

# 열대 해양의 해수면온도와 구름의 상호관계

## Interrelationships between Sea Surface Temperatures and Clouds over the Tropical Oceans

송봉근<sup>1</sup>, 김영섭<sup>2</sup>, 박경원<sup>1</sup>, Alexander A. Zharskiy<sup>1</sup>

Bong-Geun Song, Young-Seup Kim, Kyoung-Won Park and Alexander A. Zharskiy

부경대학교 환경대기과학과<sup>1</sup>, 부경대학교 위성정보과학과<sup>2</sup>

(E-mail : songsbg@yahoo.co.kr, Tel : 051-620-6271)

### Abstract

The intra-annual and interannual variations of total, high, middle, low clouds, and cloud forcing net solar radiation flux, cloud forcing net long-wave radiation flux, and SSTs over the tropical oceans are investigated with the use of ISCCP D2, NCEP/NCAR Reanalysis for January 1983-December 1993.

The intra-annual variation of total cloudiness is dominated by high and middle clouds in the western Pacific and central tropical oceans, the interannual variation of total cloudiness is also dominated by high and middle clouds in the central Pacific and Atlantic.

The dominant intra-annual and interannual EOFs of total cloudiness have spatially coherent link with those SSTs. For the interannual EOFs, total cloudiness and SSTs are related to El niño-Southern Oscillation(ENSO). The second most important intra-annual EOFs of total cloudiness are related to Inter Tropical Convergence Zone(ITCZ). The third most important intra-annual EOFs show coherent relation in the western Pacific.

The correlation analysis between cloud radiative effects and SSTs show spatially coherent relation over the tropical oceans even though cloud forcing cooling effect is much higher than heating effect.

## 1. 서론

열대 해양에서 대기-해양의 상호작용은 전지구 기후변화에 있어 중요한 열원으로써 작용하게 된다. 또한 열대 해양은 큰 열용량을 가지고 있어 대기에 지속적인 영향을 미치게 되며, 해수면온도(SST) 변동은 대기 변동보다 더 긴 시간규모를 가지게 된다. 특히, 태평양에서의 SST 변동과 관련한 연구가 활발히 진행되어 왔는데(Hsuing and Newell 1983, Kawamura 1994, Lau and Nath 1994, Luksch and Storch 1992, Pan and Oort 1983), 이러한 SST 변동은 El Niño-Southern Oscillation(ENSO)과 관계한 전지구 대기순환에 영향을 미치게 되며, 구름의 복사효과에 의한 피드백 관계와 밀접한 관련이 있다(Ramanathan and Collins 1991; Heymsfield and Miloshevich 1991; Wallace 1992; Fu et al. 1992).

열대 해양에서의 구름과 SST의 상호관계에 관한 최근 논문으로는, Arking and Ziskin(1994)과 Fu et al.(1996)을 들 수 있다. Arking and Ziskin은 ISCCP C2 자료를 사용하여 서부태평양에서의 구름과 SST사이의 관계를 조사한 바 있는데, 구름의 복사효과에 의한 냉각과 가열효과가 서로 상쇄되어 균형을 이루고 있으며, SST 변동에 결정적인 역할을 하는 요인으로 계절과 위도에 따른 일사량을 지적하였다. 하지만 연구 지역이 서부태평양으로 제한되어 있어서, 공간분포 특성을 알 수 없었다. Fu et al.은 ISCCP C2 자료를 사용하여 열대 해양에서의 구름과 SST의 연년변동을 조사하였는데, 적도태평양에서의 SST 변화가 구름 변동에 영향을 주지만 구름 변화는 SST 변동을 지배하지 않음을 밝혔다.

본 연구에서는 개선된 알고리즘으로 재분석된 ISCCP D2 자료를 사용하여 SST와 구름과의 상호 관련성을 알아보고

계절 및 연변동과 연년변동이 어떻게 나타나는지를 알아보려고 하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 자료

본 연구에서는 열대 해양에서의 해수면 온도와 구름과의 상호관계를 조사하기 위하여 International Satellite Cloud Climatology Project(ISCCP) D2 운량 자료와 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research(NCEP/NCAR) 재분석 자료 중 Sea Surface Temperature(SST), Cloud forcing net solar radiation flux(CFNSF), Cloud forcing net long-wave radiation flux(CFNLF)를 사용하였다. 분석 자료 기간은 1984년 1월부터 1993년 12월까지이다.

ISCCP D-series 자료는 C-series 자료에 비해 개선된 알고리즘으로 재분석된 자료로써, 구름, 대기, 지표의 복사특성에 대한 정보를 월별 3시간 간격으로 제공한다(Rossow and Schiffer, 1999). ISCCP D2자료에서 구름분류는 구름의 운정기압과 광학두께에 따라 9종으로, 운정기압에 따라 3종으로 나누고 있는데(Rossow and Schiffer, 1999), 본 연구에서는 상·중·하층운의 운량을 사용하여 분석하였다. 즉, 운정기압이 50~440hPa이면 하층운, 440~680hPa이면 중층운, 680~1000hPa이면 하층운으로 분류된다. ISCCP D2자료의 격자 간격은  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 로써 Equal-Area Map을 사용하고 있고, NCEP/NCAR 재분석 자료의 격자 간격은  $1.875^{\circ} \times 94$  levels로 되어 있는데, 분석을 위하여 NCEP/NCAR 자료와 동일한 격자로 보간하였다.

Fig. 1은 1984년 1월부터 1993년 12월까지의 평균 전운량(Total Cloud Amount:TCA)에 대한 상층운량(High-level Cloud Amount:HCA), 중층운량(Middle-level Cloud Amount), 하층운

량(Low-level Cloud Amount)을 나타낸 것이다. 상층운은 서부 태평양 지역과 동부 인도양 지역에 많이 발생하며, 하층운은 아열대 해양, 특히 남태평양, 대서양, 인도양의 동부 지역에 많이 발생하는 것을 볼 수 있다.

열대 해양에서의 해수면 온도와 구름 변동의 계절 및 연변동과 연년변동을 조사하기 위하여 운량자료 및 NCEP/NCAR 재분석 자료를 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용하여 분해하여 재합성하였다. 이렇게 얻어진 자료를 사용하여 상관분석과 경험적 직교 함수(Empirical Orthogonal Function) 분석을 실시하였다. 경험적 직교 함수 분석에서는 열대 해양인 20S-20N 영역에 대해 분석하였다.

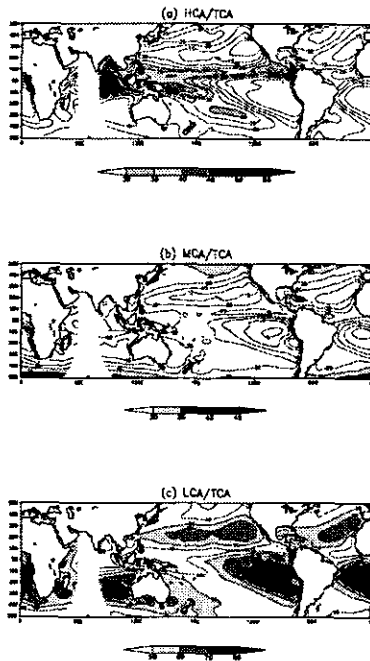


Fig. 1. Mean fractional contribution of HCA to TCA (a), MCA to TCA (b), LCA to TCA (c) for January 1984 - December 1993. The unit is percent(%).

## 2. 2 푸리에 변환을 이용한 필터링

열대 지역에서의 구름은 종관규모 요

란 및 30~60일 진동 등의 다양한 단주기 변동을 보이고 있다(Lau and Chan 1988). 이러한 단주기 변동 성분을 제거하기 위해서는 경험적 직교함수(EOF)를 이용하는 방법, 이동평균, band-pass filtering 등이 있다. 여기에서 경험적 직교함수를 이용하는 방법은 시·공간적인 노이즈와 단주기 변동 모두를 제거할 수 있고 이동평균 역시 단주기 변동을 제거할 수 있으나, 이 두 방법은 특정 주기성분을 제거하는데는 효과적이지 않다. 또한 band-pass filtering의 경우에는 특정 주기성분 제거에는 효과적이거나, 자료의 손실을 가져옴으로써 자료기간이 짧은 경우에는 적당하지 않다.

따라서, 푸리에 변환을 이용하여 SST와 구름의 계절 및 연변동과 연년변동을 조사하였다. 그 방법은 다음과 같다.

만약 어떤 한 지점에 대해  $N$ 개의 시계열 자료가 있을 때 이 시계열 자료  $f(x)$ 가 주기성을 가진다면, 다음과 같이 표현가능하고

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{N/2} (a_k \cos \frac{2\pi}{N} kx + b_k \sin \frac{2\pi}{N} kx) \quad (1)$$

푸리에 계수  $a_k$ 과  $b_k$ 는

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \\ a_k &= \frac{2}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cos \frac{2\pi}{N} kx \\ b_k &= \frac{2}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \sin \frac{2\pi}{N} kx \\ k &= 1, 2, 3, \dots, N/2 \end{aligned} \quad (2)$$

이다.

따라서, 본 연구에서는 계절 및 연변동 성분인 3~12개월 주기 성분과 연년 변동 성분인 2~10년 주기 성분으로 다음과 같이 자료를 재합성 하였다. 식(3)은 3~12개월 주기 성분, 식(4)은 2~10년 주기 성분을 나타낸다.

$$f(x)_H = a_0 + \sum_{k=10}^{40} (a_k \cos \frac{2\pi}{N} kx + b_k \sin \frac{2\pi}{N} kx) \quad (3)$$

$$f(x)_L = a_0 + \sum_{k=1}^{5} (a_k \cos \frac{2\pi}{N} kx + b_k \sin \frac{2\pi}{N} kx) \quad (4)$$

여기서,  $x=0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $N=120$  이다.

Fig. 2는 태평양의 한 지점(위도:20N, 경도:180)에서의 전운량과 식(3)과 식(4)에서 구한 3~12개월 주기 성분과 2~10년 주기 성분의 시계열을 나타낸 것이다. Fig. 2a에서 시계열 자료의 경향은 유지되면서 3개월 이하의 단주기 성분과 13개월 이상의 장주기 성분이 제거된 것을 볼 수 있으며, Fig. 2b에서는 2년 이하의 단주기 성분이 제거되고 2년 이상의 장주기 성분만이 남아 있는 것을 볼 수 있다.

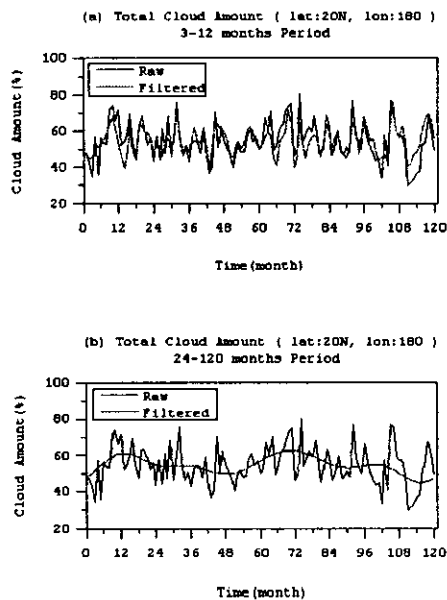


Fig. 2. Filtering the ISCCP-D2 monthly cloud amount data using Fourier Transform for January 1984 - December 1993.

### 3. 결과 및 고찰

1984년 1월부터 1993년 12월까지의 월

평균 ISCCP D2 운량 자료와 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하여 열대해양에서의 SST와 구름의 변동을 조사하였다. SST와 구름의 3~12개월 주기를 가지는 계절 및 연변동과 2~10년 주기를 가지는 장주기 변동을 조사하기 위하여 푸리에 변환을 사용하여 자료를 재합성하여 상관분석과 경험적 직교함수 분석을 실시하였다.

열대 해양에서의 전운량 변동은 서부 태평양과 중부 열대해양에서의 상층운과 중층운에 의해 지배되는데, 3~12개월 주기성분의 운량과 SST의 상관에서는 열대수렴대가 형성되는 지역에서 높은 양의 상관을 나타내었고, 2~10년 주기성분의 운량과 SST의 상관에서는 중부태평양과 중부대서양에서 높은 값을 나타내었다. 특히, 주목할 만한 점은 3~12개월 주기성분의 단주기 변동에서는 열대수렴대에서, 2~10년의 장주기 변동에서는 엘니뇨가 발생하는 적도 중부태평양에서 뚜렷한 양의 상관이 나타나고 있다는 것이다. 이러한 높은 상관 패턴은 모두 상층운과 중층운에서 볼 수 있었는데, 구름변동에 대한 SST의 영향이 상층운 및 중층운과 직접적으로 관련하고 있음을 의미한다.

3~12개월 주기성분에서 전운량과 SST의 EOF 제 1모드는 북반구와 남반구의 태양 일사의 계절변화에 의한 연변동 패턴을 보여주고 있다. 그리고 시간계수의 최대와 최소가 되는 시기는 2~3월, 8~9월로 나타났다. 제 2모드에서는 전운량의 경우 열대수렴대에서의 연변동을 볼 수 있었고, SST의 경우에는 서부태평양과 중·동부 태평양 및 중부 대서양에서의 연변동을 볼 수 있었다. 하지만 제 2 모드에서는 전운량과 SST의 연관성을 찾을 수 없었다. 제 3 모드에서는 서부 태평양에서의 상층운과 SST의 계절변동을 설명하는 것으로 공간패턴과 시간 계수의 위상이 유사하게 나타났다.

2~10년 주기성분의 전운량과 SST에

대한 EOF 제 1 모드는 ENSO의 영향에 의한 서부태평양과 중부태평양에서의 구름 변동과 SST 변동을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 상관분석 결과와 일치하는데, 장주기 변동에 있어서의 구름변동은 ENSO의 영향에 의한 SST변동과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

구름의 복사효과에 의한 SST 변동을 알아보기 위하여 3~12개월 주기 성분의 자료만을 사용하여 조사한 결과, 구름에 의한 지표의 단파복사 냉각과 장파복사가 열은 상층운과 중층운에 의해 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 또한 열대 해양에서의 구름의 단파복사 냉각과 장파복사가 열이 일어나는 지역이 서로 일치하고 있음을 볼 수 있었다.

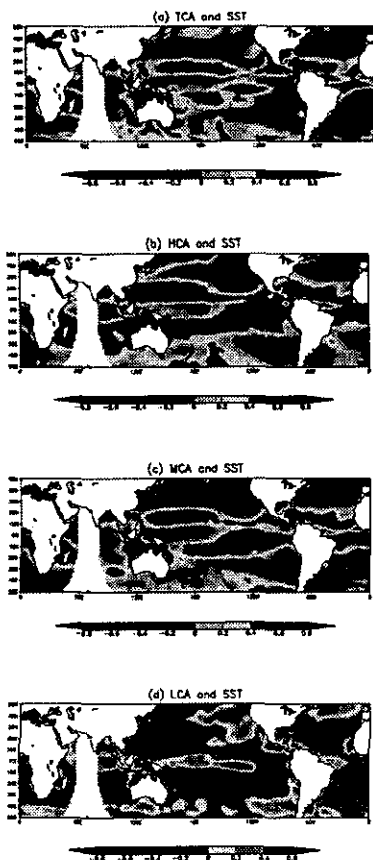


Fig. 3. Correlation maps between SST and TCA (a), HCA (b), MCA (c), and LCA (d) defined in Eq. (3) for January 1984 - December 1993.

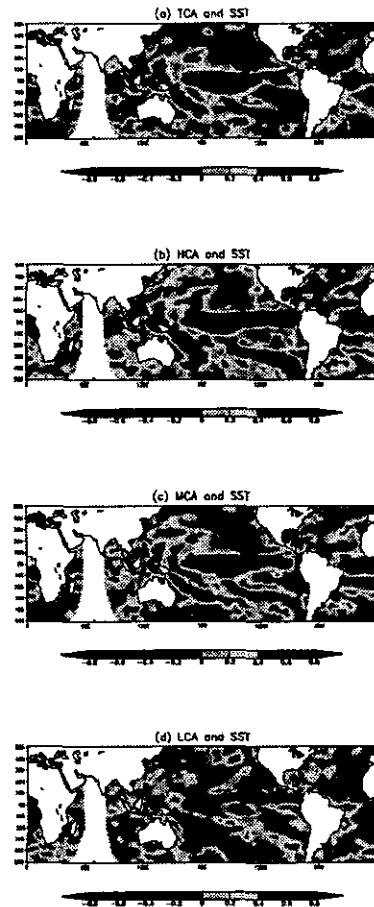


Fig. 4. Correlation maps between SST and TCA (a), HCA (b), MCA (c), and LCA (d) defined in Eq. (4) for January 1984 - December 1993.

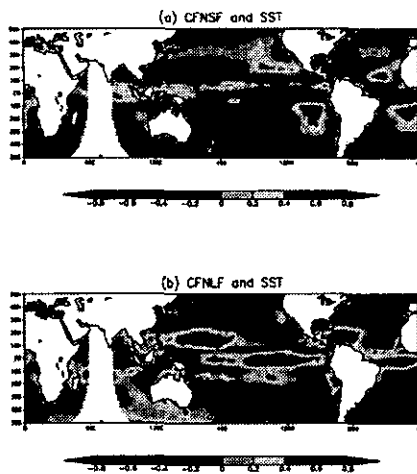


Fig. 5. Correlation maps between SST and cloud radiative effects defined in Eq. (3) for January 1984 - December 1993.

#### 4. 참고문헌

- Arking, A., and Ziskin, D., 1994: Relationship between clouds and sea surface temperatures in the western tropical Pacific. *J. Climate*, 7, 988-1000.
- Fu, R., Liu, W. T., and Dickinson, R. E., 1996: Response of tropical clouds to the interannual variation of sea surface temperature. *J. Climate*, 9, 616-634.
- Hsuing, J., and R. E. Newell, 1983: The principal nonseasonal modes of variation of global sea surface temperature. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1957-1967.
- Kawamura, R., 1994: A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales. *J. Phys. Oceanogr.*, 24, 707-715.
- Lau, K. M., and P. H. Chan, 1988: Intraseasonal and interannual variations of tropical convection: A possible link between the 40-50 day oscillation and ENSO? *J. Atmos. Sci.*, 45, 506-521.
- Lau, N.-C., and M. J. Nath, 1994: A modeling study of the relative roles of tropical and extratropical SST anomalies in the variability of the global atmosphere-ocean system. *J. Climate*, 7, 1184-1207.
- Luksch, U., and H. von Storch, 1992: Modeling the low-frequency sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific Ocean for the 1958-73 period. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1244-1258.
- Rossow, W. B., and Schiffer R. A., 1999: Advances in understanding clouds from ISCCP. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 2261-2287.