

동아시아의 30 °N 부근에서 여름철 태풍 강도변화

최기선 · 김백조 · 이성로* · 김호경** · 이지선***

기상청, *국립목포대학교 토목공학과,

서울대학교 건설환경공학부, *부경대학교 환경대기과학과
(2009년 3월 10일 접수; 2009년 4월 7일 수정; 2009년 7월 21일 채택)

Variations of the Summertime Tropical Cyclone Intensity near 30 °N in East Asia

Ki-Seon Choi, Baek-Jo Kim, Seong-Lo Lee*, Ho-Kyung Kim** and Ji-Sun Lee***

National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

**Department of Civil Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 534-729, Korea*

***Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

****Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 08-737, Korea*

(Manuscript received 10 March, 2009; revised 7 April, 2009; accepted 21 July, 2009)

Abstract

In this paper, changes in the intensity (e.g., central pressure and maximum sustained wind speed) of Tropical Cyclone (TC) in summer in the regions located at 30 °N in East Asia from 1988 to 1991 were found. The intensity of TC from 1991 to 2007 was much higher than that of TC from 1965 to 1988. The reason for this was that the frequency of TCs passing China from 1991 to 2007 was much lower than that of TCs from 1965-1988 because a northeasterly wind caused by high-pressure circulation in East Asia got severer along the East Asian coast. Instead, TCs moved from the eastern region of the Tropical West Pacific to Korea and Japan mainly after passing the East China Sea due to the low-pressure circulation strengthened in the subtropical waters of East Asia. In addition, low Vertical Wind Shear (VWS) was created along the mid-latitude regions of East Asia and the main path of TCs from 1991 to 2007. Most of the regions in the Northwestern Pacific showed higher Sea Surface Temperature (SST) from 1991 to 2007, and had a good environment where TCs were able to maintain a higher intensity on the mid-latitude. In particular, a low sensible heat flux occurred due to high snow depth in East Asia in the spring of 1991 to 2007. Accordingly, the lower layer of East Asia showed high-pressure circulation, and the sea surrounding East Asia showed low-pressure circulation. Thus, the typical west-high, east-low pattern of winter atmospheric pressure was shown. The possibility of snowfall in East Asia in spring to be used as a factor for predicting the summer intensity of TC in the mid-latitude regions of East Asia was insinuated. The characteristics of TC in a low-latitude region were the same in Korea. The latest intensity of TCs got higher, and the landing location of TCs gradually changed from the west coast to the south coast.

Key Words : Tropical cyclone, Central pressure, Maximum sustained wind speed, Vertical wind shear, Snow depth

1. 서 론

한국, 중국 및 일본 등의 동아시아 중위도 국가들은 여름철 태풍에 동반되는 강풍과 집중호우에 의해 많은 인명 및 재산 피해를 입는다. 한국의 경우, 지난 10년 동안 자연재해에 의해 발생한 재산 및 인명피해의 65%가 태풍에 의해 유발되었다¹⁾. 특히, 2002년 8월 말에 태풍 Rusa (0215)가 한국의 남해안에 상륙하여 중동부 해안으로 빠져나갔다. 이때 한국의 중동부 해안지역은 태풍에 동반된 집중호우로 많은 피해를 입었으며 (870.5 mm의 최대 일 강수량을 기록), 태백산맥의 서쪽 지역 역시 집중호우로 많은 피해를 입었다²⁾. 일본의 경우 기후학적으로 약 3개의 태풍이 여름철에 일본에 상륙하지만, 2004년에는 3배가 넘는 10개가 비정상적으로 상륙하여 많은 피해를 입힌바 있다. 따라서 동아시아 중위도 지역에서의 태풍에 의한 피해를 줄이기 위해 태풍 활동에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

한국의 경우 Choi와 Kim³⁾이 1951~2004년 동안 한국에 상륙한 태풍에 대한 기후학적 특성을 분석한 바 있다. 그들은 한국 상륙 태풍의 강도 및 빈도가 최근에 급격하게 증가 하고 있으며, 상륙지점도 한국의 서해안에서 남해안으로 최근 변화되는 추세를 증명하였다. Kim 등⁴⁾은 한국에서 1970년대 후반 이후 급격하게 증가된 8, 9월의 집중호우는 한국 상륙 태풍과 연관되어짐을 보인바 있다. 그들은 태풍의 한국 상륙 전 태풍 북서쪽에 위치해 있는 상층 기압골 (upper-tropospheric trough)와의 상호작용에 의해 한국에 집중호우가 유발됨을 증명하였다. 또한 Chan과 Shi⁵⁾는 태풍의 발생빈도를 2차 다항식으로 구한 후, 1960년대로부터 1970년대 후반 동안에는 그 발생빈도가 감소하였으나, 그 이후는 증가하는 추세에 있음을 보였다. 이러한 강한 강도를 가진 태풍의 영향 및 발생빈도의 최근의 증가는 중앙 태평양에서도 공통적으로 나타나는 현상임을 Chu와 Clark⁶⁾ 역시 증명하였다. 이러한 최근 태풍의 빈도 및 강도의 증가 원인으로서는 일반적으로 온실효과로부터 야기된 지구온난화가 제시된다. 하지만 Nitta와 Yamada⁷⁾, Trenberth⁸⁾, Graham⁹⁾, Mantua 등¹⁰⁾은 열대 서태평양에서의 십 년 규모 변동에 있음을 제안하였다. 한편, Ho 등¹¹⁾은 한국 및 일본에 영향을 주는 강한 태풍의 빈도가 1970년대 후반 이후 오히려

감소하고 있음을 보였다. 그들은 이러한 원인으로 1970년대 후반 이후 서쪽으로 강화되고 있는 북태평양 고기압을 제시하였다.

본 연구는 동아시아 30°N에서의 태풍 강도 변화를 조사한다. 동아시아에서 30°N의 위치는 중국의 중·북부, 한국 및 일본과 같은 국가에 있어서 입구에 해당하는 지역이다. 또한 이들 국가들은 여름철 태풍에 의해 피해를 많이 입기도 한다. 따라서 동아시아 30°N에서의 태풍 강도는 이들 국가들에게 있어서 매우 민감한 문제이다. 따라서 본 연구는 최근 43년 (1965~2007) 동안 동아시아 30°N에서의 태풍 강도의 추세를 진단하고, 추세변화의 원인을 밝히고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 자료

본 연구에서 사용된 태풍자료는 Regional Specialized Meteorological Center (RSMC)-Tokyo에서 제공하는 태풍의 best track이다. 이 자료는 6시간 간격의 태풍 중심기압 (Central Pressure, CP ; hPa), 중심최대풍속 (Maximum Sustained Wind Speed, MSWS ; kts) 및 이동위치 (위도·경도) 등을 포함한다.

한편, 태풍 활동과 관련된 대기순환 특성은 NCEP-NCAR (National Center for Environmental Prediction-the National Center for Atmospheric Research¹²⁾) 재분석 자료 중 바람 ($m s^{-1}$) 및 지위고도 (gpm) 등의 변수를 사용되었다. 이 자료는 6시간 간격이고, 위·경도는 2.5° 간격이며, 18개의 표준 연직층으로 구성되어 있다. 또한 T62 가우스 간격으로 구성된 현열속 (Sensible Heat Flux)와 적설수상당량 (Water Equivalent of Accumulated Snow Depth, WEASD)의 자료가 분석에 사용되었다. 그리고 NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (해수면 온도)자료 역시 사용되었다. 해수면 온도 자료는 위·경도 1° 간격으로 1854년~현재까지 월 간격으로 구성되어 있다. 위의 재분석 자료는 모두 Climate Diagnostics Center (CDC)에서 제공된다.

2.2. 분석방법

태풍 자료는 1951년부터 현재까지 이용 가능한 반면, 위성관측시기 이전인 1950년대~1960년대 초

동안에는 이 자료의 신뢰성에 약간의 문제가 있다. NCEP-NCAR 재분석 자료 역시 상층 관측망과 기상 위성관측 시스템에 있어서 이 시기에 중요한 변화를 겪었다. 그러므로 현재 연구의 결과에 대한 최대의 신뢰성을 확보하기 위해 위성관측 시기인 1965~2007년 동안의 자료만을 한정하여 분석하였다.

북서태평양에서 매년 발생하는 태풍의 60% 이상이 7, 8, 9월에 집중된다¹³⁾. 따라서 현재 연구는 이 세 달의 자료를 이용하였으며, 이 세 달을 여름으로 정의한다. 태풍 이동 빈도는 5° × 5° 격자내 마다 태풍이 지나간 회수로 정의되며, 한 격자내에 같은 태풍이 2번 이상 이동하면 1번 지나간 것으로 간주하였다. 한국 상륙 태풍은 RSMC best-track 자료로부터 지상알기도에서 한국의 해안에 접한 태풍은 모두 한국에 상륙한 태풍으로 정의된다.

태풍 이동을 야기하는 지향류의 특징을 파악하기 위해 본 연구는 대류권 평균 지위고도 (Φ_{trop}) 및 바람 (V_{trop})을 분석하였다^{14,15)}. 이들은 아래의 식과 같이 정의된다.

$$\Phi_{trop} = \frac{1}{P_b - P_t} \int_{p_t}^{p_b} \Phi dp \quad (1)$$

$$V_{trop} = \frac{1}{P_b - P_t} \int_{p_t}^{p_b} V dp \quad (2)$$

여기서, P_b 와 P_t 는 각각 850 hPa와 200 hPa을 의미한다.

3. 동아시아의 30 °N에서 태풍강도의 기후학적 특성

Fig. 1은 1965~2007년 동안 30 °N에서 경도에 따른 태풍 중심기압의 변동을 나타낸 것이다. 30 °N에서 중국은 122 °E까지 동쪽으로 위치해 있다 (embedded map in Fig. 1). 이런 지형 효과에 의해 분석 경도 중 110° - 125°E에서 중심기압이 제일 높은 반면 125° - 130°E에서 가장 낮다. 110° - 120°E의 평균 중심기압은 125° - 130°E의 평균중심기압과 약 30 hPa의 차이를 보인다. 특히, 경도대에서의 총 TC 빈도에 대한 Tropical Depression (TD), Extratropical Cyclone (EC) 빈도율의 경우, 110° - 120°E에서는 91.4% (32/35)를 보이는 반면, 125° - 130°E에서는

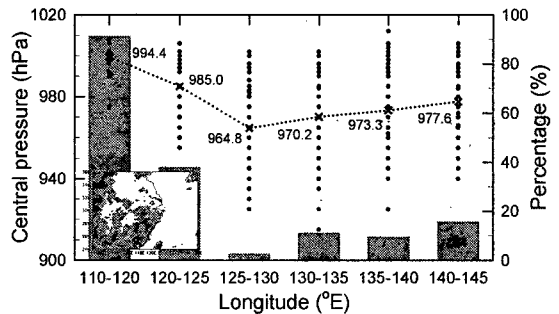


Fig. 1. Variation of tropical cyclone (TC) central pressure (CP) near 30 °N along a longitude band during the summer (July-August-September) for 43 years (1965~2007). Mark 'x' indicates an average TC CP at a longitude band.

단지 2.9% (2/67)를 나타낸다 (Fig. 1에서 막대 그래프). 또한 120° - 125°E에서는 38.2% (13/34)를 보임으로서 30 °N에서 125°E의 서쪽으로 이동하는 태풍의 65.2% (45/69)가 TD, EC와 같은 약한 강도를 가짐을 알 수 있다. 이후 중심기압 및 TD, EC 빈도율의 변화 경향은 동쪽으로 가면서 완만하게 증가한다. 125° - 130°E에서 가장 낮은 중심기압을 보이는 것은 쿠로시오 해류로부터 뻗어 나온 난류에 의한 영향 때문인 것으로 보인다.

Fig. 2는 30 °N에서 110° - 125°E, 125° - 135°E, 135° - 145°E 경도대마다 태풍의 중심기압 및 빈도를 5년 간격으로 나타낸 것이다. 30 °N에서 중국 대륙에 속하는 경도대인 110° - 125°E를 지나는 태풍의 빈도는 최근 감소하는 추세를 보이고 중심기압에서는 큰 변화를 나타내지 않는다. 한편 태풍의 강도가 가장 강했던 125° - 130°E에서의 태풍 빈도는 뚜렷한 십년 간 변동을 나타낸다. 1950~1960년대와 1990~2000년대 동안은 평균보다 높고, 이 두 시기 사이인 1970~1980년대 동안에는 평균보다 낮은 변동을 나타낸다. 하지만 중심기압에서는 1960년대 후반 이후로 꾸준한 감소 추세를 보인다. 특히, 1990년대부터 태풍의 강도와 빈도가 평균보다 강해지고 높아지는 특징을 보인다. 이는 최근에 강한 강도를 갖는 태풍이 이 경도대를 지나는 빈도가 증가되고 있음을 의미한다. 125° - 135°E의 경도대 보다 중심기압이 다소 높았던 135° - 145°E에서의 태풍 빈도는 1980년대 초반까지는 대부분 평균 이하의 빈도

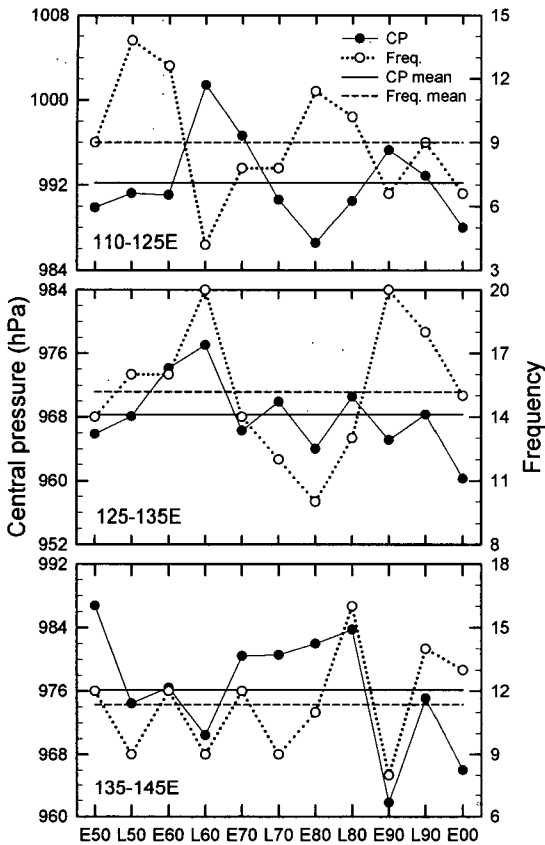


Fig. 2. Variation of 5-year mean TC CP (solid line with a closed circle) and TC frequency (dotted line with a open circle) near 30°N at a longitude band. Solid and dashed lines denote a climatological mean TC CP and frequency, respectively.

를 보이다가 그 이후에는 좀 더 높은 빈도를 나타낸다. 하지만 1980년대 후반 이후의 태풍 빈도는 125°-135°E에서의 빈도 보다는 높지 않다. 중심기압에서는 1980년대 까지는 평균 중심기압보다 높거나 비슷하지만, 1990년대부터는 급격하게 감소한다. 요약하면, 최근 중국 대륙을 경유하는 태풍의 빈도는 감소하고 강도는 변화가 없는 반면, 중국 대륙 동쪽의 해양을 지나는 태풍의 빈도와 강도는 최근 강화되는 경향을 보인다. 따라서 30°N의 북쪽에 위치해 있는 중국 화북, 한국, 일본 등의 동아시아 중위도 국가들은 최근 좀더 강한 태풍의 영향을 받을 가능성이 높다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 각 경도대를 경유한 태풍의 전체 경로를

나타낸 것이다. 110°-120°E를 지나는 태풍들은 모두 중국 대륙을 경유한다. 120°-125°E에서는 34개 태풍들 중 21개 (61.7%)가 이곳을 경유한다. 따라서 125°E의 서쪽으로 이동하는 태풍들 중 81.2% (56/69)가 중국 대륙을 경유하는 경향이 있으며, 이러한 지형의 영향에 의해 이 경도대를 지나는 태풍들이 가장 약한 강도를 가지는 이유가 된다. 또한 이러한 125°E의 서쪽에서 이동하는 태풍들은 중국의 화북과 한국을 경유하는 특성이 강하다. 125°-130°E를 지나는 태풍들은 한국과 일본을 주로 경유하며, 이 보다 더 동쪽의 경도대를 지나는 태풍들은 대체로 일본을 더 많이 경유한다. 한편 태풍의 경유 경도대가 동쪽으로 이동할수록 태풍들의 평균 발생 위치는 북동쪽으로 이동하는 경향을 나타낸다.

4. 동아시아의 30°N에서 태풍활동의 변화

4.1. 태풍 강도

Fig. 4는 매년 110°-145°E를 경유한 태풍들의 평균중심기압 및 이 태풍들 중 최소중심기압과 평균 중심최대풍속을 나타낸 것이다. 전체적으로 두 변수에서 두 시계열의 변동은 비슷해 보이며, 역시 십년 간 변동을 나타낸다. 먼저 평균중심기압의 변동에서는 1988~1991년 사이에 급격한 변화가 나타나는데, 1988년에 992.3 hPa에서 1991년에는 963.1 hPa까지 약 30 hPa 정도 하강한다. 따라서 1965~1988년 동안 (24년)의 평균중심기압은 979.1 hPa인 반면, 1991~2007년 동안 (17년)의 평균중심기압은 970.4 hPa로 두 시기 사이에는 약 10 hPa 차이를 보인다. 평균중심기압처럼 1988~1991년 사이에 급격한 변화를 보이지 않지만, 최소중심기압 역시 두 시기 사이에 약 8 hPa의 차이를 나타낸다 (1965~1988년: 950.1 hPa, 1991~2007: 942.1 hPa). 중심최대풍속 역시 중심기압과 같은 변동경향을 보인다. 평균 중심최대풍속에서 1988년에 26.1 knots에서 1991년에는 66.3 knots까지 약 40 knots 정도 강해졌다. 따라서 1977~1988년 동안의 평균 중심최대풍속은 44.2 knots인 반면, 1991~2007년 동안의 평균 중심최대풍속은 54.8 knots로 두 시기 사이에는 약 10 knots의 차이를 보인다. 평균 중심최대풍속처럼 최대 중심최대풍속에서도 1988~1991년 사이에 중심최대풍속의 뚜렷한 증가를 나타낸다. 1977~1988년

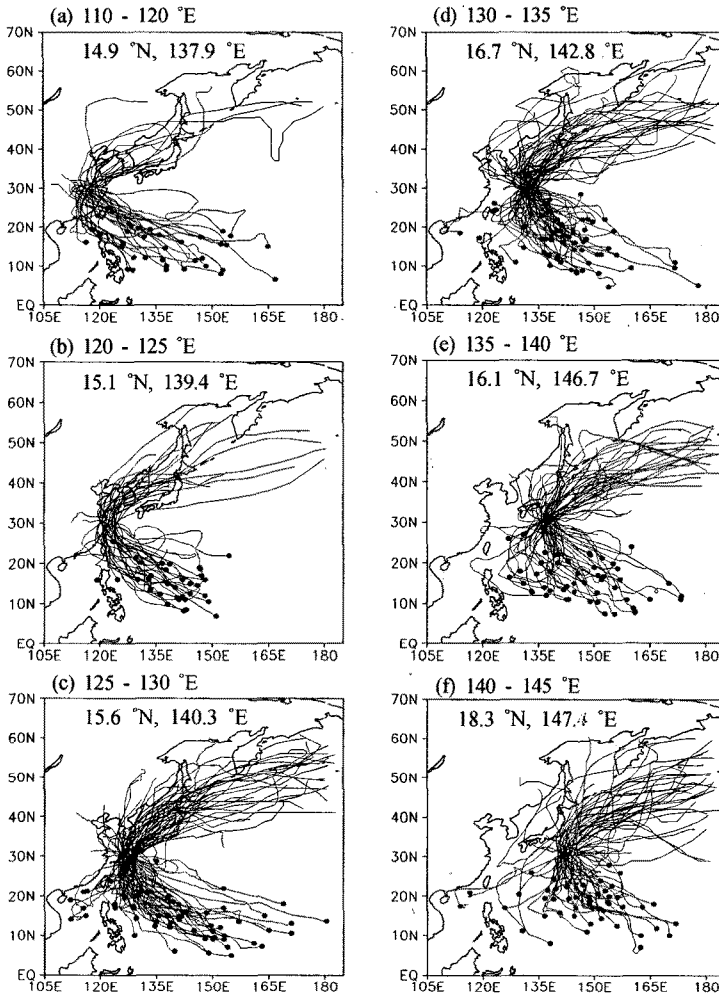


Fig. 3. TC tracks at a longitude in Fig. 1. Dots indicate TC genesis locations. Figures in an uppermost left corner denote an average of TC genesis location.

과 1991~2007년 사이의 평균 차 역시 약 10 knots이다 (1977~1988년: 77.5 knots, 1991~2007년: 85.0 knots). 따라서 위의 결과로부터 최근 동아시아 중위도로 북상하는 태풍의 강도는 강해지고 있음을 알 수 있다. 따라서 이후의 장에서는 최근 (1991~2007년: '91~'07이라 함)으로부터 이전 (1965~1988년: '65~'88이라 함)의 차가 분석된다.

4.2. 태풍 이동빈도

Fig. 5는 위·경도 5°×5° 내에서의 태풍 이동빈도에 대해 '91~'07 평균에서 '65~'88 평균의 차를 계산한 것이다. 따라서 닫힌 (열린) 원은 '91~'07 (65-88)에 더 많은 빈도를 보였다는 의미가 된다. '65~'88 동안에 태풍들은 주로 열대 서태평양의 서쪽

지역으로부터 남중국해 및 중국대륙으로 이동하는 경향이 강했음을 알 수 있다. 이들 지역 중, 남중국해에서 가장 높은 빈도를 보인다. 아열대 서태평양에서도 낮은 빈도를 보인다. '91~'07 동안에는 열대 서태평양의 동쪽지역으로부터 동중국해를 거쳐 한국 및 일본을 주로 경유하였음을 알 수 있다. 이들 지역 중 동중국해와 일본열도의 북쪽지역에서 가장 높은 빈도를 보인다. 이는 최근에 좀 더 강한 강도를 가진 태풍이 한국 및 일본에 내습하는 빈도가 높아졌음을 의미한다. 따라서 최근의 태풍들은 중국 대륙의 낮은 경유 빈도로 인해 30°N부근에서 강한 강도를 가지게 된 것으로 판단된다.

Fig. 6에서 이러한 태풍 경로의 변화경향을 7, 8,

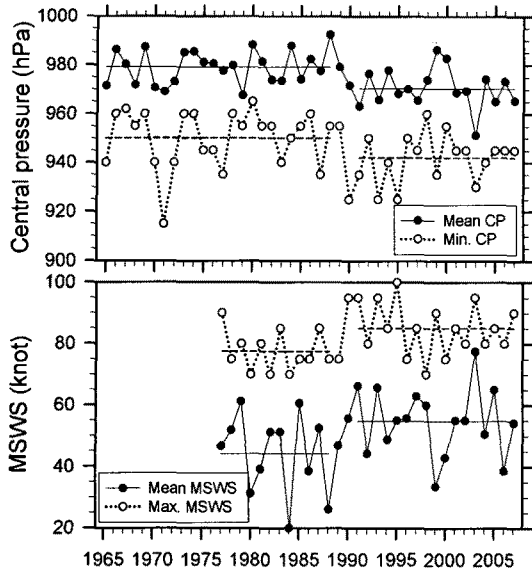


Fig. 4. Annual variations of mean (solid line with a closed circle) and minimum (dotted line with a open circle) CPs (upper) and mean (solid line with a closed circle) and maximum (dotted line with a open circle) MSWSs (lower) of TC near 30°N between 110° - 145°E. Solid and dotted lines denote period averages for '65~'88 ('77~'88 in the case of MSWS) and '91~'07, respectively.

9월 각 달에 대해 좀 더 자세히 분석하였다. 두 기간 사이에 태풍이 30°N 부근에 도착하기 전에 중국대륙을 경유하는 빈도는 7월에 가장 큰 차이를 나타낸다. '65~'88에는 36.2% (17/47)의 태풍들이 '91~'07에는 10.0% (3/30) 태풍들이 중국대륙을 경유하였다. 나머지 두 달에는 그리 큰 차이를 보이지 않는

다. 하지만 9월의 경우 '65~'88 동안에 중국대륙을 경유하는 태풍들은 '91~'07동안의 그것에 비해 훨씬 더 깊숙이 중국 내륙으로 들어감을 볼 수 있다. 하지만 '91~'07의 태풍들은 중국 동해안을 단지 스치는 정도에 불과하다.

이러한 세 달 동안의 두 시기 사이에 태풍 경로의 변동 특성은 30°N부근에서의 태풍의 강도에 반영된다. 두 시기 사이에 중국대륙 경유빈도의 차가 가장 컸던 7월에는 중심기압의 경우 두 시기 사이에 약 14 hPa의 차를 보이고, 중심최대풍속은 무려 약 22 knots의 차를 나타낸다(Fig. 7). 9월에는 7월보다는 큰 차이를 보이지 않았지만 중심기압은 7 hPa, 중심최대풍속은 8 knots의 차를 보인다. 하지만, 두 시기 사이에 경유빈도가 비슷했던 8월에는 강도 역시 큰 차를 보이지 않았다. 따라서 위의 결과로부터 동아시아 중위도 지역에서 태풍의 강도는 중국대륙의 경유유무와 연관이 있다는 것을 알 수 있다.

4.3. 종관 환경

두 시기 사이에 태풍 경로의 변화를 야기하는 종관 환경을 알아보기 위해 대류권 평균 바람, 지위고도 및 기온에 대해 두 시기 사이의 차를 분석하였다(Fig. 8). 먼저 대류권 평균 바람과 지위고도의 기후 평균에서는 30°N 부근에 아열대 고기압이 중국 내륙까지 뻗어 있는 것을 볼 수 있다. '91~'07과 '65~'88의 차에서는 분석영역의 대부분이 양의 값을 나타내어 최근에 지위고도 값이 더 높아졌음을 알 수 있다. 바이칼호 남쪽에 중심을 둔 고기압성 순환에 의해 동아시아 해안을 따라 북동풍이 강화되어 있

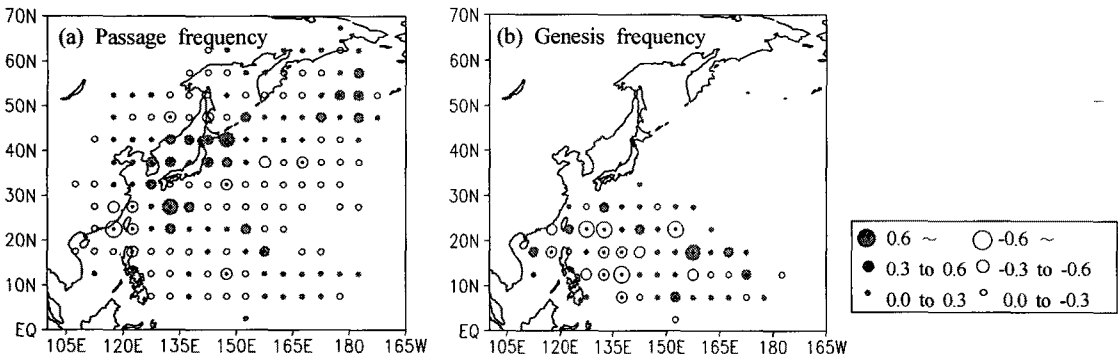


Fig. 5. Differences of (a) TC passage frequency and (b) genesis frequency between '65~'88 and '91~'07 in 5° x 5° latitude and longitude grid box.

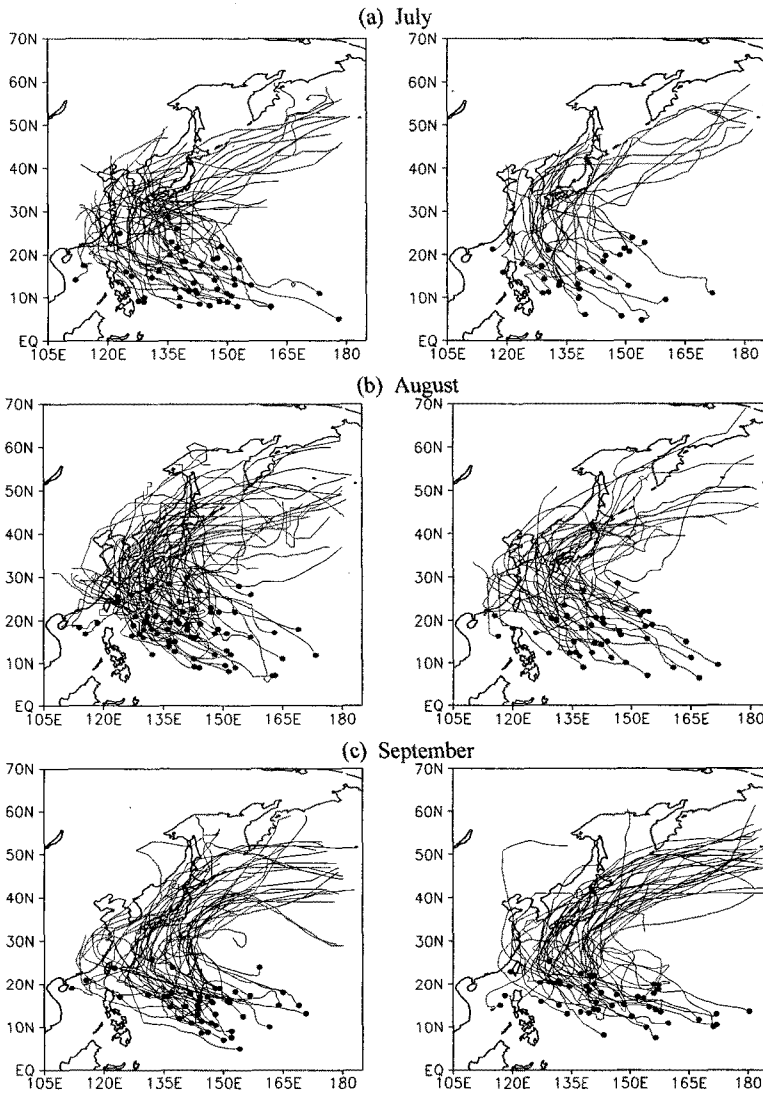


Fig. 6. TC tracks for '65~'88 (Left) and '91~'07 (right) in (a) July, (b) August, and (c) September. Dots denote a TC genesis location.

다. 반면에 이 고기압성 순환의 남동쪽, 즉 20°-30°N의 아열대 서태평양에서는 약한 저기압성 순환이 형성되어 있다. 따라서 '91~'07동안의 태풍은 동아시아 해안을 따라 강화된 북동풍 때문에 중국대륙에 상륙하기 힘들어지며, 대신에 아열대 서태평양에 강화된 저기압성 흐름을 따라 Fig. 5에서처럼 빈번한 태풍의 이동빈도의 경로를 따라 이동하게 됨을 알 수 있다.

200 hPa과 850 hPa 사이의 연직시어의 기후평균에서는 40°N를 따라 큰 연직시어가 형성되어 있다.

저위도에서는 인도차이나 부근지역에서 큰 값들이 존재한다. 여기서 큰 연직시어는 태풍의 형성 및 발달에 부정적인 역할을 함을 의미한다. 두 시기 사이의 차에서는 전체적으로 음의 값을 나타내는 축이 두 개 존재함을 볼 수 있다. 먼저 열대 서태평양의 동쪽지역으로부터 동중국해를 지나는 축 (solid line in a right panel in Fig. 9a)으로서 이는 Fig. 5에서 '91~'07의 기간에 태풍이 주로 이동하는 지역과 유사하다. 따라서 '91~'07동안의 태풍이 북상하는 동안에도 강한 강도를 유지할 수 있는 한 원인이 된다.

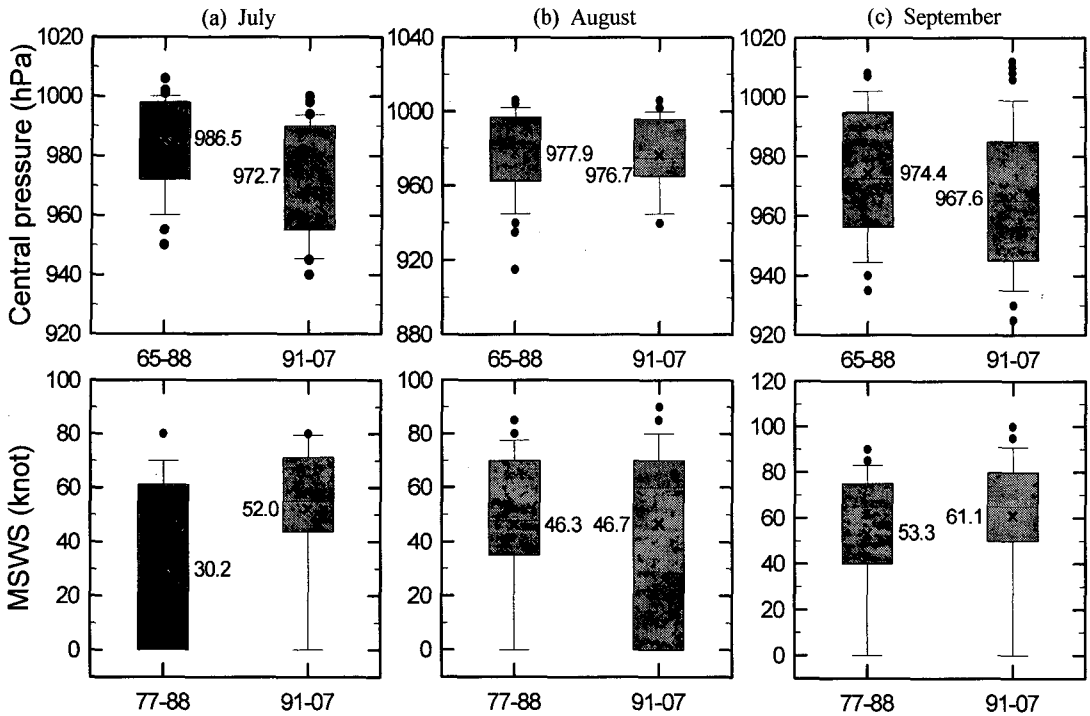


Fig. 7. TC CP (upper) and MSWS (lower) in (a) July, (b) August, and (c) September for '65~'88 ('77~'88 in the case of MSWS) and '91~'07. Mark 'x' denotes an average of TC CP for two periods.

두 번째는 남중국으로부터 일본 남쪽해상을 지나 북서태평양에 이르는 축이다. 기후평균에서는 중위도 지역에 강한 연직시어 밴드가 존재하였지만, '91~'07동안에는 비슷한 지역에 그 이전보다 약한 연직시어가 형성되어 있어 태풍이 중위도 부근으로 북상하여도 강한 강도를 유지할 수 있는 배경이 된다.

해수면 온도의 기후평균에서는 필리핀 동쪽해상에 warm pool이 형성되어 있다 (Fig. 9). 두 시기 사이의 차에서는 40°N 부근의 일부 지역을 제외하고 북서태평양의 대부분의 지역에서 '91~'07에 더 높은 해수면 온도를 나타낸다. 이는 '91~'07동안 태풍들의 강한 강도 유지에 간접적으로나마 도움이 되었을 것으로 판단된다.

4.4. 이전 봄의 징후

Fig. 9는 적설을 녹인 물의 깊이를 나타내는¹⁶⁾ 봄철 (March-May) 적설수상당량, 현열속 및 850 hPa 지위고도 및 바람에 대해 두 시기 사이의 차를 분석한 것이다. 먼저 적설수상당량에서는 동아시아의

많은 지역에서 '91~'07동안에 더 많음을 볼 수 있다 (Fig. 9a). 눈은 지표면의 열적 상태와 눈-알베도 및 눈-수자원적 효과를 통해 지표면 위 대기층에 상당한 영향을 미친다¹⁷⁾. 많은 양의 눈은 태양 복사의 반사에 의해 지표기온을 떨어뜨린다. 또한 눈으로 뒤덮인 지역에서는 좀 더 많은 태양복사가 눈을 녹이는데 소모되고, 동시에 눈이 녹은 지표는 좀 더 많은 지표 잠열속을 초래한다. 결국, 이러한 과정에 의해 변화된 지표기온은 국지적으로 또는 원격으로 대기 순환을 제어하게 된다. 본 연구에서도 '91~'07동안에 더 많았던 적설수상당량에 의해 동아시아의 많은 지역에서 이 시기에 음의 현열속을 나타내고 있다. 특히, 양의 적설수상당량과 음의 현열속 지역이 정확하게 일치함을 볼 수 있다. 이렇게 '91~'07의 시기에 더 많았던 눈으로부터 야기된 지표 냉각에 의해 동아시아 대륙의 하층에서는 고기압성 순환이 강화되고 대신에 해양에서는 저기압성 순환이 강화된 것을 볼 수 있다 (Fig. 9c). 해양의 저기압성 순환의 강화는 최근 아열대 고기압이 북쪽으로 발달하

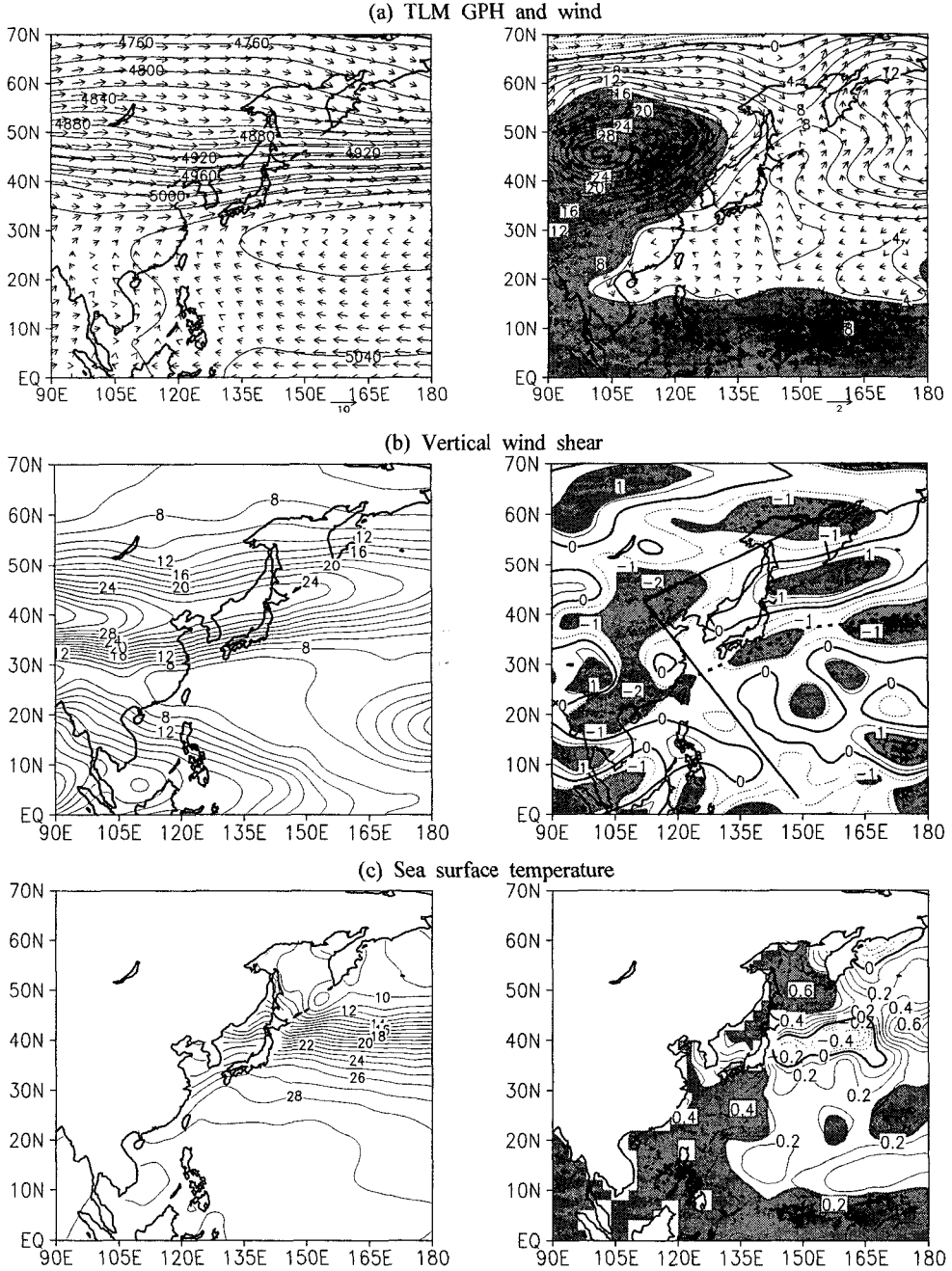


Fig. 8. A climatology (left) and a difference between '65~'88 and '91~'07 (right) on (a) Tropospheric layer mean geopotential height(TLM GPH) and wind, (b)vertical wind shear between 200 hPa and 850 hPa and (c) SST. Shaded areas denote regions greater than 95% confidence level.

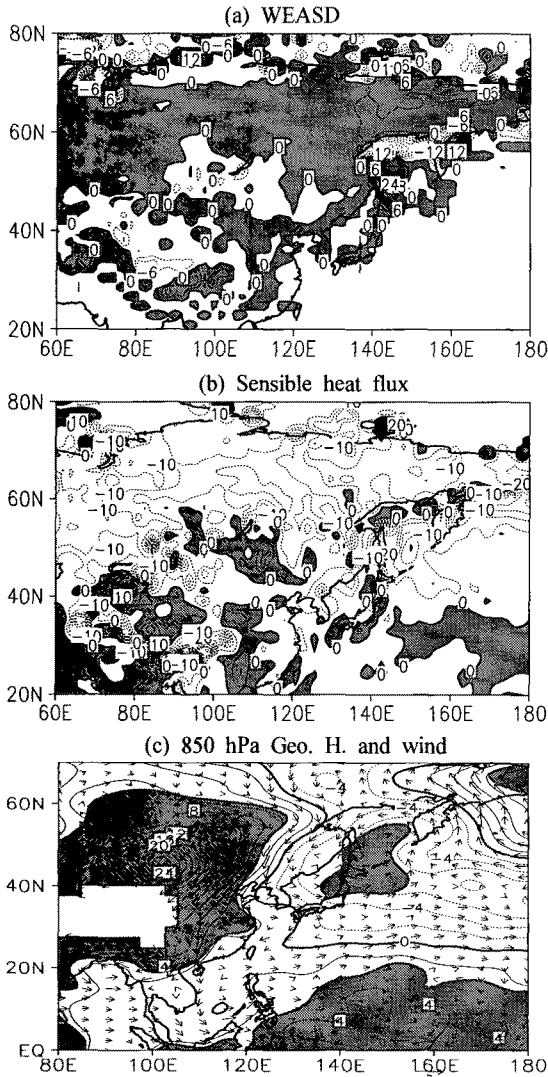


Fig. 9. Difference between '65~'88 and '91~'07 on (a) water equivalent of accumulated snow depth, (b) sensible heat flux, and (c) 850 hPa geopotential height and wind. Shaded areas denote positive regions for WEASD and for sensible heat flux and regions greater than 95% confidence level for 850 hPa geopotential height and wind. Contour intervals for WEASD, for sensible heat flux, and for 850 hPa geopotential height are 3 kg m^{-2} , W m^{-2} , and 3 gpm respectively.

지 못하였음을 의미한다. 이 결과는 Fig. 8에서 여름철 대류권 평균 바람에 대해 두 시기간의 차이의 공간패턴과 비슷하다. 이러한 서고-동저의 기압배치

는 동아시아 겨울철의 전형적인 기압패턴으로 태풍이 중국대륙으로 상륙하기 어려운 기압배치가 이미 봄부터 형성되어 있었음을 알 수 있다.

5. 한국 상륙 태풍

30°N에서의 태풍 강도 및 경로 특성이 동아시아 중위도에서도 지속되는지 알아보기 위해 한국에 상륙한 태풍들을 선택하여 30°N에서 중심기압 및 경도 위치와 상륙시 중심기압, 전체경로를 조사하였다 (Fig. 10). 30°N에서 및 상륙시 중심기압 모두 최근까지 낮아지고 있는 것을 볼 수 있다. 특히, 상륙시 중심기압은 1980년대 후반 이후로 급격하게 낮아지는 추세를 보인다. 30°N에서 '65~'88 평균 중심기압은 981.6 hPa인 반면, '91~'07 평균 중심기압은 970.1 hPa로서 약 11 hPa 차이를 보인다. 하지만 상륙시 두 시기 사이의 중심기압 차는 더 크다. '65~'88 평균은 991.9 hPa인 반면 '91~'07 평균은 975.7 hPa로서 약 16 hPa 차이를 보인다. 또한 30°N에서의 중심기압과 상륙시 중심기압 사이의 차는 '65~'88의 경우 약 10 hPa 차이를 보이는 반면, '91~'07 동안에는 단지 5 hPa밖에 차이를 보이지 않는다. 따라서 한국에 상륙하는 태풍의 강도는 최근 강해졌을 뿐만 아니라, 저위도에서의 태풍 강도의 특성이 중위도에서까지 이어지고 있음을 알 수 있다. 최근 이런 태풍 강도의 강화와 함께 30°N에서의 경도 위치도 점차 동쪽으로 이동하는 추세이다. 앞서 30°N에서 태풍의 강도가 가장 강한 경도대는 125° - 130°E이며, 이 경도의 서쪽에는 중국대륙이 위치함을 보았다. 한국 상륙 태풍의 경우, '65~'88 동안의 평균 경도 위치는 122.6°E인 반면, '91~'07 동안에는 126.2°E로 분석되어 최근 한국 상륙 태풍의 중국 대륙 경유빈도가 낮아짐으로 인해 상륙시 강한 강도를 나타내게 되었음을 알 수 있다. 이러한 한국 상륙 태풍의 경로 특성은 Figs. 10b와 10c에서 볼 수 있다. '65~'88 동안 한국에 상륙한 총 22개의 태풍들 중 9개 (40.9%)가 중국 대륙을 경유한 반면, 91-07 동안에는 총 18개의 태풍들 중 단지 3개 (16.7%)만이 중국대륙을 경유하였다. 또한 '65~'88 동안에는 태풍들이 주로 한국의 서해안에 상륙하는 반면, '91~'07 동안에는 남해안에 상륙하는 경향이 강하다. '65~'88 동안에 남해안에 상륙하는 태풍의 빈도는 3개인 반면

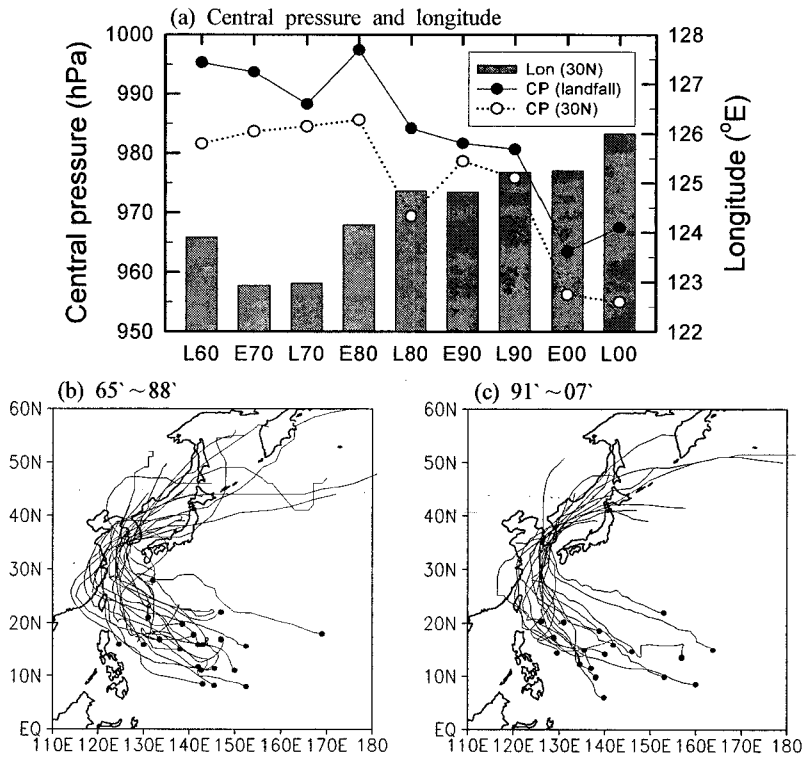


Fig. 10. (a) 5-year mean variations of CPs at landfall (solid line with a closed circle) and at 30 °N (dotted line with an open circle) and a longitude location near 30 °N and full tracks for (b) '65~'88 and (c) '91~'07 of Korean Peninsula landfalling TCs. Characters 'E' and 'L' in x-axis in (a) represent a 'early' and 'late', respectively.

'91~'07동안에는 10개의 태풍이 남해안에 상륙하였다. 따라서 한국 상륙태풍의 상륙 위치도 30 °E에서 경도 위치의 변화와 함께 점차 동쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

이 연구는 최근 43년 (1965~2007년)동안 태풍에 있어 동아시아 중위도 국가로의 진입 위치에 해당하는 30 °N, 110 ° - 145 °E에서 여름철 (July~September) 태풍들의 강도 변화를 분석하였다. 먼저 이 위치에서의 태풍 강도에 대한 기후분석에서는 최근 중국대륙에 해당하는 경도 (110 ° - 125 °E)를 경유하는 태풍의 강도 및 빈도는 각각 약화되고 변화 없는데 반해, 해양의 경도대 (125 ° - 145 °E)를 지나는 태풍 강도 및 빈도는 증가하는 추세를 나타냈다. 이는 태풍 경로가 최근 동쪽으로 이동되고 있음

을 반영하였다.

최근 43년 동안 태풍의 중심기압 및 중심최대풍속 모두 뚜렷한 십년 간 변동을 나타내었으며, 특히, 1988~1991년 사이에 태풍 강도의 급격한 변화를 보였다. 1991~2007년 ('91~'07)의 평균 중심기압은 1965~1988년 ('65~'88)의 평균보다 약 10 hPa 정도 낮았으며, 중심최대풍속 역시 전자의 기간이 후자의 기간보다 약 10 knots정도 강했다. 이는 최근에 동아시아 중위도 지역은 좀 더 강한 태풍의 영향을 받을 가능성이 높아졌음을 의미했다.

이러한 태풍 강도의 변화는 태풍 경로의 변화에 의해 야기되어 있음을 알 수 있었다. '65~'88동안의 태풍들은 주로 열대 서태평양의 서쪽지역으로부터 남중국해를 거쳐 중국대륙으로 경유하는 경향이 강했던 반면, '91~'07 동안의 태풍들은 열대 서태평양의 동쪽지역으로부터 동중국해를 거쳐 한국 및 일본으로 주로 이동하였다. 따라서 '91~'07동안 태풍

의 강한 강도는 '65~'88의 태풍들에 비해 중국대륙을 경유하는 빈도가 적었기 때문이었다. 두 시기 사이의 이러한 태풍 경로의 변화 경향은 7월과 9월에 뚜렷이 나타났다. 7월에 중국대륙을 경유하는 태풍의 빈도는 '91~'07 동안에 비해 '65~'88 동안이 6배나 많았다. 9월에는 비록 두 시기 사이에 중국대륙을 경유하는 빈도에서 큰 차이를 보이지 않았지만, '65~'88 동안에는 태풍이 중국내륙으로 깊숙이 이동한 반면, '91~'07에는 중국 동해안을 단지 스쳐가는 정도였다. 이러한 두 시기 사이에 태풍 경로의 월별 특성으로 인해 7월에 두 시기 사이의 강도 차이가 가장 컸으며, 8월에는 비슷한 강도를 나타내었다.

두 시기 사이에 이러한 태풍 강도 및 경로 차이를 유발하는 종관상태를 확인하기 위해 대류권 평균 바람을 분석하였다. '91~'07 동안에는 동아시아 대륙에 위치한 고기압성 순환으로부터 불어나온 북동풍이 동아시아 해안을 따라 강화되어 태풍이 중국 대륙으로 상륙하는 것을 막는 역할을 하였다. 대신, 동아시아의 아열대 해역에서 강화된 저기압성 순환에 의해 태풍은 열대 서태평양의 동쪽지역으로부터 동중국해를 거쳐 한국 및 일본으로 이동하기 쉬웠던 것으로 분석되었다. 또한 '91~'07 동안에는 '65~'88에 비해 태풍이 중위도 지역에서 강한 강도를 유지할 수 있는 환경이 이루어져 있었다. 200-850 hPa 연직시어에서는 중위도 지역과 '91~'07 동안의 태풍의 주 이동경로를 따라 낮은 연직 시어값이 형성되어 있었다. 게다가, 북서태평양 대부분의 지역에서 이 시기에 더 높은 해수면 온도의 상태를 나타내었다.

위와 같이 '91~'07 동안의 태풍 경로 및 강도의 특성을 야기하는 종관 환경은 이미 봄부터 형성되어 있음이 분석되었다. 봄에 동아시아 대륙에서는 눈이 '65~'88보다 많았으며, 눈에 의해 동아시아 대륙은 낮은 현열속을 나타내었다. 이에 따라 동아시아 대륙의 하층에서는 고기압성 순환, 해양에서는 저기압성 순환과 같은 서고-동저 형의 겨울철 기압 패턴이 형성되었다. 따라서 이전 봄 동안 동아시아 대륙에서의 눈의 상태로부터 여름철 동아시아 중위도 지역에서의 태풍 강도를 간단하게 예측할 수 있는 인자로서 활용 가능할 것으로 판단되었다.

실제로 30 °N에서 태풍 강도 및 진로의 특성이 중위도에서도 이어지는지를 알아보기 위해 43년 동안 한국에 상륙한 총 42개의 태풍들을 대상으로 이러한 특성을 분석하였다. 30 °N에서 뿐만 아니라 상륙시 태풍의 중심기압은 최근까지 급격하게 낮아지는 추세에 있었다. 특히, '91~'07에는 30 °N에서의 중심기압과 상륙시 중심기압 사이에 큰 변화를 보이지 않아 최근 저위도에서의 강한 태풍의 강도가 중위도에서도 유지되고 있음을 알 수 있었다. 또한 30 °N에서의 태풍 경로 위치는 최근에 동쪽으로 이동되는 추세를 나타내었으며, 이는 '91~'07 동안 태풍들의 중국대륙 경유 빈도가 더 낮은 것과 연관되었다. 이러한 전체경로의 변화경향에 의해 태풍의 한국 상륙 위치에도 변화를 나타내어 '65~'88에는 주로 서해안에, '91~'07에는 남해안에 상륙하는 경향을 보였다.

이 연구는 30 °N에서 110 ° - 145 °E의 경도대를 경유하는 태풍의 특성에 대해 조사하여 최근에 동아시아 중위도 국가에 영향을 주는 TC의 강도가 더 강해졌음을 보였다. 하지만 실제로 동아시아 중위도 국가에서 '91~'07시기가 '65~'88에 비해 태풍에 의한 인명 및 재산상의 피해가 더 컸는지는 살펴볼지 않았다. 따라서 차후연구에서는 동아시아 중위도 국가들에 있어서 두 시기 사이에 태풍에 의한 인명 및 재산 피해를 비교·분석 할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 주요사업 “기상기술 전략개발연구”와 목포대학교 내풍기술연구단을 통하여 지원된 국토해양부 지역특화연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) National Emergency Management Agency, 2005, 2005 disaster annual report, 619.
- 2) Korea Meteorological Administration, 2002, Analysis of the characteristic of the 15th typhoon "RUSA", 121.
- 3) Choi K. S. and B. J. Kim, 2007, Climatological characteristics of tropical cyclones making landfall over the Korean peninsula, Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 43, 97-109.

- 4) Kim J. H., C. H. Ho, M. H. Lee, J. H. Jeong and D. Chen, 2006, Large increase in heavy rainfall associated with tropical cyclone landfalls in Korea after the late 1970s, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18706, doi:10.1029/2006GL027430.
- 5) Chan J. C. L. and J. Shi, 1996, Long-Term Trends and Interannual Variability in Tropical Cyclone Activity over the Western North Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2765 - 2767.
- 6) Chu P. S. and J. D. Clark, 1999, Decadal variations of tropical cyclone activity over the central North Pacific, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 1875-1881.
- 7) Nitta T. and S. Yamada, 1989, Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 375-383.
- 8) Trenberth K. E., 1990, Recent Observed Interdecadal Climate Changes in the Northern Hemisphere, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 988-993.
- 9) Graham N. E., 1994, Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results, *Climate Dyn.*, 10, 135-162.
- 10) Mantua N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis, 1997, A Pacific interdecadal oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1069-1079.
- 11) Ho C. H., J. J. Baik, J. H. Kim and D. Y. Gong, 2004, Interdecadal changes in summertime typhoon tracks, *J. Climate*, 17, 1767-1776.
- 12) Kalnay E. and Coauthors, 1996, The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- 13) 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.
- 14) George J. E. and W. M. Gray, 1976, Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships, *J. Appl. Meteor.*, 15, 1252-1264.
- 15) Chan J. C. L. and W. M. Gray, 1982, Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships, *Mon. Weather Rev.*, 110, 1354-1374.
- 16) 김광식, 1992, *기상학사전*, 1판, 향문사, 457pp.
- 17) Barnett T. P., L. Dumenil, U. Schlese, E. Roeckner and M. Latif, 1989, The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations, *J. Atmos. Sci.*, 46, 661-686.