

## 2010년 태풍 특징

임명순<sup>1),2)</sup> · 문일주<sup>2),\*</sup> · 차유미<sup>1)</sup> · 장기호<sup>3)</sup> · 강기룡<sup>1)</sup> · 변건영<sup>1)</sup> · 신도식<sup>4)</sup> · 김지영<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>기상청 국가태풍센터, <sup>2)</sup>제주대학교 해양기상학협동과정, <sup>3)</sup>국립기상연구소,  
<sup>4)</sup>기상청, <sup>5)</sup>기상청 기상레이더센터

(접수일: 2014년 3월 8일, 게재확정일: 2014년 5월 12일)

## Characteristics of Tropical Cyclones in 2010

Myeong Soon Lim<sup>1),2)</sup>, Il-Ju Moon<sup>2),\*</sup>, Yu-Mi Cha<sup>1)</sup>, Ki-Ho Chang<sup>3)</sup>, Ki-Ryong Kang<sup>1)</sup>,  
Kun Young Byun<sup>1)</sup>, Do-Shick Shin<sup>4)</sup>, and Ji Young Kim<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju, Korea

<sup>2)</sup>Graduate School of Interdisciplinary Program in Marine Meteorology, Jeju National University, Jeju, Korea

<sup>3)</sup>National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea

<sup>4)</sup>Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

<sup>5)</sup>Weather Radar Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 8 March 2014; accepted 12 May 2014)

**Abstract** In 2010, only 14 tropical cyclones (TCs) were generated over the western North Pacific (WNP), which was the smallest since 1951. This study summarizes characteristics of TCs generated in 2010 over the WNP and investigates the causes of the record-breaking TC genesis. A long-term variation of TC activity in the WNP and verification of official track forecast in 2010 are also examined. Monthly tropical sea surface temperature (SST) anomaly data reveal that El Niño/Southern Oscillation (ENSO) event in 2010 was shifted from El Niño to La Niña in June and the La Niña event was strong and continued to the end of the year. We found that these tropical environments led to unfavorable conditions for TC formation at main TC development area prior to May and at tropics east of 140°E during summer mostly due to low SST, weak convection, and strong vertical wind shear in those areas. The similar ENSO event (in shifting time and La Niña intensity) also occurred in 1998, which was the second smallest TC genesis year (16 TCs) since 1951. The common point of the two years suggests that the ENSO episode shifting from El Niño to strong La Niña in summer leads to extremely low TC genesis during La Niña although more samples are needed for confidence. In 2010, three TCs, DIANMU (1004), KOMPASU (1007) and MALOU (1009), influenced the Korean Peninsula (KP) in spite of low total TC genesis. These TCs were all generated at high latitude above 20°N and arrived over the KP in short time. Among them, KOMPASU (1007) brought the most serious damage to the KP due to strong wind. For 14 TCs in 2010, mean official track forecast error of the Korea Meteorological Administration (KMA) for 48 hours was 215 km, which was the highest among other foreign agencies although the errors are generally decreasing for last 10 years, suggesting that more efforts are needed to improve the forecast skill.

**Key words:** Tropical cyclone, western North Pacific, vertical wind shear, La Niña

\*Corresponding Author: Il-Ju Moon, Jeju National University, 102  
Jejudaehak-ro, Jeju 690-756, Korea.  
Phone : +82-64-754-3412, Fax : +82-64-756-3483  
E-mail : ijmoon@jejunu.ac.kr

**Table 1.** List of tropical cyclones (TCs) which attained TS intensity or higher in 2010 and informations on formation, termination, strongest intensity of each TC.

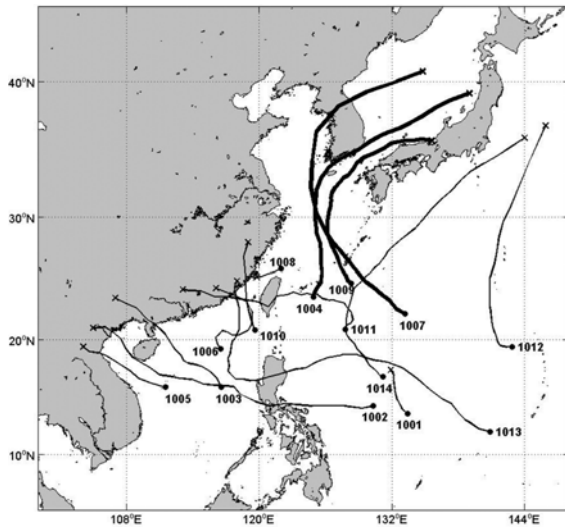
TC number and name	Time (KST) and location (lat., lon.) of TC formation and termination	Time (KST), location (lat., lon.), rank at the strongest intensity (min. pressure and max. wind speed)					
		Rank	hPa	m s <sup>-1</sup>	Time	Lat.	Lon.
1001 OMAIS	24 Mar. 21:00 ~ 26 Mar. 15:00 (13.4, 133.4) (18.3, 131.8)	TS	998	18	25 Mar. 03:00	13.9	132.3
1002 CONSON	12 Jul. 09:00 ~ 18 Jul. 09:00 (14.2, 130.5) (21.6, 105.9)	TY	975	34	16 Jul. 15:00	17.6	110.2
1003 CHANTHU	19 Jul. 21:00 ~ 23 Jul. 15:00 (15.7, 116.6) (24.0, 107.0)	TY	970	36	22 Jul. 09:00	20.5	111.5
1004 DIANMU	8 Aug. 21:00 ~ 12 Aug. 15:00 (23.6, 125.1) (39.2, 138.8)	STS	980	31	10 Aug. 09:00	31.1	125.1
1005 MINDULLE	23 Aug. 09:00 ~ 25 Aug. 09:00 (15.8, 111.0) (19.4, 103.8)	TS	990	24	24 Aug. 15:00	18.6	106.2
1006 LIONROCK	29 Aug. 03:00 ~ 2 Sep. 15:00 (19.4, 116.3) (24.3, 116.1)	STS	985	27	30 Aug. 15:00	20.8	116.7
1007 KOMPASU	29 Aug. 21:00 ~ 3 Sep. 03:00 (21.2, 134.4) (41.2, 134.5)	TY	960	40	31 Aug. 09:00	25.1	129.4
1008 NAMTHEUN	30 Aug. 21:00 ~ 1 Sep. 03:00 (26.2, 122.0) (24.7, 119.3)	TS	995	20	31 Aug. 03:00	25.6	121.3
1009 MALOU	3 Sep. 15:00 ~ 8 Sep. 09:00 (23.2, 130.9) (35.9, 134.9)	STS	990	24	6 Sep. 09:00	31.4	126.1
1010 MERANTI	9 Sep. 09:00 ~ 10 Sep. 21:00 (21.1, 119.1) (27.8, 119.4)	TS	990	24	10 Sep. 09:00	24.3	118.9
1011 FANAPI	15 Sep. 21:00 ~ 21 Sep. 03:00 (20.7, 127.5) (24.2, 112.7)	TY	935	48	19 Sep. 03:00	24.0	123.1
1012 MALAKAS	21 Sep. 15:00 ~ 25 Sep. 21:00 (18.0, 145.0) (39.4, 148.2)	TY	955	41	25 Sep. 03:00	30.9	142.8
1013 MEGI	13 Oct. 21:00 ~ 24 Oct. 03:00 (18.3, 130.3) (25.0, 118.0)	TY	890	61	18 Oct. 03:00	17.6	124.2
1014 CHABA	24 Oct. 21:00 ~ 31 Oct. 03:00 (16.0, 131.7) (36.2, 143.8)	TY	930	48	28 Oct. 21:00	25.6	130.0

## 1. 서 론

최근 10년 동안(2000~2009)의 한반도에서 발생하는 자연재해 피해현황을 유형별로 살펴보면, 태풍 56.6%, 호우 24.5%, 대설 11.3%, 태풍·호우 7.2%, 풍랑 0.4%의 순으로 태풍에 동반된 호우 피해까지 합하면 태풍으로 인한 직·간접적 피해규모는 총 63%에 달한다. 또한 같은 기간 태풍으로 인해 발생한 연평균 인명과 재산 피해액은 각각 41명과 1조 219억 원에 달한다(NEMA, 2010). 태풍으로 인한 막대한 인적·경제적 피해를 예방하고 최소화시키기 위해서는 태풍 예측의 정확도를 높이는 것이 중요하다. 이를 위해서 한 해 태풍 시즌이 끝나면 그 해 태풍에 대한 사후 재분석을 실시하여 태풍예보의 기초자료로 활용할 필요가 있다.

미국 National Hurricane Center (NHC)는 대서양 및 동태평양에서 발생한 개별 허리케인에 대한 사후분석

을 통하여 태풍 위치 및 강도, 종관장, 기상학적 통계 분석결과, 피해 등의 종합적인 정보를 수집하여 Tropical Cyclone Reports를 작성하고 있다(<http://www.nhc.noaa.gov>). 이러한 정보는 매달 Tropical Cyclone Monthly Summary 형태로 요약되어 제공될 뿐만 아니라 허리케인 시즌이 끝나면 그 해의 허리케인 특징을 요약하여 Monthly Weather Review에 게재한다(Brown *et al.*, 2010; Collins and Roache, 2011; Stewart and Cangialosi, 2012). 일본 도쿄 Regional Specialized Meteorological Centre (RSMC)에서는 남중국해를 포함한 북서태평양에서 발생한 TS (Tropical Storm) 강도 이상의 열대저기압에 대한 사후분석을 통해 태풍의 중심위치, 중심기압과 최대 지속 풍속, 대기순환장, 태풍예보오차 등을 분석하여 매년 태풍보고서를 작성하여 제공한다(<http://www.jma.go.jp>). 미국 Joint Typhoon Warning Center (JTWC)에서도 북서태평양, 북인도양, 남태평



**Fig. 1.** Tracks of tropical cyclones (TCs) which attained tropical storm (TS) intensity or higher in 2010. Thick solid lines represent TCs, which influenced on the Korea Peninsula.

양, 남인도양에서 발생한 열대저기압에 대한 사후분석을 통해 연간 열대저기압 보고서(Annual Tropical Cyclone Report, ATCR)를 발간하여 제공하고 있다 (<http://www.usno.navy.mil/JTWC/annual-tropical-cyclone-reports>).

우리나라 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서는 2006년부터 그해 발생한 태풍의 특징과 예보정확도에 대한 재분석을 실시하여 매년 태풍분석 보고서를 발간하며 그 결과를 이듬해 태풍예보 기초 자료로 활용하고 있다(KMA, 2011). 또한 이러한 자료는 2006년부터 요약 및 정리되어 학회지에 발간되고 있다(Cha *et al.*, 2007, 2008, 2009, 2010).

2010년은 전체 태풍발생 수가 14개로 태풍발생 통계분석을 시작한 1951년 이래 가장 적은 태풍이 발생한 이례적인 해로 기록되었다(Table 1, Fig. 1). 그럼에도 불구하고 한반도에 영향을 준 태풍이 총 3개로 평년(1951~2009) 3.2개와 비슷한 발생 수를 기록하였다. 특히 한반도 영향 태풍 중 9월에 발생한 태풍 “곤파스(KOMPASU)”는 수도권에 집중호우를 비롯한 크고 작은 재난(약 22회)을 발생시켜 총 14명의 인명피해와 4,268억 원의 재산피해를 발생시켰다.

본 논문은 사후분석을 통해 2010년의 태풍예보 정확도 분석을 포함하여 북서태평양에서 발생한 태풍의 특징, 태풍의 발생 및 활동에 영향을 주는 열대 순환 및 해수면온도 등의 기후 특성 등에 대한 전반적인 내용을 요약하여 향후 태풍예측에 활용하는 데 그 목

적이 있다. 이를 위해 2010년에 북서태평양에서 태풍 발생 수가 적었던 이유, 한반도에 영향을 미친 태풍의 특징, 태풍발생 경향, 태풍의 장기간 변동특성 등에 관한 중요한 특징들에 대해 자세히 분석하고자 한다. 또한 2010년 북서태평양 열대저기압의 발생이 억제된 원인을 대기순환 및 해양 특성을 통해 분석하였다.

본 연구에서 사용된 자료와 분석방법에 관한 내용은 2장에서 다룬다. 3장에는 열대저기압 발생과 밀접한 관련이 있는 열대지역의 대기 순환과 해양의 특징을 분석하였다. 4장에서는 북서태평양 발생 태풍의 특징, 5장은 한반도 영향 태풍의 특징, 6장은 태풍진로 예보정확도, 7장에서는 극소 태풍발생 시기의 특징, 마지막으로 8장에서 결론을 요약하였다.

## 2. 자료 및 분석방법

태풍 활동에 대한 정보는 일본 지역특별기상센터 (Regional Specialized Meteorological Centre, RSMC)에서 제공하는 최적 경로자료를 사용하였다. 이 자료는 1977년부터 북서태평양의 모든 열대저기압에 대한 6시간 간격 중심최저기압, 중심 위도와 경도, 유형, 최대풍속(maximum wind speed, MWS) 등을 포함한다. 세계기상기구는 열대저기압을 최대풍속에 따라 열대저압부(Tropical Depression, TD:  $17 \text{ m s}^{-1}$  미만), 열대폭풍(Tropical Storm, TS:  $17\sim 24 \text{ m s}^{-1}$ ), 강한열대폭풍(Severe Tropical Storm, STS:  $25\sim 32 \text{ m s}^{-1}$ ), 태풍(Typhoon, TY:  $33 \text{ m s}^{-1}$  이상)으로 분류한다. 본 연구에서 태풍분석은 열대저압부를 제외한 열대폭풍 이상 등급에 대해서만 실시하였다.

열대해양 분석은 NOAA에서 제공하는 1981년부터 2010년까지  $1^\circ \times 1^\circ$ 의 공간 해상도의 월평균 해수면온도(NOAA Optimum Interpolation Sea Surface Temperature, OISST) 자료를 사용하였다. 태풍활동에 영향을 미친 열대지역 대기순환 분석은 미국 국가환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)에서 제공되는 전지구재분석(Global Reanalysis R2) 자료를 사용하였다. 이 자료는 위·경도 수평 해상도가  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  격자이며, 수직으로는 총 17개 층으로 구성되어 있다. 이용한 변수는 850 hPa부터 200 hPa까지 동서 및 남북 바람, 그리고 500 hPa 지위고도이다. 사용된 기간은 1981년부터 2010년까지이다.

대류활동 여부의 판단은 NOAA 위성 시리즈로부터 관측된 외향장파복사(NOAA interpolated Outgoing Longwave Radiation) 자료가 사용되었다. 열대저기압의 발생, 발달등과 관련성이 큰 엘니뇨 감시해역(NINO 3,  $5^\circ\text{N}\sim 5^\circ\text{S}$ ,  $150^\circ\text{W}\sim 90^\circ\text{W}$ )의 해수면온도 편차와 남방진동지수 그리고 동아시아 몬순활동은 1970년부터 2010년까지 일본 기상청 자료(Japan Meteorological

Agency, 2010)를 사용하여 분석하였다.

태풍의 강도는 해수면온도 뿐 아니라 상층해양(upper-ocean)의 열적구조의 영향을 받는다(Shay *et al.*, 1992; Lin *et al.*, 2008; Tseng *et al.*, 2010). 상층해양의 열적구조가 태풍강도에 영향을 미치는 이유는 태풍이 통과하면서 강한 바람에 의한 혼합과 용승작용으로 해수면온도를 변화시키기 때문이다. 예를 들면, 해수면온도가 같은 해역에서도 표층 바로 밑에 찬물이 존재하는 지역과 따뜻한 물이 존재하는 지역은 수직혼합에 의한 해수면온도 변화가 다르게 나타난다. 태풍이 이동하는 순간에 발생하는 이러한 해수면온도의 변화는 태풍의 강도에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lin *et al.*, 2008). 따라서 태풍 이동경로의 상층해양 열적구조를 나타내는 해양열용량(Ocean Heat Content, OHC) 자료는 태풍강도 분석에 필수적이다. 본 연구에서 해양열용량은 미해군 자료동화자료(Hybrid Coordinate Ocean Model/Navy Coupled Ocean Data Assimilation, HYCOM/NCODA)를 이용하여 구하였다. 이 자료는 수평해상도 1/12°의 전 지구 3차원 수온, 염분, 해류를 포함하며, 수직적으로는 20개 층으로 이루어져 있다. 해양열용량은 아래의 식을 이용하여 구하였다(Leipper and Volgenau, 1972).

$$OHC = \rho c_p \int_0^{d26} T(z) dz, \quad (1)$$

여기서  $T(z)$ 는 수심별 수온,  $d26$ 은 수온이 26°C인 수심,  $\rho$ 는 해수밀도, 그리고  $c_p$ 는 해수비열(sea water specific heat capacity)을 나타낸다.

### 3. 열대지역 대기대순환과 해양의 특징

태풍 활동은 대기/해양의 여러 기후인자들에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 기후인자는 해수면온도와 대기 습도, 중층 지위고도, 연직바람시어, 지향류, 대류활동 등을 예로 들 수 있다. 일반적으로 여름철 북서태평양 지역에서는 높은 해수면온도를 보이

는 지역이 북쪽으로 팽창하고, 여름 몬순 기압골의 축과 북태평양고기압이 북상한다. 이러한 특징은 엘니뇨-남방진동 등과 같은 장기변동과 더불어 이 지역의 태풍활동을 결정하는 요인으로 작용한다(Wang and Chan, 2002; Chan and Liu, 2004; Chu and Zhao, 2004; Chen *et al.*, 2009). 또한 Matsuura *et al.* (2003)는 북서태평양에서 열대저기압 활동을 활성기와 비활성기로 나눠 활동변화 원인이 단지 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST)뿐만 아니라 대규모 대기순환과 SST간의 상호작용에 의한 것을 밝혔다. 이 장에서는 2010년 북서태평양 태풍활동에 영향을 끼친 열대지역의 대기대순환 및 해양의 특징을 조사하였다.

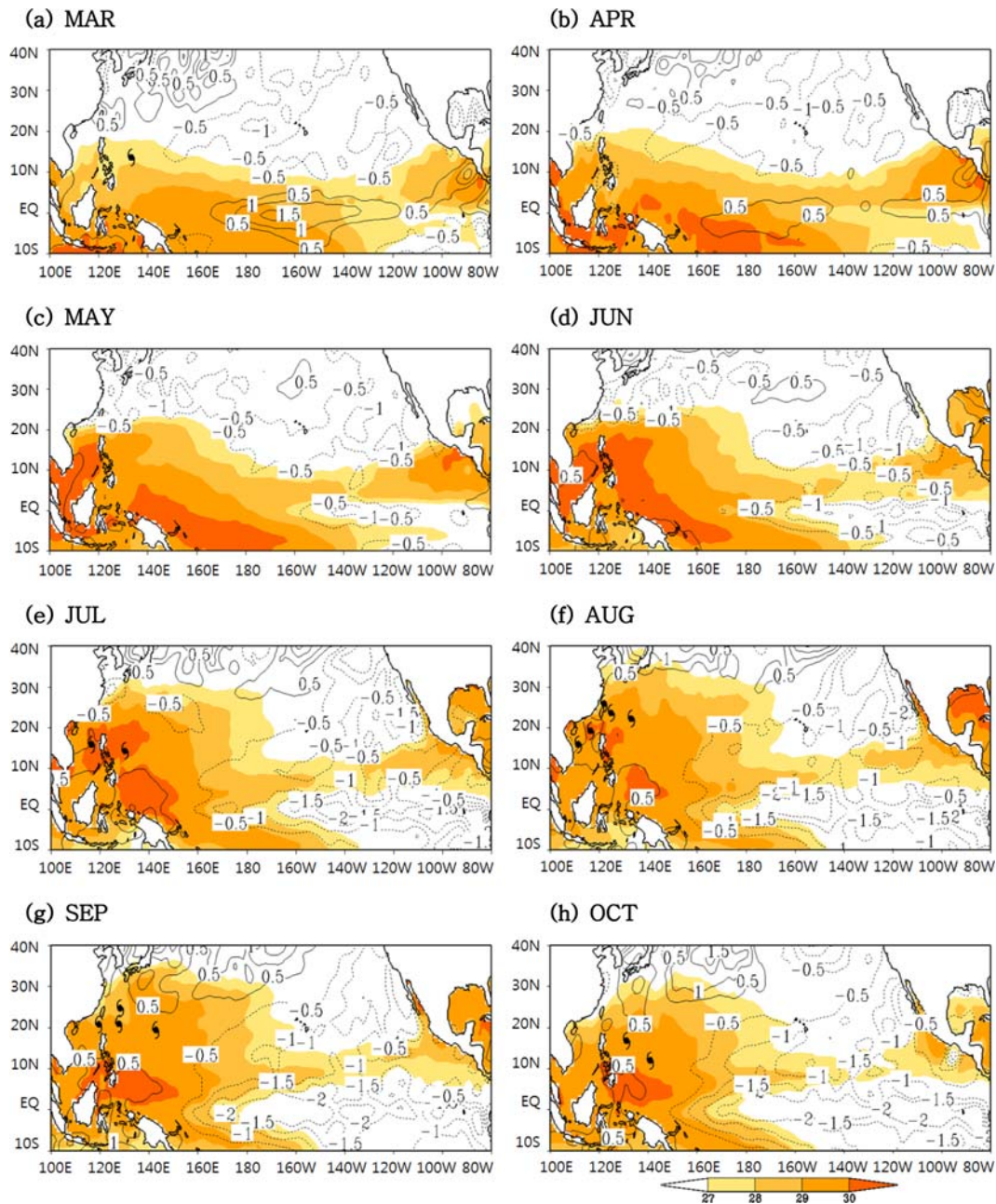
#### 3.1 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)

엘니뇨-남방진동으로 인한 대기와 해양의 변화는 여러 열대저기압의 활동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Revell and Goulter, 1986; Chan, 2000). 특히, 북서태평양에서 태풍의 지역별 발생 빈도는 ENSO와 관련성이 높은 것으로 알려져 있다(Chan, 1985; Chen *et al.*, 1998). 예를 들면, 엘니뇨 시기에는 열대해역의 동풍이 약해져 이 지역의 동서순환이 약화되고 이로 인해 고온의 해수가 평년보다 남동쪽에 위치하게 된다. 그 결과, 저기압성 순환이 발생하는 구역이 평년보다 남동쪽에 위치하여 태풍의 발생구역이 평년에 비해 남동쪽으로 치우치는 경향을 보인다(Chan, 2000; Chia *et al.*, 2002). 라니냐 시기에는 이와 반대로 태풍의 발생구역이 북서쪽에 치우치는 경향이 있다(Chan, 1985; Satoshi *et al.*, 2008).

엘니뇨는 중·동부 태평양 열대해역의 해수면온도가 평년보다 높아진 상태가 지속되는 현상이라고 정의되지만 어느 정도까지 해수면온도가 상승하였을 때를 엘니뇨라고 정의하는 가는 연구자나 연구기관에 따라 차이를 보인다. 본 연구에서 엘니뇨는 감시해역의 해수면온도와 남방진동지수를 이용하는 두 가지 방법을 사용하였다. 엘니뇨 감시해역은 선행연구(Cha *et al.*, 2007, 2008, 2009, 2010)와 일관성을 유지하기

**Table 2.** Monthly mean SST and SSTA (NINO 3), SOI, Asian summer monsoon index, and number of TC genesis in 2010.

	2010											
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
NINO 3 SSTA (°C)	26.7	27.2	27.8	28.1	27.1	25.8	24.8	24.1	23.7	23.4	23.5	23.7
SSTA (°C)	1.1	0.8	0.7	0.6	0.0	-0.7	-0.9	-1.0	-1.2	-1.6	-1.5	-1.5
Five month running mean SSTA (°C)	1.1	0.9	0.6	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.1	-1.2	-1.4	-	-
SOI	-0.7	-1.0	-0.6	1.5	1.3	0.6	2.2	2.1	2.4	1.8	1.5	2.5
Asian summer monsoon index	-	-	-	-	-0.8	-0.4	0.8	1.1	0.2	1.6	-	-
Number of TC genesis	-	-	1	-	-	-	2	5	4	2	-	-

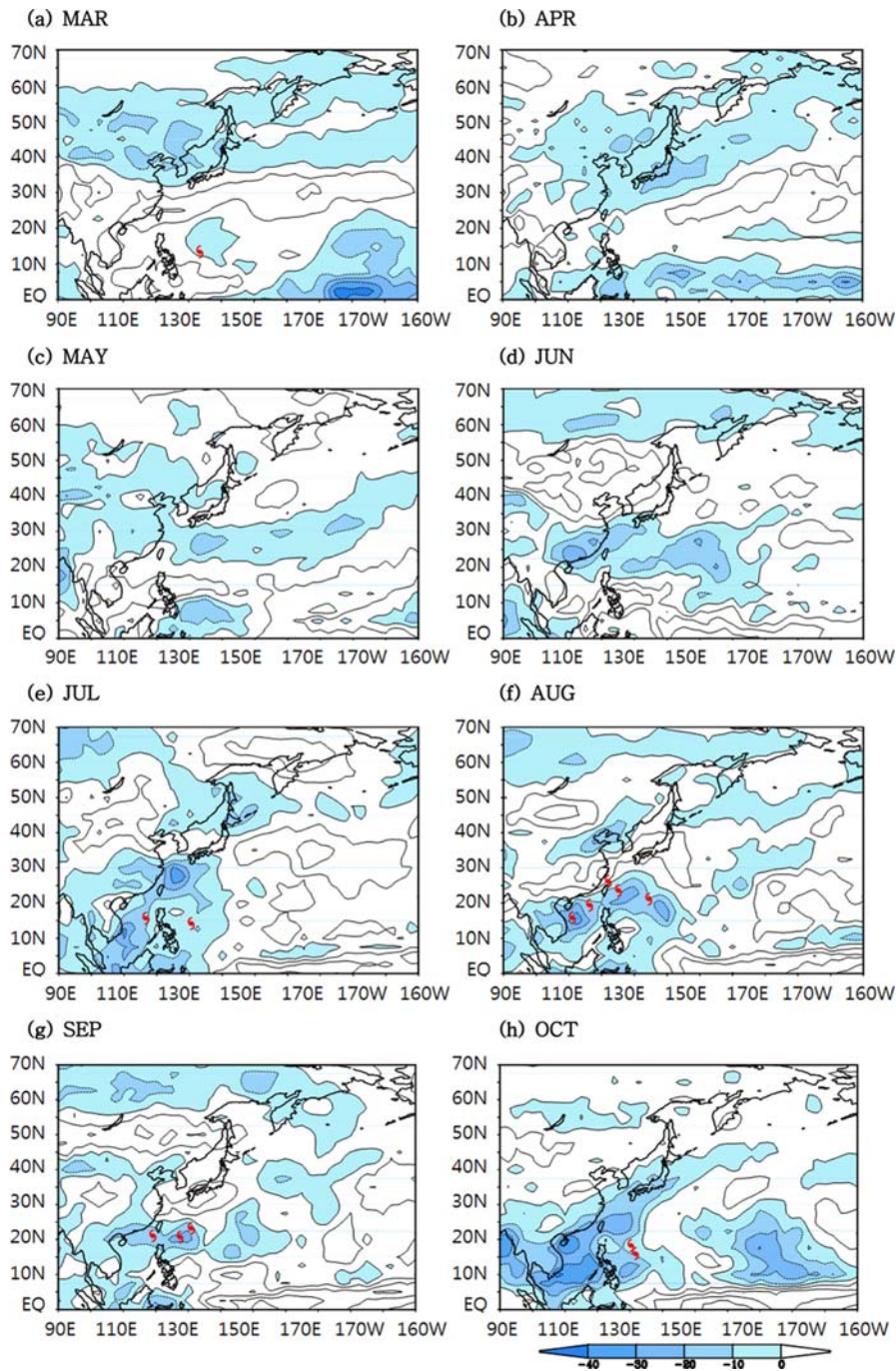


**Fig. 2.** The monthly distribution of SST (colors) and SST anomaly (contour lines) from March to October in 2010. The unit is °C. Here, zero contour is not expressed. Symbol  $\odot$  represent the genesis positions of tropical cyclone each month.

위하여 NINO 3(5°N~5°S, 150°W~90°W)을 사용하였고, 이 해역의 해수면온도 편차가 5개월 이상 0.5°C 이상을 유지할 경우 엘니뇨, -0.5°C 이하를 유지할 경우 라니냐라고 정의하였다.

분석결과, 엘니뇨 감시해역의 해수면온도 편차(Sea

surface temperature anomaly, SSTA)는 2010년 1월부터 4월까지 양의 편차가 지속되다가 6월부터는 음의 편차로 바뀌어 12월(-1.5°C)까지 음의 편차가 지속되었다. 5개월 이동평균 SSTA에서도 2010년은 1월부터 3월까지 +0.5°C를 초과하여 엘니뇨 시기 그리고 6



**Fig. 3.** The monthly distribution of negative OLR anomaly from March to October in 2010. The unit of OLR anomaly is  $W m^{-2}$ . Here, zero contour is not expressed. Symbols ♁ represent the genesis positions of tropical cyclone each month.

월부터 7개월 동안은  $-0.5^{\circ}C$  이하를 유지하여 라니냐 시기로 분류된다(Table 2).

한편, 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI)

는 열대 태평양의 무역풍 강도를 나타내는 지수로 남태평양의 타이티(Tahiti)와 오스트레일리아 북부의 다윈(Darwin)의 월평균 해면 기압 차이로 계산된다. 이

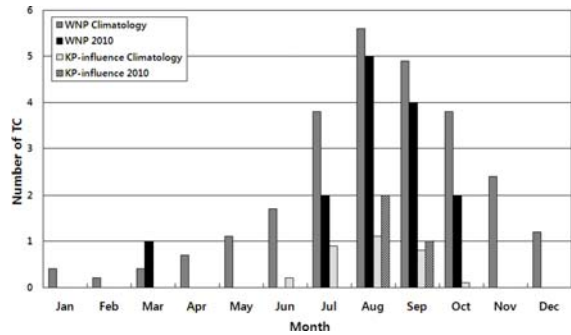
지수가 양의 편차일 경우는 양쪽지점의 기압차이가 크고 남동무역풍이 강한 라니냐 상태이고, 음의 편차일 경우에는 무역풍이 약한 엘니뇨 상태이다. SOI를 이용한 ENSO의 구분은 전반적으로 SSTA 분석결과와 비슷한 경향을 보였지만 라니냐가 4월부터 시작된 점이 다르다.

2010년 월평균 해수면온도 편차의 공간분포를 보면 (Fig. 2), 2010년 4월까지 중양태평양에 양의 편차가 나타나고 있지만, 5월부터는 열대 동태평양지역에서 해수면온도가 낮아지고 열대 서태평양지역에서는 해수면온도가 높아지는 전형적인 라니냐 현상이 나타난다. 일반적으로 라니냐 해에 열대저기압의 발생빈도는 북서태평양의 남동쪽에서 감소하고 북서쪽에서 증가하는 것으로 알려져 있다(Satoshi and Matsuura, 2008). 실제로 2010년에도 라니냐 현상이 시작된 이후로 7월부터 10월까지 발생한 열대저기압은 평년보다 서쪽에서 발생하는 경향을 보였다. 해수면온도의 양의 편차는 남중국해와 동중국해를 포함한 고위도까지 나타났으며, 그 결과 이 시기에는 상대적으로 고위도에서 태풍이 많이 발생하였다.

**3.2 적도지역 대류활동과 동아시아 몬순 활동**

북서태평양의 대류활동과 동아시아 여름 몬순활동은 열대저기압의 발생 및 발달에 영향을 미친다. 이 장에서는 2010년의 주요 태풍발생 시기의 대류활동지수와 아시아 몬순지수를 분석하여 열대저기압과의 관련성을 조사하였다.

대류활동지수는 외향장파복사량(Outgoing Longwave Radiation, OLR)에서 추정된 상층운량 값으로 결정된다. 음의 지수 값은 대류활동이 활발하여 운량이 많으므로 장파복사량이 적은 상태를 나타내고, 양의 값은 대류활동이 활발하지 않아 운량이 적으므로 장파복사량이 많은 상태를 의미한다. 3월 OLR 편차분포를 살펴보면(Fig. 3), 음의 편차를 보인 필리핀 동쪽 해상에서 대류활동이 활발하였음을 알 수 있다. 실제로 이 시기에 필리핀 마닐라 동쪽해상에서 제 1호 태풍 오마이스(Omais)가 발생하였다. 4월부터 6월 동안의 OLR 편차는 태풍발생 구역인 5~25°N, 120~160°E에서 대부분 양의 편차를 보인다. 따라서 이 시기는 상층운량이 평년보다 적고 대류활동이 활발하지 않았음을 알 수 있다. 그 결과, 태풍 오마이스가 발생한 이후에 6월까지 태풍은 발생하지 않았다. 7월이 되면서 필리핀 주변 해역에서 대류활동이 활발해짐에 따라 제 2호 태풍 콘선(Conson)과 3호 태풍 찬투(Chanthu)가 발생하였다. 8월에는 남중국해와 필리핀 동해에서 대류활동이 활발해져 이 시기에 총 5개의 태풍이 발생하였다. 그러나 이 수는 8월의 평년 평균 태풍발생수(5.9개)보다 여전히 낮았다. 8월과 비슷한 대류활동



**Fig. 4.** Comparisons of monthly TC genesis number between 2010 and climatology (60-year mean values) over the western North Pacific (WNP) from 1951 to 2010. The KP-influence TC represents the number of TC influenced over the Korean peninsular (KP).

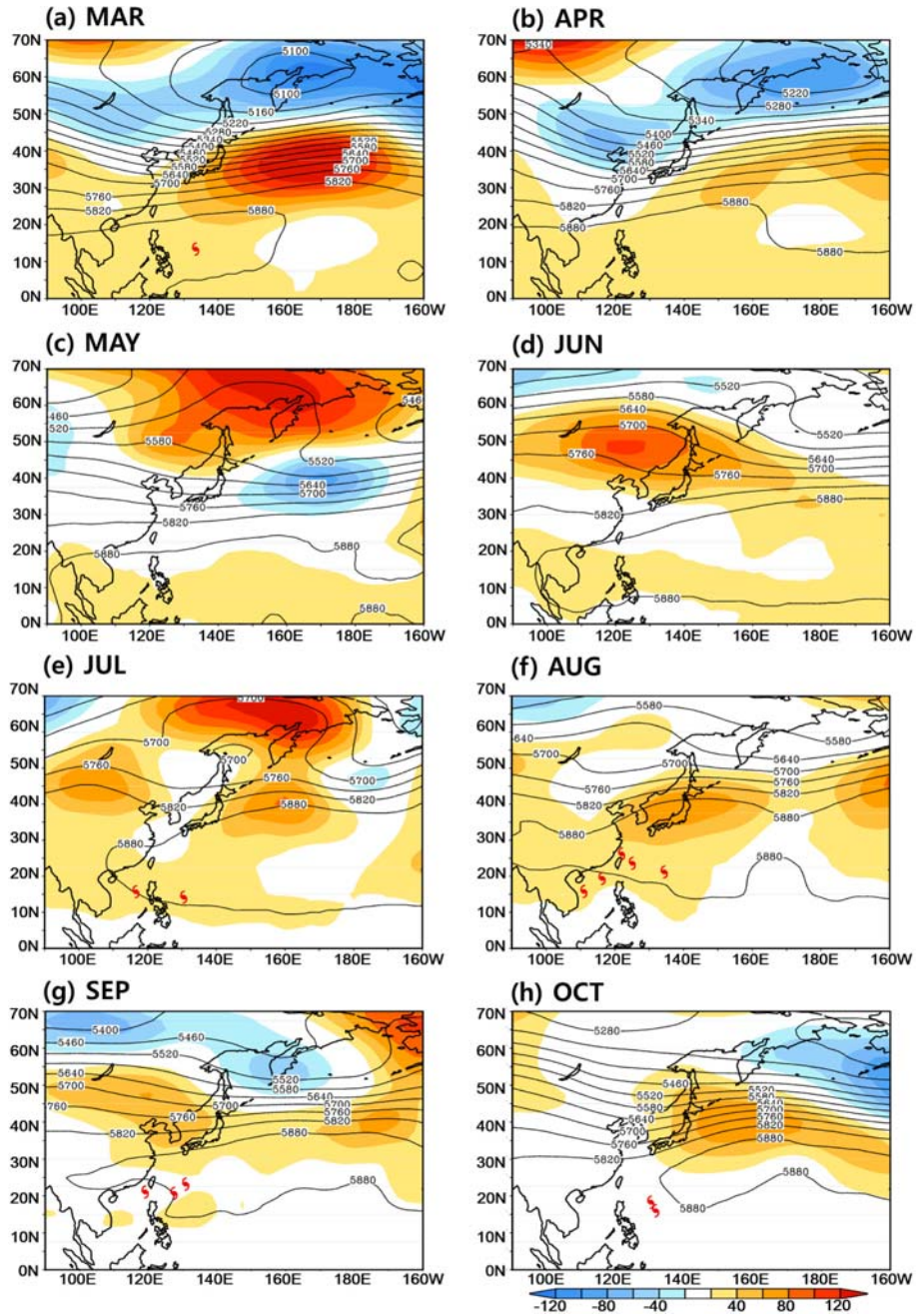
을 보인 9월과 10월에도 발생한 태풍의 수는 각각 4개, 2개로 30년 평균 4.9개, 3.6개보다 적었다. 이렇게 2010년 전 시기에서 태풍의 발생이 적었던 것은 대류활동이 활발한 지역이 140°E 서쪽에 국한되었기 때문으로 사료된다. 그 이유는 뒷장에서 상세히 다룬다.

아시아 몬순은 여름철 태평양과 인도양 쪽으로부터 아시아 내륙을 향해 부는 계절풍으로 북서태평양에서 발생한 열대저기압의 75%가 이러한 몬순의 기압골에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Ritchie et al., 1995). 35°N~5°S, 60~150°E 지역에서 평년과 2010년 OLR 편차를 사용하여 계산된 아시아 몬순지수(Table 2)는 양의 값일 때 아시아몬순이 활발함을 의미하고, 음의 값일 때 활발하지 않음을 의미한다. 2010년 지수 값을 보면, 태풍발생이 없었던 5~6월은 음의 값을 보였고 양의 값을 나타낸 7~10월에는 2010년 전체 발생태풍(14개) 중 13개가 발생하였다(전체 발생 태풍의 93% 차지). 앞서 언급한 바와 같이 이 시기에 발생한 태풍은 대부분 북서쪽으로 치우쳐 발생한 경향을 보인다.

**4. 북서태평양 발생 태풍의 특징**

**4.1 가장 적은 태풍발생 수 기록**

북서태평양에서 지난 59년(1951~2009)간 태풍은 매년 평균 26.4개가 발생하였지만 2010년에는 총 14개만 발생하였다. 이는 지난 59년 동안 가장 적은 태풍 발생 빈도수이다. 2010년 월별 태풍발생 빈도를 보면, 3월에 하나의 태풍이 발생한 이후 6월까지 단 하나의 태풍도 발생하지 않았고, 주요 태풍발생 기간(7, 8, 9, 10월)에는 평년(14.4개)보다 조금 적은 13개의 태풍이 발생하였다(Fig. 4, Table 2). 11월과 12월은 다시 하나의 태풍도 발생하지 않았다(평년은 1.8개 발생). 2010



**Fig. 5.** The monthly distribution of 500-hPa geopotential height (contour lines) and anomaly (colors) from March to October in 2010. The unit is gpm. Symbols represent the genesis positions of tropical cyclone each month

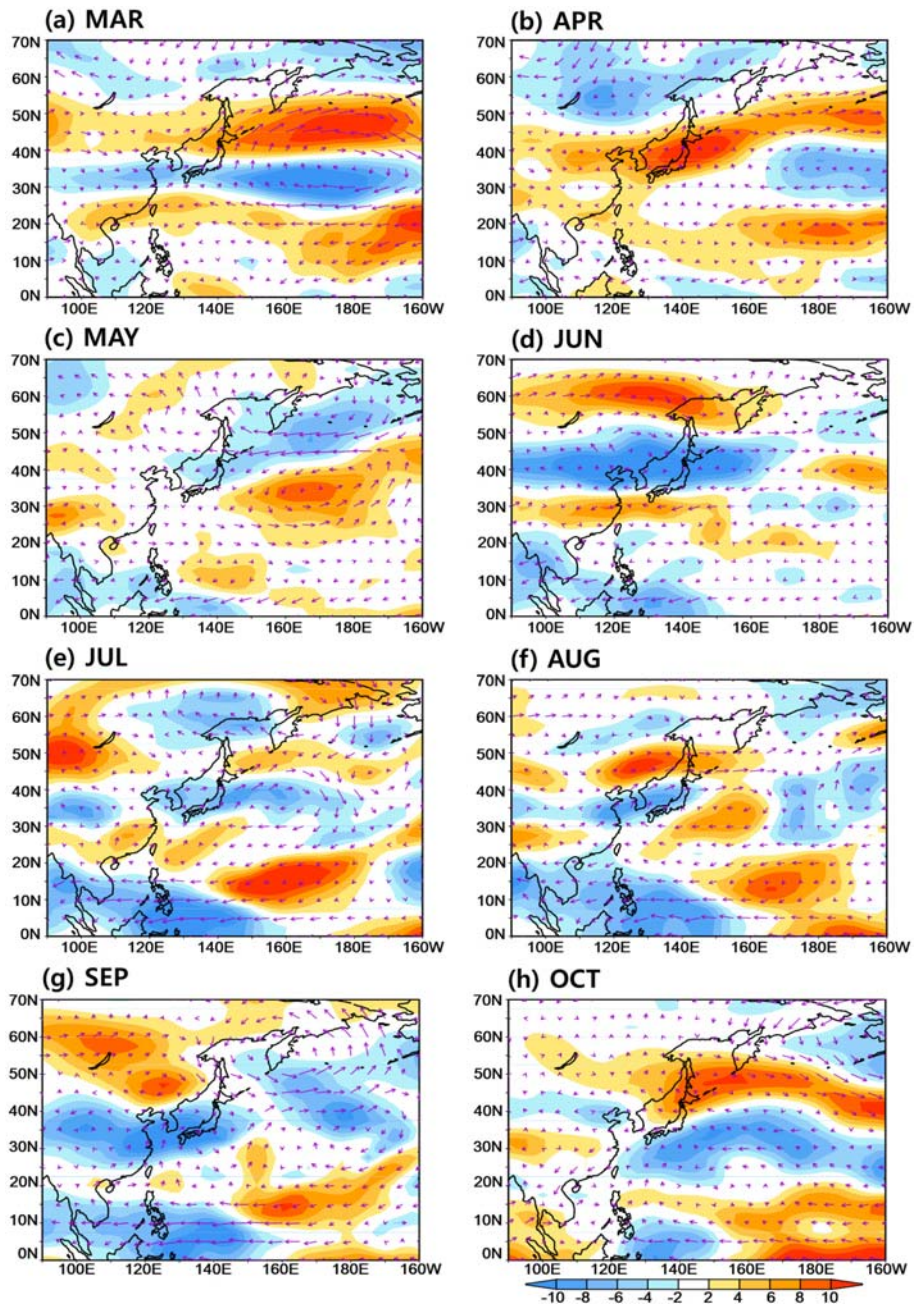
년에 발생한 14개 태풍 중 TY급은 7개, STS급은 3개, 그리고 TS급은 4개였다(Table 1).

2010년에 기록적으로 태풍발생이 적었던 원인을 파악하기 위하여 500 hPa 지위고도를 이용하여 북태평

양고기압(5880 gpm 등고선)의 발달 경향과 외향장과 복사량과 연직바람시어를 이용한 북서태평양에서의 대류활동을 살펴보았다.

먼저 3~10월까지 500 hPa 지위고도의 계절별 분포





**Fig. 6.** The monthly distribution of vertical wind shear (color) and 850-hPa wind anomaly (vectors) from March to October in 2010.

를 보면(Fig. 5), 2010년에는 북태평양고기압이 평년보다 빠르게 발달했을 뿐 아니라 남서쪽으로도 크게 확장한 것을 알 수 있다. 특히, 3~6월까지 열대해역(20°N 이하)에서 평년보다 강하게 발달한 고기압의 하강류는 태풍발생 구역에서의 대류활동을 억제하는 역

활을 한 것으로 사료된다. 7월에는 북태평양고기압은 북서쪽으로 치우쳐 발달하는 경향이 두드러지고 8월에는 7월보다 더 북서쪽으로 확장하였다. 이러한 북태평양고기압의 북서쪽 확장은 9월까지 유지되었다. 이러한 2010년의 특징적인 기압분포로 인해 2010년

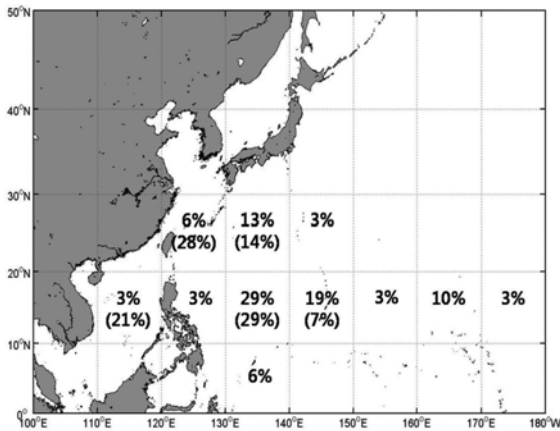


Fig. 7. The percentiles of TC genesis at 10° by 10° grid for climatology and 2010 (in parenthesis).

에는 140°E 동쪽의 주요 태풍발생 지역에서 태풍이 전혀 발생하지 못하였다.

월별로 연직바람시어의 편차분포를 살펴보면(Fig. 6), 3~5월까지의 필리핀 동쪽 주요 태풍발생 해역에서 전반적으로 연직바람시어가 커서 태풍발생에 좋지 않은 환경이 유지되었다. 7월부터 10월까지의 140~150°E의 동쪽 해역에서 강한 연직바람시어가 나타나 이 지역에서 이례적으로 태풍이 전혀 발생하지 못하였다. 그러나 연직바람시어가 평년보다 낮은 필리핀 주변해역과 남중국해를 포함하는 열대서태평양에서는 대류활동이 활발하여 이 시기에 집중적으로 13개의 태풍이 발생하였다.

4.2 고위도 및 남중국해에서 태풍발생 증가

2010년 태풍의 발생위치 경향을 알아보기 위하여 위·경도 각 10° 간격으로 태풍발생 빈도를 백분율로 나타내었다(Fig. 7). 상위 숫자는 2000~2009년 평균 발생비율이며, 괄호 안의 숫자는 2010년 발생비율을 나타낸다. 2010년 태풍발생 위치를 살펴보면, 2010년에 발생한 총 14개 태풍 중 6개(전체의 42%)가 20°N 이상의 비교적 고위도에서 발생하여 평년(22%)보다 약 두 배 정도 높았다. 남중국해에서 발생한 태풍도 평년(3%)보다 훨씬 높은 22%를 나타내었다. 반면, 140°E 동쪽해역에서는 평년(38%)보다 훨씬 낮은 7%의 태풍만이 발생하였다. 이렇게 태평양의 북서쪽으로 태풍의 발생이 집중되는 현상은 2010년 강하게 발달한 라니냐 때문인 것으로 사료된다. 이에 대한 상세한 설명은 7장에서 다시 다룬다.

4.3 태풍 활동과 발생 장기변동 특징

태풍발생의 장기간 변동 특징에 대하여 알아보기

한국기상학회 대기 제24권 3호 (2014)

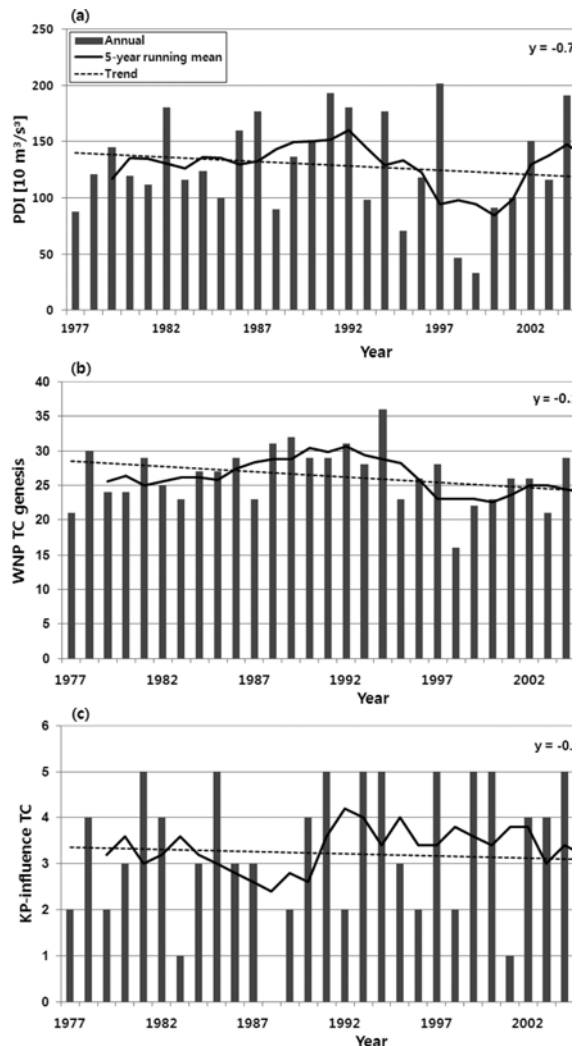


Fig. 8. Annual distributions of (a) PDI, (b) TC genesis number in the WNP, and (c) KP-influence TC number from 1977 to 2010. Thick solid and dashed line represent 5-year moving average and linear trend, respectively.

위하여 1977년부터 2010년까지 북서태평양의 태풍활동지수(Power Dissipation Index, PDI)와 태풍발생 개수를 비교 분석하였다. PDI는 태풍의 일생기간 동안의 최대풍속을 세제곱하여 모두 합산한 것으로 태풍의 지속시간과 강도가 함께 고려된 태풍활동지수이다(식 2 참고).

$$PDI = \int_0^{\tau} V_{max}^3 dt, \tag{2}$$

여기서  $\tau$ 는 태풍의 총 지속시간,  $V_{max}$ 는 최대풍속을

나타낸다. 이 식에서 PDI가 크다는 것은 물리적으로는 태풍의 총 파괴력이 커져 전체적으로 태풍의 활동이 왕성함을 의미한다.

북서태평양의 장기적인 PDI 변화를 살펴보면(Fig. 8a), 2004년 이후 감소하는 추세가 뚜렷하고 지난 34년간 동안에도 하향 추세가 잘 나타난다. 이러한 PDI의 장주기 변화는 북서태평양 태풍발생 개수의 변화와 잘 일치한다(Fig. 8b). 특히, 2010년은 PDI 지수 ( $5.0 \times 10^7 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-3}$ )가 평년( $12.6 \times 10^7 \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-3}$ )보다 약 2배 낮았다. 2010년의 기록적인 PDI의 하강을, 태풍 발생 개수, 지속일, 태풍강도로 나누어 분석해 보면, 2010년(평년) 태풍발생 빈도수가 14 (26.4)개로 매우 적었던 것이 가장 큰 원인이었다. 그 외 태풍 지속일 6.8 (8.7)일도 평년보다 약간 낮은 것도 어느 정도 기여한 것으로 분석된다. 태풍의 평균강도는  $28.7 (29.59) \text{ m s}^{-1}$ 로 평년과 비슷하였다.

Emanuel (2005)은 전 지구적으로 PDI가 해수면온도의 증가와 같은 경향으로 증가하고 있음을 보였다. 반면, Kossin *et al.* (2007)은 객관 분석된 태풍강도 자료를 사용하여 오히려 전 지구적으로 PDI가 감소하고 있다는 결과를 제시하였다. Kamahori *et al.* (2006)도 북서태평양에서 PDI의 하강 경향을 보고하였다. 장기적인 PDI의 변동은 사용된 태풍자료와 기간에 따라 그 결과가 다를 수 있지만, 대체적으로 본 연구의 결과와 같이 북서태평양에서 태풍활동은 전체적으로 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 태풍의 발생 개수가 장기적으로 감소하고 있는 것과 가장 관련성이 크다. 실제로 여러 연구에서 미래 지구온난화 환경에서는 태풍의 발생은 감소할 것으로 예상하고 있다(Oouchi *et al.*, 2006).

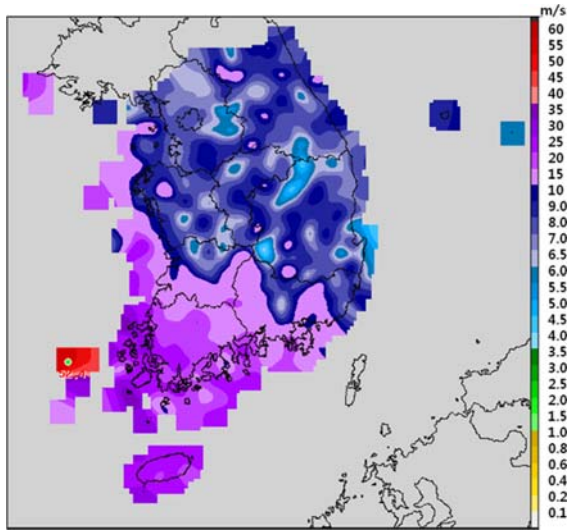
한반도에 영향을 준 태풍의 개수[2010년(평년) 3 (3.1)개]는 지난 34년간 뚜렷한 증가 및 감소의 경향이 보이지 않는다(Fig. 8c). 한반도 영향 태풍이 가장 많이 발생한 해는 1959년(총 7개)이었고, 영향 태풍이 발생하지 않은 해는 1988년과 2009년이였다. 2010년은 북서태평양에서 태풍의 발생이 매우 적었지만 세계의 태풍이 영향을 미쳐 발생비율(21%)로 보면 낮지 않았다.

### 5. 한반도 영향 태풍의 특징

2010년 발생한 14개의 태풍 중 한반도 영향 태풍은 4호 태풍 덴무, 7호 태풍 곤파스, 9호 태풍 말로로 총 3개이다(Fig. 1). 최근 30년(1981~2009) 동안 한반도에 3개 이상의 태풍이 영향을 미친 횟수는 총 20회이며 2007년 이후 3년만이다. 3개의 영향 태풍은 모두  $20^{\circ}\text{N}$  이상의 고위도에서 발생(평균위도  $22.6^{\circ}\text{N}$ )하고 비교적 단시간에 한반도에 영향을 준 것이 특징적이다.

2010년 4호 태풍 덴무는 8월 8일 12시경 타이완 타이베이 동남동쪽 약 400 km 해상에서 발생하였다. 이 시기에 북태평양고기압은 일본 열도 남동쪽에 위치하고 있었다. 태풍은 8월 9일 18시경에 한반도의 직접 영향권인 비상구역을 통과하여 8월 10일 06시경에는 북위  $30^{\circ}$ 까지 진입하였다. 이 때 태풍은 중심기압 980 hPa, 최대풍속  $31 \text{ m s}^{-1}$ 의 중간 강도의 중형급 태풍으로 발달하였다. 그러나 태풍 덴무는 해양열용량이 작은 고위도에서 발생하여 북진하는 동안에 충분한 에너지를 공급받지 못하여 더 이상 발달하지는 못하였다. 태풍은 21시경 서귀포 서쪽해상까지 진출 후 북동방향으로 전향하였으며, 8월 11일 05시경 남해안(전남 고흥군 도화면)에 상륙하였다. 상륙 후 태풍의 강도는 급격히 약화되었으며, 지속적으로 동북동진하여 14시경 울산 동쪽 해상으로 진출하였고, 18시경 비상구역을 벗어나 8월 12일 15시경 일본 서쪽해상에서 온대저기압으로 변질되었다. 덴무는 2007년 제11호 태풍 나리 이후 3년 만에 한반도에 상륙한 태풍이었다. 태풍발생에서 온대저기압으로 변질되기까지는 90시간이 소요되었고, 태풍이 한반도에 상륙하여 통과할 때까지 걸린 시간은 약 9시간이었다. 태풍이 한반도를 통과하면서 전면에 위치한 수렴대에 의해 남해안과 영동지역에 많은 강수가 발생하였다. 특히, 제주도 윗세오름(해발고도 1673 m)에서 8월 10~11일 동안 누적 강수량 739.5 mm를 기록하였다. 태풍 덴무는 피해보다 오랜 폭염과 가뭄을 해갈하는 긍정적인 역할을 많이 하였다.

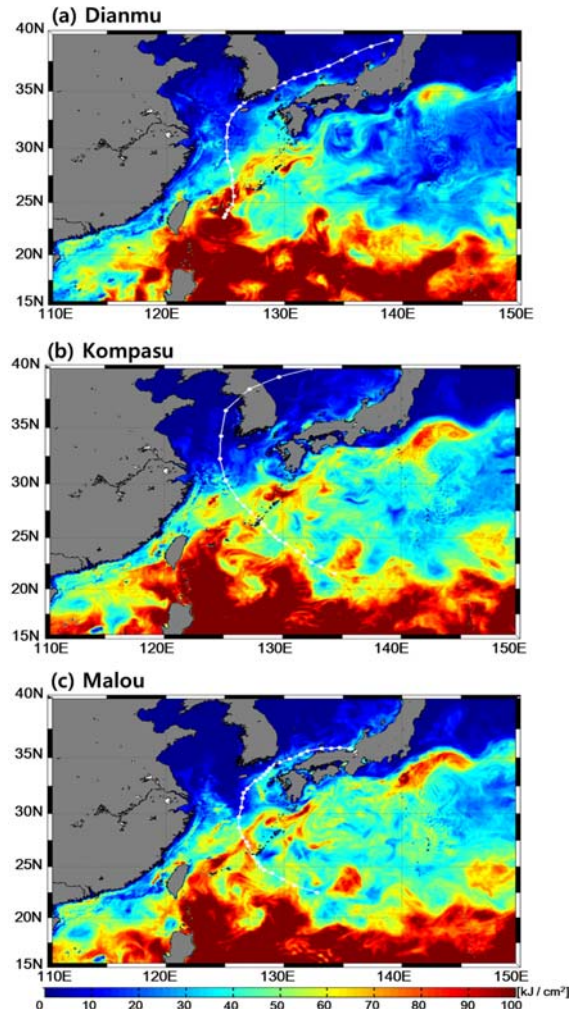
2010년 7호 태풍 곤파스는 8월 29일 21시경 일본 오키나와 남동쪽 약 880 km 부근 해상에서 발생하였다. 그 후 북태평양고기압의 가장자리를 따라 지속적으로 북진하였다. 태풍은 이동경로를 따라 분포한 고온의 해수역을 지나면서 세력이 점차 강화되어 8월 31일 09시경 중심기압 960 hPa, 최대풍속  $40 \text{ m s}^{-1}$ 의 강한 중형급 태풍으로 발달하였다. 9월 1일 0시경 비상구역내에 진입한 태풍은 평년보다 해수온이  $2\sim3^{\circ}\text{C}$  높게 형성되어 있는 서해안을 빠르게 지나면서 세력을 유지하였다. 이때 한반도는 태풍의 위험반원에 위치하여 많은 지역에서 강풍으로 인한 피해가 발생하였다. 9월 1일 18시경 태풍은 북쪽에 위치한 기압골로 인해 계속 북진하다가 21시경 중국 북부지방에 머물던 제트가 남동진하면서 북동쪽으로 전향하였다. 이후 태풍은 9월 2일 06시 35분경 강화군 남동쪽 남단에 상륙한 후 10시 50분경 강원도 고성군 앞바다로 진출하기까지 지속  $40\sim50 \text{ km}$ 의 빠른 속도로 이동하였다. 9월 2일 21시경 태풍은 비상구역을 벗어났고 9월 3일 03시경 청진 동쪽 해상에서 온대저기압으로 변질되었다. 태풍 곤파스는 소형이었지만 강한 강도를 유지하며 수도권을 강타하여 2010년에 가장 큰 피



**Fig. 9.** The spatial distribution of maximum instant wind speed on 1 September 2010 during the passage of typhoon Kompasu (1007). Adopted from KMA.

해를 입힌 태풍으로 기록되었다. 특히, 수원( $30.5 \text{ m s}^{-1}$ ), 서산( $41.4 \text{ m s}^{-1}$ ), 홍천( $20.7 \text{ m s}^{-1}$ )에서는 기상관측개시 이래 최대순간풍속 극값을 경신하였고, 2010년 9월 1일 한반도 서해상의 홍도(해발고도 517 m)에서는 최대순간풍속  $52.4 \text{ m s}^{-1}$ 를 기록하였다(Fig. 9). 강수는 경기북부와 북한지역에 집중되어 150~200 mm 이상의 비가 내렸지만 태풍의 빠른 진행속도로 인하여 강수의 지속시간이 짧아 강수피해는 상대적으로 적었다.

2010년 9호 태풍 말로는 9월 3일 15시경 일본 오키나와 남동쪽 약 470 km 부근 해상에서 발생하였다. 이 시기에 한반도와 일본에 걸쳐 형성된 고기압이 태풍의 북동쪽에 위치하고 있어 태풍은 북서방향으로 이동하였다. 9월 5일 9시경 비상구역까지 진입한 태풍은 일본 동쪽해상에 위치한 북태평양고기압이 느리게 수축하고 중국내륙에 찬 대륙고기압이 위치함에 따라 시속 12 km 내외의 느린 속도로 북진하였다. 9월 6일 09시경에 태풍은 최대로 발달하여 중심기압 990 hPa, 최대풍속  $24 \text{ m s}^{-1}$ 의 약한 소형급 태풍으로 발달하였다. 이후 태풍은 9월 6일 오전에는 상층제트가 일본 북쪽으로 남하하고 북태평양고기압의 중심이 남동쪽으로 치우치면서 북동방향으로 전향하였다. 다행히 태풍은 고압대의 영향으로 한반도로 상륙하지 않고 느리게 대한해협을 통과한 후 9월 8일 09시경 독도 남동쪽 해상에서 온대저기압으로 변질되었다. 태풍 말로는 일본 동쪽해상에 위치한 북태평양고기압의 느린 수축으로 인해 진행속도가 느려 한반도에 영향



**Fig. 10.** Spatial distribution of ocean heat content (OHC) along the track of typhoons (a) DIANMU, (b) KOMPASU, and (c) MALOU.

을 준 시간이 길어지면서 강수량이 상대적으로 많았다. 그러나 소형태풍으로 강풍반경이 작아 바람피해는 적었다.

한반도에 영향을 미친 태풍에 대해 해양열용량 분포를 살펴보았다(Fig. 10). 세 태풍 모두  $20^{\circ}\text{N}$  이상의 비교적 높은 위도에서 발생하여 북상하였기 때문에  $100 \text{ kJ cm}^{-2}$  이상의 높은 OHC 지역을 통과한 경우는 없다. 태풍의 경로를 따라 6시간 간격으로 반경 200 km 내의 OHC를 평균한 값을 살펴보면(Fig. 11a), 태풍발생 위치에서 OHC는 덴무 시기가  $91 \text{ kJ cm}^{-2}$ 로 가장 높았지만 전체적으로 보면 곤파스 시기가 가장 높았다. 태풍 말로는 발생과 이동 시기에 모두 가장 낮은 OHC를 보였다. 태풍의 일생 동안 최대강도가

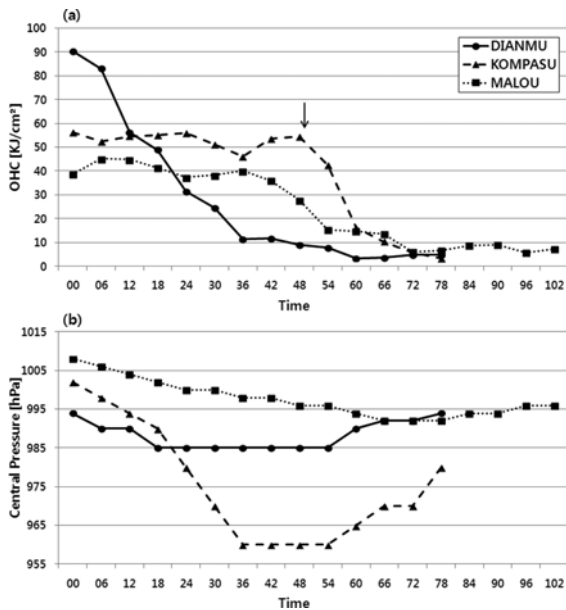


Fig. 11. Comparisons of (a) OHC averaged within 200-km radius along the track and (b) minimum central pressure for typhoons, DIANMU, KOMPASU, and MALOU.

곤파스(960 hPa), 덴무(980 hPa), 말로(990 hPa) 순으로 나타난 것도(Fig. 11b, Table 1) 이러한 OHC의 분포와 관련이 있는 것으로 사료된다.

한 가지 흥미로운 것은 태풍 곤파스가 지나간 동중국해 지역(28.6°N, 126.2°E)를 태풍 말로가 약 5일 뒤에 지나간 것이다(Fig. 1). 이 해역을 통과할 때는 곤파스는 970 hPa의 비교적 높은 강도를 유지하였기 때문에 수직혼합으로 인해 상층의 수온이 하강하였을 것으로 예상된다. 실제로 같은 지점을 곤파스가 통과할 때(52 kJ cm<sup>-2</sup>)보다 말로가 통과할 때(27 kJ cm<sup>-2</sup>)에 OHC가 약 25 kJ cm<sup>-2</sup> 정도 감소한 것을 알 수 있다(Fig. 11a의 화살표 시기 참조). 이러한 OHC의 하강은 태풍 말로가 강한 태풍으로 발달하지 못하도록 어느 정도 영향을 준 것으로 사료된다.

### 6. 태풍진로 예보정확도

2010년에 발생한 전체 14개 태풍에 대하여 KMA, RSMC, JTWC에서 발표한 24, 48, 72시간 진로오차를 비교하였다(Fig. 12). 태풍예보오차는 중심 위치의 예측값과 관측값의 차이로 결정한다. 총 14개의 태풍 중 1, 5, 8, 10호 태풍은 48시간 이내 소멸하여 48시간, 72시간 평균 오차 산출에서는 배제되었다. 14개 발생 태풍에 대하여 평균한 24, 48, 72시간 예보정확도는 JTWC가 3개 기관 중에서 가장 좋았다. JTWC는 KMA,

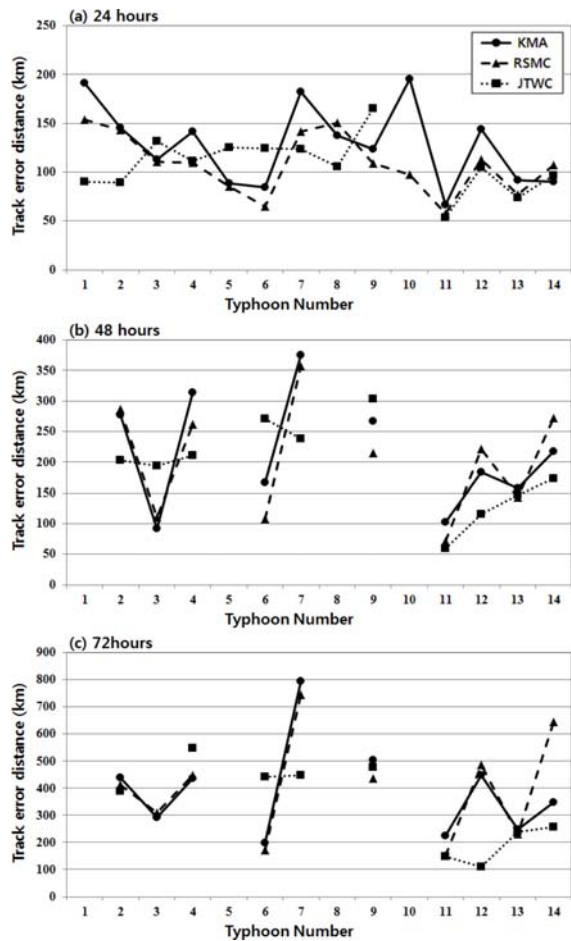


Fig. 12. Comparisons of TC track error distance among KMA, RSMC, and JTWC for (a) 24, (b) 48, (c) 72 hours during 2010 TC season.

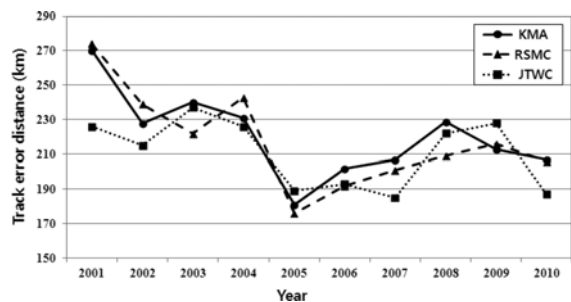
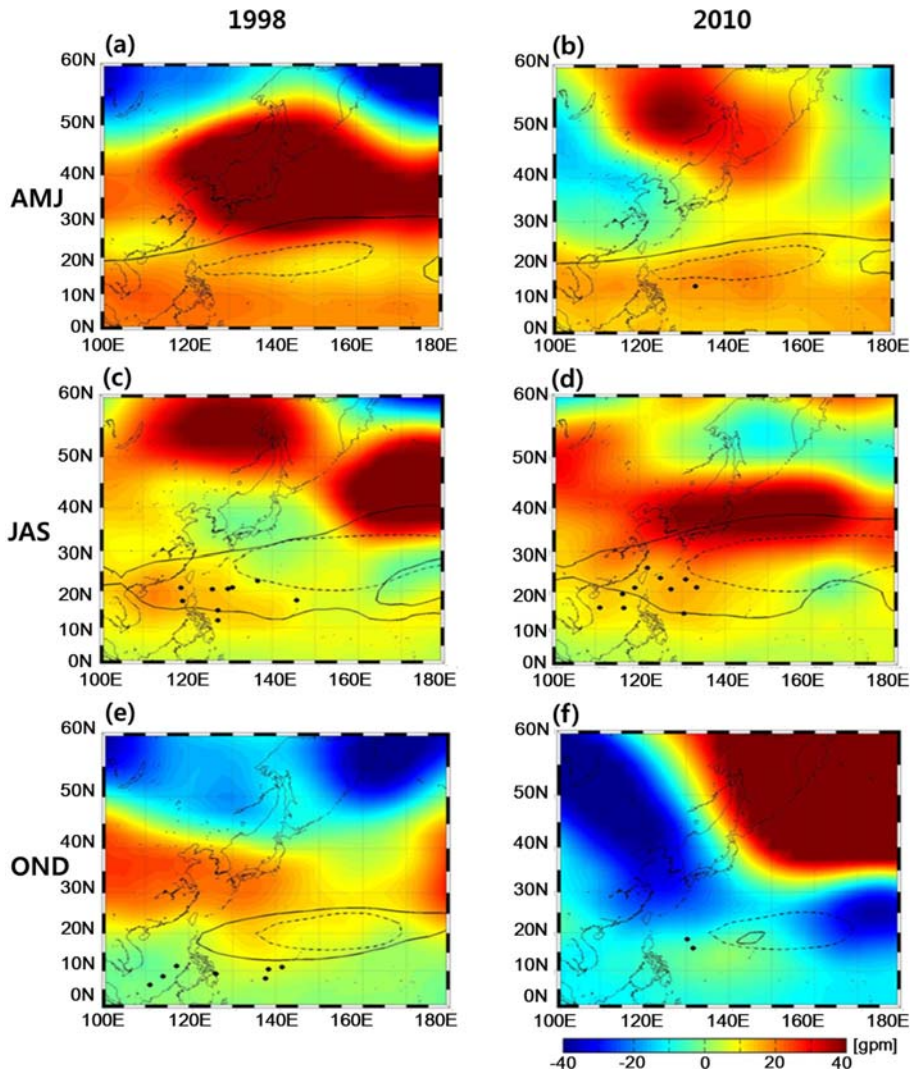


Fig. 13. Comparisons of 48-hours TC track forecast error distances among KMA (●), RSMC (▲), and JTWC (■) from 2001 to 2010.

RSMC보다 3시간 늦게 예보를 생산하고 있어 분석시간이 더 확보될 뿐 아니라 위성영상과 기상관측자료



**Fig. 14.** 500-hPa geopotential height anomalies (color) with 5880-gpm contours (dashed lines: climatology, solid lines: 1998 and 2010) during AMJ (upper), JAS (middle), and OND (lower) in 1998 (left) and 2010 (right). ● denotes the TC genesis position during the period.

등의 가용자료를 더 많이 사용할 수 있어 태풍 예측이 다른 기관보다 유리하다.

KMA의 48시간 기준 오차를 보면, 2호 태풍 끈선, 4호 태풍 덴무, 7호 태풍 곤파스, 9호 태풍 말로의 오차가 평균보다 컸다. 이 중 4, 7, 9호 태풍은 한반도에 직접적으로 영향을 준 태풍이었다. 특히, 7호 태풍 곤파스는 전향 후 상층 제트 기류와 동반된 강풍축의 영향으로 예상보다 태풍의 진행속도가 빨라져 진로오차가 가장 크게 발생하였다(72시간 예측에서 KMA와 RSMC 모두 700 km 넘는 큰 오차를 보임). 4호 태풍 덴무는 북태평양 고압대가 강하게 발달하면서 상층

기압계의 정체성이 커져 태풍의 이동이 빠르지 않을 것으로 예측되었지만 북태평양 고압대의 중심이 남동쪽으로 다소 이동하면서 태풍은 전향 후 예상보다 빠른 속도로 이동하여 진로오차가 커졌다. 9호 태풍 말로는 북태평양고기압의 중심이 북쪽에서 남동쪽으로 이동함에 따라 급격하게 동쪽으로 전향하였지만 이것을 하지 못하고 북쪽으로 이동할 것으로 예측하여 진로오차가 커졌다. 2호 태풍 끈선은 필리핀 동쪽 해상으로부터 홍콩 부근으로 이동할 것으로 예상하였지만 북태평양고기압이 예상보다 더 확장되어 진로가 서쪽으로 이동하면서 큰 오차가 발생하였다.

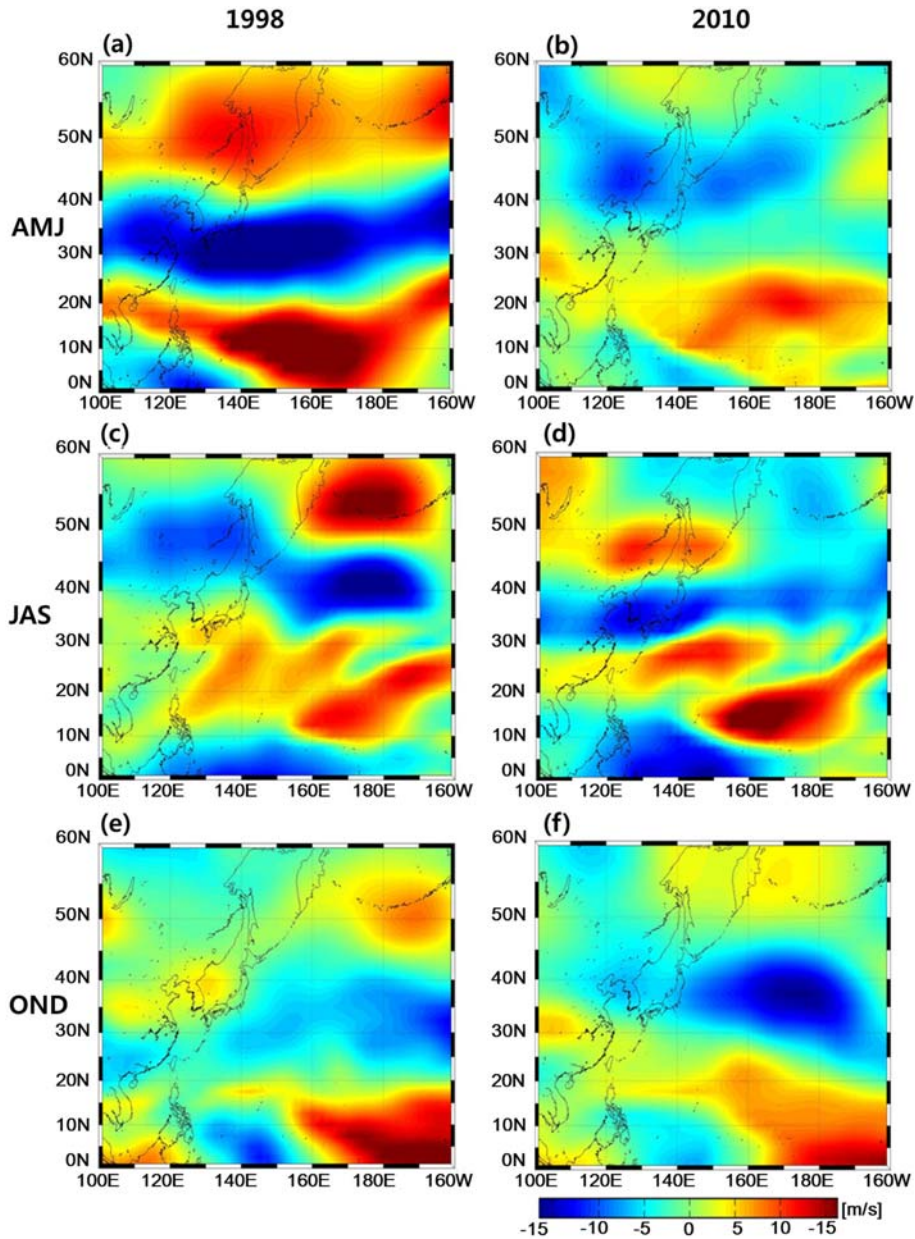


Fig. 15. Same as in Fig. 14, but for vertical wind shear anomaly (color).

장기간의 예보오차 경향을 분석하기 위해 최근 10년(2001~2010) 동안 KMA, RSMC 그리고 JTWC의 48시간 태풍진로 예보오차를 비교하였다(Fig. 13). 여기서 RSMC와 JTWC의 예보오차는 각 기관의 홈페이지를 통해 공식적으로 발표한 자료를 이용하였다. 태풍진로 오차는 해마다 이상 진로를 보이는 태풍의 출현빈도에 매우 민감하지만 세 기관 모두 최근 10년 동안 진로오차의 감소 경향이 뚜렷하다.

### 7. 극소 태풍발생 시기의 특징

2010년은 북서태평양에서 태풍관측이래 태풍발생이 가장 적은 해였다. 북서태평양에서 1998년에 16개 태풍이 발생한 적이 있었지만 한 해에 14개의 태풍만이 발생한 것은 2010년이 처음이다. 이 장에서는 북서태평양에서 기록적으로 적은 태풍이 발생한 해의 공통적인 특징을 조사하기 위해 1998년과 2010년에 대해

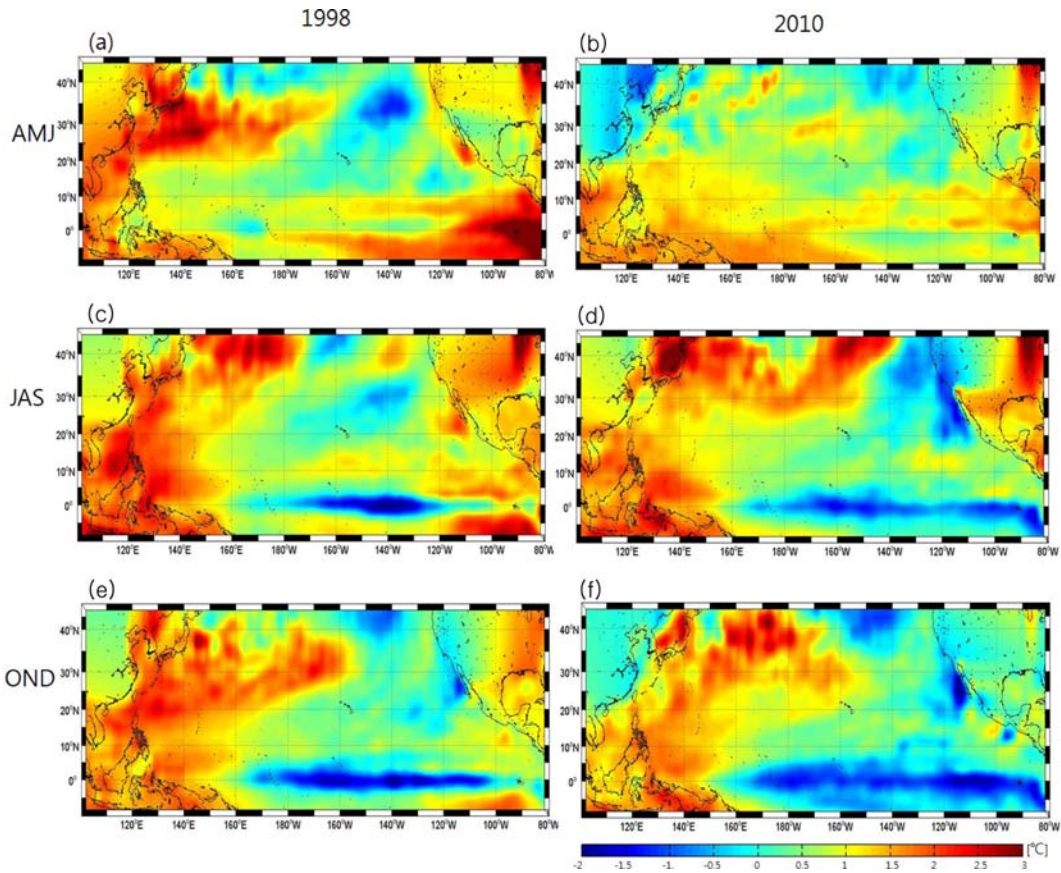


Fig. 16. Same as in Fig. 14, but for sea surface temperature anomaly (color).

500 hPa 지위고도, 연직바람시어(850 hPa부터 200 hPa 사이), 대류활동, 그리고 해수면온도 분포를 살펴보았다. 두 해의 이러한 분포는 4~6월(AMJ), 7~9월(JAS), 10~12월(OND)로 나누어 평년값(1981~2009)과의 편차를 비교하였다.

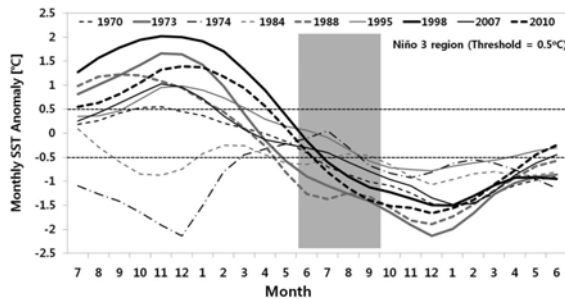
먼저 태풍의 진로를 좌우하는 500 hPa 지위고도의 편차, 북태평양고기압의 세력을 대표하는 5880 gpm 지위고도선 그리고 해당 기간에 발생한 태풍의 발생 지점을 살펴보았다(Fig. 14). 1998년과 2010년 두 해 모두 AMJ 동안 북태평양고기압은 평년과는 달리 25°N 이하의 태풍발생 해역을 모두 덮고 있어 이로 인해 태풍발생이 거의 없었던 것을 알 수 있다. JAS 동안에도 북태평양고기압은 평년에 비해 남서쪽으로 확장하면서 태풍은 대부분 140°E 서쪽(필리핀 동쪽 해역 및 남중국해)에서 적은 수만 발생하였다. 이러한 결과는 북태평양고기압이 크게 확장하였을 때에 남중국해로 향하는 태풍이 증가하며, 반대의 경우에는 중위도로 북상하는 태풍이 증가한다는 이전 연구결과와 잘 일치한다(Harr and Elsberry, 1995). OND 동안은 두

해가 다른 양상을 보여, 1998년은 북태평양고기압은 평년보다 더 확장이 되었지만 2010년은 평년보다 축소되었다(Figs. 14e, f). 이에 따라 1998년 OND 동안 발생한 태풍 중 71%가 북진하지 못하고 서진한 반면, 2010년은 발생한 2개의 태풍 중 1개의 태풍이 일본 동쪽해상까지 북상하였다.

연직바람시어 분포에서도(Fig. 15) 1998년과 2010년 두 해는 비슷한 양상을 보인다. 즉, AMJ 동안 필리핀 동쪽 대부분의 태풍발생 해역에서 연직바람시어 범위는 평년보다 강했으며 이는 대기환경이 태풍발생을 저해하는 역할을 하였다. 실제로 이 기간 동안 두 해 통틀어 하나의 태풍만이 발생하였다. JAS와 OND 기간은 두 해 모두 140°E 동쪽 열대해역에서 평년보다 강한 바람시어가 발생하여 태풍의 발생을 억제하였다. 실제로 이 두 해에서 태풍의 발생이 기록적으로 적었던 원인은 140°E 동쪽 해역에서 평년보다 태풍의 발생이 매우 적었기 때문이다.

열대해역의 해수면온도 분포에서도(Fig. 16), 두 해 모두 여름부터 서태평양에서 강한 양의 편차와 중앙





**Fig. 17.** 2-year variations of monthly SST anomalies (Niño 3 region) for La Niña years from 1970 to 2010. Thick lines represent the La Niña years shifted from El Niño to La Niña.

및 동태평양에서 음의 편차를 보이는 전형적인 라니냐 특징을 보여 140°E 동쪽 해역에서 태풍의 발생이 억제되었다. 통계분석(1970~2010년) 결과, 북서태평양 평균 태풍발생 개수는 라니냐(21.1개) 시기가 엘니뇨(25.2개) 시기보다 4개 정도 더 적었다. 그렇지만 지난 41년간 9번의 라니냐 해(1970, 1973, 1974, 1984, 1988, 1995, 1998, 2007, 2010년) 동안 1998년과 2010년 만이 기록적으로 적은 태풍이 발생하였다(Table 3). 1998년과 2010년이 다른 라니냐 해와 구별되는 특징을 찾기 위하여 (i) 라니냐가 발생한 시기, 즉 봄(MAM), 여름(JJA), 가을(SON)로 구분, (ii) 라니냐 발생 전의 상태, 즉 정상(normal) 해와 엘니뇨 해로 구분, 그리고 (iii) 라니냐의 강도(최대 수온편차)를 이용하여 좀 더 자세한 분석을 실시하였다(Table 3, Fig. 17). 그 결과, 1998년과 2010년에 공통적으로 라니냐가 강했고

(최대수온편차 < -1.5°C), 라니냐의 시작 시점이 여름이었고, 엘니뇨에서 급격하게 라니냐로 바뀐 것을 알 수 있었다. 실제로 41년 동안(1970~2010년) 엘니뇨에서 강한 라니냐(최대편차 < -1.5°C)로 바뀐 해는 총 네 해(1973, 1988, 1998, 2010년)밖에 없었고, 이 중에 라니냐가 여름에 시작된 해는 1998년과 2010년 밖에 없었다. 이 결과를 종합하면, 여름 시점에 엘니뇨에서 강한 라니냐로 바뀌는 해에 태풍이 기록적으로 적게 발생할 가능성이 높다. 물론 이러한 결론이 통계적으로 더욱 명확해지기 위해서는 이러한 조건을 만족하는 더 많은 표본의 수가 필요하다. 이를 위해 향후 비슷한 조건을 만족하는 해에 기록적으로 태풍의 발생이 억제되는지를 지속적으로 살펴 볼 필요가 있다.

### 8. 요약 및 결론

2010년은 북서태평양에서 태풍관측 이래 태풍발생이 가장 적은 해였다. 본 연구에서는 이러한 극소 태풍발생의 원인을 조사하기 위해 북서태평양 태풍활동에 영향을 미치는 열대지역의 대기대순환, 해수면온도, 대류활동, 동아시아 몬순활동, 그리고 해양열용량을 조사하였다.

2010년은 4월까지 엘니뇨 그리고 6월부터 12월까지 강한 라니냐가 지속되었다. 일반적으로 라니냐 해에 열대저기압의 발생빈도는 북서태평양의 남동쪽에서 감소하고 북서쪽에서 증가하는 것으로 알려져 있다. 실제로 2010년에도 라니냐 현상이 시작된 이후로 7월부터 10월까지 발생한 열대저기압은 대부분 140°E 서쪽에서만 발생하였고 전체 발생 개수도 적었다. 2010

**Table 3.** Onset season of La Niña, number of annual TC genesis, intensity of La Niña, and pre-conditions (normal or El Niño) for La Niña years during 1970~2010. Intensity of La Niña represents the maximum SST anomaly during La Niña period.

La Niña Onset Season	La Niña Occurrence Year	Number of TC genesis	Intensity of La Niña [°C]	Pre-conditions
Spring (MAM)	1970	26	-1.52	Normal
	1973	21	-2.14	El Niño
	1988	31	-1.89	El Niño
	1995	23	-0.78	Normal
	<b>AVG.</b>	<b>25.3</b>	<b>-1.58</b>	
Summer (JJA)	1998	16	-1.50	El Niño
	2010	14	-1.67	El Niño
	<b>AVG.</b>	<b>15</b>	<b>-1.59</b>	
Fall (SON)	1974	21	-1.15	Normal
	1984	27	-1.07	Normal
	2007	22	-1.49	Normal
	<b>AVG.</b>	<b>23.3</b>	<b>-1.24</b>	
<b>Total AVG.</b>		<b>21.2</b>	<b>-1.47</b>	

년에는 전반기에도 6월까지 북서태평양에서는 단 하나의 태풍(3월 24일)만이 발생하였다. 이는 이 시기에 주요 태풍발생 구역에서 대류 및 아시아몬순 활동이 매우 낮았기 때문으로 분석된다.

북서태평양에서 기록적으로 적은 태풍이 발생한 1998년(16개)과 2010년(14개)의 해양 및 대기 환경을 분석한 결과, 태풍이 많이 발생하는 140°E 해역에서 북태평양고기압의 확장, 강한 연직바람시어, 해수면수는 하강 등으로 태풍발생이 억제된 것이 전체 태풍발생 수의 감소에 가장 크게 기여한 것으로 조사되었다. 두 해의 공통점 분석을 통해, 더 많은 표본수가 필요하지만, 여름철(6월 이후)에 엘니뇨에서 라니냐로 바뀌는 강한 라니냐 해(해수면온도편차  $-1.5^{\circ}\text{C}$  이하)에 태풍이 기록적으로 적게 발생할 가능성이 높음을 예상할 수 있다.

2010년의 적은 태풍발생에도 불구하고 한반도에는 30년 평균값(3.1개)과 비슷한 세 개의 태풍(덴투, 곤파스, 말로)이 영향을 미쳤다. 이 세 태풍은 모두 20°N 이상의 고위도에서 발생(평균위도 22.6°N)하고 비교적 단시간에 한반도에 영향을 준 것이 특징적이다. 한반도에 가장 큰 피해를 입힌 태풍은 곤파스로 비교적 해양열용량이 높은 지역을 통과하면서 중심기압 960 hPa(최대풍속  $40\text{ m s}^{-1}$ )까지 발달하였고 한반도를 지날 때 빠른 속도로 이동하면서 강도를 유지하여 수도권에 많은 강풍 피해를 발생시켰다.

지난 34년간 태풍의 장기 활동변화를 분석한 결과, 북서태평양에서 태풍의 파괴력과 발생 개수는 감소하는 경향이 뚜렷했지만 한반도에 영향을 미친 태풍의 개수는 감소 또는 증가 경향이 뚜렷하게 보이지 않았다. 세 기관(KMA, RSMC, JTWC)의 48시간 태풍 진로예보 오차를 비교하면, 장기적으로는 세 기관의 순위는 계속 변화하였다. 그러나 공통적으로 최근 10년(2001~2010년) 동안 모두 진로오차의 감소 경향이 뚜렷하다. 2010년에는 세 기관 중에 JTWC가 진로오차가 가장 적었으며(187 km) KMA가 가장 컸다(215 km). 세 기관이 태풍진로 예측에 사용하는 가이던스 모델들이 비슷한 점을 고려하면(Lee *et al.*, 2011), 향후 태풍진로 예측 정확도 개선을 위해서는 앙상블 예측 기술 향상에 더 많은 노력을 기울여야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2013년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “종합해양과학기지 구축 및 활용연구”와 “제주씨그랜트사업”의 일환으로 수행되었으며, 2012년도 제주대학교 연구년 기간에 연구되었습니다.

한국기상학회 대기 제24권 3호 (2014)

### REFERENCES

- Brown, D. P., J. L. Beven, J. L. Franklin, and E. S. Blake, 2010: Atlantic hurricane season of 2008. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1975-2001.
- Cha, E.-J., Y.-H. Park, and H. J. Kwon, 2008: Characteristics of tropical cyclones over the western North Pacific in 2007. *Atmosphere*, **18**, 183-197.
- \_\_\_\_\_, H. J. Kwon, and S. Kim, 2010: Characteristics of tropical cyclones over the western North Pacific in 2009. *Atmosphere*, **20**, 451-466.
- \_\_\_\_\_, H.-S. Hwang, K.-J. Yang, S.-H. Won, S.-W. Ko, D.-H. Kim, and H. J. Kwon, 2009: Characteristics of tropical cyclones over the western North Pacific in 2008. *Atmosphere*, **19**, 183-198.
- \_\_\_\_\_, K.-H. Lee, Y.-H. Park, J.-S. Park, J.-K. Shim, H.-J. In, H.-D. Yoo, H. J. Kwon, and D.-S. Shin, 2007: Characteristics of typhoon in 2006 and improvement of typhoon forecast. *Atmosphere*, **17**, 299-314.
- 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.
- \_\_\_\_\_, 2000: Tropical cyclone activity over the western north pacific associated with El Niño and La Niña Events. *J. Climate*, **13**, 2960-2972.
- \_\_\_\_\_, and K. S. Liu, 2004: Global warming and western North Pacific typhoon activity from an observational perspective. *J. Climate*, **17**, 4590-4602.
- Chen, T. C., S. P. Wang, N. Yamazaki, and S. Kiehne, 1998: Interannual variation in the tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1080-1090.
- \_\_\_\_\_, S. Y. Wang, M. C. Yen, and A. J. Clark, 2009: Impact of the intraseasonal variability of the Western North Pacific large-scale circulation on tropical cyclone tracks. *Wea. Forecasting*, **24**, 646-666.
- 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.
- Chu, P. Shin, and X. Zhao, 2004: Bayesian change-point analysis of tropical cyclone activity: The central North Pacific case. *J. Climate*, **17**, 4893-4901.
- Collins, J. M., and D. R. Roache, 2011: The 2009 hurricane season in the eastern North Pacific Basin: An analysis of environmental conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1673-1682.
- Emanuel, K. A., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, 686-

- 688.
- Harr, P. A., and R. L. Elsberry, 1995: Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part 1. Spatial patterns and tropical cyclone characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1225-1246.
- Japan Meteorological Agency, 2010: Monthly report on the climate system. [http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/diag/2011/index/html/soiolru/index\\_html\\_soiolru\\_2011.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/diag/2011/index/html/soiolru/index_html_soiolru_2011.html).
- Kamahori, H., N. Yamazaki, N. Mannoji, and K. Takahashi, 2006: Variability in intense tropical cyclone days in the western North Pacific. *SOLA*, **2**, 104-107.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2011: Typhoon analysis report, KMA report, 359 pp.
- Kossin, J. P., K. R. Knapp, D. J. Vimont, R. J. Murnane, and B. A. Harper, 2007: A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04815.
- Lee, Y., H. J. Kwon, and D.-C. Joo, 2011: Dynamic database typhoon track prediction (DYTRAP). *Atmosphere*, **21**, 209-220.
- Leipper, D., and D. Volgenau, 1972: Hurricane heat potential of the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, **2**, 218-224.
- Lin, I. I., C. C. Wu, I. F. Pun, and D. S. KO, 2008: Upper-ocean thermal structure and the Western North Pacific category 5 typhoon. Part I: Ocean features and the category 5 typhoons' intensification. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3288-3306.
- Matsuura, T., M. Yumoto, and S. Iizuka, 2003: A mechanism of interdecadal variability of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Clim. Dynam.*, **21**, 105-117.
- NEMA (National Emergency Management Agency), 2010: Natural hazards report, NEMA report, 841 pp.
- Oouchi, K., J. Yoshimura, H. Yoshimura, R. Mizuta, S. Kusunoki, and A. Noda, 2006: Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20-km-mesh global atmospheric model: frequency and intensity analysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 259-276.
- Revell, C. G., and S. W. Goulter, 1986: South pacific tropical cyclones and the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1138-1145.
- Ritchie, H., C. Temperton, A. Simmons, M. Hortal, T. Davies, D. Dent, and M. Hamrud, 1995: Implementation of the semi-lagrangian method in a high-resolution version of the ECMWF forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 490-514.
- Satoshi, I., and T. Matsuura, 2008: ENSO and Western North Pacific tropical cyclone activity simulated in a CGCM. *Clim. Dynam.*, **30**, 815-830.
- Shay, L. K., P. G. Black, A. J. Mariano, J. D. Hawkins, and R. L. Elsberry, 1992: Upper ocean response to Hurricane Gilbert. *J. Geophys. Res.*, **97**, 20227-20248.
- Stewart, S. R., and P. C. John, 2012: Eastern North Pacific hurricane season of 2010. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2769-2781.
- Tseng, Y.-H., S. Jan, D. E. Dietrich, I. I., Lin Y. T., Chang, and T. Y., Tang, 2010: Modeled oceanic response and sea surface cooling to typhoon Kai-Tak. *Terr Atmos. Oceanic Sci.*, **21**, 85-98.
- Wang, B., and J. C. L. Chan, 2002: How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North pacific. *J. Climate*, **15**, 1643-1658.