

Article

남극 세종기지에서 복사 속 및 복사 가열률의 연직 분포

이규태¹ · 이방용^{2*} · 이원학¹ · 지준범¹ · 이민경¹¹강릉대학교 자연과학대학 대기환경과학과
(210-702) 강원도 강릉시 지변동 123번지²한국해양연구원 부설 극지연구소
(426-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

The Vertical Distribution of Radiative Flux and Heating Rate at King Sejong Station in West Antarctica

Kyu-Tae Lee¹, Bang Yong Lee^{2*}, Won-Hak Lee¹, Joon-Bum Jee¹, and Min-Kyung Lee¹¹Department of Atmospheric and Environmental Sciences
College of Natural Sciences, Kangnung National University
123 Jibyeon-dong, Gangneung 210-702, Korea²Korea Polar Research Institute, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : The vertical profiles of radiative flux and heating rate at King Sejong Station in West Antarctica were calculated with radiative transfer model by Chou and Suarez (1999) and Chou *et al.* (2001). To run this model, the profiles of temperature, mixing ratios of water vapor and ozone at King Sejong Station were derived from ECMWF Reanalysis data. The surface temperature and albedo were also derived from NCEP/NCAR Reanalysis and CERES data. The radiative flux strongly depends on the cloud optical path length that was calculated using the measured UV-A data and model by Chou and Lee(1996). During the period of 2000~2001 (12 and 18 UTC), the correlation coefficient between calculated and measured downward solar fluxes at surface was 0.90 and the coefficient for downward longwave flux was 0.61. The calculated net heating rates of surface layer decreased during the same period, the trend of which was in accordance with the decrease of measured temperature.

Key words : 복사 속(radiative flux), 복사 가열률(radiative heating rate), 연직분포(vertical distribution), 세종기지(King Sejong Station)

1. 서 론

지표면에 도달하는 태양 복사(solar radiation)는 지구 대기를 통과하면서 수증기, 이산화탄소, 오존과 미량 기체들, 그리고 에어로졸 및 구름에 의하여 흡수되거나 산란된다. 그리고 지구에서 방출되는 적외 복사(infrared radiation)는 태양 복사와 마찬가지로 대기 성분들에 의하여 흡

수되거나 방출되며, 지표면은 적외 복사의 중요한 흡수 및 방출체이다. 특히, 평균적으로 전 지구의 1/3 이상을 덮고 있는 구름은 시·공간적으로 매우 불균질하고, 태양 및 적외 복사 속(radiative flux) 변화에 영향을 주는 중요한 요소이다.

구름은 태양 복사를 산란시키거나 흡수하여 지표면에 도달하는 태양 복사 에너지를 감소시킴으로써 지구 대기를 냉각시키고, 또한 지표면에서 방출되는 적외 복사를 흡수하거나 방출하여 지구 대기를 온난화시킨다(Cess *et al.*

*Corresponding author. E-mail : bylee@kopri.re.kr

1989). 구름에 의한 복사의 변화는 구름의 높이, 광학 두께(optical depth), 구름의 복사 흡수 및 산란 특성으로부터 계산되나, 계산의 정확성에 대해서는 아직까지 큰 불확실성이 내포되어 있다(IPCC 2001). 이 등(2004)은 남극 세종기지(62°13'S, 58°47'W)에서의 구름 광학 경로 길이(cloud optical path length)를 자외선 관측 자료(UV-A:320~400 nm, UV-B:280~320 nm)와 태양 복사 모수화 모형(parameterization model)을 이용하여 추정하였다.

이 연구에서는 이 등(2004)의 방법으로 계산된 구름 광학 경로 길이 자료를 태양 복사(Chou and Suarez 1999) 및 적외 복사 모형(Chou et al. 2001)의 입력 자료로 사용하였다. 이들 모형의 가동을 위하여 구름 자료 이외의 입력 자료로서는 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 재분석 자료, NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료 및 CERES(Cloud and the Earth's Radiant Energy System) 위성 자료를 사용하였고, 모형에 의한 계산 결과는 남극 세종기지의 지표면 관측 자료와 비교하였다. 또한 구름 광학 경로 길이, 기온, 수증기 혼합비, 지표면 알베도 등의 입력 자료에 대한 모형의 반응도를 나타내었고, 복사 냉각(가열)률 계산 결과를 분석하였다.

2. 자료 및 방법

복사 모형 가동을 위한 입력 자료로서 기온, 수증기량, 오존량의 연직 자료가 필수적이고, 이들 자료는 ECMWF의 인터넷 웹사이트(<http://data.ecmwf.int/data>)에서 제공되는 재분석 자료를 사용하였다. 이 자료는 2.5°×2.5°의 공간 해상도를 갖는 전구 자료로서 6시간 간격으로 하루 네 번의 자료가 있고, 1 hPa부터 1000 hPa까지 23개의 기압 고도에 대하여 기온과 수증기 등의 자료가 저장되어 있다. 이 연구에서는 구름 광학 경로 길이 계산을 위하여 낮 시간의 자료가 필요하므로 하루 네 번의 자료 중에서 12와 18 UTC 자료를 사용하였고, 자료의 기간은 2000년 3월부터 2001년 12월까지이다. 이들 자료로부터 남극 세종기지의 값은 가장 가까운 네 점에 대하여, 거리에 따른 가중치를 곱하는 양선형 보간법(bilinear interpolation)으로 내삽하였다.

지표면 기온 자료는 적외 복사 모형의 가동을 위한 중요한 입력 자료로서 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하였다. 이 자료로부터 남극 세종기지의 값은 ECMWF 재분석 자료와 마찬가지로 방법으로 계산하였다. 그리고 세종기지에서의 지표면 알베도 자료는 CERES 위성자료(1°×1°의 공간 해상도)로부터 ECMWF와 NCEP/NCAR 재분석 자료의 경우와 마찬가지로 내삽하여 사용하였다.

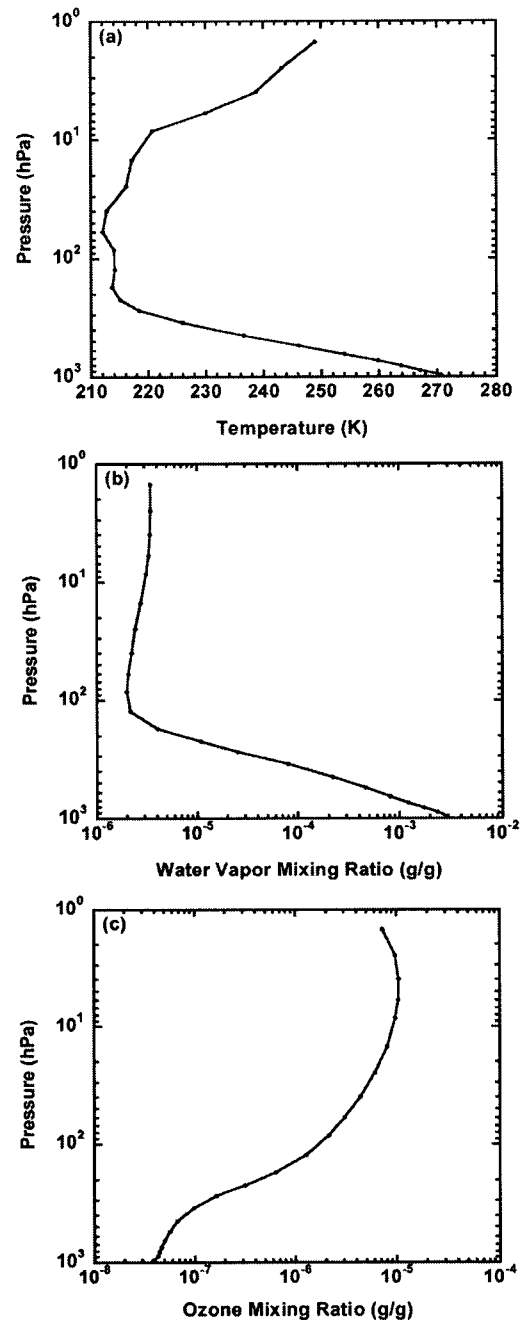


Fig. 1. Input data for the sensitivity test of radiative transfer models. (a), (b), and (c) are the profiles of temperature (K), water vapor mixing ratio (g/g) and ozone mixing ratio (g/g), respectively.

복사 모형의 반응도 분석을 위한 입력 자료는 이 연구 기간 동안 12와 18 UTC 자료를 평균하여 사용하였고 이를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 기온(a)은 1000 hPa에서 약 271 K이고 대류권 내에서 고도에 따라 감소하나 100 hPa 이상의 고도에서는 고도 증가에 따라 기온이 증

가하는 경향을 보인다. 수증기 혼합비(b)는 대류권에서 고도 증가에 따라 감소하나 100 hPa 이상의 고도에서는 10^{-5} g/g 이하로서 그 변화가 작다. 오존 혼합비(c)는 성층권에서 10^{-5} g/g 정도의 높은 값을 나타내고 대류권에서는 지표면에 근접할수록 감소하고 있다.

이 연구기간 동안 12와 18 UTC에 대한 구름 광학 경로 길이는 동일한 시각의 태양 복사 모형(Chou and Lee 1996)과 UV-A 자료를 사용하여 계산하였다. 이 연구에서 사용된 UV-A 자료의 특징에 대한 설명은 이 등(2003, 2004)에 나타나 있으며, 태양 복사 모형은 다음과 같다.

3. 복사 모형

평행 평면 대기에서 광학 두께가 τ_v 인 기층의 복사 휘도(I_v) 변화는 다음과 같다.

$$\mu \frac{dI_v(\tau_v, \mu, \phi)}{d\tau} = -I_v(\tau_v, \mu, \phi) + J_v(\tau_v, \mu, \phi) \quad (1)$$

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

$$J_v(\tau_v, \mu, \phi) = \frac{\omega_v(\tau_v)}{4\pi} \int_0^1 \int_{-1}^1 d\mu' d\phi' P_v(\tau_v, \mu, \phi; \mu', \phi') I_v(\tau_v, \mu', \phi') + Q_v(\tau_v, \mu, \phi) \quad (2)$$

식 (2)에서 $\omega_v(\tau_v)$ 는 단일 산란 알베도(single scattering albedo)이고 $P_v(\tau_v, \mu, \phi; \mu', \phi')$ 는 위상 함수이며, 열역학 평형 상태에서 원천함수 $Q_v(\tau_v, \mu, \phi)$ 는 다음과 같다.

$$Q_v(\tau_v, \mu, \phi) = Q_v^{(thermal)}(\tau_v) + Q_v^{(beam)}(\tau_v, \mu, \phi) \quad (3)$$

식 (3)에서 $Q_v^{(thermal)}(\tau_v)$ 과 $Q_v^{(beam)}(\tau_v, \mu, \phi)$ 는 각각 대기 성분 기체들이 방출하는 적외 복사와 태양 복사의 원천 함수를 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_v^{(thermal)}(\tau_v) = [1 - \omega_v(\tau_v)] B_v(T) \quad (4)$$

$$Q_v^{(beam)}(\tau_v, \mu, \phi) = \frac{\omega_v(\tau_v) F_0}{4\pi} P_v(\tau_v, \mu, \phi; \mu_0, \phi_0) e^{-\tau_v \mu_0} \quad (5)$$

여기서 B_v 는 플랑크(Planck) 함수이며, F_0 는 대기 상단으로 입사되는 태양 복사 속(flux) 또는 속 밀도(flux density)이다.

태양 복사 모수화 모형

태양 복사의 경우에 식 (4)에서 플랑크 함수 $B_v(T)$ 는 무시되나, 여러 기층에 대한 다중 산란을 고려하면 식 (1)의

정확한 해를 구하기는 쉽지 않다. 이 연구에서는 식 (1)의 해를 위하여 두 흐름 근사(two stream approximation; Lacis and Hansen 1974)를 적용한 Chou and Suarez (1999)의 모수화 방법을 이용하였다.

적외 복사 모수화 모형

적외 복사의 경우 식 (2), (4) 및 (5)에서 단일 산란 알베도 $\omega_v(\tau_v)$ 가 무시될 수 있기 때문에 식 (1)은 단순화되고, 기압 p 인 층에서 파수 영역에 대한 상향 및 하향 적외 복사 속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

이 식들에서 T_s 와 p_s 는 각각 지표 온도와 기압이고, 투과율 $T_v(p, p')$ 은 다음과 같다.

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

이 식에서 $u_v(p, p')$ 는 기압 p 에서 p' 까지 흡수 기체들에 의한 광학 두께이다. 적외 복사 영역에서 식 (6)과 (7)의 계산을 이용해 파수별 적외 복사 속을 계산하기 위해서는 많은 계산 시간을 필요로 한다. 따라서 계산 시간의 절약을 위하여 모수화가 필요하며 이 연구에서는 Chou *et al.*(2001)의 방법을 사용하였다.

복사 가열률

임의의 기층에서 복사에 의하여 시간에 따른 온도 변화(복사 가열률 또는 복사 냉각률, $\partial T/\partial t$)는 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{g}{C_p} \frac{\partial F_{\neq T}(p)}{\partial p} \quad (9)$$

여기서 C_p 는 정압 비열이고, g 는 중력 가속도이며, $F_{\neq T}$ 는 태양 및 적외 복사에 의한 순 복사 속이다.

4. 결과 및 토의

구름 광학 경로 길이

이 연구기간(2000년 3월~2001년 12월) 동안 남극 세종기지에서 구름 광학 경로 계산은 이 등(2004)에 의한 방법을 이용하였고 그 결과는 Fig. 2와 같다. 이 그림에서 구름 광학 경로 길이 계산을 위하여 ECMWF 자료 중 낮 시간에 해당하는 12와 18 UTC를 사용하였다. 또한 이 연구에

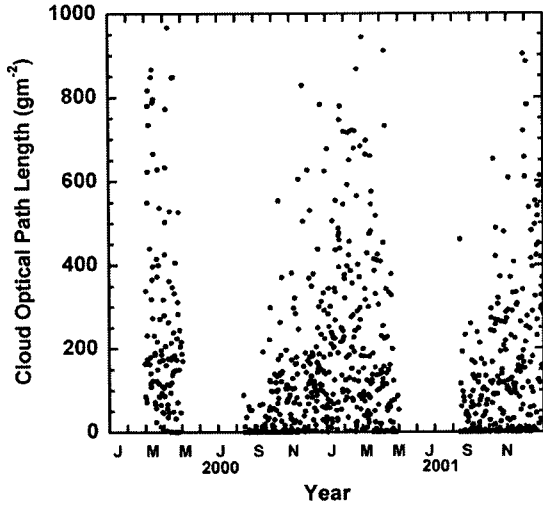


Fig. 2. Cloud optical path lengths (gm^{-2}) calculated by measured UV-A radiations and by the model of Chou and Lee (1996) at King Sejong Station in West Antarctica during March 2000~December 2001.

서 사용된 복사 모형은 ECMWF 자료의 연직 기층 수에 맞추어 지표면에서부터 1 hPa까지 22개의 기층으로 구성하였고, 이 등(2004)의 CERES 구름 자료 분석 결과에 따라 500~600 hPa의 기층에 구름이 존재하는 것으로 가정하였다. 그리고 이 그림에는 나타나있지 않으나 이 연구기간 동안 500~600 hPa 기층의 기온이 계절에 따라 약 230~260 K 사이에서 변화하였고, 이 기층에 존재하는 것으로 가정된 구름은 빙정과 수적이 각각 50%의 비율로 혼합된 것으로 가정하였다.

남극 세종기지의 겨울철에는 태양 천정각(solar zenith angle)이 90°보다 크기 때문에 Fig. 2와 같이 구름 광학 경로 길이는 계산되지 않는다. 따라서 겨울철을 제외하고 이 연구기간 동안 계산된 구름 광학 경로 길이는 최대 967.4 gm^{-2} 이었고, 여름철이 다른 계절보다 크게 나타났다.

복사 모형의 반응도 실험

태양 복사 모형의 반응도

태양 복사 모형의 입력 자료인 기온, 수증기와 오존 혼합비, 구름 경로 길이, 지표면 알베도의 변화에 따라 지표면에서의 태양 복사 속 반응도를 Fig. 3에 나타내었다. 기온과 수증기 혼합비 및 오존 혼합비는 Fig. 1의 자료를 기준으로 모든 기층에 대하여 40%까지 증감하였을 경우 지표면에서의 하향 복사 속 변화를 나타낸 것이다. 그리고 이 연구기간 동안 지표면 알베도 및 구름 광학 경로 길이의 평균은 각각 0.5와 175(gm^{-2})이었기 때문에 이들을 기준 입력 자료로 사용하였다.

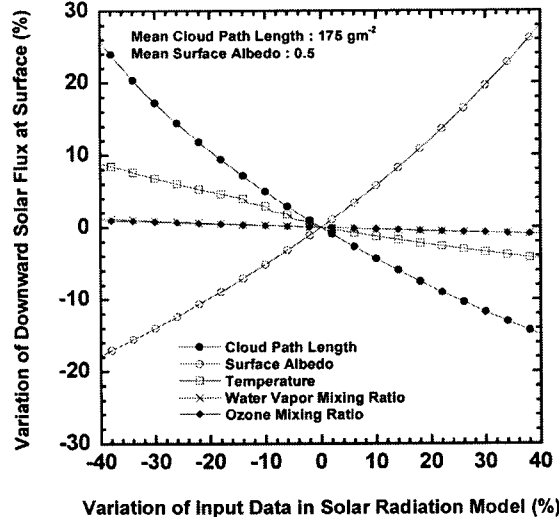


Fig. 3. Sensitivity of downward solar flux at surface by the variation of input data (cloud path length, surface albedo, temperature profile, water vapor mixing ratio profile, and ozone mixing ratio profile) in solar radiation model. The units are in %.

이 그림에서 보여지는 것처럼, 모형 대기의 기층 온도가 $\pm 40\%$ 변화할 경우 지표면에서의 하향 복사 속은 $-4\sim +9\%$ 까지 변화한다. 이러한 변화는 0.7 μm 이상의 태양 복사 파장 영역에서 수증기에 의한 태양 복사의 흡수가 기온의 영향을 받기 때문에 나타난다. 이 영역에서 태양 복사의 흡수는 수증기 양과 흡수 계수에 따라 변화하고, 양 보다는 흡수 계수에 좀 더 강하게 의존한다. 따라서 수증기 양의 증가는 기온 변화에 따른 반응도 보다 훨씬 적어서 40%의 수증기량 증감이 지표면의 하향 복사 속을 1% 이하로 변화시킨다. 파장이 0.4 μm 이하의 자외선 영역에서는 오존의 흡수가 중요하나 오존 흡수 계수는 온도의 영향을 크게 받지 않고, 이 영역의 에너지는 전체 태양 복사 에너지의 10% 이하이기 때문에 오존량 변화에 따른 지표면에서의 하향 복사 속 변화는 1% 이하이다.

구름은 지표면에 도달하는 태양 복사를 크게 변화시키는 요소로서 입사하는 태양 복사를 흡수 및 산란시킨다. 구름 경로 길이가 40% 증가할 경우 지표면에 도달하는 하향 태양 복사 속은 최대 26%까지 감소된다. 앞에서 설명한 바와 같이 이 계산을 위하여 구름은 빙정과 수적이 각각 50%의 비율로 존재한다고 가정한 것으로서, 이 비율이 변화하면 지표면에서의 복사 속도 다소 변화하나 이 연구에서는 포함시키지 않았다.

지표면에 도달한 태양 복사는 지표면에서 반사되어 대기 중의 공기 분자나 에어로졸의 다중 산란에 의하여 다시 지표면으로 돌아온다. 따라서 지표면의 알베도가 증가

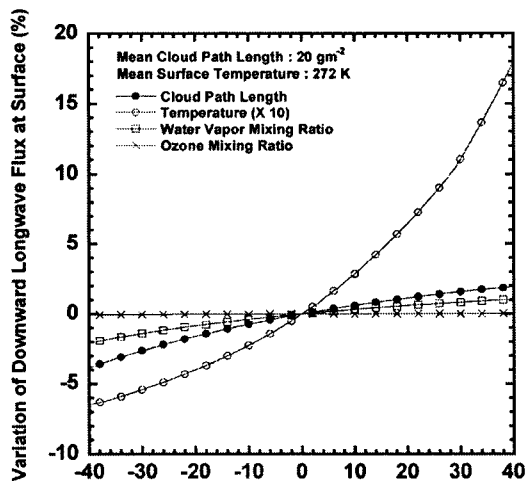
하면 지표면에 도달하는 태양 복사 속은 증가할 것이고, 이 모형에서는 40%의 지표면 알베도 증가에 대하여 약 28%의 하향 태양 복사 속이 증가하였다.

적외 복사 모형의 반응도

적외 복사 모형의 경우도 태양 복사와 동일한 입력 자료를 사용하여 모형의 반응도를 조사하였다. 그러나 구름의 광학 경로 길이가 크면 구름은 흑체에 가까우므로 이 반응도 계산을 위하여 구름 광학 경로 길이가 20 gm^{-2} 를 기준으로 하였다. 그리고 지표면의 온도는 이 연구기간 동안의 평균인 272 K 를 기준 값으로 가정하였다.

태양 복사 모형의 반응도 조사에서 설명한 바와 같이, 수증기와 오존 등의 기체에 의한 복사의 흡수는 기체 양의 변화 보다는 기온의 변화에 더 민감하다. 따라서 Fig. 4에 나타난 것처럼 수증기와 오존량이 $\pm 40\%$ 의 변화에 대해 지표면에서의 하향 적외 복사 속은 2% 미만으로 변화하고, 기온이 40% 증가하면 하향 적외 복사 속 180% 정도 증가한다. 이 그림에서 기온 증감에 따른 하향 적외 복사 속의 변화 값은 y축 값의 10배로 나타내었다.

구름은 다량의 수적과 빙정 및 수증기를 포함하며 이들 성분은 의하여 적외 복사의 흡수 및 방출 에너지양이 많기 때문에 적외 복사의 공간 분포를 변화시킬 수 있는 중요한 요소이다. 이 그림에서 보는 것과 같이 40%의 구름 광학 경로 길이 증가에 대하여 약 4% 하향 적외 복사 속이 증가하였다. 이 반응도 실험을 위하여 기준 구름 광학 경로 길이는 20 gm^{-2} 이었고, 이 값이 60 gm^{-2} 이상되면 구름은 거의 흑체가 되며 지표면의 하향 적외 복사의 변화는 무시된다.



Variation of Input Data in Longwave Radiation Model (%)

Fig. 4. Same as Fig. 3, except for downward longwave flux at surface.

남극 세종기지에서 지표면 복사 속

태양 복사 모형에 의하여 남극 세종기지의 지표면에서 하향 적외 복사 속 계산을 위하여 앞에서 말한 자료와 방법을 사용하였고, 구름 경로 길이는 Fig. 2의 자료를 이용하였다. 이들 자료를 이용하여 2000년 3월부터 2001년 12월까지의 기간 동안 지표면에 도달하는 태양 복사 속을 계산하였고, 이 결과를 남극 세종기지에서 관측한 자료와 비교하기 위하여 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서처럼 계산 값과 관측 값 사이에는 약 0.90의 높은 상관관계를 나타내고 있지만, 산포도가 더 균질하지 못한 원인은 시시각각으로 변화하는 구름의 광학 경로 길이 오차가 가장

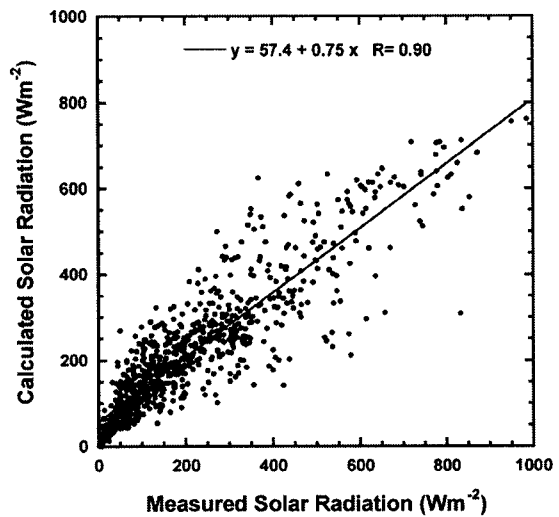


Fig. 5. The relationship between measured and calculated solar radiation (Wm^{-2}) at King Sejong Station in West Antarctica.

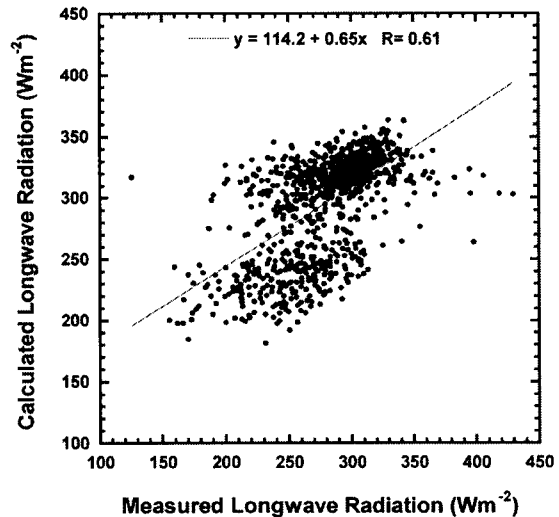


Fig. 6. Same as Fig. 5, except for longwave radiation.

중요한 요인으로 분석된다.

적외 복사의 경우는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 계산 값과 관측 값의 상관계수가 0.61로서 태양 복사의 경우보다 낮게 나타났다. 적외 복사의 경우는 구름의 광학 경로 길이뿐만 아니라 구름의 고도에 따른 온도 및 지표면 온도도 중요한 요소이다. 이 연구에서는 구름의 고도를 500~600 hPa에 고정하였으므로, 실제 구름 고도 변화에 따른 구름 온도변화를 정확하게 반영할 수 없었던 것이 계산

오차의 원인이 될 수 있고, 또한 지표면 온도자료로 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용하였으나 이 자료와 실제 지표면 온도차가 또 다른 계산 오차의 원인이 될 수 있다. 계산 오차에 대한 부족한 설명을 보완하기 위해서 다음에는 많은 누적 자료를 이용하여 통계 분석(MBE나 RMSE 등)을 수행할 예정이다.

이상과 같이 남극 세종기지에서의 일사 관측 자료에 비하여 복사 모형으로 계산된 값은 다소의 차이가 있으나,

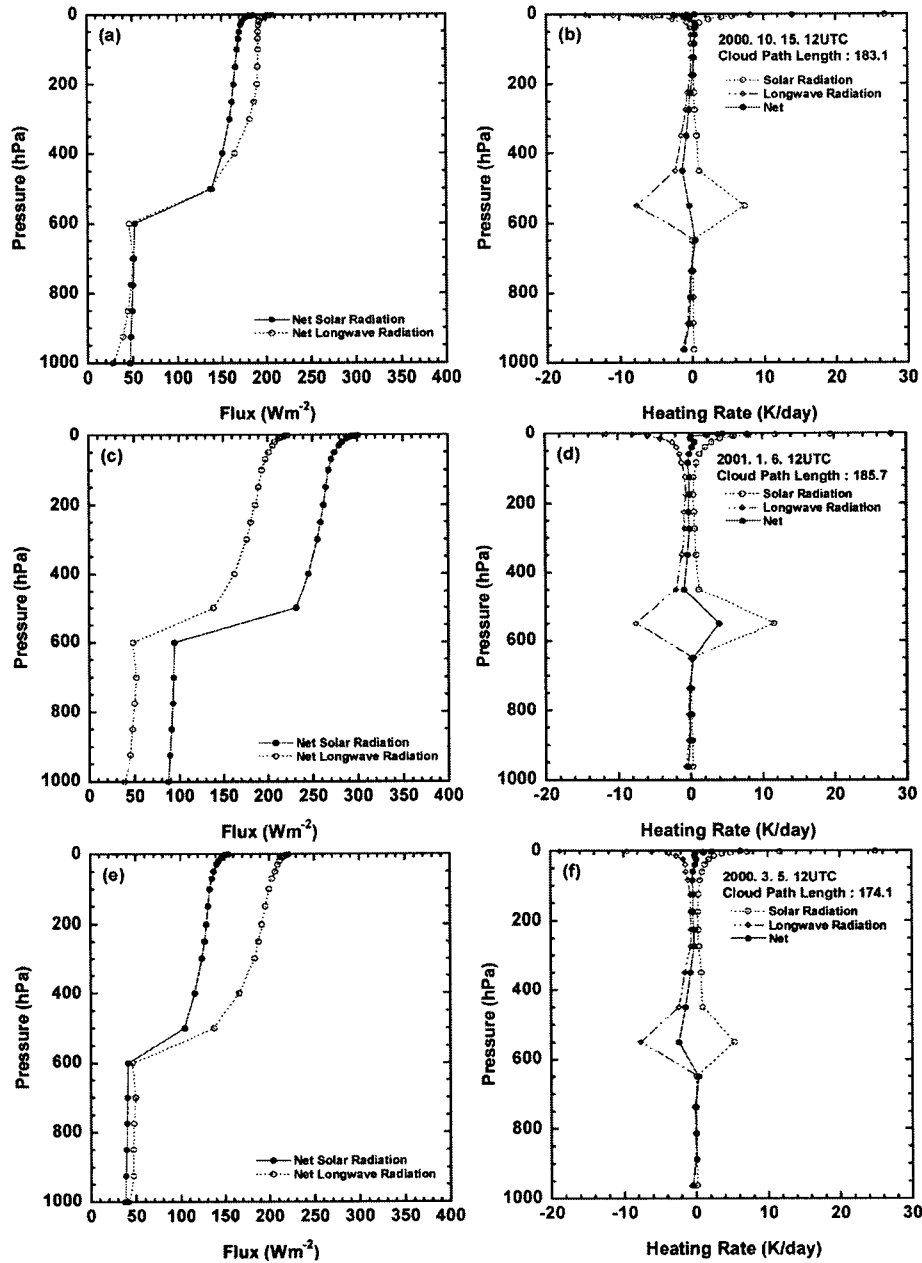


Fig. 7. The radiative flux (Wm^{-2}) and heating rate (K/day) profile at King Sejong Station in West Antarctica. Upper (a),(b), middle (c),(d) and lower panels (e),(f) represent those in spring, summer, and autumn 12 UTC, respectively.

남극 세종기지에서 복사 장의 연직 분포 경향을 분석하는 목적으로 이 복사 모형을 사용함에 있어서 큰 장애가 되지 못한다.

남극 세종기지에서 복사 속과 가열률의 연직 분포

이 연구 기간 동안 하루 두 번(12, 18 UTC)의 시각에 대해 복사 속과 복사 가열률을 계산하였고, 이 결과들 중 에서 남극의 겨울을 제외한 세 계절의 대표적인 결과를

Fig. 7과 8에 나타내었다.

Fig. 7(a)와 (b)는 남극 봄철 12 UTC의 경우(2000년 10 월 15일)로서, 남극 세종기지에서 12 UTC에 대한 봄철 평균 대기와 유사한 경우를 발췌한 것이며 이 경우의 구름 광학 경로 길이는 183.1 gm^{-2} 이다. 그림 (a)에서처럼 대기 상한에 입사된 순 하향 태양 복사 속은 500~600 hPa 의 구름을 통과하면서 급격히 감소하여 지표면에서의 값 은 46.4 Wm^{-2} 이었고, 구름보다 상층에서는 순 하향 태양

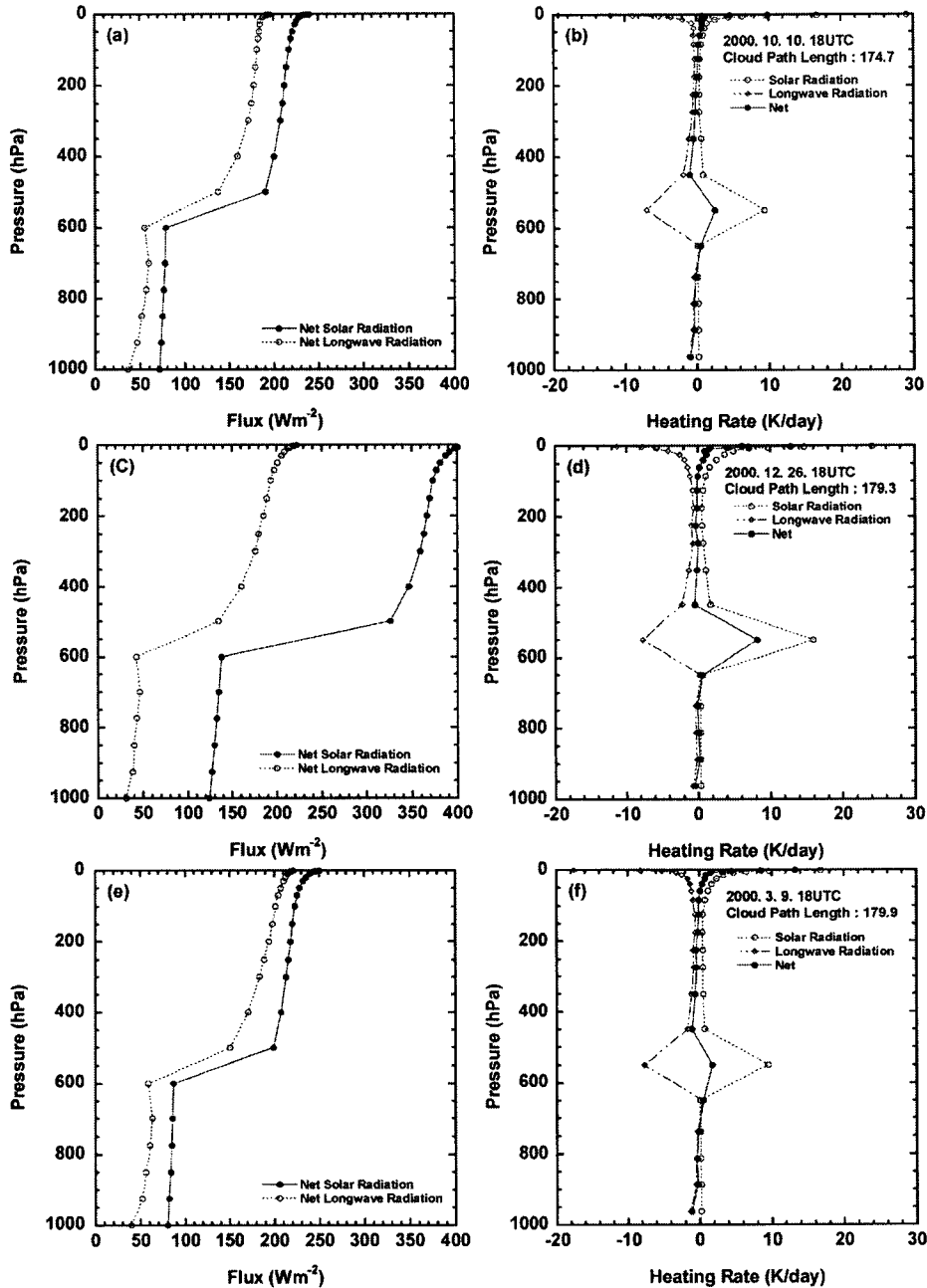


Fig. 8. Same as Fig. 7, except for 18 UTC.

복사 속이 순 상향 적외 복사에 비교하여 큰 값을 나타내며 구름보다 하층 대기에서는 반대로 적외 복사가 태양 복사보다 크게 나타났다. 이 계절에 구름층과 지표면에 인접한 기층의 순 복사 가열률은 그림(b)에서와 같이 각각 -0.4와 -1.2 K/day로서 거의 전 기층에서 복사에 의한 냉각이 일어났다. 그러나 여름철(2001년 1월 6일)에는 그림(c)와(d)에서 보는 바와 마찬가지로 전 기층에서 태양 복사 속이 적외 복사 속 보다 약 50 Wm^{-2} 이상 크게 나타났으며 구름층에서의 순 복사 가열률도 4.0 K/day 이었다. 그림(e)와(f)의 가을철(2000년 3월 5일)에는 복사 속과 복사 가열률의 변화 경향이 봄철과 비슷하나, 봄철에 비교하여 구름 광학 경로 길이가 9 gm^{-2} 작음에도 불구하고 오존량이 많기 때문에 대기 상층에 입사한 태양 복사 속이 지표면에 도달하는 동안 복사 감쇠율이 크다.

Fig. 8은 Fig. 7과 마찬가지로 18 UTC에 대한 것이다. 일출 직후의 시간에 대한 Fig. 7에 비교하여 Fig. 8에서는 순 태양 복사 속 및 순 복사 가열률이 크게 나타났다. 즉, 전 기층에 대하여 적외 복사 속에 비교하여 태양 복사 속이 약 20 Wm^{-2} 이상 크고, 구름층에서의 순 복사 가열률을 봄과 여름 및 가을에 각각 $2.5, 8.2, 1.8 \text{ Wm}^{-2}$ 이었다.

Fig. 7과 8에서와 같이 지표면에 인접한 기층은 12와 18 UTC 모두 복사에 의하여 대부분 냉각되었고, 이 연구기간 동안 지표에 인접한 기층의 순 가열률의 변화 경향을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서와 같이 순 복사 가열률은 대부분 0 K/day 이하로서 복사 냉각되었고, 0 K/day 이상의 복사 가열은 구름 없는 맑은 날의 18 UTC 자료들이다. 그리고 이 연구기간 동안 이 기층의 순 복사 가열률은 0.00015 의 기울기로 감소하는 경향을 나타내었다. Fig.

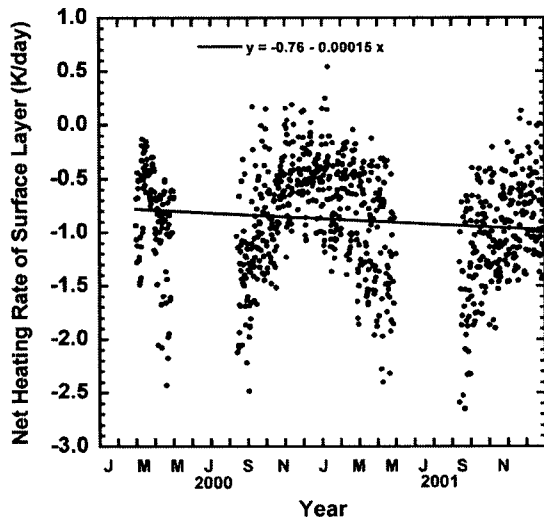


Fig. 9. Net heating rate (Wm^{-2}) of the surface layer at King Sejong Station in West Antarctica during March 2000~December 2001.

10은 Fig. 9와 마찬가지로 구름층의 순 복사 가열률을 나타낸 것으로서 이 연구기간 동안 0.0031 의 기울기로 증가하였다.

Fig. 7과 8에서 본 바와 같이 구름의 광학 경로 길이가 클수록 구름에 의한 순 복사 가열률이 증가하기 때문에 Fig. 10에서 순 복사 가열률의 증가는 이 연구기간 동안 구름의 광학 경로 길이 증가를 의미한다. 그리고 얇은 권운의 경우는 온실효과에 의하여 대류권 하층의 기온을 증가시키는 역할도 하지만(Liou 2005), 남극 세종기지에서의 구름은 중층 또는 하층운이 대부분이기 때문에 대류권 하층은 복사에 의하여 냉각되는 경향이 강하다(Hobbs 1993).

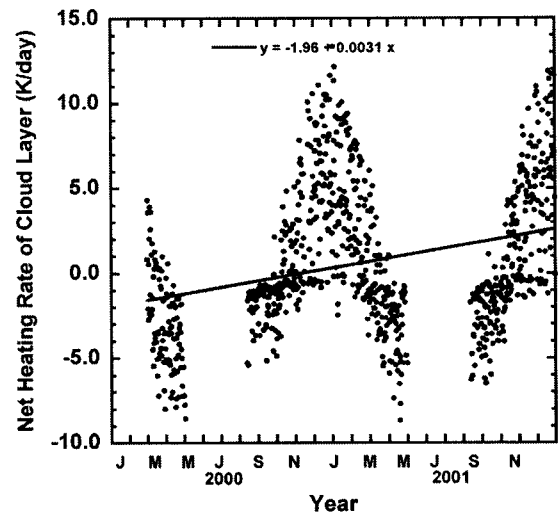


Fig. 10. Same as Fig. 9, except for cloud layer (500~600 hPa).

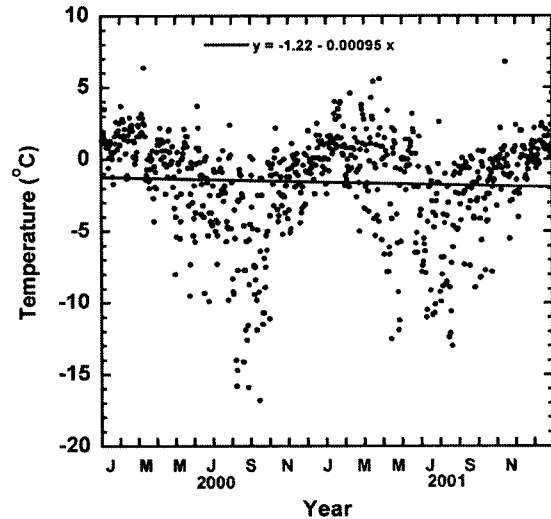


Fig. 11. The measured daily-mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) at King Sejong Station in West Antarctica during March 2000~December 2001.

Fig. 11은 이 연구기간 동안 남극 세종기지에서 자동기상관측 장비에 의하여 관측된 기온 자료이다. 이 그림에 의하면 이 연구기간인 2000년 3월부터 2001년 12월까지 0.00095의 기울기로 기온이 감소하고 있으며, 이 결과는 Fig. 9와 10의 결과와 잘 일치한다. 즉, 이 연구기간 동안 구름 광학 경로 길이가 증가하기 때문에 지표면에 인접한 기층의 기온은 감소하고, 이 결과로부터 남극에서의 기온 변화는 복사 효과가 매우 중요하다는 것을 의미한다. 그러나 중위도 또는 저위도에서 지표면 근처의 기온 변화는 복사 효과보다 역학적인 관계들이 더 중요함을 고려하면, 남극 세종기지에서도 이 연구기간 동안의 기온 감소는 역학적인 관계를 고려하여 다시 평가할 필요성이 있으나 이 연구에서는 포함하지 않았다.

5. 결 론

남극 세종기지에서도 복사 모형을 이용하여, 2000년 3월부터 2001년 12월 까지 12 UTC와 18 UTC에 대하여 태양 복사와 적외 복사의 연직 분포를 조사하였다. 이 복사 모형의 가동을 위한 입력 자료로서 흡수기체의 연직 분포는 ECMWF 자료를 사용하였고, 지표면 온도와 알베도는 각각 NCEP/NCAR 재분석 자료 및 CERES 위성자료를 이용하였다. 그리고 구름의 광학 경로 길이는 남극 세종기지에서 관측된 UV-A 및 태양 복사 모형을 이용하여 계산하였으며 구름의 고도는 모형 대기의 500~600 hPa 층에 존재하는 것으로 가정하였다.

그 결과 남극 세종기지에서 계산된 하향 태양 복사 및 적외 복사는 관측 값과 각각 0.90의 0.61의 양호한 상관관계를 나타내었기 때문에, 이 복사 모형에 의하여 남극 세종기지에서의 복사 장 연직 분포 경향을 분석하였다.

남극 세종기지에서 12와 18 UTC에 계산된 순 복사 가열률은 지표면에 인접한 기층에서 2000년 3월부터 2001년 12월까지 0.00015의 기울기로 미세하게 감소하였다. 그리고 마찬가지로 기간 동안 구름층의 순 복사 가열률은 0.0031의 기울기로 작게 증가하였다. 따라서 짧은 기간이지만, 이 연구기간 동안 구름 광학 경로 길이가 증가한 것으로 판단되어서, 남극 세종기지에서 관측된 기온 감소는 지표면에 인접한 기층의 복사 냉각과 밀접한 관계가 있을 수 있으므로, 보다 긴 기간동안의 많은 자료를 분석할 필요가 있다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 “지구대기 연직구조별 대기환경 특성 및 빙하연구(PP04105)” 사업, “북극 환경특성 연구(PP04108)” 사업과 “북극 대기환

경 및 광물자원 연구(PN51200)” 사업에서 일부를 지원받아 수행되었다. 이 논문의 향상을 위해 조언해 주시고 심사하여 주신 심사위원들께 감사드린다.

참고문헌

- 이규태, 이방용, 원영인, 김윤정, 이원학, 지준범. 2004. 남극 세종기지에서의 구름 산란에 의한 자외선 변화. *Ocean Polar Res.*, 26, 133-143.
- 이규태, 이방용, 원영인, 지준범, 이원학, 김윤정. 2003. 대기 복사 모형에 의한 남극 세종기지에서의 복사학적 특징: 지표면에서 UV-A와 Erythral UV-B 자외선 양 변화. *Ocean and Polar Res.*, 25, 9-20.
- Cess, R.D., G.L. Potter, J.P. Blanchet, G.J. Boer, S.J. Ghan, J.T. Kiehl, H. BeTreat, Z.-X. Li, X.-Z. Liang, J.F.B. Mitchell, J.-J. Morcrette, D.A. Randall, M.R. Riches, E. Roeckner, U. Schlese, A. Slingo, K.E. Taylor, W.M. Washington, R.T. Wetherald, and I. Yagai. 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models. *Science*, 245, 513-516.
- Chou, M.-D. and K.T. Lee. 1996. Parameterization for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *J. Atmos. Sci.*, 53, 1203-1208.
- 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.
- Hobbs, P.V. 1993. *Aerosol-cloud-Climate Interactions*. Academic Press. 235p.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 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. 881p.
- Lacis, A. and J.E. Hansen. 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the Earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133.
- Liou, K.N. 2005. *McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Earth Science*. McGraw-Hill Co. (in press)

Received Feb. 1, 2005

Accepted Mar. 3, 2005