

지표 에너지 수지에 미치는 구름의 복사 역할

홍성철·정일웅·김형진·이재범^{*}·오성남^{***}
강릉대학교 대기환경과학과, ^{*}IPRC/University of Hawaii
^{**}국립환경과학원 지구환경연구소, ^{***}기상연구소 원격탐사연구실
(2006년 5월 10일 접수; 2007년 1월 15일 채택)

Radiative Role of Clouds on the Earth Surface Energy Balance

Sung-Chul Hong, li-Ung Chung, Hyung-Jin Kim^{*}, Jae-Bum Lee^{**} and Sung-Nam Oh^{***}

Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangnung National University, Gangneung 210-702, Korea

^{}International Pacific Research Center, 1680 East West Road, POST 401 Honolulu, Hi 96822, USA*

*^{**}Global Environment Research Center, National Institute Environment Research, Incheon 404-708, Korea*

*^{***}Remote Sensing Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Seoul 460-18, Korea*

(Manuscript received 10 May, 2006; accepted 15 January, 2007)

In this study, the Slab Ocean Model (SOM) is coupled with an Atmospheric General Circulation Model (AGCM) which developed in University of Kangnung based on the land surface model of Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS). The purposes of this study are to understand radiative role of clouds considering of the atmospheric feedback, and to compare the Clouds Radiative Forcing (CRF) come from the analyses using the clear-cloud sky method and CGCM. The new CGCM was integrated by using two sets of the clouds with radiative role (EXP-A) and without radiative role (EXP-B). Clouds in this two cases show the negative effect -26.0 Wm^{-2} of difference of radiation budget at top of atmosphere (TOA). The annual global means radiation budget of this simulation at TOA is larger than the estimations (-17.0 Wm^{-2}) came from Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). The work showed the surface negative effect with -18.6 Wm^{-2} in the two different simulations of CRF. Otherwise, sensible heat flux in the simulation shows a great contribution with positive forcing of $+24.4 \text{ Wm}^{-2}$. It is found that cooling effect to the surface temperature due to radiative role of clouds is about 7.5°C . From this study it could make an accurate of the different CRF estimation considering either feedback of EXP-B or not EXP-A under clear-sky and cloud-sky conditions respectively at TOA. This result clearly shows its difference of CRF -11.1 Wm^{-2} .

Key Words : Slab ocean model, CGCM, Clouds radiative forcing, Radiative role of clouds, Feedback

1. 서론

지구 에너지 균형에 미치는 구름의 역할을 밝히는 것은 현재의 기후 시스템을 이해하고 미래의 기후 변화를 예측하는데 중요하다. 이 역할의 정량적 추정을 위해서 과거에 이루어진 많은 관측 및 모델링 연구는 주로 전천 복사량과 청천 복사량의 차이

로 정의되는 구름의 복사 강제(Cloud Radiative Forcing, 이하 간단히 CRF)를 분석하는데 초점이 맞추어져 왔다^{1,2)}.

Manabe and Strickler³⁾는 구름의 복사 효과를 살펴보기 위하여 1차원 대류 복사 모형 실험을 통해 지구 평균 지표 온도를 약 13°C 가량 냉각시키는 음의 효과를 가진다는 결과를 제시하였다. Harrison et al.⁴⁾은 ERBE(Earth Radiation Budget Experiment) 사업으로 수집된 위성 자료의 분석을 통해 지구 복사 수지에 대한 구름의 순 강제가 -17 Wm^{-2} (단파 강제 -48 Wm^{-2} , 장파 강제 $+31 \text{ Wm}^{-2}$)로 추정하였다. 그러나 위성 관측 자료 자체

Corresponding Author : li-Ung Chung, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangnung National University 123 Jibyeon-dong, Gangneung, 210-702, Korea
Phone: +82-33-640-2325
E-mail: iuchung@kangnung.ac.kr

에 내재된 오차와 그 자료 처리 과정에 연루된 오차 등으로 인해 현재까지 CRF로 정량화된 구름의 복사 역할에는 상당히 큰 불확실성을 가진 것으로 알려져 있다⁵⁻⁸⁾.

일반적으로 구름은 태양에서 오는 태양 복사를 반사시키는 냉각(음) 효과와 지구 장파 복사를 가두는 온실(양) 효과를 함께 가지고 있으며, 다른 기후 과정들과의 피드백을 통해 지구 에너지 순환 과정에서 중요한 역할을 담당한다⁹⁾. Kiehl and Trenberth¹⁰⁾에 의하면 입사하는 태양복사의 49%(168 Wm⁻²)가 지표에 흡수되며, 이 열은 현열, 잠열 그리고 열적외 복사로 대기로 되돌아간다. 이 복사의 대부분은 대기에 흡수된 후 재 방출되며, 외계로 손실되는 복사 에너지는 지표보다 훨씬 차가운 구름 상부와 대기에서 피드백을 통하여 보충되며, 이것이 온실효과를 야기 시킨다는 결론을 얻었다.

지금까지 CRF 분석을 통한 구름의 복사 역할에 대한 정량적 추정에는 '만약 구름이 없었다면'이라는 가상적 상황만을 평가하였다. 이런 상황으로 인해 계속해서 전개될 시스템의 변화, 즉 피드백이 반영될 수 없는 한계를 가지고 있으며, 아울러 지표 에너지 수지를 구성하는 지표 열 속(즉 잠열 속과 현열 속)에 대한 효과를 제시할 수 없는 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 간단한 해양 모형이 접합된 기후 모형으로 수치 실험을 실행함으로써, 피드백이 반영되는 구름의 복사 역할을 정량적으로 추정하고자 한다. 이 연구의 또 다른 한 목적은 기존의 CRF 분석을 통한 구름 복사 효과 추정 방법의 유의성을 평가하는 것이다.

이에 따라 본 연구에서는 KNU (Kangnung National University) AGCM(Atmospheric General Circulation)과 해양 모형이 연동하는 접합 모형을 제작하여 전구 기후를 재현하였다. 개발된 모형을 이용하여 구름의 복사 강제와 그 효과를 정량적으로 추정하고자 한다. 2절에서는 연구에 사용된 자료 및 실험방법을, 3절에서는 수치 실험을 위한 모형의 접합을, 4절에서는 수치 실험의 결과 및 분석을, 마지막으로 5절에서는 요약 및 결론을 제시한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 자료

본 연구에서는 피드백이 반영된 실험에 앞서 기존의 관측 및 재분석 자료를 이용하여 CRF 분석을 수행하였다. 사용된 검증 자료로는 미국의 CPC (Climate Prediction Center)에서 제공하는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research) Reanalysis(자료기간: 1971~2000)와 유럽 ECMWF

(European Center for Medium range Weather Forecasting) 40-Year Reanalysis(자료기간: 1979~2000), 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 ISCCP-FD(International Satellite Cloud Climatology Project-Flux Data) Retrieval Dataset(자료기간: 1985~1990)과 ERBE Satellite Observation Dataset(자료기간: 1983~2001)을 사용하였다. 또한, 지면모형인 BATS가 접합되기 전 모형인 KNU AGCM의 AMP II (Atmospheric Model Intercomparison Project II)기간의 모사 자료¹¹⁾를 이용하여 전천 복사량과 청천 복사량의 차이를 구하였다.

2.2. 방법

본 연구의 목적을 위해, KNU AGCM에 해양 혼합층 모형인 SOM(Slab Ocean Model)을 접합한 모형을 제작하였다. SOM은 다음에 주어진 간단한 열역학 수치 방정식에 기초한다¹²⁾.

$$\rho_o C_o h_o \frac{\partial T_o}{\partial t} = F + Q \quad (1)$$

여기서 T_o 는 해양 혼합층 온도, ρ_o 는 해수밀도, C_o 는 해수 열용량, 그리고 h_o 는 해양 혼합층 깊이이다. 그리고 F 는 대기에서 해양으로 전달되는 열속, Q 는 해양 혼합층 아래나 측면을 통해 유입되는 열속을 나타낸다. 이 모형에는 3층으로 이루어진 열역학적 해빙 모형이 포함되어 있다.

이 모형을 이용하여 구름이 정상적으로 복사 역할을 하는 수치 적분(EXP-A)과 강제로 그 역할을 차단시킨 수치 적분(EXP-B)을 각각 3년 기간에 대해 실행하였다. 첫 1년을 모형의 스핀 업 기간으로 간주하여 분석에서 제외시키고, 나머지 2년 기간에 대해 평균된 지구 에너지 수지의 성분들을 분석하였다. 이 연구에서는 이들에 대한 두 실험 결과간의 차이를 "피드백이 반영된 CRF"로 정의하며, EXP-A의 전천 복사와 청천 복사의 차이를 기존 연구들에서와 같이 "피드백이 반영되지 않은 CRF"로 간주한다.

3. KNU AGCM과 SOM의 접합

3.1. 접합의 필요성

접합 대순환 모형(Coupled General Circulation Model, 이하 간단히 CGCM)을 이용한 연구는 기후 시스템 간에 발생하는 복잡하고 다양한 상호작용에 대한 연구를 촉진하는데 큰 의의가 있다. 전 지구의 70%이상이 해양인 점을 감안할 때 구름의 복사 효과를 정확하게 정량화하기 위해 대기-해양이 연동하는 모형을 이용한 실험이 요구된다. 따라서 피드백이 고려된 본 실험을 위해 SOM의 접합을 통하여

계산된 해수면 온도에 따른 에너지 수지 분석에도 그 파급 효과가 기대된다.

3.2. SOM의 특징

SOM은 1996년 NCAR에서 CCM3(Community Climate Model version 3)와 접합할 목적으로 최초 개발되었으며, 간단한 해양 혼합층 모형(SOM)을 접합하여 지구 기후시스템에서 대기-해양의 상호작용을 이해하고자 하였다. 이 모형을 이용한 연구로 지구 온난화 실험을 수행하여 지구온난화에 따른 열대-동아시아 기후시스템 상호작용의 변화를 살펴보고 이를 바탕으로 동아시아 기후변동을 추정하였다¹³⁾. 또한 SOM이 접합된 CCM3.6을 이용하여 동 태평양 강수와 해수면 온도값에 대한 계절 내 진동에 대한 연구를 수행하여 에너지 속들의 아노말리 값이 관측보다 다소 감소한 결과를 얻었다¹⁴⁾.

본 연구를 위하여 해양 혼합층 모형에서 사용된 해양 열역학 방정식을 역으로 해결함으로써 해수면 온도를 구할 수 있다(식 2.1 참조). 특히, 해양 혼합층의 깊이(h_o), 해양 혼합층의 열속(Q-flux) 두 변수값의 처방이 필요하다. 해양 혼합층의 깊이는 CCM3에 접합된 SOM의 해양 혼합층의 깊이와 같은 값으로 계절의 변화 없이 위도방향으로만 변하는 이상화된 값으로 Levitus¹⁵⁾로부터 처방된 값을 KNU AGCM의 수평 격자 체계에 맞게 월 평균 값으로 구축하였다(Fig. 1). 한편 Q-flux는 해양 혼합층 아래나 옆에서 유입되는 열 속을 나타내는데, 관측이 어렵기 때문에 식 (2.1)로부터 관측된 해수면 온도 자료를 대입하여 Q-flux값을 계산하게 된다(Fig. 2).

3.3. SOM의 자립판 및 접합 실험

KNU AGCM과 접합에 앞서 민감도 분석을 위해 자립판 실험을 수행 하였다. 적분 간격을 20분마다

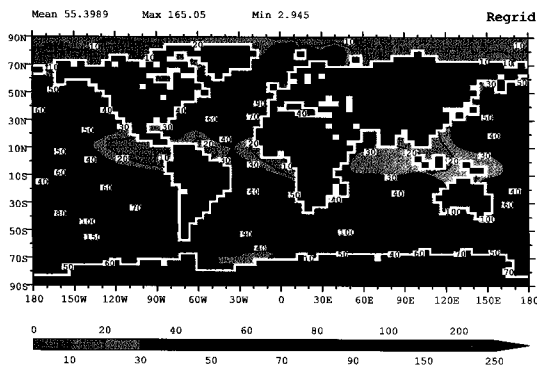


Fig. 1. Annual mean mixed ocean layer depth(m) used in the SOM simulation.

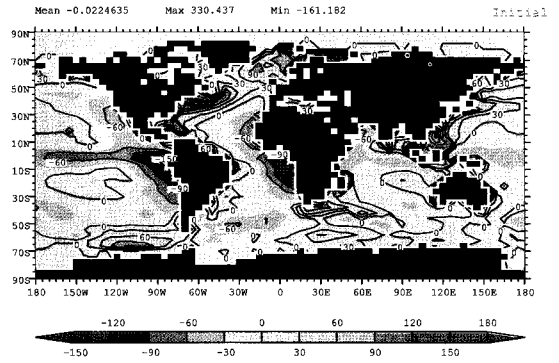


Fig. 2. Annual mean values of Q-flux(Wm^{-2}) for the SOM simulation.

로 하였으며, 30일간 적분을 실행하였다. 이 실험을 통하여 해수면온도의 변화를 기후 값과 비교하여 나타내어 보았다(Fig 3). 결과에서 볼 수 있듯이 해수면 온도가 관측과 비슷한 패턴을 보이는 것을 알 수 있었다.

접합에 있어서 우선 Table 1.에 제시한 다양한 변수들이 모형에서 교환되어야 한다. 이 변수들 중 SOM에 필요한 입력 변수는 KNU AGCM의 복사와 강수 가정에서 얻을 수 있으며, SOM이 제공하는 출력 변수는 해수면 온도를 결정하여 준다. 즉, SOM의 접합은 해양 1층, 해빙 연직 3층의 구조를

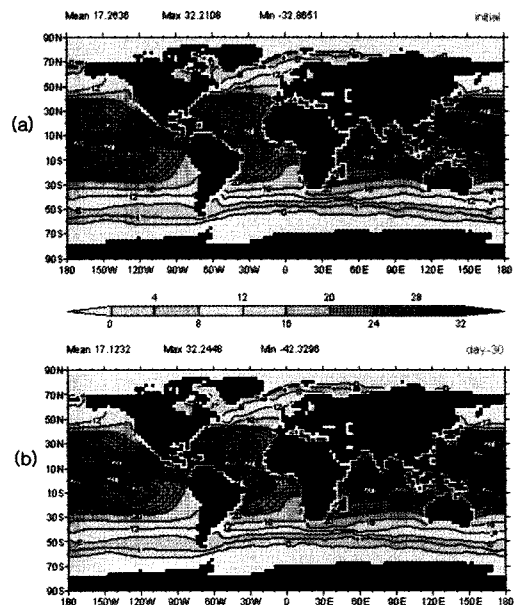


Fig. 3. SOM simulated sea surface temperature($^{\circ}C$) in CCM3 data, initial condition(a) and model result(b).

Table 1. Input variables to SOM model and output variables from SOM model

SOM(slab ocean model)	
	Grid configuration
Dynamics	- horizontal : depending on AGCM
	- vertical : 1-layer for ocean, 3-layer for sea-ice
	SST/SIC
	- thermodynamic budget equation
	Input variables from AGCM
	- latent heat flux, sensible heat flux
	- surface radiative fluxes (except LW ↑)
	Output variables
Physics	- sea surface temperature
	- sea-ice temperature
	- surface upward longwave radiation
	- sea-ice thickness
	Prescribed data
	- oceanic heat flux
	- ocean mixed layer depth

가진 간단한 해양 혼합층 모형으로부터 해수면 온도 자료를 대기로 전달함을 의미한다. 모형의 접합 결과를 검증하기 위하여 해수면 온도값을 관측값과 자립판의 결과와 비교하여 보았다(Fig. 4). 이 결과 전 지구 해수면 온도의 최대, 최소값은 다소 차이를 보였으나 평균 및 분포는 관측과 유사하게 묘사된 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 개발된 접합 모형을 이용하여 수치 실험을 실행함으로써, 지구 에너지 수지의 분석을 통하여 피드백이 반영되는 구름의 복사 역할을 정량적으로 추정하고자 하였다. 또한 기존의 CRF 분석을 통한 구름 복사 효과 추정 방법의 유의성을 평가하였다.

4. 결과 및 분석

개발된 접합 모형을 이용하여 수치 실험으로부터의 대기 상단과 지표에서의 에너지 수지를 비교하고 그 차이를 통해 구름의 복사 강제를 정량적으로 제시하였다(Table 2). 또한 실험 결과와 각 검증 자료들 간의 비교를 살펴본 결과 비교적 큰 편차를 보였다(Table 3). 여기서 구름의 복사 역할을 정략적으로 평가하는 것은 많은 불확실성이 있음을 알 수 있었다. 이 표에서 복사 강제의 양과 음의 값은 각각 온난화 강제와 냉각화 강제를 의미한다.

4.1. 대기 상단에서의 복사 강제력

먼저, 지구 기후 시스템 전체의 에너지 수지에 대한 구름의 복사 효과를 살피기 위한 대기 상단

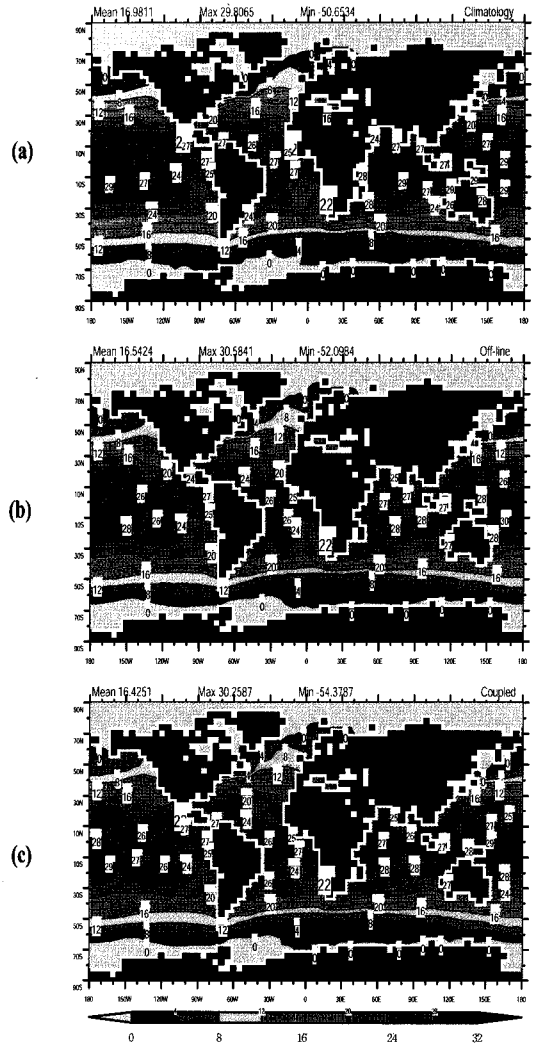


Fig. 4. Global distributions of sea surface temperature (°C) for January. Observation(a), SOM off-line simulation(b), and coupled simulation(c).

Table 2. Simulated cloud radiative effect(Wm⁻²) on the global energy budgets at top-of-atmosphere(TOA) and surface(SFC) for 2 years

TOA Flux	EXP-A	EXP-B	Cloud forcing
SW(↑)	120.8	58.3	-62.5
LW(↑)	207.5	244.0	+36.5
Net			-26.0
SFC Flux	EXP-A	EXP-B	Cloud forcing
SW(↓)	145.7	214.0	-68.3
LW(↑)	54.8	77.9	+23.1
SHF(↑)	96.3	122.9	+26.6
Net			-18.6

Table 3. Comparison of CRF difference(Wm^{-2}) between simulation and observations

	Feedback	Non Feedback	ERBE	ISCCP-FD	ERA40	NRA40
TOA Flux			Cloud Radiative Forcing			
SW (↑)	-62.5	-57.9	-51.1	-49.8	-56.5	-61.1
LW (↑)	+36.5	+20.8	+30.3	+25.6	+20.0	+31.5
Net	-26.0	-37.1	-20.0	-24.2	-36.5	-29.6
SFC Flux			Cloud Radiative Forcing			
SW (↓)	-68.3	-77.9	-	-52.7	-63.4	-59.5
LW (↑)	+23.1	+31.8	-	+29.2	+27.8	+25.1
SHF (↑)	+26.6	-	-	-	-	-
Net	-18.6	-46.1	-	-23.5	-35.6	-34.4

(TOA)에서의 분석 결과, 태양 복사(SW)에 대해서는 약 $-62.5 Wm^{-2}$ 크기의 음의 강제를 나타냈다.

지구 복사(LW)에 대해서는 약 $+36.5 Wm^{-2}$ 크기의 양의 강제를 가져 구름의 순 복사 역할이 잘 알려진 바와 같이 음의 효과($-26.0 Wm^{-2}$)를 가지는 것으로 추정 되었다. 이 결과는 ERBE 사업에서 위성 자료로부터 추정된 순 복사 CRF보다 상당히 크게 모사된 결과이다. 이 차이가 주로 모형의 결점에 기인하는 지 CRF에서 피드백의 반영 여부에 기인하는 지에 대해서 논의하기에 아직 이르다. 차후 또 다른 관측 분석 결과와 비교하여 이 추정 방법에 대하여 살펴 볼 것이다.

4.2. 지표에서 복사 강제력

지표 에너지 수지에 대한 구름의 복사 역할을 파악하기 위해서 지표에서의 에너지 수지를 분석하였다. 그 결과 SW에 대해서는 음의 강제($-68.3 Wm^{-2}$)를 보였으며, LW 및 지표 열 속(SHF)에 대해서는 모두 양의 강제(각각 $+23.1 Wm^{-2}$ 과 $+26.6 Wm^{-2}$)를 나타내었다. 결과적으로 순 구름 복사 효과는 $-18.6 Wm^{-2}$ 로 나타났다. 특히 SHF에 대한 양의 강제의 대부분($+24.4 Wm^{-2}$)은 잠열 속의 기여로 설명되는데, 이것은 구름의 복사 역할이 없는 경우 대기 하층의 온도가 상당히 상승함으로써 대기의 포화 수증기압이 증가하는 것과 연관될 것으로 해석된다.

피드백이 반영된 지표 에너지 수지에 대한 구름의 복사 역할에 따라, EXP-B에서의 지표 온도가 EXP-A에 비해 전구 평균으로 약 $7.5^{\circ}C$ 상승하였다(Fig. 5). 이 값은 1차원 기후 모형 실험으로부터 추정된 약 $13^{\circ}C$ 의 증가보다는 작은 결과이다. 자세히 살펴보기 위하여 두 실험 각각의 평균 온도 차이를 자오 분포 평균하였다(Fig 6). 구름의 복사 역할이 없을 경우 북반구 중위도의 온도 상승이 크며 남극

대륙에서는 최소값을 갖는 것으로 알 수 있다. 따라서 구름의 복사 역할에 대한 냉각 효과는 북반구에 더 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 북반구 대륙위의 식생과 지면에서 구름의 복사 역할에 따른 변화가 있는 것으로 사료된다.

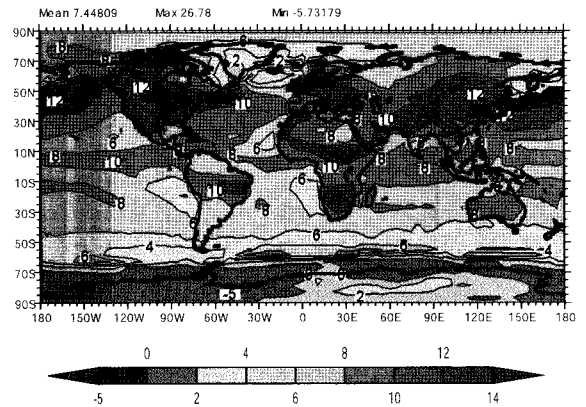


Fig. 5. Difference($^{\circ}C$) of annual mean ground temperature between two simulations under EXP-A and EXP-B.

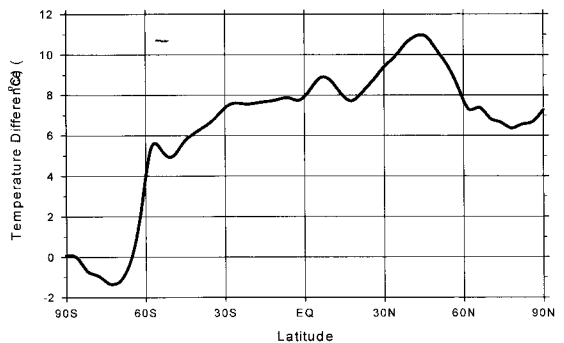


Fig. 6. Zonal mean values of surface temperature($^{\circ}C$).

일반적으로 대기 상단과 지표에서 구름의 순 복사 수지가 음의 효과를 나타내는데 이는 구름의 복사 효과가 지구 온난화보다는 냉각 효과의 비중이 크다는 것을 알 수 있다. 단파에 대해서는 반사와 흡수를 통하여 냉각 효과를 장파에 대해서는 흡수를 통하여 온난화 효과를 갖는다.

4.3. 관측 CRF 추정 방법과 수치 실험 비교

구름-복사 역할의 피드백이 반영되지 않은 CRF 추정 방법의 유의성을 평가해 보았다. 이를 위해 본 실험에서 얻은 구름 강제 크기와 전천 복사와 청천 복사의 차이로 정의되는 CRF의 크기와 비교 분석하기 위하여 관측 값과 재분석 자료의 순 복사 강제력을 살펴보았다(Table 3. 참조). 그 결과 실험에서 피드백이 고려된 순 구름 복사 강제 크기가 그렇지 않은 것보다 11.1 Wm^{-2} 정도 작게 나타났으며 관측 CRF 추정값과는 $-6.0 \text{ Wm}^{-2} \sim +13.3 \text{ Wm}^{-2}$ 의 오차를 보였다. 대기 상단과 지표 모두 순 복사 강제력의 편차가 큰 것을 알 수 있었다(Fig. 7).

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 간단한 해양 모형이 접합된 기후 모형으로 수치 실험을 실행함으로써, 피드백이 반영되는 구름의 복사 역할을 정량적으로 추정하고자 하였다. 또한, 기존의 CRF 분석을 통한 구름 복사 효과 추정 방법의 유의성을 평가 하였다. 본 연구의 목적을 위해 KNU AGCM에 해양 혼합층 모형을 접합한 모형을 제작하였으며 이를 이용한 수치 실험을 통하여 평균된 지구 에너지 수지의 성분들을 분석하였다. 이들에 대한 두 실험 결과간의 차이를 “피드백이 반영된 CRF”로 정의하며, EXP-A의 전천 복사와 청천 복사의 차이를 기존 연구들에서와 같이 “피드백이 반영되지 않은 CRF”로 간주하였다. 본 연구에서의 주요 결과는 다음과 같다.

해양 혼합층이 접합된 새로운 모형을 제작하였다. 이 모형은 지면 모형인 BATS가 접합된 대류권 7층 모형인 KNU AGCM을 기초로 하였으며, 해양 혼합층 모형은 CCM3에 접합할 목적으로 NCAR에서 개발된 SOM을 이용하였다. SOM은 해양 열역학 수치 방정식을 해결함으로써 해수면 온도를 결정하며, 해양은 연직 1층, 해빙은 연직 3층으로 이루어진 열역학적 해빙 모형이 포함되어 있다.

접합 모형을 이용하여 구름 복사 역할을 추정하는데 있어서 피드백이 고려된 실험으로 구름 복사 강제를 정량화 하였다. 대기 상단에서는 구름의 순 복사 역할이 잘 알려진 바와 같이 음의 효과(-26.0 Wm^{-2})를 가지는 것으로 추정되었다. 이것은 ERBE의 추정값 보다 -9 Wm^{-2} 만큼 크게 모사된 결과이다. 지표에서는 구름의 순 복사 효과는 -18.6 Wm^{-2} 로 나타났다. 특히 지표 열 속은 양의 강제를 보이는데 대부분($+24.4 \text{ Wm}^{-2}$)은 잠열 속의 기여로 나타났다. 이는 구름의 복사 역할이 없는 경우 대기 하층의 온도가 상당히 상승함으로써 대기의 포화 수증기압이 증가하는 것과 연관될 것으로 해석된다.

지표 에너지 수지에 미치는 구름 복사의 냉각 효과를 살펴보기 위하여 수치 실험의 지구 평균 지표 온도를 분석한 결과 구름의 복사 역할로 약 7.5°C 정도 지표가 냉각되는 것으로 나타났으며 이는 1차원 기후 모형 실험으로부터 추정된 약 13°C 의 냉각보다 작은 결과이다.

CRF 추정 방법의 유의성을 평가하기 위하여 대기 상단에서의 강제 크기와 EXP-A에서 전천 복사와 청천 복사의 차이로 정의되는 CRF 크기, 그리고 관측으로부터의 CRF 크기와 비교하였다. 피드백이 반영된 구름의 순 복사 강제 크기가 그렇지 않은 실험보다 11.1 Wm^{-2} 정도 작게 나타났다. 관측의 CRF 크기와 $-6.0 \text{ Wm}^{-2} \sim +13.3 \text{ Wm}^{-2}$ 의 오차가

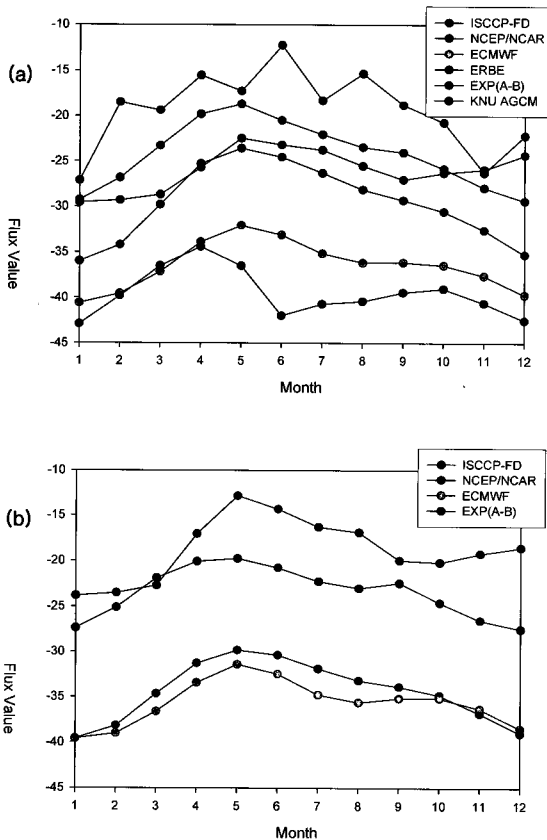


Fig. 7. Monthly variations(Wm^{-2}) of CRF at TOA(a) and SFC(b).

나타났다. 이것은 무시할 수 없는 크기로 사료되며, 피드백이 반영되지 않은 CRF로부터 정량화된 기존 연구들에서의 구름의 복사 역할에 대한 신중한 해석이 요구된다. 앞으로 구름의 순 복사 강제의 정량화에 관한 더 많은 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 “지구 온난화 및 한반도 기후 변화 예측 기술 개발” 과제에 의해 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Ramanathan, V., Cess, R. D., Harrison, E. F., Minnis, P., Barkstrom, B. R., Ahmad E., Hartmann, D., 1989, Cloud-radiative forcing and climate: Result from the Earth Radiation Budget Experiment, *Sci.*, 243, 57-63.
- 2) Cess, R. D., Zhang, M. H., Ingram, W. J., Potter, G. L., Alekseev, V., Barker, H. W., Cohen-Solal, E., Colman, R. A., Dazlich, D. A., Del Genio, A. D., Dix, M. R., Dymnikov, V., Esch, M., Fowler, L. D., Fraser, J. R., Galin, V., Gates, W. L., Hack, J. J., Kiehl, J. T., Treunt, H. Le., Lo, K. K.-W., McAvaney, B. J., Meleshko, V. P., Morcrette, J.-J., Randall, D. A., Roeckner, E., Royer, J.-F., Schlesinger, M. E., Sporyshev, P. V., Timbal, B., Volodin, E. M., Taylor, K. E., Wang, W., Wetherald, R. T., 1996, Cloud feedback in atmospheric general circulation model: An update, *J. Geophys. Res.*, 101, 12791-12794.
- 3) Manabe, S., Strickler, R. F., 1964, Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment, *J. Atmos. Sci.*, 21, 361-385.
- 4) Harrison, E. F., Minnis, P., Barkstrom, B. R., Ramanathan, V., Cess, R. D., Gibson, G. G., 1990, Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the Earth Radiation Budget Experiment, *J. Geophys. Res.*, 95, 18687-18703.
- 5) Cess, R. D., Zhang, M. H., Minnis, P., Corsetti, L., Dutton, E. G., Forgan, B. W., Garber, D. P., Gates, W. L., Hack, J. J., Harrison, E. F., Jing, X., Kiehl, J. T., Long, C. N., Morcrette, J.-J.,

- Potter, G. L., Ramanathan, V., Subasilar, B., Whitlock, C. H., Young, D. F., Zhou, Y., 1995, Absorption of solar radiation by clouds: observations versus models, *Sci.*, 267, 496-499.
- 6) Collins, W. D., Valero, F. P. J., Flatau, P. J., Lubin, D., Grassl, H., Pilewskie, P., 1996, Radiative effects of convection in the tropical Pacific, *J. Geophys. Res.*, 101, 14999-15012.
- 7) Wilson, M. F., 1984, The construction and use of land surface information in a general circulation climate model, Ph.D. Thesis, University of Liverpool, United Kingdom.
- 8) Chou, M. D., Zhao, W., Chou, S. H., 1998, Radiation budgets and cloud radiative forcing in the pacific warm pool during TOGA COARE, *J. Geophys. Res.*, 103, 16967-16977.
- 9) Cess, R. D., Potter, G. L., Blanchet, J. P., Boer, G. J., Ghan, S. J., Kiehl, J. T., Le Treut, H., Li, Z.-X., Liang, X.-Z., Mitchell, J. F. B., Morcrette, J.-J., Randall, D. A., Riches, M. R., Roeckner, E., Schlese, U., Slingo, A., Taylor, K. E., Washington, W. M., Wetherald, R. T., Yagai, I., 1989, Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation model, *Sci.*, 245, 513-516.
- 10) Kiehl, J. T., Trenberth, K. E., 1997, Earth's annual mean energy budget, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 97-208.
- 11) 정일웅, 1999, 대순환 모형에서 일어나는 운동 에너지의 소산과 마찰 가열, 박사학위논문, 대기과학과, 연세대학, 서울.
- 12) Hansen, J., Lacis, A., Rand, D., Russel, G., Stone, P., Fung, I., Ruedi R., Lerner, J., 1983, Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms in climate processes and climate sensitivity, *Geophys. Mono.*, 29, 130-163.
- 13) 유수현, 이은정, 전종갑, 류상범, 2001, 지구온난화에 따른 여름철 열대-동아시아 기후변동 상호작용 연구, *한국기상학회 초록집*, 11(3), 397-400.
- 14) Maloney, E. D., Kiehl, J. T., 2002, Intraseasonal eastern Pacific precipitation and SST variations in a GCM coupled to a slab ocean model, *J. Climate*, 15, 2989-3007.
- 15) Levitus, S., 1982, Climatological Atlas of the World Ocean, NOAA Professional Paper 13.

여백