한반도에 영향을 주는 태풍의 접근 진단 지수 개발

최기선* · 김태룡

기상청 국가태풍센터, 699-948, 제주도 서귀포시 남원읍 한남리 1622-1

Development of a Diagnostic Index on the Approach of Typhoon Affecting Korean Peninsula

Ki-Seon Choi* and Tae-Ryong Kim

National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju 699-948, Korea

Abstract: This study has developed the index for diagnosis on possibility that typhoons (TYs) affect Korea. This index is closely related to the strength of the western North Pacific high (WNP), which is calculated as a difference in meridional wind between at the highest correlation area (around Korea) and at the lowest correlation area (sea southeast of Japan) through a correlation analysis between TC frequency that affects Korea and 500 hPa meridional wind. In low frequency years that selected from Korea affecting TC index, anomalous northeasterly is strengthened from Korea to the South China Sea because the center of anomalous anticyclonic circulation is located to northwest of Korea. Thus, TCs tend to move westward from the sea east of the Philippines to the mainland China. On the other hand, in high frequency years, anomalous southwesterly serves as steering flow that more TCs move toward Korea because the center of anomalous anticyclonic circulation is located to sea east of Japan. Consequently, this study suggests that if this index is calculated using real time 500 hPa meridional winds that forecasted by dynamic models during the movement of TCs, the possibility that TCs approach Korea can be diagnosed in real time.

Keywords: Typhoon, western North Pacific high, correlation analysis

요약: 이 연구는 우리나라 영향 태풍을 먼저 분류하고, 이후 경유하게 될 가능성을 진단하는 지수를 개발하였다. 우리나라 영향 태풍의 접근 진단 지수는 여름철에 북서태평양 고기압의 서쪽 가장자리의 발달강도를 표현하는 지수로서, 우리나라 영향 태풍의 빈도와 남북류 (500-hPa)의 강도사이의 상관관계에서 나타나는 양의 최대 상관지역(우리나라 부근)과 음의 최대 상관지역(일본 남동쪽 해상)간의 남북류의 속도 차이로 계산된다. 우리나라 영향 태풍 진단 지수로 추출된 우리나라 영향 태풍의 저빈도 해에는, 고기압성 순환 아노말리의 중심이 우리나라 북서쪽에 위치하기 때문에 우리나라로부터 중국 동해안과 남중국해까지 북동류의 성분이 강화되고, 태풍은 이에 따라 필리핀 동쪽해상으로부터 중국 동해안 및 중국내륙 쪽으로 서편하는 경향을 보였다. 반면에 고빈도 해에는 고기압성 순환 아노말리의 중심이 일본 동쪽 해상에 위치하기 때문에 동중국해 및 우리나라, 일본에서 유도된 남서풍이 더 많은 태풍을 우리나라 영역으로 접근시켰다. 결과적으로 태풍의 북상 동안 역학모델로부터 실시간으로 예측된 500 hPa 남북류를 이용하여 이 지수를 산출하면 태풍의 우리나라 접근 가능성을 진단할 수 있음을 이 연구는 제안한다.

주요어: 태풍, 북서태평양 고기압, 상관분석

서론

많은 연구들은 모든 해역 및 각 해역에서의 태풍 활동을 진단하고 예측하기 위한 지수 및 요소

(parameter)를 개발해왔다. 먼저 모든 해역에서 적용 가능한 지수들에 대해서 Emanuel(1986, 1987, 2005)과 Bell et al.(2000)은 태풍 강도를 정량화 하고 태풍활동에서 기후 시그널을 찾기 위한 Accumulated Cyclone Energy(ACE), Power Dissipation Index(PDI), and Maximum potential intensity(MPI)을 개발하였다.

*Corresponding author: choiks@kma.go.kr
Tel: +82-64-801-0230
Fax: +82-64-805-0366

대서양에서의 태풍활동 및 예측 인자들에 대해서 Gray(1977)과 Gray(1979)는 다양한 대기 요소들의 조합을 통해 태풍발생에 대한 기후학적 요소를 발견하였다: (i) 하층 상대와도, (ii) 코리올리 매개변수, (iii) 연직시어, (iv) 해양 열 용량, (v) 중하층 습윤불안정, (vi) 중층 상대습도. 그들은 이 요소와 개선된 요소를 사용하여 예측된 대서양 허리케인 활동자료를 매년 제공하였다(Gray et al., 1992a; Gray et al., 1993; Gray et al., 1994; Klotzbach and Gray, 2004). 또한 그들은 이전에 12월까지의 기후요소를 사용하여 대서양 허리케인 활동을 예측하는데 상당히 성공적이었음을 증명하였다. Landsea et al.(1999)은 카리브 해 지역에서의 해면기압과 200 hPa 동서류, 준 2년 진동(Quasi-Biennial Oscillation, QBO), 엘니뇨-남방진동(El Nino-Southern Oscillation, ENSO), 아프리카 서쪽의 사헬 강우량, 대서양 해수면 온도와 같은 대기-해양 환경요소들과 대서양 허리케인 활동과의 상관성을 분석한 뒤, 모든 환경요소들이 대서양 허리케인의 빈도, 강도, 지속기간과 상당한 연관성이 있음을 보였다. 좀 더 최근에 Klotzbach and Gray (2006)는 U.S. landfall parameter(LP)의 지수를 개발한 뒤 지금까지 가장 강력하고 파괴적인 대서양 허리케인 활동의 해인 2004년의 사례에 이 지수를 적용하여 이 지수가 2004년의 대서양 허리케인 활동을 잘 반영하였음을 증명하였다. Sall et al.(2007)은 강한 태풍과 약한 태풍의 구별하는데 925 hPa 연직속도와 700 hPa 잠재와도가 가장 좋은 대기요소 임을 제안하였다. 또한 태풍의 강도 및 진로 예측을 위해 개발된 통계적 회귀 모델에서 많은 요소 및 예측 인자들이(CLIPER, 종관 예측인자, 동적 및 열적 예측인자 등) 사용되고 있다(Neumann, 1972; Neumann and Randrianarison, 1976; Leftwich and Neumann, 1977; Neumann and Mandal, 1978; Xu and Neumann, 1985; Fraedrich and Leslie, 1989; Aberson, 1998; DeMaria and Kaplan, 1999; Morison, 2000).

한편, 북서태평양 해역에서의 태풍 발생빈도는 매년 전지구적으로 발생하는 태풍의 30%를 차지하고 있다. 발생태풍들 중 최소 3개에서 많게는 10개의 태풍들이 동아시아의 중위도 지역에 매년 영향을 주고 있다. 그러나 북서태평양 태풍활동을 예측하고 진단하기 위한 지수 및 요소들은 대서양에 비해 상대적으로 적은 편이다. Harr and Elsberry(1991)는 먼저

태풍 진로의 형태를 군집 분류한 뒤, 형태별 기후학적 요소 및 700 hPa 동서류와 같은 인자들을 태풍 진로를 예측하는데 사용하였다. Fogarty et al.(2006)는 매년 중국 상륙 태풍활동의 패턴을 반영하는 태풍의 중국 상륙 지수(China landfalling index, LI)를 태풍 상륙빈도와 기후 인자들과의 상관분석을 통해 개발하였다.

북서태평양에서 태풍 활동에 대한 이러한 모든 상황을 고려해볼 때, 동아시아 각 지역에서 태풍 활동을 예측하고 진단하기 위한 지수 및 요소들이 개발되어야 함은 필수 불가결한 사실이다. 그러므로 이 연구는 먼저 태풍의 이동 동안 우리나라에 영향을 줄 가능성을 진단할 수 있는 실시간 지수를 개발한다. 우리나라 상륙 및 영향태풍에 관하여 Choi et al. (2010a)은 우리나라 상륙 및 영향 태풍의 빈도가 크게 세 기간(1951-1965, 1966-1985, 1986-2004)으로 나누어지며, 상륙진로는 최근 동쪽으로 이동하는 추세에 있음을 보인바 있다. Choi et al.(2009b)는 이전 봄 동안 인도 부근에서의 상층 티벳고기압이 이러한 우리나라 상륙 및 영향 태풍의 특성을 잘 반영함과 동시에 여름 태풍의 빈도와 양의 상관관계가 있음을 발견하고 이 인자를 이용하여 통계모델을 개발하였다. 또한 Choi et al.(2009b)과 Choi and Kim(2010b)는 우리나라 상륙태풍의 빈도와 북극진동(Arctic Oscillation)과 양의 상관관계에 있음을 보였다. 이외에 ENSO 등 다양한 요소들과 우리나라 상륙 및 영향태풍과의 관계에 대해 연구되었다 (Choi and Kim, 2007a; Choi et al., 2009a). 하지만 위의 인자들은 우리나라 상륙 및 영향태풍의 계절예측에만 적용될 수 있다는 한계가 있다.

2장에서는 자료 및 분석방법이 소개되고, 3장에서는 우리나라 영향 태풍의 빈도와 500 hPa 남북류와의 상관분석이 이루어진다. 4장에서는 우리나라 영향 태풍 진단 지수를 정의하고 5장에서는 높은 지수의 해와 낮은 지수의 해 사이의 차가 분석된다. 6장에서는 사례분석 및 실시간 태풍의 영향 진단 지수를 위한 제안이 이루어지며, 7장에서 이 연구의 결과가 요약된다.

자료 및 분석방법

태풍 활동에 대한 정보는 일본 동경에 위치한 지역특별기상센터(Regional Specialized Meteorological

Centers-Tokyo Typhoon Center)로부터 구할 수 있다. 이 자료는 태풍의 이름, 위경도 위치, 최소 중심기압, 중심 최대풍속 등의 변수가 6시간 간격으로 구성되어 있다. 태풍은 일반적으로 중심 최대풍속을 기준으로 다음과 같이 4 강도로 분류된다: 열대 저기압(tropical depression, $MSWS < 34$ kts), 열대 폭풍(tropical storm, $34 \text{ kts} \leq MSWS \leq 47$ kts), 강한 열대 폭풍(Severe tropical storm, $48 \text{ kts} \leq MSWS \leq 63$ kts), 태풍(typhoon, $MSWS \geq 64$ kts). 이 연구에서의 '태풍'은 4 강도의 모든 열대 저기압을 포함하는 의미로 사용된다. 현재 연구는 이 네 강도의 태풍 외에 태풍에서 변형된 온대저기압(extratropical cyclone)도 분석에 포함되는데, 이는 이 온대저기압도 동아시아의 중위도 지역에 상당한 피해를 입히기 때문이다.

이 연구는 지위고도(geopotential height), 동서 바람 등의 변수를 포함하는 National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research(NCEP-NCAR) 재분석 자료를 사용한다(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001). 이 자료는 위경도 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 의 격자간격 및 연직 17층과 같은 공간해상도로 구성되어 있으며, 1948년부터 현재까지 이용 가능하다. 또한 NOAA Extended Reconstructed monthly Sea Surface Temperature 자료가 사용되었는데, 이 자료는 위경도 $2^\circ \times 2^\circ$ 및 1854년부터 현재까지의 월 평균과 같은 시공간적 해상도로 구성되어 있다.

북서태평양에서 발생하는 태풍의 약 60%가 7-9월에 분포되며(e.g., Chia and Ropelewski, 2002), 따라서 현재 연구는 이 세 달을 여름으로 정의한다.

이 연구는 태풍 이동빈도를 구하기 위해 $5^\circ \times 5^\circ$ 의 격자간격마다 태풍의 이동빈도를 계산하였다. 여기서, 태풍이 같은 격자를 여러 번 이동하더라도 단 한번 이동한 것으로 간주하였다. 또한 기후학적 평균은 최근 57년(1951-2007년)동안의 평균을 의미한다.

이 연구에서의 우리나라 영향 태풍은 Fig. 3a에서 묘사된 것처럼 $32^\circ\text{--}40^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{--}138^\circ\text{E}$ 의 영역을 통과한 7, 8, 9월 태풍으로 정의된다(KMA, 1996).

우리나라 영향 태풍의 빈도와 500 hPa 남북류와의 상관분석

북서태평양에서의 태풍은 일반적으로 북서태평양 고기압의 서쪽 가장 자리를 따라 북상하는 특성이

Fig. 1. Correlation map between frequency of TYphoon Passing Korean area (TYPAK) and 500 hPa meridional wind anomaly during the boreal summer for the period 1951-2007. Shades indicate areas where the student's t-test is significant at the 99% confidence level. Left and right dots denote the centers of positive correlation position (PCP) and the negative correlation position (NCP) in this area, respectively. Contour interval is 0.1.

있다. 따라서 북서태평양 고기압의 남북 및 동서로의 발달 정도가 태풍의 이동변화에 있어서 상당히 중요하다. 우리나라 영향 태풍의 빈도 역시 북서태평양 고기압과 연관될 것이라고 판단하고 두 변수 사이의 상관관계를 분석하였다.

Figure 1은 57년 동안 여름철 우리나라 영향 태풍의 빈도 아노말리와 같은 달 평균 500 hPa 남북류 아노말리와의 상관도를 나타낸 것이다. 우리나라 부근에는 양의 최대 상관지점(positive correlation position, PCP: 32.5°N , 132.5°E)이, 일본 동쪽 해상에 음의 최대상관지점(negative correlation position, NCP: 32.5°N , 152.5°E)이 위치해 있다. 두 지점에서의 남북류 아노말리와 우리나라 영향 태풍 빈도와의 상관계수는 약 ± 0.5 이상의 값을 가진다(95% 신뢰수준에서 유의함). 이는 PCP에 남풍이, NCP에 북풍이, 즉 두 지점 사이에 시계방향(고기압성) 순환 아노말리가 강화될수록 우리나라 영향 태풍의 빈도가 증가함을 의미한다. 또한 태풍의 북상 동안 우리나라 주변에서 강화된 이러한 고기압성 순환은 우리나라로의 태풍 접근을 용이하게 할 수 있다. 따라서 두 지점 각각에서의 여름 평균 남북류 아노말리와 우리나라 영향 태풍 빈도 아노말리와의 시계열을 분석하였다(Figs. 2a and 2b). 두 상관지점에서 두 변수 사이의

Fig. 2. Time series standardized by the standard deviation of monthly (July-September) time series from the 57 years for (a) TROPAK frequency and highest positive correlation position (PCP) and for (b) TROPAK frequency and highest negative correlation position (NCP) in Fig. 1, and for (c) TROPAK and correlation coefficient difference between PCP and NCP.

매년 값은 다소 차이를 나타내나, 전체적인 변동 패턴은 대체로 일치하고 있음을 볼 수 있다.

사실, 여름철 우리나라 영향 태풍의 빈도는 지위고도 및 동서류의 인자와도 상관관계가 분석되었다(그림 미제시). 두 인자 모두 일본 남동쪽 해역에서 북서태평양 고기압과 연관되는 상관관계가 분석되었지만, 남북류 인자와의 상관관계보다 높지 않게 나타나 이 연구에서 우리나라 영향 태풍 진단 지수로 500 hPa 남북류를 사용하게 되었다.

우리나라 영향 태풍 진단 지수의 정의

앞서 우리나라 영향 태풍의 빈도는 우리나라 동쪽

에서의 고기압성 순환 아노말리의 강도와 연관될 것으로 판단하였다. 이 고기압성 순환 아노말리의 강도는 PCP에서 NCP사이의 남북류 아노말리의 차로 고려될 수 있다. 즉, PCP에서 남풍의 아노말리(양의 남북류)가 강화되고, 동시에 NCP에서 북풍의 아노말리(음의 남북류)가 강화되어, 이 둘 사이의 남북류 아노말리 차가 커지게 되면 고기압성 순환의 강도는 강화된다. 따라서, 이런 순환이 형성되면 우리나라 영향 태풍의 빈도도 증가될 수 있다. 이 연구는 두 변수 사이에 형성되는 우리나라 주변에서의 이와 같은 순환특성을 이용하여 우리나라 영향 태풍 가능성을 진단할 수 있는 지수를 산출하였다. 즉, 아래 식과 같이 Fig. 1에서 최대 양의 상관 지점인 PCP에서 최대 음의 상관 지점인 NCP사이에 500 hPa 남북류 아노말리의 차로부터 산출된다.

$$\text{Korea-Influence TC index} = \text{vwnd500}_{\text{ano}}(32.5\text{N}, 132.5\text{N}) - \text{vwnd500}_{\text{ano}}(32.5\text{N}, 152.5\text{E})$$

비록 이 지수는 우리나라 영향 태풍의 빈도를 이용하여 산출된 것이지만, 태풍의 북상 동안 북서태평양 고기압의 변동에 따라 태풍의 우리나라 영향 가능성을 진단할 수 있는 지수로서도 사용될 수 있다. 즉, 태풍의 발생 후부터 태풍의 우리나라 영향 가능성을 산출하는데, 만약 지수가 커진다면 이 태풍의 우리나라로의 접근 가능성이 커진다는 것을 의미하므로 태풍에 대처할 준비를 미리 할 수 있을 것이다.

이후 이 식으로부터 구해진 57년 동안의 우리나라 영향 태풍 진단 지수와 우리나라 영향 태풍 빈도 아노말리와의 시계열을 비교하였다(Fig. 2c). 57년 동안 두 변수 사이에는 0.61의 강한 양의 상관을 보인다(95% 신뢰수준에서 유의함). 이 상관계수는 각 지점에서의 두 아노말리 사이의 상관관계보다 높아 우리나라 영향 태풍 진단 지수가 우리나라 영향 태풍 빈도 아노말리의 크고 낮은 변동 경향을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

이후 이 지수의 타당성을 확인하기 위해, 우리나라 영향 태풍 진단 지수의 시계열로부터 57년 중 최대 양의 값(최대 영향 빈도)을 갖는 17년과 최소 음의 값(최소 영향 빈도)을 갖는 17년(선택된 34년은 총 57년 분석기간의 2/3를 차지함)을 각각 선택하여 우리나라 영향 태풍의 빈도, 경로, 강도 및 종관 대기 환경 등에 대한 두 시기 사이의 차가 분석된다.

Fig. 3. Monthly TROPAC frequencies for 17 high frequency years (HF year) and 17 low frequency years (LF year) selected from the PCP-NCP time series in Fig. 2c.

높은 지수의 해와 낮은 지수의 해 사이의 차

우리나라 영향 태풍 빈도

Figure 3은 우리나라 영향 태풍 진단 지수로부터 선택된 높은 영향 빈도의 17년(다빈도 해)과 낮은 영향 빈도의 17년(저빈도 해)에 대해 여름 동안 우리나라 영향 태풍의 빈도를 각각 조사한 것이다. 두 기간 사이의 가장 큰 빈도차는 8월에 나타난다. 이것은 우리나라 영향 태풍의 빈도가 기후적으로 8월에 가장 높으며, 저빈도 해에는 세 달 동안 큰 차이 없이 18개 이하의 낮은 영향빈도를 보이기 때문이다. 결과적으로 세 달의 총 빈도는 고빈도 해가 저빈도 해보다 약 두 배 높다.

종관 환경

두 시기 사이에 이러한 우리나라 영향 태풍 빈도 차의 원인은 500 hPa 순환 아노말리로부터 찾을 수 있다(Fig. 4). 전체적으로 두 시기 사이에 종관 규모의 대기 순환은 반대패턴을 나타낸다. 특히, 주목해야 될 부분은 두 시기에 일본 남쪽해상에 위치해 있는 순환 아노말리이다. 고빈도 해에는 이 지역에 고기압성 순환 아노말리가 위치하고 그 왼쪽에는 저기압성 순환 아노말리가 위치함으로 인해 PCP에는 남풍의 아노말리가 강화되어 태풍이 우리나라로 쉽게 이동할 수 있는 환경이 조성되어 있다. 또한 이 고기압성 순환의 오른쪽에도 저기압성 순환이 위치하여 NCP에 북풍의 아노말리가 탁월하다. 이러한 종관 규

(a) HF year

(b) LF year

Fig. 4. 500-hPa wind and geopotential height anomalies for (a) HF year and (b) LF year selected from the PCP-NCP time series in Fig. 2c. Solid box represents the TROPAC area (32°-40°N, 120°-138°E). Shadings indicate areas where the student's t-test is significant at the 95% confidence level. Contour interval is 2 gpm. Left and right dots denote the PCP and the NCP in Fig. 1, respectively.

모의 대기 순환은 앞서 우리나라 영향 태풍 진단 지수의 정의시, 두 최대 상관지점 사이에 고기압성 순환이 강화되면 태풍의 우리나라 영향 빈도가 증가할 것이라는 가정과 일치하는 결과이다. 또한 이러한 고빈도 해의 특성은 비록 대서양 허리케인에 관한 연구 결과이지만, Klotzbach and Gray(2006)의 연구에서 2004년 여름 동안 미국 동부에 비정상적으로 허리케인의 상륙 빈도가 높았던 원인이 되는 종관 규모의 환경과도 정확하게 일치한다. 한편 저빈도 해에는 같은 지역에 반대의 순환 아노말리가 강화되어

Fig. 5. Distribution of frequency difference greater 5880 gpm between HF year and LF year for all three months within each $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ latitude-longitude grid box. Small solid circle indicates that the differences are significant at the 95% confidence level. Solid and dashed contours represent 5880 gpm contours averaged for HF year and LH year selected from the PCP-NCP time series in Fig. 2c, respectively.

PCP에 북풍, NCP에는 남풍의 아노말리가 탁월한 것을 볼 수 있다. 저빈도 해 동안의 이런 종관 규모 환경의 특성은 태풍의 우리나라 접근을 어렵게 할 수 있다.

한편, 고빈도 해에 일본 남쪽해상에 위치해 있는 이 고기압성 순환 아노말리는 북서태평양 고기압의 발달과 관련이 있을 것으로 판단된다. 이를 알아보기 위하여 위경도 2.5° 의 격자마다 5880 gpm 이상의 값을 가지는 빈도에 대해 고빈도 해에서 저빈도 해 사이의 평균차를 계산하였다(Fig. 5). 여기서, 5880 gpm 이상의 값을 가지는 영역을 북서태평양 고기압의 영역으로 정의하였다. Figure 4a에서 고빈도 해에 고기압성 아노말리가 위치해 있는 지역에 높은 양의 빈도가 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 그러나 저빈도 해에는 그 영역의 북동쪽에 더 높은 음의 빈도를 나타낸다. 이는 고빈도 해 동안의 북서태평양 고기압이 서쪽으로 더 발달하였음을 의미한다. 이러한 특징은 고빈도 해(solid line)와 저빈도 해(dashed line) 평균 5880 gpm 등고선의 서쪽으로의 발달 정도에서 정확하게 구분된다. 그러므로 고빈도 해 동안 북서태평양 고기압의 서쪽으로의 발달은 그 기간 동안 우리나라 영향 태풍의 높은 빈도를 야기하는 가장 큰 원인이 됨을 알 수 있다.

태풍 이동 빈도

일반적으로 태풍은 북서태평양 고기압 서쪽 연변의

Fig. 6. TROPAC passage frequency difference between HF year and LF year selected from the PCP-NCP time series in Fig. 2c for all three months within each $5^\circ \times 5^\circ$ latitude-longitude grid box. Small solid circle indicates that the differences are significant at the 95% confidence level. Legend is the same one as in Fig. 5.

지향류를 따라 이동하는 경향이 있음을 앞서 언급하였다. 따라서 이 연구에서 보여진 두 시기 사이에 북서태평양 고기압의 서쪽으로의 발달 차가 우리나라 영향 태풍의 이동경로에서도 차이를 야기할 수 있다. 이를 알아보기 위해, 두 시기 사이에 위경도 5° 의 격자마다 우리나라 영향 태풍의 평균 이동빈도 차를 조사하였다(Fig. 6). 저빈도 해에 우리나라 영향 태풍은 필리핀 동쪽 해상으로부터 중국 동해안 및 중국 내륙을 따라 이동하는 빈도가 높은 반면, 고빈도 해에는 저빈도 해의 주 경로보다 더 동쪽에서 이동하는 경향을 보인다. 즉, 동아시아의 중위도에서 중국 보다는 우리나라와 일본에서 더 높은 빈도를 나타낸다. 두 시기 사이에 이러한 이동경로 차의 원인은 Fig. 4에서 찾아 볼 수 있다. 즉, 저빈도 해 동안 우리나라 북서쪽에 중심을 둔 고기압성 순환 아노말리로부터의 북동풍 및 동풍이 우리나라로부터 중국 내륙으로 향하고 있으며, 일부는 남중국해 및 인도차이나 반도까지 남하하고 있다. 이러한 저빈도 해에 동풍류 아노말리의 흐름이 고빈도 해의 우리나라 영향 태풍보다 더 서쪽에서 빈번하게 이동하게 하는 원인이 된다. 게다가 Fig. 5에서 저빈도 해 동안 비록 낮은 값이지만 북서태평양 고기압이 110°E 까지 확장한 것을 볼 수 있다. 이것이 저빈도 해의 우리나라 영향 태풍이 더 서쪽에서 이동했다는 다른 증거가 될 수 있다.

Fig. 7. Histogram of Total lifetime (black bar) and tropical storm (TS; gray bar) days of TROPAC for HF year and LF year selected from the PCP-NCP time series in Fig. 2c.

태풍 강도

Choi and Kim(2007b)은 우리나라 영향 태풍의 우리나라 상륙시 그것의 강도를 결정짓는 주요 원인 중의 하나로 우리나라 영향 태풍의 이동 동안 중국 대륙의 경유여부에 있다고 지적한 바 있다. 본 연구의 Fig. 6에서도 저빈도 해의 우리나라 영향 태풍들이 중국대륙을 경유하는 빈도가 더 높았음을 살펴볼 수 있다. 따라서 저빈도 해의 우리나라 영향 태풍들이 고빈도 해의 그것들보다 강도가 더 약할 수 있다.

이를 확인하기 위하여, 두 기간 동안 7, 8, 9월 및 세 달 평균 우리나라 영향 태풍의 수명과 우리나라 영향 태풍이 열대 폭풍 이상의 강도를 유지한 날(TS-day)을 분석하였다(Fig. 7). 전체적으로, 모든 달에서 고빈도 해의 우리나라 영향 태풍들이 저빈도 해의 그것들보다 수명이 긴 것을 확인할 수 있다. 또한, 두 기간 사이의 우리나라 영향 태풍의 우리나라 영향 빈도 차에서처럼, 고빈도 해에 태풍의 수명은 8월이 가장 긴 반면, 저빈도 해에는 세 달 사이에 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서, 평균적으로는 고빈도 해에 우리나라 영향 태풍들이 약 2일 수명이 더 지속되었다. 한편 두 기간 사이의 큰 차이는 TS-day에서 나타난다. 즉, 고빈도 해의 TS-day는 저빈도 해의 그것보다 약 3일 정도 더 지속되었다. 이는 수명의 차에서 보인 결과(2일) 보다 크다.

이러한 차이로 인해 고빈도 해 동안의 우리나라 영향 태풍들은 수명 중 약 60% 동안을 열대 폭풍 이상의 강도로 지내왔지만, 저빈도 해의 그것들은 단지 45% 동안 열대 폭풍 이상의 강도를 유지하였다. 이 연구에 제시하지 않았지만, 이는 많은 우리나라 영향 태풍들이 남중국에 상륙해서 온대성 저기압으로 약화되었기 때문이었다.

Fig. 8. SST difference between HF year and LF year selected from the PCP-NCP time series in Figure 2c. Shades indicate areas where the student's t-test is significant at the 95% confidence level. Contour interval is 0.1°C.

이런 두 기간 사이의 우리나라 영향 태풍 강도 차이의 원인은 해수면 온도의 분석에서도 확인할 수 있다. Figure 8은 고빈도 해와 저빈도 해 사이의 해수면 온도차를 나타낸 것이다. 전체적으로 북서 태평양에서는 고빈도 해에 더 높은 해수면 온도를 나타낸다. 또한 30°N 이남에서는 Fig. 6에서 우리나라 영향 태풍의 경로에 해당하는 지역을 따라 양의 해수면 온도 아노말리를 나타내고 있다. 이것은 고빈도 해에 우리나라 영향 태풍들이 우리나라 부근으로 북상하는 동안 저빈도 해의 태풍들보다 더 강한 강도를 유지할 수 있도록 에너지를 제공해 줄 수 있는 좋은 환경이 갖추어져 있음을 의미한다. 특히, 우리나라 근처를 포함한 동아시아의 중위도 지역에 형성되어 있는 높은 양의 해수면 온도 아노말리는 Fig. 7에서 분석되었듯이 고빈도 해의 우리나라 영향 태풍

Fig. 9. Time series of Korean Typhoon Passage Index (KOTYPI) on KPTs for JAS in 2007 (left panel) and full track of each TC case (right panel). In the left panel, “0” time denotes the time when TC maximally approaches in the KPT area. In the right panel, solid line box means the Korean peninsula-affecting-TC (KPT) area. Shading indicates the area greater than 5880 gpm.

Fig. 10. Same as in Fig. 9, except for non-KPT.

들이 동아시아 중위도 지역으로 북상한 후에도 강한 강도를 유지할 수 있는 가능성을 제공한다.

사례분석 및 진단을 위한 제안

사례분석

지금까지, 태풍의 우리나라 영향 가능성 진단 지수의 정의 및 이 지수의 높고 낮음에 따른 여러 가지

특성을 살펴보았다. 이 장에서는 태풍의 북상 동안 이 지수가 태풍의 우리나라 영향 가능성을 진단 할 수 있는지를 알아보기 위해, 2007년 7, 8, 9월 달 동안 실제로 한반도에 영향을 준 태풍(Fig. 9)과 그렇지 않은 태풍(Fig. 10)에 적용하여 사례분석을 해본다. 여기서, 지수산출의 편리성을 위하여, 지수는 각 사례마다 정규화 되지 않은 500 hPa 지위고도 값을 사용하여 계산되었다. 500 hPa 지위고도 값은 6시간 간격

Fig. 10. Continued.

의 NCEP-NCAR 재분석 자료가 사용되었다. 2007년 이 세 달 동안 발생한 태풍은 모두 11개였으며, 이 중 5개가 한반도에 영향을 주었다. 먼저 한반도에 영향을 준 태풍들의 경우, 태풍이 서쪽으로 이동하는 동안에는 낮은 값이 일정하게 유지되다가, 북쪽 또는 북동쪽으로 진행방향을 바꾸는 동시에 그 값이 급격하게 증가하기 시작하는 것을 볼 수 있다(Fig. 9). 이후 이 지수는 태풍이 우리나라에 가까워짐에 따라 급격하게 증가하고 우리나라 영향 영역에 접근했을 때는 가장 높은 값을 나타낸다. 그 이후 이 지수는 감소한다.

한편, 우리나라에 영향을 주지 않은 태풍 사례에서는 태풍의 일생 동안 지수가 감소하거나 일정하게 유지됨을 볼 수 있다(Fig. 10). 즉, 남중국이나 인도차이나 반도로 향하는 태풍(0703, 0708 및 0713)의 경우, 지수가 지속적으로 감소하는 특징을 보인다. 하지만 우리나라에 영향을 주지 않고 30°N 이상으로 북상한 태풍(0709과 0710)에서는 대체적으로 지수가 감소하지 않고 비교적 일정하게 유지된다. 따라서 이 지수는 태풍의 이동에 따른 북서태평양 고기압의 상태를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이는 우리나라에 영향을 준 태풍과 그렇지 않은 태풍들에 대해 태풍의 일생 동안 평균된 북서태평양 고기압의 상태를 살펴봄으로써 확인할 수 있다(shaded areas in Figs. 9 and 10). 여기서 북서태평양 영역은 5880 gpm 이

상의 값을 갖는 영역으로 정의된다. 우리나라에 영향을 준 태풍의 경우 태풍이 우리나라로 쉽게 이동할 수 있도록 북서태평양 고기압의 대부분이 태풍의 우리나라 영향 경도대에 속하는 130°-140°E까지 발달한 것을 볼 수 있다. 하지만 우리나라에 영향을 주지 않은 태풍들에서는 북서태평양 고기압이 비정상적으로 서쪽으로 발달하였거나 발달하지 못하였다.

진단을 위한 제언

우리나라 영향 태풍 진단 지수를 이용한 태풍의 우리나라 영향 가능성의 진단은 다음과 같은 과정으로 이루어질 수 있다.

i) 57년 동안 태풍의 우리나라 영향 영역에서의 영향 태풍 진단 지수를 계산하여 기후학적 평균 우리나라 영향 태풍 진단 지수를 산출한다. 이 기후학적 우리나라 영향 태풍 진단 지수는 실제 태풍의 이동 과정 동안 우리나라 영향 여부를 판단하는 문턱값으로 이용된다.

ii) 태풍 예측모델과는 별도로, 다른 수치모델에서 생산된 예측자료로부터의 500 hPa 남북류를 이용하여 현재시간 이후부터의 예측 우리나라 영향 태풍 진단 지수를 산출한다.

iii) 기후 평균 우리나라 영향 태풍 진단 지수와 비교하면서 우리나라로의 영향 가능성 여부를 진단한다.

iv) 태풍의 우리나라 영향 전까지 수치모델에서 예측자료를 생산할 때 마다 ii), iii)의 과정을 반복한다.

위의 과정을 거치게 되면, 비록 태풍 예측모델은 태풍이 우리나라에 영향을 주지 않을 것으로 예측하더라도, 우리나라 영향 태풍 진단 지수는 영향이 있을 것으로 예측할 수도 있다. 그러나 이 과정으로 부터 산출된 우리나라 영향 태풍 진단 지수의 정확도는 수치모델의 예측정확도에 의존될 수 밖에 없다는 한계점이 있다. 하지만 동아시아 아열대 및 중위도 지역에서의 태풍 진로는 북서태평양 고기압의 발달 정도에 크게 제어를 고려할 때, 태풍 진로 예측을 위해 예보자의 주관으로 이 고기압의 발달 정도를 판단하는 것보다는 좀 더 객관적인 우리나라 영향 태풍 진단 지수를 이용하는 것이 태풍 진로 예측에 있어서 더 효과적일 것으로 사료된다.

요약 및 결론

이 연구는 1951-2007년 동안 500 hPa 남북류 아노말리를 이용하여 여름철에 태풍이 북상하는 동안 우리나라 영역을 경유할 가능성을 진단할 수 있는 우리나라 영향 태풍 진단 지수를 개발하였다. 이 지수는 여름철 우리나라 영향 태풍의 빈도 아노말리와 같은 시기의 500 hPa 남북류 아노말리와 상관분석을 통하여, 500 hPa에서 양의 최대 상관 지역(우리나라 부근)과 음의 최대 상관지역(일본 남동쪽 해상)사이의 남북류 아노말리의 차이로 정의되었다. 이것은 우리나라 영향 태풍 진단 지수가 커질수록 두 지점 사이에 고기압성 순환(북서태평양 고기압)이 강화되어 태풍이 우리나라에 접근할 가능성이 증가할 것임을 이용한 것이다.

우리나라 영향 태풍 진단 지수로부터 양의 최대값(고 빈도해)과 음의 최대값(저 빈도해)을 갖는 17년을 각각 선택하여 두 시기 사이에 우리나라 영향 태풍의 빈도, 진로, 강도 및 종관 규모 환경 등의 차이를 분석하였다. 우리나라 영향 태풍의 빈도에서는 고 빈도해가 저 빈도해보다 약 두 배 정도 높았다. 이러한 빈도차이는 고빈도 해의 경우, 일본남쪽 해상에 위치한 고기압성 순환 아노말리와 함께 우리나라 부근에 위치한 저기압성 순환 아노말리에 의해 우리나라 부근지역은 강한 남서류의 영향을 받기 때문이었다. 반면 저빈도 해에는 우리나라 북서쪽에 중심을 둔 고 기압성 순환 아노말리로부터의 북동류가 우리나라로

부터 중국내륙 및 남중국해와 인도차이나 반도까지 남하함으로써 태풍이 우리나라로 북상하는데 저지하는 역할을 하였다. 또한 이 북동류는 우리나라 영향 태풍의 진로에도 영향을 주어 저빈도 해의 우리나라 영향 태풍이 고빈도 해보다 더 서쪽에서(즉, 중국 동해안 및 중국내륙을 경유) 북상하는 경향을 나타내었다. 이러한 저빈도 해에 우리나라 영향 태풍들의 중국내륙 경유 영향으로 인해 고빈도 해보다 더 낮은 강도를 나타내었다. 특히, 저빈도 해의 해수면 온도가 서태평양 대부분의 지역(특히, 동아시아 중위도 지역)에서 더 낮게 나타나 태풍 강도 약화의 한 원인이 되었다.

또한 이 연구는 재분석 자료로부터 지수를 산출하여 과거 태풍사례에 대해 적용한 결과 태풍이 우리나라로 접근하는 동안 지수가 꾸준히 증가하는 반면, 우리나라 비 영향 태풍의 경우 지수가 일정하거나 오히려 감소하는 경향을 보여, 이 지수가 타당함을 알 수 있었다.

이 연구 이후 다음과 같은 내용들이 차후연구에서 이루어 질 것이다.

i) 실제 과거 태풍사례에서 수치모델로부터 산출된 예측자료를 이용하여 우리나라 영향 태풍 진단 지수의 진단 가능성을 심도 있게 조사할 예정이다.

ii) 현재는 여름철 우리나라 영향 태풍만을 대상으로 하였지만, 차후연구에서는 다른 시기의 우리나라 영향 태풍을 대상으로 우리나라로의 영향 가능성을 진단할 수 있는 지수를 개발할 것이다.

iii) 이 연구는 우리나라 영향 태풍만을 대상으로 분석하였으나, 동아시아의 다른 태풍 영향 영역으로 연구 영역을 옮겨 볼 것이다.

iv) 현재 연구에서는 남북류의 인자만을 이용하였지만, 다른 기상인자를 추가한 진단 지수를 개발할 것이다.

앞으로 여름철에 태풍의 북상 동안 이 지수를 지속적으로 산출하면서 태풍의 진로를 모니터링 하여 우리나라 영향 가능성을 예보한다면, 태풍에 의한 피해를 줄이는데 조금이나마 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 예보국 국가태풍센터 주요과제 “국가태풍센터 운영(1131-301-210)”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Aberson, S.M., 1998, Five-day tropical cyclone track forecasts in the North Atlantic basin. *Weather and Forecasting*, 13, 1005-1015.
- Bell, G.D., Halpert, M.S., Schnell, R.C., Higgins, R.W., Lawrimore, J., Kousky, V.E., Tinker, R., Thiaw, W., Chelliah, M., and Artusa, A., 2000, Climate assessment for 1999. *Bulletin of American Meteorological Society*, 81, 1328.
- Chia, H.H. and Ropelewski, C.F., 2002, The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific. *Journal of Climate*, 15, 2934-2944.
- Choi, K.S., Kang, K.R., Kim, D.W., and Kim, T.R., 2009a, Prediction of tropical cyclone intensity and track using the artificial neural network method. *Journal of Korean Earth Science Society*, 30, 294-304.
- Choi, K.S. and Kim, B.J., 2007a, A simple introduction of extratropical transition of tropical cyclone (TC) and a case study on the latest three TCs: SHANSHAN (0613), YAGI (0614), and SOULIK (0618). *Journal of Korean Earth Science Society*, 28, 947-956.
- Choi, K.S. and Kim, B.J., 2007b, Climatological characteristics of tropical cyclones making landfall over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 43, 97-109.
- Choi, K.S., Kim, B.J., and Byun, H.R., 2009b, Relationship between Korean Peninsula landfalling tropical cyclones and interannual climate variabilities. *Journal of Korean Earth Science Society*, 29, 375-389.
- Choi, K.S., Kim, B.J., Kim, D.W., and Byun, H.R., 2010a, Interdecadal variation of tropical cyclone making landfall over the Korean Peninsula. *International Journal of Climatology*, 30, 1472-1483.
- Choi, K.S. and Kim, T.R., 2010b, Change of TC activity around Korea by Arctic Oscillation phase. *Atmosphere*, 20, 387-398.
- DeMaria, M. and Kaplan, J., 1999, An updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Weather and Forecasting*, 14, 326-337.
- Emanuel, K.A., 1986, An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part 1: Steady-state maintenance. *Journal of Atmospheric Sciences*, 43, 585-604.
- Emanuel, K.A., 1987, The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 326, 483-485.
- Emanuel, K.A., 2005, Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436, 686-688.
- Fogarty, E.A., Elsner, J.B., and Jagger, T.H., 2006, Variations in typhoon landfall over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23, 665-677.
- Fraedrich, K. and Leslie, L.M., 1989, Estimates of cyclone track predictability. I: Tropical cyclones in the Australian region. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 115, 79-92.
- Gray, W.M., 1977, Tropical cyclone genesis in the western North Pacific. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 55, 465-482.
- Gray, W.M., 1979, Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. In Shaw, D.B. (ed.), *Meteorology over the Tropical Oceans*. Royal Meteorological Society, UK, 155-218.
- Gray, W.M., Landsea, C.W., Mielke Jr., P.W., and Berry, K.J., 1993, Predicting Atlantic seasonal tropical cyclone activity by 1 August. *Weather and Forecasting*, 8, 73-85.
- Gray, W.M., Landsea, C.W., Mielke Jr., P.W., and Berry, K.J., 1992a, Predicting Atlantic seasonal hurricane activity 6-11 months in advance. *Weather and Forecasting*, 7, 440-455.
- Gray, W.M., Landsea, C.W., Mielke Jr., P.W., and Berry, K.J., 1994, Predicting Atlantic seasonal tropical cyclone activity by 1 June. *Weather and Forecasting*, 9, 103-115.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., and Fiorino, M., 2001, The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 247-268.
- Klotzbach, P.J. and Gray, W.M., 2004, Upgraded 6-11-month prediction of Atlantic basin seasonal hurricane activity. *Weather and Forecasting*, 19, 917-934.
- Klotzbach, P.J. and Gray, W.M., 2006, Causes of the unusually destructive 2004 Atlantic basin hurricane season. *Bulletin of American Meteorological Society*, 87, 1325-1333.
- Korea Meteorological Administration, 1996, Typhoon White Book, Korea Meteorological Administration, Seoul, 261 p.
- Landsea, C.W., Mielke Jr., P.W., and Mestas-Nunez, A.M., 1999, Atlantic basin hurricanes: Indices of climatic changes. *Climate change*, 42, 89-129.
- Leftwich, P.W. and Neumann, C.J., 1977, Statistical guidance on the prediction of eastern North Pacific tropical cyclone motion. Part 2. NOAA Technical Memorandum.

- dum NWS WR-125, p. 15.
- Morison, R.P., 2000, Australian REID CLIPER. Preprints, 24th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Fort Lauderdale, FL, American Meteorological Society, 494-495.
- Neumann, C.J., 1972, An alternate to the HURRAN tropical cyclone forecast system. NOAA Technical Memo NWS SR-62, p. 32.
- Neumann, C.J. and Randrianarison, E.A., 1976, Statistical prediction of tropical cyclone motion over the southwest Indian Ocean. Monthly Weather Review, 104, 76-85.
- Neumann, C.J. and Mandal, G.S., 1978, Statistical prediction of tropical storm motion over the Bay of Bengal and Arabian Sea. Indian Journal of Meteorology, Hydrology and Geophysics, 29, 487-500.
- Sall, S.M., Sauvageot, H., Gaye, A.T., Viltard, A., and Felice, P., 2006, A cyclogenesis index for tropical Atlantic off the African coasts. Atmospheric Research, 79, 123-147.
- Xu, Y. and Neumann, C.J., 1985, A statistical model for the prediction of western North Pacific tropical cyclone motion (WPCLPR). NOAA Technical Memo NWS-NHC 28, p. 30.

2011년 5월 16일 접수
 2011년 6월 13일 수정원고 접수
 2011년 7월 8일 채택