북대서양 진동과 북서태평양 태풍발생빈도와의 관계

최기선* · 박상욱 · 장기호 · 이종호

기상청 국가태풍센터, 699-942, 제주특별자치도 서귀포시 남원읍 서성로 810번길 2

Possible Relationship between NAO and Western North Pacific Typhoon Genesis Frequency

Ki-Seon Choi*, Sangwook Park, Ki-Ho Chang, and Jong-Ho Lee

National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju 699-942, Korea

Abstract: This study examined a strong positive correlation between the North Atlantic Oscillation (NAO) index during June and the total tropical cyclone (TC) genesis frequency in the western North Pacific during July and August. To investigate a possible cause for this relationship, the mean difference between the highest positive NAO years and the lowest negative NAO years was analyzed by dividing into when the El Niño and La Niña years were included and when the El Niño and La Niña years were not included. When the El Niño and La Niña years were included, for the positive NAO years, the TCs mostly occurred in the northwestern region of tropical and subtropical western Pacific, and showed a pattern that migrate from the sea northeast of the Philippines, pass the East China Sea, and move toward the mid-latitudes of East Asia. In contrast, for the negative NAO years, the TCs mostly occurred in the southeastern region of tropical and subtropical western Pacific, and showed a pattern that migrate westward from the sea southeast of the Philippines, pass the South China Sea, and move toward the southern coast of China and Indochinese peninsula. These two different TC migration patterns affect the recurving location of TC, and for the positive NAO years, the recurving of TC was averagely found to take place in the further northeast. In addition, the migration patterns also affect the TC intensity, and the TCs of positive NAO years had stronger intensity than the TCs of negative NAO years as sufficient energy can be absorbed from the ocean while moving north in the mid-latitudes of East Asia. The TCs of negative NAO years showed weak intensity as they get weaken or disappear shortly while landing on the southern coast of China and the Indochinese peninsula. On the other hand, the above result of analysis is also similarly observed when the El Niño and La Niña years were not included.

Keywords: North Atlantic Oscillation, typhoon, TC genesis frequency

요약: 이 연구는 지역특별기상센터-동경 태풍 센터에서 제공하는 태풍의 최적 경로 자료와 미국 국립 환경예측센터/미국 국립 대기연구센터의 재분석 자료를 이용하여 6월 북대서양 진동 지수와 7, 8월 총 북서태평양 태풍발생빈도 사이에 강한 양의 상관관계가 있음이 분석되었다. 이러한 관계의 가능한 원인을 알아보기 위해 엘니뇨, 라니냐 해를 포함한 경우와 포함 하지 않은 경우로 구분하여 가장 높은 양의 북대서양 진동 해와 가장 낮은 음의 북대서양 진동 해 사이의 평균 차를 분석하였다. 엘니뇨 해와 라니냐 해를 포함한 경우 양의 북대서양 진동 해에는 태풍이 열대 및 아열대 서태평양의 북서쪽에서 주로 발생하였으며, 필리핀 북동쪽 해상으로부터 동중국해를 지나 동아시아 중위도 지역으로 이동하는 패턴을 나타냈다. 반면, 음의 북대서양 진동 해에는 태풍이 열대 및 아열대 서태평양의 남동쪽에서 주로 발생하였으

*Corresponding author: choiks@kma.go.kr

Tel: +82-64-801-0231

Fax: +82-64-805-0366

며, 필리핀 남동쪽 해상으로부터 남중국해를 지나 중국 남부해안 및 인도차이나 반도를 향해 서진하는 패턴을 나타냈다. 이러한 두 해의 태풍 이동 패턴은 태풍의 전향위치에도 영향을 주어 양의 북대서양 진동 해에 태풍 전향이 평균적으로 좀 더 북동쪽에 이루어지는 것으로 나타났다. 또한 두 해의 태풍 이동 패턴은 태풍의 강도에도 영향을 주어 동아시아 중위도에 북상하는 동안 바다로부터 충분한 에너지를 공급받을 수 있는 양의 북대서양 진동 해의 태풍의 강도가 음의 북대서양 진동 해의 태풍들보다 더 강했다. 음의 북대서양 진동 해에 태풍은 중국 남부해안 및 인도차이나 반도에 상륙하면서 강도가 약해지거나 바로 소멸되어 약한 강도를 나타내었다. 한편 위의 모든 분석의 결과는 엘니뇨, 라니냐 해를 포함하지 않은 경우에도 비슷하게 나타나 6월 북대서양 진동 지수가 7, 8월 총 북서태평양 태풍발생빈도를 예측하는데 좋은 예측인자가 될 수 있음을 알 수 있었다.

주요어: 북대서양 진동, 태풍, 태풍발생빈도

서론

기후학적으로, 열대 및 아열대 서태평양에서 발생하는 태풍 빈도는 어떤 다른 태풍발생 해역보다 높은 빈도를 가지고 있다(Neumann, 1993). 북서태평양 주변 국가들에서는 매년 상륙하는 태풍에 의해 많은 재산과 인명피해를 입고 있다. 따라서 태풍의 발생 특징을 이해하고 이를 예측하기 위한 많은 연구들이 이루어져왔다. 지금까지 태풍 발생의 특징을 이해하기 위해 가장 주목 받아왔던 변수로는 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)가 있다(Wang and Chan, 2002; Chu, 2002; Wu et al., 2004). 일반적으로 엘니뇨 해의 태풍들은 아열대 서태평양의 남동해역에서 주로 발생하여 전향한 뒤 동아시아 중위도에 위치한 중국 동부해안, 한국 및 일본에 상륙하거나 영향을 주는 경향이 있다. 반대로 라니냐 해의 태풍들은 아열대 서태평양의 북서해역에서 발생하여 서쪽 또는 서북쪽으로 향하는 경향이 있기 때문에 이러한 태풍들은 주로 필리핀, 남중국 또는 인도차이나 반도에 상륙한다. 따라서 엘니뇨 해의 태풍들은 라니냐 해의 태풍들보다 좀 더 긴 수명과 좀 더 강한 강도를 나타낸다.

Gray(1975, 1984)와 Gray et al.(1992, 1993, 1994)은 태풍의 발생에 중요한 여섯 가지 물리적 요소가 있음을 발견하였다. 그 여섯 가지 요소는 (i) 하층 상대와도, (ii) 코리올리스 파라미터, (iii) 상층과 하층 대류권 사이의 연직바람시어, (iv) 해수면으로부터 수십 60 m 깊이까지 26.8°C 이상의 해수면 온도에 기인하는 해양 열 에너지, (v) 지표와 500 hPa 고도 사이에 상당온위의 연직경도, (vi) 중층대류권 상대습도이다. 이러한 Gray의 요소는 태풍활동의 계절별 특성을 잘 반영하기 때문에 태풍발생의 계절예측을 위한 통계모델에서 주요예측인자로 사용되고 있다.

위의 연구에서 살펴보았듯이, ENSO 및 태풍 발생 지역에서의 대기 요소들(Gray 요소)을 이용한 태풍 발생 특징은 많은 연구에서 성공적으로 수행되었다. 하지만 태풍은 열대지역의 환경요소에 의해서 발생할 뿐만 아니라, 열대 지역 외에 존재하는 많은 다양한 원격패턴들과의 상호작용에 의해서 발생하기도 한다. 따라서 태풍의 발생에 영향을 주는 원격패턴들의 시그널을 찾아 태풍 발생과의 관계를 명확하게 밝히는 것이 무엇보다도 중요하다. Chan et al.(1998)과 Chen et al.(2001)은 Gray의 요소들보다는 원격패턴의 요소들에 초점을 두었다. 즉, 그들은 (i) 중앙 및 동태평양에서의 해수면 온도 아노말리, (ii) 이전 해의 4월부터 현재 해의 3월까지 서태평양과 아시아 지역에서의 대기순환 특징 지수 (iii) 태풍활동에서의 매년 변화 경향(기후와 지속성)과 호주 및 남태평양 지역에서의 대기순환을 대표하는 지수를 포함하는 대기 및 해양 요소를 이용하여 태풍 발생의 특성을 다루었다. Ho et al.(2005)는 남반구에서 발생하는 양의 남극진동 해에 양반구의 중위도에서 고기압성 아노말리가 강화됨에 따라 강한 대류가 적도부근지역으로만 제한되어 태풍의 발생빈도가 낮아짐을 보였다. Choi et al.(2010)은 양의 태평양-일본 원격패턴시에 일본 동쪽해상에는 고기압성 아노말리가 강화되는 반면, 아열대 서태평양에 몬순 기압골이 강화됨에 따라 태풍의 발생빈도가 높아짐을 보였다. 또한 Choi et al.(2012)는 양의 북극진동의 해에 동아시아 중위도에는 고기압성 아노말리가 강화되는 반면, 아열대 서태평양에는 몬순기압골이 발달하여 태풍의 발생빈도가 높아짐을 주장하였다. 이 외에도 열대 지역이 아닌 중위도 및 한대지역에서의 대기순환이 태풍의 발생에 미치는 영향에 대한 연구는 많이 진행되어왔다(Choi et al., 2009; Choi and Kim, 2011a; Choi and Kim, 2011b; Choi and Moon, 2012).

하지만 북대서양 진동과 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생과의 관계에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 일반적으로 북대서양 진동은 20°-90°N 영역에서의 500 hPa 지위고도 아노말리의 자료를 이용하여 Rotated Empirical Orthogonal Function(REOF)의 기법에 적용되어 산출된 결과를 이용한다. 양의 북대서양 진동해의 경우 아열대 대서양에는 평소보다 강한 아조레스 고기압과 함께 북대서양에는 아이슬란드 저기압이 발달하며, 북대서양 해역에 강한 폭풍이 초래된다. 또한 유럽에는 온난하고 습한 겨울날씨가 형성되는 반면, 북아메리카와 그린란드 주변 지역에는 차고 건조한 겨울 날씨가 형성된다. 한편, 북대서양 진동과 대서양 허리케인 활동과의 연구도 다소 존재한다 (Elsner et al., 2000; Liu and Fearn, 2000; Scott et al., 2003; McCloskey and Knowles, 2009).

따라서 이 연구는 북대서양 진동이 열대 및 아열대 서태평양에서 발생하는 태풍 빈도와 관계가 있는지를 조사하고, 관계가 있다면 그 이유를 대기순환을 통해서 찾고자 하였다.

자료 및 분석방법

태풍 자료는 지역특별기상센터-동경 태풍 센터에서 제공하는 태풍의 최적 경로 자료로부터 얻어졌다. 이 자료는 1978-2011년(34년)동안 매 6시간 간격으로 관측된 태풍 이름, 태풍 위경도 위치, 태풍 중심기압, 태풍 중심 최대풍속의 정보로 구성된다. 태풍은 일반적으로 중심최대풍속(maximum sustained surface wind speeds, MSSWS)을 기준으로 네 등급으로 나뉘어진다: 열대 저기압($MSSWS < 17 \text{ m s}^{-1}$), 열대 폭풍($17 \text{ m s}^{-1} \leq MSSWS \leq 24 \text{ m s}^{-1}$), 강한 열대 폭풍($25 \text{ m s}^{-1} \leq MSSWS \leq 32 \text{ m s}^{-1}$), 태풍($MSSWS \geq 33 \text{ m s}^{-1}$). 위의 네 등급에 더하여 이 연구에서는 태풍으로부터 변형된 온대 저기압도 분석에 포함시켰다. 이는 이러한 온대 저기압도 동아시아 중위도 지역에서 많은 재산과 인명피해를 입히기 때문이다. 본 연구에서의 태풍은 이 다섯 등급을 포함한 열대 저기압을 의미한다.

한편 이 연구는 1978-2011년 동안의 National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research(NCEP-NCAR) 재분석 자료의 지위고도(gpm) 및 동서바람(m s^{-1})의 변수를 사용하였다(Kalnay and Coauthors, 1996; Kistler and Coauthors, 2001), 이 NCEP-NCAR 재분석 자료는

위경도 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 및 17개의 연직층과 같은 공간해상도로 이루어져 있다.

또한 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 월평균 해수면 온도 자료가 사용되었다(Reynolds et al., 2002). 이 자료는 1854년부터 현재까지 이용 가능하다.

북대서양 진동 지수는 미국 NOAA의 기후예측센터(Climatic Prediction Center)에서 제공하는 지수를 사용하였다.

본 연구에서 태풍의 이동빈도는 $5^\circ \times 5^\circ$ 격자 간격 내를 통과하는 태풍의 빈도를 더한 것으로 표현되었다. 하지만 같은 태풍이 같은 격자를 여러 번 통과하는 경우는 단 한번 통과한 것으로 간주하였으며, 태풍의 발생빈도 역시 태풍의 이동빈도와 같은 방법으로 계산되었다.

결 과

북대서양 진동과 여름철 열대 및 아열대 서태평양 태풍 발생빈도와의 관계

Table 1은 열대 및 아열대 태평양에서 여름철 태풍 발생빈도와 북대서양 진동 지수 사이에 상관관계를 분석한 것이다. 9월 태풍발생빈도와 6-8월 북대서양 진동 지수 사이에는 음의 관계를 나타내지만 다른 모든 달에서는 양의 상관을 나타낸다. 특히 95% 신뢰수준에서 유의한 높은 양의 상관을 나타내는 월은 6월 북대서양 진동 지수와 7, 8월 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도 사이에서 나타난다. 따라서 이 연구는 6월 북대서양 진동과 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도 사이에 상관에 초점을 두었다.

7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍 발생빈도와 6월 북대서양 진동 지수 사이에 상관을 분석하게

Table 1. Correlation coefficient matrix between North Atlantic Oscillation (NAO) index and TC genesis frequency in summer (June-September). Bold figures are significant at the 95% confidence level

		TC genesis frequency			
		June	July	August	September
NAO	June	0.04	0.33	0.39	-0.06
	July		0.14	0.13	-0.30
	August			0.31	-0.07
	September				0.16

Fig. 1. Time series of North Atlantic Oscillation (NAO) index (solid line with closed circle) in June and TC genesis frequency in the western North Pacific in July-August (dotted line with open circle).

되면 99% 신뢰수준에서 유의한 0.49의 좀 더 높은 양의 상관을 나타낸다. 6월 북대서양 진동 진수와 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍 발생빈도의 시계열을 Fig. 1에 제시하였다. 두 변수는 같은 위상(in phase)의 관계를 나타내며 뚜렷한 매 년 변동성과 십 년 변동성을 나타낸다. 한편 북대서양 진동지수는 34년 동안 약하게 감소하는 경향을 나타내는 반면, 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도는 변화 경향이 거의 없다. 두 변수로부터 변동 경향을 제거하게 되면 앞서 분석된 상관관계가 달라질 수 있어 두 변수로부터 변동 경향을 제거하고 상관관계를 재분석하였다. 하지만 두 변수의 상관관계는 99% 신뢰수준에서 유의한 0.45의 강한 양의 상관관계를 나타낸다.

이후의 장에서는 두 변수 사이에 이러한 양의 상관을 나타내는 이유를 알아보고자 한다.

양의 북대서양 진동과 음의 북대서양 진동 사이의 차

이 연구는 6월 북대서양 진동과 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도 사이에 나타나는 양의 상관관계의 원인을 알아보기 위해 Fig. 1에서 34년의 분석 기간 중 가장 높은 북대서양 진동 지수를 가지는 9개 해(양의 북대서양 진동 해)와 가장 낮은 북대서양 진동 지수를 가지는 9개 해(음의 북대서양 진동 해)를 선택하여 양의 북대서양 진동 해의 평균과 음의 북대서양 진동 해의 평균 사이에 차를 분석하였다(Table 2). 양의 북대서양 진동 해에 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도의 평균은 10.7개이며, 음의 북대서양 진동 해에 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도의 평균은 7.4개로

Table 2. TC genesis frequency in positive and negative NAO phases including ENSO years

Positive NAO phase		Negative NAO phase	
1983	8	1982	8
1986	8	1987	8
1988	10	1997	10
1992	13	1998	4
1994	16	2004	10
1996	11	2007	7
1999	10	2008	6
2002	11	2009	7
2006	9	2011	7
Average	10.7	Average	7.4

Table 3. Same as in Table 2, but for excluding ENSO years

Positive NAO phase		Negative NAO phase	
1983	8	1981	12
1986	8	1984	10
1992	13	1993	11
1994	16	2007	7
1996	11	2008	6
2006	9	2011	7
Average	10.8	Average	8.8

서 평균적으로 약 3개의 태풍이 양의 북대서양 진동 해에 더 많이 발생하였다. 두 해들 사이에 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍 발생빈도의 평균차는 90% 신뢰수준에서 유의하다.

한편 두 변수 사이에 상관결과는 ENSO에 영향을 받을 수 있다. 따라서 위의 결과와의 비교를 위해 Fig. 1에서 34년의 분석기간 동안 6-8월 평균 엘니뇨 해(1982, 1987, 1991, 1997, 2002, 2004, 2009년)와 라니냐 해(1985, 1988, 1998-2000, 2010년)를 제외하고 가장 높은 북대서양 진동지수를 가지는 6개 해와 가장 낮은 북대서양 진동지수를 가지는 6개 해를 선택하여 두 해들 사이에 평균차를 분석하였다(Table 2). 여기서 엘니뇨 해, 라니냐 해를 선정하기 위한 기후학적 평균 해수면 온도는 1978-2011년 평균 해수면 온도를 사용하였다. 양의 북대서양 진동 해에 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도의 평균은 10.8개이며, 음의 북대서양 진동 해에 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도의 평균은 8.8개로서 평균적으로 약 2개의 태풍이 양의 북대서양 진동 해에 더 많이 발생하였다. 두 해들 사이에 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍 발생빈도의 평균차는 85% 신뢰수준에서 유의하다.

Fig. 2. (a) TC genesis frequency and (b) TC passage frequency in the grid box of $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ in July-August including ENSO years (left panel) and excluding ENSO years (right panel). In (a) and (b), the small boxes inside the circles are significant at the 95% confidence level. In (b), the solid and the dashed lines represent 5875 gpm contours in the positive and negative NAO phases, respectively.

태풍 활동

Fig. 2a는 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함하였을 경우(좌측 패널)와 포함하지 않았을 경우(우측 패널)에 양의 북대서양 진동의 해와 음의 북대서양 진동의 해 사이에 태풍 발생빈도의 평균차를 나타낸 것이다. 전체적으로 두 경우 모두 양의 북대서양 진동 해에는 아열대 서태평양의 북서 지역에서 발생하는 경향이 있으며, 음의 북대서양 진동 해에는 아열대 서태평양의 남동 지역에서 발생하는 경향이 뚜렷하다. 이는 두 해 각각에 대한 평균 발생위치에서의 차를 비교해 봄으로써 확인할 수 있다. 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우, 양의 북대서양 진동 해의 평균 발생 위치는 17.8°N , 138.2°E 인 반면, 음의 북대서양 진동 해의 평균 발생 위치는 14.9°N , 144.5°E 로 분석되었다. 여기서 평균 발생위치의 위경도차는 95% 신뢰수준에서 유의하다. 엘니뇨 해, 라니냐 해를 제외한 경우, 양의 북대서양 진동 해의 평균 발생 위치는 17.2°N , 138.1°E 인 반면, 음의 북대서양 진동 해의 평균 발생

위치는 15.2°N , 143.7°E 로 나타났다. 여기서 평균 발생위치의 위경도차는 90% 신뢰수준에서 유의하다. 따라서 태풍 발생빈도의 공간분포에서 아열대 서태평양의 북서쪽과 남동쪽 지역 사이에 쌍극자의 공간분포를 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 2b는 엘니뇨, 라니냐 해를 포함하였을 경우(좌측 패널)와 포함하지 않았을 경우(우측 패널)에 양의 북대서양 진동의 해와 음의 북대서양 진동의 해 사이에 태풍 이동빈도의 평균차를 나타낸 것이다. 전체적으로 두 경우 모두 유사한 태풍 이동의 공간분포를 나타낸다. 양의 북대서양 진동 해에는 평균적으로 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 동중국해를 지나 동아시아 중위도 지역에 위치한 한국 및 일본으로 이동하는 경향을 나타내는 반면, 음의 북대서양 진동 해에는 필리핀 남동쪽 해상으로부터 남중국해를 지나 중국 남부해안 및 인도차이나 반도지역에 상륙하는 패턴을 나타낸다. 따라서 태풍 이동빈도의 공간분포에서 동아시아의 남서쪽과 북동쪽 지역 사이에 쌍극자

Fig. 3. TC recurvature location in July-August (a) including ENSO years and (b) excluding ENSO years.

의 공간분포를 보임을 알 수 있다.

Fig. 3은 엘니뇨 해와 라니냐 해를 포함하였을 경우(좌측패널)와 포함하지 않았을 경우(우측패널), 양의 북대서양 진동의 해(붉은 점)와 음의 북대서양 진동 해(파란 점) 동안에 태풍의 전향 위치를 나타낸 것이다. 본 연구에서의 태풍 전향위치는 태풍이 서쪽을 향해 이동하다가 동쪽을 향해 이동하기 시작하는 시점으로 정의된다. 따라서 태풍의 전체적인 경로가 서진 또는 동진만 하는 경우, 이상한 경로를 가지는 태풍의 사례는 본 연구에서 제외되었다. 전체적으로 두 경우 모두 음의 북대서양 진동의 해보다 양의 북대서양 진동의 해에 아열대 서태평양에서 좀 더 북동쪽에서 전향하였음을 볼 수 있다. 이는 두 해에 대한 태풍의 평균 전향위치를 살펴봄으로써 알 수 있다. 먼저 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우, 양의 북대서양 진동의 해에 태풍의 평균 전향위치는 33.0°N , 140.2°E 인 반면, 음의 북대서양 진동의 해에는 30.7°N , 130.6°E 를 나타낸다(Fig. 3a). 여기서 두 해 사이에 평균 전향위치의 위도차는 90% 신뢰수준에서 유의하며, 경도차는 95% 신뢰수준에서 유의하다. 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함하지 않았을 경우, 양의 북대서양 진동의 해에 태풍의 평균 전향위치는 33.2°N , 136.5°E 인 반면, 음의 북대서양 진동의 해에는 31.5°N , 130.3°E 를 나타낸다(Fig. 3b). 여기서 두 해 사이에 평균 전향위치의 위도차는 85% 신뢰수준에서 유의하며, 경도차는 90% 신뢰수준에서 유의하다.

위에서 살펴본 것처럼 태풍의 발생 및 이동방향, 전향위치 등은 태풍의 강도에 영향을 줄 수 있다. 따라서 이 연구는 두 해에 대한 각각의 태풍 강도를 조사하였으며, 태풍의 강도는 지역특별기상센터-동경 태풍 센터에서 제공하는 6시간 간격의 태풍 최적경

로 자료에서 태풍의 일생 동안에 관측된 가장 낮은 중심기압과 태풍 수명으로 정의된다(Fig. 4). 먼저 태풍의 수명에서는 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우와 포함하지 않은 해의 경우 모두 전체적으로 양의 북대서양 진동 해에 태풍의 수명이 더 긴 것을 볼 수 있다(Fig. 4a). 이는 두 해에 대한 태풍의 평균 수명을 비교해 봄으로써 알 수 있다. 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우 모두 양의 북대서양 진동 해에 태풍이 평균적으로 약 3일 더 생존하였다. 두 해 사이에 태풍의 평균 수명 차이는 모두 95% 신뢰수준에서 유의하다. 한편 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우 모두 양의 북대서양 진동 해에 태풍의 최소중심기압이 더 낮은 것을 볼 수 있다(Fig. 4b). 두 경우 모두 양의 북대서양 진동 해와 음의 북대서양 진동 해 평균 태풍의 최소중심기압 차는 약 10 hPa로서 이러한 차는 95% 신뢰수준에서 유의하다. 따라서 태풍의 수명이 길수록 태풍의 최소 중심기압은 낮은 것을 알 수 있다, 두 해 사이에 태풍의 강도차는 태풍의 이동 경로의 차를 통해 확인할 수 있다(Fig. 2b). 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우 모두, 양의 북대서양 진동 해의 태풍은 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본이 위치한 동아시아 중위도 지역까지 이동하는 동안 바다로부터 충분한 에너지를 공급받을 수 있기 때문에 태풍의 강도가 강한 반면, 음의 북대서양 해에는 필리핀 남동쪽 해상으로부터 남중국해를 지나 중국남부 해안 및 인도차이나 반도에서 상륙한 후 지형효과로 인해 약해지거나 바로 소멸되었기 때문에 태풍의 강도가 약한 것으로 분석된다.

Fig. 4. (a) TC lifetime and (b) TC minimum central pressure in positive and negative NAO phases including ENSO years (left panel) and excluding ENSO years (right panel).

대규모 대기 순환

위에서 분석된 것처럼 두 해 사이에 태풍의 활동에서 차를 야기하는 원인을 알아보기 위해 7, 8월 평균에 대해 두 해 사이에 500 hPa 유선의 차를 분석하였다(Fig. 5). 본래 북대서양 진동은 북반구 겨울철에 가장 뚜렷하게 나타나는 원경패턴이지만, 본 연구에서도 겨울철 만큼 뚜렷하지는 않으나 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우에 북아메리카 대륙에는 양의 값이 북대서양에는 음의 값이 위치해 있는 전형적인 양의 북대서양 진동 패턴의 공간분포를 나타낸다(Fig. 5a). 또한 북반구 중위도에서는 북대서양으로부터 북서태평양까지 양의 공간분포-음의 공간분포-다시 양의 공간분포와 같이 로스비 파에 의한 파열(wave train)의 공간분포를 나타낸다. 반면 30°N 이남의 북반구 열대 및 아열대 지역에는 모두 음의 공간분포를 나타내고 있다. 이는 양의 북대서양 진동 해에 열대 및 아열대 서태평양에서 태풍의 발생빈도를 높게 하는 한 원인이 된다. 한편 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함하지 않은 경우에 두 해 사이에 500 hPa

유선 차 역시 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우와 비슷한 공간분포를 나타낸다(Fig. 5b).

두 해 사이에 태풍의 발생빈도 차의 원인을 알아보기 위해 북서태평양 지역에서 7, 8월 평균에 대해 두 해 사이에 850 hPa 유선차를 분석하였다. 먼저 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우 25°N 이북인 동아시아 중위도 지역에는 고기압성 순환 아노말리가, 25°N 이남인 열대 및 아열대 서태평양에는 저기압성 순환 아노말리가 강화되어 있다. 따라서 분석영역인 동아시아 지역은 25°N 위도대를 경계로 남저북고의 공간분포를 보이고 있어 양의 북대서양 진동 해에 태풍의 발생에 유리한 대기순환이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 공간 분포는 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함하지 않은 경우에도 유사하게 나타난다(Fig. 6b). 특히, 25°N 이남인 열대 및 아열대 서태평양에서의 남동쪽 해역에는 양의 아노말리 값이 위치해 있어 앞서 분석된 것처럼 양의 북대서양 진동 해에 열대 및 아열대 서태평양의 북서쪽 영역에서, 음의 북대서양 진동 해에서는 남동쪽 영역에서 태풍이

Fig. 5. Difference in 500 hPa stream flows between positive and negative NAO phases (a) including ENSO years and (b) excluding ENSO years.

주로 발생하는 한 원인이 된다.

한편, 두 해 사이에 500 hPa과 850 hPa 유선차에서 보여진 동아시아 영역에서의 남저 북고의 기압 아노말리 패턴은 양의 북대서양 진동 해에 북서태평양 고기압이 좀 더 북쪽으로 발달 했음을 의미한다. 이를 알아보기 위해 북서태평양 고기압의 발달 정도를 분석하였다(Fig. 2b). 여기서 북서태평양 고기압은 5875 gpm 이상의 영역을 나타내는 지역으로 정의된다. 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우, 양의 북대서양 진동 해에 북서태평양 고기압은 음의 북대서양 진동 해보다 좀 더 북동쪽으로 수축되어 있는 반면, 음의 북대서양 진동 해에는 타이완 부근까지 남서쪽으로 확장되어 있다. 이러한 특징은 엘니뇨 해, 라니냐 해를 제외한 경우에도 유사하게 나타난다. 태풍은 북서태평양 고기압의 서쪽 연변을 따라서 이동하는 경향을 나타낸다. 따라서 북서태평양 고기압이 북동쪽으로 수축한 양의 북대서양 진동 해에 태풍들은 필리핀 북동해상으로부터 동중국해를 지나 한국 및 일본이 위치한 동아시아 중위도를 향해 이동할 수 있는 반면, 북서태평양 고기압이 대만 부근까지 남서쪽으로 확장해 있는 음의 북대서양 진동 해에 태풍들은 필리핀 남동쪽 해상으로부터 남중국해를 지나 중국남해안 및 인도차이나 반도를 향해 서진하는 패턴을 나타낼 수 있다.

태풍의 발생 및 발달은 연직바람시어의 영향을 많이 받는다. 따라서 본 연구는 두 해 사이에 200-850 hPa 사이에 연직바람시어 차를 분석하였다(Fig. 7). 연직바람시어는 그 값이 적을수록 기단이 안정하여

Fig. 6. Difference in 850 hPa stream flows between positive and negative NAO phases (a) including ENSO years and (b) excluding ENSO years.

태풍의 발생 및 발달에 우호적인 환경을 제공해 준다. 먼저 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우, 열대 및 아열대 서태평양의 남동쪽 해역을 제외한 대부분의 해역에서 음의 아노말리 값을 나타내고 있다. 이는 양의 북대서양 진동 해에 태풍의 발생에 우호적인 환경을 제공해 준다. 또한 이러한 공간패턴은 양

Fig. 7. Difference in vertical wind shear (200-850 hPa) between positive and negative NAO phases (a) including ENSO years and (b) excluding ENSO years.

의 북대서양 진동 해에 태풍이 열대 및 아열대 서태평양의 북서쪽에서 주로 발생하는 반면, 음의 북대서양 진동 해에는 태풍이 열대 및 아열대 서태평양의 남동쪽에서 주로 발생할 수 있는 좋은 환경을 제공해 준다. 게다가 열대 및 아열대 서태평양의 음의 아노말리 값은 일본 남서쪽 지역까지 북쪽으로 확장되어 있다. 따라서 양의 북대서양 진동 해에 태풍이 동아시아 중위도 지역까지 북상하더라도 강한 강도를 유지할 수 있는 좋은 환경을 제공해 준다. 이러한 특징은 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함하지 않은 경우에도 유사하게 나타난다(Fig. 7b).

요약 및 결론

이 연구는 6월 북대서양 진동 지수와 7, 8월 총 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도 사이에 강한 양의 상관관계가 있음이 분석되었다. 이러한 관계의 가능한 원인을 알아보기 위해 엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우와 포함하지 않은 경우로 구분하여 가장 높은 양의 북대서양 진동 해와 가장 낮은 음의 북대서양 진동 해 사이의 평균 차를 분석하였다.

엘니뇨 해, 라니냐 해를 포함한 경우 양의 북대서양 진동 해에는 태풍이 열대 및 아열대 서태평양의 북서쪽에서 발생하는 특징을 보였으며, 필리핀 북동쪽 해상으로부터 동중국해를 지나 한국과 일본이 위치한 동아시아 중위도 지역으로 이동하는 패턴을 나타냈다. 반면, 음의 북대서양 진동 해에는 태풍이 열대 및 아열대 서태평양의 남동쪽에서 발생하는 경향을 보였으며, 필리핀 남동쪽 해상으로부터 남중국해를 지나 중국 남부해안 및 인도차이나 반도를 향해 서진하는 패턴을 나타냈다. 이러한 두 해의 태풍 이동 패턴은 태풍의 전향위치에도 영향을 주어 음의 북대서양 진동 해보다 태풍이 좀 더 북동쪽에서 이동한 양의 북대서양 진동 해에 태풍의 전향위치가 평균적으로 북동쪽에 위치하는 것으로 나타났다. 또한 두 해의 태풍의 이동 패턴은 태풍의 강도에도 영향을 주어 동아시아 중위도에 북상하는 동안 바다로부터 충분한 에너지를 흡수할 수 있는 양의 북대서양 진동 해의 태풍의 강도가 음의 북대서양 진동 해의 태풍들보다 더 강했다. 음의 북대서양 진동 해에 태풍은 중국 남부해안 및 인도차이나 반도에 상륙하면서 강도가 약해지거나 바로 소멸되어 약한 강도를 나타낸 것으로 판단된다.

이러한 두 해 사이에 태풍의 활동에 영향을 미치는 대기순환 패턴을 알아보기 위해 두 해 사이에 500 hPa 유선차가 분석되었다. 그 결과로서 미국 대륙에는 양의 값이, 북대서양에는 음의 값이 위치해 있는 전형적인 양의 북대서양 진동 패턴의 공간분포를 나타내었으며, 또한 북반구 중위도에서는 북대서양으로부터 북서태평양까지 양의 공간분포-음의 공간분포-다시 양의 공간분포와 같이 로스비 파에 의한 파열(wave train)과 같은 공간분포를 보였다. 반면 30°N 이남의 북반구 열대 및 아열대 지역에는 모두 음의 공간분포를 나타내어 양의 북대서양 진동 해에 열대 및 아열대 서태평양에서 태풍의 발생빈도를 높게 하는 한 원인이 되었다. 두 해 사이에 850 hPa 유선차의 분석에서도 동아시아 영역에서 30°N를 중심으로 남저북고의 기압 아노말리 패턴을 나타내어 양의 북대서양 진동 해에 열대 및 아열대 서태평양에서 태풍의 발생빈도를 높게 하는 좋은 환경을 제공해 주었다. 이러한 남저북고의 기압 아노말리 패턴은 양의 북대서양 진동 해에 북서태평양 고기압이 좀 더 북동쪽으로 수축되고, 음의 북대서양 진동 해에는 북서태평양 고기압이 타이완까지 남서쪽으로 확장하

는 결과를 가져왔으며, 이러한 두 해 사이에 북서태평양 고기압의 위치 차는 앞서 설명하였듯이 태풍의 이동 패턴에 영향을 주었다. 또한 두 해 사이에 태풍의 발생위치, 이동패턴 및 강도 등과 같은 태풍 활동의 차 역시 두 해 사이에 연직바람시어 차의 분석을 통해 확인 되었다.

한편 위의 모든 분석의 결과는 엘니뇨 해, 리니냐 해를 포함하지 않은 경우에도 비슷한 결과를 나타내었다.

이 연구는 6월 북 대서양 진동과 7, 8월 중 열대 및 아열대 서태평양 태풍 발생빈도와의 상관과 이러한 상관이 발생하는 원인 분석에 초점을 두었다. 차후 분석에서는 6월 북 대서양 진동을 이용하여 7, 8월 중 열대 및 아열대 서태평양 태풍발생빈도를 예측할 수 있는 통계모델을 개발할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 재원 “국가태풍센터 운영” 사업 및 국립기상연구소 “예보기술 지원 및 활용 연구(NIMR-2013-B-1)”의 태풍 단,장기 예측기술 개발의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Chan, J.C.L., Shi, J.E., and Lam, C.M., 1998, Seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the western North Pacific and the South China Sea. *Weather and Forecasting*, 13, 997-1004.
- Chen, J.E., Shi, J.E., and Liu, K.S., 2001, Improvements in the seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the western North Pacific, *Weather and Forecasting*, 16, 491-498.
- Choi, K.S., Kang, K.R., Kim, D.W., Hwang, H.S., and Lee, S.R., 2009, A study on the characteristics of tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific using Empirical Orthogonal Function. *Journal of Korean Earth Science Society*, 30, 721-733.(In Korea)
- Choi, K.S. and Kim, T.R., 2011a, Development of a diagnostic index on the approach of typhoon affecting Korean Peninsula. *Journal of Korean Earth Science Society*, 32, 347-359. (In Korea)
- Choi, K.S. and Kim, T.R., 2011b, Regime shift of the early 1980s in the characteristics of the tropical cyclone affecting Korea. *Journal of Korean Earth Science Society*, 32, 453-460.
- Choi, K.S. and Moon, I.J., 2012, Influence of the Western Pacific teleconnection pattern on western North Pacific tropical cyclone activity. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 57, 1-16.
- Choi, K.S., Wu, C.C., and Byun, H.R., 2012, Possible connection between summer tropical cyclone frequency and spring Arctic Oscillation over East Asia. *Climate Dynamics*, 38, 2613-2629.
- Choi, K.S., Wu C.C., and Cha, E.J., 2010, Change of tropical cyclone activity by Pacific-Japan teleconnection pattern in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 115, D19114
- Chu, P.S., 2002, Large-scale circulation features associated with decadal variations of tropical cyclone activity over the central North Pacific. *Journal of Climate*, 15, 2678-2689
- Elsner, J.B., Liu, K.B., and Kocher, B., 2000, Spatial Variations in Major U.S. Hurricane Activity: Statistics and a Physical Mechanism. *Journal of Climate*, 13, 2293-2305.
- Gray, W.M., 1975, Tropical cyclone genesis. Dept. of Atmospheric Science Paper 234, Colorado State University, Fort Collins, CO, 121 pp
- Gray, W.M., 1984, Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. *Monthly Weather Review*, 112, 1669-1683.
- Gray, W.M., Landsea, C.W., Mielke Jr. P.W., and Berry, K.J., 1992, 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., 1993, Predicting Atlantic basin seasonal tropical cyclone activity by 1 August, *Weather Forecasting*, 8, 73-86.
- Gray, W.M., Landsea, C.W., Mielke Jr., P.W., and Berry, K.J., 1994, Predicting Atlantic basin seasonal tropical cyclone activity by 1 June, *Weather and Forecasting*, 9, 103-115.
- Ho, C.H., Kim, J.H., Kim, H.S., Sui, C.H., and Gong, D.Y., 2005, Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 110, D19104.
- Kalnay, E. and Coauthors, 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kistler, R. and Coauthors, 2001, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- Liu, K.B. and Fearn, M.L., 2000, Reconstruction of Prehistoric Landfall Frequencies of Catastrophic Hurricanes in Northwestern Florida from Lake Sediment Records. *Quaternary Research*, 54, 238-245.

- McCloskey, T.A. and Knowles, J.T., 2009, Migration of the tropical cyclone zone throughout the Holocene. *Hurricanes and Climate Change*. New York: Springer. ISBN 978-0-387-09409-0.
- Neumann, C.J., 1993, Global overview, In *Global guide to tropical cyclone forecasting*, edited by Holland, G.J., 1.1-1.56. Technical Document WMO/TC-No. 560, Report No. TCP-31. Geneva: World Meteorological Organization.
- Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., and Wang, W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate, *Journal of Climate*, 15, 1609-1625.
- Scott, D.B., Collins, E.S., Gayes, P.T., and Wright, E. 2003, Records of prehistoric hurricanes on the South Carolina coast based on micropaleontological and sedimentological evidence, with comparison to other Atlantic Coast records. *Geological Society of America Bulletin*, 115, 1027-1039.
- Wang, B. and Chan, J.C.L., 2002, How strong ENSO affect tropical storm activity over the western North Pacific, *Journal of Climate*, 15, 1643-1658.
- Wu, M.C., Chang, W.L., and Leung, W.M., 2004, Impacts of El Niño-Southern Oscillation events on tropical cyclone landfalling activity in the western North Pacific, *Journal of Climate*, 15, 1419-1431.

2013년 4월 16일 접수
 2013년 5월 24일 수정원고 접수
 2013년 6월 4일 채택