

대기 복사 모형에 의한 세종기지에서의 복사학적 특징: 복사 대류 평형 모형을 이용한 기후 변화 연구

이규태* · 이방용** · 이원학* · 지준범* · 윤영준**

*강릉대학교 대기환경과학과

**한국해양연구원 부설 극지연구소

Radiative Properties of King Sejong Station in West Antarctica with the Radiative Transfer Model: Climate Change Using Radiative Convective Equilibrium Model

Kyu-Tae Lee* · Bang Yong Lee** · Won-Hak Lee* · Joon-Bum Jee* · Young Jun Yoon**

*Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangnung National University

**Korea Polar Research Institute, KORDI

요약 : 연직 공기 기둥에 대한 복사 및 대류 과정이 포함된 일차원 복사-대류 평형 모형을 구축하였고, 이 모형을 이용하여 남극 세종기지에서 복사-대류 평형 온도를 계산하고 분석하였다. 이 모형의 반응도에서 지표면 알베도와 태양 천정각의 코사인 및 이산화탄소 증가는 지표면에서의 복사-대류 평형 온도를 감소시켰다. 그리고 구름 광학두께가 비교적 큰 하층운은 지표면 온도를 감소시키나, 구름 광학두께가 작은 상층운은 온실효과 때문에 지표면 온도를 증가시켰다. 남극 세종기지의 44년(1958~2001)의 기간에 대하여 계산된 지표면에서의 복사-대류 평형 온도의 연변화는 0.012°C/년이었다. 마찬가지로 13년 동안(1989~2001)의 자료에 대한 복사-대류 평형 온도 변화는 0.01°C/월이었으며, 동일한 기간의 관측 자료 분석 결과로는 0.005°C/월의 변화를 나타내었다.

주요어 : 복사 대류 평형 온도, 세종기지, 기후 변화, 지구 온난화

ABSTRACT : The radiative convective equilibrium (RCE) temperature was calculated for the climate change study at King Sejong Station in West Antarctica. As a result of RCE model sensitivity test, the increases of surface albedo, solar zenith angle, and cloud optical thickness decrease surface temperature. On the other hand, the increases of carbon dioxide and cirrus cloud amount are caused by surface warming due to the greenhouse effect. According to the model calculation result, annual mean surface temperature shows a upward trend of 0.012°C/year during the period of 1958-2001. During the period of 1989~2001, the trend of monthly mean surface temperature by model calculation is 0.01°C/month and the observation trend is 0.005°C/month.

Key words : radiative convective equilibrium temperature, King Sejong Station, climate change), global warming

1. 서론

최근 IPCC(2001) 보고서에 의하면 지난 20세기 동안 평균된 전 지구의 지표면 온도가 약 0.6±0.2°C 증가하였고, 특히 남극반도 지역은 심각한 온난화가 일어나고 있는 여러 지역들 중 하나로 알려져 있다. 이와 관

련된 국내외의 연구 결과가 다수 있으며 국외의 결과들로서, Vaughan *et al.*(2001)는 지난 50년간 남극반도가 전구 평균으로부터 약 2.8°C 정도 더 상승함을 보였다. 그리고 Turner *et al.*(2004)도 최근 50년 동안 남극반도에 있는 Faraday(현재, Vernadsky)에서 약 2.5°C의 지표 기온 상승이 있었음을 밝혔다. 국내에서는

Lee *et al.* (2002)이 남극 6개 관측 지점(Rothera, Faraday, Bellingshausen, Orcadas, Esperanza, Halley)에서 40년(1962~2001) 동안 관측된 지표면 온도 자료를 분석하였다. 그 결과 Halley를 제외한 5개 지점에서 가을과 겨울철에 온난화가 크게 일어났고, 특히 서남극 대륙에서는 겨울에 동남극 대륙에서는 가을에 보다 뚜렷한 온난화 경향이 나타남을 보였다. 또한, 이 등(2003)은 남극반도 지역에서 기온, 바람, 기압 사이의 관계성을 조사한 결과 남극반도의 북동쪽 지역에서 북서풍이 증가하고, 남동풍이 감소할수록 기온이 증가함을 보였다.

이 연구에서는 기후 변화에 영향을 주는 기상 요소들의 시간 변화를 분석하고 이 결과를 복사 대류 평형 모형의 입력 자료로 사용하여, 남극반도와 멀지 않은(약 100 km) 북쪽 킹조지섬에 위치한 남극 세종기지의 기온 변화 경향을 분석하고자 한다.

2. 연구 자료

연직 복사 평형 온도 계산을 위한 모형의 입력 자료로서 기온과 수증기 및 오존 혼합비의 연직 분포 자료가 필요하며, 이들 자료는 ECMWF(the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 인터넷 웹사이트(<http://data.ecmwf.int/data>)에서 제공되는 재분석 자료를 사용하였다. 이 자료의 수평 분해능은 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이고, 연직으로는 1 hPa부터 1000 hPa까지 23개의 기층으로 구성되어 있으며 자료 기간은 1958년부터 2001년 까지 44년이다.

남극 세종기지에 대한 모형의 입력 자료를 위하여 ECMWF 재분석 자료를 내외삽하였고, 그 결과 기온과 수증기 및 오존 혼합비의 월별 연직분포를 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에서 기온(a)은 1000 hPa층에서 265-270 K이었고 최저 기온은 약 30 hPa층 부근에서 나타났다. 이 자료 기간 동안 1000 hPa층의 월별 기온 변화 경향은 $0.0043^{\circ}\text{C}/\text{월}$ 이었고, 계절별로는 봄, 가을, 겨울에 각각 0.0006 , 0.0017 , $0.0009^{\circ}\text{C}/\text{월}$ 로 약간 증가하였으나 여름철에는 오히려 $-0.0032^{\circ}\text{C}/\text{월}$ 로 감소하였다. 수증기 혼합비(b)는 1000 hPa층에서 약 2.5-3.0 g/kg이었고 기온과 마찬가지로 여름을 제외한 봄, 가을, 겨울에 약간의 증가 경향을 나타냈으며, 기압이 500 hPa보다 작은 상층에서는 0.5 g/kg 이었다. 오존 혼합비(c)는 5 hPa층에서 최대 $1.1 \times 10^{-2} \text{ g/kg}$ 의 값을 나타내었고 지표면과 대기상

한으로 갈수록 오존혼합비는 감소하였다.

모형의 가동을 위하여 필요한 구름 자료는, 미국항공우주국(NASA; National Aeronautics and Space Administration)에서 운영하는 Terra 위성의 MODIS

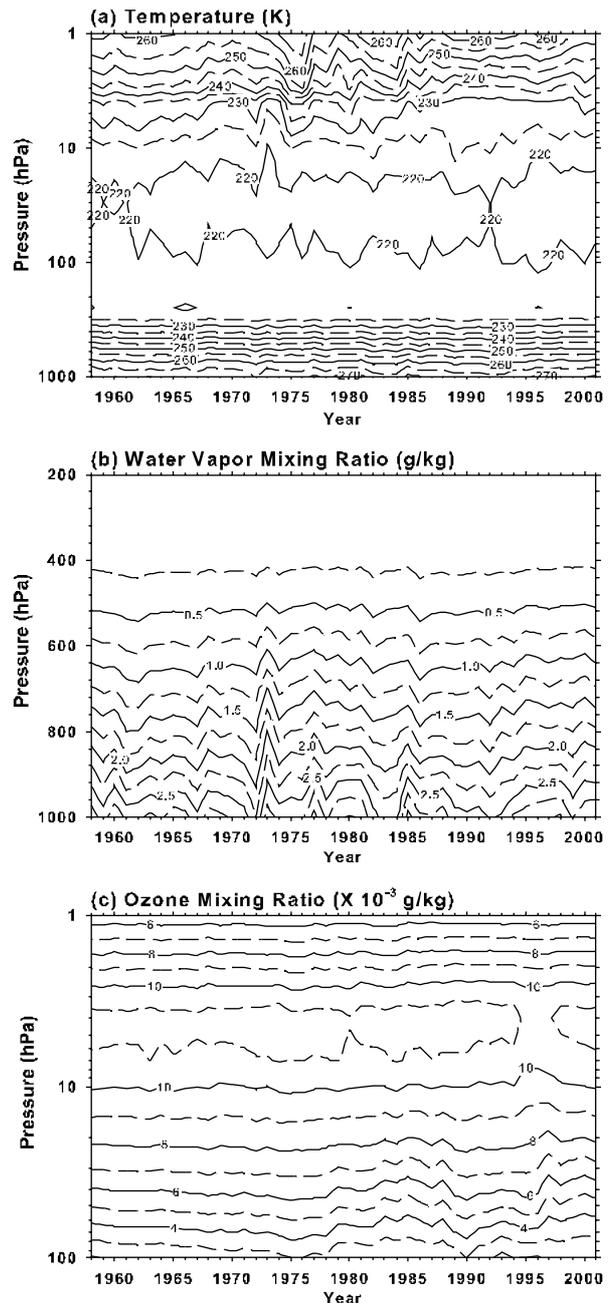


Fig. 1 The annual mean profiles of ECMWF reanalysis during the period from 1958 to 2001. The (a), (b), and (c) are temperature, water mixing ratio, and ozone mixing ratio, respectively.

(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 관측 자료를 사용하였다. 이 자료는 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 수평 분해능의 Level 3 자료이며 웹사이트(<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>)에서 받을 수 있다. 이 연구에서 사용된 MODIS 자료 기간은 2000년 3월부터 2005년 2월까지이나, 남극 세종기지의 겨울철인 6, 7, 8월 자료는 결측되었거나 불확실성 때문에 사용하지 않았고 이 자료들 중 운량과 구름의 광학 경로 길이(cloud path length)의 월 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림의 (a)는 남극 세종기지의 운량을 나타낸 것으로서 여름에는 수적 구름이 빙정 구름보다 많고, 나머지 계절에는 반대로 빙정 구름이 수적 구름보다 많음을 알 수 있다. 그리고 구름 경로 길이(b)는 5월을 제외한 모든 계절에서 빙정 구름의 경로 길이

가 수적 및 액체(liquid)구름의 경로 길이보다 크게 나타나고 있다.

남극 세종기지의 지표면 알베도는 정 등(2005)의 방법을 사용하였고, 이를 위한 지표 기온 자료는 인터넷 웹사이트(<http://www.antarctica.ac.uk/met/gjma/>)에서 제공되는 월 평균 자료를 이용하였다.

3. 연구 방법

3.1 복사 모형

평행 평면 대기에서 광학두께가 τ 인 기층의 복사 휘도(I_ν) 변화를 나타내는 복사 전달 방정식은 다음과 같다.

$$\mu \frac{dI_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi)}{d\tau} = I_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi) - J_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi) \quad (1)$$

여기서, $\mu = \cos \theta$ 이고, θ 와 ϕ 는 복사의 진행 방향에 대한 천정각과 방위각이며 원천 함수 J_ν 는 아래와 같다.

$$J_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \omega_\nu I_\nu(\tau_\nu, \mu', \phi') P_\nu(\mu, \phi; \mu', \phi') d\mu' d\phi' + Q_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi) \quad (2)$$

이 식에서 ω_ν 는 단일 산란 알베도(single scattering albedo), P_ν 는 위상 함수이며 열역학 평형 상태에서의 원천 함수 $Q_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi)$ 는 다음과 같다.

$$Q_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi) = Q_\nu^{(thermal)}(\tau_\nu) + Q_\nu^{(beam)}(\tau_\nu, \mu, \phi) \quad (3)$$

이 식에서 $Q_\nu^{(thermal)}(\tau_\nu)$ 과 $Q_\nu^{(beam)}(\tau_\nu, \mu, \phi)$ 는 각각 대기 성분 기체들이 방출하는 적외 복사와 태양 복사의 원천 함수를 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_\nu^{(thermal)}(\tau_\nu) = [1 - \omega_\nu(\tau_\nu)] B_\nu(T) \quad (4)$$

$$Q_\nu^{(beam)}(\tau_\nu, \mu, \phi) =$$

$$\frac{\omega_\nu(\tau_\nu) F_0}{4\pi} P_\nu(\tau_\nu, \mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) \exp(-\tau_\nu/\mu_0) \quad (5)$$

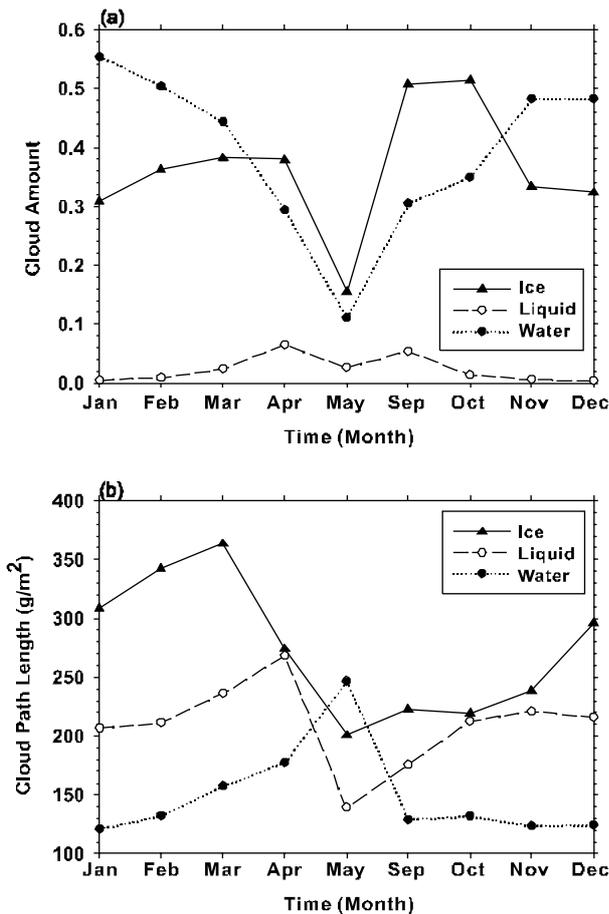


Fig. 2 The monthly mean cloud amount(a) and cloud path length(b) over 5-year period (Mar. 2000~Feb. 2005). This cloud parameters derived from MODIS Level 3 data on board the Terra satellite.

여기서 B_ν 는 플랑크(Planck) 함수이며, F_o 는 대기 상단으로 입사되는 태양 복사 속 밀도(irradiance or flux density)이다.

태양 복사의 경우에 식 (4)에서 플랑크 함수 $B_\nu(T)$ 는 무시되고, 이 연구에서 여러 기층에 대한 다중 산란이 포함된 식 (1)의 모수화는 Chou and Suarez(1999)의 방법을 사용하였다. 적외 복사의 경우는 식 (2), (4) 및 (5)에서 단일 산란 알베도 ω 가 무시되므로 식 (1)의 형태는 단순화되고, 기압 p 인 층에서 파수 영역에 대한 상향 및 하향 복사 속 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F^\uparrow(p) = \int d\nu \left[B_\nu(T_s) \tau_\nu(p, p_s) - \int_p^{p_s} B_\nu(T') \frac{\partial \tau(p, p')}{\partial p'} dp' \right] \quad (6)$$

$$F^\downarrow(p) = \int d\nu \left[\int_0^p B_\nu(T') \frac{\partial \tau(p, p')}{\partial p'} dp' \right] \quad (7)$$

이 식들에서 T_s 와 p_s 는 각각 지표면의 온도와 기압이고, 투과율 $\tau_\nu(p, p')$ 는 다음과 같다.

$$\tau_\nu(p, p') = 2 \int_0^1 e^{-u_\nu(p, p')/\mu} \mu d\mu \quad (8)$$

이 식에서 du_ν 는 기압 두께가 dp' 인 층의 광학 두께이며, $u_\nu(p, p')$ 는 기압 p 에서 p' 까지 흡수 기체들에 의한 광학 두께이다. 적외 복사 영역에서 식 (6)과 (7)의 계산을 위하여 Chou and Kouvaris(1991)의 모수화 방법을 사용하였다.

3.2 복사 대류 평형 모형

복사 대류 평형 모형은 지구 대기계에서 기온과 복사 속 성분들의 연직 분포를 계산하기 위한 1차원 모형으로서, 대류권계면을 기준으로 성층권 이상의 고층대기에서 다음과 같은 복사 평형이 가정된다.

$$\left[\frac{\partial T}{\partial t} \right]_R = \frac{g}{C_p} \frac{\partial F_{NET(P)}}{\partial p} = 0 \quad (9)$$

여기서, T , t , p , g , C_p , $F_{NET(P)}$ 는 각각 기온, 시간,

기압, 중력 가속도, 정압 비열, 순 복사 속이다. 이 연구에서는 식 (9)의 복사 평형에 도달하기 위하여 초기($n=0$) 기온 분포를 설정하고 이 기온과 복사 속 변화의 반복 계산 방법에 의하여 기층별 기온의 변화를 다음과 같이 계산하였다.

$$T(p, t_{n+1}) = T(p, t_n) + \left[\frac{\partial T(p, t)}{\partial t} \right]_{R, t=t_n} \Delta t, \quad (n=0, 1, \dots, N) \quad (10)$$

여기서, $T(p, t_{n+1})$ 와 $T(p, t_n)$ 은 시각 $t=t_{n+1}$ 과 $t=t_n$ 일 때 기압이 p 인 기층의 온도이고, Δt 는 온도 분포를 수정하는 시간 간격 ($\Delta t=t_{n+1}-t=t_n$)이다.

이 모형에서 대류권의 연직 방향 에너지 수송은 복사이외에 대류 작용이 포함되므로 대류권에서는 식 (9)와 같은 복사 평형은 일어나지 않는다. 따라서 대류권에서 기층의 복사 평형 온도는 복사 평형 보다 기온 감률(건조 및 습윤 단열 기온 감률)을 따르고 이 과정에서 지표면의 경계 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{C_p}{g} \int_{P_T}^{P_0} \left[\frac{\partial T(p, t)}{\partial t} \right]_{RC, t=t_n} dp \\ & dp = \frac{C_p}{g} \int_{P_T}^{P_0} \left[\frac{\partial T(p, t)}{\partial t} \right]_{R, t=t_n} dp + (-F_0 + S_0) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $[\partial T(p, t)/\partial t]_{RC, t=t_n}$ 은 시각 $t=t_n$ 에서 복사 대류 평형 온도 변화를 의미하고 P_T 와 P_0 는 대류 층 상부와 지표면 기압이며, F_0 와 S_0 는 지표면에서 상향 적외 복사 속과 하향 태양 복사 속이다.

3.3 빙정의 산란 특성 모수화

복사의 산란에 영향을 미치는 단일 산란 특성(single-scattering properties)은 소산 계수(extinction coefficient, β), 단일 산란 알베도(single-scattering albedo, ω) 그리고 비 대칭인자(asymmetry factor, g)로 정의된다. 이 연구에서 빙정에 따른 단일 산란 특성은 태양 및 적외 복사 파수 영역에 대하여 다음과 같이 분석 함수로 나타내었다.

$$\beta = a_0 + a_1 / D_e^{a_2} \quad (12)$$

$$1 - \omega = b_0 + b_1 / D_e^{b_2} \quad (13)$$

$$g = c_0 + c_1 / D_e^{c_2} \quad (14)$$

이 식들은 11개의 태양 복사 파장 영역(Chou and Suarez, 1999)과 9개의 적외 복사 파장 영역(Chou *et al.*, 2001)에 대한 것으로서 D_e 는 산란체의 직경을 의미하고 유효 입자 크기(effective particle size)이고, a 와 b 및 c 는 회귀 계수들로서 그 값들은 각각 Table 1, 2, 3에 나타내었다.

4. 결과 및 토의

4.1 복사 대류 평형 모형의 반응도

입력 자료 변화에 따른 복사 대류 평형 온도의 연직 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 이 계산을 위하여 기온과 수증기 및 오존 혼합비는 아한대 여름철(sub-arctic summer) 표준 대기 자료를 사용하였고 이산화탄소는 350 ppmv로 가정하였다. 그리고 태양 상수는 1360 Wm^{-2} , 태양 천정각의 코사인 값은 0.25, 지표면 알베도는 0.48을 가정하였으며 대류권의 기온 감률은 습윤 단열 감률을 사용하였다. 구름은 상층운(260~300 hPa)과 하층운(860~900 hPa)으로서 각각의 전운량은 0.5, 0.2로 가정하였고

구름입자 혼합비는 $0.39 \times 10^{-3} \text{ g/g}$ 로 놓았다. 이 그림에서 지표면 알베도(a) 증가는 지표에 흡수되는 태양 복사 에너지 감소 때문에 지표에서 방출하는 적외 복사도 감소되어 복사 대류 평형 온도가 감소됨을 알 수 있다.

그러나 지표면 알베도 증가는 대류권 상부에서 태양 복사의 흡수 증가 때문에 이곳에서의 복사 대류 평형 온도는 다소 증가 경향이 나타났고, 성층권 이상의 고도에서 지표 알베도 변화 효과는 무시할 수 있는 수준이다. 태양 천정각 코사인 값(b)의 증가는 대기 중의 복사 통과 경로가 짧아지고 태양 복사 감쇄가 적어지기 때문에 지표에 도달하는 태양 복사 속 및 지표 부근의 복사 대류 평형 온도의 증가 요인이 되지만, 성층권 이상의 고도에서는 태양 복사 흡수 감소 때문에 복사 평형 온도는 대류권과 반대로 감소 경향을 보여준다. 대기 중의 이산화탄소(c) 증가는 온실효과 때문에 대류권의 복사 대류 평형 온도를 증가시키나 성층권 이상의 고도에서는 적외 복사 증가 때문에 기온이 감소하는 것을 볼 수 있다. IPCC(2001)의 대기 해양 결합 모형들(AOGCMs)에 의한 CO_2 배증 실험(Transient Climate Response, 점증기 후반응)에서 $1.1 \sim 3.1^\circ\text{C}$ 의 지표 기온 증가와 그림 (c)의 경향은 잘 일치한다.

Fig. 3의 결과 중에서 9 hPa 기압의 성층권과 270 hPa의 대류권 상부 및 지표면에 대한 복사 대류 평형 온도의 반응도 계산 결과를 Table 4에 요약하였다. 이 표에서 지표면과 태양 천정각의 코사인 값 및 이산화 탄소량은

Table 1 Coefficients for the parameterizations for solar and infrared radiation extinction coefficient.

Band	Solar Radiation			Infrared Radiation		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
1	0.30E-03	0.33E+01	0.10E+01	-0.61	0.78	0.04
2	0.42E-03	0.34E+01	0.10E+01	-0.84	1.10	0.05
3	0.54E-03	0.34E+01	0.10E+01	-0.04	1.20	0.60
4	0.56E-03	0.34E+01	0.10E+01	-0.02	0.98	0.64
5	0.42E-03	0.34E+01	0.10E+01	-0.06	0.59	0.39
6	0.40E-03	0.34E+01	0.10E+01	-0.06	0.91	0.50
7	0.40E-03	0.34E+01	0.10E+01	-0.04	1.34	0.64
8	0.57E-04	0.34E+01	0.10E+01	-0.03	1.78	0.74
9	-0.18E-03	0.33E+01	0.10E+01	-0.01	2.95	0.91
10	0.10E-02	0.35E+01	0.10E+01			
11	0.10E-02	0.35E+01	0.10E+01			

Table 2 Same as Table 1, except for single scattering co-albedo and albedo.

Band	Solar Radiation			Infrared Radiation		
	b_0	b_1	b_2	b_0	b_1	b_2
1	0.10E-05	0.26E-06	-0.11E+01	0.60	-1.78	0.73
2	0.50E-07	0.19E-06	-0.10E+01	0.82	-0.01	-0.60
3	0.50E-07	0.17E-06	-0.10E+01	0.58	-0.01	-0.21
4	0.50E-07	0.16E-06	-0.10E+01	1.00	-0.86	0.13
5	0.50E-07	0.82E-07	-0.10E+01	0.84	-0.10	-0.22
6	0.50E-07	0.72E-07	-0.10E+01	1.62	-0.75	-0.07
7	0.50E-07	0.72E-07	-0.10E+01	1.91	-1.06	-0.05
8	0.10E-07	0.54E-07	-0.11E+01	1.91	-1.08	-0.05
9	0.50E-05	0.56E-05	-0.10E+01	1.90	-0.86	-0.09
10	0.10E-05	0.95E-03	-0.85E+00			
11	0.50E-03	0.18E-01	-0.53E+00			

Table 3 Same as Table 1, except for asymmetry factor.

Band	Solar Radiation			Infrared Radiation		
	c_0	c_1	c_2	c_0	c_1	c_2
1	0.70	0.21E-01	-0.36	0.96	-2.53	0.78
2	0.69	0.30E-01	-0.32	1.20	-0.80	0.21
3	0.65	0.70E-01	-0.20	1.00	-0.73	0.48
4	0.65	0.70E-01	-0.20	0.97	-0.86	0.81
5	0.65	0.70E-01	-0.20	0.98	-0.86	0.84
6	0.66	0.70E-01	-0.20	1.23	-0.50	0.13
7	0.66	0.70E-01	-0.20	1.23	-0.50	0.13
8	0.65	0.60E-01	-0.24	1.26	-0.50	0.11
9	0.60	0.85E-01	-0.22	1.14	-0.50	0.19
10	0.57	0.95E-01	-0.24			
11	0.50	0.20E+00	-0.16			

각각 기준 값과 20%의 증가 및 감소에 대한 결과이며, 이 표의 결과는 Fig. 3의 결과와 일치한다.

Fig. 4는 모형의 구름 자료 변화에 따른 반응도이다. 상층운의 전운량(a) 증가는 온실 효과 때문에 지표 기온을 증가시키나, 이 상층운에 의한 태양 복사의 반사 증가 때문에 성층권 이상의 기온은 감소되는 것을 볼 수 있다. 그러나 하층운의 전운량(b)이 증가하면, 지표에 입사하는 태양 복사 에너지 감소와 구름에 의한 태양 복사 반사 증가 때문에 지표와 전 기층의 복사 평형 온도는

감소된다. 상층운(c)과 하층운(d)의 구름 혼합비 증가는 구름 광학 두께의 증가와 더불어 태양 복사 에너지 차단 증가 때문에 지표의 복사 평형 온도를 감소시킨다.

4.2 지표면에서 복사 대류 평형 온도의 연 변화

44년 동안(1958~2001년)의 남극 세종기지의 연 평균 자료를 사용하여 지표에서 복사 대류 평형 온도를 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 이 계산을 위하여 모형의

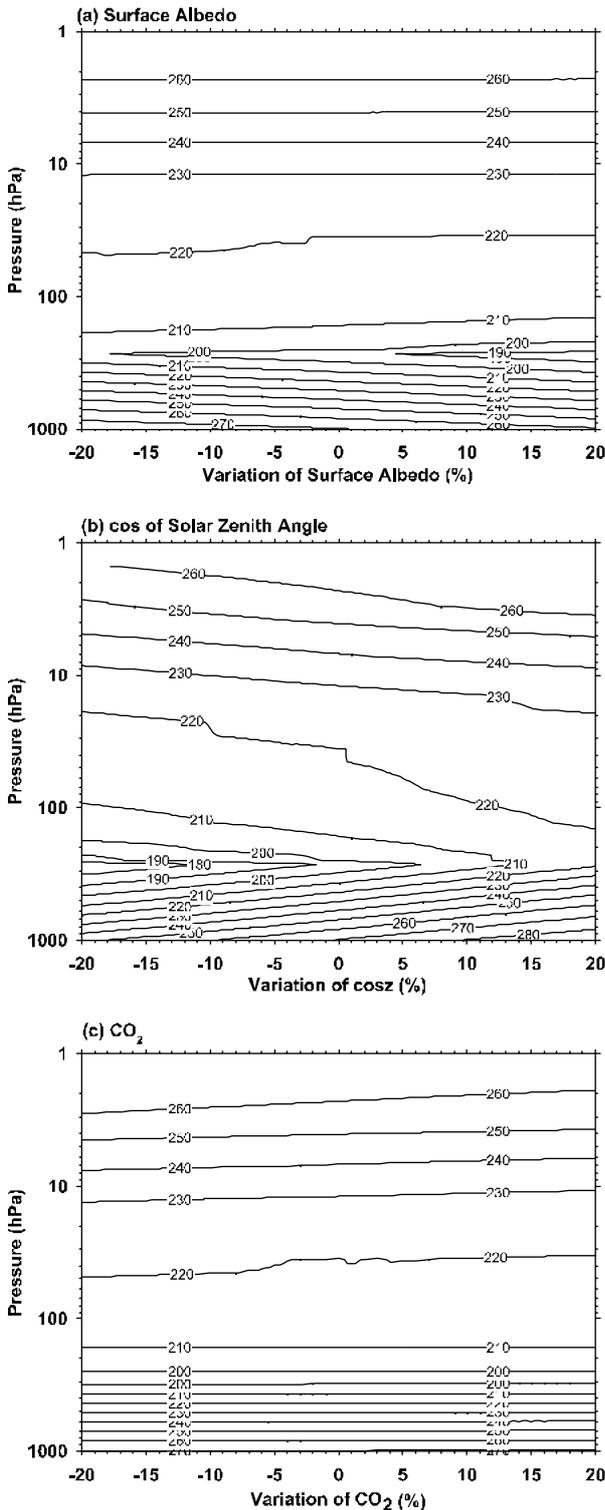


Fig. 3 Sensitivity of radiative convective equilibrium temperature by surface albedo(a), cos of solar zenith angle(b), and CO₂ concentration(c).

초기 연직 분포 자료는 ECMWF 재분석 자료를 사용하였고 이산화탄소와 태양상수 및 지표면 알베도 등의 자료는 모형의 반응도 실험과 같은 값을 사용하였다. 그리고 구름의 운량 및 광학경로 길이는 Fig. 2에 나타난 자료를 산술 평균하여 사용하였다. 그 결과 1958년부터 2001년까지 지표면에서 복사 대류 평형 온도는 0.012 °C/년의 증가 경향을 나타내었다. 이 기간 동안 1958년부터 1970년대 중반까지 대류권의 수증기에 의한 온실효과 증가 때문에 지표면의 복사 대류 평형 온도는 급하게 상승하였고, 반대로 1980년부터는 마찬가지로 대류권 수증기량 때문에 지표의 평형 온도가 감소함을 알 수 있다.

4.3 지표면에서의 복사 평형 온도와 관측 값의 월 변화 비교

남극 세종기지에서 1989년부터 2001년까지 13년 동안은 지표 기온의 관측 자료를 갖고 있기 때문에 이 관측 자료와 비교하기 위하여 이 기간 동안의 복사 대류 평형 온도를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 계산을 위하여 초기 연직 분포 자료는 월 평균 ECMWF 재분석 자료를 사용하였고, 이산화탄소 등의 값은 반응도 실험과 같은 값을 사용하였다. 그러나 태양 천정각의 코사인 값은 월 평균 값을 사용하였고, 지표면 알베도는 정 등(2005)의 방법을 이용하여 계산하였다. 관측된 월 평균 기온 자료에 의해 계산된 지표면 알베도(a)는 1992년 5월에 0.75로 가장 높은 값을 나타냈고, 남극 세종기지의 여름철에는 약 0.3 정도의 값을 보였다. 알베도의 최대값은 남극의 겨울철에 해당하는 6, 7, 8월에 나타날 것으로 판단되나, 겨울철 자료 결측 때문에 Fig. 6에는 6, 7, 8월의 알베도를 나타내지 않았으므로 5월이 가장 높은 값을 나타낸다. 모형으로 계산된 복사 대류 평형 온도와 관측 값의 월 변화는 (b)에 나타내었다. 이 그림에서 계산된 복사 평형 온도는 최저 227.3 K부터 최고 282.3 K까지 나타나지만 250.0 K이하의 낮은 값이 나타나는 이유는 남극의 늦은 가을에 구름 자료 불확실성 때문이며 관측 값은 265.2~276.2 K사이에 분포한다. 이 자료 기간 동안 250.0 K이하의 복사 평형 온도를 나타내는 두 자료를 제외한 월별 변화 경향은 0.01 °C/월이고 관측 값은 0.005 °C/월로서 두 경향 모두 기온의 증가를 나타낸다. (c)는 계산된 복사 평형 온도와 관측 값의 차이를 나타낸 것으로서, 대부분 5%미만의 차이가 있었으나 3개의 자료는 5~15%의 큰

Table 4 Radiative convective equilibrium temperatures with the variations of surface albedo, cosine of solar zenith angle, and CO₂.

Variable	Percent Variation	Radiative Convective Equilibrium Temperature (K)		
		Stratosphere (9 hPa)	Top of Troposphere (270 hPa)	Surface
Surface Albedo	-20	234.5	201.0	278.1
	0	234.4	192.0	271.0
	20	234.2	182.6	261.8
cosine of Solar Zenith Angle	-20	228.9	171.3	248.2
	0	234.4	192.0	271.0
	20	239.3	218.1	288.2
CO ₂	-20	236.3	191.6	270.7
	0	234.4	192.0	271.0
	20	233.0	192.3	271.3

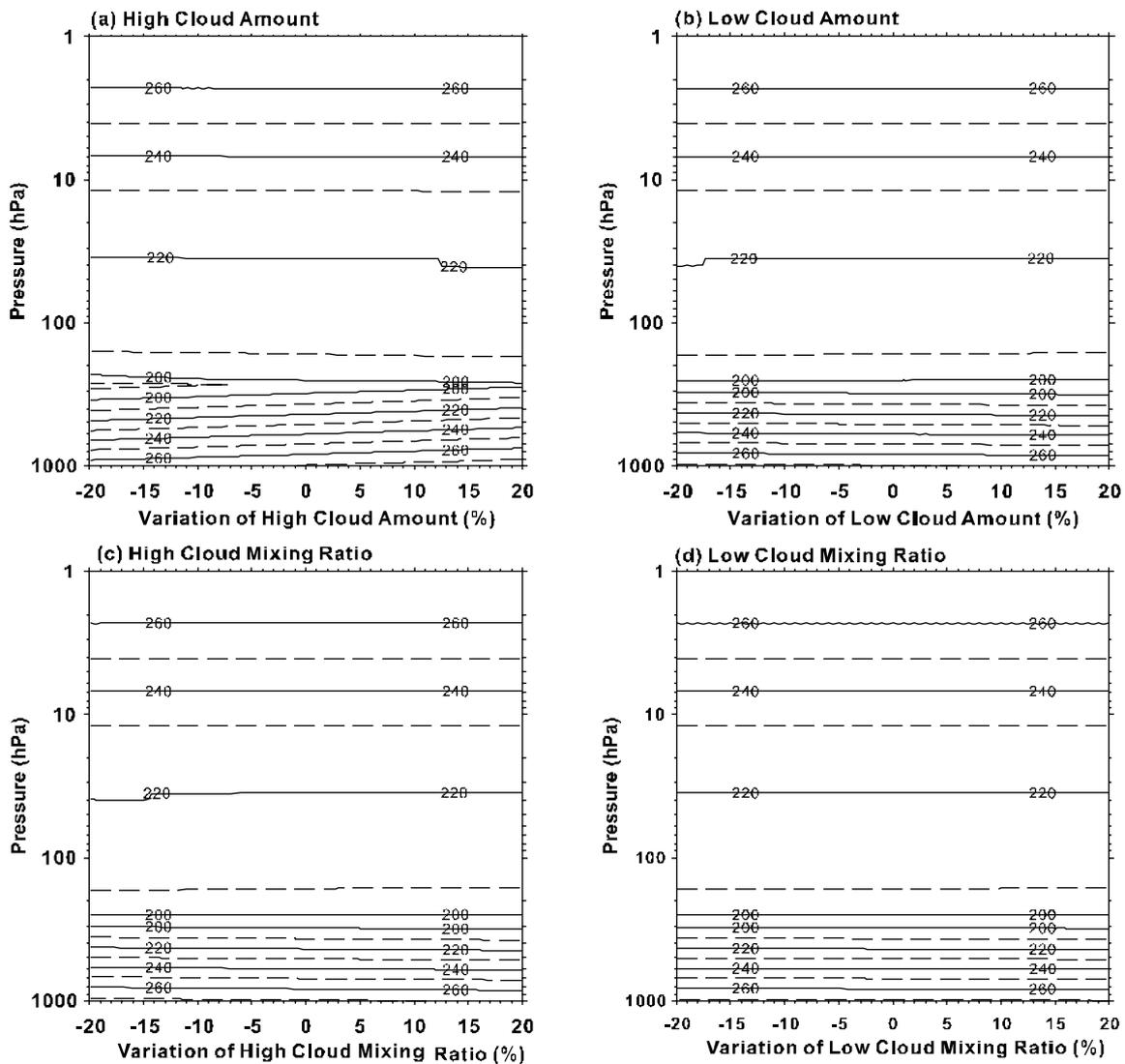


Fig. 4 Same as Fig. 3, except for high(a) and low(b) cloud amount, and high(c) and low(b) cloud mixing ratio.

차이가 있었고 이 차이는 (b)에서 설명한 바와 같다.

Fig. 6의 그림에서 계산된 복사 평형 온도와 관측값의 상관관계는 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서처럼 복사 평형 온도와 관측값의 상관 계수는 0.74로 높게 나타났고, 구름 자료의 불확실성이 포함된 2개의 자료를 제외하면 이 상관 계수는 더욱 증가할 것이다.

복사 대류 평형 모형은 특정 지역의 지표면 및 대류권 온도를 계산하기에는 이론적으로 적합하지 못한 부분이 있다. 즉, 지표면 및 대류권 온도 결정은 복사보다는 역학적인 요인이 더 중요하기 때문에 정확한 지표와 대류권 온도 분포 분석을 위해서는 3차원 역학모형이 필요하다. 그러나 극지에서는 대기의 움직임이 다른 위도에 비교하여 안정적이기 때문에 구름 자료 등의 입력 자료만 정확하면 큰 오차 없이 지표면 기온 변화 분석에 사용될 수 있을 것이다.

5. 결론

이 연구는 일차원 복사 대류 평형 모형을 이용하여 남극 세종기지에서의 기온 변화를 분석하는 것이 목표이다. 입력 자료 변화에 따른 복사 대류 평형 모형의 반응도 분석 결과 지표면 알베도와 태양 천정각 증가는 지표기온을 감소시키며, 구름은 고도와 광학 깊이 및 운량에 따라 온실 효과 등과 관계되어 지표면 기온을 증가 및 감소시킨다.

남극 세종기지의 지표면에서 장기간(1958~2001) 동안 복사 대류 평형 온도를 계산 하고 분석한 결과 0.012

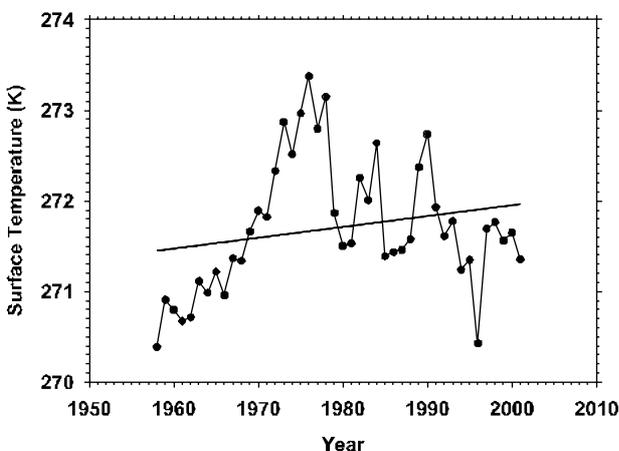


Fig. 5 The annual mean of radiative convective equilibrium temperature at surface during the period of 1958~2001.

°C/년의 증가 경향이 나타났다. 그리고 세종기지에서의 지표면 관측 기온 자료가 존재하는 1989년부터 2001년까지의 기간에 대하여, 복사 대류 평형 온도와 관측값은 각각 0.01°C/월과 0.005°C/월로 증가하였다.

대류권의 역학 과정이 충분히 반영되지지는 못하였지만 일차원 복사 대류 평형 모형에 의하여 계산된 지표기온의 분석 결과, 세종기지에서 지표기온 증가 현상이 나타났다. 이러한 경향은 남극 세종기지에서의 관측값과 3차원 역학모형을 이용한 연구 결과와 근접하였다. 그러나 복사 대류 평형 온도 계산을 위하여 필수적인 초

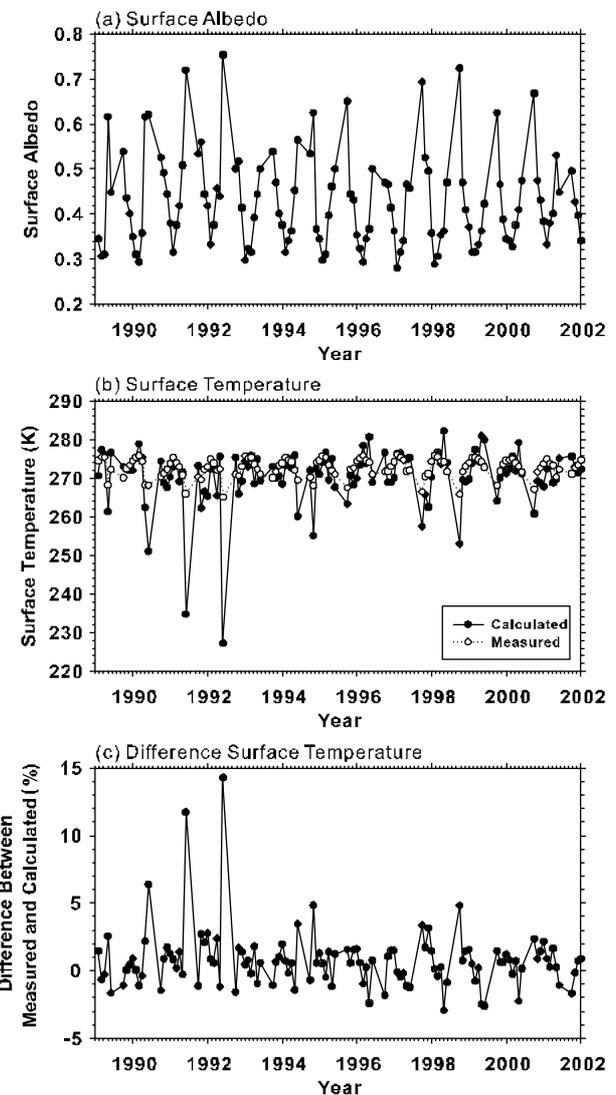


Fig. 6 The monthly mean of surface albedo(a), radiative convective equilibrium surface temperature and measured surface air temperature(b), and difference between measured and calculated temperature(c).

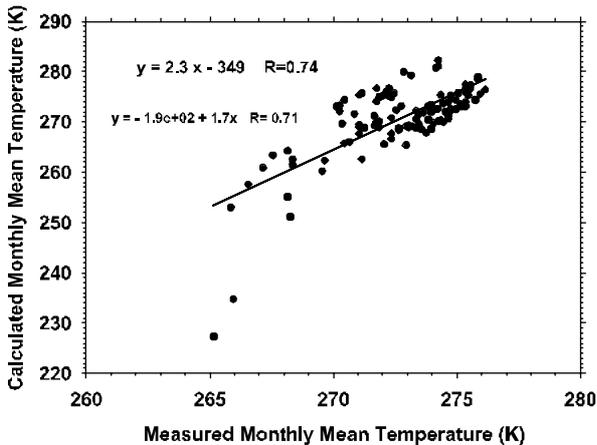


Fig. 7 The relation between measured and calculated monthly mean temperatures at surface of King Sejong Station.

기 자료들의 정확성 및 검증 등의 문제가 보완되면 남극의 기후 연구에 중요한 도구로 쓰일 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 ‘극지 대기 및 기후변화 연구(PE06030)’ 사업과 ‘극지기반 첨단 종합기술 개발(PG05010)’ 사업의 일환으로 수행되었다. 이 논문을 세심하게 검토하고 조언해 주신 심사위원들께 감사드린다.

참고문헌

이정순, 권태영, 이방용, 윤호일, 김정우. 2003. 남극반도의 최근 온난화와 관련된 지역적 대기순환의 변화. *Ocean and Pol.*

Res., **25(4)**, 503-518.

정연진, 이윤곤, 김준, 이방용, 조희구. 2005. 남극 세종기지에서의 에너지 평형. *2005년도 한국기상학회 가을학술발표회 초록집*, pp.114-115.

Antarctic surface temperature website, 2005. <http://www.antarctica.ac.uk/met/gjma/>.

Chou, M.-D. and L. Kouvaris. 1991. Calculation of Transmission Functions in the IR CO₂ and O₃ Bands. *J. Geophys. Res.*, **96**, 9003-9012.

Chou, M.-D. and M.J. Suarez. 1999. A solar radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Tech. Mem. 104606*, 15, Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation. 40p.

Chou, M.-D., M.J. Suarez, X.-Z. Liang, and M.M.H. Yan. 2001. A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies. *NASA Tech. Mem. 104606*, 19, Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation. 56p.

ECMWF website, 2005. <http://data.ecmwf.int/data>.

IPCC, 2001: *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. eds. by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881p.

Lee, B.Y, T.-Y. Kwon, J.-S. Lee, and Y.-I. Won. 2002. Surface air temperature variations around the antarctic peninsula: Comparison of the west and east sides of the peninsula. *Ocean and Pol. Res.*, **24(3)**, 267-278.

MODIS website, 2005. <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov>.

Turner, J., S.R. Colwell, G.J. Marshall, T.A. Lachlan-Cope, A.M. Carleton, P.D. Jones, V. Lagun, P.A. Reid, and S. Iagovkina. 2004. The SCAR READER Project: Towards a high-quality database of mean Antarctic meteorological observation. *J. Climate*, **17**, 2890-2898.

Vaughan, D.G., G.J. Marshall, W.M. Connolley, J.C. King, and R. Mulvancy. 2001. Climate change-Devil in the detail. *Science*, **293**, 1777-1779.