 연직바람쉬어만이 태풍발생빈도 변동에 기여하는바가 컸으며, 나머지 모든 환경인자들은 그 기여도가 매우 낮았다. 따라서 북동태평양 GPI와 태풍발생빈도 간의 상관관계는 약하게 나타나며, GPI의 태풍발생에 대한 모의 성능 역시 비교적 낮은 것으로 생각된다.

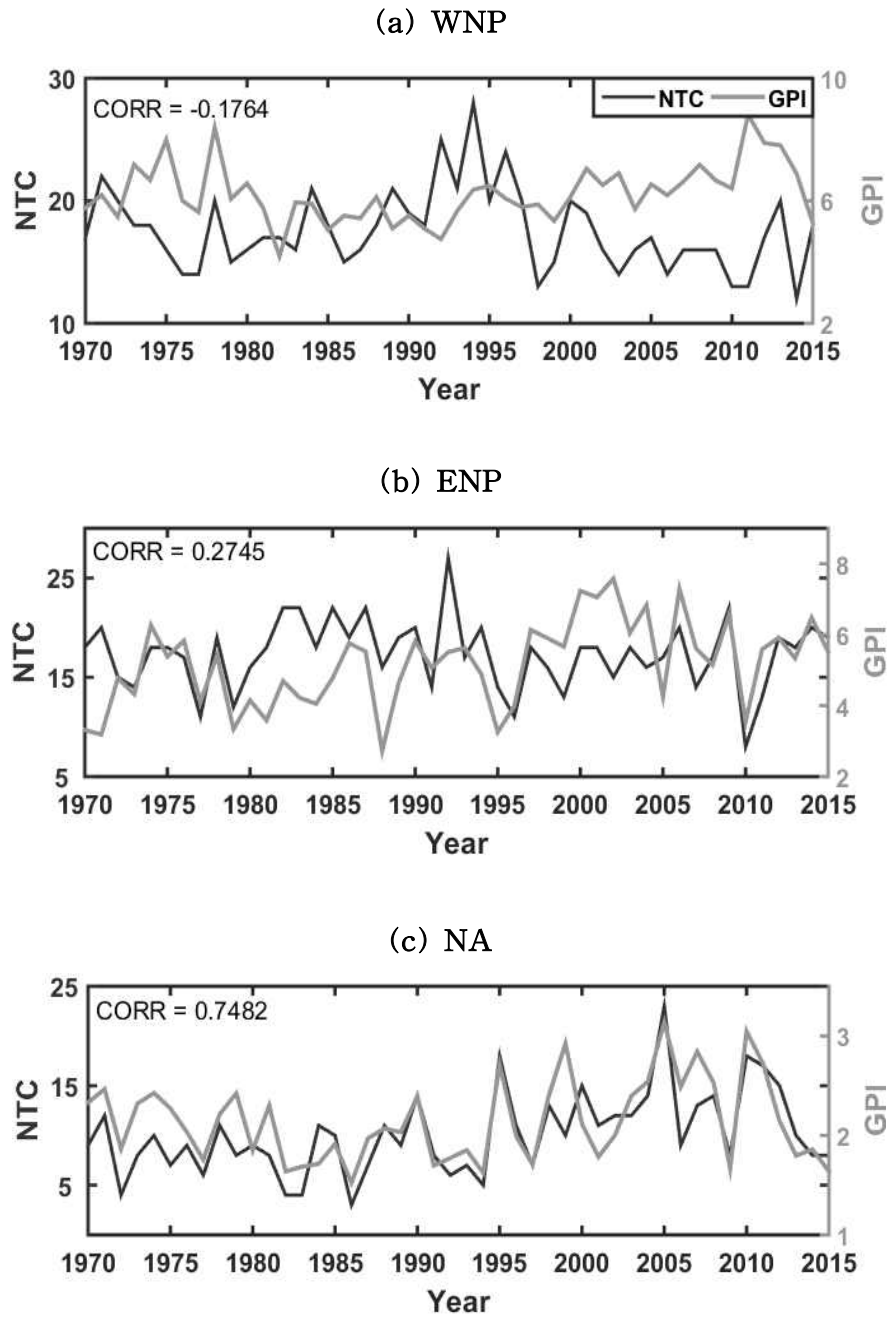


Fig. 9. Time series of GPI and TCs genesis frequency over the MGR of the (a) western North Pacific, (b) eastern North Pacific, and (c) North Atlantic in JASO.

3.2 태풍의 주요 발생구역의 환경인자와 태풍발생빈도 간 상관도의 해역별 차이에 대한 원인 분석

상관관계에 대한 분석은 비교대상인 두 환경인자들의 변동성에 따라 크게 영향을 받기 때문에 분석에 이용되는 요소들의 변동성을 파악하는 것은 중요하다. 이번 절에서는 해역별 환경인자와 태풍발생빈도 간의 상관도 차이가 발생하게 되는 원인을 알아보기 위해 환경인자들의 변동성과 평균 분포에 대하여 조사하였다. 분석에 쓰인 환경인자는 앞선 절에서와 동일하게 역학적 환경인자인 연직바람쉬어와 열역학적 환경인자인 최대잠재강도 그리고 해수면온도를 사용하였다.

Fig. 10은 해역별 태풍의 주요 발생구역의 연직바람쉬어와 최대잠재강도 그리고 해수면온도의 평균과 변동 크기를 나타낸 그림이다. 그림에서 'x'는 각 해역의 환경인자들의 평균값을 의미하며, ▲와 ▼는 평균에서 ±표준편차(standard deviation)를 나타낸다. 그림에서 박스로 설정된 범위는 변수 구간의 25-75% (Interquartile Range, IQR)를 나타내며, 점선으로 나타낸 범위는 상·하위 25%를 차지하는 범위를 가리킨다. 또한 '+'로 나타낸 것은 IQR의 1.5배 이상 차이 나는 값들을 가리키므로, 잠재적으로 분석에서 제외된 값들이라 할 수 있다. 따라서 변수들의 전체 변동크기는 검정색 가로 실선으로 표시된 구간을 가리키며, 그 간격이 넓을수록 환경인자의 변동성이 크다고 할 수 있다.

북서태평양의 연직바람쉬어는 평균값이 약 9 m s^{-1} 이었으며, 표준편차는 0.8 m s^{-1} 로 세 해역 중 가장 작게 나타났다(Fig. 10a). 또한 이 해역의 연직바람쉬어는 전체적으로 약 3 m s^{-1} 의 매우 작은 변동크기($8\text{-}11 \text{ m s}^{-1}$)를 나타내었다. 연직바람쉬어의 여름철 기후 값의 분포와 변동성을 살펴보면(Fig. 11) 태풍이 주로 발생하는 구역에서 표준편차가 1.5 m s^{-1} 내외로 주변에 비해 상대적으로 작은 값이 분포하고 있음을 알 수 있다(Fig. 11a). 즉, 북서태평양에서 연직바람쉬어의 변동성이 작다는 것은 여름철 동안 태풍의 주요 발생구역 내에서 대기 환경이 크게 바뀌지 않음을 의미하며, 이는 이 해역 태풍발생빈도 변동에 큰 영향을 미치지 어렵다는 것을 나타낸다.

북동태평양의 경우, 태풍의 주요 발생구역에서의 연직바람쉬어는 평균적으로 8

m s^{-1} 이하의 낮은 값을 보였으며, 북서태평양의 두 배에 해당하는 약 2 m s^{-1} 의 표준편차를 보이고 있었다. 전체적인 연직바람쉬어의 변동크기는 6 m s^{-1} ($4\text{--}10 \text{ m s}^{-1}$)로 이 역시 북서태평양에 비해 두 배 큰 값을 보이고 있었으며, 여름철 평균 연직바람쉬어의 공간 분포에서도 이러한 특징들은 잘 나타나고 있다(Fig. 11b). 북동태평양에서 연직바람쉬어의 변동성이 크다는 것은 태풍발달에 우호적인 환경과 비우호적인 환경이 혼재함을 의미하기 때문에, 북동태평양의 연직바람쉬어가 태풍발생빈도 변동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

북대서양의 경우는 북동태평양과 유사하게 전체적으로 5.5 m s^{-1} ($8\text{--}13.5 \text{ m s}^{-1}$)의 큰 변동크기를 보이고 있었다. 북대서양의 여름철 연직바람쉬어의 기후 값 공간분포에서도 태풍의 주요 발생구역 내에서 최대 3 m s^{-1} 이상의 높은 표준편차를 보이고 있었다(Fig. 11c). 이러한 큰 변동성은 북대서양의 연직바람쉬어가 태풍발생빈도의 변동에 크게 기여할 수 있는 환경을 제공하게 된다.

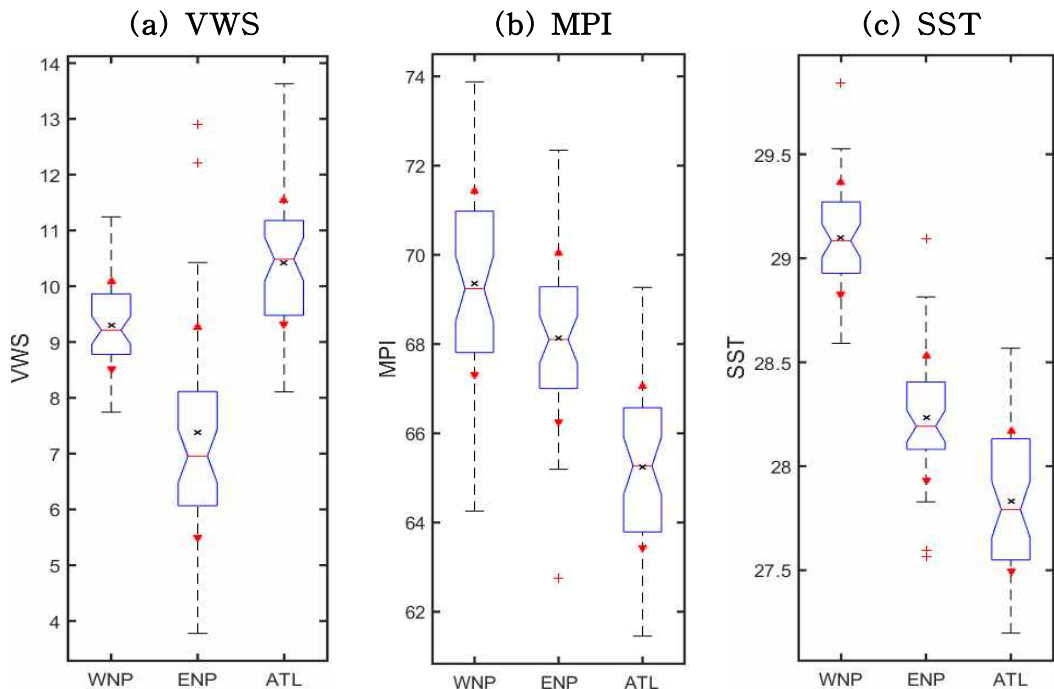


Fig. 10. Box plots of (a) vertical wind shear, (b) maximum potential intensity, and (c) sea surface temperature during JASO in the MGR for each basin. 'x' means an average these factors and '▲' and '▼' show the mean plus and minus the standard deviation.

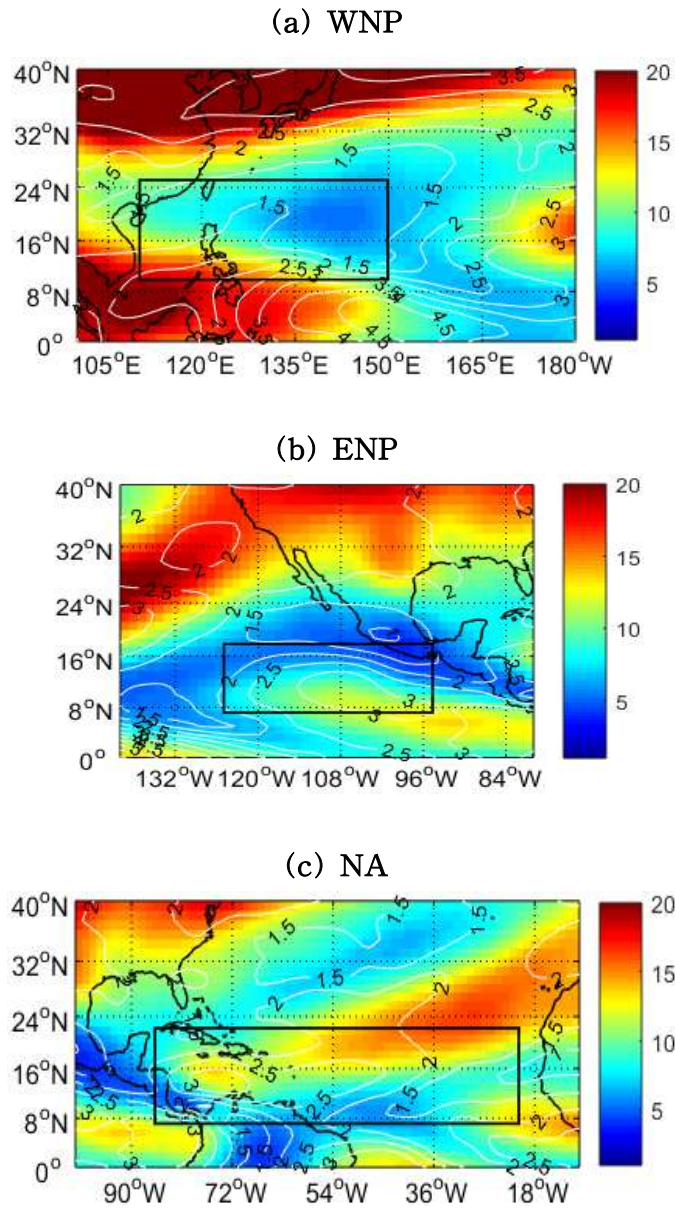


Fig. 11. Climatological mean of vertical wind shear in JASO season. Contour and color indicate the standard deviation and mean of the vertical wind shear, respectively. Black box means the MGR for each basin.

Fig. 10b는 태풍의 주요 발생구역에서 해역별 최대잠재강도의 평균과 변동성에 대한 분석 결과이다. 최대잠재강도는 유일하게 북대서양에서 태풍발생빈도와 강한 양의 상관관계를 보였으며, 나머지 두 해역에서는 낮은 유의 수준의 상관도를 보이고 있었다. 분석 결과, 북서태평양과 북동태평양의 최대잠재강도는 평균적으로 68 m s^{-1} 이상의 높은 값을 보였지만, 북대서양의 경우는 평균 약 65 m s^{-1} 로 상대적으로 작은 값을 보였다. 또한 북대서양에서 최대잠재강도가 작게는 62 m s^{-1} 이하로 매우 작은 값을 포함하고 있다. 최대잠재강도가 태풍발생에 영향을 끼치는 경계 값에 대한 연구는 아직 제시되지 않았지만, 북대서양의 여름철 최대잠재강도가 다른 두 해역에 비해 평균적으로 낮을 때에는 태풍의 발생빈도가 열린 요건에 의해 영향을 받게 될 것으로 사료된다. 그러나 북서태평양과 북동태평양의 경우는 최대잠재강도가 변동성에 관계없이 평균적으로 높게 유지되고 있기 때문에, 열적환경이 좋지 않은 해이더라도 열적 요건이 태풍발생에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 사료된다.

최대잠재강도에 기반이 되는 요소인 해수면온도의 변동성에 대해서도 유사한 분석을 실시해 본 결과(Fig. 10c), 북서태평양은 연변동에 관계없이 여름철 열적인 환경은 태풍발생에 우호적인 것으로 나타났다. 북대서양의 경우는 해수면온도가 평균적으로 세 해역 중에 가장 낮아, 해수면온도의 연변동에 따라 열적 환경이 태풍발생에 비우호적인 환경을 제공했을 가능성이 높아 보인다. 북동태평양의 경우 평균적인 해수면온도의 분포는 북서태평양과 북대서양 사이의 중간 값을 보이고 있었다.

해역별 환경인자들의 각기 다른 변동성에 의해 형성되는 태풍들 역시 해역별로 서로 다른 크기의 변동성을 보이고 있었다. 우선 북서태평양에서는 여름철에 태풍활동이 가장 활발한 만큼 태풍의 발생 빈도도 다른 해역에 비해 크게 나타나지만(평균 17.59개), 변동크기(std = 3.3개)는 비교적 작은 편이었다. 북동태평양 태풍의 평균 발생빈도는 12.35개이며, 변동크기(std = 3.5개)는 북서태평양과 유사한 수준을 가리키고 있었다. 반면, 환경인자들과 태풍발생빈도 간의 상관관계가 매우 강했던 북대서양의 경우 여름철 동안 비교적 낮은 발생 빈도(평균 10.13개)를 보였지만 변동성(std = 4.2개)은 상대적으로 크게 나타났다. 즉, 북대서양에서는 환경인자들의 변동성이 상대적으로 크고, 열역학적 환경인자들의 평

균이 비교적 낮아 태풍발생에 민감하게 영향을 미쳤기 때문에 태풍발생빈도 역시 높은 변동성을 보이는 것으로 판단된다. 반면, 북서태평양의 경우 여름철 평균적인 열역학적 환경이 좋아 높은 태풍발생빈도를 보이지만, 열적환경이 연 변동에 관계없이 태풍발생에 우호적이기 때문에 태풍발생시 환경변화에 민감하게 반응하지 못한 것으로 사료된다.

4. 태풍활동과 관련된 환경인자 분석

4.1 해역별 태풍활동과 환경인자 간의 상관관계

이번 절에서는 태풍의 활동을 나타내는 지수인 PDI를 이용하여 각 해역별 주요 환경인자와의 상관관계에 대한 분석을 진행하였다. 분석에 이용된 환경인자는 대표적인 역학적 환경인자인 연직바람쉬어와 열역학적 환경인자인 해수면온도를 사용하였다. Table 2는 2.3절에서 설정한 각 해역별 태풍의 주요 활동구역에 대해 환경인자와 PDI 간의 상관도를 분석한 결과이다. 여기서 연직바람쉬어는 태풍활동과 음의 상관 그리고 해수면온도는 양의 상관을 보이는 것이 일반적이다. 북서태평양의 분석 결과, PDI와 연직바람쉬어는 약한 양의 상관도를 보였고, 해수면온도와는 반대로 약한 음의 상관도를 보였다. 이 결과는 북서태평양 태풍의 주요 활동구역 내 열·역학적인 두 환경인자가 태풍활동 변동에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다. 북동태평양과 북대서양의 경우에는 두 환경인자 모두 태풍활동과 95% 신뢰 수준에 유의하는 강한 상관관계를 보였다. 특히 북대서양에서 두 환경인자 간의 상관도가 더욱 높게 나타났다. 이 결과는 북동태평양과 북대서양에서 해수면온도와 연직바람쉬어가 두 해역의 태풍활동 변동에 큰 기여를 하고 있음을 나타낸다.

Table 2. Correlations between PDI and environmental factors(vertical wind shear and sea surface temperature) in the Main Activity Region (MAR) of the western North Pacific, eastern North Pacific, and North Atlantic. Bold face indicates statistical significance at the 99% level.

Factor	WNP	ENP	NA
VWS	0.1699	-0.6104	-0.6684
SST	-0.1147	0.4544	0.5129

앞선 분석과 동일한 방법으로 태풍활동과 관련된 두 환경인자와 태풍활동 지수 간의 격자별 상관계수를 통해 각 해역별 상관도 분포를 알아보았다. Fig. 12는 연직바람쉬어와 PDI의 간의 상관도를 각 격자별로 나타낸 그림이다. 북서태평양의 경우 태풍의 주요 활동구역 안에서 강한 양의 상관도와 음의 상관도가 남북으로 혼재되어 있으며, 두 상관도 모두 95%이상 유의한 수준임을 알 수 있다(Fig. 12a). 이 결과는 태풍의 주요 활동구역에서 연직바람쉬어는 남북방향으로 서로 다른 형태로 변동함을 의미한다. 따라서 설정된 영역 내의 연직바람쉬어는 태풍활동과 평균적으로 낮은 상관도를 보이게 된다. 또한 설정 구역 내의 북쪽 구역에서 부터 설정 구역의 동쪽 해상까지 강한 음의 상관도가 띠 모양으로 분포함을 알 수 있는데, 이 같은 결과는 Fig. 4a와 매우 유사하다는 점을 주목해야 한다.

북동태평양과 북대서양의 상관도 분포의 분석 결과, 두 해역 모두 태풍의 주요 활동구역을 중심으로 강한 음의 상관도가 넓게 분포함을 알 수 있다(Fig. 12b,c). 특히 북대서양의 경우, 열대 해역을 중심으로 -0.6에 달하는 아주 강한 음의 상관도를 보이고 있었다. 이를 통해 북동태평양과 북대서양의 대기 역학적 환경인자는 태풍의 발생과 더불어 활동에도 매우 큰 기여를 하는 것으로 예측할 수 있다. 반면, 북서태평양의 대기 역학적 환경은 태풍의 주요 활동구역 내에서 남북방향으로 서로 다른 성질을 갖는 연직바람쉬어로 구성되어 있어 전체적으로 상관도의 상쇄를 일으키게 된다. 또한 북서태평양의 동쪽 해역에서 강한 상관도를 보임에 따라 이 해역의 대기 환경이 태풍의 발생과 더불어 활동 변동에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

Fig. 13은 여름철 태풍활동 지수와 해수면온도 간의 격자별 상관도를 나타낸 그림이다. 북서태평양의 상관도 분포에서 태풍의 주요 활동구역은 음의 상관도가 넓게 분포하고 있으며, 이 같은 분포는 일본의 동쪽 해상까지 넓게 자리하고 있음을 알 수 있다(Fig. 13a). 또한 태풍의 주요 활동구역의 남동쪽 부근에서 강한 양의 상관도를 보이는 것은 Fig. 6a의 결과와 매우 유사하나, 전체적으로 음의 상관도는 약화되었고 양의 상관도는 더욱 강해진 것을 알 수 있다. 따라서 북서태평양 태풍의 주요 활동구역의 해수면온도는 태풍활동 변동과 밀접한 관련성이 없는 것으로 판단되며, 이 해역의 해수면온도의 변동이 태풍활동에 큰 영향을 끼

치지 못하는 것으로 사료된다. 반면, 설정 구역으로부터 동쪽으로 벗어난 해역에서 오히려 강한 양의 상관도를 보이는 것으로 보아, 이 해역의 해수면온도의 변동은 연직바람쉬어와 더불어 북서태평양의 전체 태풍활동 변동에 큰 영향을 미치는 것으로 예상된다.

북동태평양의 경우 설정된 연구 영역에서 250°E로 갈수록 양의 상관도가 감소하고 있지만, 전체적으로 95% 이상 신뢰 수준의 강한 양의 상관관계를 보이고 있었다(Fig. 13b). 이때 양의 상관도가 감소하는 구역은 Fig. 5b와 Fig. 6b에서 상관도의 급격한 감소를 보인 구역과 매우 유사한 지점이다. 즉, 태풍과 관련된 열역학적 환경인자들과 태풍의 발생빈도 및 활동의 상관도가 북동태평양의 일부 해역에서 특징적인 감소 형태를 보이고 있다는 것이다. 이때 염두에 두어야 할 점은 급격한 상관관계의 감소를 보이는 지점이 태풍의 발생과 활동이 집중된 지역인 것이다(Fig. 2, Fig. 3). 따라서 태풍의 활동이 집중적으로 이뤄지는 해역의 열적 환경은 PDI 변동에 기여하는 바가 상대적으로 감소하며, 그 지역을 벗어난 해역의 환경일수록 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

해수면온도와 태풍활동 간의 상관도가 가장 큰 값을 보였던 북대서양은 넓은 해역에 걸쳐 양의 상관도 분포를 보였으며, 특히 열대 해역을 중심으로 매우 강한 양의 상관관계를 이루고 있었다(Fig. 13c). 이는 여름철 북대서양 해수면온도의 태풍활동에 기여하는 정도가 전반적으로 크며, 열대해역의 해수면 온도가 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 따라서 북대서양에서는 연직바람쉬어와 더불어 해수면온도의 변동에 의해 태풍활동이 민감하게 변화하고 있음을 알 수 있다.

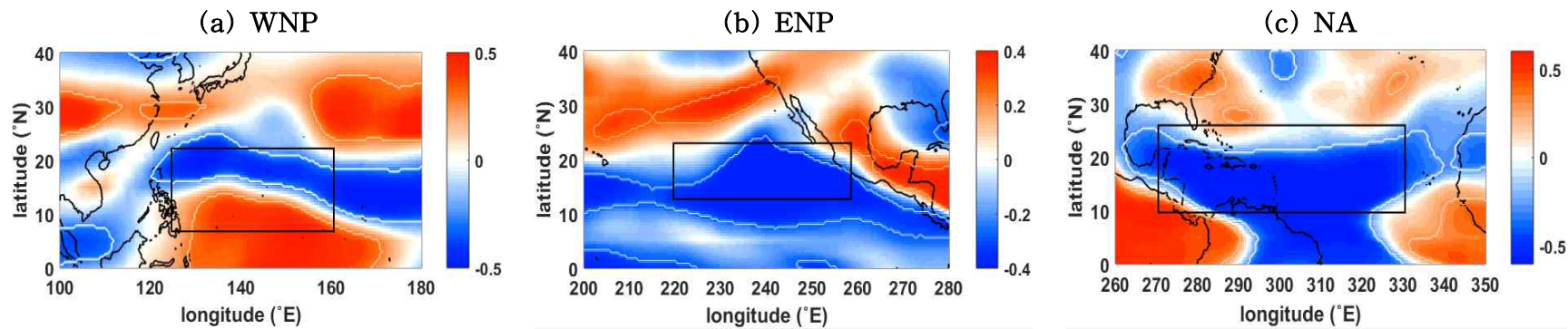


Fig. 12. Maps of correlation coefficients of gridded vertical wind shear with PDI in JASO. Box indicates the MAR for each basin. Contour indicates area where the correlation is statistically significant at the 95% confidence level.

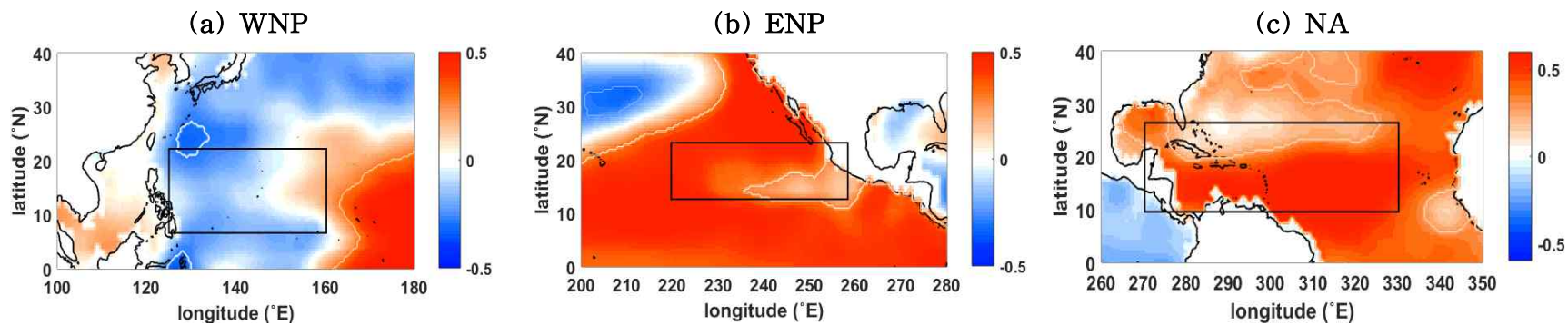


Fig. 13. Same as Fig. 12, but correlation between sea surface temperature and PDI.

4.2 태풍의 주요 활동구역의 환경인자와 PDI 간 상관도의 해역별 차이에 대한 원인분석

앞선 분석을 통해 태풍의 주요 활동 구역의 환경인자들과 PDI 간의 상관도가 각 해역별로 큰 차이를 보이고 있었으며, 북서태평양과 북동태평양 상에서는 특징적인 상관도 분포를 갖고 있었다. 따라서 이번 절에서는 두 해역의 상관도 분포 결과에 대하여 설명 가능한 원인을 집중적으로 분석해 보고자 한다.

i) 북서태평양

북서태평양의 상관도 분석 결과, 역학적 환경인자와 열적 환경인자 모두 태풍의 주요 활동구역에서 일반적인 이론과 상반되는 결과를 보였다. 하지만 Fig. 12a와 Fig. 13a에서 보였듯이 북서태평양의 동쪽 해역에서 이론과 일치하는 강한 상관도를 보이고 있었다. 태풍의 주요 활동 및 발생구역에서 동쪽으로 벗어나 있는 이 해역은 예상보다 많은 사전연구에서 언급되어 오고 있었다. Liu and Chan (2013)은 최근 1998-2011년 동안 태풍활동이 저조했던 원인이 본 연구에서 주목하는 해역과 유사한 10-17.5°N, 150-180°E의 대기 환경이 태풍발생에 비우호적이었기 때문이라고 설명하였다. Lin and Chan (2015)은 이와 비슷한 해역의 대기 환경이 태풍활동에 비우호적으로 변하고 있으며, 이는 지구 온난화에 의해 태풍 발달에 대하여 점차 우호적으로 변하고 있는 해양 환경의 효과보다 더욱 강하게 작용하여 태풍활동 감소에 큰 영향을 미친다고 주장하였다. Chan and Liu (2004)는 습윤정적에너지의 EOF (Empirical Orthogonal Functions) 분석을 통해 두 번째 모드가 태풍활동과 밀접한 연관이 있다는 결과를 보였다. 특히 북서태평양의 남동쪽 해역에서 높은 변동을 보이고 있으며 이는 태풍활동에 큰 영향을 미치게 된다고 밝혔다. 따라서 이번 절에서는 북서태평양 태풍의 주요 활동구역의 동쪽 해역을 HCR(High-Correlation Region, 8-21°N, 158-180°E)으로 설정하고, HCR의 환경인자가 북서태평양 PDI와 강한 상관관계를 갖는 이유와 북서태평양 태풍활동에 미치는 영향에 대하여 집중적으로 분석해보고자 한다.

Table 3은 북서태평양 태풍의 주요 활동구역(Main Activity Region, MAR)과

HCR 상의 환경인자가 북서태평양의 PDI와 갖는 상관관계를 나타낸 것으로, 장주기 변동(Multi-decadal)과 연변동(inter-annual)까지 분석한 결과이다. 장주기 변동은 7년 이동 평균한 결과이며, 전체 변동에서 장주기 변동을 빼준 결과가 나머지 연변동을 가리킨다.

분석 결과, HCR의 연직바람쉬어와 해수면온도는 북서태평양 전체 PDI와 99% 이상 유의한 수준의 강한 상관관계를 보이고 있었다. 또한 장주기 변동과 이를 제거한 나머지 변동에서도 95%이상 유의한 수준의 강한 상관도를 보이고 있다. 이는 HCR의 환경인자들이 북서태평양의 태풍활동과 매우 높은 관련이 있으며, 태풍활동 변동에 큰 기여를 하고 있다고 해석 할 수 있다. 반면, 태풍의 주요 활동구역의 연직바람쉬어 같은 경우 모든 상관도 분석에서 아주 낮은 상관관계를 보였으며, 해수면온도 분석에서는 유일하게 장주기 변동에서 95% 이상 유의한 수준의 양의 상관관계를 보였다. 하지만 이 역시 HCR 지역의 결과보다 현저히 낮은 상관도였으며, 장주기 변동을 제거한 나머지 변동에서는 오히려 95% 유의 수준에 해당하는 음의 상관도를 보였다. 즉, 두 환경인자의 연변동에 있어서 태풍의 주요 활동구역의 해수면온도는 태풍활동 변동과 반대되는 경향을 보이고 있기 때문에 이 같은 결과는 유의미한 결과로 볼 수 없다고 생각된다. 따라서 HCR 상의 환경인자들이 태풍활동 변동에 미치는 영향은 상대적으로 매우 큰 것으로 보이며, 이렇게 좁은 해역의 환경들이 북서태평양의 전체 태풍활동 변동에 기여하는 바가 굉장히 크다는 것은 기후학적으로 매우 의미가 있는 결과라고 생각된다.

Table 3. Correlations between PDI and environmental factors(vertical wind shear and sea surface temperature) in the main activity region (MAR) and high-correlation region (HCR) of the western North Pacific. Bold face (underlined) indicates statistical significance at the 99% (95%) level.

Factor		PDI&VWS	PDI&SST
Total	MAR	0.1699	-0.1147
	HCR	-0.4085	0.3823
Multi-decadal	MAR	-0.2159	<u>0.3407</u>
	HCR	<u>-0.3333</u>	0.5590
Inter-annual	MAR	0.2256	<u>-0.3982</u>
	HCR	<u>-0.3959</u>	<u>0.3337</u>

HCR의 환경인자가 북서태평양 전체 태풍활동과 높은 관련이 있음을 보였기 때문에, 이러한 환경 하에 발생하는 태풍들은 전체 태풍활동에 어떠한 영향을 주는지 알아보려고 한다. 먼저, HCR에서 발생하는 태풍들의 PDI를 계산하여 전체 태풍활동 변동에 기여하는 바를 조사하였다(Table 4). HCR에서 발생한 태풍들의 PDI와 북서태평양 전체 태풍의 PDI 간의 상관관계는 태풍의 주요 활동구역에서의 결과보다는 작은 값을 보였다. 다시 말해, 두 경우 모두 99% 이상 유의하는 매우 강한 상관도를 보였지만 태풍의 주요 활동구역에서의 태풍활동이 북서태평양 전체 PDI 변동에 기여하는 바가 10% 더 우세함을 보였다. 하지만 이 같은 결과는 태풍의 발생 빈도가 두 구역에서 8배 이상의 매우 큰 차이를 보이기 때문에, 태풍의 발생 빈도 차이를 고려하여 구역별로 해마다 태풍 하나가 발생했을 때 갖는 기여도를 조사해 볼 필요가 있다. 그 결과, 태풍 하나 당 북서태평양 전체 PDI 변동에 대한 기여도는 주요 활동구역에서 7.23%로 매우 작은 기여도를

보인 반면, HCR에서는 태풍 하나 당 52.78%의 기여도로 약 7배 이상 차이 나는 결과를 보였다. 즉, 1년에 약 1.09개의 굉장히 낮은 발생빈도를 갖는 HCR의 태풍들이 북서태평양 전체 PDI 변동에 매우 큰 기여를 하는 것으로 설명할 수 있다.

Table 4. Correlations between total PDI and PDI of TCs formed in each region and contribution of PDI in each region to total PDI variation. Bold face (underlined) indicates statistical significance at the 99% (95%) level.

1970–2015	<i>r</i>	contribution	frequency (year ⁻¹)	contribution per 1 TC (year ⁻¹)
MAR PDI	0.8250	68.06%	460 (9.41 year ⁻¹)	7.23%
HCR PDI	0.7585	57.53%	53 (1.09 year ⁻¹)	52.78%

북서태평양 태풍의 주요 활동구역과 HCR의 두 해역을 중심으로 환경인자들이 PDI를 구성하는 요소에 대하여 어떠한 관련이 있는지 조사하였다(Table 5). 태풍의 주요 활동구역에서의 환경인자들은 지속기간과 높은 상관도를 보이고 있었지만, 일반적으로 알려진 바와는 상반된 결과를 나타내고 있었다. 즉, 태풍의 주요 활동구역의 연직바람쉬어가 약화되고 해수면온도 역시 상승하여 태풍 발달에 호조건이 형성됨에도 불구하고, 태풍의 지속기간은 오히려 감소하게 된다는 결과를 보여주고 있는 것이다. 반면 HCR의 연직바람쉬어는 PDI를 구성하는 세 가지 요소들과 95% 신뢰수준의 강한 음의 상관관계를 보였으며, 해수면온도는 태풍의 강도와 강한 양의 상관관계를 보이고 있었다. 이 결과는 여름철 HCR의 연직바

람쉬어가 약해질수록 북서태평양의 태풍발생빈도는 높아지고 이와 더불어 태풍의 강도와 지속시간 까지 증가하게 되며, 해수면온도는 태풍 강도의 발달 과정에서 더욱 큰 영향을 미치는 것을 나타낸다. 따라서 HCR의 환경인자들은 PDI를 구성하고 있는 세 가지 요소들도 높은 상관관계를 보이고 있기 때문에, 북서태평양 전체 PDI와 강한 상관도를 갖게 되는 것으로 사료된다.

Table 5. Correlations between PDI components and environmental factors in each region. Bold face (underlined) indicates statistical significance at the 99% (95%) level.

1970-2015	VWS		SST	
	MAR	HCR	MAR	HCR
Frequency	0.0274	<u>-0.3644</u>	-0.2291	0.0848
Intensity	-0.0139	<u>-0.3535</u>	0.0467	0.4284
Duration	<u>0.3712</u>	-0.4539	-0.4797	0.1685

이러한 결과를 보인 HCR의 환경인자들이 태풍활동과 큰 상관성을 갖는 것에 대하여 3.2절과 같이 환경인자들의 변동성에 대하여 분석을 진행하였다. Fig. 14는 그 결과로 HCR의 연직바람쉬어와 해수면온도의 변동성을 MAR과 비교해 보았다. HCR의 연직바람쉬어는 평균이 10 m s^{-1} 이상이며, 표준편차는 약 2 m s^{-1} 이상으로 나타났다. 이는 MAR보다 두 배 이상 되는 크기이며, 전체 변동크기 역시 6.5 m s^{-1} ($7.5\text{--}14 \text{ m s}^{-1}$)로 비교적 높은 변동성을 보였다. 즉, HCR의 연직바람쉬어가 MAR 보다 크게 변동하기 때문에 북서태평양 태풍활동에 절대적으로 작용한 것으로 사료된다. HCR의 해수면온도는 MAR의 평균보다 약 0.5°C 가량 낮은 것을 알 수 있다(Fig. 14b). 즉, MAR의 해수면온도는 여름철 동안 고온의

해수를 유지하며 태풍활동에 계속해서 호조건인 환경을 제공해준 반면, HCR에서는 상대적으로 낮은 수온 분포를 보여 태풍활동 변동에 기여하는 바가 비교적 큰 것으로 보인다. 따라서 HCR의 대기인자의 강한 변동성과 비교적 낮은 열적 환경에 의해 북서태평양 전체 태풍활동 변동에 큰 영향을 미친 것으로 보이며, HCR에서 발생한 태풍들이 지속시간이 길고, 강도 발달에 좋은 조건을 보였기 때문에 PDI 변동에 기여하는 바가 큰 것으로 사료된다.

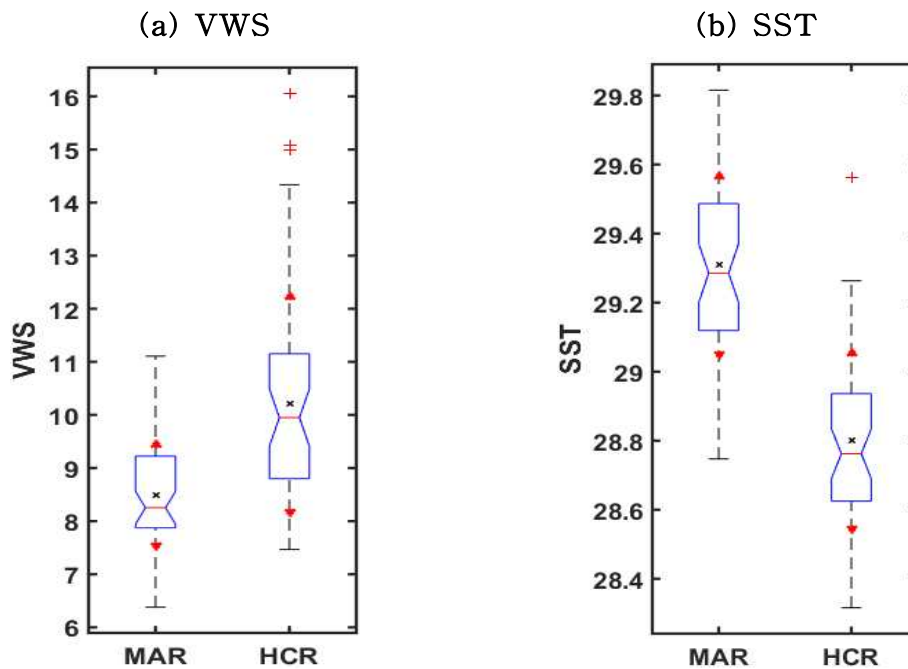


Fig. 14. Same as Fig. 10, but box plots of (a) vertical wind shear and (b) sea surface temperature during JASO for each region.

ii) 북동태평양

여름철 북동태평양 태풍의 주요 활동구역에서 연직바람쉬어와 해수면온도는 태풍의 활동 변동과 99% 이상 유의한 수준의 높은 상관도의 결과를 보여주었다. 또 다른 열역학 환경인자로 최대잠재강도는 북동태평양 태풍의 주요 활동구역에서 PDI와 0.3276의 상관도로 95%이상 유의한 수준의 강한 상관관계를 보였다. 그러나 격자별 해수면온도와 북동태평양 전체 PDI의 상관도 분포를 통해 태풍이 주로 발생하고 활동하는 해역에서 상관도가 급격히 떨어지는 현상을 보이고 있었다(Fig. 13b). 이러한 분포는 최대잠재강도와 PDI 간의 상관도 분포에서도 유사하게 나타났으며, 일부 해역에서는 95% 이상 유의한 음의 상관도를 보이기도 하였다(Fig. 15). 앞서 언급했듯이 북동태평양의 열적 환경인자들과 태풍활동 간의 상관도가 급격히 감소하는 해역은 태풍의 발생과 활동이 집중된 해역으로, 이러한 해역에서 열적 환경인자들이 태풍활동과 급격한 상관도 감소를 보이는 것은 매우 주목할 만한 문제이다.

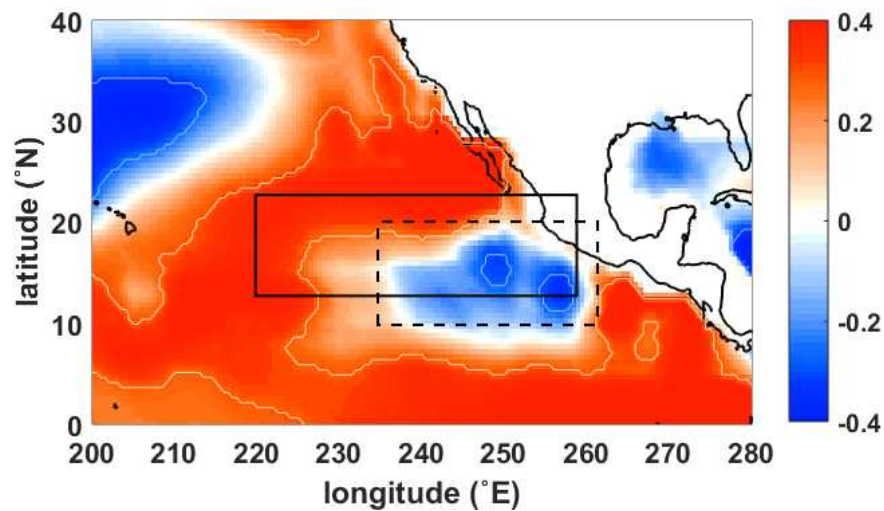


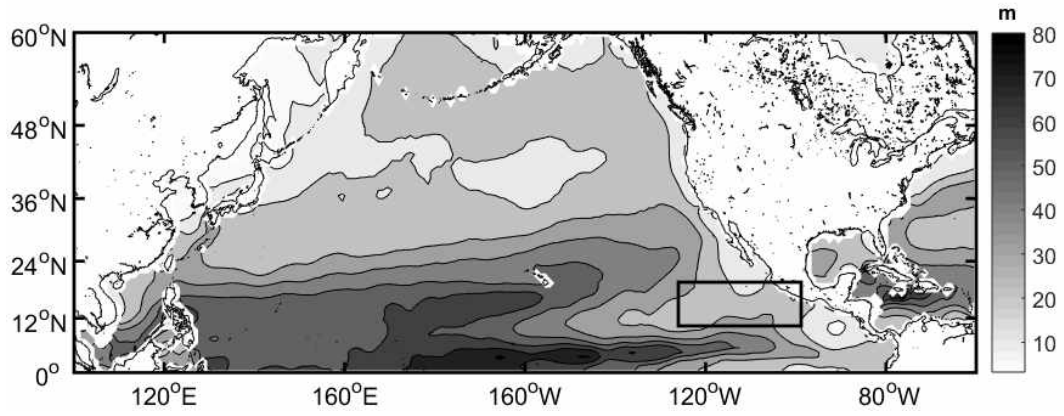
Fig. 15. Same as Fig. 12, but correlation between maximum potential intensity and PDI. Dashed line indicates the low-correlation region (LCR, 10-20°N, 235-262°E).

이러한 결과를 바탕으로 태풍활동과 관련된 북동태평양의 해양의 열적 구조가 다른 해역과 다소 차이가 있을 것이라 생각되었다. 태풍의 생성과 발달 과정에 있어 해양의 수심별 수온 구조는 중요한 요소로 작용하게 된다(Lin et al., 2008; Gray, 1979; Emanuel et al., 2004). 특히 태풍의 발생과 활동에 필요조건이 되는 26°C의 등온선을 의미하는 D26 (Depth of 26 °C isotherm)과 D26까지의 해수의 열용량을 뜻하는 OHC (Ocean Heat Contents), 그리고 해수면으로부터 0.5°C 이상 차이가 나기 시작하는 혼합층 깊이(Mixed Layer Depth, MLD) 등의 열적인 수온 구조는 태풍발달 과정에 있어 매우 큰 영향을 미치게 된다(Monterey and Levitus, 1997). 따라서 북동태평양의 해양 열적 구조를 이해하기 위해 해양 기후 자료를 이용하여 해양의 수심별 열적 구조를 분석해보았다. 이때 열적 환경인자와 태풍활동 간의 상관도가 급격히 감소하는 해역을 10-20°N, 235-262°E (Low-Correlation Region, LCR)로 설정하였다.

Fig. 16a는 북태평양상의 혼합층 깊이를 나타낸 것으로, 주변 해역에 비해 검은 선으로 표시된 LCR에서 상대적으로 얇은 혼합층 깊이를 보이고 있다. 혼합층 깊이가 얇다는 것은 해양 표면에 고온의 해수가 얇게 형성됨을 의미하며, 물리적인 기작에 의해 상층 해수의 혼합 운동이 활발해지므로 해수면 냉각(cooling)이 쉽게 발생할 수 있음을 의미한다. 대표적인 해수의 혼합 기작으로는 태풍의 강력한 바람으로, 태풍이 집중적으로 발생하고 발달하는 LCR에서 해수면의 혼합 운동이 활발할 것으로 판단되며, 이에 따라 LCR의 해수면은 냉각 활동이 쉽게 일어날 것으로 보인다.

D26 역시 LCR에서 비교적 낮은 값이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 16b). 이는 태풍발달에 있어 필요한 해양의 열적 조건인 26°C의 해수 층이 주변 해역보다 비교적 상층에 얇게 분포하고 있음을 가리킨다. 사전 연구에 의하면 D26이 깊을수록 태풍 발달 과정에서 많은 에너지를 제공하게 되므로, 태풍활동에 우호적인 영향을 미친다고 밝힌 바 있다(Pun et al., 2007; Lin et al., 2009). 그러나 D26이 낮은 북동태평양의 LCR은 해양 상층에 고온의 해수가 비교적 풍부하지 않기 때문에, 태풍의 활동에 의해 해양 상층의 혼합운동이 활발해지고, 이에 따라 해수면 냉각이 쉽게 발생하게 될 것으로 보인다.

(a) Mixed Layer Depth



(b) D26

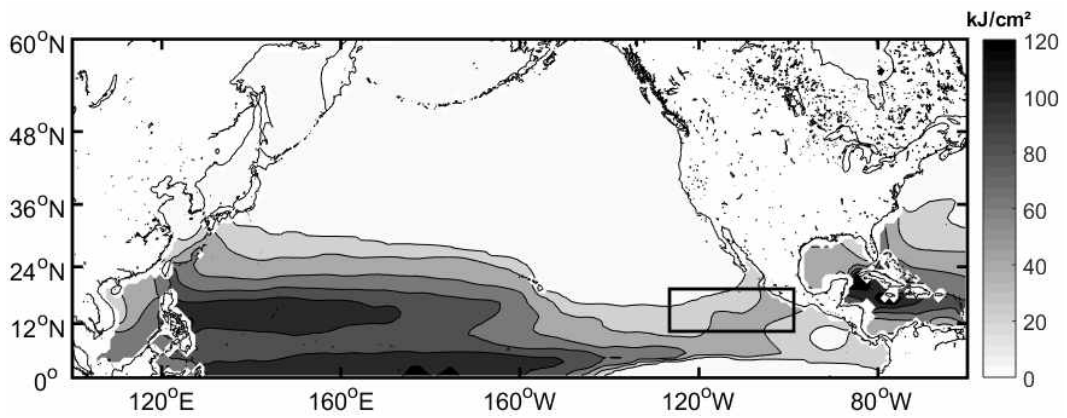


Fig. 16. Climatological mean of (a) mixed layer depth (MLD) and (b) D26 in JASO season. Black box means the LCR.

북동태평양 해수의 열적인 특징을 고려하여 본 연구에서는 하나의 가능성을 제시하였다. 그것은 현재 널리 사용되고 있는 월별 해수면온도 자료에 태풍에 의한 냉각 효과가 이미 포함되어 있을 수 있다는 것이다. 다시 말해, 일별 해수면온도 자료를 이용하여 월별 해수면온도 자료를 산출하는 과정에서 태풍에 의한 냉각 효과가 이미 포함되어 있기 때문에 실제 태풍활동이 이루어지는 환경과 다소 차이가 있을 수 있다는 것이다. 특히, 북태풍활동의 LCR은 태풍의 발생과 활동이 매우 밀집되어 있는 해역으로, 태풍활동에 의한 상층 해수의 혼합 운동이 활발히 진행됨에 따라 해수면 냉각이 쉽고 빠르게 발생하게 된다. 따라서 북태풍 활동 상의 태풍활동이 활발한 해역에서 해수면 냉각 현상을 많이 포함하고 있기 때문에, 월별 열적 환경인자와 태풍활동 간의 상관도가 급격히 떨어지는 것으로 추측된다. 이러한 가능성을 확인하기 위해 본 연구에서는 간단한 실험을 진행하였다.

실험에 앞서 설계한 가정은 ‘태풍에 의한 해수면 냉각효과를 월별 해수면온도 자료에서 제거를 해준다면, 태풍의 활동과 새롭게 얻어진 해수면온도 간의 상관도는 급격한 감소를 보이지 않을 것’이다. 실험 방법은 태풍의 활동 정도에 따른 해수면온도의 냉각 효과를 제거하기 위하여 임의의 해수면온도 보정 값을 더해 주는 방법으로, 최종적으로 태풍의 효과를 제거한 새로운 해수면온도 자료를 산출해 내는데 집중하여 실험을 진행하였다. 한 해 평균 PDI의 공간적인 분포를 확인하기 위해, 태풍의 최적경로 자료를 이용하여 한 해 여름철 동안 발생한 태풍들의 PDI를 6시간 간격의 태풍 이동에 따라 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 격자 간격으로 누적하여 계산하였다. 연구 기간 동안의 전체 PDI의 평균 공간 분포를 통해 PDI가 집중적으로 높은 값을 보이는 250°E 부근은 Fig. 14b와 Fig. 15에서 보였던 LCR지역과 매우 유사하다는 것을 알 수 있다(Fig. 17).

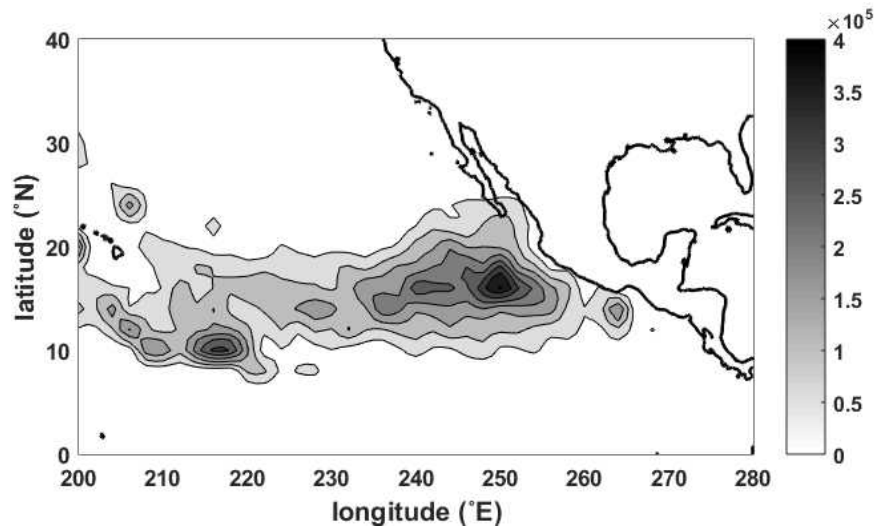


Fig. 17. The spatial distribution of PDI followed the movement of TCs in JASO.

태풍활동에 의해 해수면의 냉각된 정도를 파악하고, 그에 대한 보정 값을 기준하기 위하여 일별 해수면온도 자료를 이용하여 태풍의 도달 일로부터 그 이후의 해수면온도 변화를 조사하였다. 다시 말해, 태풍이 위치해 있는 위·경도를 중심으로 반경 400km 내의 해수면온도를 평균하여, 태풍이 도달 후 21일(3주) 동안의 해수면온도 변화를 조사하였다. 이렇게 구한 3주 동안의 해수면온도의 변동은 태풍이 도달하기 5일 전 환경과 비교하여, 해수면온도가 최저값을 보인 날을 최종 냉각이 이루어진 날로 설정하였다. 이때 태풍이 도달하기 5일 전 해수면온도와 최저값을 보인 해수면온도 간의 차이를 최종 냉각의 크기로 정의하였다. Fig. 18는 실험에 이용된 한 예(1997년 8호 hurricane 'HILDA')로, 태풍이 도달한 이후 해수면온도가 어떻게 변화되었는지 파악하기 위해 발생 지점에서 21일 동안의 해수면온도 변화를 나타낸 시계열이다.

사각형으로 표시된 점은 태풍이 도달하기 5일 전의 환경으로, 반경 400km 내의 해수면온도를 평균한 값이다. 그 다음으로 찍힌 점이 태풍이 현 지점에 도달했을 당시의 해수면온도를 가리키며, 그 이후부터 해수면온도가 변화하는 것을 1

일 간격으로 총 3주간의 변동을 나타내었다. 이때 검은색으로 채워진 원이 해수면온도가 최저로 떨어졌을 때를 의미한다. 따라서 이 지점에서 해수면의 수온은 태풍이 도달한 날로부터 7일 후에 약 0.65°C 크기의 냉각이 발생하게 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 한 태풍이 6시간 간격으로 도달하는 지점마다 냉각되는 정도를 계산하였으며, 46년의 연구기간 중 대표적으로 7개의 연도(1982, 1988, 1989, 1997, 1998, 2000, 2013)를 선택하여 해수면의 평균 냉각 크기를 구하였다. 분석에 선택된 6개의 해는 북태평양 상에서 해양 열적 환경의 변동을 일으키는 기후 현상인 엘니뇨(1982, 1997-98)와 라니냐(1988-89, 2000), 그리고 정상해(2013)를 포함하는 경우로, 자연 변동에 의한 해양 환경의 변화를 고려하기 위해 위와 같은 해들을 선정하였다.

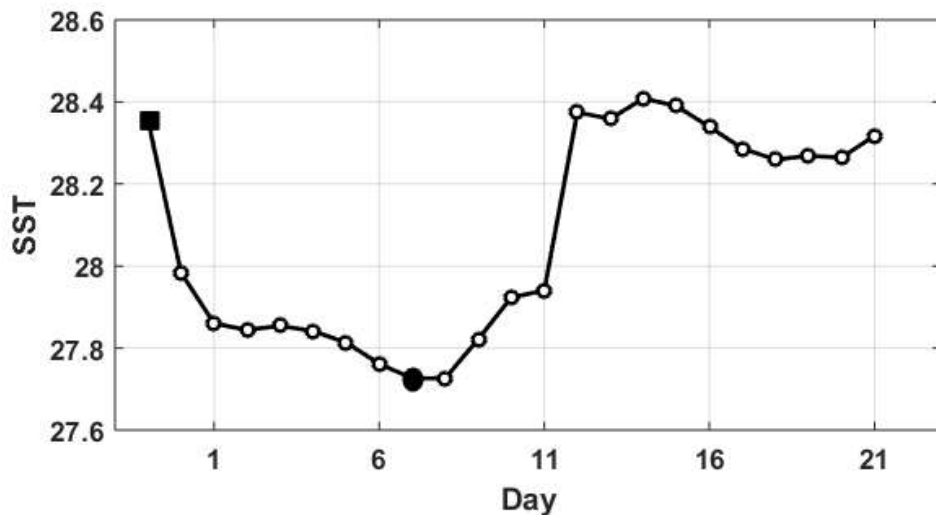


Fig. 18. Time series of SST at hurricane 'HILDA' genesis location. Black square and circle marker mean SST before the TC reaches this point and the minimum SST after the TC passed, respectively.

이렇게 계산된 해수면온도의 냉각 크기는 Fig. 19a의 분포로 나타내었으며, 태풍 이동에 따른 PDI의 평균 역시 비정규분포를 통해 나타내었다(Fig. 19b). 이때 태풍에 의한 해수면의 냉각 정도는 평균 0.71℃이였으며, 최대 3℃이상의 냉각을 보이기도 하였다. PDI의 분포에 따라 해수면온도 보정 값을 지정하기 위해 PDI의 평균을 기준으로 표준편차만큼의 간격을 설정하여 총 7개의 범위를 지정하였고, PDI 범위에 따른 해수면온도 보정 값도 동일한 방법으로 설정하였다(Fig. 19). 따라서 해마다 PDI가 갖는 공간분포에 대하여, 각 격자별 PDI 값이 사전에 설정한 범위 안에 속하게 되면 해당 격자의 해수면온도에 그에 상응하는 냉각 보정 값을 더해주는 과정을 거쳤다. 이를 통해 연구기간 동안 태풍에 의한 냉각 효과가 제거된 새로운 해수면온도자료를 산출해낼 수 있었다.

실험을 통해 얻어진 새로운 해수면온도 자료가 보정이 되었는지 검증하기 위하여, 기존의 해수면자료를 이용하여 각각의 기후 값 차이의 분포를 구해 보았다(Fig. 20). 확인 결과, 태풍이 주로 활동하는 영역에서 해수면온도가 증가하는 형태를 보였고, 이를 통해 새로운 해수면온도 자료에 해수면 냉각 현상이 상쇄되었음을 알 수 있었다. 그림에서도 알 수 있듯이, 실험 전후 해수면온도의 편차 분포는 태풍의 평균 활동 분포와 매우 유사하게 나타나며(Fig. 17), 평균적으로 최대 1.5℃가량 보정이 되었다.

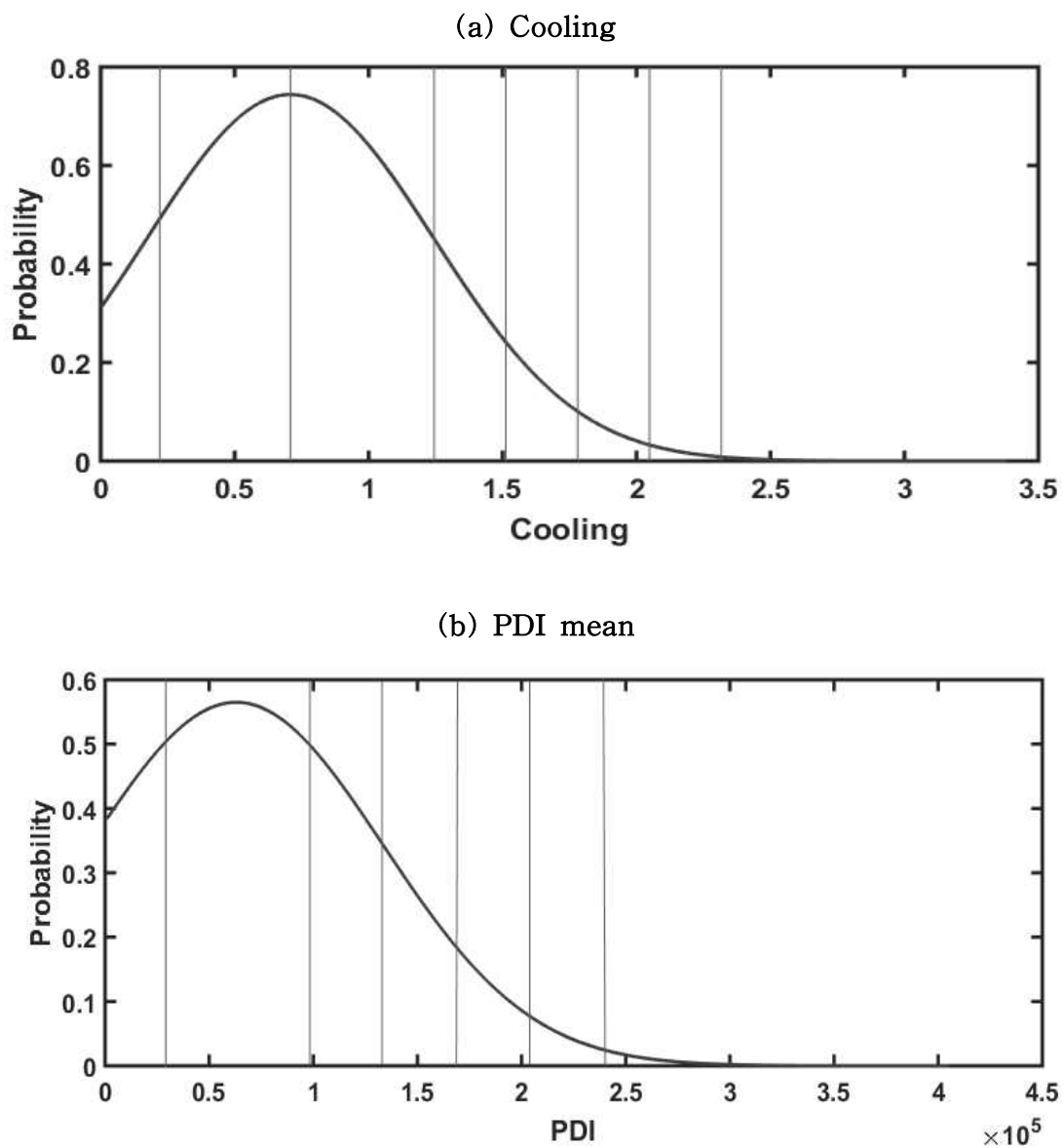


Fig. 19. Non-normal distribution in (a) SST cooling after the passing of TCs and (b) averaged PDI. Gray line means (a) correction values for SST cooling and (b) certain range of PDI mean.

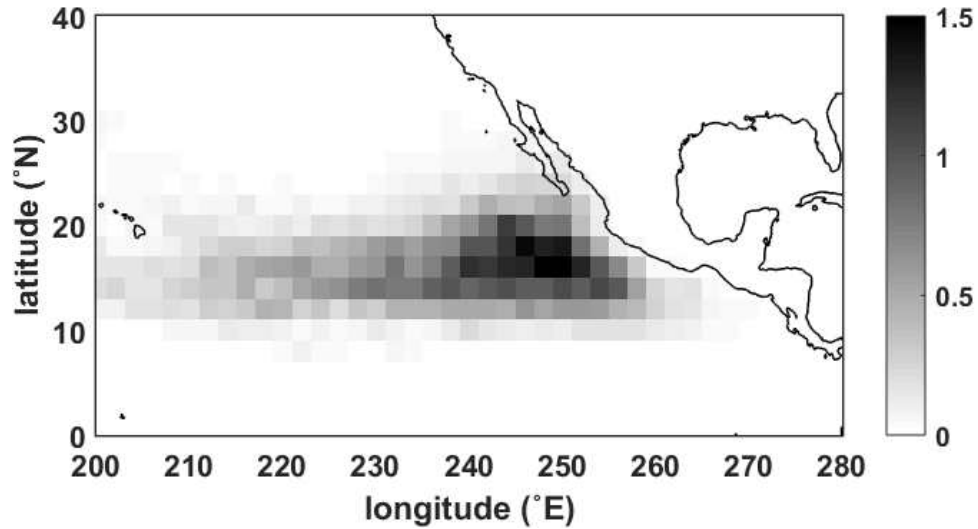


Fig. 20. Difference of the SST in before and after experiment.

본 실험의 가정의 적절성을 확인하기 위해, 새롭게 구한 해수면온도와 PDI 간의 격자별 상관도를 구해보았다. Fig. 21에서 알 수 있듯이, 실험 전과 다르게 북태풍활동 전반에 걸쳐 강한 양의 상관도를 보이고 있으며, LCR로 정의된 구역에서 상관도가 급격히 떨어지는 현상이 매우 줄어들음을 알 수 있다. 실험 결과에 대하여 자세히 확인하기 위해 앞서 설정한 태풍의 주요 활동구역 및 LCR의 해수면온도와 북태풍활동 전체 PDI에 대한 시계열분석을 진행하였다(Fig. 22). Fig. 22a,b는 실험 전 결과로 태풍의 주요 활동구역과 LCR 상의 해수면온도와 PDI의 시계열을 나타낸 것이다. 실험 전 태풍의 주요 활동구역의 해수면온도와 PDI 간의 상관도는 0.4544로 99%유의한 수준이긴 하였지만, 상관도가 급격히 감소하는 LCR에서는 0.3554의 비교적 낮은 상관도를 보이고 있었다. 실험 후 보정된 해수면온도를 이용하여 같은 분석을 한 결과, 태풍의 주요 활동구역에서는 상관도가 0.7159로 두 환경인자 간의 상관관계가 더욱 강해진 것을 알 수 있었다(Fig. 22c). 또한, LCR의 해수면온도는 PDI와 0.7253의 더욱 강한 양의 상관도를 보여(Fig. 22d), LCR을 중심으로 태풍에 의한 냉각현상이 굉장히 상쇄되었음을 알 수 있다.

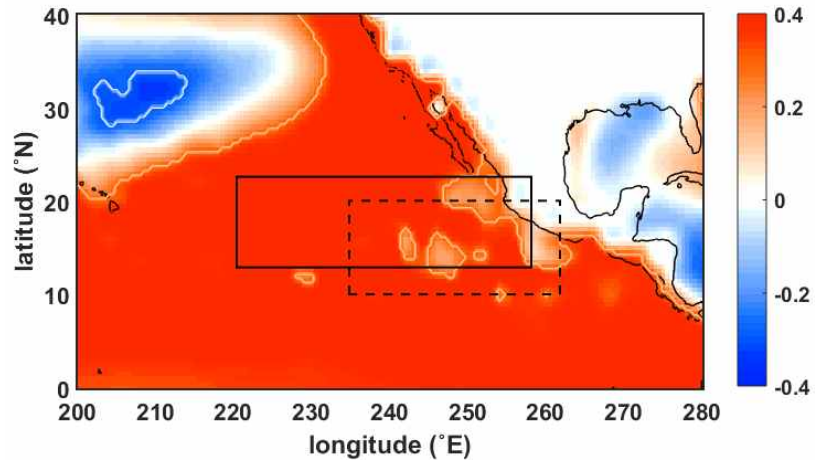


Fig. 21. Same as Fig. 15, but correlation between SST derived from experiment and PDI.

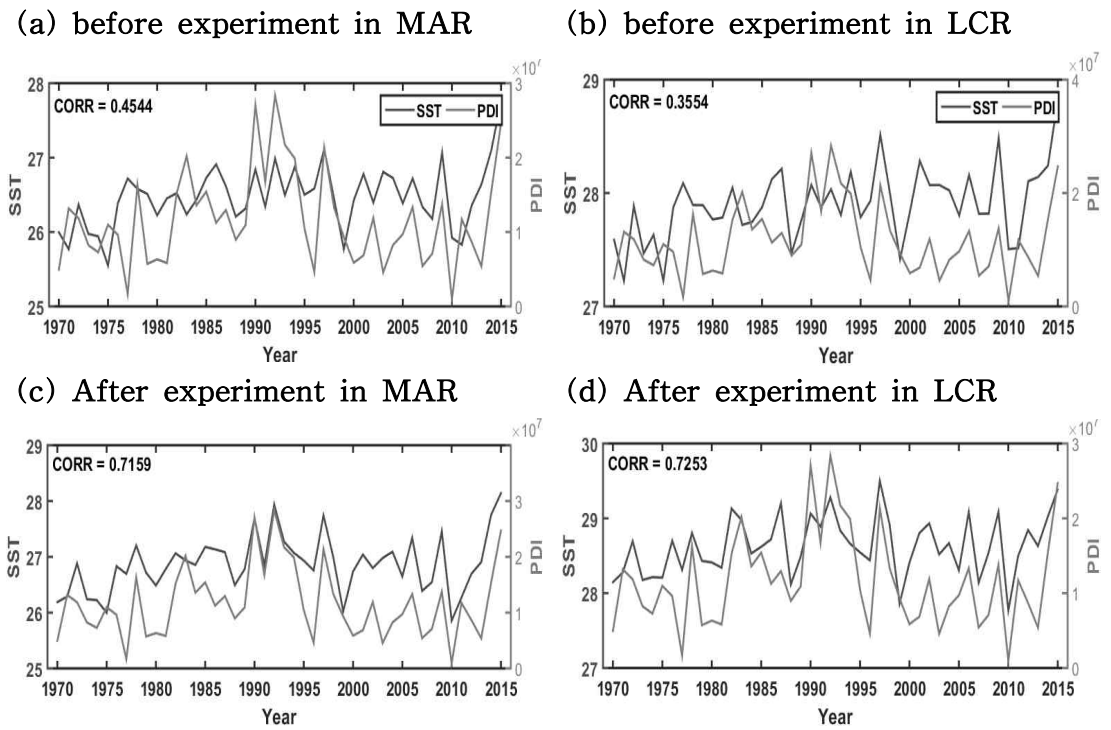


Fig. 22. Time series of PDI and SST over the MAR (left panel) and LCR (right panel). (a) and (b) are results before conducting the experiment and (c) and (d) are results after that.

본 실험을 통해 북태풍활동의 기존 해수면온도 자료에 태풍에 의한 냉각효과가 포함되어 있을 수 있다는 가설에 대한 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 해수면온도뿐만 아니라 이를 이용한 최대잠재강도에도 큰 영향을 미칠 것으로 생각되어, 수정된 해수면온도 자료를 이용하여 최대잠재강도를 계산한 뒤, 북태풍활동 PDI와의 상관도에 대하여 재분석하고자 하였다. 보정된 해수면온도 자료를 이용하여 계산된 최대잠재강도를 확인하기 위해 기존의 최대잠재강도와 기후값의 차이를 비교해 보았다(Fig. 23). 그 결과, 해수면온도 자료의 편차분포와 유사하게 태풍의 주요 활동구역을 중심으로 최대잠재강도가 증가함을 보였으며, 해수면온도가 최대로 보정된 해역에서 3 m s^{-1} 이상의 증가를 보이기도 하였다. 새롭게 얻어진 최대잠재강도와 PDI의 상관도가 얼마나 향상되었는지 확인하기 위해 격자별 상관도 분포를 통해 알아보았다. Fig. 24는 그 결과로, 실험 전과 비교하여 LCR 부근에서 음의 상관도가 확연히 줄어든 것을 알 수 있다. 또한, 태풍의 주요 활동구역의 최대잠재강도는 태풍활동과의 상관도가 실험 전 0.3276에서 실험 후 0.6927로 더욱 강해졌으며, LCR에서는 실험 전 0.0287이었던 상관도가 실험 후 0.5953으로 이 역시 큰 폭 증가하는 결과를 보였다. 따라서 수정된 해수면온도 자료를 이용하여 계산된 최대잠재강도 역시, 태풍활동과의 상관도가 매우 향상됨을 알 수 있었다.

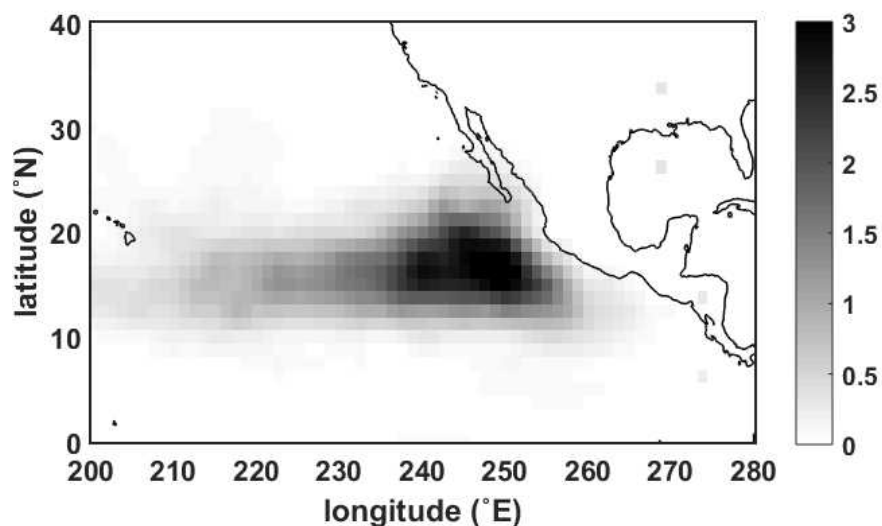


Fig. 23. Same as Fig. 20, but difference of the MPI.

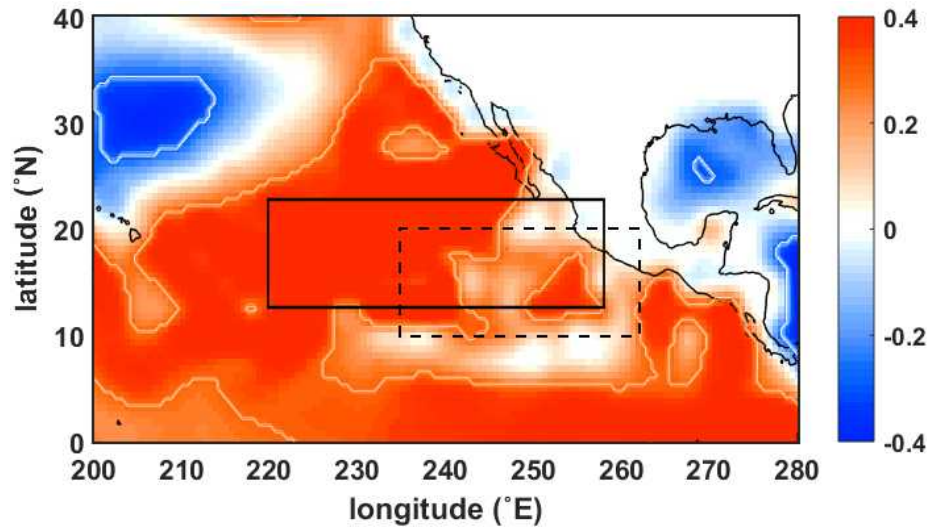


Fig. 24. Same as Fig. 15, but correlation between MPI derived from experiment and PDI.

전체적으로 해수면온도 자료에서 북태풍활동의 태풍활동에 의한 혼합 작용으로 발생하는 해수면 냉각 효과를 보정한 결과, 최대잠재강도를 비롯한 열적 환경인자와 태풍활동 간에 상관도가 굉장히 향상됨을 알 수 있었다. 또한 태풍활동이 밀집되어 있는 부근에서 열적 환경인자와 PDI 간 상관도의 급격한 감소 현상 역시 크게 줄어든 것을 실험을 통해 확인하였다. 이 실험을 통해 북태풍활동 태풍의 발생과 활동이 밀집된 해역에서 상층 해양의 혼합이 비교적 쉽게 발생하는 환경임을 알 수 있었고, 해양 상층의 혼합 운동에 의한 해수면 냉각 효과가 현재 널리 사용되고 있는 해수면온도 자료에 일부 포함되어 있는 것으로 판단되었다. 그러나 태풍의 활동에 따른 해수면 냉각 현상은 해수면온도의 보정을 통해 그 효과를 크게 상쇄시킬 수 있기 때문에, 이를 더욱 개선하여 재분석한다면 활용도 높은 해수면온도 자료를 새롭게 구축할 수 있을 것이라 생각된다.

5. 토의

북서태평양의 환경인자들과 PDI 간의 상관도 분석 과정에서 태풍의 주요 활동구역의 동쪽 해역인 HCR을 본 연구에서는 주목하였다. HCR의 환경인자들은 높은 변동성을 보이고 있었기 때문에 태풍활동의 변동에 민감하게 영향을 미친 것으로 판단되었다. 이러한 변동성을 확인할 수 있는 한 예로, 태평양 적도 해역에 주기적으로 찾아오는 엘니뇨-남방진동 현상이 있다. 엘니뇨 해에는 고온의 수온이 북태풍활동으로 편중되기 때문에, 북서태평양 태풍의 주요 활동구역보다 HCR로 갈수록 상대적으로 고온의 해수가 자리하게 된다(Camargo and Sobel, 2005). 또한 무역풍의 약화로 인해 북태평양 고기압이 약화되기 때문에, 북서태평양의 서쪽으로 북태평양 고기압이 넓게 확장하지 못하는 경향을 보인다. 따라서 남방진동에 따라 변화하는 해양과 대기의 환경에 의해 북서태평양 태풍의 발생과 활동에 영향을 미치게 되는 것이다. 따라서 남방진동 활동이 뚜렷한 nino 3.4 지역 해수면온도 편차의 3년 이동 평균한 지수인 ONI를 이용해서 북서태평양 상의 환경인자와 태풍활동에 대하여 조사해 보았다.

ONI와 북서태평양 전체 PDI 간에는 0.60의 상관도를 보이고 있었으며, 99% 이상 유의한 수준의 결과였다. 이는 남방진동이 북서태평양의 태풍활동 변동에 큰 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 북서태평양 전체 PDI와 그 요소들의 변동에 높은 기여를 하는 HCR의 연직바람쉬어는 ONI와 -0.40의 상관도로 99% 이상 유의한 결과를 보였다. 또한 ONI는 HCR에서 발생하는 태풍들의 발생빈도와 강도, 그리고 지속시간과도 99%이상 유의한 수준의 강한 상관관계(각각 0.51, 0.56, 0.60)를 보이고 있었다. 따라서 엘니뇨가 발달함에 따라 HCR 상에서 발생하는 태풍들이 더욱 활발했으며, 이 같은 결과에 의해 북서태평양 전체 태풍활동에도 큰 영향을 미치게 되는 것으로 사료된다.

북태풍활동의 열역학적 요소들과 태풍활동의 상관도는 특정 해역(LCR)에서 급격한 감소 현상을 보였다. 이러한 결과에 대하여 본 연구에서는 해수면온도 자료에서 그 원인을 찾아 분석하였고, 해수면 냉각효과를 제거하는 실험을 진행하였

다. LCR 현상에 있어 해양 환경뿐만 아니라 대기환경 역시 영향을 미칠 수 있는 가능성을 제기할 수 있다. 하지만 대기의 경우 평형상태로 회복하는 속도가 해양보다 비교적 빠르기 때문에, 해수면 냉각현상과 같은 특징적인 형태가 오랫동안 유지되지 못하게 된다. 따라서 대기의 효과는 해양에 비해 매우 적을 것으로 판단되며, 추후에 미세한 대기 효과까지 고려한다면 더욱 현실성 있는 해수면 재분석 자료를 산출해 낼 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구뿐만 아니라 수많은 선행연구들에서 북대서양 태풍의 주요 발생구역은 열대해역을 중심으로 분석되어 왔다. 본 연구 결과에서도 알 수 있듯이, 북대서양의 열대해역은 주변해역에 비해 태풍의 발생과 활동의 변동에 대하여 기여하는 바가 매우 큰 것으로 나타났다. 하지만 북대서양의 멕시코만 부근 역시 여름철 태풍발생의 약 15%를 차지하고 있기 때문에, 이 해역에 대한 연구도 이루어질 필요가 있다고 사료된다. 멕시코만의 여름철 해수면 온도와 북대서양의 태풍 발생빈도 간의 상관도는 0.38로 99%이상 유의한 수준의 결과를 보였으며, 다른 환경인자에 비해 절대와도의 기여도가 비교적 높게 나타났다. 또한 본 연구에서 지정한 태풍의 주요 발생구역에 멕시코만 해역을 포함하여 태풍발생빈도 변동과의 상관도 분석을 추가적으로 분석한 결과, 상대습도와 연직바람속도를 제외한 모든 환경인자가 99%이상 유의하는 강한 상관관계를 보이고 있었으며, GPI의 여름철 태풍발생 모의 수준 역시 높은 결과를 보이고 있었다($r=0.49$). 따라서 추후에 북대서양의 열대해역과 더불어 멕시코만 해역을 포함한 태풍관련 분석이 진행된다면, 더욱 설득력 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 연구는 1970-2015년 북반구 여름철 동안 발생한 태풍들의 발생빈도 및 활동 변동과 태풍의 주요 발생·활동구역의 환경인자들 간의 상관관계가 해역별로 차이나는 원인에 대하여 분석을 수행하였다. 연구에 이용된 환경인자들은 해수면 온도를 비롯하여 태풍의 잠재발생지수를 구성하고 있는 다섯 가지의 요소들(절대와도, 상대습도, 최대잠재강도, 연직바람쉬어, 연직바람속도)이다.

각 해역별 태풍의 주요 발생구역의 환경인자들과 태풍발생빈도 간의 상관도는 북대서양에서 가장 많은 요소들이 강한 상관관계를 보이고 있었으며, 그 중 최대잠재강도와 연직바람쉬어가 매우 높은 상관도를 보이고 있었다. 북태풍활동의 경우, 역학적 환경인자인 연직바람쉬어가 태풍발생빈도와 가장 강한 상관관계(99% 신뢰수준)를 보이고 있었다. 북서태평양은 분석에 이용된 모든 환경인자들이 신뢰하기 어려운 수준의 낮은 상관도를 보였으며, 일부 요소들은 일반적인 이론과 반대되는 상관도를 보이기도 하였다.

이러한 결과는 태풍의 주요 발생구역 내 대기환경의 변동성과 열적환경의 평균이 해역별로 큰 차이를 보였기 때문으로 사료된다. 즉, 북서태평양의 연직바람쉬어는 매우 약한 변동성을 갖고 있기 때문에 태풍발생에 절대적인 영향을 미치지 못한 것으로 판단되며, 북태풍활동과 북대서양의 연직바람쉬어는 상대적으로 높은 변동성을 보여 태풍발생빈도 변동에 큰 기여를 한 것으로 판단된다. 열역학적 환경인자로 최대잠재강도는 태풍발생빈도와의 상관도가 낮았던 북서태평양과 북태풍활동 상에서 상대적으로 큰 값의 평균을 보이고 있었고, 북대서양에서는 비교적 낮은 평균을 보이고 있었다. 따라서 여름철 동안 북서태평양과 북태풍활동 상에서 열적인 조건이 매우 풍부하고 태풍발생에 호조건인 상태를 유지하고 있기 때문에 태풍발생에 큰 영향을 끼치지 못한 것으로 판단된다. 반면, 북대서양의 열적 환경은 여름철 동안 태풍발생에 호조건의 상태를 유지하지 않고 계속해서 변동하기 때문에, 최대잠재강도의 크기에 따라 북대서양의 태풍발생에 절대적인 영향을 미치게 되는 것으로 판단된다. 이 같은 결과는 해수면온도에서도 매

우 유사한 형태를 보여, 북대서양의 열적 환경 역시 태풍발생빈도 변동에 큰 기여를 하게 된 것으로 보인다.

상관도 분석을 통해 태풍의 주요 발생구역의 환경인자들이 태풍발생빈도와 상관관계가 낮다고 해서 태풍발생에 영향을 미치는 바가 전혀 없음을 의미하는 것이 아니며, 단지 태풍발생빈도의 변동에 있어 환경인자들의 기여도가 해역별로 차이가 있음을 본 연구를 통해 제시하고자 하였다. 또한 해역별 태풍의 주요 발생구역의 환경상태가 태풍 발달에 우호적인 조건이라고 해서 더 많은 태풍이 발생하는 것이 아니며, 환경인자들의 변동성과 평균에 의해 태풍발생빈도가 변동할 수 있음을 주장하고자 하였다.

태풍활동과 환경인자 간의 관계를 알아보기 위해 해역별 태풍의 주요 활동구역의 연직바람쉬어와 해수면온도를 이용하여 태풍의 활동을 나타내는 지수인 PDI와의 상관관계를 조사하였다. 그 결과 북서태평양의 두 환경인자 모두 유의하지 않은 수준의 매우 낮은 상관도를 보인 반면, 북태풍활동과 북대서양에서는 강한 상관도를 나타내고 있었다. 해역별 환경인자와 PDI 간의 상관도 분포를 확인한 결과, 북서태평양 태풍의 주요 활동구역에서 매우 낮은 상관도 분포를 보이고 있었지만 주요 활동구역의 남동쪽으로 벗어난 해역(8-21°N, 158-180°E, High-Correlation Region, HCR)에서는 강한 상관관계를 보이고 있었다. HCR의 환경인자들은 PDI뿐만 아니라 PDI 요소인 태풍의 빈도와 강도, 그리고 지속시간과도 매우 높은 상관관계를 보이고 있었으며, 이 해역에서 발생하는 하나의 태풍이 북서태평양 전체 PDI 변동에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 따라서 북서태평양의 PDI 변동은 태풍의 주요 활동구역보다 HCR에서의 환경인자들이 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 북서태평양의 HCR에 대한 상세한 분석과 연구의 필요성이 더욱 강조된다면, 북서태평양 태풍과 관련된 기후학적인 연구에 크게 기여할 것으로 예상된다.

반면 태풍의 주요 활동구역의 환경인자들과 PDI 간의 상관도가 높았던 북태풍활동의 경우, 해수면온도와 PDI 간의 상관도 분포에서 일부 해역(10-20°N, 235-262°E, Low-Correlation Region, LCR)으로 갈수록 급격한 감소현상을 보이고 있었다. LCR의 현상에 대한 원인을 파악하기 위해 수심별 수온 특성을 분석한 결과, LCR의 혼합층 깊이와 26°C의 등온선이 주변 해역에 비해 비교적 상층

에 형성됨을 알 수 있었다. 이러한 해양 특성은 상층의 물리적인 기작에 의한 해수면 혼합 운동이 활발해지기 때문에, 해수면온도가 쉽게 감소할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서 이용된 월평균 해수면온도 자료를 산출할 때, 일별 해수면온도 자료로 부터 해수면 냉각 현상이 누적되어 실제 태풍활동이 진행되는 해양환경과 다소 차이가 나게 될 것으로 판단하였다. 이러한 가능성을 확인하기 위해 월별 해수면온도 자료에서 해수면 냉각효과를 상쇄시켜주는 실험을 진행하였다.

실험을 통해 얻어진 새로운 해수면온도 자료를 이용하여 북태풍활동의 태풍활동과 상관도 분석을 진행한 결과, 상관관계가 급격히 감소했던 LCR에서 상관도가 두 배 가량 증가하는 결과를 보였다. 또한 산출된 해수면온도를 이용한 최대잠재강도와 태풍활동 간의 상관도 역시 크게 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 본 실험을 통해 현재 다양한 연구에 이용되고 있는 해수면온도의 월평균 자료에 북태풍활동 태풍활동에 의한 냉각 효과가 포함될 수 있는 가능성을 확인하였다. 추후에 북태풍활동 상의 태풍활동으로 인한 해수면 냉각 현상을 고려한 해수면온도 자료가 제공된다면, 태풍의 발생 및 활동에 대한 연구뿐만 아니라 다양한 해양 연구에 폭넓게 이용될 수 있을 것이라 기대한다.

참고문헌

- Bruyère, C. L., G. J. Holland, and E. Towler, 2012: Investigating the use of a Genesis Potential Index for Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin. *J. Clim.*, 25, 8611–8626.
- Camara, M., A. Diedhiou, and A. T. Gaye, 2010: Spatial and Temporal Distribution of North Atlantic Tropical Cyclones. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4.
- Camargo, S. J., and A. H. Sobel, 2005: Western North Pacific Tropical Cyclone Intensity and ENSO. *J. Clim.*, 18, 2996–3006.
- Camargo, S. J., A. H. Sobel, A. G. Barnston, and K. A. Emanuel, 2007a: Tropical Cyclone Genesis Potential Index in Climate Models. *Tellus A*, 59, 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.
- Camargo, S. J., 2013: Global and Regional Aspects of Tropical Cyclone Activity in the CMIP5 Models. *J. Clim.*, 26, 9880–9902.
- Chan, J. C., and K. S. Liu, 2004: Global Warming and Western North Pacific Typhoon Activity from an Observational Perspective. *J. Clim.*, 17, 4590–4602.
- Chan, J. C., 2009: Thermodynamic Control on the Climate of Intense Tropical Cyclones. *Proc. Roy. Soc. London*, A465, 3011 - 3022.
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1999: An Updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and Eastern North Pacific Basins. *Weather and Forecasting*, 14, 326–337.

- DeMaria, M., J. A. Knaff, and B. H. Connell, 2001: A Tropical Cyclone Genesis Parameter for the Tropical Atlantic. *Weather and Forecasting*, 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). *Weather and Forecasting*, 20, 531-543.
- Emanuel, K. A., 1995: Sensitivity of Tropical Cyclones to Surface Exchange Coefficients and a Revised Steady-State Model Incorporating Eye Dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 52, 3969-3976.
- Emanuel, K. A., 1999: Thermodynamic Control of Hurricane Intensity. *Nature*, 401, 665-669.
- Emanuel, K. A., and Nolan, D. S., 2004: Tropical Cyclone Activity and the Global Climate System. In *Preprints, 26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc. A.
- Emanuel, K., C. DesAutels, C. Holloway, and R. Korty, 2004: Environmental Control of Tropical Cyclone Intensity. *J. Atmos. Sci.*, 61, 843-858.
- Emanuel, K. A., 2005: Increasing Destructiveness of Tropical Cyclones Over the Past 30 Years. *Nature*, 436, 686-688.
- Emanuel, K. A., 2007: Environmental Factors Affecting Tropical Cyclone Power Dissipation. *J. Clim.*, 20, 5497-5509.
- Emanuel, K. A., 2013: Downscaling CMIP5 Climate Models shows Increased Tropical Cyclone Activity Over the 21st Century. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 110, 12219-12224.
- Gallina, G. M., and C. S. Velden, 2002: Environmental Vertical Wind Shear and Tropical Cyclone Intensity Change Utilizing Enhanced Satellite Derived Wind Information. In *Preprints, 26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*.
- Goni, G., M. DeMaria, J. Knaff, C. Sampson, I. Ginis, F. Bringas, A. Mavume, C. Lauer, I. Lin, and M. Ali, 2009: Applications of satellite-derived ocean

- measurements to tropical cyclone intensity forecasting.
- Gray, W. M., 1968: Global View of the Origin of Tropical Disturbances and Storms. *Mon. Weather Rev.*, 96, 669–700.
- Gray, W. M., 1984: Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part I: El Nino and 30 Mb Quasi-Biennial Oscillation Influences. *Mon. Weather Rev.*, 112, 1649–1668.
- Gray, W. M., 1979: Hurricanes: Their Formation, Structure and Likely Role in the Tropical Circulation. *Meteorology over the tropical oceans*, 77, 155–218.
- Ha, K., S. Yoon, K. Yun, J. Kug, Y. Jang, and J. C. Chan, 2012: Dependency of Typhoon Intensity and Genesis Locations on El Niño Phase and SST Shift Over the Western North Pacific. *Theoretical and Applied Climatology*, 109, 383–395.
- Kim, G. Y., S. Lee, and H. J. Ham, 2015: Discussion on conflict in distributions of historic typhoon genesis locations in the Pacific and those of GPIs suggested by Emanuel, 18th The wind Engineering institute of Korea, 125–128.
- Kim, H., P. J. Webster, and J. A. Curry, 2011: Modulation of North Pacific Tropical Cyclone Activity by Three Phases of ENSO. *J. Clim.*, 24, 1839–1849.
- Knaff, J. A., C. R. Sampson, and M. DeMaria, 2005: An Operational Statistical Typhoon Intensity Prediction Scheme for the Western North Pacific. *Weather and Forecasting*, 20, 688–699.
- Kossin, J. P., K. A. Emanuel, and G. A. Vecchi, 2014: The Poleward Migration of the Location of Tropical Cyclone Maximum Intensity.
- Kwon, M., 2012: Annual Cycle and Interannual Variability of Tropical Cyclone Genesis Frequency in the CMIP5 Climate Models: Use of Genesis Potential Index. *Journal of the Korean earth science society*, 33, 583–595.
- Landsea, C. W., R. A. Pielke Jr, A. M. Mestas–Nunez, and J. A. Knaff, 1999: Atlantic Basin Hurricanes: Indices of Climatic Changes. *Clim. Change*, 42,

89-129.

- Lee, S., and G. Y. Kim, 2014: Spatial Analysis of Typhoon Genesis Distribution Based on IPCC AR5 RCP 8.5 Scenario. *Journal of Korea Spatial Information Society*, 22, 49-58.
- Li, W., L. Li, and Y. Deng, 2015: Impact of the Interdecadal Pacific Oscillation on Tropical Cyclone Activity in the North Atlantic and Eastern North Pacific. *Scientific reports*, 5.
- Lin, I., C. Wu, K. A. Emanuel, I. Lee, C. Wu, and I. Pun, 2005: The Interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a Warm Ocean Eddy. *Mon. Weather Rev.*, 133, 2635-2649.
- Lin, I., C. Wu, I. Pun, and D. Ko, 2008: Upper-Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category 5 Typhoons. Part I: Ocean Features and the Category 5 Typhoons' Intensification. *Mon. Weather Rev.*, 136, 3288-3306.
- Lin, I., I. Pun, and C. Wu, 2009: Upper-Ocean Thermal Structure and the Western North Pacific Category 5 Typhoons. Part II: Dependence on Translation Speed. *Mon. Weather Rev.*, 137, 3744-3757.
- Lin, I., and J. C. Chan, 2015: Recent Decrease in Typhoon Destructive Potential and Global Warming Implications. *Nature communications*, 6.
- Liu, K. S., and J. C. Chan, 2013: Inactive Period of Western North Pacific Tropical Cyclone Activity in 1998 - 2011. *J. Clim.*, 26, 2614-2630.
- Monterey, G., and S. Levitus, 1997: Seasonal Variability of Mixed Layer Depth for the World Ocean, NOAA Atlas NESDIS 14, 96 Washington. DC: US Government Printing Office.
- Moon, I., and S. J. Kwon, 2012: Impact of Upper-Ocean Thermal Structure on the Intensity of Korean Peninsular Landfall Typhoons. *Prog. Oceanogr.*, 105, 61-66.
- Murakami, H., and B. Wang, 2010: Future Change of North Atlantic Tropical Cyclone Tracks: Projection by a 20-km-Mesh Global Atmospheric Model*.

- J. Clim., 23, 2699–2721.
- Murakami, H., B. Wang, and A. Kitoh, 2011: Future Change of Western North Pacific Typhoons: Projections by a 20-km-Mesh Global Atmospheric Model*. J. Clim., 24, 1154–1169.
- Park, D. R., C. Ho, and J. Kim, 2014: Growing Threat of Intense Tropical Cyclones to East Asia Over the Period 1977 - 2010. Environmental Research Letters, 9, 014008.
- Paterson, L. A., B. N. Hanstrum, N. E. Davidson, and H. C. Weber, 2005: Influence of Environmental Vertical Wind Shear on the Intensity of Hurricane-Strength Tropical Cyclones in the Australian Region. Mon. Weather Rev., 133, 3644–3660.
- 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, 4680–4684.
- Saffir, H. S., 2003: Communicating Damage Potentials and Minimizing Hurricane Damage. Hurricane! Coping with Disaster, R. Simpson, Ed., Amer. Geophys. Union, 155 - 164.
- Shapiro, L. J., and S. B. Goldenberg, 1998: Atlantic Sea Surface Temperatures and Tropical Cyclone Formation. J. Clim., 11, 578–590.
- Shay, L. K., G. J. Goni, and P. G. Black, 2000: Effects of a Warm Oceanic Feature on Hurricane Opal. Mon. Weather Rev., 128, 1366–1383.
- Shim, J. S., J. J. Yoon, and J. A. Kim, 2011: Estimation of storm surge inundation and hazard mapping in Korea. 2011 Korea Marine Science and Technology Council Joint Conference, 2205–2208.
- Song, Y., L. Wang, X. Lei, and X. Wang, 2015: Tropical Cyclone Genesis Potential Index Over the Western North Pacific Simulated by CMIP5 Models. Adv. Atmos. Sci., 32, 1539–1550.
- Tian, F., T. Zhou, and L. Zhang, 2013: Tropical Cyclone Genesis Potential Index Over the Western North Pacific Simulated by LASG/IAP AGCM.

- Acta Meteorologica Sinica, 27, 50-62.
- Vimont, D. J., and J. P. Kossin, 2007: The Atlantic Meridional Mode and Hurricane Activity. *Geophys. Res. Lett.*, 34.
- Wada, A., 2009: Idealized Numerical Experiments Associated with the Intensity and Rapid Intensification of Stationary tropical cyclone like Vortex and its Relation to Initial sea surface Temperature and vortex induced sea surface Cooling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114.
- 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.
- Xu, S., and B. Wang, 2014: Enhanced Western North Pacific Tropical Cyclone Activity in may in Recent Years. *Clim. Dyn.*, 42, 2555-2563.
- Zhang, Y., H. J. Wang, J. Sun, and H. Drange, 2010: Changes in the tropical cyclone genesis potential index over the Western North Pacific in the SRES A2 scenario. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27, 1246 - 1258.
- Zeng, Z., Y. Wang, and L. Chen, 2010: A Statistical Analysis of Vertical Shear Effect on Tropical Cyclone Intensity Change in the North Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 37.
- 국민안전처, 2016: 올 태풍·호우 시 인명보호 및 불편해소 최우선 추진. 정책설명 자료(주간)