

에어로솔 대기에서 단파 영역에서의 복사전달모델들의 상호비교

유정문^{1,*} · 정명재² · 이규태³ · 김 준⁴ · 이주은¹ · 허영민¹ · 김보미¹ · 이윤곤⁴ · 이재화⁴ · 윤종민⁴ · 이원학³

¹이화여자대학교 과학교육과, 120-750, 서울특별시 서대문구 대현동 11-1

²미국 항공우주국/GSFC, Greenbelt, Maryland 20771, USA

³강릉대학교 대기환경과학과, 210-702, 강원도 강릉시 강릉대학로 120

⁴연세대학교 대기과학과, 120-749, 서울특별시 서대문구 신촌동 134

Intercomparison of Shortwave Radiative Transfer Models for Aerosol-laden Atmospheres

Jung-Moon Yoo^{1,*}, Myeong-Jae Jeong², Kyu-Tae Lee³, Jhoon Kim⁴, Ju-Eun Rhee¹,
Young Min Hur¹, Bo-Mi Kim¹, Yun-Gon Lee⁴, Jae-Hwa Lee⁴,
Jong-Min Yoon⁴, and Won-Hak Lee³

¹Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

²NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland 20771, USA

³Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Kangnung National University,
Kangnung 210-702, Korea

⁴Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Abstract: Intercomparison among the three radiative transfer models (RTMs) which have been used in the studies for COMS, was carried out on the condition of aerosol-laden atmospheres. Also the role of aerosols in the atmospheric radiation budget was analyzed. The results (hereafter referred to as H15) from Halthore et al.'s study (2005) were used as a benchmark to examine the models. Aerosol Radiative Forcing (ARF) values from the three RTMs, calculated under two conditions of Aerosol Optical Thickness (AOT=0.08, 0.24), were systematically underestimated in comparison to H15 in the following shortwave components; 1) direct and diffuse irradiance at the surface, 2) diffuse upward fluxes at the surface and the top of the atmosphere, and 3) atmospheric absorbance. The ARF values for the direct and diffuse fluxes at the surface was $-10 \sim -40 \text{ Wm}^{-2}$. The diffuse upward values became larger with increasing both AOT and Solar Zenith Angle (SZA). Diffuse upward/downward fluxes at the surface were more sensitive to the SZA than to the atmospheric type. The diffuse downward values increased with increasing AOT and decreasing SZA. The larger AOT led to surface cooling by exceeding the reduction of direct irradiance over the enhancement of diffuse one at the surface. The extinction of direct solar irradiance was due mainly to water vapor in tropical atmospheres, and to both ozone and water vapor in subarctic atmospheres. The effect of water vapor in the tropics was 3~4 times larger than that of the ozone. The absorbance values from the three RTMs agree with those from H15 within $\pm 10\%$.

Keywords: aerosol-laden atmospheres, radiative transfer model, shortwave, radiation, absorptance, forcing

요약: 본 연구에서는 에어로솔 대기 상태에서 국내 COMS 연구자들이 사용하는 세 개의 단파 복사전달모델에서 산출된 복사속 성분을 비교분석하였으며, 대기 복사 수지에서 에어로솔 역할도 분석하였다. 국내 모델들의 평가를 위하여, 15개 모델값을 평균한 Halthore et al.(2005) 결과를 기준값으로 사용하였다. 두 종류 에어로솔 농도(AOT=0.08, 0.24)에서 조사된 열대 또는 한대 대기의 에어로솔 강제력은 지표에서의 하향 일사 및 상향 산란, 대기 상부의 상향 산란, 그리고 대기 흡수도의 복사 성분들에 있어서 국외 연구에 비하여 국내 결과들에서 체계적으로 약하게 나타났다. 에어로솔 강제력은 지표에서의 하향 일사에 대하여 $-10 \sim -40 \text{ Wm}^{-2}$ 이었으며, 지표 및 대기 상부의 상향 산란의 경우에 상대적으

*Corresponding author: yjm@ewha.ac.kr

Tel: 82-2-3277-2710

Fax: 82-2-3277-2684

로 큰 태양천정각과 고농도 에어러솔 상태에서 컸다. 두 종류 에어러솔 조건에서 지표에서의 하향 및 상향 산란값들은 대기 종류보다는 태양천정각에 더 민감하였다. 하향 산란은 상대적으로 작은 태양천정각과 고농도 에어러솔 조건에서 컸다. 에어러솔 농도 증가는 하향 산란 증가에도 불구하고 하향 직달 일사의 감소가 이를 초과함으로써 지표 냉각을 유도하는 것으로 조사되었다. 동일한 에어러솔 농도 및 태양천정각 조건에서 직달일사 소산은 열대 대기에서는 주로 수증기, 그리고 한대 대기에서는 수증기 뿐만 아니라 오존에도 기인하는 것으로 조사되었다. 특히 열대 대기에서는 수증기의 역할이 오존에 비하여 3~4배 컸다. 저농도 및 고농도 에어러솔 대기에서 대기 흡수도는 국내외 연구 간에 $\pm 10\%$ 내에서 일치하였다.

주요어: 에어러솔 대기, 복사전달모델, 단파, 복사, 흡수도, 강제력

서 론

복사전달모델을 이용한 수치실험은 에어러솔이 존재하는 기상 상태에서 복사 에너지 변화에 대한 통찰력을 줄 수 있다. 기후 변화에서의 에어러솔 역할은 복사 강제력(radiative forcing)의 변화를 통하여 지구-대기 시스템의 에너지 평형에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며(IPCC, 2007), 그 영향력의 정도는 기후 모델이나 복사전달모델 결과의 분석을 사용하여 조사될 수 있다. 에어러솔은 악기상에도 영향을 줄 수 있으므로, 이에 대한 정확한 분석은 재해 방지와 경제적 파급 효과의 차원에서도 중요하다. 더욱이 여러 연구는 대기 중의 에어러솔이 주어진 대기 상태에 따라 구름 수명 및 강수의 증감을 유도한다고 보고한 바 있다(Rosenfeld, 1999, 2000; Phillips et al., 2002; Jacobson and Kaufman, 2006; Bell et al., 2008). 특히 우리나라의 경우는 중국으로부터 수송되어 오는 황사나 대기오염 에어러솔에 직접적인 영향을 받으므로 그 영향력을 좀 더 객관적으로 평가하여야 할 필요가 있다. 에어러솔 정보를 효과적으로 생산하고 처리하기 위하여는 관측자료 및 모델 결과에 대한 분석이 필수적이거나, 에어러솔 대기 하에서 단파 영역의 복사전달과정은 모델 간에도 순수 기체 대기(e.g., 유정문 외, 2007)에 비하여 상당한 차이를 보일 수 있다(Halthore et al., 2005).

한편, 우리나라 최초의 정지궤도 위성인 통신해양기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite; COMS)은 당초 계획보다 1년 늦어진 2009년에 발사될 예정이며(기상연구소, 2005), COMS 연구 과제에 참여하는 국내 연구자들은 위성관측 자료와 복사전달모델을 함께 활용하여 기상청 현업 예보 향상에 기여하는 기상자료처리시스템 개발을 추진 중이다. 또한 몇몇 연구자들은 에어러솔 원격탐사와 관련하여 여러 종류의 복사전달모델을 사용하고 있지

만, 에어러솔 분석에서의 각 모델의 오차는 정확하게 제시되어 있지 않은 실정이다.

모델 간의 비교분석 연구는 Halthore et al.(2005)에서 16 종류의 모델을 사용하여 다양한 대기 상태(순수기체, 에어러솔, 구름) 하에서 시도된 바 있다. 그러나 같은 모델 결과 간에도 사용자들의 실행 방법이나 목적에 따라 상당한 차이가 나타날 수 있으므로, 본 연구는 국내 사용자들에게 도움을 줄 수 있다. 이러한 모델 비교 분석은 모델의 장단점과 사용자의 운용 능력의 평가 분야뿐만 아니라 모델 개발 능력의 향상을 통한 지적 소유권 확보에도 유용하다. 순수 기체 대기 하에서의 복사전달모델 결과들의 상호 비교는 유정문 외(2007)에서도 시도된 바 있으며, 그들 연구에서는 국내 연구자들이 사용하는 아홉 개의 모델 결과들이 동일한 초기 조건 하에서 비교 분석되었다. 본 연구에서는 편의상 국내 연구자들이 사용하는 복사전달모델을 ‘국내 모델’이라고 정의한다.

에어러솔 존재 대기에서의 복사전달과정은 순수 기체 대기에 비하여 대기 복사 수지에 대하여 우리에게 좀더 큰 불확실성을 제공한다. 그러므로 복사 수지에서의 에어러솔 역할을 이해하는 것은 기후 변화 연구의 관점에서도 중요하다. 본 연구의 목적은 COMS 연구자들이 사용하고 있는 복사전달모델에서의 단파 복사속(shortwave flux) 산출값을 에어러솔 존재의 대기 조건 하에서 상호 비교함으로써 모델 간 상대 오차를 조사하고, 대기 복사에서 에어러솔 역할을 정량화하여 분석하는 데 있다.

자료 및 방법

본 연구에서는 국내 연구자들이 주로 사용하는 두 종류의 세 개 복사전달모델(Table 1)을 동일한 에어러솔 대기 조건하에서 실행하여 다섯 종류 복사속 성분을 산출한 후에 상호 비교하였다. 이 비교에는

Table 1. Radiative Transfer Models (RTMs), their characteristics and investigators in this study. Here the model abbreviations are as follows; Average of 15 models in the study of Halthore et al. (2005) (H15), the SBDART of Ewha Womans University (Ewha-SB), the SBDART of Yonsei University (Yon-SB), and the Line-By-Line model of Kangnung National University (KNU-LBL)

Model name	Description of models	Investigators	Model abbreviation	Model No in this study
H15	Average of 15 models	Halthore et al.	H15	1
SBDART	20 cm ⁻¹ spectral resolution, 1 km vertical resolution in troposphere, 33 altitude layers	Yoo and Jeong	Ewha-SB	2
		Kim	Yon-SB	3
KNU-LBL	Discrete Ordinate Method (KNU-LBL)	Lee	KNU-LBL	4

세 개 모델 외에 기존 연구(Halthore et al., 2005) 결과도 포함되었다. 여기서 Halthore et al.(2005) 결과는 하나의 대기대순환 모델(General Circulation Model; GCM)을 제외하고 10개의 흡수대(band) 모델과 5개의 흡수선 누적(line-by-line; LBL) 모델에서 계산된 15개 모델들의 복사속 평균값을 의미한다. 본 연구에서는 이 평균값을 편의상 H15 모델로 명명하기로 하며, 국내 모델 결과를 평가하는 데 기준값으로 사용하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이, 모델 비교에 참여한 연구자들은 다음의 네 개 기관에 속해 있다; 강릉대학교, 연세대학교, 이화여자대학교, 그리고 NASA/GSFC. 국내 연구자들이 사용한 복사전달모델은 흡수대 모델인 SBDART(Santa Barbara DISTORT Atmospheric Radiative Transfer; Ricchiazzi et al., 1998)와 흡수선 누적 모델인 KNU-LBL(Kangnung National University Line-By-Line model; Chou and Lee, 1996)이다. 동일한 SBDART의 모델 비교에는 두 개 기관(이화여자대학교, 연세대학교)의 연구자들이 참여하였다. 이들 모델에 대한 개략적인 설명은 유정문 외(2007)에 기술되어 있다. 본 연구에서 H15을 포함할 때, 총 네 개의 복사전달 복사속 결과값들이 비교 분석에 사용되었다.

수치실험을 위한 대기의 초기 조건으로 온도(T), 수증기(W), 오존(O₃)의 연직 분포뿐만 아니라 에어러솔 정보 등도 각 모델에 대하여 다음과 같이 동일하게 주어졌다(Fig. 1); 저농도 에어러솔(0.55 μm에서 Aerosol Optical Thickness, AOT=0.08)과 고농도 에어러솔(AOT=0.24), 한대 대기(subarctic winter; SAW)와 열대 대기(tropical; TRP), 태양 천정각(SZA=30°, 75°), 네 파장역(단파 SW 0.28~5.00 μm, 가시광선 VIS 0.35~0.70 μm, 자외선 UV 0.20~0.35 μm, 근적외선 SWIR 0.70~5.00 μm), 파장에 의존하지 않

는 Lambertian 표면 반사도(0.2), 그리고 이산화탄소 농도(360 ppm). (주의: 본 연구에서는 언급된 네 개의 파장역 중에 특히 포괄적인 SW 0.28~5.00 μm에 대한 복사속 비교에 비중을 두었음). 또한 한대 대기와 열대 대기는 온도, 수증기, 그리고 오존의 연직 분포에 있어서 서로 다른 초기 조건을 갖는다.

에어러솔 수농도는 고농도 또는 저농도 에어러솔 대기에서 고도가 높아질수록 지수 함수적으로 감소한다(Fig. 1d). 본 연구에서 에어러솔의 광학적 특성을 정의하기 위하여 Mie 계산에서 유도된 파장별 변수값을 Table 2에 제시하였으며 변수들의 내용은 다음과 같다; 1) 소산 효율(extinction efficiency; Q_{ext}), 2) 일차 산란 반사도(ω), 그리고 3) 비대칭 계수(g). 이들 변수 계산에는 다음 조건이 사용되었다; 1) log 정규분포, 2) 에어러솔의 기하학적 평균 반경 $\bar{r}=0.027 \mu\text{m}$, 3) 에어러솔 크기 분포에서의 표준편차 $\sigma=0.77$, 그리고 4) 에어러솔 굴절률(1.42-0.0079i). 또한 이 계산에서 사용된 열 네 개 파장 중에서 열 개는 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectrometer) 채널에서, 그리고 두 개는 TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer) 채널을 근거로 선택되었으며, 이들 대부분의 채널은 에어러솔 원격탐지에 사용되어 왔다.

대기 기주에서 파장 $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 에서의 전체 에어러솔 광학적 두께(τ_λ 또는 AOT)와 특정 고도에서의 에어러솔 수밀도 $n(r,z)$ 사이의 관계는 다음 (1)과 (2)의 관계식에 의해 주어진다(Liou, 2002);

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty k_{ext}(\lambda, z) dz \tag{1}$$

$$\begin{aligned} k_{ext}(\lambda, z) &= \int_{r_1}^2 \sigma_{ext}(r, \lambda) n(r, z) dr \\ &= \int_{r_1}^2 Q_{ext}(r, \lambda) \pi r^2 n(r, z) dr \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 소산 효율(Q_{ext})은 구형 에어러솔 입자의 기하학적인 단면적(cross section; πr^2)에 대한 에어러솔

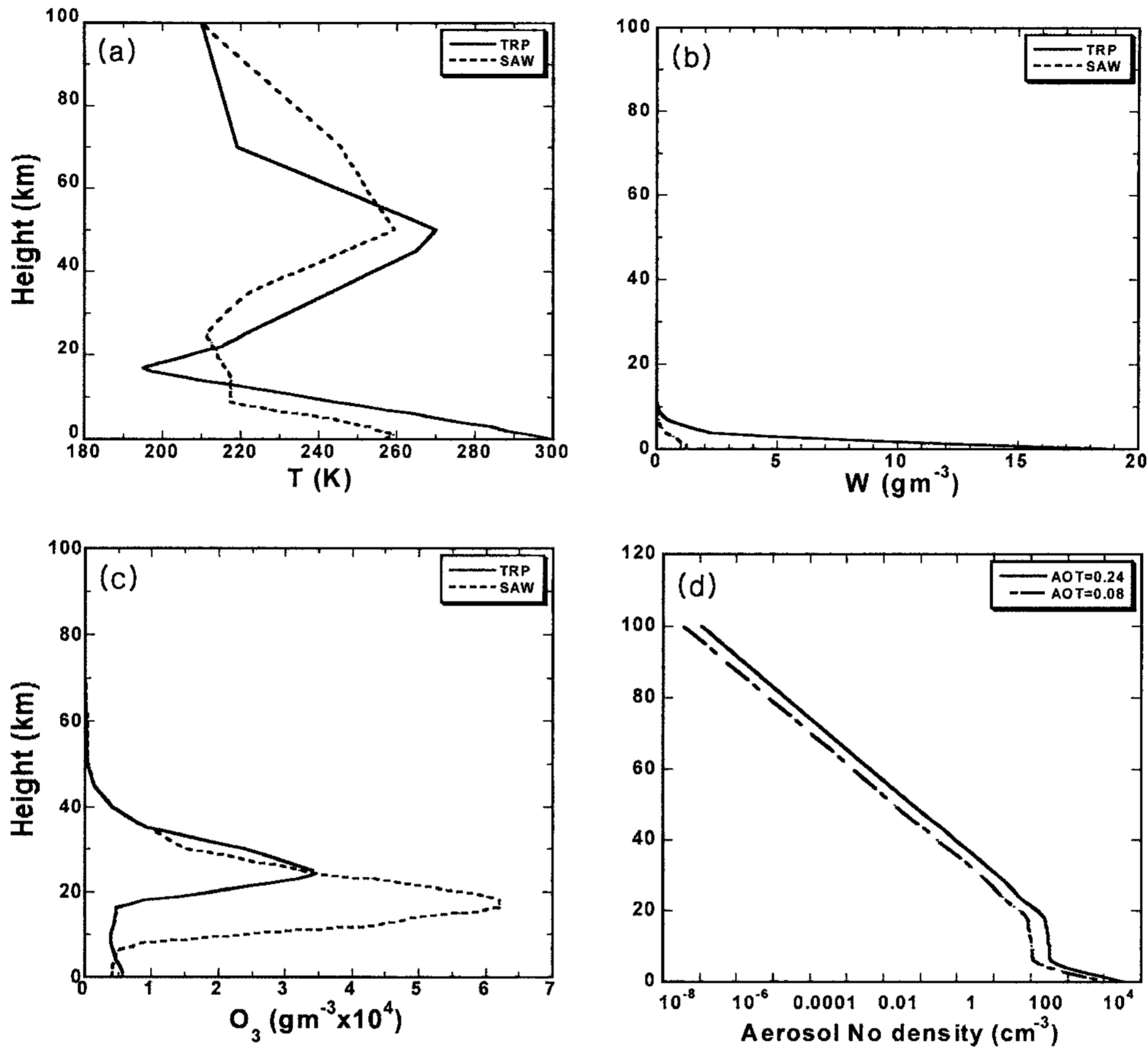


Fig. 1. The vertical profiles of (a) temperature (T), (b) water vapor (W), and (c) ozone (O₃) for two kinds of atmospheres; tropical (TRP) and subarctic winter (SAW). The profiles of aerosol number density (cm⁻³) for two aerosol atmospheres (Aerosol Optical Thickness, AOT=0.08 and 0.24) are given in Fig. 1d.

소산 단면적(extinction cross section; σ_{ext})의 비율로 정의된다(Thomas and Stamnes, 1999). 또한 $k_{ext}(\lambda, z)$ 와 r 은 각각 에어로솔의 체적 소산계수와 반경을 의미한다.

산출된 복사속 값들은 $k_{ext}(\lambda, z)$ 지표에서의 직달 일사(BDDir), 하향 산란(BDDif), 상향 산란(BUDif), 대기 상부에서의 상향 산란(TUDif), 그리고 대기 흡수도(absorptance; A)이다. 특정 파장대에서 대기 흡수도($A_{\Delta\lambda}$)는 (3)과 같이 정의된다(e.g., Halthore et al., 2005);

$$A_{\Delta\lambda} = \frac{\int_{\Delta\lambda} \{ (F_{\lambda,TOA}^{\downarrow} - F_{\lambda,TOA}^{\uparrow}) - (F_{\lambda,SFC}^{\downarrow} - F_{\lambda,SFC}^{\uparrow}) \} d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} F_{\lambda,TOA}^{\downarrow} d\lambda} \quad (3)$$

여기서 $F_{\lambda,TOA}^{\downarrow}$ 와 $F_{\lambda,TOA}^{\uparrow}$ 복사속은 각각 특정 파장에서 대기 상부(top of atmosphere; TOA)에서의 하향 직달 일사값과 상향 산란값이다. 또한 $F_{\lambda,SFC}^{\downarrow}$ 와 $F_{\lambda,SFC}^{\uparrow}$

복사속은 각각 지표(surface; SFC)에서의 하향 직달 및 산란값, 그리고 상향 산란값이다. 특정 파장에서의 복사속 값은 주어진 파장대에 대하여 적분된다.

결 과

저농도 에어로솔(AOT=0.08)과 고농도 에어로솔(AOT=0.24) 조건에서 지표에서의 단파(SW; 0.28~5 μm) 하향 산란값은 대기 종류(열대, 한대)보다는 태양천정각에 더 민감하였다(Fig. 2a, b). 이 값은 같은 대기 종류 경우에 큰 태양천정각(SZA = 75°)보다는 작은 태양천정각(SZA = 30°)에서 컸다. 또한 하향 산란값은 저농도 에어로솔(Fig. 2a)에서 50~125 Wm^{-2} , 그리고 고농도 에어로솔(Fig. 2b)에서는 80~200 Wm^{-2} 을 보였다. 고농도 에어로솔 하에서 하향 산란값이 큰 원인은 에어로솔 농도가 증가할수록 하향 산란되

Table 2. Spectral values of extinction efficiency (Q_{ext}), single scattering albedo (ω) and asymmetry factor (g) used to define aerosol optical property in this study. These parameters have been obtained from the Mie theory, using the assumptions as follows; 1) log normal distribution, 2) geometric mean radius of aerosols $\bar{r} = 0.027 \mu\text{m}$, 3) standard deviation of aerosol size distribution $\sigma = 0.77$, and 4) refractive indices of aerosol ($1.42 - 0.0079i$). Aerosol parameters calculated at some nominal MODIS (Menzel et al., 2002) and TOMS (McPeters et al., 1996) channels, which are used for atmospheric and aerosol remote sensing, are also shown

λ (μm)	Band (B)	Q_{ext}	ω	g
0.280		1.546	0.944	0.727
0.340	TOMS	1.261	0.945	0.713
0.380	TOMS	1.104	0.945	0.704
0.466	MODIS B3	8.389×10^{-1}	0.943	0.685
0.554	MODIS B4	6.447×10^{-1}	0.940	0.665
0.647	MODIS B1	4.974×10^{-1}	0.936	0.645
0.746	MODIS B15	3.847×10^{-1}	0.931	0.624
0.857	MODIS B2	2.945×10^{-1}	0.925	0.603
0.936	MODIS B10	2.465×10^{-1}	0.920	0.588
1.242	MODIS B5	1.337×10^{-1}	0.897	0.535
1.629	MODIS B6	7.076×10^{-2}	0.862	0.479
2.114	MODIS B7	3.712×10^{-2}	0.810	0.422
3.788	MODIS B20	8.666×10^{-3}	0.589	0.290
5.000		4.644×10^{-3}	0.434	0.230

는 단파 복사(e.g., 태양복사)속이 증가하기 때문이다 (e.g., Cho et al., 2003). 세 개의 국내 모델들(model number 2, 3 and 4)의 하향 산란값은 H15(model number 1)에 비하여 2~10% 정도 작았으며, 이러한 경향은 고농도 에어로솔 대기보다는 저농도 대기에서 상대적으로 현저하였다. SZA = 75°인 저농도 에어로솔 대기의 경우에 국내 모델값들은 H15에 비하여 10% 정도 작았다(Fig. 2a).

저농도 또는 고농도 에어로솔에서 지표에서의 단파 상향 산란값(BUDif)은 동일한 태양 천정각에서 수증기 효과로 인하여 습한 열대 대기보다는 건조한 한대 대기에서 컸다(Fig. 3a, b). 또한 같은 종류의 대기에서는 큰 태양천정각(SZA = 75°)보다 작은 태양천정각(SZA = 30°)에서 컸다. 이러한 사실은 같은 에어로솔 농도 대기에서 지표에서의 단파 하향 직달 · 산란 값은 한대 대기보다는 수증기가 많은 열대 대기

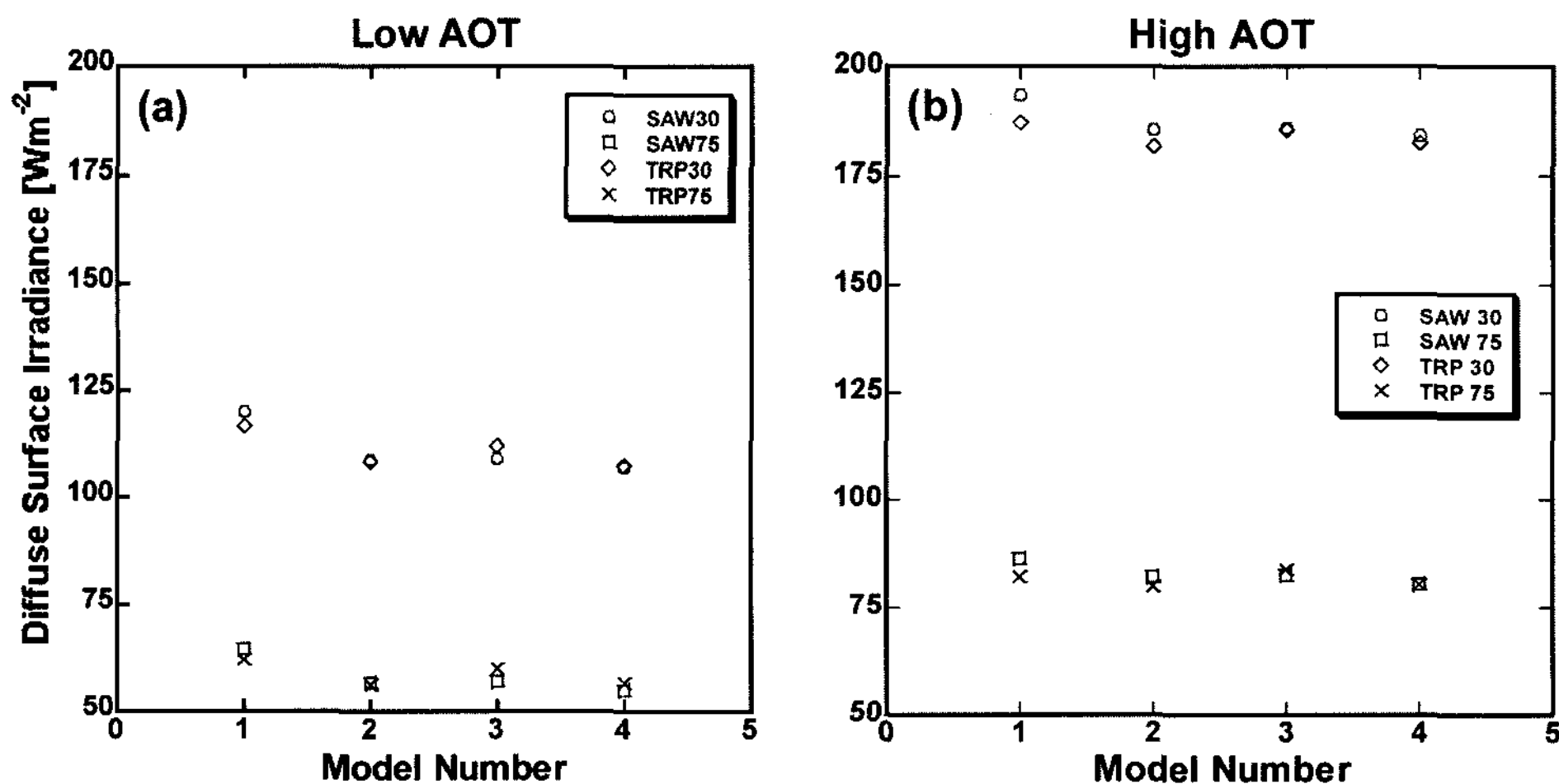


Fig. 2. The SW (0.28~5 μm) downward diffuse irradiance at surface (BDDif) for the atmospheres with Aerosol Optical Thickness, (a) AOT = 0.08 and (b) AOT = 0.24. The sequence of model numbers is as follows; ① H15 (Halothore et al., 2005; average of 15 models), ② Ewha-SB, ③ Yon-SB, and ④ KNU-LBL. Here the abbreviation for the model names is described in Table 1.

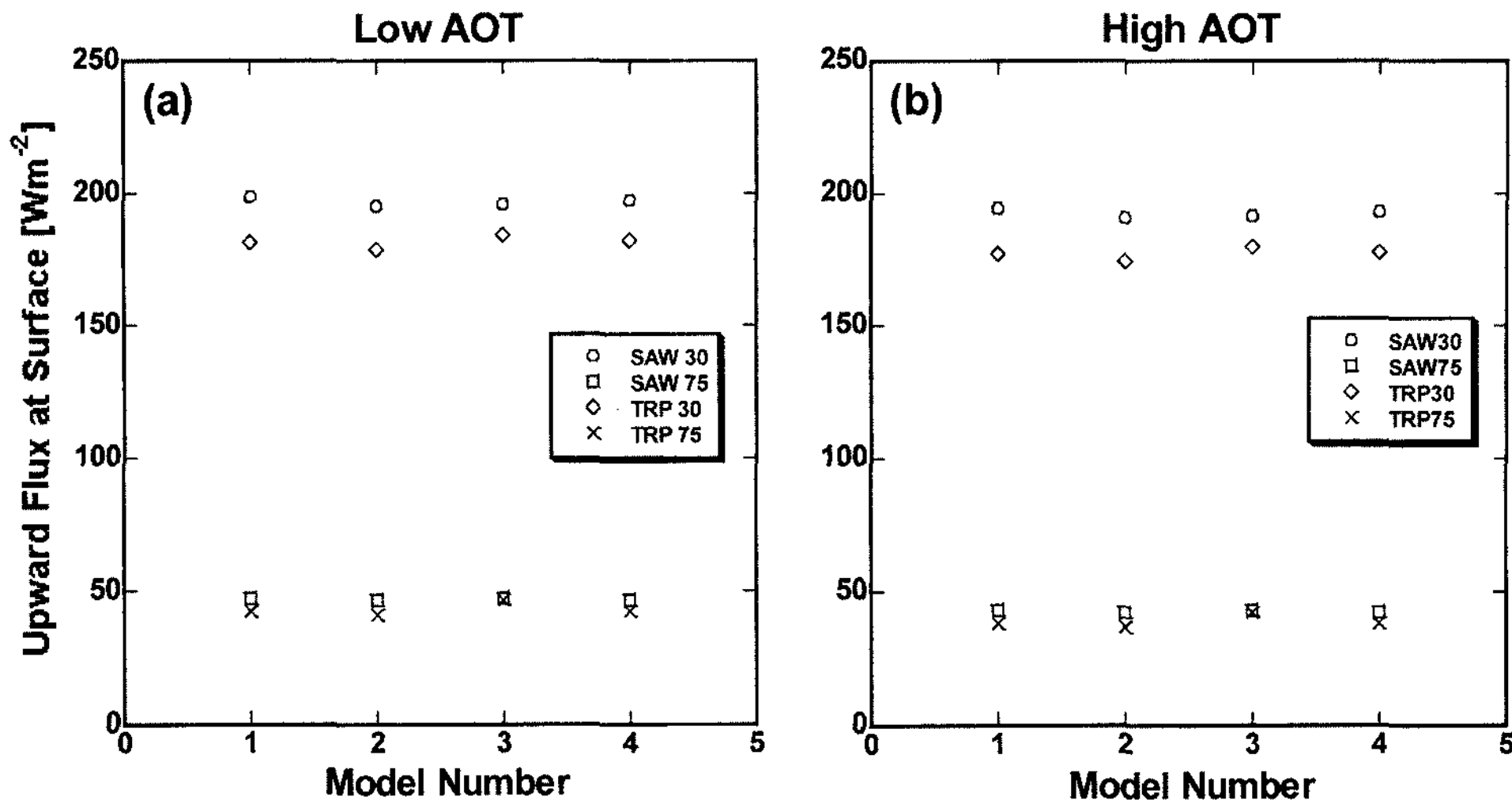


Fig. 3. Same as in Fig. 2 except for upward diffuse irradiance at surface (BUDif).

에서, 그리고 $SAZ = 30^\circ$ 보다는 대기 경로가 긴 $SAZ = 75^\circ$ 에서 더 많이 감소되는 것을 의미한다. Halthore et al.(2005) 결과와 유사하게, 본 연구에서도 지표 반사도가 일정한 경우에 감소된 하향 직달 산란 값은 상향 산란의 감소를 유도한다. 한편 저농도 및 고농도 에어로솔 조건에서의 상향 산란값은 $40 \sim 200 Wm^{-2}$ 이었으며, 대기 종류보다는 태양 천정각에 더 민감하였다. 이러한 민감도 추세는 하향 산란의 경우(Fig. 2)와 유사하였다. 저농도 및 고농도 에어로솔 조건에서의 모델들의 하향 산란값이 대체로 H15에서 다소 큰 경향이 있었으나, $SAZ = 75^\circ$ 인 열대 대기를 제외하고 모델값들은 3% 이내에서 서로 일치하였다(Figs. 3a, b).

동일한 에어로솔 농도 및 동일한 태양천정각 조건에서도 열대 대기와 한대 대기는 서로 다른 수증기량과 오존량을 갖기 때문에 각각 다른 복사속을 나타낸다. 일반적으로 열대 대기는 한대 대기에 비하여 상대적으로 많은 수증기량을 포함하므로, 이러한 차이가 순수한 에어로솔 효과와는 별도로 복사속에 영향을 주게 된다. 본 연구에서의 에어로솔 강제력은 앞서 언급한 바와 같이 주어진 수증기와 오존의 연직 분포에서 에어로솔 대기 복사속으로부터 레일리 대기 복사속을 감한 것으로 정의하였다. 따라서 열대 대기와 한대 대기 간의 에어로솔 강제력 차이를 이해하기 위하여는 이들 대기의 복사 수지에서 수증기나 오존의 역할을 각각 조사할 필요가 있다.

Table 3에서는 에어로솔 강제력에 대한 수증기나

오존의 개별적인 영향을 복사전달 수치실험을 통하여 정량적으로 제시하였다. 이 계산은 SBDART 모델을 사용하여 $0.28 \sim 5.00 \mu m$ 의 단파 영역, $AOT = 0.24$, 그리고 $SAZ = 30^\circ, 75^\circ$ 조건에서 실시되었으며, 구름 효과를 고려하지 않았다. 이 표에서 보는 바와 같이, 에어로솔 농도에 가장 큰 변화를 보이는 복사속 성분, 즉 지표에서의 직달 일사($F_{dir, SFC}^{\downarrow}$)는 열대 대기 경우에 태양천정각에 관계없이 오존보다 수증기에 의하여 더 많이 감소함을 알 수 있다. 구체적으로 $SAZ = 30^\circ$ 인 열대 대기에서 에어로솔, 수증기, 오존 모두에 의한 에어로솔 강제력은 $-148.17 Wm^{-2}$ 이었고, 수증기 및 오존 부재 시에는 $-161.75 Wm^{-2}$ 이었다. 두 조건 차에 의한 강제력 변화($13.58 Wm^{-2}$) 중에 수증기의 기여는 $10.63 Wm^{-2}$ 이었고, 오존의 기여는 $2.92 Wm^{-2}$ 이었다. 다시 말해, 수증기의 역할이 오존보다 3~4배 큼을 의미한다. 이들 두 기체에 의한 총 기여($13.55 Wm^{-2}$)와 강제력의 총 변화($13.58 Wm^{-2}$) 간에 약간의 차이($0.03 Wm^{-2}$)는 $0.56 \sim 0.66 \mu m$ 의 파장대에서 수증기 흡수대와 오존 흡수대의 중첩으로 인한 비선형 효과로 해석된다(본 연구에서는 보이지 않음). 이러한 차이는 건조하고 대기 경로가 상대적으로 짧은($SAZ = 30^\circ$) 한대 대기에서는 나타나지 않았다(Table 3의 SAW, $SAZ = 30^\circ$).

한대 대기의 경우에 $SAZ = 30^\circ$ 에서 오존 기여($4.66 Wm^{-2}$)가 수증기 기여($4.36 Wm^{-2}$)보다 약간 큰 반면에 $SAZ = 75^\circ$ 에서는 수증기 기여($6.06 Wm^{-2}$)가 오존 기여($5.39 Wm^{-2}$)보다 다소 컸다(Table 3). 열대

Table 3. Aerosol radiative forcing (i.e., the subtraction of the Rayleigh case from the aerosol) in the shortwave (0.28-5 μm) region under the cloud-free condition of high aerosol optical thickness (AOT = 0.24), based on the calculation of the SBDART 32-streams. Here the unit of flux (F) is Wm^{-2}

Atmosphere type	SZA ($^{\circ}$)	Extinction factors		$F_{\text{dir,SFC}}^{\downarrow}$	$F_{\text{dif,SFC}}^{\downarrow}$	$F_{\text{dif,SFC}}^{\uparrow}$	$F_{\text{dif,TOA}}^{\uparrow}$	α	A
TRP	30	with	wv & O ₃	-148.17	117.77	-6.08	4.13	3.52×10^{-3}	0.0172
		w/o	wv	-158.80	127.48	-6.26	3.96	3.38×10^{-3}	0.0180
		w/o	O ₃	-151.09	119.61	-6.30	4.31	3.68×10^{-3}	0.0178
		w/o	wv & O ₃	-161.75	129.35	-6.48	4.14	3.53×10^{-3}	0.0186
TRP	75	with	wv & O ₃	-75.96	42.99	-6.59	16.40	4.68×10^{-2}	0.0285
		w/o	wv	-89.39	50.65	-7.75	18.33	5.23×10^{-2}	0.0362
		w/o	O ₃	-78.82	44.41	-6.88	17.46	4.99×10^{-2}	0.0287
		w/o	wv & O ₃	-92.36	52.14	-8.05	19.42	5.54×10^{-2}	0.0364
SAW	30	with	wv & O ₃	-152.85	122.20	-6.13	3.80	3.24×10^{-3}	0.0177
		w/o	wv	-157.21	126.26	-6.19	3.74	3.19×10^{-3}	0.0179
		w/o	O ₃	-157.51	125.44	-6.41	4.12	3.52×10^{-3}	0.0184
		w/o	wv & O ₃	-161.87	129.51	-6.47	4.06	3.46×10^{-3}	0.0186
SAW	75	with	wv & O ₃	-80.95	45.80	-7.03	16.53	4.72×10^{-2}	0.0331
		w/o	wv	-87.01	49.25	-7.55	17.51	5.00×10^{-2}	0.0362
		w/o	O ₃	-86.34	48.70	-7.53	18.40	5.25×10^{-2}	0.0334
		w/o	wv & O ₃	-92.46	52.18	-8.06	19.40	5.54×10^{-2}	0.0366

및 한대 대기들에 대한 결과를 요약하면, 열대 대기의 직달 일사 복사속 변화에서는 오존에 비하여 수증기 효과가 컸으며, 한대 대기에서는 두 기체의 효과가 거의 비슷하였다. 이러한 원인은 열대 대기가 한대 대기에 비하여 대기 복사의 소산에 중요한 수증기를 많이 포함하는 데에 있다. 상대적으로 건조한

한대 대기에서는 오존에 의한 대기 복사 소산도 중요하게 된다. 이러한 경향은 지표에서의 하향 및 상향 산란, 대기 상부에서의 상향 산란 및 알베도, 그리고 대기 흡수도에서도 대체로 유사하였다.

고농도 에어러솔 하에서의 상향 산란값은 35~200 Wm^{-2} 이었으며(Fig. 3b), 저농도 경우에 비하여 ~4

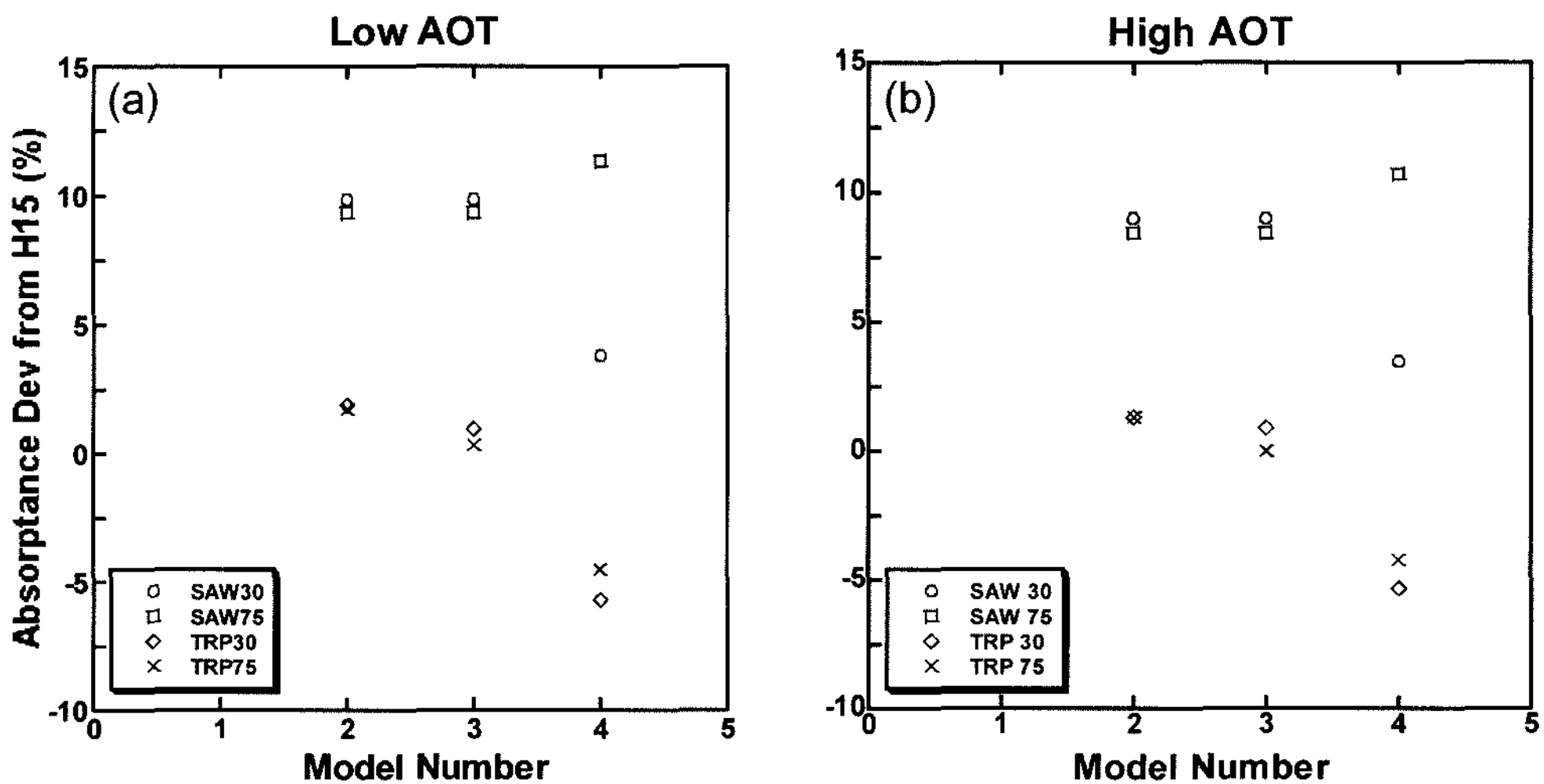


Fig. 4. The SW (0.28~5 μm) absorptance shown as percent deviation from the values of H15 (Halothore et al., 2005; mean of 15 models) for the models for atmosphere with Aerosol Optical Thickness, (a) AOT = 0.08 and (b) AOT = 0.24. The sequence of model numbers is as follows; ① H15, ② Ewha-SB, ③ Yon-SB, and ④ KNU-LBL. Here the abbreviation for the model names is described in Table 1.

Wm^{-2} 정도 작았다(Fig. 3a, b). 이러한 원인은 고농도 에어로솔 조건에서 저농도 경우에 비하여 지표에서의 하향 복사속의 감소가 약 $-20 Wm^{-2}$ 인 데에 있다. 다시 말해, 고농도 에어로솔 조건에서 상대적으로 하향 직달 일사의 감소가 하향 산란의 증가보다 큼을 의미한다. 그러므로 대기 중의 에어로솔 증가는 기후 변화 관점에서 일반적으로 지표에 입사하는 산란 복사량을 증가시키지만, 이 복사량보다 하향 직달 일사를 더 감소시켜 지표 냉각을 유도한다. 이러한 결과는 에어로솔 존재가 직접적으로 복사 냉각 효과를 일으킨다는 IPCC(2007) 보고와 일치한다. 이 보고서에 따르면, 에어로솔 농도의 증가는 구름 및 알베도 변화에 영향을 주어 간접적으로도 복사 냉각 효과를 일으킬 수 있다.

저농도 및 고농도 에어로솔 대기 하에서 단파 영역에서의 대기흡수도는 국내 SBDART 모델(Ewha-SB and Yon-SB)과 국외 연구(H15) 간에 $\pm 10\%$ 내에서 일치하였으며, 불일치 정도는 열대 대기 보다는 한대 대기에서 컸다(Fig. 4). 에어로솔 대기 하에서 국내 SBDART의 단파 대기 흡수도는 H15에 비하여 최대 10% 정도 크게 나타나는 경향이 있었다. KNU-LBL 흡수선 누적 모델의 대기 흡수도는 H15에 비하여 한대 대기에서는 크게, 그리고 열대 대기에서는 작게 나타나는 경향이 있었다. H15에 대한 상대적인 불일치는 SBDART 모델에 비하여 KNU-LBL에서 컸으며, 이에 대한 원인 분석이 장차 요구된다.

에어로솔 강제력은 저농도 에어로솔 조건의 한대 대기에서 지표에 입사하는 하향 복사속(직달 및 산란)의 경우에 $-10 \sim -40 Wm^{-2}$ 이었으며, 국외 연구(H15)에 비하여 국내 모델에서 $\sim 4 Wm^{-2}$ 약하게 나타났다(Fig. 5a). 여기서 음의 값은 대기 중의 에어로솔 존재로 인하여 지표에 도달하는 복사속이 감소하는 것을 의미한다. 다른 모델에 비하여 KNU-LBL 강제력 값은 태양천정각이 큰 고농도 에어로솔 대기(i.e., $AOT=0.24, SZA=75^\circ$)에서 컸으며, 태양천정각이 작은 저농도 에어로솔 대기(i.e., $AOT=0.08, SZA=30^\circ$)에서 작았다.

지표에서의 상향 산란 경우에 에어로솔 강제력은 $-2 \sim -8 Wm^{-2}$ 을 보였으며, 국외연구(H15)에 비하여 국내모델에서 $0.7 Wm^{-2}$ 정도 약하게 나타났다(Fig. 5b). 하향 복사속과 상향 산란에 대한 에어로솔 강제력은 태양천정각이 큰 고농도 에어로솔 대기(i.e., $AOT=0.24, SZA=75^\circ$)에서 컸으며, 태양천정각이 작은 저농도 에어로솔 대기(i.e., $AOT=0.08, SZA=30^\circ$)에서 작았다.

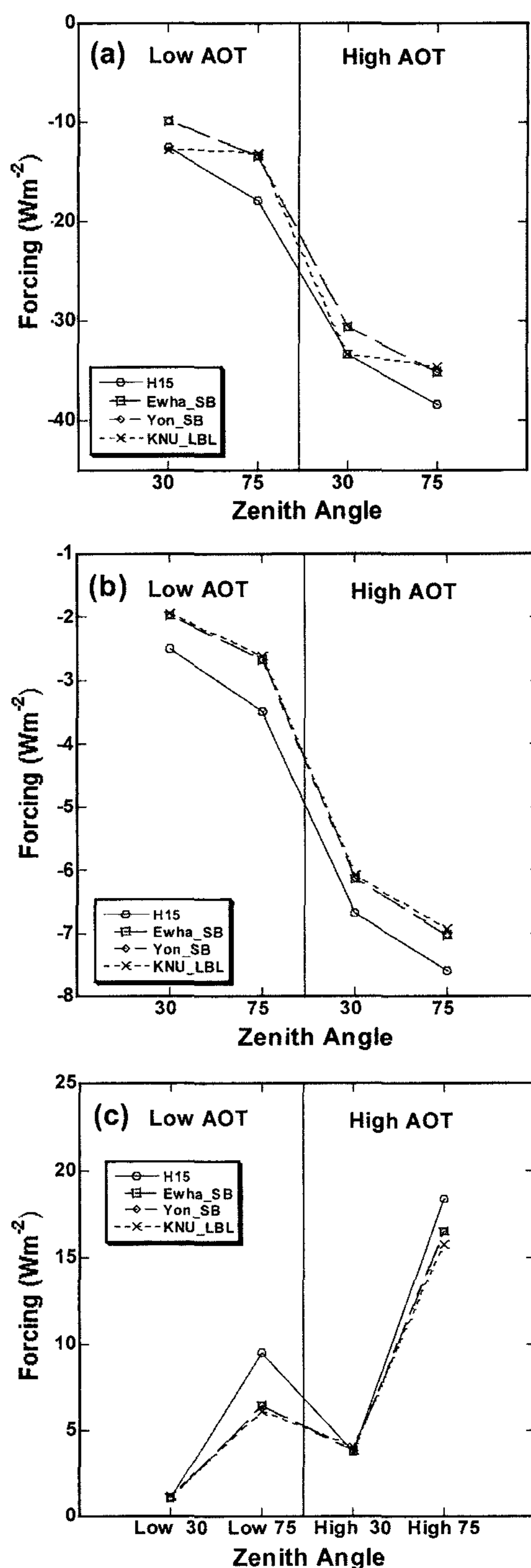


Fig. 5. For a SAW atmosphere, the SW (0.28~5 mm) aerosol forcing as a function of AOT and SZA for (a) $F_{\lambda,SFC}^{\downarrow}$, (b) $F_{\lambda,SFC}^{\uparrow}$, and (c) $F_{\lambda,TOA}^{\uparrow}$.

에어로솔 강제력은 한대 대기 상부에서의 상향 산란 경우에 양의 값으로 1~18 Wm⁻²이었으며 국외연

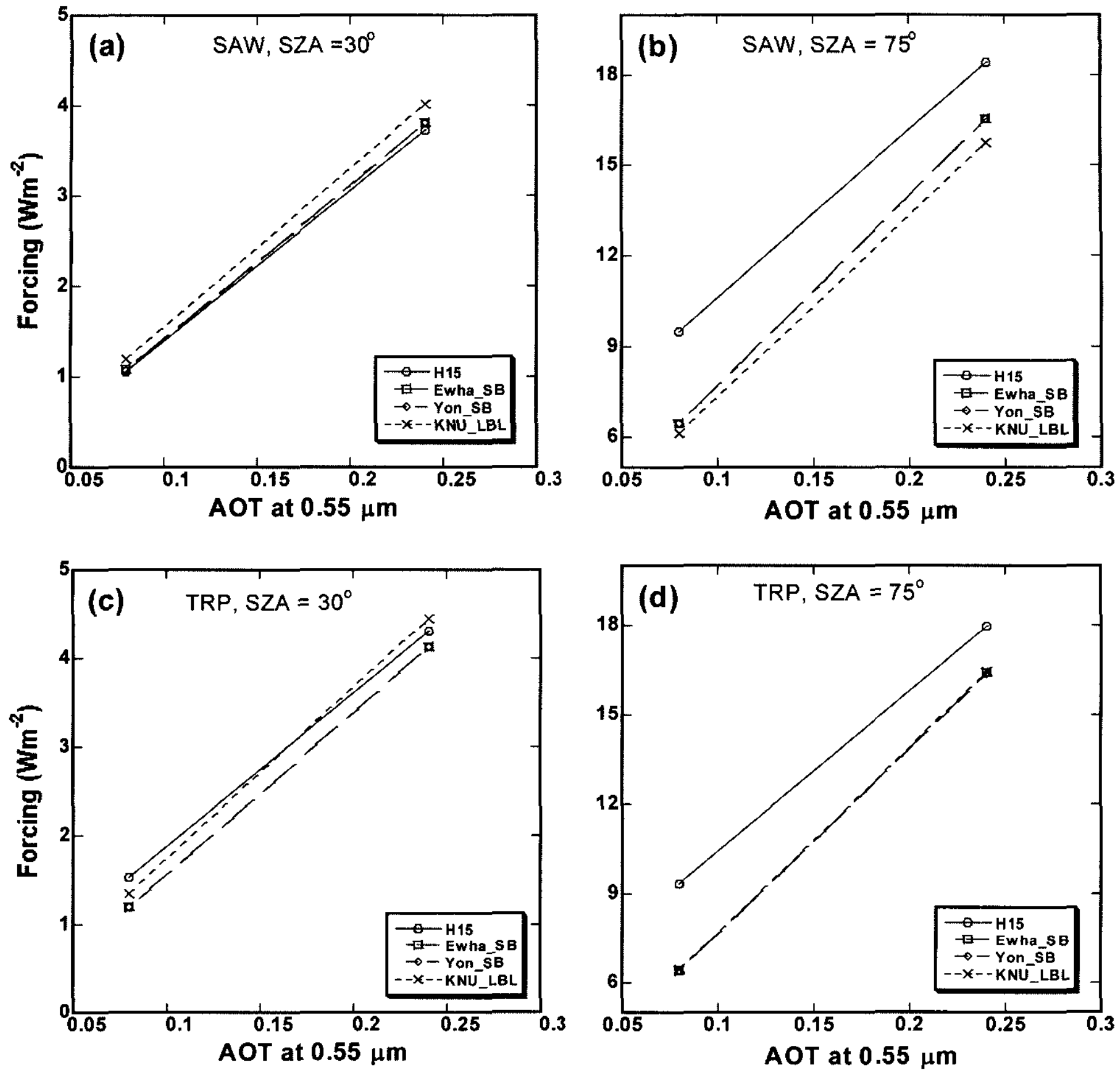


Fig. 6. Dependence of aerosol forcing for $F_{\lambda, TOA}^{\uparrow}$ on aerosol optical thickness under the atmospheric conditions of (a) SAW at SZA = 30°, (b) SAW at SZA = 75°, (c) TRP at SZA = 30°, and (d) TRP at SZA = 75°. Please see the caption of Fig. 1 for the definition of 'TRP' and 'SAW'.

구(H15)에 비하여 국내 모델들에서 최대 3 Wm^{-2} 정도 약하였다(Fig. 5c). 대기 상부에서의 에어러솔 강제력은 지표에서의 경우(Fig. 5a, b)와 유사하게 태양천정각이 큰 고농도 에어러솔 대기에서 컸으며, 태양천정각이 작은 저농도 에어러솔 대기에서 작았다. 그러나 지표 경우에 비하여 대기 상부에서의 상향산란은 태양천정각에 민감하였으며, 이러한 경향은 H15(AOT = 0.08, SZA = 75°)에서 현저하였다.

태양천정각이 30°인 한대 및 열대 대기에서 에어러솔 강제력은 대기 상부에서 상향산란의 경우에 양의 값으로 $1 \sim 4.5 \text{ Wm}^{-2}$ 이었다(Fig. 6a, c). 강제력은 저농도 에어러솔(AOT = 0.08) 대기보다 고농도 에어러솔(AOT = 0.24) 대기에서 컸으며, 한대 대기보다는 열대 대기에서 다소($0.3 \sim 0.4 \text{ Wm}^{-2}$) 컸다. 이들 강제

력은 SBDART 보다 KNU-LBL에서 $0.1 \sim 0.3 \text{ Wm}^{-2}$ 정도 컸다. 이들 국내 모델 결과는 0.3 Wm^{-2} 범위 내에서 H15와 대체로 잘 일치하였다. 태양천정각이 30°에서 75°로 증가함에 따라 에어러솔 강제력은 에어러솔 광학적 두께의 증가로 인하여 4~6배 증가하였다(Fig. 6b, d). H15에 대한 국내 모델 결과의 불일치는 태양천정각 증가에 따라 현저하게(최대 $3 \sim 4 \text{ Wm}^{-2}$) 증가하였다. 이러한 불일치 결과는 증가된 에어러솔 대기 경로에 따른 복사 전달(특히, 산란 과정) 계산의 불일치에 기인한 것으로 해석된다. 에어러솔 강제력(또는 강제력과 관련된 복사속 변화)에 있어서 현재의 불일치 정도는 대기 종류에 대하여는 덜 민감하여(Fig. 6b, d), 에어러솔에 비하여 수증기나 오존 효과는 적은 것으로 판단된다.

열대 대기의 지표에서의 하향 일사(직달 및 산란)의 경우에 에어러솔 강제력은 음의 값으로 범위는 $-10 \sim -35 \text{ Wm}^{-2}$ 로 한대 대기 경우(Fig. 5a)와 비슷하였다(Fig. 7a). 여기서 음의 강제력은 에어러솔 소산에 의한 단파 하향 일사의 감소를 의미한다. 국내 모델 결과는 국외 연구(H15)에 비하여 $\sim 2 \text{ Wm}^{-2}$ 약하게 나타났다. 지표의 하향 일사의 경우에 에어러솔 강제력은 태양천정각(30° , 75°) 보다는 현재 주어진 에어러솔 농도($\text{AOT} = 0.08, 0.24$)에 더 민감하였다. 또한 에어러솔 강제력은 동일한 태양천정각 조건에서 저농도 에어러솔 대기에 비하여 고농도 에어러솔 대기에서 $\sim 20 \text{ Wm}^{-2}$ 컸다. 지표에서의 상향 산란에 대한 에어러솔 강제력은 지표에 입사하는 하향 일사의 경우와 변화 경향은 유사하였으나, 그 크기는 하향 일사의 20%에 해당하였다(Fig. 7b). 상향 산란에 대한 강제력값은 국내외 모델들 간에 대체로 잘 일치하였다. 에어러솔 강제력은 열대 대기 상부에서의 상향 산란의 경우에 양의 값으로 $1 \sim 18 \text{ Wm}^{-2}$ 이었으며, 한대 대기 경우(Fig. 5c)와 비슷하였다(Fig. 7c). 이 강제력은 국외 연구(H15)에 비하여 국내 연구에서 최대 3 Wm^{-2} 정도 약하였다. 특히 이러한 경향은 상대적으로 큰 태양천정각에서 뚜렷하였다. 다시 말해 $\text{SZA} = 75^\circ$ 인 한대 대기에서 대기 상부에서의 상향 산란에 대한 에어러솔 강제력은 모델 간에 최대 3 Wm^{-2} 의 불일치를 보였다.

결론

본 연구에서는 국외 모델 결과(H15)와 함께 국내 COMS 연구자들이 사용하는 두 종류의 세 개 복사 전달모델에서 산출된 단파 복사속 성분들을 에어러솔 존재 대기 조건에서 비교분석하였으며, 대기 복사 수지에서의 에어러솔 역할도 분석하였다. 이 조사에서는 두 종류 에어러솔 농도($\text{AOT} = 0.08, 0.24$), 두 종류 대기(열대, 한대), 그리고 두 개의 태양천정각($\text{SZA} = 30^\circ, 75^\circ$)가 초기 조건으로 사용되었다.

두 종류 에어러솔 조건에서 지표에서의 하향 및 상향 산란값은 대기 종류보다는 태양천정각에 더 민감하였다. 하향 산란은 상대적으로 작은 태양천정각과 고농도 에어러솔 조건에서 컸다. 고농도 에어러솔 하에 하향 산란이 큰 원인은 에어러솔 농도가 증가할수록 하향 산란의 단파 복사가 증가하기 때문이다(Cho et al., 2003). 에어러솔 농도 증가는 하향 산란 증가

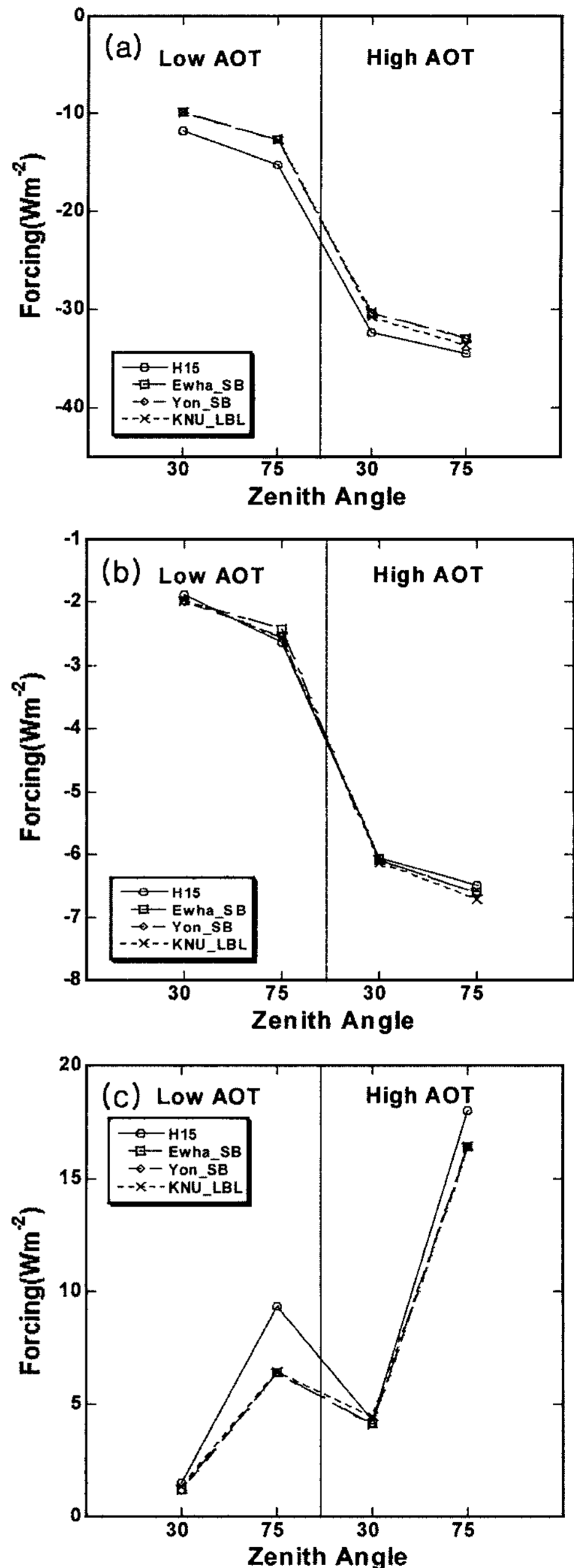


Fig. 7. Same as in Fig. 5 except for a tropical (TRP) atmosphere.

에도 불구하고 하향 직달 일사의 감소가 이를 초과함으로써 지표 냉각을 유도하는 것으로 조사되었다.

동일한 에어러솔 농도 및 태양천정각 조건에서 직달일사 소산은 열대 대기에서는 주로 수증기, 그리고

한대 대기에서는 수증기뿐만 아니라 오존에도 기인하는 것으로 조사되었다. 특히 열대 대기에서는 수증기의 역할이 오존에 비하여 3~4배 컸다. 이러한 경향은 지표에서의 하향 및 상향 산란, 대기 상부의 상향 산란 및 알베도, 그리고 대기 흡수도에서도 대체로 유사하였다.

열대 또는 한대 대기의 에어러솔 강제력은 지표에서의 하향 일사 및 상향 산란, 대기 상부의 상향 산란, 그리고 대기 흡수도의 복사 성분들에 있어서 국외 연구에 비하여 국내 결과들에서 체계적으로 약하게 나타났다. 좀더 구체적으로 보면, 국내 모델들의 강제력은 H15에 비하여 한대 대기 지표에서의 하향 일사에서 4 Wm^{-2} , 상향 산란에서 0.7 Wm^{-2} , 그리고 대기 상부의 상향 산란에서 최대 3 Wm^{-2} 정도 약하였다. 강제력은 지표에서의 하향 일사에 대하여 $-10 \sim -40 \text{ Wm}^{-2}$ 이었으며, 지표 및 대기 상부의 상향 산란의 경우에 상대적으로 큰 태양천정각과 고농도 에어러솔 상태에서 컸다.

저농도 및 고농도 에어러솔 대기에서 대기 흡수도는 국내외 연구 간에 대략 $\pm 10\%$ 내에서 일치하였으며, 불일치 정도는 열대에 비하여 한대 대기에서 컸다. 대기 흡수도에 대한 국내외 모델 간에 불일치는 SBDART 모델에 비하여 KNU-LBL에서 컸으며, 이에 대한 원인 분석이 장차 요구된다. 또한 다른 모델에 비하여 KNU-LBL의 에어러솔 강제력은 태양천정각에 대하여 상대적으로 덜 민감하였다. 본 연구는 에어러솔 대기 하에서 대기 변수에 따른 모델 간의 상대 오차를 분석함으로써 에어러솔 자료처리를 위한 모델을 선택하고 기후 변화에서의 에어러솔 역할을 정량적으로 이해하는데 도움을 준다. 장차 연구에서는 모델 간 불일치에 대한 구체적인 원인 분석과 함께, 에어러솔의 광학적 특성이 그 종류에 따라 광범위하게 변하는 것을 고려하여, 보다 다양한 종류의 에어러솔(biomass burning smoke, mineral dust, sulfate, sea salt 등)에 대한 수치실험이 요구된다.

사 사

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2005-041-C00477). 본 논문에 건설적인 지적을 준 두 분의 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 기상연구소, 2005, 통신헤양기상위성 기상자료 처리시스템 (II). 846 p.
- 유정문, 정명재, 이규태, 김준, 허창희, 안명환, 허영민, 이주은, 유혜림, 정주용, 신인철, 최용상, 김영미, 이윤곤, 이재화, 윤종민, 이원학, 2007, 레일리 대기에서 단파 영역에서의 복사전달모델 결과들의 상호 비교. 한국지구과학회지, 28, 298-310.
- Bell, T.L., Rosenfeld, D., Kim, K.-M., Yoo, J.-M., Lee, M.-I, and Hahnenberger, M., 2008, Midweek increase in U.S summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms. *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-22.
- Cho, H.-K., Jeong, M.J., Kim, J., and Kim, Y.-J., 2003, Dependence of diffuse photosynthetically active solar irradiance on total optical depth. *Journal of Geophysical Research*, 108, ACL 4, 1-10.
- Chou, M.-D. and Lee, K.-T., 1996, Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53, 1203-1208.
- Halthore, R.N. and Coauthors, 2005, Intercomparison of shortwave radiative transfer codes and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 110, D11206, 1-18.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller, H.L. (eds.), 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, 1-996.
- Jacobson, M.Z. and Kaufman, Y.J., 2006, Wind reduction by aerosol particles. *Geophysical Research Letters*, 33, L24814, 1-6.
- Liou, K.-N., 2002, An Introduction to Atmospheric Radiation, 2nd ed., Associated Press, San Diego, USA, 583 p.
- McPeters, R.D., Bhartia, P.K., Krueger, A.J., and Herman, J.R., 1996, Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) data products user's guide. NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA, 67 p.
- Menzel, W.P., Seemann, S.W., Li, J., and Gumley, L.E., 2002, MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basic document. http://earth.engr.cuny.edu/noaa/wc/atbd_mod07.pdf (검색일: 2008. 4. 23.)
- Phillips, V.T.J., Choulaton, T.W., Blyth, A.M., and Latham, J., 2002, The influence of aerosol concentrations on the glaciation and precipitation of a cumulus cloud. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128, 951-971.

Ricchiazzi, P., Yang, C., Gautier, C., and Sowle, D., 1998, A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.
Rosenfeld, D., 1999, TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophysical Research Letters*, 26, 3105-3108.

Rosenfeld, D., 2000, Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 287, 1793-1796.
Thomas, G.E. and Stamnes, K., 1999, *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 517 p.

2008년 2월 11일 접수
2008년 3월 16일 수정원고 접수
2008년 3월 26일 채택