

ORIGINAL ARTICLE

남중국해 여름몬순과 ENSO와의 가능한 상관관계

최재원* · 박기준 · 김정윤 · 김백조

국립기상연구소 정책연구과

Relationship of South China Sea summer monsoon with ENSO

Choi Jae-Won*, Ki-Jun Park, Jeoung-Yun Kim, Baek-Jo Kim

Policy Research Department, National Institute of Meteorological Research, Jeju 697-845, Korea

Abstract

This study analyzed a correlation between South China Sea summer (June to September) monsoon (SCSSM) and the ENSO for the last 32 years (1979 to 2010). There was a correlation that the higher (lower) the SST in the Niño-3.4 region was, the weaker (stronger) the SCSSM intensity was. To identify the reason for this correlation, a difference of means between 8 El Niño years and 8 La Niña years (June to September).

The analysis on the difference between two groups with respect to the 850 hPa stream flows showed that there were anomalous huge cyclones in the subtropical Pacific in the both hemispheres so that cold and dry anomalous northerlies were strengthened in the South China Sea relatively while anomalous westerlies were strengthened from the Maritime Continent to the off the coast of Chile. The analysis on the difference between two groups with respect to the 200 hPa stream flows showed that the opposite anomalous pressure system pattern to that in the 850 hPa stream flows were shown. In the subtropical Pacific of the both hemispheres, anomalous anticyclones existed so that anomalous easterlies were strengthened from the Maritime Continent to the equatorial central Pacific. Considering the anomalous atmospheric circulations in the upper and lower layers of the troposphere, upward airflows from the equatorial central and eastern Pacific were downward in the South China Sea and the Maritime Continent, which was a structure of anomalous atmospheric circulations. This means that the Walker Circulation was weakened and it was a typical structure of atmospheric circulations revealed in El Niño years.

Key words : South China Sea summer monsoon, ENSO, Walker Circulation

1. 서론

남중국해는 아시아-호주 몬순 시스템의 중심에 위치해 있고, 동아시아 몬순과 북서태평양 몬순의 중간지역에 위치해 있기 때문에 남중국해 여름몬순은 아시아 여름몬순의 중요한 요소이다(Murakami와 Matsumoto, 1994; Wang 등, 2009). 비록 남중국해 여름몬순 시작의

정의 및 영역에 대한 합의가 아직 정확하게 일치하지 않지만(So와 Chan, 1997; Wang과 Wu, 1997; Li와 Mu, 1999), 남중국해 여름몬순의 가장 뚜렷한 특징들 중의 하나는 5월 중순에 남중국해 전역에 걸쳐 갑작스러운 여름몬순의 시작이다(Lau와 Yang, 1997; Wang과 Xu, 1997; Wang과 LinHo, 2002). 5°N와 15°N사이에서 남중국해 지역에 대류권 하층 여름몬순 전 동풍으로부터 여름몬순

Received 17 April, 2015; Revised 8 June, 2015;

Accepted 11 June, 2015

*Corresponding author : Choi Jae-Won, Policy Research Department,
National Institute of Meteorological Research, Jeju 697-845, Korea
Phone: +82-64-780-6537
E-mail: choiks@kma.go.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서풍으로의 풍향의 역전과 북남중국해(10°-20°N)에서 집중호우로서 강화된 대류가 동반되는 특징이 있다.

최근 남중국해 여름몬순을 포함하여 북서태평양 몬순의 십년간 변동에 대해 토론되어 왔다(Ryu와 Kim, 2002; Kwon 등, 2005, 2007; Kim 등, 2008). Kwon 등 (2005)은 동아시아 여름몬순에서 상당한 십년변동이 있으며, 이 십년변동은 북서태평양 여름몬순과도 연관됨을 발견하였다. Yim 등 (2008)은 하이브리드 모델 수치실험의 장기간 적분에서 유사한 십년간 변동이 있음을 발견하였다. Wang 등 (2009)은 1993년 이후로 여름 및 가을 강수량이 중국 남부지역과 북남중국해에서 증가하였지만, 중앙 남중국해에서는 감소하였을 보였다. 그들은 역시 계절-의존 경험적 직교함수를 근거로 계절성에서 십년간 변동이 있음을 주목하였다. 그러나 이러한 십년간 변동의 세부사항은 아직 완전히 분석되지 못했으며, 가능한 메커니즘 역시 여전히 규명되지 못한 채 남아있다. 게다가 1993/1994년 근처에서의 십년간 변동은 역시 북반구 여름 동안 남중국해에서 계절안 변동의 시공간적 구조에 있음이 발견되었다(Kajikawa 등, 2009). 또한 Kajikawa와 Wang (2012)은 남중국해 여름몬순 시작에서 1993/1994년에 뚜렷한 십년간 변동이 존재함을 발견하였다. 그들은 첫 십년 동안의 비교적 늦은 시작은 열대 수렴 지역(intertropical convergence zone, ITCZ)의 북쪽으로의 계절적 이동에 의해 결정되었으며, 두번째 십년 동안의 비교적 늦은 시작은 적도 서태평양으로부터 북쪽으로 이동하는 열대 요란의 강화된 활동에 영향을 받음을 확인하였다.

따라서 남중국해 여름몬순의 시작은 아시아 여름몬순 변동을 이해하는데 상당한 기여를 하며, 서태평양과 중태평양에서의 대기순환이 남중국해 여름몬순 시스템에 상당한 영향을 미친다. 남중국해 여름몬순의 시작은 동아시아와 북서태평양에서 여름우기의 시작으로 상정된다(Tao와 Chen, 1987; Ding, 1992; Wang과 LinHo, 2002; Ryu와 Sohn, 2009). 게다가, 남중국해 여름몬순의 연변화는 북반구 여름에 동아시아 기후변동과 인도양 기후변동에 상당한 영향을 준다(Nitta, 1987; Kajikawa 등, 2003). 남중국해 여름몬순 시작의 빠르고 늦음은 동아시아 여름몬순의 강수 패턴 및 강수량에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

많은 연구자들은 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern

Oscillation, ENSO)와 동아시아 여름몬순 및 북서태평양 여름몬순과의 관련성을 설명하기 위해 노력해 왔다(e.g., Ju와 Slingo, 1995). Wang 등 (2000)은 엘니뇨-남방진동 사례 동안 필리핀의 동쪽으로 고기압 아노말리와 함께 태평양-동아시아(Pacific-East Asian, PEA) 원격상관을 통해 동아시아 기후에 영향을 미침을 발견한바 있다. Zhang 등 (1996)은 적도 서태평양에서 대류활동의 변화를 통해 동아시아 여름몬순에 대한 엘니뇨의 효과를 강조하였다. Oort와 Yienger (1996)은 라니냐(엘니뇨) 동안 지역적 해들리 순환이 열대서태평양에서 약화(강화)되어지고, 열대 동태평양에서는 강화(약화)되어짐을 발견하였다. 그러나 엘니뇨-남방진동과 남중국해 여름몬순 사이에 관계에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. Zhou 등 (2007)은 온난(한랭) 엘니뇨-남방진동 해에는 남중국해 여름몬순 시작이 늦어(빨라)지고 남중국해 여름몬순 강도는 약(강)해짐을 보인바 있다. 이러한 배경에서 이 연구에서는 남중국해 여름몬순 강도가 엘니뇨-남방진동과 밀접한 연관성을 찾아보고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1. 자료

한편 이 연구는 1979-2010년 동안의 미국 국립환경예측센터-국립대기연구센터(National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR) 재분석 자료의 지위고도(gpm), 기온(°C), 상대습도(%), 동서 및 남북류(ms^{-1}), 가강수량(kgm^{-2})의 변수를 사용하였다(Kalnay 등, 1996; Kistler 등, 2001). 이 재분석 자료는 위경도 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 및 17개의 연직층(상대습도는 16층)과 같은 공간해상도로 이루어져 있다.

또한 미국 국립대기해양청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 월평균 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)(Reynolds 등, 2002) 자료가 사용되었다. 이 자료는 위경도 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ 수평 공간해상도로 구성되어 있고, 1854년부터 현재까지 이용 가능하다.

미국 NOAA 산하의 기후예측센터(Climatic Prediction Center, CPC)에서 제공하는 월평균 강수량 자료를 사용하였다(Xie와 Arkin, 1997). 이 자료는 국립환경예측센터

타-국립대기예측센터의 재분석 자료와 같은 수평 공간해상도를 가지고 있으며, 1979년부터 현재까지 이용 가능하다. 이 강수량 자료는 해양까지 커버하는 전 지구자료로서 우량계 관측데이터, 위성자료 및 수치모델 자료를 이용하여 산출되었다.

역시, NOAA 위성 시리즈로부터 산출된 외향장파복사 자료가 사용되었다. 이 자료는 기후진단센터(Climatic Diagnosis Center, CDC)에서 제공하며, 1974년 6월부터 사용가능하다. 그러나 1978년 3월부터 12월의 기간 동안 유실기간이 존재하며, 외향장파복사자료에 대한 좀더 자세한 사항은 CDC 웹사이트(<http://www.cdc.noaa.gov>) 또는 Liebmann과 Smith (1996)의 논문을 참고하기 바란다.

미국 NOAA 산하의 기후예측센터(Climatic Prediction Center, CPC)에서 제공하는 월평균 강수량 자료를 사용하였다(Xie와 Arkin, 1997). 이 자료는 국립환경예측센터-국립대기예측센터의 재분석 자료와 같은 수평 공간해상도를 가지고 있으며, 1979년부터 현재까지 이용 가능하다. 이 강수량 자료는 해양까지 커버하는 전 지구자료로서 우량계 관측데이터, 위성자료 및 수치모델 자료를 이용하여 산출되었다.

태풍자료는 지역특별기상센터-동경 태풍센터(Regional Specialized Meteorological Center (RSMC)-Tokyo Typhoon Center)에서 제공하는 태풍의 최적경로(best-track) 자료로부터 획득되었다. 이 자료는 1979-2010년 동안 매 6시간 간격으로 관측된 태풍 이름, 위경도 위치, 중심기압, 중심 최대풍속의 정보로 구성된다. 태풍은 일반적으로 중심 최대풍속을 기준으로 네 등급으로 나뉘어진다: 열대 저압부(Tropical Depression, 중심최대풍속 $< 17\text{ms}^{-1}$), 열대폭풍(Tropical Storm, $17\text{ms}^{-1} \leq$ 중심최대풍속 $\leq 24\text{ms}^{-1}$), 격렬한 열대폭풍(Severe Tropical Storm, $25\text{ms}^{-1} \leq$ 중심최대풍속 $\leq 32\text{ms}^{-1}$), 태풍(Typhoon, 중심최대풍속 $\geq 33\text{ms}^{-1}$). 위의 네 등급에 더하여 이 연구에서는 태풍으로부터 변형된 온대저기압(extratropical cyclone)도 분석에 포함시켰다. 이는 이러한 온대 저기압도 동아시아 중위도 지역에서 많은 재산과 인명피해를 입히기 때문이다. 이 연구에서 태풍은 이 다섯 등급을 모두 포함하는 것으로 정의된다.

2.2. 분석방법

이 연구에서 태풍 이동빈도를 계산하기 위해서 각 태풍은 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 격자내에 위치시킨 후 계산되었으며, 태풍이 같은 격자내에 여러 번 이동하여도 한번 이동한 것으로 간주하였다. 태풍의 발생빈도 역시 이와 같은 방법으로 계산되었다.

두 평균 사이의 유의성 비교는 독립표본 t-검정 (independent two-sample t-test)을 사용하였다. 두 독립변수의 시계열이 t-분포를 따르고, 표본의 평균이 각각 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 로 정의될 경우, t-검정의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{x_1x_2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (1)$$

여기서 S_1 , S_2 는 표준편차이고 n_1 , n_2 는 두 시계열에서 총 개수이다. 만약 위의 식으로부터 t의 절대값이 유의수준의 문턱값보다 크게 산출되면, 귀무가설(null hypothesis)은 $\alpha(\times 100)\%$ 의 신뢰수준에서 기각된다(Wilks, 1995).

온란, 한랭, 노말 엘니뇨-남방진동 해를 정의하기 위하여, Niño-3.4 지역($5^{\circ}\text{S}-5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}-120^{\circ}\text{W}$)에서 6-9월 동안의 해수면 온도 아노말리(sea surface temperature anomalies, SSTa)를 사용하여 아래와 같이 분류하였다.

- warm : SSTa $\geq 0.5^{\circ}\text{C}$
- cold : SSTa $\leq -0.5^{\circ}\text{C}$
- normal : $-0.5^{\circ}\text{C} < \text{SSTa} < 0.5^{\circ}\text{C}$

여기서, SSTa를 얻기 위하여, Niño-3.4지역에서 6-9월 동안 32년 평균 해수면 온도자료가 사용되었다.

이 연구에서 여름은 6-9월의 기간으로 정의된다.

Niño-3.4지역에서 평균된 노말라이즈 된 850 hPa and 200 hPa 동서바람 지수는 NOAA CPC의 웹사이트에서 제공받았다(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>).

2.3. 남중국해 여름몬순 지수의 정의

이 연구에서 남중국해 여름몬순 지수는 Li와 Zeng (2002, 2003, 2005)의 Dynamical Normalized Seasonality (DNS) 지수를 이용하여 정의되었다. DNS 지수의 기본 개념은 바람장의 노말라이즈 된 계절성의 강도에 근거로 둔다. 몬순은 풍향의 매우 강한 계절변동을 가지기 때문에, 강하고 약한 몬순은 바람장의 계절성의 크기를 사용함으로써 정의되는 것이 타당하다. 몬순에 대한 이러한 기본 개념을 이용하여 DNS 지수는 다음과 같은 방정식으로 계산된다.

$$\delta_{mn} = \frac{\| \bar{V}_1 - V_{mn} \|}{\| \bar{V} \|} - 2 \quad (2)$$

여기서 \bar{V}_1 과 \bar{V} 는 1월 기후학적 평균 바람벡터와 1월과 7월의 기후학적 평균 바람벡터를 각각 의미하며, V_{mn} 은 년 n 과 월 m 에 대한 월 평균 바람벡터를 의미한다. 이후 남중국해 여름몬순 지수는 남중국해 영역(Fig. 1, 0°-25°N, 110°E-120°E) (Li와 Zeng, 2003)내에서 850 hPa에서 영역평균 된 계절성(6-9월) DNS로 정의된다. 이들 연구결과에서 위의 방정식을 통해 계산된 남중국해 여름몬순 지수와 남중국해에서 6-9월 강수량 사이

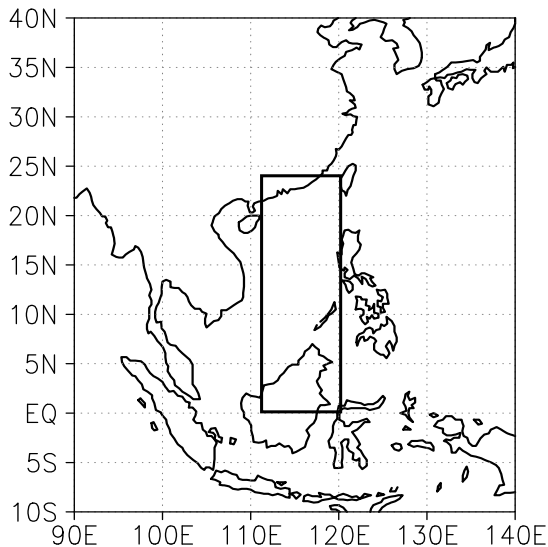


Fig. 1. Definition of South China Sea (SCS) domain (0°-25°N, 110°E-120°E) in this study.

에 뚜렷한 음의 상관성이 있었음을 보임으로서 위의 남중국해 여름몬순의 정의가 타당함을 증명하였다. 즉 남중국해 여름몬순 지수가 높(낮)을수록 남중국해 여름몬순은 약(강)함을 의미한다.

3. 남중국해 여름몬순과 엘니뇨-남방진동과의 상관분석

Figure 2은 6-9월 평균 남중국해 여름몬순 지수와 Niño-3.4 지수의 시계열을 보여준다. 두 변수 모두 최근까지 감소하는 경향을 나타낸다. 전체적으로 두 시계열 모두 연변동과 십년간 변동이 뚜렷하다. 또한 Niño-3.4 지수의 감소경향은 통계적으로 유의하지 않지만 남중국해 여름몬순 지수의 감소경향은 90% 신뢰수준에서 유의하다. 한편 두 시계열 사이에는 동위상 관계가 뚜렷하다. 따라서 두 변수 사이에 상관을 분석한 결과 0.64의 높은 양의 상관관계가 존재하였으며, 이 상관관계는 99% 신뢰수준에서 유의하다. 이는 Niño-3.4 지수가 높(낮)을수록 남중국해 여름몬순 지수는 약(강)화됨을 의미한다.

따라서 이 연구는 6-9월 평균 8개 엘니뇨 해(1982, 1986-87, 1991, 1997, 2002, 2004, 2009)의 평균과 8개의 라니냐 해(1985, 1988, 1995, 1998-2000, 2007, 2010)의 평균차가 분석된다.

4. 엘니뇨 해와 라니냐 해 사이의 차

엘니뇨 해와 라니냐 해 사이에 대류활동의 차를 알아보기 위해 외향장파복사에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다(Fig. 3a). 열대 및 아열대 서태평양으로부터 남중국해를 거쳐 Maritime Continent에 강한 양의 아노말리를 나타낸다. 반면에 적도 태평양을 따라 동서방향으로 강한 음의 아노말리가 존재한다. 이는 엘니뇨 해에 나타나는 전형적인 공간분포이다. 외향장파복사는 값이 적을수록 대류가 활발하다는 것을 의미한다. 따라서 열대 및 아열대 서태평양으로부터 남중국해를 거쳐 Maritime Continent에는 대류가 약한 반면, 적도 태평양에서는 대류가 강함을 알 수 있다.

두 그룹 사이에 이러한 대류활동의 차는 가강수량 및 강수량에 대한 두 그룹 사이의 차에 반영되어 나타난다(Fig. 3b, 3c). 먼저 가강수량의 분석에서 양의 아노말리는 양반구의 열대 및 아열대 태평양에서 나타나며, 그 중

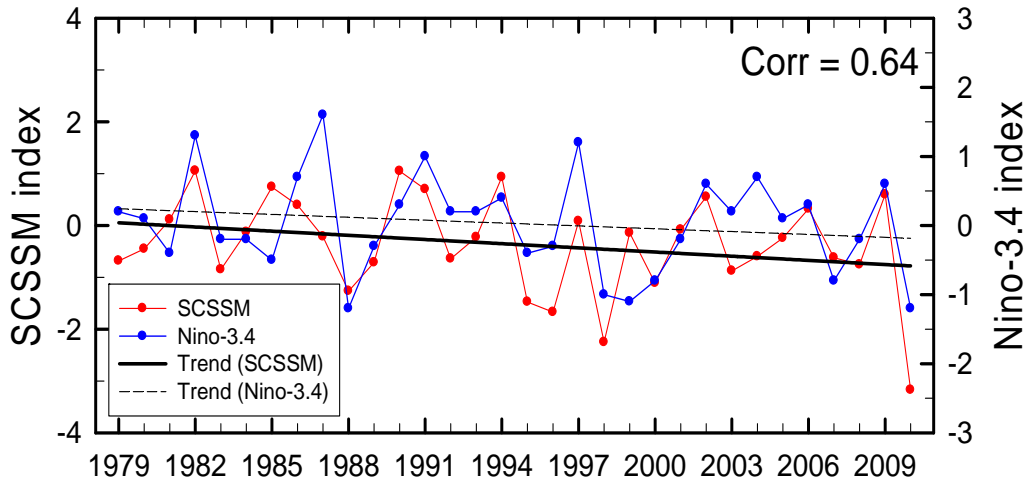


Fig. 2. Time series of South China Sea summer monsoon (SCSSM) index and Niño-3.4 index and their trends for June-September (JJAS).

심은 적도 태평양에 위치해 있다(Fig. 3b). 그 이외의 지역에서는 대부분 음의 아노말리가 형성되어 있다. 강수량 분석의 결과는 외향장파복사 분석결과와 반대의 공간 분포를 보인다(Fig. 3c). 열대 및 아열대 서태평양으로부터 남중국해를 거쳐 Maritime Continent에는 강한 음의 아노말리가, 반면에 적도 태평양을 따라 동서방향으로는 강한 양의 아노말리가 형성되어 있다. 이 결과로부터 앞서 분석되었듯이 Niño-3.4 지수가 높을수록(즉 Niño-3.4 지역에서 해수면 온도가 높을수록) 남중국해 여름몬순 강도는 약해짐을 알 수 있다.

위에서 분석된 것처럼 라니냐 해보다 엘니노 해에 남중국해 여름몬순 강도가 약화되는 이유를 알아보기 위해 850 hPa 유선에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다(Fig. 4a). 양반구에 거대한 저기압성 순환 아노말리가 강화되어 있으며, 이 두 저기압 아노말리로부터의 북풍의 아노말리가 남중국해 남쪽해상에 합류하여 페루 앞바다를 향해 동쪽으로 이동하고 있다. 따라서 적도 태평양에는 서풍의 아노말리가 강화되어 있으며(무역풍의 약화), 남중국해 지역에서는 상대적으로 차고 건조한 북풍의 아노말리가 강화됨으로써 남중국해 여름몬순 강도가 약화될 수 있는 좋은 환경이 형성되어 있다.

200 hPa 유선에 대한 두 그룹 사이에 차의 분석결과에서는 850 hPa에서 보여진 기압계 패턴 아노말리와 정반대의 공간분포를 나타낸다(Fig. 4b). 양반구의 열대 및

아열대 태평양에 고기압성 순환 아노말리가 강화되어 있다. 양반구의 이러한 고기압 아노말리에 의해 적도 서태평양과 적도 중태평양에서는 동풍의 아노말리가 강화되어 있다. 이 결과를 앞서 분석된 대류권 하층의 대기순환과 연관시켜볼 때, 적도 중태평양과 적도 동태평양에서 상승한 기류가 남중국해 및 Maritime Continent에서 하강하는 대기순환이 강화되어 있음을 알 수 있다. 이는 위커 순환의 약화를 의미한다. 따라서 엘니노 해에는 약화된 위커 순환에 의해 남중국해 여름몬순 강도가 약화되었음을 알 수 있다.

실제로 라니냐 해보다 엘니노 해에 남중국해에서 좀더 차고 건조한 대기상태를 나타내는지 알아보기 위해 850 hPa 기온과 850 hPa 비습에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다(Fig. 5). 먼저 850 hPa 기온의 분석결과에서는 140°E 동쪽의 열대 및 아열대 서태평양에서는 온난 아노말리를 나타내는 반면 분석영역의 나머지 지역은 한랭 아노말리를 나타낸다(Fig. 5a). 850 hPa 비습의 분석결과에서도 140°E 동쪽의 열대 및 아열대 서태평양에서는 양의 아노말리를 나타내는 반면 분석영역의 나머지 지역은 음의 아노말리를 나타내고 있다(Fig. 5b). 따라서 앞서 분석되었던 것처럼 남중국해는 엘니노 해에 북풍의 아노말리가 강화됨으로써 라니냐 해보다 상대적으로 차고 건조한 대기상태를 나타냄을 알 수 있다.

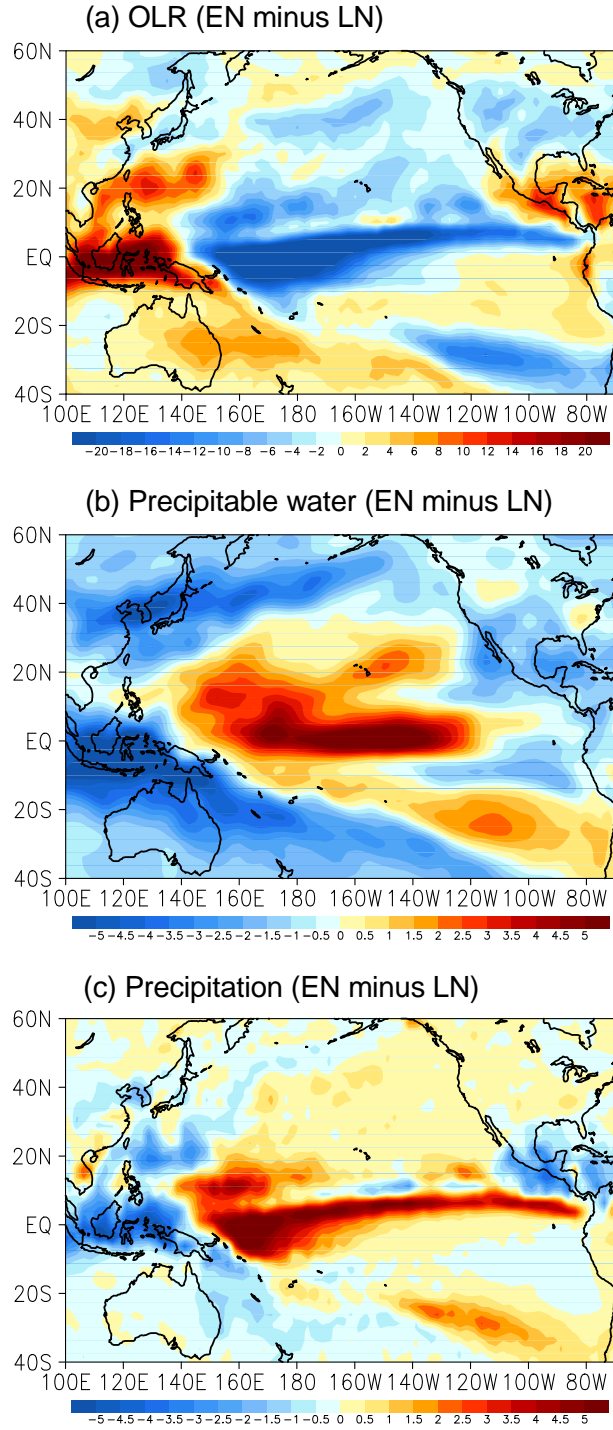


Fig. 3. Differences in (a) OLR, (b) precipitable water, and (c) precipitation between El Niño years and La Niña years.

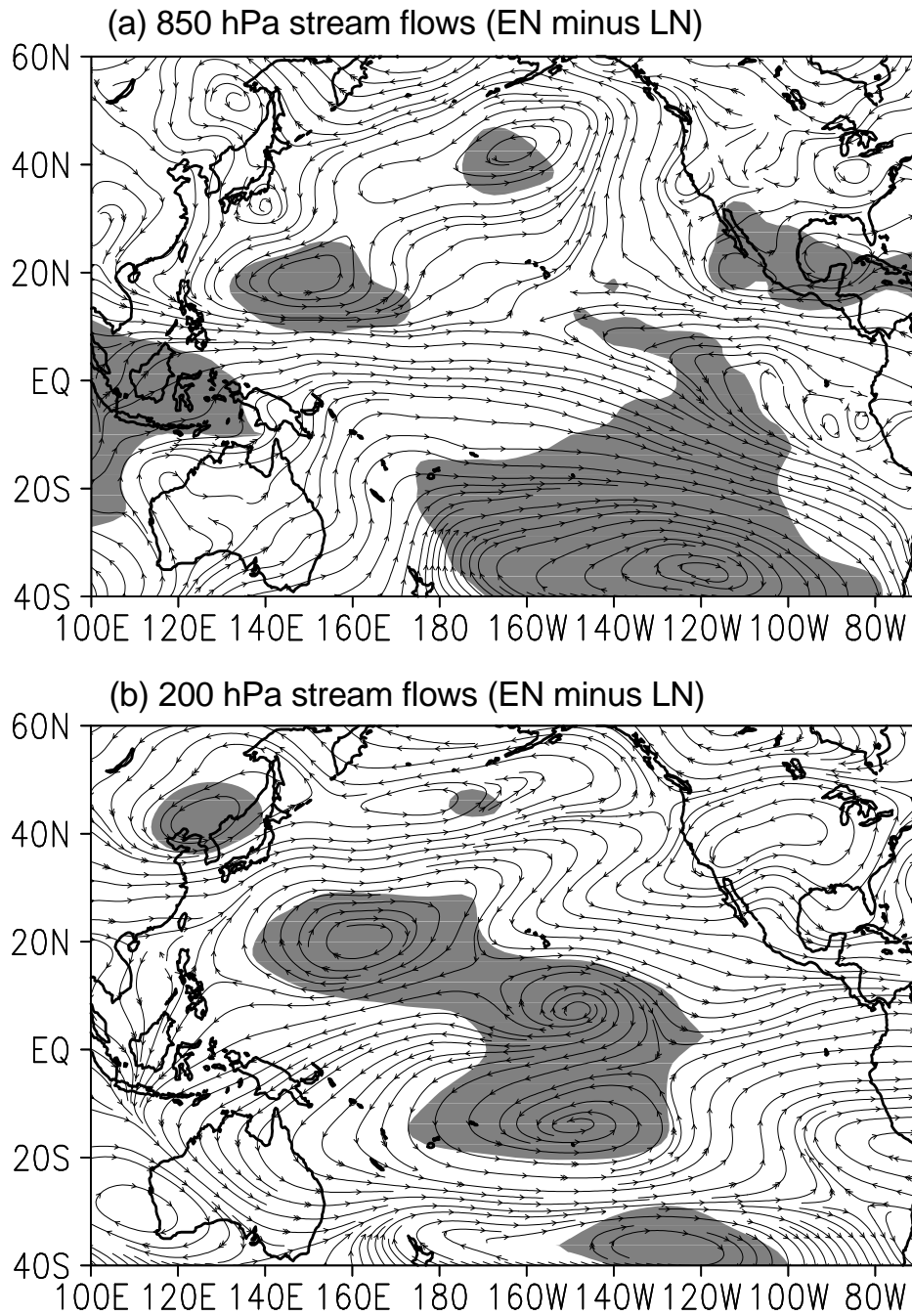


Fig. 4. Same as in Fig. 3., but for (a) 850 hPa stream flows and (b) 200 hPa stream flows. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

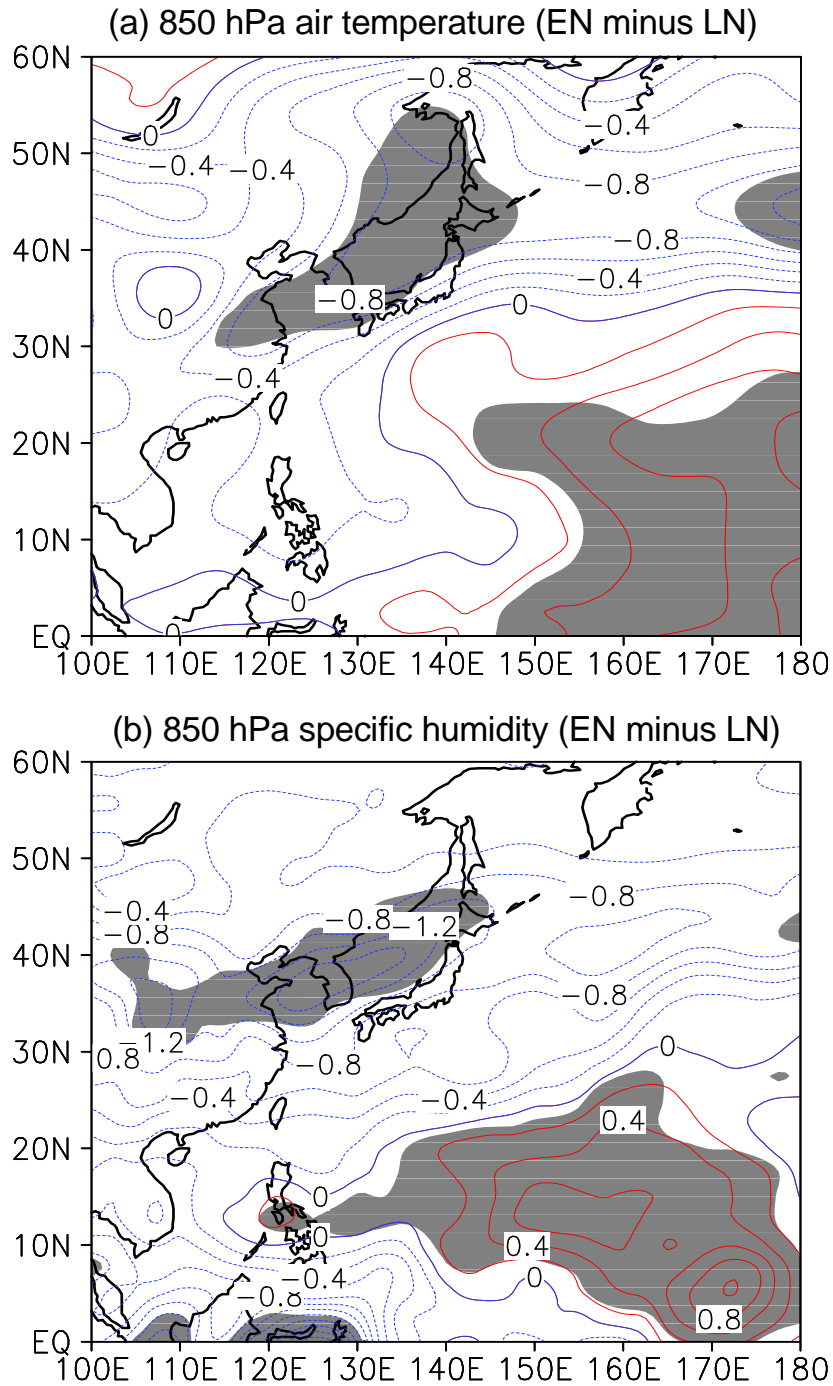


Fig. 5. Same as in Fig. 3., but for (a) 850 hPa air temperature and (b) 850 hPa specific humidity. Contour intervals are 0.2°C for 850 hPa air temperature and 0.2 g kg^{-1} . Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

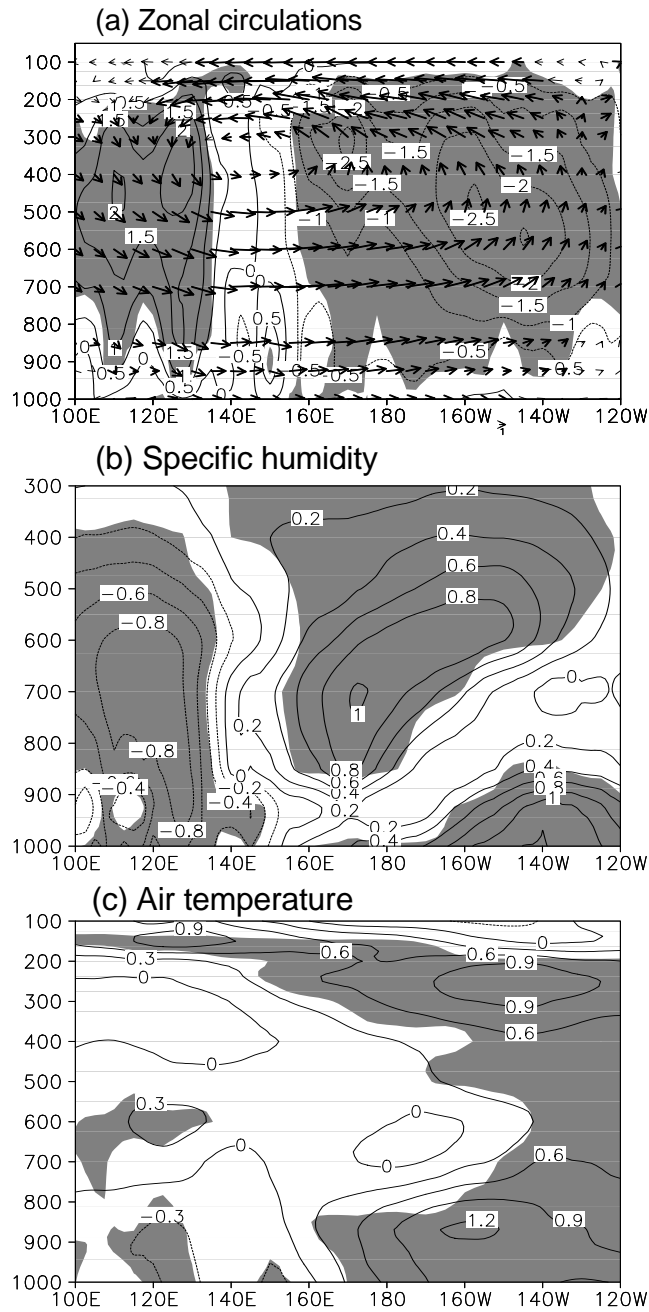


Fig. 6. Composite differences of longitude - pressure cross section of (a) vertical velocity (contours) and zonal circulations (vectors), (b) specific humidity, and (c) air temperature averaged along 0°-20°N between El Niño years and La Niña years for JJAS. The values of vertical velocity are multiplied by -100. Bold arrows and shaded areas are significant at the 90% confidence level. Contour intervals are 0.5⁻²hPa s⁻¹ for vertical velocity, 0.2 g kg⁻¹ for specific humidity, and 0.3°C for air temperature, respectively.

엘니뇨 해에 워커 순환이 더 약화되는지를 알아보기 위해 남중국해의 위도대 (0-25°N)를 평균한 연직동서 대기순환에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다 (Fig. 6a). 적도 중태평양과 적고 동태평양에서 상승한 기류는 서쪽으로 이동한 후 남중국해 및 필리핀 부근해역에서 하강하여 다시 동쪽으로 이동하는 연직 동서 대기순환 아노말리가 강화되어 있다. 이러한 대기순환은 워커 순환과 반대의 패턴으로 엘니뇨 해에 워커 순환이 더욱 약화되었음을 의미한다. 따라서 라니냐 해보다 엘니뇨 해에 워커 순환이 더욱 약화됨으로써 남중국해 여름몬순 강도가 약화되었음을 알 수 있다.

남중국해의 위도대를 평균한 연직비습 분포와 연직 기온 분포에 대해 두 기간 사이에 차를 살펴보았다(Fig. 6b, 6c). 먼저 비습의 분석에서 남중국해를 포함한 150°E의 서쪽지역은 대류권 전 층에서 음의 아노말리를 보이는 반면, 동쪽지역은 대류권 전 층에서 양의 아노말리가 강화되어 있다(Fig. 6b). 기온의 분석에서 170°E의 서쪽 지역은 대류권 대부분의 층에서 한랭 아노말리를 나타내는 반면, 동쪽지역은 대류권 대부분의 층에서 온난 아노말리를 나타낸다(Fig. 6c). 이는 연직 동서 대기순환에 대해 두 그룹 사이에 차에서 분석되었듯이 라니냐 해보다 엘니뇨 해에 워커 순환이 약화되었기 때문임을 알 수

있다.

실제로 해수면 온도에 대한 두 그룹 사이에 차에서 엘니뇨 패턴의 해수면 온도분포가 나타나는지를 알아보기 위해 해수면 온도에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다(Fig. 7). 북미 서부해안으로부터 적도 중태평양과 적도 동태평양을 거쳐 남미 서부해안까지 온난 아노말리가 강화되어 있으며, 온난 아노말리의 중심은 적도 중태평양과 적도 동태평양에 위치해 있다. 그 외에 지역인 양반구의 열대 및 아열대 서태평양에서는 한랭 아노말리가 강화되어 있다. 이러한 해수면 온도의 공간분포는 엘니뇨 해에 나타나는 전형적인 해수면 온도의 공간패턴이다. 이는 앞서 설명하였듯이 엘니뇨 해에 워커 순환의 약화로 인해 적도 편서풍 아노말리가 강화되었기 때문이다. 이 결과로부터 엘니뇨(라니냐) 현상이 강화될수록 남중국해 여름몬순 강도가 약(강)화됨을 알 수 있다.

엘니뇨 해에 워커 순환의 약화가 남중국해 여름몬순 강도의 약화와 연관되는지 알아보기 위해 Niño-3.4 지역에서 영역평균 된 6-9월 평균 850 hPa 동서류와 6-9월 평균 200 hPa 동서류의 시계열을 남중국해 여름몬순 지수의 시계열과 비교하였다(Fig. 8). 먼저 850 hPa 동서류의 시계열에서 전체적으로 연변동 및 십년간 변동이 뚜렷함을 볼 수 있다. 또한 850 hPa 동서류는 최근까지

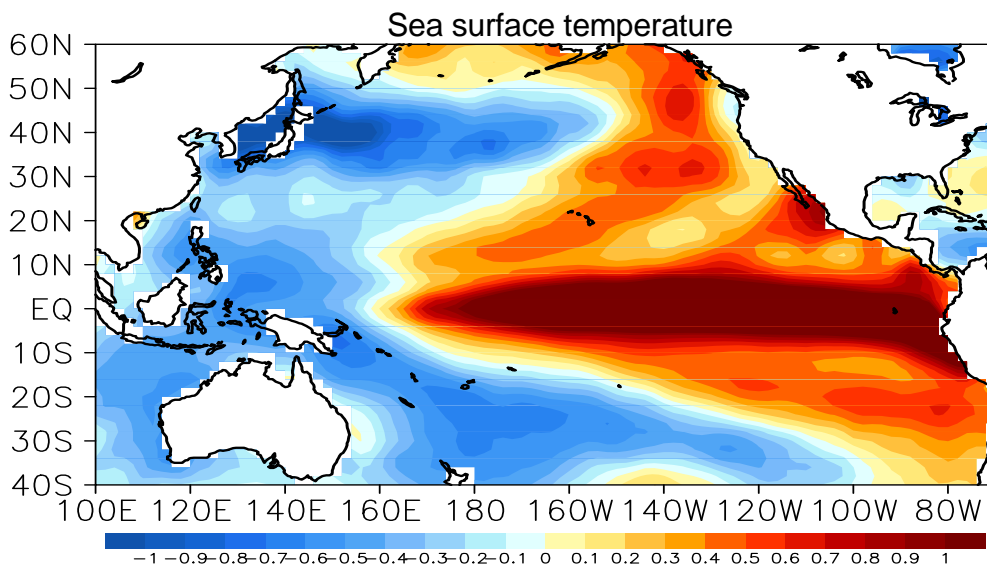


Fig. 7. Same as in Fig. 3., but for sea surface temperature (SST).

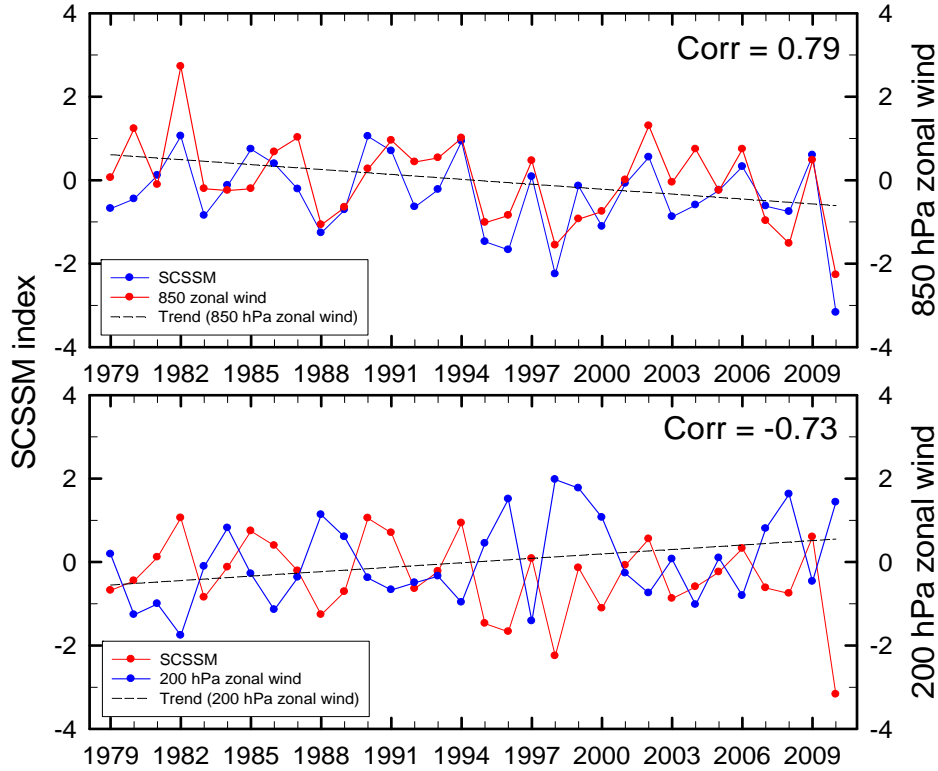


Fig. 8. Time series of SCSSM index and (a) 850 hPa zonal wind and (b) 200 hPa zonal wind averaged for Niño-3.4 region (5°S-5°N, 170°E-120°W).

감소하는 경향을 보이며, 이 감소 경향은 90% 신뢰수준에서 유의하다. 한편 두 변수 사이에는 동위상 관계가 뚜렷함을 알 수 있으며, 두 변수 사이에는 0.79의 높은 양의 상관관계가 존재함을 볼 수 있다. 이 양의 상관관계는 99% 신뢰수준에서 유의하다. 이는 적도 중태평양과 적도 동태평양의 대류권 하층에서 서풍(동풍)이 강화될수록 남중국해 여름몬순 강도는 약(강)해짐을 의미한다.

200 hPa 동서류의 시계열에서도 전체적으로 연변동 및 십년간 변동이 뚜렷함을 볼 수 있다. 또한 200 hPa 동서류는 최근까지 증가하는 경향을 보이며, 이 증가 경향은 95% 신뢰수준에서 유의하다. 한편 두 변수 사이에는 반대의 위상이 뚜렷함을 알 수 있으며, 두 변수 사이에는 -0.73의 높은 음의 상관관계가 존재함을 볼 수 있다. 이 음의 상관관계는 99% 신뢰수준에서 유의하다. 이는 적도 중태평양과 적도 동태평양의 대류권 상층에서 동풍(서풍)이 강화될수록 남중국해 여름몬순의 강도는 약(강)

해짐을 의미한다. 따라서 위의 상관분석결과로부터 엘니뇨 해에 워커 순환의 약화가 남중국해 여름몬순 강도의 약화와 연관됨을 다시 한번 더 확인할 수 있다.

한편 남중국해의 여름 강수량의 변동에서 태풍의 영향을 무시할 수 없다. 따라서 5°×5° 격자마다 태풍 이동 빈도에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다(Fig. 9). 엘니뇨 해에 태풍들은 주로 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 일본동쪽해상으로 북상하여 오후츠크 해 동쪽해상으로 이동하는 반면, 라니냐 해에 태풍들은 필리핀으로부터 남중국해를 지나 중국남부지역에 상륙한 뒤 한반도를 향해 북진하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 엘니뇨 해에 태풍들이 라니냐 해에 태풍들보다 좀 더 동쪽지역에서 이동함을 보인 Wang과 Chan (2002)의 결과와 일치한다. 따라서 엘니뇨 해에는 남중국해에서 태풍 빈도까지 낮음으로써 남중국해 여름몬순 강도의 약화에 영향을 줄 수 있다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 최근 32년 (1979-2010년) 동안 남중국해 여름(6-9월) 몬순과 엘니뇨-남방진동 사이에 상관관계를 분석하였다. Niño-3.4 지역에서의 해수면 온도가 높(낮)을수록 남중국해 여름몬순 강도는 약(강)화되는 상관관계가 존재하였다. 이러한 상관관계의 원인을 알아보기 위해 6-9월 평균 8개 엘니뇨 해의 평균과 8개 라니냐 해의 평균 사이에 차를 분석하였다.

외향장파복사, 가강수량, 강수량에 대한 두 그룹 사이에 차의 분석에서는 열대 서태평양으로부터 남중국해를 거쳐 Maritime Continent에서는 대류활동이 약화된 반면, 적도 태평양에서는 강화되는 공간분포를 보였다.

850 hPa 유선에 대한 두 그룹 사이에 차의 분석에서는 양반구의 열대 및 아열대 태평양에 거대한 저기압 아노말리가 존재하여 남중국해는 상대적으로 차고 건조한 북풍 아노말리가 강화되었으며, Maritime Continent으로부터 칠레 앞바다까지 서풍 아노말리가 강화되었다. 200 hPa 유선에 대한 두 그룹 사이에 차의 분석에서는 850 hPa 유선에 대한 두 그룹 사이에 차의 분석에서 보여진 결과와 반대의 기압계 패턴 아노말리를 나타내었다. 양반구의 열대 및 아열대 태평양에서는 고기압 아노말리가 존재하였으며, 이로 인해 Maritime Continent으로부터 적도 중태평양에서는 동풍 아노말리가 강화되었다. 대류권 상하층의 대기순환 아노말리를 함께 고려해 볼 때, 적도 중앙 태평양 및 적도 동태평양에서 상승한 기류가 남중국해 및 Maritime Continent에서 하강하는 대기순환 아노말리의 구조를 나타내었다. 이는 워커 순환이 약화되었음을 의미하며, 엘니뇨 해에 나타나는 전형적인 대기순환 구조였다.

엘니뇨 해에 워커 순환이 약화되는지를 알아보기 위해 남중국해의 위도대(0-25°N)를 평균한 연직 동서 대기순환에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다. 적도 중태평양 및 적도 동태평양에서 상승한 기류는 서쪽으로 이동한 후 남중국해 및 필리핀 부근해역에서 하강하여 다시 동쪽으로 이동하는 연직 동서 대기순환 아노말리가 강화되어 있었다. 남중국해의 위도대를 평균한 연직 비습분포와 연직 기온분포에 대한 두 기간 사이에 차의 분석에서는 남중국해를 포함한 150°E의 서쪽지역은 대류권 전 층에서 차고 건조한 대기상태를 보이는 반면, 동쪽

지역은 대류권 전 층에서 온난습윤한 대기상태를 나타내었다. 이러한 대기순환 및 대기상태는 워커 순환과 반대 패턴으로 엘니뇨 해에 워커 순환이 더욱 약화되었음을 의미하였다. 따라서 라니냐 해보다 엘니뇨 해에 워커 순환이 더욱 약화됨으로써 남중국해 여름몬순 강도가 약화되었음을 알 수 있었다.

실제로 엘니뇨 해에 워커 순환의 약화가 남중국해 여름몬순 강도의 약화와 연관되는지 알아보기 위해 Niño-3.4 지역에서 영역평균 된 6-9월 평균 850 hPa 동서류와 6-9월 평균 200 hPa 동서류의 시계열을 남중국해 여름몬순 지수의 시계열과 비교하였다. 850 hPa 동서류와 남중국해 여름몬순 지수 사이에는 높은 양의 상관관계를, 200 hPa 동서류와 남중국해 여름몬순 지수 사이에는 높은 음의 상관관계를 나타냄으로써 엘니뇨에 워커 순환이 더욱 약화되었음을 다시 한번 확인할 수 있었다.

남중국해 여름몬순에 대한 태풍의 영향을 알아보기 위하여 따라서 5°×5°격자마다 태풍 이동빈도에 대해 두 그룹 사이에 차를 분석하였다. 엘니뇨 해에 태풍들은 주로 필리핀 먼 동쪽해상으로부터 일본동쪽해상으로 북상하여 오후츠크 해 동쪽해상으로 이동하는 반면, 라니냐 해에 태풍들은 필리핀으로부터 남중국해를 지나 중국남부지역에 상륙한 뒤 한반도를 향해 북진하는 경향을 나타내었다. 따라서 엘니뇨 해에는 남중국해에서 태풍 빈도까지 낮음으로써 남중국해 여름몬순 강도의 약화에 영향을 줄 수 있었다.

이 연구는 남중국해 여름몬순 강도가 엘니뇨-남방진동과 밀접하게 연관됨을 살펴보았다. 따라서 엘니뇨-남방진동은 남중국해 여름몬순의 계절예측에 중요한 예측인자로서 활용가능하며, 차후 연구에서는 엘니뇨-남방진동을 이용하여 남중국해 여름몬순의 계절예측을 위한 통계모델을 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 2015년 주요사업 “예보기술지원활용연구(NIMR-2015-B-1)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

- Ding, Y.H., 1992, Summer monsoon rainfalls in China, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 70, 373-396.
- Ju, J., Slingo, J., 1995, The Asian summer monsoon and ENSO, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121, 1133-1168.
- Kajikawa, Y., Yasunari, T., Kawamura, R., 2003, The role of the local Hadley circulation over the western Pacific on the zonally asymmetric anomalies over the Indian Ocean, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81, 259-276.
- Kajikawa, Y., Yasunari, T., Wang, B., 2009, Decadal change in intraseasonal variability over the South China Sea, *Geophysical Research Letters*, 36, L06810, doi:10.1029/2009gl037174.
- Kajikawa, Y., Bin, W., 2012, Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset, *Journal of Climate*, 25, 3207-3218.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., co-authors, 1996, The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kim W. M., Jhun, J. G., Moon, B. K., 2008, The interdecadal variation of relationship between Indian Ocean sea surface temperature and East Asian summer monsoon, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 29, 45-59.
- Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., co-authors, 2001, The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation, *Bulletin of American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- Kwon, M., Jhun, J.G., Wang, B., An, S.I., Kug, J.S., 2005, Decadal change in relationship between east Asian and WNP summer monsoons, *Geophysical Research Letters*, 32, L16709, doi:10.1029/2005gl023026.
- Kwon, M., Jhun, J.G., Ha, K.J., 2007, Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s, *Geophysical Research Letters*, 34, L21706, doi:10.1029/2007GL031977.
- Lau, K.M., Yang, S., 1997, Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon, *Advances in Atmospheric Sciences*, 14, 141-162.
- Liebmann, B., Smith, C.A., 1996, Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset, *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 1275-1277.
- Li, C., Mu, M., 1999, El Niño occurrence and sub-surface ocean temperature anomalies in the Pacific warm pool, *Chinese Journal of the Atmospheric Sciences*, 5, 513-521.
- Li, J.P., Zeng, Q.C., 2002, A unified monsoon index, *Geophysical Research Letters*, 29, 1274 doi:10.1029/2001GL013874.
- Li, J.P., Zeng, Q.C., 2003, A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons, *Advances in Atmospheric Sciences*, 20, 299-302.
- Li, J.P., Zeng, Q.C., 2005, A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation, *Climatic and Environmental Research*, 10, 351-365.
- Murakami, T., Matsumoto, J., 1994, Summer monsoon over the Asian continent and western North Pacific, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 72, 719-745.
- Nitta, T., 1987, Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 65, 373-390.
- Oort, A.H., Yienger, J.J., 1996, Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO, *Journal of Climate*, 9, 2751-2767.
- Reynolds, R.W., Rayner, N.A., Smith, T.M., Stokes, D.C., Wang, W., 2002, An improved in situ and satellite SST analysis for climate, *Journal of Climate*, 15, 1609-1625.
- Ryu, C.S., Kim, B.J., 2002, Observational characteristics of East Asian monsoon during the summers of 1993 and 1994, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 23, 369-379.
- Ryu, G.H., Sohn, B.J., 2009, The impact of interaction between cloud and longwave radiation on the Asian monsoon circulation, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 30, 58-68.
- So, C.H., Chan, J.C.L., 1997, An observational study on the onset of the summer monsoon over South China around Hong Kong, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 75, 43-57.
- Tao, S., Chen, L., 1987, A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon*

- Meteorology, C.-P. Chang and T. N. Krishnamurti, Eds., Oxford University Press, 60 - 92.
- Wang, B., Wu, R., Fu, X., 2000, Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian Climate?, *Journal of Climate*, 13, 1517 - 1536.
- Wang, B., Xu, X.H., 1997 Northern Hemisphere summer monsoon singularities and climatological intraseasonal oscillation, *Journal of Climate*, 10, 1071-1085.
- Wang, B., LinHo, 2002, Rainy season of the Asian - Pacific summer monsoon, *Journal of Climate*, 15, 386-398.
- Wang, B., Huang, F., Wu, Z.W., Yang, J., Fu, X.H., Kikuchi, K., 2009, Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: A review, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 47, 15-37.
- Wang, B., Wu, R., 1997, Peculiar temporal structure of the South China Sea summer monsoon, *Advances in Atmospheric Sciences*, 14, 177-194.
- Wilks, D.S., 1995, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 467 pp.
- Xie, P., Arkin, P.A., 1997, Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs, *Bulletin of American Meteorological Society*, 78, 2539-2558.
- Yim, S.Y., Yeh, S.W., Wu, R., Jhun, J.G., 2008, The influence of ENSO on decadal variations in the relationship between the East Asian and western North Pacific summer monsoons, *Journal of Climate*, 21, 3165-3179.
- Zhang, R., Sumi, A., Kimoto, M., 1996, Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 74, 49 - 62.
- Zhou, W., Chan, J.C.L., 2007, ENSO and the South China Sea summer monsoon onset, *International Journal of Climatology*, 27, 157-167.