

## 대기 대순환 모형을 이용한 에어로졸의 복사 강제 추정

홍성철 · 정일웅\* · 김형진\*\* · 이규태\* · 이재범

국립환경과학원 지구환경연구소, \*강릉대학교 대기환경과학과,

\*\*IPRC/University of Hawaii

(2008년 2월 14일 접수; 2008년 3월 13일 채택)

## Estimation of Aerosol Radiative Forcing by AGCM

Sung-Chul Hong, Il-Ung Chung\*, Hyung-Jin Kim\*\*,  
Kyu-Tae Lee\* and Jae-bum Lee

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

*\*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*

(Manuscript received 14 February, 2008; accepted 13 March, 2008)

### Abstract

Many recent studies have concentrated upon the radiative effects of atmospheric aerosols. Though their scattering and absorption of radiation, aerosols can also induce some other important environment effects. In this study, new radiation code and aerosol data within Atmosphere General Circulation Model (AGCM) is used to assess the aerosol radiative forcing and to analyze relative climate effects. The new Kangnung National University AGCM Stratospheric-15 (KNU AGCM ST15) was integrated by using two sets of radiative effect of aerosols : CTRL as not a radiative effect of aerosols and AERO as a radiative effect of aerosols. Two cases show the difference of net shortwave radiation budget at top-of-atmosphere (TOA) is found to be about  $-3.4 \text{ Wm}^{-2}$ , at the surface (SFC) is about  $-5.6 \text{ Wm}^{-2}$ . Consequently the mean atmospheric absorption due to aerosol layer in global is about  $2.2 \text{ Wm}^{-2}$ . This result confirms the existence of a negative forcing due to the direct effect of aerosols at the surface and TOA in global annual mean. In addition, it is found that cooling over at the surface air temperature due to radiative effect of aerosols is about  $0.17 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . It is estimated that radiative forcing of the net upward longwave radiation taken as the indirect effect of aerosol is much smaller than that of the direct effect as there is about  $0.2 \text{ Wm}^{-2}$  of positive forcing both at TOA and at SFC. From this study, It made an accurate estimation of considering effect of aerosols that is negative effect. This may slow the rate of projected global warming during the 21<sup>st</sup> century.

**Key Words :** New radiation code, Aerosol data, Aerosol radiative forcing, KNU AGCM ST15, Global warming

### 1. 서 론

기후 변화는 온실 효과의 인위적 강화에 따른 지구 온난화와 거의 같은 의미로 인식되고 있다. 여러 학자들은 기후 모형에 의해 대기 중 온실 기체 농도

변화를 고려하여 지표 온도 변화를 모사하는 연구를 수행하였다. 최근 연구 보고서에 따르면 대기 중 온실 기체 농도 변화를 고려한 기후 모형실험에서 2100년 지구 평균 기온은 최대 6.4°C 상승할 것으로 전망하였으며, 이들 온실기체 증가에 대한 정량적인 복사 강제력 값은 이산화탄소(1.66 Wm<sup>-2</sup>), 메탄(0.48 Wm<sup>-2</sup>), 아산화질소(0.16 Wm<sup>-2</sup>), 할로젠화탄소(0.32 Wm<sup>-2</sup>), 수소불화탄소(0.017 Wm<sup>-2</sup>) 등에 의해 전 지구적으로 약 2.637 Wm<sup>-2</sup>가 증가할 것으로 평가되었다<sup>1)</sup>. 일반적으로 지면이 해양보다 온난화가 더 빠르며 비교적 고위도에서 더 큰 온난화가 일어난다고 예상하였다. 이는 실제 관측치가 전구 평균 1°C 미만의 증가를 보인 것보다 크게 모사된 결과이다. 이와 같이 기후 모형을 이용한 지구 온난화 연구에서 아직 그 불확실성이 비교적 큰 것으로 알려져 있는데, 이에 대한 한 요인으로서 에어로졸의 기후 효과를 꼽고 있다. 여러 기후 모형들이 지구 온난화의 크기를 실제 보다 과하게 모사하는 문제가 에어로졸의 효과를 고려하지 않은 것에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>2-6)</sup>.

에어로졸의 효과를 살펴보면 크게 두 가지인 직·간접적으로 지구 복사 평형에 영향을 미친다. 첫째로 에어로졸이 지구에 들어오는 태양 복사 에너지를 산란 및 흡수에 의해 차단하여 직접적으로 지구를 냉각화하는 역할을 하며<sup>7-10)</sup>, 둘째로는 에어로졸의 일부가 구름 응결핵(Cloud Condensation Nuclei)으로 작용하여 구름의 반사도를 높이는데 이 또한 지구를 냉각화 하는 결과를 가져 온다<sup>11,12)</sup>. 하지만, 기후 변화에 있어서 에어로졸의 효과에 대한 연구는 여전히 초보 단계이며, 인간 활동에 의해 방출되는 황산염 에어로졸에 그 초점이 맞추어져 왔다. 또한, 에어로졸의 구성 성분(예: 해염, 검댕, 사막 흙먼지, 등)에 대한 관심이 높아졌으나 주로 연구에 사용된 에어로졸 자료의 시·공간 분포들은 관측 자료의 부재로 인해 대부분 에어로졸 수송 모형으로부터 얻어진 것으로 그 정확도를 점검하는데 어려움이 있었다<sup>13-15)</sup>.

따라서, 신뢰성이 높은 인공위성의 관측 자료로부터 에어로졸의 광학 성질을 고려하여 기후 시스템과 복사에 미치는 그 효과에 대한 연구들이 시도되고 있다<sup>1,16-18)</sup>. 전 지구 관측 자료로부터 에어로졸

의 복사강제력을  $-3.0 \pm 1 \text{ Wm}^{-2}$ 로 추정하였으며<sup>19)</sup>, 연평균 대기상단과 지표에서의 에어로졸 복사강제력이 각각  $-2 \pm 1 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $-7 \pm 2 \text{ Wm}^{-2}$ 로 추정하였다<sup>20)</sup>. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 위성 관측으로부터의 에어로졸 분포와 광학 성질을 이용하여 전구 해양에 대한 단파 에어로졸 복사 강제가  $-5.3 \pm 1.7 \text{ Wm}^{-2}$ 라는 결과를 제시하였으며<sup>21)</sup>, Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR) 5th generation Mesoscale Model (MM5)을 이용한 수치 실험을 통하여 동아시아 지역에서 에어로졸의 단파 복사 강제력이 대기 상단에서와 지표에서 각각  $-4.1 \text{ Wm}^{-2}$ 와  $-5.9 \text{ Wm}^{-2}$  정도임을 밝혔다<sup>22)</sup>. 또한 '07년 IPCC 4차보고서에 의하면 에어로졸의 직·간접효과를 포함한 총 복사강제력은  $-2.4 \pm 0.7 \text{ Wm}^{-2}$ 로 그 불확실성은 여전히 큰 것으로 보고되었다<sup>1)</sup>. 이처럼 에어로졸은 복사적으로 전구 및 지역 기후에 대해 무시 못 할 영향력을 가지기 때문에 기후 모델링에서 이 효과를 포함시키는 것은 필수적 요건으로 인식되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 KNU AGCM ST15 모형과 MODIS와 Aerosol Robotic Network (AERONET)의 Sun photometer 자료로부터 에어로졸 광학 성질 분포 자료를 이용하여 에어로졸의 직·간접 효과가 모두 고려된 모형으로 기후 시스템에 미치는 에어로졸의 복사 강제와 그 기후 효과를 정량적으로 추정하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 수치 모형 및 실험 방법

#### 2.1.1. 성층권 모형의 개요

이 연구를 위해 사용된 모형은 성층권을 포함한 대기 대순환 모형(이하 ST15)이다<sup>23-25)</sup>. ST15의 수평 격자 간격은 구면 좌표 위에서  $5^\circ \times 4^\circ$ (경도×위도)이며, 이 격자 위에서 예단 변수들의 배치는 Arakawa C-방안의 유한 차분법<sup>26)</sup>을 따른다. 연직 좌표는 다음과 같이 정의되는  $\sigma$ -좌표<sup>27)</sup>를 따른다.

$$\sigma \equiv \frac{p - p_T}{\pi} \quad (2.1)$$

여기서  $p$ 는 기압을,  $p_T$ 는 모형의 대류권계면 기압으로 일정하게 처방한 100 hPa을 나타낸다. 식 (2.1)

에서 기압 두께인  $\pi$ 는  $z$  좌표계의 밀도에 상당하는 것으로,  $\sigma$ 와 함께 동반적으로 압력의 함수로 정의된다:

$$p \leq p_I \text{에서, } \pi \equiv p_I - p_T; \sigma \equiv \frac{p - p_I}{\pi} \quad (2.2a)$$

$$p > p_I \text{에서, } \pi \equiv p_S - p_I; \sigma \equiv \frac{p - p_I}{\pi} \quad (2.2b)$$

이 때,  $p_T \equiv 1 \text{ hPa}$ 는 모형 상단에서 일정하게 주어졌던 압력, 그리고  $p_S$ 는 모형 하단 곧 지표에서의 압력이다. 한편 역학 과정에 대한 적분 시간 간격은 7.5분 (450초)이다. 한 번의 Matsuno 방안과 이를 따르는 일곱 번의 도와 (leapfrog) 방안이 한 조가 되어 한 시간의 적분이 진행된다. 이 적분 과정이 끝나면 물리 과정들의 계산이 수행되어 앞서 수행된 역학 과정의 계산 결과가 보정된다. ST15는 5개의 예단 방정식 (수평 운동량 방정식, 열역학 에너지 방정식, 연속 방정식, 수증기 방정식, 구름 수액 방정식)과 2개의 진단 방정식 (상태 방정식, 정수 방정식)으로 구성된 원시 방정식 계를 기초로 한다. 예단 변수들은 수평 바람 ( $\vec{V}$ ), 기온 ( $T$ ), 기압 두께 ( $\pi$ ), 수증기 혼합비 ( $q$ ), 그리고 구름 수액 혼합비 ( $m$ )이고, 주요 진단 변수들은 기압 ( $p$ ), 비체적 ( $\alpha$ ), 연직 속도 ( $\sigma$ ), 지위 ( $\phi$ ) 등이다.

AGCM에서 가장 중요한 하부 경계 조건의 하나인 해면 온도 (Sea Surface Temperature; 이하 간단히 SST)와 해빙의 분포는 월 평균 SST 및 해빙 농도 (Sea Ice Concentration, 이하 간단히 SIC) 자료를 사용한다<sup>28)</sup>. 모형의 각 기층에서 발생하는 오존에 의한 복사 흡수를 고려하기 위해 기후학적 3차원 (경도-위도-고도) 오존 농도 자료를 사용한다. 이 자료는 Atmospheric Model Intercomparison Project Phase II (AMIP II) 표준 실험을 위해 마련된 2차원 오존 농도 자료<sup>29)</sup>와 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) 오존 전량 자료를 합성하는 방법<sup>30)</sup>을 통하여 산출하였다. 한편 모형의 하부 경계로 사용되는 지형 자료는<sup>31)</sup>  $1^\circ \times 1^\circ$  자료를 경도  $5^\circ \times$  위도  $4^\circ$ 의 모형 격자점으로 내삽 및 평활된 것이다.

대기 중 온실 기체들인  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  그리고  $\text{N}_2\text{O}$ 의 농도는 AMIP II의 표준 실험 권고 사항에 따라 348 ppmv, 1650 ppbv 그리고 306 ppbv로 각각 처방하였

다. 또한 Halo-carbon인 CFC-11과 CFC-12의 농도는 0.268 ppbv와 0.503 ppbv의 값을 각각 사용하였다<sup>32)</sup>. 태양 상수는 AMIP II 표준값인  $1365 \text{ Wm}^{-2}$ 을 사용하였다. 특히 지구 자전에 따른 일변화 및 공전에 따른 계절 변화가 고려되는데, 이를 위해 지구 자전축의 기울기, 공전 궤도의 이심율, 그리고 근일점의 경도를 역시 AMIP II에 따라  $23.441^\circ$ ,  $0.016715^\circ$ , 그리고  $102.7^\circ$ 의 값들로 사용하였다.

### 2.1.2. 에어로졸 자료의 분포와 특성

본 연구에서는 Terra 위성에 탑재하여 1999년에 발사한 MODIS에서 관측한 에어로졸 분포 및 광학 성질과 AERONET의 Sun photometer 자료를 이용하였으며, 자료는 자연적인 발생과 인위적인 발생을 모두 포함한다. 또한, 2000년 3월~2003년 6월(40개월) 기간의 월 평균값으로 경도  $2.5^\circ \times$  위도  $2^\circ$ 의 수평 해상도를 가지며 광학 깊이, 비대칭 인자와 단일 산란 알베도로 구성된 값을 수치 실험 모형의 격자 체계에 맞게 선형 내삽하여 입력 자료로 처방하였다.

세 변수는 단파에 대한 파장별 자료 중 에어로졸에 의한 산란이 효과적인 7개의 파장(자외선 영역에 4개, 근적외 영역에 3개)에서 계산을 수행하였다. 비대칭 인자와 단일 산란 알베도는 모든 고도에 대해 일정하며 각 단파 영역에서 계산된 값을 사용하였다. 하지만, 에어로졸의 광학 깊이는 전체 공기 기둥에 대한 값이라서 이 값을 모형에 사용하기 위해서는 고도별 자료가 필요하므로 다음과 같은 가정에 의하여 구하였다. 만약 화산 폭발에 의한 성층권으로의 에어로졸 이동을 고려하지 않는다면 에어로졸은 대류권 각 층에 분포하게 되는데 이 양은 대류권 각 층의 건조 공기의 양에 비례한다는 가정에 따라 기층별 광학 깊이를 계산한 값을 사용하였다. 모형의 초기조건인 분광 영역에 따른 시간 평균 에어로졸 광학 깊이의 전구 분포를 Fig. 1에 나타내었으며, 본 연구를 위해 에어로졸의 단파 복사 효과가 계산될 수 있도록 설계된 National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center (NASA/GSFC) 복사 모수화 방안이 장착된 수치 모형 입력 자료를 완성하였다.

### 2.1.3. 복사 모형의 개요

연구를 위하여 모형의 복사 코드 부분에<sup>33)</sup> 의한 적외 복사 모수화 방안으로 수정하였다. 이 방안은

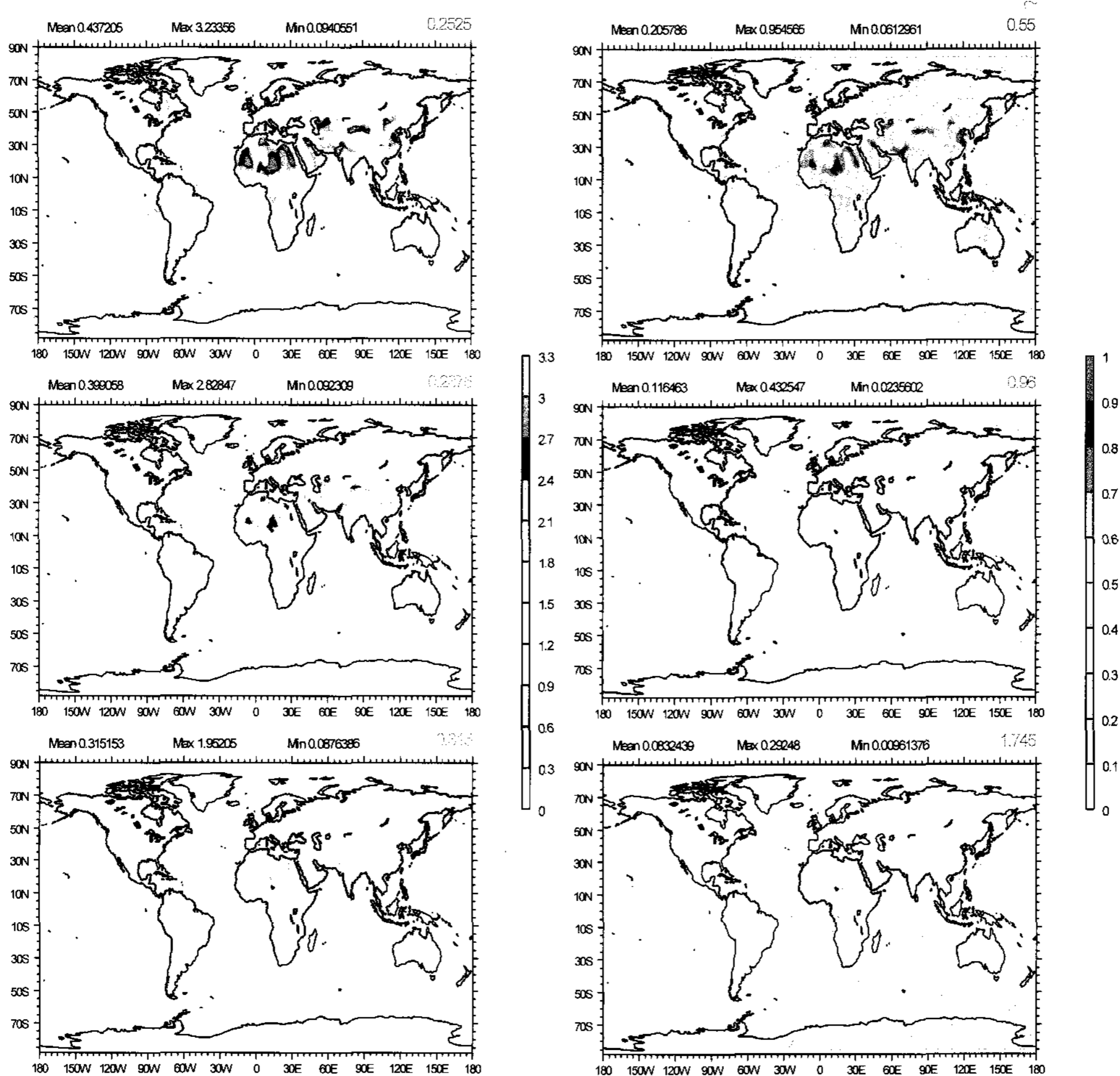


Fig. 1. Global distributions of annual mean aerosol optical depth by spectral range.

주요 기체 (수증기, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>), 대부분의 미량 기체 (N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CFCs) 그리고 구름과 에어로졸에 의한 흡수를 9개의 밴드로 구분된 적외 복사 스펙트럼에서 계산한다. 기체에 의한 투과 함수는 *k*-분포 방법 (*k*-distribution), 표 참조 방법 (table look-up) 혹은 단일 모수 기온 스케일링 방법 (one-parameter temperature scaling)으로 계산된다. 구름과 에어로졸에 의한 산란 효과를 고려하기 위한 광학 깊이 (optical thickness)는 단일 산란 알베도 (single-scattering albedo)와 비대칭 인자 (asymmetric factor)로 스케일되는데, 이 때 구름의 광학 성질들은 구름의 수액 (얼음) 함량과 크기로 결정된다.

한편 Chou와 Suarez<sup>34)</sup>에 의한 복사 모수화 방안을

새롭게 접합한 복사 모형은 수증기, 오존, 산소 분자, 이산화탄소, 구름 그리고 에어로졸에 의한 태양 복사의 흡수와 구름, 에어로졸 그리고 기체 분자에 의한 레일리 산란을 계산할 수 있다. 이 때 고려되는 태양 복사의 파장은 0.175-10 μm 이며, 이 파장 영역에서 자외선 및 광합성 활성 파장역 (photosynthetically active region, PAR)이 8개의 band로, 그리고 근적외선 영역이 3개의 band로 나뉜다. 구름의 반사율과 투과율은 델타-에딩턴 (δ-Eddington) 방법을 이용하여 계산한다. 이 방법의 적용에 필요한 구름의 광학 성질은 수적/빙적의 양 및 유효 반지름(광학 깊이) 혹은 유효 반지름만의 함수 (단일 산란 알베도와 비대칭 인자)로 결정된다.

2.1.4. 실험방법

완성된 에어로졸의 입력 자료를 개선된 모형에 처방하여 줌으로써 에어로졸의 단파 복사 효과 및 기후 시스템에 미치는 효과를 살펴 볼 수 있다. 그 효과를 정량화하기 위하여 다음과 같은 두 방법으로 모형을 적분하였다. 첫째, 에어로졸의 단파 복사 효과가 포함되지 않은 제어 적분(이하 CTRL)과 둘째, 그 효과가 포함된 실험 적분(이하 AERO)을 각각 5년 기간에 대해 실행하였다. 적분 기간의 첫 2년을 스피ن-업 기간으로 간주하여 분석에서 제외시키고, 3년 기간에 대한 두 실험간의 차이를 통해 지구 에너지 수지에 미치는 에어로졸의 효과를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

에어로졸의 단파 복사 효과가 계산될 수 있는 수치 모형 실험 결과와 제어 실험 결과의 차이로부터 에어로졸이 기후 시스템에 미치는 복사 강제와 그 기후 효과에 대하여 정량적으로 추정할 수 있었다. 3.1절에는 대기 상단(이하 TOA)과 지표(이하 SFC)에서 각각의 복사 강제에 대해 정량적으로 제시하였으며, 3.2절에는 에어로졸에 의한 대기 중 운량과 총 수증기량, 지표에서의 강수량과 지표 온도의 변화에 대하여 살펴보았다.

3.1. 복사 강제력

Table 1은 두 수치 실험으로부터의 대기 상단과 지표에서 각각 에너지 수지를 비교하고 그 차이에

**Table 1.** Simulated radiation effects(in  $Wm^{-2}$ ) of aerosol on the global energy budgets at top-of-atmosphere (TOA) and surface (SFC)

TOA Flux	CTRL	AERO	Aerosol forcing
SW(↑)	119.5	122.9	-3.4
LW(↑)	245.4	245.2	+0.2
SFC Flux	CTRL	AERO	Aerosol forcing
SW(↓)	178.1	172.5	-5.6
SW(↑)	25.6	24.9	+0.7
LW(↓)	335.8	335.0	-0.8
LW(↑)	395.3	394.3	+1.0
SHF(↑)	20.9	19.9	+1.0
LHF(↑)	94.8	94.0	+0.8

의해 정량화될 수 있는 에어로졸의 연 평균 복사 강제를 제시한 결과이다. 잘 알려진 바와 같이 이 표에서 복사 강제의 양과 음의 값은 각각 온난화와 냉각화 강제를 의미한다. 에어로졸의 단파 복사 효과로 인해 TOA에서의 순 태양 복사 에너지(이하 SW)가 약  $3.4 Wm^{-2}$ 로 음의 복사 강제를 가지며, 순 장파 복사 에너지(이하 LW)  $0.2 Wm^{-2}$ 로 양의 복사 강제를 갖는 것으로 나타났다. 에어로졸에 의해 지표로 입사되는 태양 복사량은 약  $5.6 Wm^{-2}$  감소한 것으로 나타나 TOA에서의 음의 강제와  $2.2 Wm^{-2}$ 의 차이를 보이는데, 이것은 에어로졸의 단파 복사 흡수로 설명될 수 있다.

에어로졸의 간접 효과의 한 척도로 해석될 수 있는 SFC에서 순 상향 장파 복사는  $0.2 Wm^{-2}$ 의 양의 강제를 갖는 것으로 나타나 직접적 효과의 크기에 비해 훨씬 작은 것으로 추정된다. 지표 열 속 또한 감소를 보였으며 양의 강제로 각각 추정되었다. 지표 잠열 속의 감소( $-0.8 Wm^{-2}$ )는 대기 중 총 수증기량의 감소로 인해 야기된 것으로 추정된다. 특히 순 복사 속의 감소에 따라 지표 온도의 다소간의 감소를 예상할 수 있는데, 현열 속의 감소( $-1.0 Wm^{-2}$ )가 이를 반증한다.

Fig. 2는 에어로졸의 복사 강제에 대한 계절 변화를 나타낸 그림이다. 순 복사 강제력은 장파 복사 속 보다는 단파 복사 속 패턴의 영향을 더 많이 받으며 대기 상단에서는 8월에 지표에서는 7월에 순 복사 강제가 최소가 됨을 알 수 있다.

3.2. 기후 시스템의 변화

실험 적분과 제어 적분의 차이로부터 운량과 강수량은 에어로졸에 의해 전체적으로 각각 약 0.4 %와  $0.03 mm day^{-1}$ 로 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 3a와 Fig. 4a). 운량은 저위도 보다 고위도 극지방에서 비교적 많은 감소를 보였으며, 특히 아프리카 대륙의 나이지리아에서 최대 감소를 보이며, 북아메리카와 중앙 시베리아 고원에서 최대 증가가 나타났다. 강수량은 주로 저위도 대륙과 중국 남동부 지역, 그리고 동아시아 적도에서 비교적 많은 감소가 나타났다. 에어로졸의 광학 깊이 분포를 따라 운량과 강수량의 증감 지역이 상당히 일치함을 보였으며 특징적인 것은 강수량이 중국 남동부 지역과 동아시아 적도 지역에서 집중적으로 감소하는 것으로

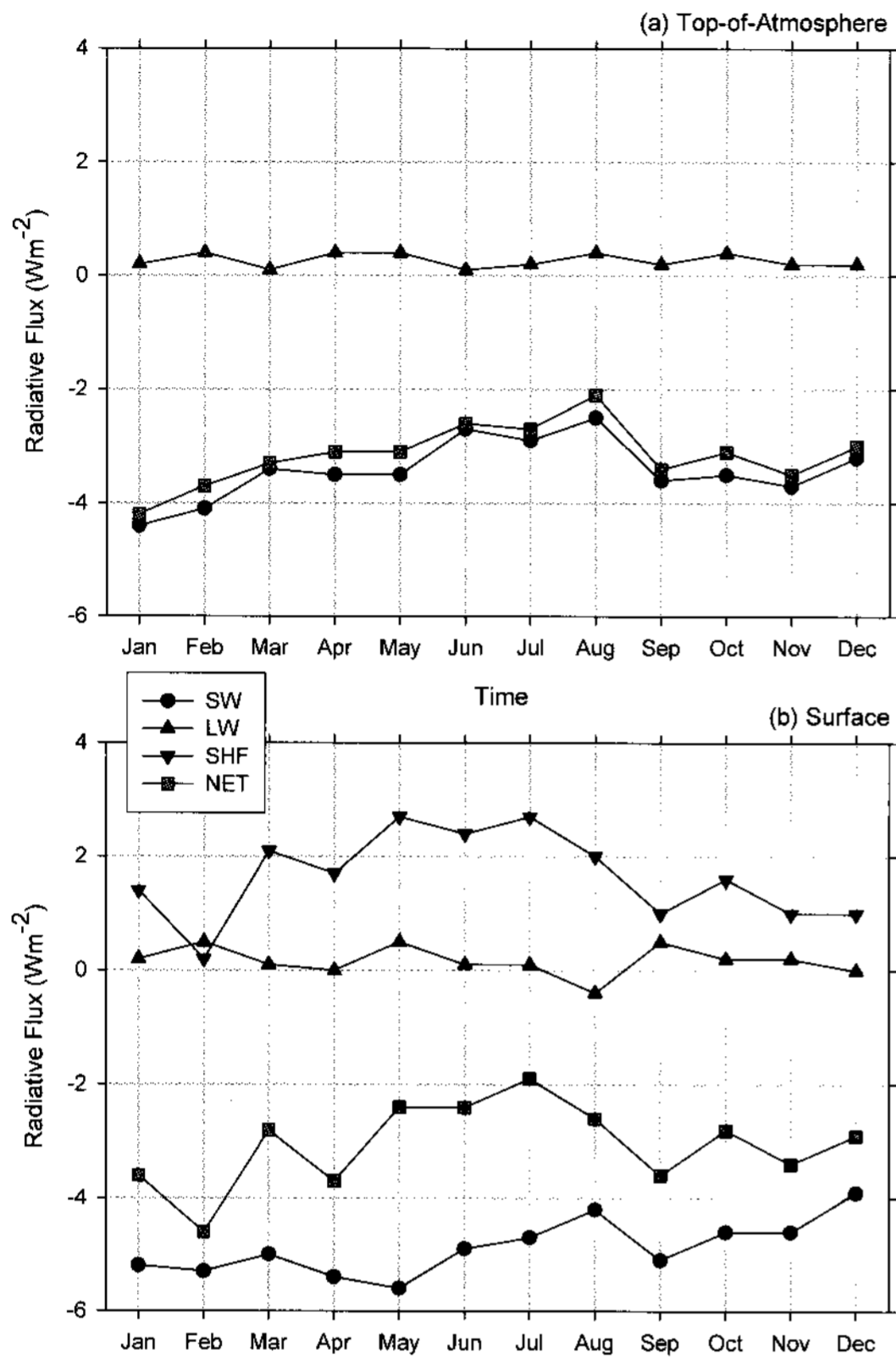


Fig. 2. Seasonal variations of aerosol radiative forcing(in Wm<sup>-2</sup>) (a) in TOA and (b) in surface.

나타났다.

Fig. 3b와 Fig. 4b는 운량 및 강수량의 월별 변화량을 각각 나타냈다. 계절 변화를 살펴보면 봄철 다소 증가를 보이다가 여름과 가을에 감소하는 경향을 나타냈으며, 지역별로는 대륙이 많은 북반구에서 증감의 폭이 더 큰 것을 알 수 있었다. 운량 및 강수량 모두 계절별 또한 증감하는 계절이 일치함을 보이며 전반적인 운량의 감소로 알 수 있듯이 강수량 또한 감소한 것을 알 수 있었다. 전구 운량의 감소한 사실로부터 대기 상단에서의 에어로졸의 단파 복사 강제(-3.4 Wm<sup>-2</sup>)보다 더 큰 것을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 에어로졸에 의한 대기 중 총 수증기량의 변화량을 보여준다. 증감 지역이 앞서 본 운량, 강수량과 연관되며 비교적 저위도 대륙과 동아시아 적도에서 큰 감소가 나타났다. 에어로졸의 효과로 전

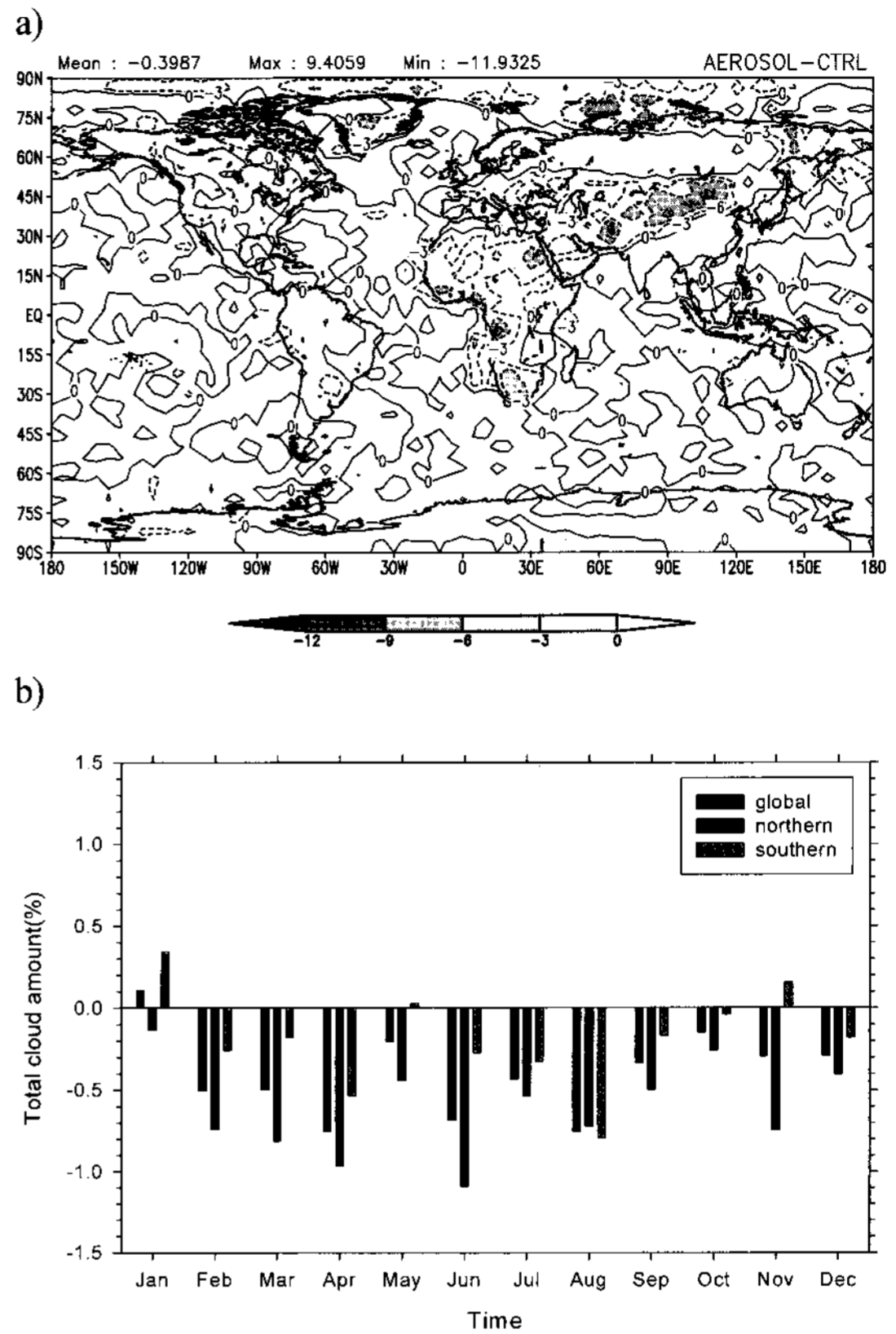


Fig. 3. (a) Total cloud amount change(in %) (b) Seasonal variations of cloud amount change due to aerosol in AGCM.

구 총 수증기량은 약 0.02 kgm<sup>-2</sup> 감소하는 결과를 보이는데 이는 대기로부터 지표로의 하향 장파 속의 감소(-0.8 Wm<sup>-2</sup>)에 영향을 주며, 다시 지표 잠열 속의 감소(-0.8 Wm<sup>-2</sup>)와 연관지을 수 있다.

Fig. 6a는 에어로졸 복사 효과에 따른 지표 기온의 변화를 나타낸 것으로 전구 연평균 지표 온도가 약 0.17°C 감소하였다. 지역적으로 살펴보면 에어로졸의 광학 깊이 값이 컸던 지역에서 운량, 강수량 그리고 수증기량이 감소했던 지역인 사하라 지역과 티벳 및 남아메리카 지역에서 크게 감소를 보인 반면에, 증가했던 지역인 북아메리카와 중앙 시베리아 고원에서 지표 온도가 증가하는 것으로 나타났다. 잘 알려진 바와 같이 지구 온난화 시나리오에서 극지방의 온도가 높아지는 현상과 반대로 에어로졸에 의한 효과로 고위도 극지방의 온도가 매우 낮아

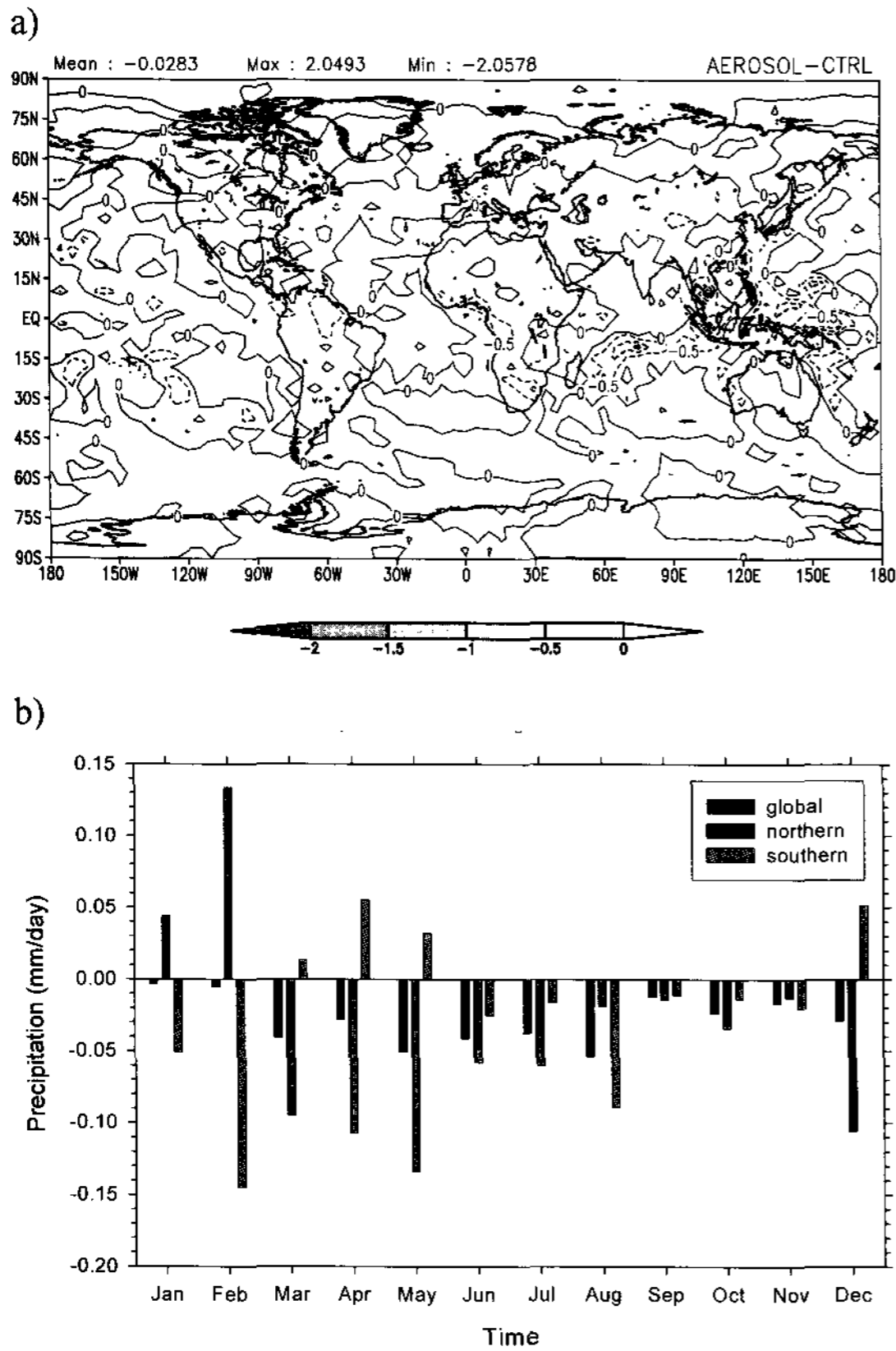


Fig. 4. Same as Fig. 3. except for precipitation change(in mm day<sup>-1</sup>).

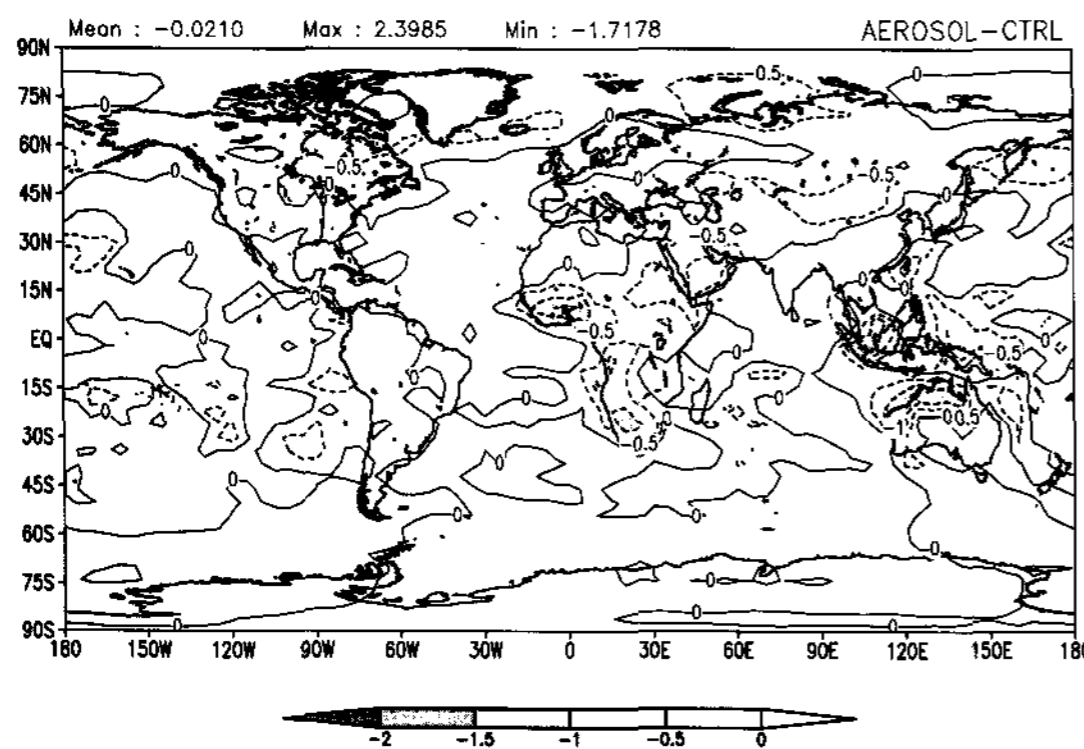


Fig. 5. Vertically-integrated water vapor change(in kgm<sup>-2</sup>) due to aerosol in AGCM.

짐으로 두 현상이 크게 상쇄됨을 알 수 있었다. 즉, 지구 온난화 연구에 있어 에어로졸의 효과가 반영되어야 함을 본 연구를 통해 더욱 강조할 수 있을

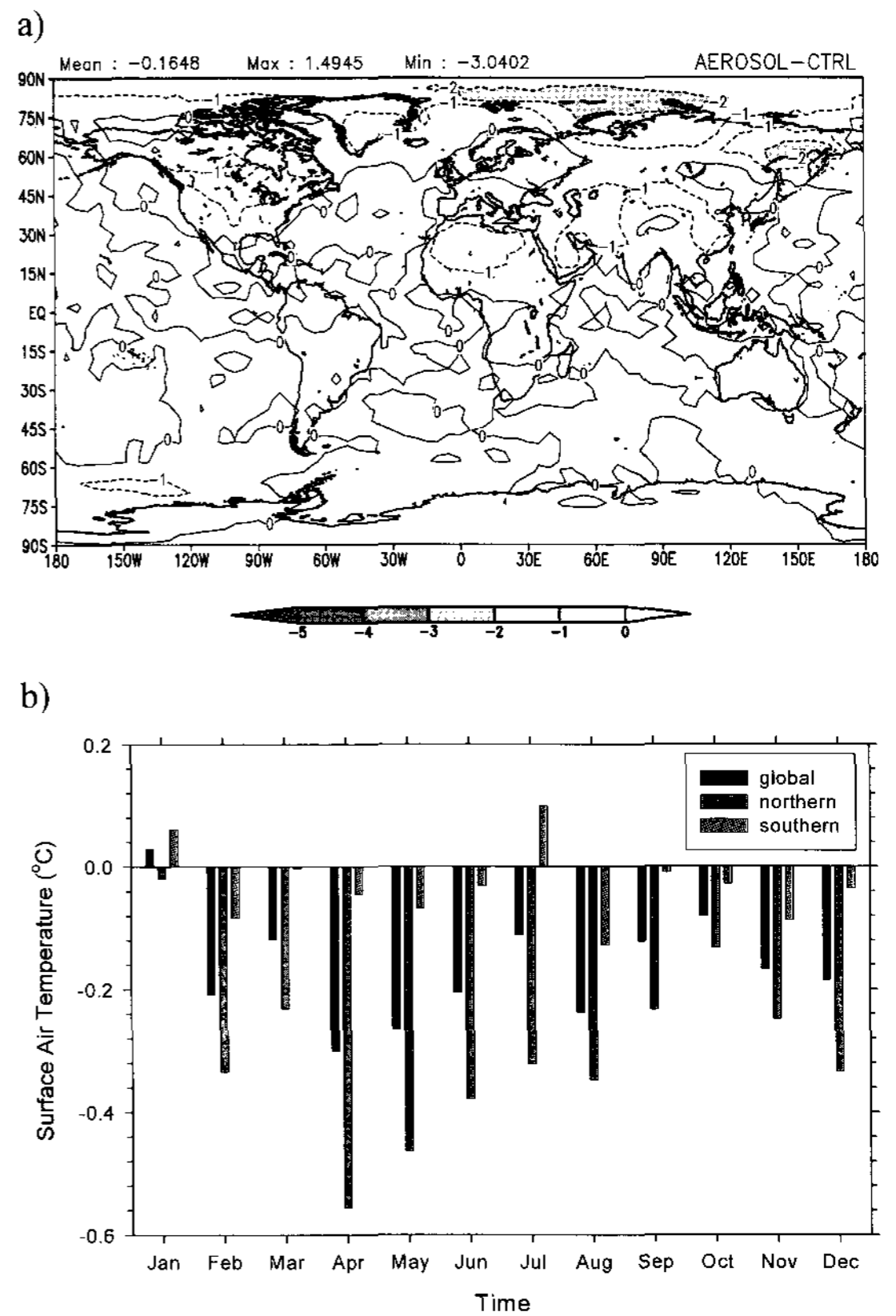


Fig. 6. (a) Surface air temperature change(in °C) (b) Seasonal variations of surface air temperature change due to aerosol in AGCM.

것으로 보인다.

Fig. 6b는 에어로졸의 단파 복사 효과에 따른 지표 기온의 월별 및 반구별로 보인 것이다. 이 그림으로부터 계절에 따라서는 이 크기보다 더 클 수 있다는 사실과 북반구가 남반구보다 에어로졸의 효과가 훨씬 더 크게 나타난다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 육지 면적 비율이 북반구가 더 큰 사실과 인류의 산업 활동이 활발하게 진행 중인 사실과 크게 무관하지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 위성 자료의 처리를 통해 얻어진 에어로졸 광학 두께 자료를 이용하여 에어로졸에 의한 단파 복사 강제 효과를 정량적으로 이해하고자 하였다. 에어로졸 자료는 현재에 가장 정확하고

신뢰성 있는 MODIS 자료와 AERONET 자료를 사용하였으며 이를 KNU AGCM ST15에 처방하여 적분을 수행하였다. 이를 통해 에어로졸의 단파 복사 효과가 포함된 결과를 얻었으며, 에어로졸의 단파 복사 효과가 포함되지 않은 제어 적분과의 차이를 통하여 복사 강제와 그 기후 시스템에 미치는 효과를 정량적으로 추정하였다.

에어로졸의 단파 복사 효과는 대기 상단과 지표에서 각각 음의 강제인  $3.4 \text{ Wm}^{-2}$ ,  $5.6 \text{ Wm}^{-2}$ 이며 장파 복사 속은  $0.2 \text{ Wm}^{-2}$ 으로 양의 강제임을 알 수 있었다. 또한, 에어로졸의 간접적 효과의 척도가 될 수 있는 대기로부터 지표로의 하향 장파 속 감소( $0.8 \text{ Wm}^{-2}$ )는 대기 중 총 수증기량의 감소( $0.02 \text{ kgm}^{-2}$ )와 연관되며, 이는 지표 잠열 속의 감소( $0.8 \text{ Wm}^{-2}$ )와 연관지을 수 있다.

현열 속의 감소( $1.0 \text{ Wm}^{-2}$ )로 예상할 수 있었듯이 에어로졸의 단파 복사 효과에 따른 전구 및 연 평균 지표 온도가  $0.17^\circ\text{C}$  감소하였으며, 에어로졸의 분포를 따라 지역적으로 운량, 강수량, 그리고 총 수증기량이 감소한 지역에서 지표 온도가 냉각됨을 알 수 있었다. 특히, 이 결과로부터 에어로졸에 효과에 의해 고위도 극지방에서 크게 냉각되는 것을 알 수 있었는데 이는 지구 온난화 시나리오에서 나타났던 고위도 극지방의 온난화를 크게 상쇄시키는 결과로써 지구 온난화 연구에 있어서 에어로졸의 효과가 무시 못할 영향력을 준다는 것을 시사한다.

본 연구에서는 대기 중 온실 기체들의 농도가 증가함에 따라 지구 온난화에 대한 우려가 점점 커지고 있는 현재 에어로졸은 이와는 반대로 TOA와 SFC에서 추정된 여러 간접적 효과들이 양의 강제를 보였으나 직접적 효과의 크기보다 상당히 작아 음의 강제인 것으로 나타났다.

이 연구 결과로부터 에어로졸의 복사 효과가 포함된 AGCM의 개발이 완성되었으며, 이를 대기 성분 모형으로 갖는 기후 시스템 모형으로 생산될 지구 온난화 정보의 유의성이 한층 높아질 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 "지구 온난화 및 한반도 기후 변화

예측 기술 개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- 1) IPCC, 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth. Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- 2) Mitchell J. F. B., Johns T. C., 1997, On modification of global warming by sulfate aerosols, *J. Climate*, 10, 245-267.
- 3) Haywood J. M., Roberts D. L., Slingo A., Edwards J. M., Shine K. P., 1997, General circulation model calculations of the direct radiative forcing by anthropogenic sulfate and fossil-fuel aerosol, *J. Climate*, 10, 1562-1577.
- 4) Penner J. E., Charlson R. J., Hales J. M., Laulainen N. S., Leifer R., Novalov T., Ogren J., Radke L. F., Schwartz S. E., Travis L., 1994, Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosol, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75, 375-400.
- 5) Taylor K. E., Penner J. E., 1994, Response of the climate system to atmospheric aerosols and greenhouse gases, *Nature*, 369, 734-737.
- 6) Kiehl J. T., Briegleb B. P., 1993, The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing, *Science*, 260, 311-314.
- 7) 김병곤, 권태영, 2006, 지상원격탐사를 이용한 에어로졸 간접효과 연구, *한국대기환경학회지*, 22(2), 235-247.
- 8) Haywood J. M., Shine K. P., 1995, The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 603-606.
- 9) Chylek P., Videen G., Ngo D., Pinnick R. G., Klett J. D., 1995, Effect of black carbon on the optical properties and climate forcing of sulfate aerosols, *J. Geophys. Res.*, 100, 16325-16332.
- 10) Charlson R. J., Langner J., Rodhe H., Leovy C. B., Warren S. G., 1991, Perturbation of the North Hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols, *Tellus*, 43AB, 152-163.
- 11) Twomey S. A., 1977, The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149-1152.
- 12) Jones A. D., Roberts L., Slingo A., 1994, A climate model study of the indirect radiative forcing by an-



- thropogenic sulphate aerosols, *Nature*, 370, 450-453.
- 13) Tegen L., Hollrig P., Chin M., Fung I., Jacob D., Penner J., 1997, Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model result, *J. Geophys. Res.*, 102, 23895-23915.
  - 14) Liousse C., Penner J. E., Chuang C., Walton J. J., Eddleman H., Cachier H., 1996, A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle. *J. Geophys. Res.*, 101, 19, 411-19, 432.
  - 15) Langner J., Rohde H., 1991, A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle, *J. Atmos. Chem.*, 13, 225-263.
  - 16) Chou M. D., Chan P. K., Wang M., 2002, Aerosol radiative forcing derived from SeaWiFS-retrieved aerosol optical properties, *J. Atmos. Sci.*, 59, 748-757.
  - 17) IPCC, 2001, *Climate Change 2000: The science of climate change. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 339pp.
  - 18) Boucher O., Tarr'e, 2000, Estimation of the aerosol perturbation to the Earth's radiative budget over oceans deduced from POLDER satellite aerosol retrievals, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1103-1105.
  - 19) Kim D., Ramanathan V., 2008, Solar radiation budget and radiative forcing due to aerosols and clouds, *J. Geophys. Res.*, 113(D2), DOI: 10.1029/2007JD008434.
  - 20) Yu S., Zender C. S., Saxena V. K., 2001, Direct radiative forcing and atmospheric absorption by boundary layer aerosols in the southeastern US: model estimates on the basis of new observations, *Atmos. Env.*, 35(23), 2967-3977.
  - 21) Christopher S. A., Zhang J., 2004, Cloud-free shortwave aerosol radiative effect over oceans: Strategies for identifying anthropogenic forcing from Terra satellite measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18101, DOI:10.1029/2004GL020510.
  - 22) Chang L. S., Park S. U., 2004, Direct radiative forcing due to anthropogenic aerosols in East Asia during April 2001, *Atmospheric Environment*, 38, 4467-4482.
  - 23) 환경부, 과학기술처, 1997, 기후 변화 예측 기술, G7 프로젝트 제2단계 1차년도 보고서.
  - 24) 환경부, 1998, 기후 변화 예측 기술, G7 프로젝트 제2단계 2차년도 보고서.
  - 25) 환경부, 1999, 기후 변화 예측 기술, G7 프로젝트 제2단계 3차년도 보고서.
  - 26) Arakawa A., Lamb V., 1997, Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model, In *Methods in Computational Physics*, Vol.17, J. Chang, Ed., Academic Press, 173-265.
  - 27) Phillips N. A., 1957, A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *J. Meteor.*, 14, 184-185.
  - 28) Fiorino M., 1997, AMIP II sea surface temperature and sea ice concentration: observations, [http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/AMIP2EXPDSN/BCS\\_OBS/amip2\\_bcs.htm](http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/AMIP2EXPDSN/BCS_OBS/amip2_bcs.htm)
  - 29) Wang W. C., Liang X. Z., Dudek M. P., Polland D., Thompson S. L., 1995, Atmospheric ozone as a climate gas, *Atm. Res.*, 37, 247-256.
  - 30) Liang X. Z., Wang W. C., Boyle J. S., 1997, Atmospheric ozone climatology for use in general circulation models, PCMDI Report No. 43, UCRL-MI-125650, 25pp.
  - 31) Gates W. L., Nelson A. B., 1975, A new tabulation of the Scripps topography on a 1° global grid. Part I: Terrain heights, R-1276-2-ARPA, The Rand Corporation, Santa Monica, CA, 132pp.
  - 32) IPCC, 1995, *Climate change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 572pp.
  - 33) Chou M. D., Suarez M. J., 1999, A shortwave radiation parameterization for atmospheric studies, NASA/TM-1999-104606, 15, 42pp.
  - 34) Chou M. D., Liang X. Z., Suarez M. J., Yan M. M. H., 2001, A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies, NASA/TM-2001-104606, 19, 55pp.