남중국해의 여름철 대기-해양 상호작용과 동아시아 강수량의 상관성 분석

장혜영 · 예상욱*

한양대학교 과학기술대학 해양융합학과

(접수: 2013년 4월 26일, 수정: 2013년 6월 16일, 게재확정일: 2013년 6월 16일)

Analysis of Atmosphere-Ocean Interactions over South China Sea and its Relationship with Northeast Asian Precipitation Variability during Summer

Hye-Yeong Jang and Sang-Wook Yeh*

Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, ERICA, Korea

(Received: 26 April 2013, Revised: 16 June 2013, Accepted: 16 June 2013)

Abstract This study investigates the changes in the atmosphere-ocean interactions over the South China Sea (SCS) by analyzing their variables in the period of 1979~2011 during the boreal summer (June-July-August). It is found that a simultaneous correlation coefficient between sea surface temperature (SST) and precipitation over SCS during summer is significantly changed before and after the late-1990s. That is, the variation of precipitation over SCS is negatively (positively) correlated with the SST variations before (after) the late-1990s. Our further correlation analysis indicates that the atmospheric forcing of the SST is dominant before the late-1990s accompanying with wind-evaporation feedback and cloud-radiation feedback. After the late-1990s, in contrast, the SST forcing of the atmosphere through the latent heat flux from the ocean to the atmosphere is dominant. It is found that the change in the relationship of atmosphere-ocean interactions over SCS are associated with the changes in the relationship with Northeast Asian summer precipitation. In particular, a simultaneous correlation coefficient between the precipitation over SCS and Northeast Asia becomes stronger during after the late-1990s than before the late-1990s. We argue that the increase of the SST forcing of the atmosphere over SCS may lead a direct relationship of precipitation variations between SCS and Northeast Asia after the late-1990s.

Key words: South China Sea, atmosphere-ocean interaction, Northeast Asian summer precipitation, Atmospheric forcing, SST forcing

1. 서 론

서태평양과 인도양 사이에 위치하는 남중국해는 남동아시아에서 가장 큰 연해이다. 남중국해는 분지형태로 평균수심은 1800 m이고 중앙 분지에서 최대수심은 5400 m에 이른다(Twigt *et al.*, 2007). 남중국해는 남동아시아 몬순 시스템에 영향을 받으며, 남중국

해 주변 지역의 바람 분포에 의하여 다양한 표층 순환이 발생하는 것으로 알려져 있다(Wyrtki, 1961; Shaw and Chao, 1994; Chu *et al.*, 1999; Hu *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2001a, b; Centurioni *et al.*, 2009). 여름철 남중국해 지역에서는 남서풍이 주풍을 이루며, 시계 방향의 표층 순환이 우세하게 나타나는데 이러한 흐름은 베트남 연안에서 용승현상을 유발시켜 표층 수온을 차갑게 유지시킨다. 특히 이 지역에서 표층의 순열속은 표층 수온 변동에 주요한 요인이며(Liu *et al.*, 2001b; Qu, 2001), 단파복사와 잠열 또한 표층 수온의 증가 및 감소에 주요한 요인으로 알려져 있다(Liu and

*Corresponding Author: Sang-Wook Yeh, Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, ERICA, Ansan 426-791, Korea.
Phone : +82-31-400-5532, Fax : +82-31-436-8177
E-mail : swyeh@hanyang.ac.kr

Fig. 1. Time series of sea surface temperature averaged in South China Sea during the boreal summer (June-July-August) for the period of 1979~2011. Unit is $^{\circ}\text{C}$. The trend of SST time series is 0.013, which is statistically significant at the 90% confidence level.

Xie, 1999; Wu, 2002; Chen *et al.*, 2003; Lestari *et al.*, 2011).

남중국해는 또한 동인도양과 서태평양 난기풀(warm pool) 지역의 일부분으로서 해양과 대기의 상호작용이 매우 중요하게 나타나는 지역이다(Wang *et al.*, 1997; Wu and Wang, 2001; Liu *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2007; Wu, 2010). 특히 최근 남중국해의 여름철 표층 수온은 경년 변동성과 함께 뚜렷한 온난화 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다(Fig. 1). 이와 같은 온난화 경향은 이 지역에서의 해양과 대기의 상호 작용 특성에 변화를 주었을 것으로 생각할 수 있다. 즉 남중국해 지역의 표층 수온의 증가는 표층해수의 증발을 야기해 대기 하층에서 수증기의 수렴을 발생시키고 이것은 이 지역에서 대류현상을 발생시켜 대기를 불안정하게 만들 수 있다(Lestari *et al.*, 2011). 따라서 이 지역에서의 표층 수온의 증가는 대기의 대류활동 및 강수량을 증가시키는 주요 요인으로 작용할 수 있다. 이와 반대로 이 지역에서의 강수 현상 및 구름 운량의 변화와 같은 대기의 특성 변화는 해양에 도달하는 태양 복사량 및 해양의 증발, 해수 혼합 등과 같은 특성에 영향을 줌으로 남중국해 지역의 표층 수온의 변화를 유도할 수 있다. 따라서 이 지역에서의 대기-해양 상호작용의 특성 변화는 표층 수온 및 대기 특성 변화를 유도하고 나아가 남북 방향의 지역 해들리 순환을 통해 주변 아시아 지역의 일기 및 기후 변동성에 영향을 줄 수 있을 것으로 생각할 수 있다.

따라서 남중국해의 대기와 해양의 상호작용의 특성 변화를 이해하는 것은 남중국해 주변 지역뿐만 아니라 동아시아 지역의 기상현상을 예측하는 데 매우 중

요하다(He and Wu, 2012). 또한 남중국해의 몬순은 주변지역의 여름철 기후특성을 결정하는 데 매우 중요한 역할을 한다(Ding, 1992; Zhu *et al.*, 2003; Lestari, 2010). 즉 아시아 지역의 여름철 몬순이 가장 처음 남중국해에서 발달하기 때문에 아시아 몬순의 변동 특성을 결정하는 중요한 지역이라고 볼 수 있다(Lau *et al.*, 2000). 특히 최근 연구결과에 의하면 남중국해 표층 수온의 변화는 지구 온난화 아래에서 동아시아 몬순 특성에 민감한 강제력으로 작용할 수 있다고 알려졌다(Shin *et al.*, 2011). 따라서 남중국해의 대기와 해양의 상호작용의 역할을 이해하는 것은 매우 중요하며, 그에 따른 동아시아 몬순과의 상관성 연구는 여름철 동아시아의 기후시스템의 특성을 파악하는 데 유용할 것으로 사료된다.

지역적인 해양-대기 상호작용은 일반적으로 대기 변수와 표층 수온과의 시간에 따른 동시 상관성 및 지연 상관성 분석을 통해 이해할 수 있다(von Storch, 2000; Frankignoul *et al.*, 2002; Wu and Kirtman, 2005; Wu *et al.*, 2006). 특히 Wallace *et al.*(1990)에서는 대기변수와 표층 수온과의 동시 상관성 분석의 결과는 대기의 영향을 받는 해양의 상태를 모두 포함할 수 있다고 하였다. 특히 월평균 값을 이용한 동시 상관성 분석결과에는 대기의 지속성에 의한 영향이 포함되어 있다(Frankignoul and Hasselmann, 1977; Frankignoul *et al.*, 1998). 따라서 해양의 반응속도가 대기보다는 느리게 나타나지만 대기의 지속적인 영향에 의한 해양의 상태는 월평균 값 또는 여름철 평균 값에 포함되어 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서도 남중국해 지역의 여름철 표층 수온과 강수량과의 동시 상관성 분석과 지연 상관성 분석을 통하여 이 지역에서의 대기-해양 상호작용의 특성이 어떻게 변화되었는지를 알아보았으며, 이러한 특성 변화가 여름철 동아시아 몬순과 어떠한 관련성이 있는지에 대하여 알아보았다.

2. 자료 및 분석 방법

본 연구에서의 분석기간은 1979년에서부터 2011년까지로 여름철은 6월, 7월, 8월의 평균값을 이용하였다. 지연 상관성 분석에서는 6월, 7월, 8월별 평균값을 이용하였다. 또한 남중국해는 위도 5°N ~ 23°N , 경도 105°E ~ 120°E 로, 동아시아지역은 위도 30°N ~ 50°N , 경도 110°E ~ 145°E 로 각각 정의하였다(Fig. 2). 남중국해와 동아시아의 해양과 대기의 상호작용을 분석하기 위해서 NCEP/NCAR(National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료 1(Kalnay *et al.*, 1996)을 이용하였으며 분석 변수는 500 hPa의 연직속도이다. 또한 해양 표

Fig. 2. Areas of South China Sea and Northeast Asia used in this study.

층에서의 잠열속, 단파복사, 장파복사, 표층 풍속 그리고 850 hPa에서의 지위고도, 동서바람과 중층의 구름운량의 경우 NCEP/NCAR 재분석 자료 2(Kanamitsu *et al.*, 2012)를 이용하였다. 잠열속, 장파복사, 단파복사, 구름운량의 경우 위, 경도 1.875°의 해상도를 가지며 나머지 자료들은 모두 위, 경도 2.5°의 해상도를 가지고 있다. 잠열속은 해양에서 대기의 방향을 양의 값으로 정의하였으며, 단파복사는 대기에서 해양으로 들어오는 방향을 양의 값으로 정의하였다.

표층 수온자료는 GISST(Met Office's Global sea-Ice and Sea Surface Temperature)를 이용하였다. 해상도는 $1^\circ \times 1^\circ$ 이며, 일평균 자료를 월평균자료로 변환하여 사용하였다. 강수량자료는 Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation(CMAP)를 이용하였으며, 해상도는 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 이다(Xie and Arkin 1997).

그리고 실제적인 기온 및 강수량의 변동에 대하여 초점을 맞추었기 때문에 관측자료 내의 선형 경향성은 제거하지 않았다. 하지만 선형 경향성을 제거한 결과들은 그렇지 않은 경우와 비슷하게 나타나 논문의 전체적인 결과가 변하지는 않았다. 앞에서 언급한 것처럼 남중국해와 동아시아 지역의 여름철 평균 표층 수온과 강수량, 잠열속, 단파복사 값들과의 상관 계수 분석(correlation coefficient analysis), 이동 상관분석, 지연상관 분석을 통해 각 변수들 사이의 상호 관련성

의 특성 변화를 분석하여 이 지역에서의 해양-대기 상호작용의 특성과 동아시아 몬순과의 관련성을 살펴보았다.

3. 남중국해의 대기-해양 상호작용의 특성 변화

남중국해 지역의 해양-대기 상호작용 특성의 장주기 변동성을 알아보기 위해 이 지역에서 평균된 여름철 표층 수온과 강수량의 11년 이동 상관계수를 계산하였다(Fig. 3). 그림에서 볼 수 있듯이 1999년을 전후로 남중국해의 표층 수온과 강수량의 상관성이 뚜렷하게 변화한 것을 확인할 수 있다. 즉 1979년부터 1998년까지 표층 수온과 강수량은 음의 상관성을 나타낸 반면에 1999년 이후에는 양의 상관성을 나타내었다. 상관계수가 대기-해양의 물리적 특성을 온전히 설명하는 것은 아니지만 표층 수온과 강수량의 음의 상관성은 표층 수온 즉 해양 변동성이 강수량 변동성 즉 대기 변동성에 의해 반응하고 있음을 암시하며 반대로 두 변수의 양의 상관성은 해양 변동성이 대기 변동성의 강제력으로 작용하고 있음을 암시적으로 보여주고 있는 것이다(Wu and Kirtman, 2007). 이 연구에서는 표층수온과 강수량의 상관성이 음의 상관성에서 양의 상관성으로 변화한 1999년을 경계로 1999년 이전을 전반기로, 이후를 후반기로 정의하여 각 기간에서 대기-해양 상호작용의 특성 변화를 분석하였다.

Figures 4a, b는 남중국해 지역에서 전반기와 후반

Fig. 3. The 11-year running correlation coefficients between Sea Surface temperature and precipitation over South China Sea for the period of 1979~2011. Note that the X-axis indicates a center of year in the 11-year window, therefore, the 2004 indicates a correlation coefficient in the year of 1999~2009.

Fig. 4. (a) Simultaneous correlation coefficients in Precipitation-SST during summer for the period 1979~1998. (b) is the same as in (a) except but the period of 1999~2011.

기의 표층 수온과 강수량의 상관성을 나타낸 그림이다. 표층수온의 격자를 선형 보간법을 통하여 강수량의 격자에 맞춘 후 격자별 상관성을 계산하였다. 전반기의 표층 수온과 강수량의 상관성은 남중국해 대부분의 지역에서 음의 상관성을 나타냈지만, 후반기의 경우에 표층 수온과 강수량의 상관성이 남중국해 지역을 중심으로 양의 상관성이 나타나는 것을 볼 수 있으며 이것은 Fig. 3의 결과와 일치하는 것이다. 즉 Fig. 3과 Fig. 4의 결과들은 1990년대 후반을 경계로 남중국해 지역의 대기와 해양의 상호작용의 특성이 뚜렷하게 변화했음을 암시한다.

남중국해의 해양-대기 상호작용이 전반기와 후반기에 각각 어떤 차이점이 있으며, 그 물리적 과정은 어

떻게 변화하였는지 좀 더 자세하게 살펴보기 위하여 두 기간의 남중국해의 표층 수온과 강수량의 상관성을 비롯하여 잠열속, 단파 복사량, 구름 운량, 표층 풍속, 연직속도, 850 hPa에서의 기압 및 동서풍들과의 상관성을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Table 1에서 나타난 다양한 대기-해양 변수들의 동시 상관성 중 통계적으로 유의한 값을 가지면서도 주목해야 할 상관성은 하층 지위고도-표층 풍속(-0.69), 표층 풍속-잠열속(0.61), 하층 지위고도-연직속도(0.53), 하층 지위고도-구름운량(-0.60), 하층 지위고도-강수량(-0.63), 강수량-단파 복사(-0.65), 강수량-표층 수온(-0.51), 표층 수온-단파복사(0.75)이다. 결과적으로 위의 상관성들은 대기의 변동성이 해양 변동성을 억제시키는 음의 되

Table 1. Correlation coefficients between the atmosphere and ocean variables over South China Sea for the period of 1979~1998.

Correlation coefficient	Precipitation	Latent heat flux	Net short wave radiation	Wind speed	Cloud cover	Geopotential height at 850 hPa	Zonal wind at 850 hPa
SST	-0.51**	0.20	0.75***	-0.54***	-0.71***	0.83***	-0.73***
Precipitation		-0.01	-0.65***	0.36*	0.66***	-0.63***	0.40*
Latent heat flux			0.16	0.61**	-0.09	-0.08	0.39
Wind speed					0.52***	-0.69***	0.92***
Cloud cover						-0.60***	0.70***
Omega						0.53**	-0.47**
Geopotential height at 850 hPa							-0.79***

* 90% confidence level

** 95% confidence level

*** 99% confidence level

Table 2. Table 2 is the same as in Table 1 except but the period of 1999~2011.

Correlation coefficient	Precipitation	Latent heat flux	Net short wave radiation	Wind speed	Cloud cover	Geopotential height at 850 hPa	Zonal wind at 850 hPa
SST	0.37	0.24	0.20	-0.32	-0.06	0.43*	-0.45
Precipitation		0.44*	-0.54*	0.31	0.74**	-0.17	0.14
Latent heat flux			-0.20	0.71**	0.28	-0.47*	0.60*
Wind speed					0.47*	-0.68***	0.94***
Cloud cover						-0.61**	0.41
Omega						0.46	-0.19
Geopotential height at 850 hPa							-0.70***

* 90% confidence level

** 95% confidence level

*** 99% confidence level

먹임 현상과 연관되어 있음을 알 수 있으며, Fig. 4a에서 나타난 대기-해양 변수 사이의 음의 상관관계의 주요 원인으로 볼 수 있다.

즉 전반기에 남중국해 지역에서 하층 기압의 감소는 동풍의 증가와 함께 표층 풍속의 증가를 동반하면서 해양에서 대기로의 잠열속 증가를 가져오게 된다. 또한 하층 기압의 감소와 함께 연직 상승운동의 증가는 구름 운량의 증가와 함께 강수현상을 동반한다. 이러한 강수 현상과 구름 운량의 증가는 대기에서 해양으로 들어오는 단파복사의 양을 감소시키게 되고 이에 따라 해양의 표층 수온은 감소하게 된다. 이와 같은 일련의 대기-해양 상호작용 과정들은 대기 변동성에 기인한 해양의 상태 변화로 볼 수 있는데 즉 대기 변동성이 해양 변동성의 강제력으로 작용하고 있음을 생각할 수 있다. 나아가 이 과정에서 해양-대기의 다양한 피드백 과정이 관여하고 있음을 알 수 있다. 좀 더 구체적으로 살펴보면 표층 풍속과 잠열속의 관계에서는 바람-증발 피드백이 작용하고 있음을 확인할 수 있으며 또한 구름 운량과 단파 복사와의 관계에서는 구름-복사 피드백이 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 증가된 구름에 의한 대기에서 해양으로의 감소된 단파 복사의 양은 표층 수온의 감소를 유도한다. 따라서 남중국해의 전반기 여름철 대기-해양 상호작용의 특성은 대기 강제력에 의한 해양 변화의 특성이 강하게 나타나고 있다고 볼 수 있다(Fig. 7).

후반기 여름철 다양한 대기-해양 변수들의 상관성 결과들은 전반기와 비교하여 상관계수들의 절댓값들이 크지 않고 유의하지 않았다. 전반기와 비교하여 표층 온도와 대기 변수들 간의 상관성이 감소하였으며, 동풍과 연직상승운동의 변수가 잠열속을 제외한 다른 변수들과의 상관성이 약해졌음을 알 수 있다. 그에 반해 후반기에는 잠열속이 거의 모든 대기 변수들(강수량, 단파 복사, 표층 풍속, 구름 운량, 하층 지위고도

및 동서 바람) 과 높은 상관성을 보이는 것이 특징으로 나타났다(Table 2).

바람과 연직상승운동은 전반기에 해양의 강제력으로 작용하는 대기 강제력을 설명하는 주요 변수들로 볼 수 있는데 후반기에 이 변수들과 다른 대기 변수들과의 상관성 감소는 이 시기에 대기 강제력에 의한 해양 변화의 특성이 약해졌음을 암시하는 것이다. 특히 전반기와 비교하여 후반기에 해양에서 대기로의 잠열속 증가가 연직 상승운동을 유도하면서 하층 지위고도의 감소와 함께 강수량 증가와 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 후반기에 해양에서 대기로의 잠열속 증가가 강수량 증가와 직접적인 연관성을 가짐으로 해양에서 대기로의 열적 강제력이 강수량을 유도하는 중요한 역할을 하고 있음을 추측할 수 있다. 이와 반대로 Table 1에서 확인할 수 있는 것처럼 전반기에는 잠열속과 강수량은 아무런 상관성을 보이지 않았다(전반기에 잠열속과 강수량의 상관계수는 -0.01).

후반기에 해양 강제력이 강수량을 유도하는 중요한 메커니즘을 확인하기 위하여 여름철 평균값을 이용한 동시 상관 분석보다 여름철 월별 값을 이용한 지연 상관성 분석을 통하여 그 특성 변화를 자세히 살펴본다. Figures 5a, b는 남중국해의 여름철 월별 평균 표층 수온에 대하여 대기 변수들과의 지연 상관성 분석을 전반기와 후반기로 각각 나누어서 분석한 결과이다. 전반기에는 거의 모든 대기변수들이 지연 시간 변화에도 불구하고 표층 수온과의 상관성이 음의 상관성 또는 양의 상관성을 지속적으로 유지하고 있다(Fig. 5a). 표층 수온과 강수량, 표층 풍속, 구름 운량은 지연 시간 변화에 따라 음의 상관성을 유지하고 있으며 연직 속도, 단파 복사, 잠열속과는 양의 상관성을 가진다. 이 결과는 Table 1의 동시 상관 계수 분석을 통해 제시한 대기-해양 상호 작용의 특성과 일

Fig. 5. (a) Lead-lag correlation of SST and various atmospheric variables over South China Sea during summer for the period of 1979~1998. (b) is the same as in (a) except but the period of 1999~2011.

치하는 것이며 결국 대기 강제력이 해양의 표층 수온 변화를 주도하는 상태를 나타낸다. 즉, 대기의 지속적인 영향에 의해서 해양의 표층 수온이 반응하고 있으며, 그 상관성이 시간의 흐름에 따라 계속 일정하게 유지되고 있다는 것을 알 수 있다.

하지만 후반기의 경우에는 표층 수온의 변화에 따른 대기변수들의 변화는 전반기와 큰 차이가 나타났다(Fig. 5b). 예를 들면 표층 수온의 증가는 두 달 후의 잠열속량과 구름 운량 및 연직 속도를 증가시키며 단파 복사량의 감소와 함께 강수량의 증가와 상관성이 있음을 알 수 있다. 비록 상관계수의 결과이지만 이와 같은 결과는 표층 수온의 증가가 시간 지연을 두고 대기 변수의 변화를 유도하고 있음을 보여주는 것이다. 나아가 대기 변수들 또한 시간 지연을 두고 표층 수온의 변화와 약하지만 어느 정도 상관성을 가지고 있음을 알 수 있다. 즉 강수량, 잠열속, 연직 속도 그리고 구름 운량의 증가 및 단파 복사량의 감소는 한 달 후 표층 수온의 감소와 상관성이 있음을 알 수 있는데 결론적으로 표층 수온의 증가는 두 달 후의 잠열속의 증가, 수직속도의 증가, 구름 운량의 증가와 함께 강수량의 증가를 가져오며, 단파 복사량의 감소

가 나타난다. 그리고 이러한 강수량의 증가, 구름 운량의 증가, 단파 복사의 감소는 한 달 뒤에 표층 수온의 감소를 유도한다고 생각할 수 있다.

이와 같은 결과는 1990년대 후반 이전에는 남중국해의 대기-해양 상호작용은 대기 강제력에 의한 해양 변화가 뚜렷하였다면 1990년대 후반 이후에는 해양 강제력에 의한 대기 변동성이 뚜렷함과 동시에 시간 지연을 두고 해양과 대기의 상호작용이 일어났음을 보여주는 것이다.

4. 남중국해와 동북아시아 몬순과의 상관성

이 절에서는 1990년대 후반을 경계로 남중국해의 강수량, 표층 수온 변동성과 동북아시아 여름철 강수량과의 상관성 변화를 살펴보았다. 앞 절에서 살펴본 것과 같이 남중국해 지역에서 1990년대 후반을 경계로 표층 수온-강수량의 상관성은 음의 상관성에서 양의 상관성으로 크게 변화하였으며 이는 이 지역에서 표층 수온의 역할이 크게 달라졌음을 보여주는 것이다. 이와 같은 표층 수온의 역할 변화가 동북아시아 여름철 몬순 변동성과 어떤 상관성의 변화를 유도하였는지 살펴보는 것은 의미 있을 것으로 사료된다. 먼저 Table 3은 전반기와 후반기 남중국해 지역의 강수량, 표층 수온과 동북아시아의 강수량과의 상관성을 나타낸 것이다. 먼저 전반기, 후반기 모두 남중국해 강수량 변동성은 동북아시아 강수량 변동성과 음의 상관성을 가지고 있었다. 또한 전체 분석 기간 동안(1979~2011) 두 지역의 강수량 변동성의 상관성 역시 음의 값(-0.37)으로 남중국해 지역의 강수량 증가(감소)는 동북아시아 지역의 강수량 감소(증가)를 의미하는 것이다. 이것은 남중국해의 강수량 변동성과 연관된 두 지역 간의 남북 방향의 지역 대기 순환구조에 기인한 것으로 이해 할 수 있다. 즉 Fig. 6에서 알 수 있는 것처럼 남중국해에서 동북아시아로 이어지는 남북 방향의 지역 대기 순환 구조는 남중국해의 강수량 증가가 지역 해들리 순환의 변조를 통해 동북아시아 지역

Table 3. Correlation coefficients between sea surface temperature and precipitation over South China Sea and Northeast Asia, respectively, for the period of 1979~1998 and 1999~2011.

	Northeast Asia	
	Precipitation	
South China Sea	1979~1998	1999~2011
Precipitation	-0.34	-0.56**
SST	0.63***	-0.31

** 95% confidence level

*** 99% confidence level

Fig. 6. The regressed stream line against with the precipitation variations averaged in South China Sea during summer for the period of 1979~2011.

에서 하강 기류의 강화를 가져와 그 지역에서의 강수량 감소를 유도하며 반대로 남중국해의 강수량 감소는 동북아시아 지역의 상승 기류의 강화를 가져와 그 지역에서의 강수량 증가를 유도하고 있음을 알 수 있다.

Table 3에서 흥미로운 것은 남중국해 강수량과 동북아시아 강수량 변동성의 음의 상관성이 후반기에 더욱 강해졌다는 것이다. 앞 절에서 살펴본 것과 같이 전반기와 후반기 남중국해 지역에서 대기-해양 상호작용의 특성 변화가 이와 같은 상관성의 변화에 대한 물리적 원인을 어느 정도 설명할 수 있을 것으로 사료된다. 즉 후반기와 전반기 남중국해 지역의 가장 큰 변화중의 하나는 해양의 역할 변화로 생각할 수 있다. 즉 후반기에는 남중국에서 해양 강제력이 대기 변동성의 주요 원인이며 또한 이 지역에서 대기-해양 상호작용이 전반기에 비해 활발하게 일어났다는 것이다. 이것은 Table 3에 남중국해 표층 수온 변동성과 동북아시아 강수량 변동성의 상관성의 변화와도 일치하는 것이다. 즉 전반기에는 남중국해 표층 수온의 변화는 대기 강제력에 의한 변화가 우세하였기 때문에 이 지역에서 강수량이 증가할 경우 표층 수온은 감소하게 되고 동북아시아 지역의 강수량 또한 감소하게 되어 결국 남중국해 표층 수온 변화와 동북아시아 강수량은 양의 상관성을 가지게 된다. 그에 반해 후반기에는 표층 수온의 변화가 이 지역에서 대기 변동성을 유도하였기 때문에 반대로 음의 상관성을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 즉 남중국해 표층 수온의 증가가 이 지역에서의 강수량 증가를 유도하게 되고 이 지역에서의 강수량 증가는 지역 해들리 순환에 영향을 주어 동북아시아 지역에 하강기류를 유도 강수량의 감소를 가져오게 된다. 따라서 남중국해 표층 수온은 동북아시아 강수량과 음의 상관성을 보이게 된다. 이와 같은 결과들은 후반기 남중국해 해양 강제력의 증가와 대기-해양 상호작용에 의해 유도되는 이 지역에서의 강수량 변동성이 남북방향의 지역 대기

순환의 변동성을 통해 동북아시아 강수량과 더욱 밀접한 연관성을 유도하였음을 생각할 수 있다.

5. 요약

대기-해양 상호작용의 과정에서 해양의 표층 수온이 대기 강제력에 의해 영향을 받는 상태인지 해양 강제력으로 작용하고 있는지를 파악하는 것은 매우 중요하다. Wu and Kirtmman(2007)은 대기-해양 상호작용을 이해하는 것이 대기 대순환 모형에서 표층수온이 강제력으로 작용하는 실험의 모의 결과에 중요한 역할을 할 수 있다고 제시 하였다. 즉 표층 수온이 해양 강제력으로 작용하는 경우 그와 같은 실험의 모의 결과가 관측과 유사하게 나타날 수 있는 반면 대기 강제력이 해양 표층 온도를 유도하는 경우 대기 대순환 모형의 모의 결과가 관측과는 전혀 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 따라서 최근 지구 온난화에 기인하여 표층 수온이 증가하고 있는 경향에서 이와 같은 대기-해양 상호작용의 특성을 분석하는 것은 의미 있는 일이다. 본 연구에서는 1979년부터 2011년까지 33년간 남중국해 표층 수온과 주요 대기 변수들(강수량, 바람, 잠열속, 단복사량, 구름운량, 하층기압)과의 동시, 및 지연 상관성 분석을 통해 남중국해 대기-해양 상호작용의 특성 변화에 대하여 알아보았으며, 이와 같은 특성변화와 동아시아 여름철 강수량과의 상관성 변화를 확인하였다.

남중국해 지역의 여름철 해양 표층 수온과 강수량은 1990년대 후반을 경계로 그 상관성이 큰 차이를

Fig. 7. (a) The schematic diagram representing the characteristics of air-sea interactions over South China Sea during summer for the period of 1979~1998. (b) is the same as in (a) except the period of 1999~2011.

보이고 있는 것으로 나타나 이 지역의 대기-해양 상호작용의 특성이 1990년대 후반 뚜렷한 변화가 있는 것으로 분석되었다(Fig. 7). 1990년대 후반 이전 시기에서는 남중국해에서 바람-증발 피드백 과정과 구름-복사 피드백 과정을 통해 하층기압의 감소가 동풍의 증가를 동반하면서 표층 풍속의 증가를 유도하고 그와 동시에 해양에서 대기로의 잠열속이 증가하는 상관성을 보였다. 또한 연직 상승운동의 증가는 구름운량의 증가와 함께 강수현상을 동반하면서 대기에서 해양으로 들어오는 단파복사의 양을 감소시키게 되고 이에 따라 해양의 표층 수온은 감소하게 된다. 즉 1990년대 후반 이전에는 이와 같은 일련의 대기-해양 상호작용 과정들을 통해 대기 변동성에 기인한 해양 변화의 특성이 강하게 나타났다고 볼 수 있다. 그에 반해 후반기의 경우에는 표층 수온의 변화에 따른 대기 변수들의 변화는 전반기와 큰 차이가 나타났다. 특히 지연 상관계수 분석은 남중국해 지역의 표층 수온의 증가는 시간 지연을 통해 잠열속량과 구름 운량 및 연직 속도의 증가와 상관성을 가지면서 단파 복사량의 감소와 함께 강수량의 증가의 상관성을 보였다. 비록 상관계수의 결과이지만 이와 같은 결과는 후반기 남중국해 표층 수온의 증가가 시간 지연을 두고 대기 변동성의 변화를 유도하고 있음을 보여주는 것이다. 나아가 대기 변수들 또한 상관성이 크지는 않지만 시간 지연을 두고 표층 수온의 변화와 어느 정도 상관성을 보여 1990년대 후반 이후에는 이전 시기에 비해 남중국해의 해양 강제력에 의한 대기 변동성이 뚜렷함과 동시에 시간 지연을 두고 해양과 대기의 상호작용이 일어났음을 추측할 수 있었다.

이와 같은 남중국해에서의 대기-해양 상호작용 특성 변화가 남중국해와 동북아시아 지역 강수량과의 상관성에 어떤 변화를 유도하는 지에 대해서도 살펴 보았다. 후반기의 남중국해의 표층수온이 동북아시아 지역의 강수량 변동성과 음의 상관성을 보이고 나아가 남중국해의 강수량 변동성이 동북아시아 강수량 변동성과 유의한 음의 상관성이 나타났다. 이와 같은 상관성의 변화는 남중국해 지역의 표층수온이 해양 강제력으로 작용함으로 이 지역에서의 강수량 변동성이 동북아시아 강수량 변동성에 더욱 밀접한 상관성을 유도한 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 지구 온난화 환경에서 남중국해 표층수온의 변화가 동아시아 몬순 특성에 민감한 강제력으로 작용할 수 있다고 제시된 기존 연구결과(Shin *et al.*, 2011)와 어느 정도 일치하는 것이다. 향후 해양의 표층 수온이 강제력으로 작용할 때 동북아시아 강수량 변동성뿐만 아니라 다른 대기 변동 특성에 어떠한 변화를 보이는지 살펴보는 것은 이 지역에서의 기후 변동 특성을 이해하는데 중요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발관리단(CATER-2012-3041)의 지원으로 수행되었습니다. 세밀한 심사로 논문의 질을 높여주신 두 분 심사자님들에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Centurioni, L. R., P. N. Niiler, and D. K. Lee, 2009: Near-surface circulation in the South China Sea during the winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L06605.
- Chen, J. M., C. P. Chang, and T. Li, 2003: Annual cycle of the South China Sea surface temperature using the NCEP/NCAR reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 879-884.
- Chu, P. C., N. L. Edmonds, and C. W. Fan, 1999: Dynamical mechanisms for the South China Sea seasonal circulation and thermohaline variabilities. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 2971-2989.
- Ding, Y. H., 1992: Summer monsoon rainfalls in China. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 373-396.
- Frankignoul, C., and K. Hasselmann, 1977: Stochastic climate models. II: Application to sea-surface temperature anomalies. *Tellus.*, **29**, 284-305.
- , Z. Czaja, and B. L'Heveder, 1998: Air-sea feedback in the North Atlantic and surface boundary conditions for ocean models. *J. Climate*, **11**, 2310-2324.
- , ———, and J. Mignot, 2002: The surface heat flux feedback. Part II: direct and indirect estimates in the ECHAM4/OPA8 coupled GCM. *Climate Dyn.*, **21**, 27-51.
- Hu, J. Y., H. Kawamura, H. S. Hong, and Y. Q. Qi, 2000: A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion. *J. Oceanogr.*, **56**, 607-624.
- He, Z., and R. Wu, 2012: Coupled seasonal variability in the South China Sea. *J. Oceanogr.*, **69**, 57-69.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: Ncep-Doe Amip-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Lau, K. M., Y. Ding, J.-T. Wang, R. Johnson, T. Keenan, R. Cifelli, J. Gerlach, O. Thiele, T. Rickenbach, S.-C. Tsay, and P.-H. Lin, 2000: A report of the field operations and early results of the South China Sea Mon-

- soon Experiment (SCSMEX). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 1261-1270.
- Lestari, R. K., 2010: *Mechanisms of seasonal march of Precipitation over Maritime Continent Regions: Observational and Model Studies*.
- _____, M. Watanabe, and M. Kimoto, 2011: Role of air-sea coupling in the interannual variability of the South China Sea summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **89A**, 283-290.
- Liu, W. T., and X. S. Xie, 1999: Spacebased observations of the seasonal changes of South Asian monsoons and oceanic responses. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1473-1476.
- Liu, Q. Y., H. J. Yang, and Z. Y. Liu, 2001a: Seasonal feature of the Sverdrup circulation in the South China Sea. *Prog Nat Sci.*, **11**, 202-206.
- _____, X. Jiang, S. P. Xie, and W. T. Liu, 2004: A gap in the Indo-Pacific warm pool over the South China Sea in boreal winter: seasonal development and interannual variability. *J. Geophys. Res.*, **109**, C07012.
- Liu, Z., H. Yang, and Q. Liu, 2001b: Regional dynamics of seasonal variability in the South China Sea. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 272-284.
- Qu, T. D., 2001: Role of ocean dynamics in determining the mean seasonal cycle of the South China Sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **106**, 6943-6955.
- Shaw, P. T., and S. Y. Chao, 1994: Surface circulation in the South China Sea. *Deep Sea Res. Part I*, **41**, 1663-1683.
- Shin, S.-I., 2011: Sensitivity of the northeast Asian summer monsoon to tropical sea surface temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L22702.
- Trenberth, K. E., and D. J. Shea, 2005: Relationships between precipitation and surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14703.
- Twigt, D. J., E. D. De Goede, E. J. O. Schrama, and H. Gerritsen, 2007: Analysis and modeling of the seasonal South China Sea temperature cycle using remote sensing. *Ocean Dyn.*, **57**, 467-484.
- Von Storch, J.-S., 2000: Signature of air-sea interactions in a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. Climate*, **13**, 3361-3379.
- Wallace, J. M., C. Smith, and Q.-R. Jiang, 1990: Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the northern winter. *J. Climate*, **3**, 990-998.
- Wang, D. X., Z. H. Qin, and F. X. Zhou, 1997: Study on air-sea interaction on the interannual time-scale in the South China Sea. *Acta Meteorol Sinica*, **55**, 33-42.
- Wu, R., and B. Wang, 2001: Multi-stage onset of the summer monsoon over the western North Pacific. *Climate Dyn.*, **17**, 277-289.
- _____, 2002: Processes for the northeastward advance of the summer monsoon over the western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **80**, 67-83.
- _____, and B. P. Kirtman, 2005: Roles of Indian and Pacific Ocean air-sea coupling in tropical atmospheric variability. *Climate Dyn.*, **25**, 155-170.
- _____, _____, and K. Pegion, 2006: Local air-sea relationship in observations and model simulations. *J. Climate*, **19**, 4914-4932.
- _____, and _____, 2007: Regimes of seasonal air-sea interaction and implications for performance of forced simulations. *Climate Dyn.*, **29**, 393-410.
- _____, 2010: Subseasonal variability during the South China Sea summer monsoon onset. *Climate Dyn.*, **34**, 629-642.
- Wyrtki, K., 1961: Physical oceanography of the Southeast Asian waters. Naga report, vol. 2. Scientific results of marine investigations of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961. *Scripps Institution of Oceanography*, La Jolla, 195 pp.
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.
- Xie, S. P., C. H. Chang, Q. Xie, and D. X. Wang, 2007: Intraseasonal variability in the summer South China Sea: wind jet, cold filament, and recirculations. *J. Geophys. Res.*, **112**, C10008.
- Zhu, C. W., T. Nakazawa, and J. P. Li, 2003: The 30~60 day intraseasonal oscillation over the Western North Pacific Ocean and its impacts on summer flooding in China during 1998. *Geophys. Res. Lett.*, **30**.