

## 경년과 계절 시간 규모하에서 해수면 온도에 대한 구름복사 강제력의 지역 의존도

김맹기\* · 이우섭 · 광종흠 · 소선섭 · 서명석

공주대학교 대기과학과, 314-701 공주시 신관동 182

## The Regional Dependency of Cloud-radiative Forcing on the Sea Surface Temperature in the Interannual and Seasonal Time Scales

Maeng-Ki Kim\* · Woo-Seop Lee · Chong-Heum Kwak  
Seon-Sup So · Myoung-Seok Suh

Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

**Abstract:** The regional dependency of cloud-radiative forcing at the top of atmosphere is studied using ERBE (Earth Radiation Budget Experiment), ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) and NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) reanalysis data for 60 months from January 1985 to December 1989 over tropical ocean. In the interannual time scale, the dependency of cloud-radiative forcing on the sea surface temperature over the equatorial eastern Pacific ocean is about  $7.4\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  for longwave radiation and about  $-4.4\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  for shortwave radiation, respectively. This shows that the net cloud-radiative forcing due to the increase of sea surface temperature over the equatorial eastern Pacific ocean heats the atmosphere. But the dependency is reversed over tropical oceans with  $-3.4\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  for longwave and  $1.9\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  for shortwave radiation, indicating that the net cloud-radiative forcing cools the atmosphere over tropical oceans. In raw data including seasonal cycle, the dependency of cloud-radiative forcing over the equatorial eastern Pacific ocean is very similar to that in interannual time scale in both the magnitude and the sign. But the dependency of cloud-radiative forcing on the sea surface temperature over tropical oceans is about  $0.2\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  for longwave and  $2.7\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  for shortwave radiation, respectively. These results represent that the role of seasonal cycle on the cloud radiative forcing is gradually more important than role of interannual time scale as the ocean area is broadening from the tropical central Pacific to the tropical ocean.

**Keywords:** cloud-radiative forcing, interannual variation, seasonal variation, sea surface temperature.

**요 약:** 해수면 온도에 대한 구름복사 강제력의 지역 의존도가 조사되었다. 이 조사는 경년 변동과 계절 시간규모에 대해서 각각 조사되었다. 적도 동태평양에서 경년 변동의 경우 해수면 온도가  $1^{\circ}\text{C}$  증가할 때 순 구름복사 강제력은 약  $3\text{Wm}^{-2}$ 가 증가하였으며, 계절변동이 포함된 경우 약  $3.5\text{Wm}^{-2}$ 가 증가하는 것으로 나타났다. 반면 열대 해양전체에서 경년 변동의 경우 해수면 온도가  $1^{\circ}\text{C}$  증가할 때 순 구름복사 강제력은  $1.5\text{Wm}^{-2}$  감소하였으나, 계절변동이 포함된 경우 약  $2.9\text{Wm}^{-2}$ 로 증가하였다. 따라서 해수면 온도에 대한 구름복사 강제력의 의존도는 적도 동태평양에서 열대 해양으로 넓어질수록 경년 변동에 의해 영향에서 계절변동에 의한 영향이 더 지배적으로 작용한다. 계절 변동이 포함된 경우 해역에 관계없이 해수면 온도가  $1^{\circ}\text{C}$  증가할 때, 순 구름복사 강제력은 약  $2\sim 3\text{Wm}^{-2}$  증가하였다. 이러한 결과는 해수면 온도의 경년 변동이 뚜렷한 적도 동태평양에서는 경년 변동에 의한 구름복사 강제력이 대기를 가열하는 반면, 열대 해양 전체에서는 계절변동에 의한 구름복사 강제력이 대기를 가열한다는 것을 의미한다.

**주요어:** 구름복사 강제력, 경년 변동, 계절 변동, 해수면 온도.

\*Corresponding Author: mkkim@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8531

Fax: 82-41-856-8527

## 서 론

구름-기후 상호작용은 기후계의 많은 불확실성 요소 중에서 상당히 불확실성이 큰 대표적인 요소이다. 구름은 입사 태양 복사량의 일부분을 반사시켜 지표-대기계의 태양복사 흡수를 감소시키며 다른 한편으로는 방출 지구 복사에 대한 유효 온도를 낮추어 계의 에너지 손실을 막아주는 역할을 하기 때문에 두 개의 상반된 효과의 크기는 지표 기후변동에 큰 영향을 미친다. 온정과 운저의 고도, 구름의 광학적 성질 등에 의해 대기 상부와 지표면에서의 복사 효과는 매우 다르게 나타나며 (손병주, 1996), 구름복사 피드백은 구름의 양, 종류, 고도 등에 의해서 좌우될 뿐만 아니라 위도 및 계절의존도를 갖는다 (김맹기와 강인식, 1998). 특히, 대부분 해양으로 덮여 있는 열대 지방에서 경년 변동에 의한 구름복사 강제력은 해수면 온도와 밀접하게 연관되어 있으며 그 연관성은 해역에 따라 다르게 나타난다(Zhang *et al.*, 1996).

지구복사수지실험(Earth Radiation Budget Experiment, ERBE) 자료의 제공으로 대기 상단에서 구름에 의한 장파와 단파복사량을 보다 정확하게 추정할 수 있게 되었으며(Ramanathan *et al.*, 1989), ERBE 자료를 이용하여 구름복사 강제력의 계절 변동성을 추정하였고(Harrison *et al.*, 1990; Bergman and Hendon, 2000), 여러 연구에서 구름과 해수면 온도의 관계가 조사되었다(Hartmann and Michelsen, 1993; Arking and Ziskin, 1994; Song and Kim, 2002, Ho *et al.*, 2002). Pai and Rajeevan(1998)은 ERBE 자료를 사용하여 열대 인도양 지역의 대기 상단에서 순 구름복사 강제력의 변동성을 조사하였다. 이들은 이 지역의 구름복사 강제력이 상층운의 변동성과 강하게 관련되어 있지만 하층운과 중층운의 변동성과는 관계가 약하다고 하였다. 특히, 인도양 지역에서는 7월에 상층운량이 50%를 초과할 때 순 구름복사 강제력은 커졌다. 반면 온난한 서 태평양에서 순 구름복사 강제력이 크지 않았는데, 그 이유는 이 지역에서 상층운량이 50%를 넘지 않았기 때문이었다. Bony *et al.* (1997)은 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)의 40년 재분석 자료와 ERBE scanner자료를 사용하여 구름복사 강제력에서 해수면 온도와 대규모 순환의 영향을 연구하였다. 그 결과, 온실효과는 SST가 상승할 때 대규모 상승운동과 연

관되어 일어나면 더욱더 커진다는 것을 제시하였다.

SST에 대한 구름복사 강제력은 대부분 경년변동의 관점에서 연구되었을 뿐 계절사이클의 관점에서 연구된 경우는 상당히 적다. 또한 계절변동은 자오면 순환과 연관되어 있으므로 SST에 대한 구름복사 강제력의 지역의존도에 밀접하게 연관될 것으로 생각된다. 따라서 이 연구에서는 해수면 온도와 구름복사 강제력사이의 관계가 어떠한 지역의존도를 갖는지를 조사하고자 한다. 또한 그러한 의존도가 경년 변동과 계절 변동에서 어떻게 차이를 보이는지를 조사하였다.

## 연구 방법

대기상단의 복사 자료는 ERBE scanner의 장파 및 단파복사의 월평균 자료가 이용되었다. 이 자료는 Earth Radiation Budget Satellite(ERBS), National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)-9와 NOAA-10을 결합한 S-4 자료이다(Table 1). S-4 자료는 지역적, 수평적, 그리고 전지구 평균 규모에서 플럭스(flux)와 알베도(albedo)의 평균을 포함하고, 맑은 하늘(clear sky)과 구름 낀 하늘(cloudy sky)에 대한 복사자료를 포함한다. 공간 해상도는  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  이고, 기간은 1985년부터 1989년까지의 60개월이다. 이 기간은 ERBE scanner 자료가 이용 가능한 기간이다. ERBE scanner 자료에서 맑은 하늘과 흐린 하늘에서의 에러는 시간과 공간 평균을 하였을 때 2% 미만으로 추정되었다(Harrison *et al.*, 1990). 이 연구에서는 Zhang *et al.*(1996)의 방법과 동일하게 인접한 4개의 격자에서 가장 큰 값을 에러 격자에 채워서 사용하였다. 즉, 구름복사 강제력을 유도할 때 맑은 하늘에서의 복사의 결측을 주변 값 중에서 가장 큰 값으로 채워주었다. 이러한 부분은 전체의 아주 적은 부분에 불과하다.

구름 자료는 ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project) D2에서 제공되는 구름의 총량을 이용하였다(William *et al.*, 1999). ISCCP D2 구름자료는 해상도는 280km이며, 월평균 자료를 지구 전체에 대해 제공하고 있으며, 전체 구름량과 구름 종류의 분포와 특성을 제시하였다. ISCCP D2에서는 구름을 고도에 따라 상층운(cloud top pressure:  $P_c < 440hPa$ ), 중층운( $P_c = 680hPa \sim 440hPa$ ), 하층운( $P_c > 680hPa$ )으로 분류하였으며, 하층운과 중층운은 물방울과 얼음알갱이로 나뉘었고, 상층운은 단지 얼음알

**Table 1.** Archival status of S-4 products from 1984 to 1990

Periods	Satellites
November 1984 - January 1985	ERBS
February 1985 - October 1986	ERBS/NOAA-9
November 1986 - January 1987	ERBS/NOAA-9/NOAA-10
February 1987 - May 1989	ERBS/NOAA-10
June 1989 - February 1990	ERBS

갱이로 되어있다. ISCCP D2 자료의 해상도는 ERBE scanner 자료와 같다.

해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)는 NCEP에서 분석한 자료를 사용하였다. 이 자료는 배, 부이 그리고 위성측정을 분석하여 얻어진 것이다. 이 자료의 공간 해상도는  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 로서 ERBE scanner 자료와 같은 해상도로 내삽하여 사용하였다. SST에 대한 상세한 설명은 Reynolds(1988)의 보고서에서 얻을 수 있다. 그리고 P-velocity, U, V, 잠열 속(Latent Heat Flux)은 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용하였다. 이 자료의 공간 해상도는  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 로서 ERBE scanner 자료와 동일하며, 기간은 ERBE scanner 자료와 같은 기간이다. 분석 영역은 열대 해양(30N~30S)이다.

구름복사 강제력은 대기의 상단에서 지구-대기 시스템에 들어오는 복사 에너지에 대한 구름의 영향으로 정의한다. 이것의 변동은 기후 시스템에서 구름의 되먹임을 표현한다. 즉, 구름복사 강제력이 양(음)의 값을 가지면 구름의 변화(감소)에 따른 복사효과로 인하여 대기를 가열(냉각)하는 것을 의미한다. 만약 대기의 상단에서 나가는 장파복사를 F로 표시하고, 들어오는 단파복사를 S로 표시한다면, 장파 구름복사 강제력(Longwave Cloud Radiative Forcing, LWCRF), 단파 구름복사 강제력(Shortwave Cloud Radiative Forcing, SWCRF), 순 구름복사 강제력(Net Cloud Radiative Forcing, Net CRF)은 다음과 같이 정의된다.

$$LWCRF = F_{clr} - F \quad (1)$$

여기서 아래첨자 clr은  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 내에 맑은 하늘에 대한 F의 값이다. LWCRF는 보통 양의 값을 가지며, 구름이 있으면 방출되는 LW의 감소를 의미한다.

$$SWCRF = S(\alpha_{clr} - \alpha) \quad (2)$$

$\alpha$ 는 지구-대기 시스템에서 전체 하늘의 알베도,  $\alpha_{clr}$ 는 맑은 하늘의 알베도를 의미한다. SWCRF는 보

통 음의 값을 가진다. 순 복사강제력은 SWCRF와 LWCRF의 합으로 식 (3)과 같이 정의되며, 그 크기는 SWCRF와 LWCRF의 크기에 의존된다.

$$Net\ CRF = SWCRF + LWCRF \quad (3)$$

CRF(Cloud Radiative Forcing)와 SST의 관계를 연구하기 위하여, 열대 해양에서 구름과 SST의 계절변동을 제거한 60개월 편차 자료와 원시 자료가 사용되었다. 이 편차 자료는 매달 원시자료와 기후평균(climatology)의 차이이다. 월별 기후평균값은 5년의 자료를 평균하여 구하였다. 이 자료는 정확한 기후의 경년변동을 정의하기에는 짧은 기간이지만 ERBE scanner 자료의 전체 기간이기도 하다. 이 기간에는 엘니뇨가 포함되어 있어 단순평균으로 계절사이클을 계산할 경우에 그 영향이 계절 사이클에 개입될 여지가 있다. 그러나 편차자료를 이용한 실제 분석에서 경년 변동이 잘 나타나는 것으로 보아 큰 문제는 없었다. 여기서 편차자료를 분석한 결과는 경년변동의 영향을 나타내며, 원시자료를 분석한 결과와 편차 자료를 분석한 결과의 차이는 계절변동의 영향을 나타낸다. 이 연구에서는 계절 변동의 영향을 직접 분석하지는 않았는데 그 이유는 경년 변동의 경우와 같은 자료 수를 유지하기 위해서이다.

SST와 CRF사이의 관계를 조사하기 위하여 SST를 독립변수로, CRF 등을 종속변수로 한 단순회귀 모형의 회귀계수가 이용되었다.

$$y = \alpha + \beta x \quad (4)$$

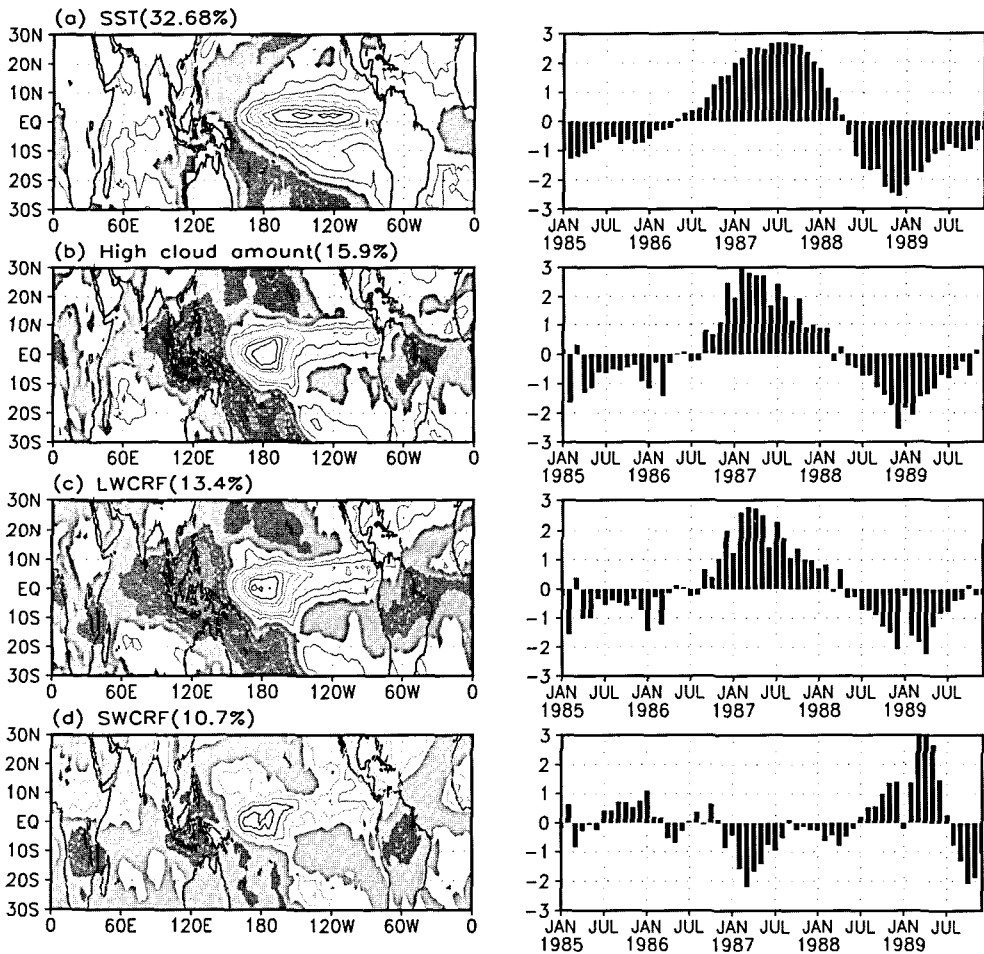
여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 회귀계수를 나타낸다. 여기서  $\beta$ 는 SST가  $1^{\circ}C$  변화했을 때, CRF 등이 얼마나 변화하는지를 나타낸다.

기상 변수의 시공간 변동을 분석하기 위하여 경험적 직교함수 분석(Empirical Orthogonal Functions, EOF)이 사용되었다. 이 방법은 상당히 많은 문헌에서 활용되었는데, 그 상세한 서술은 Preisendorfer and Mobley(1988)를 참고하기 바란다.

## 결과 및 토의

### SST에 대한 구름복사 강제력의 의존도

열대 해양에서 SST는 구름복사 강제력과 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 이 관계에 대기의 동서 및 남북 대기순환은 매우 중요한 연결고리를 형성한다.



**Fig. 1.** The spatial eigenvector (left panel) and time coefficients (right panel) of the first EOF mode of observed monthly anomaly data. (a): sea surface temperature, (b): high cloud amount, (c): longwave cloud radiative forcing, (d): shortwave cloud radiative forcing.

이러한 대기 순환의 연결 고리 때문에 같은 위도라 하더라도 해역에 따라 그 관계는 상이할 수 있다. 실제로 Zhang *et al.*(1996)에서 제시한 바와 같이 계절 사이클이 제거된 자료를 사용한 분석에서 SST와 구름복사 강제력사이의 관계는 적도 동태평양과 열대 해양 전체에서 서로 다르게 나타났다. 그런데 대기의 순환은 계절사이클이 포함되는냐 그렇지 않느냐에 따라 다르게 나타날 것이고, 해역에 따라서 다르게 나타날 것이다.

Fig. 1은 ERBE 기간 동안에 주요변수의 경년 변동성을 조사하기 위하여 60개월의 월평균 편차자료를 경험적 직교함수분석에 적용하여 얻은 결과이다. Fig. 1에서 왼쪽은 고유벡터 값(eigen value)을 나타내고, 오른쪽은 시간계수(Time Coefficient)의 값을

나타낸다. 1987년 엘니뇨와 관련하여 적도 동태평양(10S-10N, 180°-90W)에서는 SST가 양의 값을 갖고, 서태평양에서는 음의 값을 갖는 것을 알 수 있다 (Fig. 1a). 또한 인도양과 대서양의 많은 해역에서 엘니뇨시기에 SST가 양의 값을 갖는다. 엘니뇨 시기(1987년)에 적도 동태평양에서 SST가 상승했을 때, 적어도 상층운량의 패턴은 SST 패턴과 유사하다 (Fig. 1b). 이러한 일치는 열대 해양에서 특히 두드러지게 나타난다. 반면, 열대 인도양에서는 SST의 상승에도 불구하고 상층운량은 다소 감소하는 경향을 보인다. 같은 시기에 적도 동태평양에서 상층운량과 LWCRF는 증가하지만, 인도양 지역의 상층운량과 LWCRF는 SST가 상승했음에도 불구하고 감소한다 (Fig. 1a-c). LWCRF의 패턴은 상층운의 패턴과 거의

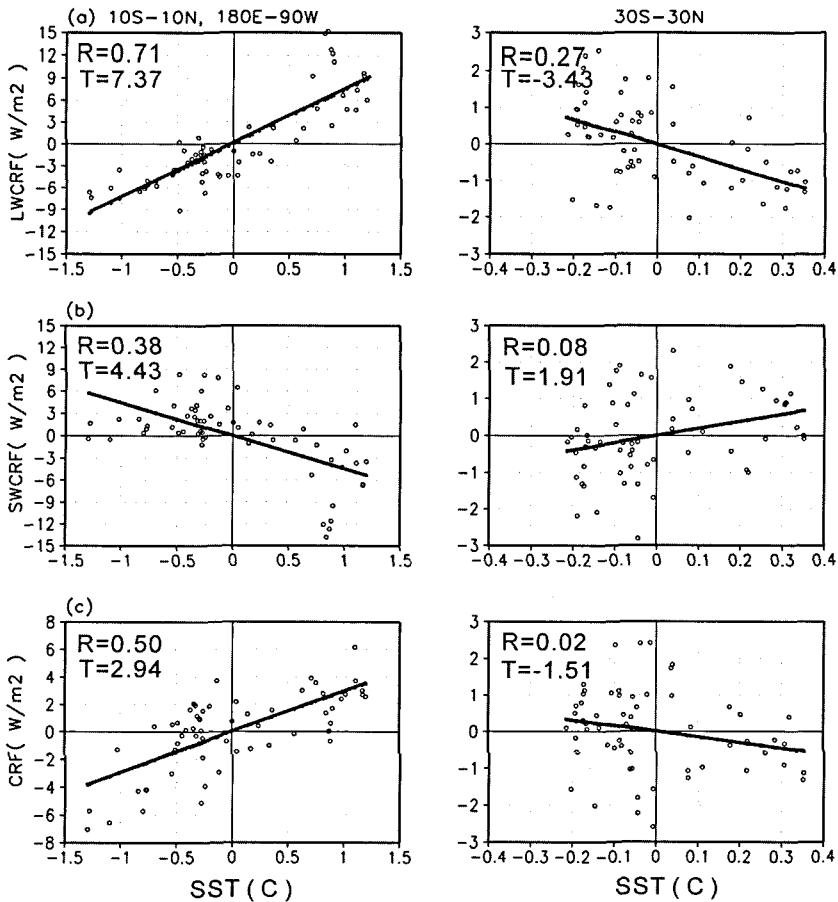


Fig. 2. Relationships of (a) longwave, (b) shortwave, and (c) net cloud-radiative forcing with SSTs obtained by employing monthly mean anomaly data. Left panels are for the equatorial eastern Pacific and Right panels are tropical Oceans.

일치하지만 SWCRF과는 반대의 변동을 보여준다. 즉, 엘니뇨시기에 적도 동태평양에서 SWCRF는 음의 값을 보이며, 열대 서태평양과 열대 인도양에서 SWCRF는 양의 값을 나타낸다.

적도 동태평양지역은 높은 SST에 대해 대류 활동이 강하고 구름복사 강제력의 크기도 크게 반응하는 하는 것으로 알려져 있다(Lau et al., 1997). 이를 고찰하기 위하여 편의상 위도 10S-10N, 경도 180°-90W 지역을 적도 동태평양으로, 위도 30S-30N의 해양을 열대 해양으로 정하고, SST에 대한 구름복사 강제력의 영향을 조사하였다(Fig. 2). 이 그림에서 하나의 점은 한 달을 의미하며, 전체는 60개월 아노말리의 지역평균으로 구성된 것이다. 그리고 R은 결정계수를 나타내고, T는 회귀계수 값을 나타낸다. 결정계수에서 알 수 있듯이 적도 태평양의 경우는 SST와

CRF가 강하게 상관된 것을 보이고 있지만, 열대 해양에서는 SST와 CRF의 상관성이 적을 것을 알 수 있다. 그러나 회귀계수 값의 부호는 상당한 의미를 갖는다. 즉, 적도 동태평양의 경우에 SST가 증가하면 LWCRF가 증가하는 반면, SWCRF는 감소하는 특성을 보인다. SST 변화에 따른 영향은 SWCRF보다는 LWCRF에서 더 큰 것으로 나타난다. 따라서 순 복사 강제력은 장파복사 강제력의 특성을 따른다. SST에 대한 복사강제력의 의존도를 고찰해보면, SST 1°C 증가할 때 LWCRF이 약 7.4Wm<sup>-2</sup>가 증가하였으며, SWCRF 이 약 4.4Wm<sup>-2</sup> 감소하였다. 따라서 SST가 1°C 증가할 때, netCRF 는 3.0Wm<sup>-2</sup> 증가한다. 한편, 열대 해양에서는 적도 동태평양과 완전히 상반된 관계를 나타내고 있다. 즉, SST가 높아짐에 따라 LWCRF는 감소한다. SST가 높아질 때, 장파복사는

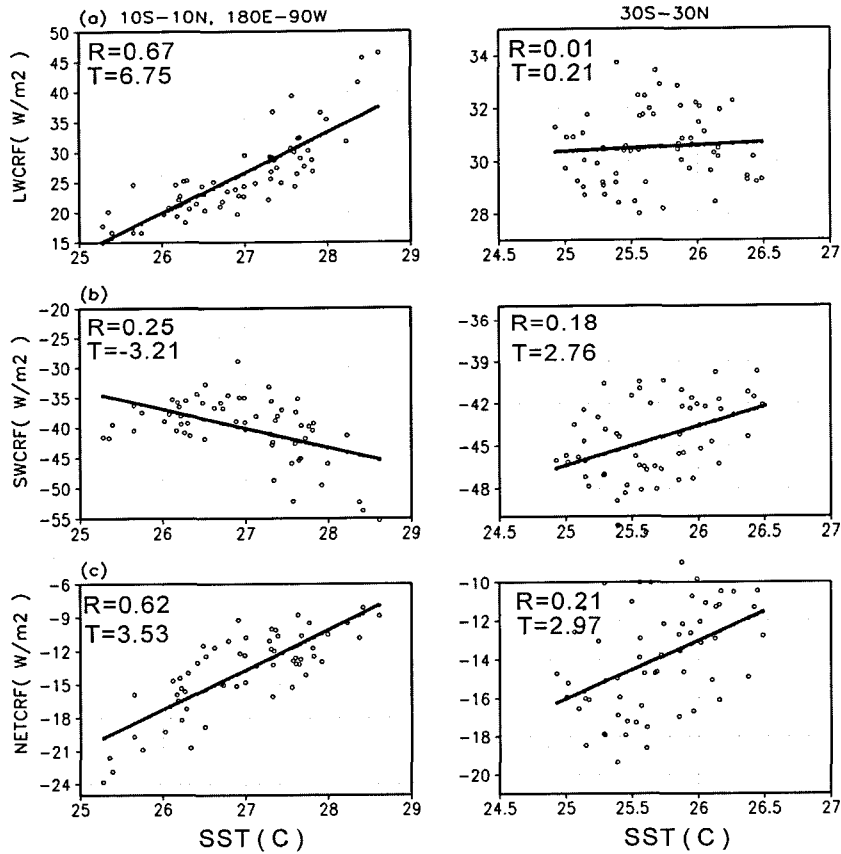


Fig. 3. Relationships of (a) longwave, (b) shortwave, and (c) net cloud-radiative forcing with SSTs obtained by employing monthly mean data. Left panels are for the equatorial eastern Pacific and Right panels are tropical Oceans.

구름에 의해 적게 차단(trapping)되어 대기상단으로 방출이 커지게 된다. 특히, 열대 해양이 적도 동태평양을 포함한다는 것을 감안하면 적도 동태평양 이외의 해역에서는 SST의 증가에 따른 LWCRF의 감소 폭이 훨씬 더 커졌을 것이다. 이러한 해석은 Fig. 1a-c의 고유벡터의 분포로부터도 쉽게 이해할 수 있다. 경년 변동에서 SST의 증가가 뚜렷한 적도 동태평양(10S-10N, 180°-90W)에서는 상층운량의 증가가 뚜렷하고, 그에 따라 LWCRF도 뚜렷하게 증가하는 반면, 그 이외의 해역에서는 일부 해역을 제외하고 SST의 증가에도 불구하고 상층운량이 감소하고, LWCRF도 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 1a-c). SWCRF의 경우도 적도 동태평양에서의 결과와 상반되는 결과를 보인다(Fig. 2b). SST에 대한 복사강제력의 의존도를 보면, SST 1°C가 증가할 때 LWCRF이 약 3.4Wm<sup>-2</sup>가 감소하였으며, SWCRF 이 약 1.9Wm<sup>-2</sup> 증가하였다. 따라서 SST 1°C가 증가할 때, netCRF는 약

1.5Wm<sup>-2</sup> 감소하였다.

계절 변화를 제외한 경년 변동에서 해역의 SST 변화에 따른 구름복사 강제력은 분명한 해역 의존도를 갖고 있다. 특히 SST의 경년 변동이 분명한 적도 동태평양에서 SST의 증가에 따른 구름복사 강제력은 대기를 온난화 시키는 역할을 하는 반면, 열대해양 전체를 고려하였을 때, 구름복사 강제력이 오히려 대기를 냉각시키는 역할을 하였다. 따라서 좁은 해역에서(예를 들면 적도 동태평양) SST가 증가했을 때 구름이 대기를 가열시키는 방향으로 작용하더라도 광역규모로 보면(예를 들면 열대 해양) 구름이 오히려 대기를 냉각시킨다. 그 원인은 소위 열대 전체에 걸쳐 나타나는 광역규모의 대기순환(예를 들면 워커 순환)과 관련된 것으로 보인다. 즉, 열대 해양의 경우 SST의 증가가 상층운의 증가를 유도하는 반면, 상대적으로 그 주변에서 하강운동을 유도하여 상층운의 감소를 유도한다(Fig. 1b). 물론 구름복사 강제력은 구름의

Table 2. Classification of different ten regions

Region	Latitude, longitude	Region	Latitude, Longitude
1	10S-10N, 180°-90W	6	30S-30N, 120E-70W
2	10S-10N, 120E-70W	7	20S-20N, 45E-70W
3	10S-10N, 45E-70W	8	20S-20N, Global
4	20S-20N, 120E-70W	9	30S-30N, 45E-70W
5	10S-10N, Global	10	30S-30N, Global

높이, 형태, 그리고 구름의 광학적 성질 등 다양한 원인에 의해 변화된다. 그럼에도 불구하고 상층운의 변동은 열대 해역의 대류활동의 지표로써 매우 좋은 지시자임에는 틀림이 없다. 특히, 상층운의 시공간 변동 특성이 SWCRF와 LWCRF의 시공간 변동과 매우 밀접한 관계를 보여주는 것이 이를 반증한다 (Fig. 1). 특히 인도양의 많은 지역은 SST의 증가에도 불구하고 상층운량이 감소하는 특성을 보였다. 이러한 특성은 인도양 지역이 적도 동태평양에서의 상승운동과 연관된 동서순환의 하강 지역이라는 것을 반증한다.

계절 사이클이 포함된 60개월 원시자료에서 SST에 따른 구름복사 강제력이 조사되었다(Fig. 3). 적도 동태평양지역에서 SST가 증가하면 LWCRF는 증가하지만, SWCRF는 감소하였다(Fig. 3의 왼쪽). 이러한 특성은 경년 변동에서(Fig. 2c) 나타난 특성과 정성적으로 같다. 적도 동태평양에서 해수면 온도가 1°C의 증가했을 때 netCRF는 약 3.5Wm<sup>-2</sup> 증가하였다. 이 값은 경년 변동에서(Fig. 2c) 나타났던 3.0Wm<sup>-2</sup>보다 약 0.5Wm<sup>-2</sup> 증가한 양이다. 따라서 적도 동태평양에서 계절사이클은 SST에 대한 순 복사 강제력을 다소 증가시키는 역할을 한다. 열대 해양의 경우(Fig. 3의 오른쪽) 경년변동에서(Fig. 2의 오른쪽) 나타난 특성과는 반대의 특성을 보인다. 열대 해양에서 해수면 온도가 1°C의 증가했을 때 netCRF는 약 2.9Wm<sup>-2</sup> 증가하였다. 이러한 값은 경년 변동에서 보여준 -1.5Wm<sup>-2</sup>와는 완전히 다르다. 반면, 적도 동태평양과 열대 해역에서 모두 같은 의존도를 보여준다. 따라서 계절사이클은 SST에 대한 순 복사강제력의 의존도를 증가시키는 방향으로 작용한다. 특히, 열대 해양전체에서 계절사이클이 제거된 경우(Fig. 2)에 비해 계절사이클이 포함된 경우(Fig. 3)에 netCRF의 결정계수가 0.21로 증가하였다. 이것은 열대 해양 전체에서 해수면 온도에 대한 의존도는 계절 사이클이 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

### 지역 의존도

앞서의 결과는 SST와 구름복사 강제력의 관계가 해역에 따라 또는 해역의 크기에 따라 달라질 수 있으며, 같은 해역이라 하더라도 계절사이클이 포함되어 있느냐에 따라 다르게 나타나한다는 것을 보여준다. 이는 지역에 따라 지역에 따른 보상관계에서 기원된 것으로 추정할 수 있다. 즉 적운규모와 그 주변을 포함한 공간규모에서 상승과 하강은 보상관계가 유지된다. 광역규모에서도 그와 유사한 보상관계가 성립할 수 있다. 그 대표적인 예로는 워커순환, 해들리 순환을 들 수 있다. 오히려 월평균적인 자료를 사용할 경우에는 적운 규모의 보상관계보다는 워커순환 규모의 보상관계가 더 확실하게 나타날 것이다. 이러한 관계를 조사하기 위하여 열대 해역을 10개로 구분하였다 (Table 2). 이 지역의 구분은 Zhang *et al.*(1996)에 의해 구분한 12개 지대를 참고하여 10개를 선정한 것이다. 지역 1은 적도 동태평양의 중부와 동부를 나타내며 지역 10으로 갈수록 인도양을 포함하고 ±30도도 넓어진다.

Fig. 4는 60개월 편차 자료를 이용하여 해역별로 SST와 구름복사 강제력간의 회귀계수를 나타낸 것이다. 가로축은 Table 2의 10개의 지역을 나타내며, 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 지역 크기가 커진다. 세로축은 SST와 CRF사이의 회귀계수값을 나타낸다. 사용한 자료가 계절 사이클이 제거된 편차 자료이므로 이 결과는 경년변동에 의한 영향을 나타낸다. 이 분석은 Fig. 2와 Fig. 3에서 제시한 것과 같이 해역이 넓어지면서 유의수준이 어느 정도 낮아진다. 그러나 회귀계수값의 부호는 상당한 의미를 갖는다. 해역이 넓어지면서 LWCRF에 대한 회귀계수 값은 음에서 양으로 감소하고, SWCRF에 대한 회귀계수는 음에서 양으로 증가한다. net CRF에 대한 회귀계수는 LWCRF에 대한 회귀계수의 부호와 같다. 이는 경년 변동에서 net CRF가 해역에 관계없이 LWCRF에 의해 지배된다는 것을 의미한다. 그리고 열대 적도해양

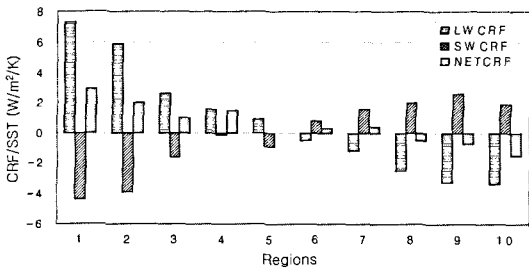


Fig. 4. Regression coefficients of the longwave (left), short-wave (middle) and net (right) cloud radiative forcing against sea surface temperature for different ten regions in the inter-annual time scale.

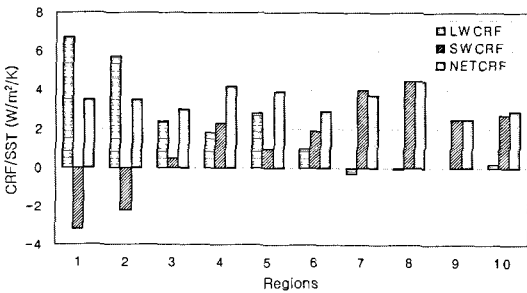


Fig. 5. Regression coefficients of the longwave (left), short-wave (middle) and net (right) cloud radiative forcing against sea surface temperature for different ten regions in the raw data.

(10S-10N, Global)에서는 LW와 SW가 모두 소거되는 모습이 나타난다. 그리고 LWCRF와 SWCRF의 회귀계수 값은 대부분의 지역에서 반대의 부호로 나타난다. SST에 대한 구름복사 강제력의 해역의존도는 대기의 순환에 따른 보상관계를 간접적으로 보여주는 좋은 지시자이다. SST의 경년 변동이 뚜렷한 열대 해역의 경우 왕성한 대류활동과 그에 따른 상층운의 증가로 인하여 장파복사에 의한 구름 복사 강제력이 상당히 증가하는 반면, 열대 해역으로 넓어지면서 오히려 구름에 의한 장파복사 강제력이 점점 적어지다가 결국 음의 값을 보인다. 특히, 해역 7과 9, 8과 10은 해역 1, 2, 3, 4와 좋은 대비관계를 보여준다(Table 2 참조). 즉, 해역 7, 8, 9, 10은 해역 1, 2, 3, 4와 달리 모두 LWCRF가 모두 음의 값을 갖는다. 또한 해역 7보다는 9에서 해역 8보다는 10에서 더 큰 음의 값을 갖는다. 즉, 적도 동태평양 지역을 이외의 지역이 포함될수록 LWCRF의 의존도는 감소하는 방향으로 진행된다. 반면 SWCRF의 의존도는

증가하는 방향으로 증가한다. 따라서 이러한 특성은 적도 동태평양 이외의 지역의 하강 보상운동에 기인한 구름의 감소에 의한 효과로 해석할 수 있다.

전체변동에서도(Fig. 5) LWCRF의 의존도는 지역이 증가할수록 감소하며, SWCRF의 의존도는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 net CRF의 의존도는 모든 해역에서 양의 값을 보였다. 흥미로운 것은 적도 동태평양의 특성은 경년변동에서 나타난 특성과 거의 유사하게 나타났다. 반면 해역이 넓어질수록 매우 다른 특성을 보였다. 따라서 적도 동태평양의 구름복사 강제력의 의존도는 거의 경년 변동에 의해 지배되며, 해역이 넓어질수록 계절사이클의 영향이 지배적이다. 경년변동에서 순복사 강제력의 의존도는 해역에 따라 매우 다른 값을 보이지만, 계절 사이클에서 순복사 강제력의 의존도는 해역에 따라 큰 영향을 보이지 않는다. 또 하나의 특성은 경년변동에서 순복사강제력은 모든 해역에서 장파복사강제력에 의해 지배되는데 비해, 계절 사이클에서 순복사강제력은 적도 동태평양에서는 장파복사에 의해 지배되지만 열대 해양에서는 단파복사강제력에 의해 지배된다는 점이다. 또한 한가지 특성은 SST에 대한 단파복사강제력의 의존도가 경년변동과 계절변동에서 정성적으로 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 해역 1쪽으로 갈수록 음의 값을 갖고, 해역 10으로 갈수록 양의 값을 나타낸다.

## 결론

이 연구에서는 ERBE, ISCCP D2 그리고 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하여 열대 해양에서 나타나는 구름복사 강제력이 SST 및 대기 순환과 어떻게 연관되어 있는지를 조사하였다. 사용한 자료의 기간은 ERBE 자료가 이용 가능한 1985년 1월부터 1989년 12월까지 5년간이다. 구름복사 강제력은 ERBE 자료를 이용하여 계산하였으며, 구름자료는 상층운, 중층운, 하층운으로 구별된 자료를 사용하였다. 특히, 이 연구에서는 적도 동태평양에서 나타나는 구름복사 강제력의 지역적 보상효과를 조사하기 위하여 적도 동태평양(10S-10N, 180°-90W)에서부터 열대 해양(30S-30N)으로 점차 지역을 넓히면서 10개의 지역으로 구분하여 SST와 구름복사 강제력의 연관성을 조사하였다. 이 분석은 계절변동이 제거된 자료(편차자료)와 제거하지 않은 원래의 자료(원시자료)를 이용하여 이루어졌다.



편차자료를 사용한 경우, 적도 동태평양에서는 SST가 1°C 증가할 때 장파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $7.3\text{Wm}^{-2}$ , 단파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $-4.4\text{Wm}^{-2}$ 를 나타냈다. 이 결과는 SST의 증가와 연관되어 구름은 대기를 가열시키는 역할을 한다. 반면 지역이 점차 넓어질수록 구름복사 강제력의 크기는 점차 감소하여 처음의 부호와 반대의 부호를 나타냈다. 특히, 열대 해양 전체에 대해서 SST가 1°C 증가할 때 장파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $-3.4\text{Wm}^{-2}$ , 단파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $1.9\text{Wm}^{-2}$ 를 나타냈다. 따라서 비록 SST의 경년 변동이 뚜렷한 적도 동태평양에서 SST의 상승에 따른 구름의 변화가 대기를 가열시키는 역할을 한다고 하더라도 열대 해양 전체적인 관점에서 보면 오히려 구름이 대기를 냉각시킨다는 것을 나타낸다.

계절변동을 제거하지 않은 원시자료를 사용한 경우, 적도 동태평양에서는 SST가 1°C 증가할 때 장파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $6.7\text{Wm}^{-2}$ , 단파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $-3.2\text{Wm}^{-2}$ 를 나타냈다. 이 결과는 편차자료를 사용한 경우의 결과와 정성적으로 잘 일치한다. 다만 그 크기가 작아졌다. 따라서 적도 동태평양의 경우 SST에 대한 구름복사 강제력의 의존도는 경년변동이 지배적이며, 계절변동은 그 의존도를 약화시키는 방향으로 작용한다. 지역이 점차 넓어질수록 구름복사 강제력의 크기는 점차 감소하여 SST에 대한 의존도가 약하게 나타난다. 특히, 열대 해양 전체에 대해서 SST가 1°C 증가할 때 장파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $0.2\text{Wm}^{-2}$ 로 매우 작으며, 단파복사에 의한 구름복사 강제력은 약  $2.7\text{Wm}^{-2}$ 로 크게 나타났다. 이 결과는 계절변동과 경년변동의 영향이 포함된 경우 적도 동태평양에서뿐만 아니라 열대 해양 전체에서도 SST의 상승에 따른 구름의 변화가 대기를 가열시키는 역할을 한다는 것을 나타낸다. 따라서 SST의 경년변동이 뚜렷한 적도 동태평양에서는 경년변동에 의한 구름복사 강제력이 대기를 가열하는 반면, 열대 해양 전체에서는 계절변동에 의한 구름복사 강제력이 대기를 가열한다.

## 감 사

이 연구는 2001년도 공주대학교 학술연구비 지원 과제 「구름이 복사냉각 및 가열에 미치는 영향」에 의해 이루어졌으며, 연구비 지원에 감사한다.

## 참고 문헌

- 김맹기, 강인식, 1998, 지표온난화에 미치는 구름-복사 파드백의 계절의존도. 한국기상학회 추계학술대회 초록집. 194-197.
- 손병주, 1996, 구름이 지표 장파복사 수지에 미치는 영향. 한국기상학회지, 32(2), 229-242.
- Arking, A. and Ziskin, D., 1994, Relationship between clouds and sea surface temperatures in the western tropical Pacific. *Journal of Climate*, 7, 988-1000.
- Bony, S., K. Lau, M., and Sud, Y. C., 1997, Sea surface temperature and large-scale circulation influences on tropical greenhouse effect and cloud radiative forcing. *Journal of Climate*, 10, 2055-2077.
- Bergman, J. and Hendon, H. H., 2000, The impact of clouds on the seasonal cycle of radiative heating over the Pacific. *Journal of the Atmospheric Science*, 57, 545-566.
- Harrison, E. F., Barkstorm, B. R., Ramanathan, V., Cess, R. D., and Gibson, G. G. 1990, Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the Earth radiation Budget Experiment. *Journal of Geophysical Research*, 95, 18687-18703.
- Hartmann, D. L. and Michelsen, M., 1993, Large-scale effects on the regulation of tropical sea surface temperature. *Journal of Climate*, 6, 2049-2062.
- Ho, C.-H., Chou, M.-D., and Sui, C.-H. 2002, Comparison of different earth radiation budget experiment data sets over tropical oceans. *International Journal of Climatology*, 22, 263-270.
- Lau, K.-M., Wu, H.-T., and Bony, S., 1997, The Role of Large-Scale Atmospheric Circulation in the Relationship Between Tropical Convection and Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, 10, 381-392.
- Pai, D. S. and Rajeevan, M., 1998, Clouds and cloud radiative forcing over tropical Indian ocean and their relationship with sea surface temperature. *Current Science*, 75, 372-381.
- Preisendorfer, R. W. and Mobley, C. D., 1988, Principal component analysis in meteorology and oceanography. Elsevier Science Publication, 425 pp.
- Ramanathan, V., Cess, R. D., Harrison, E. F., Minnis, P., Barkstorm, B. R., Ahmad, E., and Hartmann, D., 1989, Cloud-radiative forcing and climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment. *Science*, 243, 57-63.
- Rossov, W. B., Brest, C. L., and Roiter, M., 1996, International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) Update of Radiance Calibrations. WMO/TD-No. 736. World Meteorological Organization.
- Song, B.-G. and Kim, Y.-S., 2002, Interrelationship between sea surface temperature and clouds over the Tropical ocean. *Journal of the Korean Meteorological*

Society, 38 (3), 225-235.  
Zhang, M. H., Cess, R. D., and Xie, S. C., 1996, Relationship between Cloud Radiative Forcing and Sea Surface

Temperatures over the Entire Tropical Oceans, Journal of Climate 9, 1374-1384.

---

2003년 6월 20일 원고 접수  
2003년 9월 1일 수정원고 접수  
2003년 9월 20일 원고 채택