

## 레일리 대기에서 단파 영역에서의 복사전달모델 결과들의 상호 비교

유정문<sup>1,\*</sup> · 정명재<sup>2</sup> · 이규태<sup>3</sup> · 김 준<sup>4</sup> · 허창희<sup>5</sup> · 안명환<sup>6</sup> · 허영민<sup>1</sup> · 이주은<sup>1</sup> · 유혜림<sup>1</sup> ·  
정주용<sup>6</sup> · 신인철<sup>6</sup> · 최용상<sup>5</sup> · 김영미<sup>5</sup> · 이윤곤<sup>4</sup> · 이재화<sup>4</sup> · 윤종민<sup>4</sup> · 이원학<sup>3</sup>

<sup>1</sup>이화여자대학교 과학교육과, 120-750 서울특별시 서대문구 대학동 11-1

<sup>2</sup>NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland 20771, USA

<sup>3</sup>강릉대학교 대기환경과학과, 210-702 강원도 강릉시 강릉대학로 120

<sup>4</sup>연세대학교 대기과학과, 120-749 서울특별시 서대문구 신촌동 134

<sup>5</sup>서울대학교 지구환경과학부, 151-742 서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1

<sup>6</sup>기상연구소 원격탐사실, 156-720 서울특별시 동작구 신대방동 460-18

## Intercomparison of Shortwave Radiative Transfer Models for a Rayleigh Atmosphere

Jung-Moon Yoo<sup>1,\*</sup>, Myeong-Jae Jeong<sup>2</sup>, Kyu-Tae Lee<sup>3</sup>, Jhoon Kim<sup>4</sup>, Chang-Hoi Ho<sup>5</sup>,  
Myoung-Hwan Ahn<sup>6</sup>, Young Min Hur<sup>1</sup>, Ju-Eun Rhee<sup>1</sup>, Hye-Lim Yoo<sup>1</sup>,  
Chu-Yong Chung<sup>6</sup>, In-Chul Shin<sup>6</sup>, Yong-Sang Choi<sup>5</sup>, Young-Mi Kim<sup>5</sup>,  
Yun-Gon Lee<sup>4</sup>, Jae-Hwa Lee<sup>4</sup>, Jong-Min Yoon<sup>4</sup>, and Won-Hak Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

<sup>2</sup>NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland 20771, USA

<sup>3</sup>Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Kangnung National University,  
Kangnung 210-702, Korea

<sup>4</sup>Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>5</sup>School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>6</sup>Remote Sensing Research Laboratory, METRI/KMA, Seoul 156-720, Korea

**Abstract:** Intercomparison between eight radiative transfer codes used for the studies of COMS (Communications, Ocean, and Meteorological Satellite) in Korea was performed under pure molecular, i.e., Rayleigh atmospheres in four shortwave fluxes: 1) direct solar irradiance at the surface, 2) diffuse irradiance at the surface, 3) diffuse upward flux at the surface, and 4) diffuse upward flux at the top of the atmosphere. The result (hereafter called the H15) from Halthore et al.'s study (2005) which intercompared and averaged 15 codes was used as a benchmark to examine the COMS models. Uncertainty of the seven COMS models except STREAMER was  $\pm 4\%$  with respect to the H15, comparable with  $\pm 3\%$  of Halthore et al.'s (2005). The uncertainty increased under a large SZA =  $75^\circ$ . The SBDART model generally agreed with the H15 better than the 6S model, but both models in the shortwave infrared region were equally good. The direct solar irradiance fluxes at the surface, computed by the SBDARTs of four different users, were different showing a relative error of 1.4% ( $12.1 \text{ Wm}^{-2}$ ). This reason was partially due to differently installing the wavelength resolution in the flux integration. This study may be useful for selecting the optimum model in the shortwave region.

**Keywords:** intercomparison, radiative transfer model, Rayleigh atmosphere, SBDART, 6S

\*Corresponding author: yjm@mm.ewha.ac.kr

Tel: 82-2-3277-2710

Fax: 82-2-3277-2684

**요약:** 본 연구에서는 레이리(순수 기체) 대기 조건 하에서 국내 COMS 연구자들이 사용하는 여덟 개 단파 복사전달 모델에서 산출된 네 종류 복사속(flux) 성분을 상호비교함으로써 상대 오차를 조사하였다. 이들 복사속 성분은 지표에서의 직달 일사, 하향 산란, 상향 산란, 그리고 대기 상부에서의 상향 산란이다. 또한 국내 모델의 평가를 위하여, 15개 모델을 평균한 Halthore et al.(2005) 결과(예, H15)를 기준값으로 사용하였다. 동일한 태양천정각에서 모델 간의 불일치는 열대 대기에서 수증기에 기인하였고, 한대 대기에서는 오존에 기인하였다. STREAMER를 제외한 국내 7개 모델의 지상에서의 하향 직달일사값은 H15에 대하여 ±4%내에서 일치하였다. 이러한 상대 오차는 태양천정각이 커질 때 증가하였으며, Halthore et al.(2005)에서의 ±3%와 근접하였다. 네 종류 복사속 분석에서 SBDART 모델이 6S 모델에 비하여 전반적으로 우수하였으나, 근적외 파장영역에서는 서로 비교할만하였다. 네개 기관의 연구자들이 같은 SBDART 모델에서 산출한 지표에서의 하향 직달일사값 간에도 12.1 Wm<sup>-2</sup>(1.4%)의 불일치가 존재하였다. 불일치의 원인은 부분적으로 복사속 적분에 있어서 서로 다르게 설정된 파장 분해능에도 있었다. 본 연구는 단파 영역에서 최적 모델을 선정하는 데 도움을 줄 수 있다.

주요어: 상호비교, 복사전달모델, 레이리 대기, SBDART, 6S

## 서론

단파 영역(0.3~5 μm)에서의 태양복사는 지구복사와 함께 대기 상태 및 운동을 결정하는 주요 에너지원이며, 전기적인 복사 수지를 구성한다(Peixoto and Oort, 1992). 따라서, 여러 자연적인, 인위적인 환경 변화에 대하여 대기 상태가 어떻게 반응할 것인가를 예측하기 위하여, 태양복사의 복사전달 과정에서 흡수, 투과, 반사, 산란에 의한 에너지양을 관측 및 복사전달모델을 이용하여 정량화하는 것이 필요하다(Halthore et al., 2005). 또한 태양복사 파장역 내의 가시채널이나 근적외 채널을 사용하는 위성 원격탐사에서는 단파 복사전달에 대한 정확한 지식이 요구된다. 예를 들면, 0.65 μm와 3.7 μm 채널은 지표면이나 에어러솔 탐지뿐만 아니라 구름 탐지에도 활용될 수 있다(e.g., Knapp and Vonder Haar, 2002; Underwood et al., 2004; Cermak and Bendix, 2005).

우리나라 최초의 다목적 정지궤도 위성인 통신해양 기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite; COMS)은 2008년에 발사될 예정이어서(기상연구소, 2005), COMS 연구에 관련된 국내 연구자들이 기존 위성관측 자료와 복사전달모델을 활용하여 장치 COMS 위성자료를 처리할 기상자료처리시스템을 개발 중에 있다(Table 1). 또한 연구자들은 여러 종류의 복사전달모델들을 현재 사용하고 있지만, 각 모델의 오차와 최적 용도에 대하여는 정확하게 제시되어 있지 않은 실정이다.

모델 간 비교분석 연구는 국외 연구인 Halthore et al.(2005)에서 시도된 바가 있으나, 같은 모델 결과

간에도 사용자들의 실행 방법이나 응용에 따라 상당한 차이가 나타날 수 있으므로, 본 연구는 국내 사용자들에게 유용하리라고 판단된다. 다시 말해, 해당 연구는 모델들의 장단점과 사용자의 운용 능력도 평가할 수 있다는 점에서 중요하다. 특히 특정 용도(e.g., COMS 자료처리 시스템)를 위한 최적 모델의 선정에 있어서, 이러한 비교분석 노력은 가치있는 정보를 마련할 수 있다. 이들 모델을 입수하는데 있어서 MODTRAN(MODerate resolution atmospheric TRANsmision)의 경우에는 사용자가 구입 비용을 부담해야 하므로, 우수한 복사전달모델의 활용 및 자체 개발은 컴퓨터 소프트웨어 분야에서 지적 소유권 확보를 통한 경제적인 파급 효과를 줄 수 있다.

복사전달모델을 이용한 민감도 수치실험은 주변 환경에서 일반적으로 관측되지 않는 다양한 기상 상태 하에서 복사 에너지 변화에 대한 통찰력을 제공할 수 있다(e.g., Yoo et al., 2006). 순수 기체 대기에 비하여 에어러솔 또는 구름 존재 대기에서의 복사전달 과정은 더욱 복잡하여 모델 간에 상당한 차이를 보일 수 있다(e.g., Halthore et al., 2005). 그러므로 본 연구에서는 복사전달모델 결과 간의 비교 분석을 순수 기체 대기(i.e., 레이리 대기)의 경우에 대해 적용한 이후, 장치의 연구에서는 에어러솔/구름 효과를 분석하고자 한다. 본 연구의 목적은 COMS 연구자들이 사용하고 있는 복사전달모델들의 단파 복사속(shortwave flux) 산출값을 레이리 대기 조건 하에서 상호 비교함으로써 상대 오차를 분석하고, 자료처리 최적 모델을 제안하는데 있다.

**Table 1.** Radiative Transfer Models (RTMs), their characteristics and investigators in this study

Model name	Description of models	Investigators	Model abbreviation	Model No in this study
H15	Average of 15 models	Halthore et al. (2005)	H15	1
SBDART	20 cm <sup>-1</sup> spectral resolution, 1 km vertical resolution in troposphere, 33 altitude layers	Yoo & Jeong	Ewha_SB	2
		Kim	Yon_SB	3
		Ho	SNU_SB	4
		Ahn	MRI_SB	5
MODTRAN-4	Eight-stream DISORT model, HITRAN based transmittance, 2 cm <sup>-1</sup> wavelength resolution, 50 vertical layers	Ahn	MRI_MOD	6
KNU_LBL	Discrete Ordinate Method (Line-by-Line)	Lee	KNU_LBL	7
STREAMER	5 aerosol optical model and 4 vertical aerosol model, 65 vertical layers	Ho	SNU_STR	8
6S	2.5 nm spectral resolution	Kim	Yon_6S	9

### 자료 및 방법

COMS 연구자들이 주로 사용하는 다섯 종류의 여덟개 모델(Table 1)을 동일한 레일리 대기 조건하에서 실행하여 네 종류의 복사속 성분을 산출한 후에 상호 비교하였다. 이 비교에는 기존 연구(Halthore et al., 2005) 결과도 포함되었다. Halthore et al.(2005) 결과는 10개의 흡수대(band) 모델과 5개의 흡수선 누적(line-by-line; LBL) 모델에서 계산된 15개 모델들의 복사속 평균값으로 본 연구에서는 편의상 H15 모델로 명명하기로 한다. 본 연구에서 H15 모델값은 국내 모델 결과를 평가하는 데 기준값으로 사용되었다.

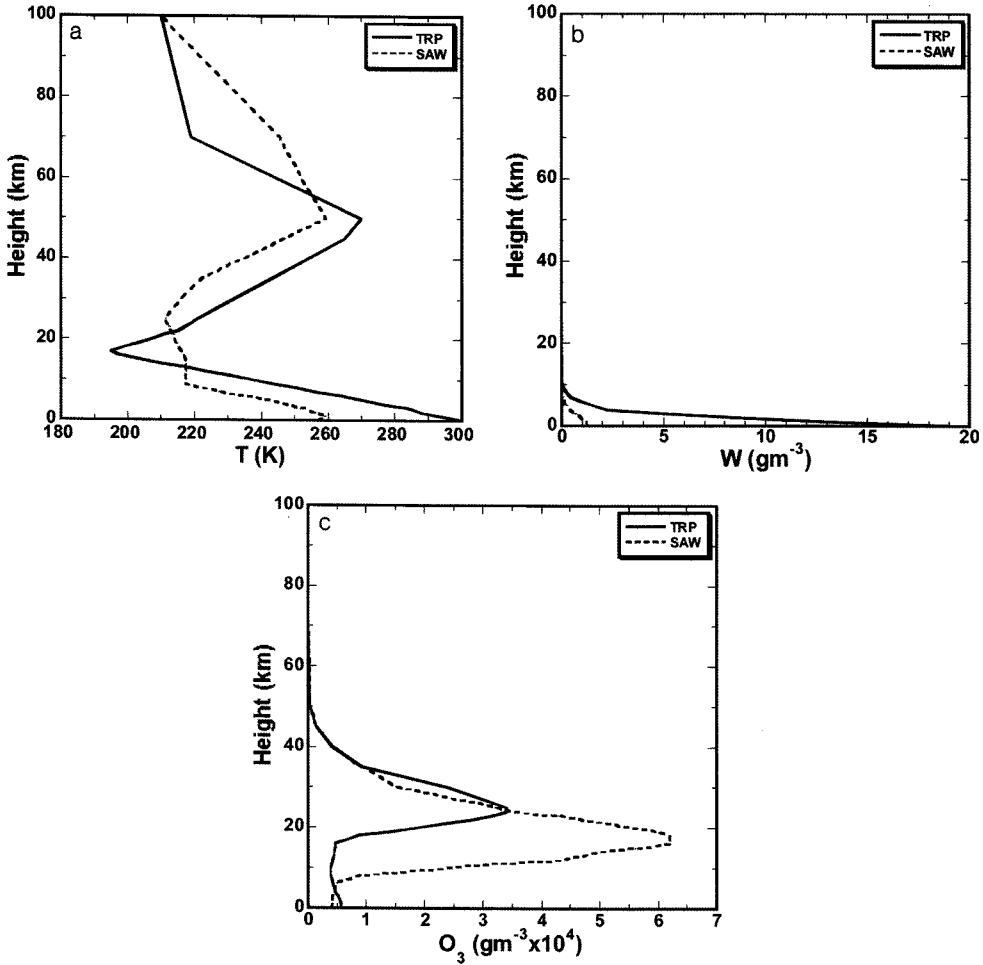
Table 1에서 보는 바와 같이, 모델 비교에 참여한 COMS 연구자들은 다음의 여섯 개 기관에 속해 있다; 강릉대학교, 기상연구소, 서울대학교, 연세대학교, 이화여자대학교, 그리고 NASA/GSFC. 국내 연구자들이 사용한 다섯 종류의 모델에 대한 설명을 부록의 Table A1에 제시하였다. 이들 복사전달모델은 다음과 같다; MODTRAN-4(Berk et al., 2003), SBDART(Ricchiazzi et al., 1998), STREAMER(Key, 2002), 6S(Vermote et al., 1997), 그리고 KNU\_LBL(Chou and Lee, 1996). 흡수선 누적 모델인 KNU\_LBL을 제외하고 다른 모델은 흡수대 모델이다. 동일한 SBDART의 모델비교에는 네 개 기관의 연구자들이 참여하였다. 그러므로 H15을 포함할 때 총 아홉 개의 복사전달 복사속 결과값들이 비교 분석되었다.

Table A1에서는 모델이 사용되는 분야의 예, 모델 개발 정보, 모델 특성, 그리고 모델의 장단점이 기술되었다. 여기서 언급된 다섯 종류의 복사전달모델은

네 개의 흡수대(band) 모델과 하나의 흡수선 누적(line-by-line) 모델로 구성되어 있다. 투과율 계산에 있어서 흡수대 모델은 흡수선 누적 모델에 비하여 컴퓨터 계산 시간을 절약하는 근사적 방법을 사용한다(Halthore et al., 2005). 따라서 일반적으로 흡수선 누적 모델 결과가 흡수대 모델에 비하여 정확하다고 볼 수 있다. 그러나 Ricchiazzi et al.(1998)에 의하면 흡수선 누적 모델 간에도 상당한 불일치가 있으므로, 흡수선 누적과 흡수대 모델 간에 정확도 차이를 정량화하는 것은 어렵다. 흡수대 모델 및 흡수선 누적 모델에 대한 설명은 국내 경우에 이광목(2000)에서도 소개된 바 있다.

수치실험을 위한 레일리 대기의 초기 조건은 각 모델에 대하여 다음과 같이 동일하게 주어졌다; 한대 대기(subarctic winter; SAW)와 열대 대기(tropical; TRP), 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 않는 Lambertian 표면 반사도(0.2), 그리고 이산화탄소 농도(360 ppm). 한대 대기와 열대 대기는 온도, 수증기, 오존의 연직 분포에 있어서 서로 다른 초기 조건을 갖는다. 산출된 복사속값들은 지표에서의 직달 일사(BDDir), 하향 산란(BDDif), 상향 산란(BUDif), 그리고 대기 상부에서의 상향 산란(TUDif)이다. 모델 계산에서 지표에서의 하향 산란값은 하향 총 복사속(직달 일사와 하향산란의 합)에서 직달 일사를 뺀 것이고, 하향 총 복사속에 0.2 반사도값을 곱한 것이 지표에서의 상향 산란 복사속이다.

Fig. 1은 위에서 언급한 두 종류 대기에서 온도, 수



**Fig. 1.** The profiles of (a) temperature (T), (b) water vapor (W), and (c) ozone ( $O_3$ ) for two Rayleigh Atmospheres (tropical, TRP; subarctic winter, SAW).

증기 그리고 오존의 연직 분포에 대한 모델의 초기 조건을 보여준다. 열대 대기의 온도 연직 분포(그림에서 실선)에서 지표 및 대류권계면 부근의 온도는 각각 300 K, 195 K이다(Fig. 1a). 그러므로 대류권에서의 평균 기온감율은 약 6.2 K/km이다. 대류권계면 및 성층권계면은 각각 17 km와 50 km에 존재한다. 한편, 한대 대기의 경우(그림에서 점선)에 지표 및 대류권계면 부근의 온도는 각각 257 K, 217 K이다. 대류권계면 고도를 약 9 km로 가정할 때, 대류권에서의 평균 기온감율은 4.4 K/km이다.

초기 조건에서 수증기 연직 분포의 실질적인 상한 고도는 열대 대기에서 10 km, 그리고 한대 대기에서 5 km 이하로 주어졌다(Fig. 1b). 지표 부근에서의 수증기양은 열대 대기에서  $19 gm^{-3}$ , 한대 대기에서 1.2

$gm^{-3}$ 으로 고도에 따라 급격히 감소한다. 한편, 오존 농도의 최대값은 열대 대기의 24.5 km 고도에서  $3.4 \times 10^4 gm^{-3}$ , 그리고 한대 대기의 17 km 고도에서  $6.2 \times 10^4 gm^{-3}$ 이다(Fig. 1c).

## 결 과

Fig. 2는 세 종류 모델(SBDART, MODTRAN, 6S; Tables 1 and A1)를 사용하여 단파 영역( $0.2-4 \mu m$ )에서 산출된 지표에서의 하향 직달일사 복사속도를 파장별로 보여준다. 여기서의 SBDART는 이화여자대학교 사용자의 계산 결과를 의미하며, Table 1에는 Ewha\_SB라고 표시하였다. 이 계산은 두 종류의 대기(열대, 한대), 두개의 태양천정각(SZA =  $30^\circ, 75^\circ$ ),

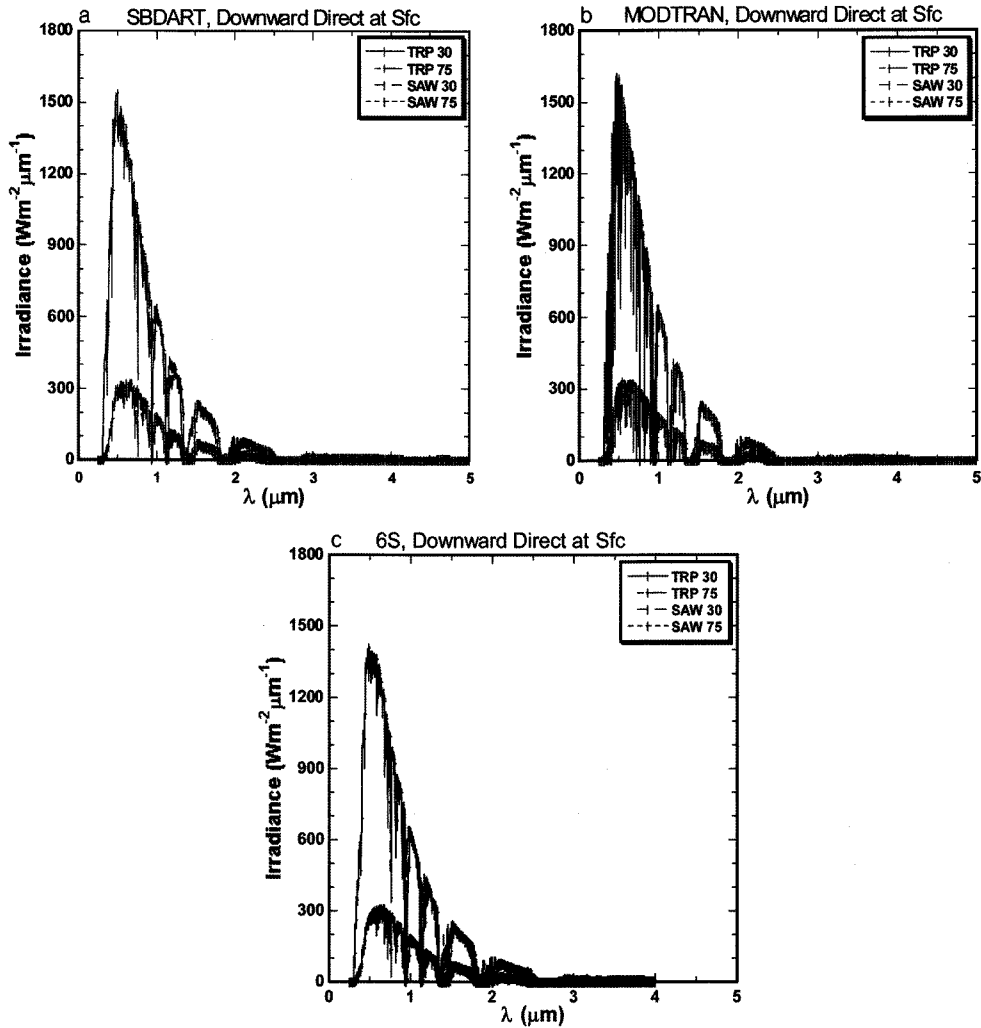


Fig. 2. Downward direct irradiances at the surface (Sfc) in the shortwave region for tropical (TRP) and subarctic winter (SAW) Rayleigh atmospheres with the solar zenith angles of 30° and 75° calculated from (a) SBDART, (b) MODTRAN, and (c) 6S.

그리고 레일리 대기에서 수행되었다. 하향 직달일사 값은 대기 종류보다는 태양천정각의 변화에 더 민감하였다. 세 모델들은 0.5  $\mu\text{m}$ 에서의 지표 하향 직달일사 값을  $\text{SZA} = 30^\circ$ 에서 1400-1600  $\text{Wm}^{-2}$ , 그리고  $\text{SZA} = 75^\circ$ 에서 300-350  $\text{Wm}^{-2}$ 를 보였다. 이러한 값은 MODTRAN(Fig. 2b)에서 가장 컸고, 6S(Fig. 2c)에서 가장 작았다. 태양 천정각이 같은 조건에서는 지표에서의 하향 직달일사값이 열대 대기보다 한대 대기에서 더 컸다. 이러한 결과는 Halthore et al.(2005) 연구와 잘 일치하였다.

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 초기 조건에서 지표에서의 하향 산란 복사속을 보여준다. 세 모델들에서 계산된

하향 산란값은 0.3  $\mu\text{m}$  부근에서 260-490  $\text{Wm}^{-2}$ 으로 가장 컸다. MODTRAN(Fig. 3b)에서 계산된 하향 산란값은 6S(Fig. 3c)의 것에 비하여 두배 정도 컸다. 이러한 상대적인 불일치는 직달일사에 비하여 산란 복사속에서 크게 나타나, 복사 모델에서 흡수과정보다는 산란과정의 차이가 상대적으로 큼을 반영한다.

Fig. 4는 두 종류(Ewha\_SB, MODTRAN) 복사 전달모델을 사용하여 단파(0.2-5  $\mu\text{m}$ ) 영역에서 파장별로 계산된 지상에서의 상향 산란 복사속값을 보여준다. 지상에서의 상향 복사속값은 0.5  $\mu\text{m}$  부근에서 최대로 나타나며,  $\text{SZA} = 30^\circ$ 에서 350-375  $\text{Wm}^{-2}$  그리고  $\text{SZA} = 75^\circ$ 에서는 80-90  $\text{Wm}^{-2}$ 를 보인다.  $\text{SZA} = 30^\circ$ 인

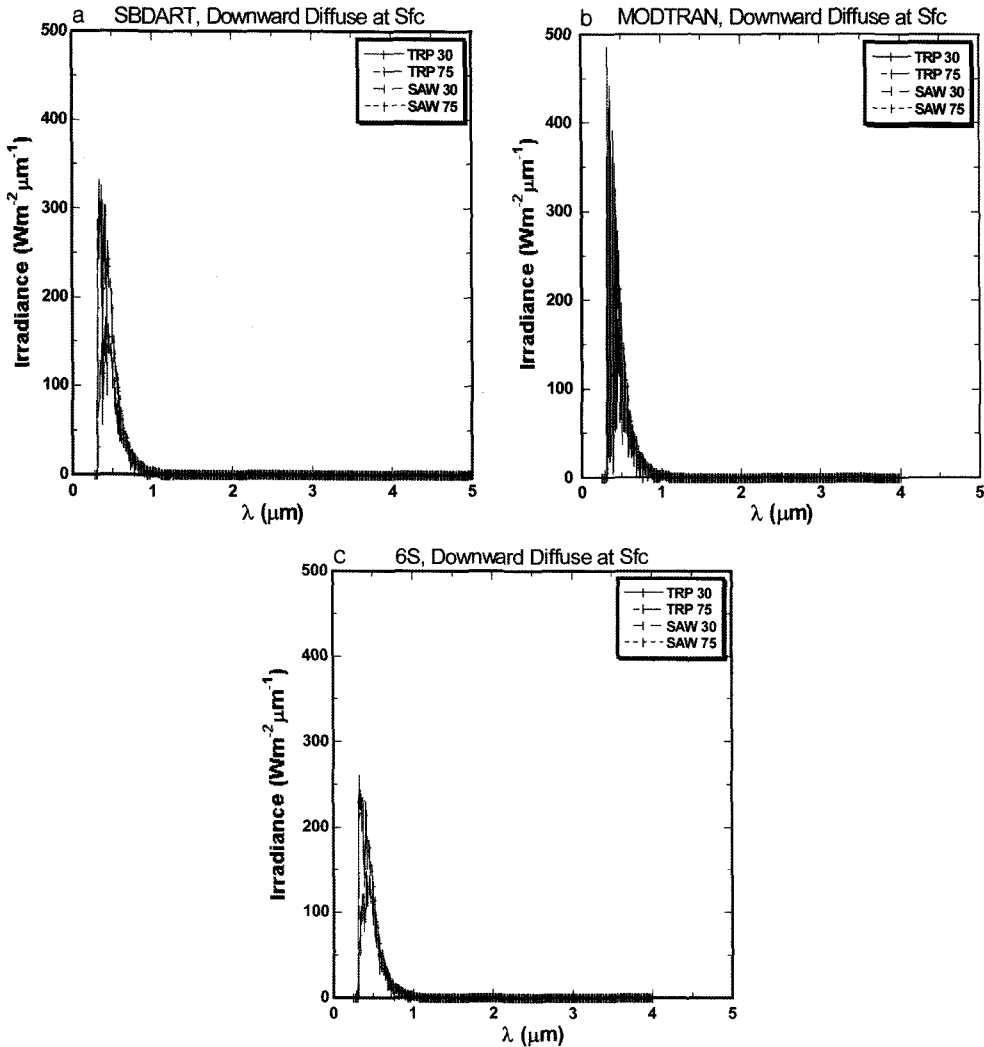


Fig. 3. Same as in Fig. 2 except for downward diffuse irradiance.

경우에 MODTRAN(Fig. 4b) 계산값이 SBDART(Fig. 4a)에 비하여 6-7% 더 크다. Fig. 5는 대기 상부에서의 상향 산란 복사속을 보여준다. 이 산란 복사속은 0.4-0.45  $\mu\text{m}$  부근에서 최대로 나타나며,  $\text{SZA} = 30^\circ$ 에서 490-590  $\text{Wm}^{-2}$  그리고  $\text{SZA} = 75^\circ$ 에서는 230-250  $\text{Wm}^{-2}$ 를 보였다.  $\text{SZA} = 30^\circ$ 인 경우에 MODTRAN(Fig. 5b) 계산값이 SBDART(Fig. 5a)에 비하여 ~16% 더 컸다.

복사속값(Figs. 2-3)은 MODTRAN에서 가장 컸고, 반면에 6S에서 가장 작았다. SBDART 결과는 MODTRAN과 6S의 중간 정도를 보였다. 이러한 복사속값은 대기 종류(열대, 한대)의 차이에 비하여  $30^\circ$ 에서  $75^\circ$ 까지의 태양 천정각 변화에 더 민감하였다.

또한 네 종류 복사속 성분은 상대적인 크기에 있어서 지상에서의 직달 일사값이 가장 컸고( $\text{SZA} = 30^\circ$ 에서 1400-1600  $\text{Wm}^{-2}$ ), 그 다음에 대기 상부에서의 상향 산란값(490-590  $\text{Wm}^{-2}$ ), 지상에서의 하향 산란값(270-490  $\text{Wm}^{-2}$ ), 그리고 지상에서의 상향 산란값(330-375  $\text{Wm}^{-2}$ ) 순으로 나타났다. 모델 간에 복사속 크기의 불일치는 복사전달과정 중에 소산 메커니즘의 차이를 반영한다.

Fig. 6는 아홉 개 복사전달모델에서 산출된 단파(SW)와 자외선(UV) 파장영역에서의 연직 방향의 직달 일사를 보여준다. 두 종류 대기(열대 및 한대), 두개의 태양천정각( $\text{SZA} = 30^\circ, 75^\circ$ )의 다른 조건을 가진 레일리 대기가 지표에 입사하는 하향 직달일사 계산

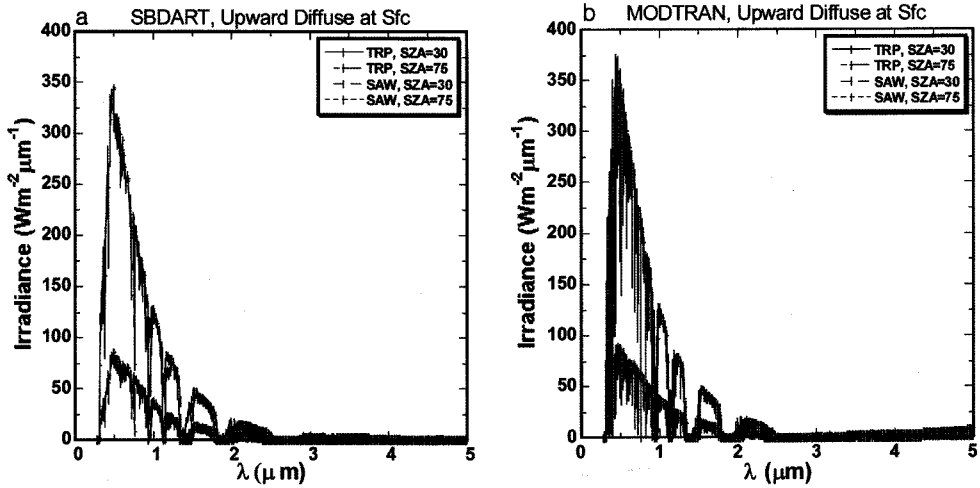


Fig. 4. Upward diffuse irradiance at surface (Sfc) in the shortwave region for the atmospheric (tropical, TRP; subarctic winter, SAW) and geometric (solar zenith angle, SAZ = 30°, 75°) conditions for a Rayleigh Atmosphere in the radiative transfer models of a) SBDART and b) MODTRAN.

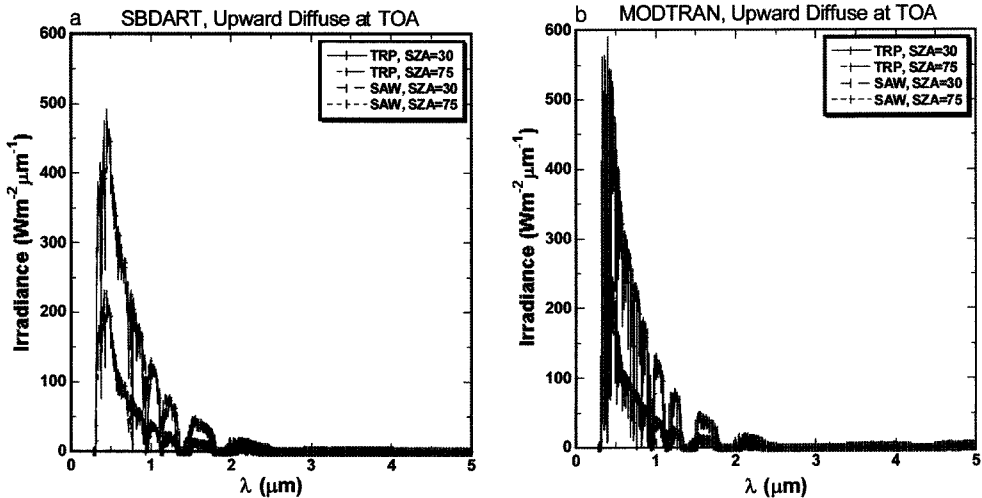
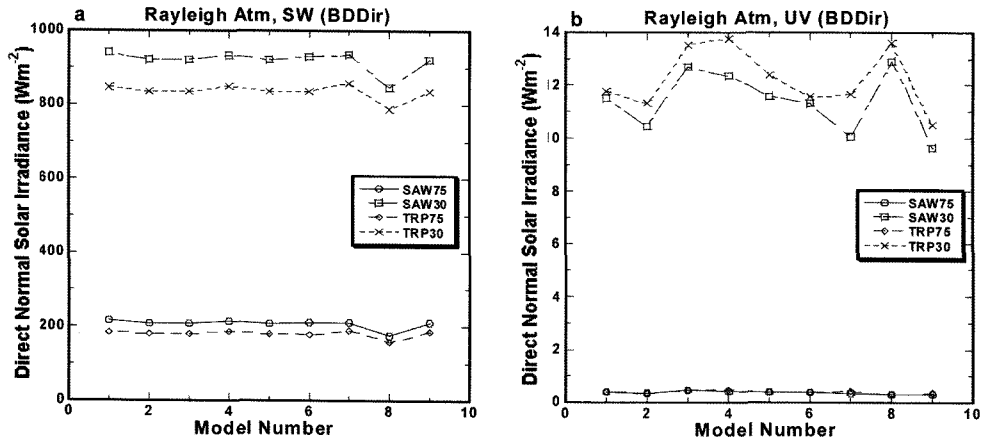


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for the irradiance at top of atmosphere (TOA).

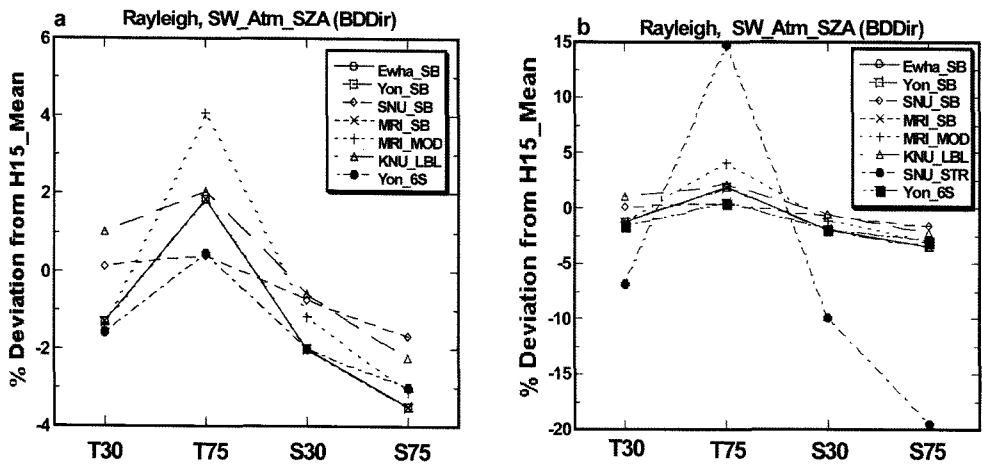
에 사용되었다. 지표에 도달하는 직달일사는 모든 모델에서 SAZ = 30°인 한대 대기(SAW30)에서 최대이었고, SAZ = 75°인 열대 대기(TRP75)에서 최소이었다(Fig. 6a). 따라서 현재의 조건 하에서는 직달일사 값이 대기 종류(열대, 한대)보다는 태양천정각 변화 ( $\Delta$ SAZ = 45°)에 더 민감하였다. 직달일사가 태양천정각 변수에 선형 함수라는 가정 하에서 태양천정각에 따른 직달일사 변화량은 평균적으로 태양천정각 1° 변화에 대하여 20 Wm<sup>-2</sup>이었다. 같은 태양천정각 조건 하에서 지표에 도달하는 직달일사가 열대 대기보

다 한대 대기에서 큰 것은 수증기가 많은 습한 열대 대기에서의 직달일사 소산이 건조한 한대 대기에 비하여 상대적으로 큼을 의미한다. 전체 아홉 개 모델 값 중에서 STREAMER(그림에서 Model number 8)의 불일치가 현저하였다.

직하점 방향(SAZ = 0°)에서 지표에 입사하는 자외선(UV) 영역의 직달일사는 태양천정각이 30°인 열대 대기에서 최대로 나타남으로써 단파(SW) 영역에서의 결과(Fig. 6a; SAZ = 30°인 한대 대기에서 최대)와 다르게 나타났다(Fig. 6b). 이러한 결과는 자외선의 경



**Fig. 6.** Broadband (0.28-5  $\mu\text{m}$ ) direct-normal solar irradiance for the atmospheric (tropical, TRP; subarctic winter, SAW) and geometric (solar zenith angle,  $\text{SZA} = 30^\circ, 75^\circ$ ) conditions as a function of model number for a Rayleigh atmosphere in the wavelength regions of a) SW(0.28-5  $\mu\text{m}$ ) and b) UV (0.2-0.35  $\mu\text{m}$ ). The sequence of nine model numbers investigated in this study is as follows; ① H15 (Halthore et al., 2005; average of 15 models), ② Ewha\_SB, ③ YON\_SB, ④ SNU\_SB, ⑤ MRI\_SB, ⑥ MRI\_MOD, ⑦ KNU\_LBL, ⑧ SNU\_STR, and ⑨ YON\_6S. The abbreviation for the model names is described in Table 1.



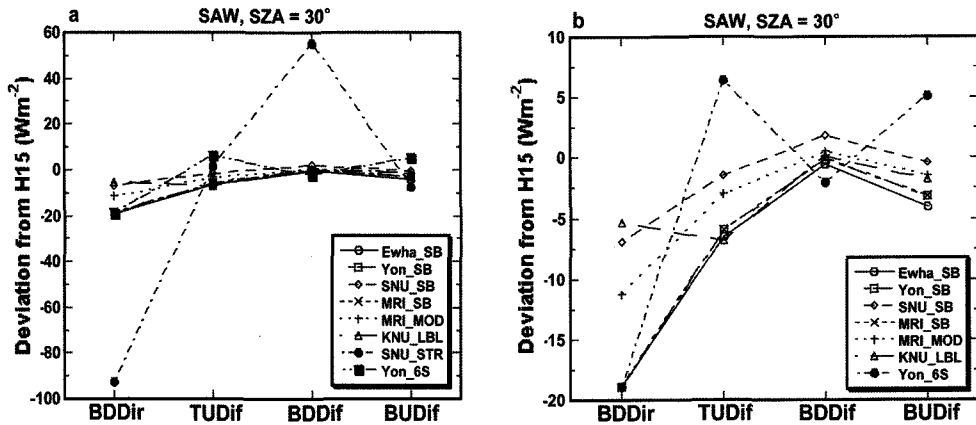
**Fig. 7.** Broadband (0.28-5  $\mu\text{m}$ ) direct solar irradiance at the surface (BDDir) as percent deviation from the H15 (Halthore et al., 2005; average of 15 models) under the conditions of two atmospheres and two SZAs for the (a) seven and (b) eight models, respectively. Here the SNU\_STR model is excluded in Fig. 7a compared to Fig. 7b. In addition, the abbreviation for the model names is described in Table 1.

우에 수증기 보다는 오존 소산에 더 지배적인 영향을 받는데 기인한다. 다시 말해, 현대 대기에서의 오존에 의한 직달일사 소산이 열대 대기에서보다 큼을 의미한다. UV 파장역에서의 직달일사에 대한 비교에 의하면, 모델들은  $4 \text{ Wm}^{-2}$  내에서 일치하였다. SW 파장역에 비하여 UV 파장역에서 직달일사값은 상대적으로 좁은 파장대에 기인하여 보다 민감하게 나타나며 모델 간에 뚜렷한 특징이 나타나지 않았다(Figs.

6a-b). UV의 직달일사량은 SW 직달일사량의 약 1-2%에 해당하였다.

STREAMER를 제외한 국내 일곱개 모델의 지상에서의 하향 직달일사값은 H15에 대하여  $\pm 4\%$  내에서 일치하였으며, 이러한 오차는 태양천정각이 큰 조건 (TRP75와 SAW75)에서 증가하였다(Fig. 7a). Halthore et al.(2005)에 의하면, 같은 초기 조건 하에서 15개 모델 간에 상대오차는 약 3%이었다. H15를 배제한





**Fig. 8.** Four fluxes (BDDir, TUDif, BDDif, and BUDif) at SAZ = 30° for the SAW atmosphere as deviation [Wm<sup>-2</sup>] from the H15 (Halothore et al., 2005; average of 15 models) for the a) eight and b) seven models, respectively. Here the SNU\_STR model is excluded in Fig. 8b compared to Fig. 8a. The symbols of BDDir, TUDif, BDDif, and BUDif stand for direct irradiance at surface, diffuse upwelling flux at TOA, diffuse downwelling flux at surface, and diffuse upwelling flux at surface, respectively. In addition, the abbreviation for the model names is described in Table 1.

**Table 2.** Deviation (Wm<sup>-2</sup>) of the SBDART (Ewha\_SB) and 6S (YON\_6S) from the average of 15 models (H15) described by Halothore et al. (2005) for the atmospheric (SAW, TRP) and geometric (solar zenith angle, SAZ = 30°, 75°) conditions. The deviation was examined in the four different wavelength bands (SW, UV, VIS, SWIR), and in the flux components of BDDir and BDDif. Here the symbols of BDDir and BDDif mean the direct irradiance at surface and the diffuse downwelling flux at surface, respectively

	SAW 30		SAW 75		TRP 30		TRP 75	
	BDDir	BDDif	BDDir	BDDif	BDDir	BDDif	BDDir	BDDif
H15	940.90	63.80	217.00	37.10	848.50	64.00	184.80	37.20
SB_SW	-18.92	-0.60	-7.61	-0.75	-11.12	0.11	3.42	0.24
6S_SW	-19.81	-14.72	-6.49	-5.32	-13.34	-13.71	0.84	-4.75
H15	11.50	9.00	0.40	2.80	11.80	9.50	0.40	3.00
SB_UV	-1.05	-0.62	-0.06	-0.30	-0.50	-0.03	-0.04	-0.12
6S_UV	-1.85	-1.11	-0.08	-0.56	-1.28	-0.49	-0.05	-0.37
H15	414.00	50.30	81.40	30.70	413.30	50.30	81.30	30.90
SB_VIS	-3.94	0.27	-2.72	-0.24	-0.75	0.70	-0.06	0.32
6S_VIS	-16.22	-11.92	-4.46	-3.75	-12.71	-11.58	-1.84	-3.32
H15	515.30	4.40	135.20	3.50	423.40	4.20	103.00	3.40
SB_SWIR	-13.83	-0.14	-4.82	-0.11	-9.87	-0.57	-3.22	-0.53
6S_SWIR	-10.63	-1.6	-1.95	-0.91	0.65	-1.64	2.83	-1.17

국내 사용자 모델들도 ±4% 내에서, 그리고 수증기가 적은 한대 대기에서는 ±2% 내에서 상호 일치하였다. 그러나 H15 모델에 대하여 가장 큰 불일치를 보인 STREAMER를 포함할 경우에 하향 직달일사값에 대한 상대오차는 ±20%까지 증가하였다(Fig. 7b).

태양천정각이 30°인 한대 대기에서 STREAMER를 포함한 국내 여덟개 모델의 네 종류(지표에서의 하향 직달일사(BDDir), 하향 산란(BDDif), 상향 산란(BUDif), 그리고 대기 상부에서의 상향 산란(TUDif))

복사속값은 H15에 대하여 ±95 Wm<sup>-2</sup> 내에서 일치하였다(Fig. 8a). 반면에 STREAMER를 제외할 때, ±19 Wm<sup>-2</sup> 내에서 일치하여 상대오차가 현저하게 감소하였다(Fig. 8b). 네 개의 다른 기관의 연구자들이 사용한 SBDART 결과들은 같은 초기 조건에도 불구하고 ±12 Wm<sup>-2</sup> 정도의 불일치를 보였다. 이러한 원인은 파장에 따른 복사속 적분에 있어서 모델 간에 파장 분해능 설정의 차이에도 기인하는 것으로 조사되었다. 따라서 같은 모델의 경우도 사용자의 실험

방법에 따라 모델 상대 오차의 크기가 다를 수 있다.

네 종류 복사속에 대한 상대오차 추세에 있어서 6S는 SBDART, MODTRAN-4, 그리고 KNU\_LBL 모델과 다른 경향을 보였다(Fig. 8b). 복사속값은 H15에 대하여 전반적으로 6S 모델보다 SBDART에서 더 잘 일치하였다(Table 2). 그러나 SZA = 75°인 SWIR 파장역(0.7-5 μm)에서는 SBDART와 6S는 서로 간에 큰 차이를 보이지 않았다.

## 결 론

본 연구에서는 국외 모델 비교 결과(Halthore et al., 2005)와 함께 국내 COMS 연구자들이 사용하는 다섯 종류의 여덟 개 복사전달모델에서 산출된 네 종류 복사속값을 레이리 대기 조건 하에서 상호비교함으로써, 상대오차를 분석하였다. 이 분석에서는 네 개의 단파 영역, 두 종류 대기, 두 종류 태양천정각의 초기 조건을 사용하였다.

같은 태양 천정각 조건 하의 레이리 대기에서 모델 간의 불일치는 열대 대기에서는 수증기, 그리고 한대 대기에서는 오존에 기인하는 것으로 조사되었다. 이 조사에서 열대 대기는 한대 대기에 비하여 많은 수증기량을 포함하는 반면에 적은 오존량을 포함한다. 또한 지표에서의 하향 직달 일사값이 열대 대기보다 한대 대기에서 더 크게 나타났으며, 이러한 결과는 Halthore et al.(2005)와 잘 일치하였다. 지표에서의 직달일사는 태양천정각 30°-75° 범위에서 1° 증가 시에 약 20 Wm<sup>-2</sup> 감소하였다. 자외선 영역의 직달일사값은 단파 영역값의 1-2%에 해당하였다. STREAMER를 제외한 국내 일곱 개 모델의 지상에서의 하향 직달일사값은 국외 H15에 대하여 ±4% 내에서 일치하였으며, 이러한 상대 오차는 대기 경로가 길어지는(즉 태양천정각이 큰) 조건에서 증가하였다. 이러한 불일치 정도는 Halthore et al.(2005) 연구에서 보인 15개 모델의 상대오차 3%에 근접하였다. 본 연구에서 발견된 국내 연구자 모델 간의 4% 상대오차는 모델 결과(또는 조건표)를 사용하는 COMS 위성자료처리시스템 분야(예, 안개, 구름, 그리고 에어러솔)에서 장차 정량적으로 고려되어야 한다.

네 개의 다른 연구기관의 연구자들이 실행한 SBDART 동일 모델의 지표에서의 하향 직달일사값 간에도 12.1 Wm<sup>-2</sup>(1.4%)의 불일치가 존재하였다. 이러한 불일치는 파장에 따른 복사속 적분에 있어서

파장 분해능 설정의 차이에도 기인하는 것으로 조사되었다. 네 종류 복사속에 대한 상대오차 추세에 있어서 SBDART가 전반적으로 6S에 비하여 H15에 잘 일치하였으나, 근적외 파장역에서는 서로 비교할만 하였다. SBDART, 6S, MODTRAN의 세 모델 간에 비교에서 복사속값들은 계통적으로 MODTRAN에서 가장 컸고, 6S에서 가장 작았다. 본 연구는 COMS 자료처리시스템과 같은 분야에서 활용할 최적 모델을 선택하는데 있어서 도움을 주며, 장치의 연구에서는 에어러솔 및 구름 효과가 포함된 상태 하에서 비교 분석이 필요하다.

## 사 사

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (KRF-2005-041-C00477). 좋은 지적을 해주신 심사위원들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 기상연구소, 2005, 통신해양기상위성 기상자료 처리시스템 (II), 846 p.
- 이광목, 2000, 대기복사(장파복사와 응용). 시그마프레스, 서울, 174 p.
- Berk, A., and Coauthors, 2003, MODTRAN-4 Version 3 Revision 1 User's Manual, Air Force Research Laboratory. Hanscom AFB, MA 01731-3010, 91 p.
- Cermak, J.B., and Bendix, J., 2005, A microphysics-based approach to fog/low stratus detection and discrimination using satellite data. COST 722 Midterm Workshop, Langen, Germany.
- 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.
- Key, J.R., 2002, Streamer User's Guide, NOAA/NESDIS, Madison, Wisconsin, 108 p.
- Knapp, K.R., and Vonder Haar, T.H., 2002, Aerosol optical depth retrieved from GOES-8: Uncertainty study and retrieval validation over South America. *Journal of Geophysical Research*, 107, D7, 4055-4059.
- Peixoto, J.P., and Oort, A.H., 1992, *Physics of Climate*, MIT, New York, 520 p.
- Ricchiazzi, P., Yang, C., Gautier, C., and Sowle, D., 1998, A research and teaching software tool for plane-paral-

- lel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.
- Underwood, S.J., Ellrod, G.P., and Kuhnert, A.L., 2004, A multiple-case analysis of nocturnal radiation-fog development in the central valley of California utilizing the GOES nighttime fog product. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 297-310.
- Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., and Morcrette, J.J., 1997, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35 (3), 675-686.
- Yoo, J.M., Jeong, M.J., and Yun, M.Y., 2006, Optical characteristics of fog from satellite observation (MODIS) and numerical simulation. *The Journal of the Korean Meteorological Society*, 42 (5), 291-305.

---

2007년 3월 28일 접수  
2007년 4월 19일 수정원고 접수  
2007년 5월 11일 채택

## Appendix

**Table A1.** The information about five radiative transfer models used in this study. The model contents of application, developer, characteristics, and advantage/disadvantage are described.

MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission)	Product/Application	Reference radiance calculation Comparison with other faster RTMs	
	Developer	AFGL	
	Characteristics	Type	Band model
		Range	0~50,000/cm with 2/cm in averaged step of 1/cm
		V. Resol.	User defined (0~100 km)
		Atm. Param.	-6 Standard atmosphere and user input -Various molecular species in default models -Aerosol vertical distribution in 4 levels (V3.7) -User provided various cloud parameters
		Sfc. Param.	-BRDF parameterization model -Default and user defined surface models
		Others	-Various geometrical angles
		Sfc. Param.	Surface albedo user input
		Other	Various geometrical angles
	Advantage	Accurate and flexible, easy to handle	
Disadvantage	Fast in IR, slow in high stream VIS		
SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer)	Product/Application	COT, ER, FOG, OLR for the threshold value, derivation of the empirical equation, and LUT construction. Calculation of TOA radiance over cloud for calibration	
	Developer	UC Santa Barbara	
	Characteristics	Type	Band model
		Range	0.25 $\mu\text{m}$ -100 $\mu\text{m}$ with 5 nm (VIS) and 20 nm (LW) resolution
		V. Resol.	65 Layer
		Atm. Param.	-6 Standard atmosphere and user input -User defined cloud parameters -Gas absorption is based LOWTRAN-7 band model
		Sfc. Param.	-5 default surface type (Ocean, Lake, Vegetation, Snow, Sand) and combination of the default surfaces, -User defined sfc. Information, -User input BRDF
		Others	-Various geometrical angles are possible
Advantage	Fast calculation, easy input parameters, free of charge		
Disadvantage	Unable to include non-spherical particle, only plane parallel atmosphere		
STREAMER	Products/Application	CP, CT, CTTH for threshold determination, LUT construction	
	Model	CIMSS Version 3.0	
	Characteristics	Type	Parameterized band model
		Range	SW (24), LW (105 with 20/cm bandwidth)
		V. Resol.	65 layer
		Atm. Param.	-7 Standard atmosphere and user input -5 aerosol optical model and 4 vertical aerosol model -Various cloud information (10 layer with mixed cloud type)
		Sfc. Param.	-Lambertian & BRDF -Spectral albedo & BRDF user input
	Others	Various geometrical angle	

Table A1. Continued

STREAMER	Advantage	Fast calculation, easy to input the input parameters		
	Disadvantage	Difficult to derive surface radiance		
6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)	Products/Application	AOD, Surface Reflectance, and Calibration for threshold determination, LUT construction		
	Model	Improved version of the Lab. d'Optique Atmospherique 5S		
	Characteristics	Type	Band model	
		Range	VNIR (0.25~5 μm) with spectral resolution of 2.5 nm	
		V. Resol.		
	Atm. Param.	-Standard atmosphere and user defined input -6 default aerosol model and user defined input -Various geometrical condition is easily simulated		
		Sfc. Param.	-Lambertian & BRDF	
	Other	-Cloud input is not possible -Basic information of VIS channel of current satellite is included		
		Advantage	Easy to satellite application, Relatively high spectral resolution Only for clear sky	
	Line-by-Line Model with Discrete-Ordinate Method	Disadvantage	Reference radiance calculation comparison with other faster RTMs	
Products/Application		Line-by-Line Model with Discrete-Ordinate Method		
Model		type	LBL Model	
Characteristics		Range	0.2-10 μm with spectral resolution of 20 cm <sup>-1</sup>	
		V. Resol.	User define	
Atm. Param.		- 6 standard atmosphere and user defined input - includes rayleigh scattering and gas absorption - user defined cloud and aerosol parameters		
		Advantage	Accurate and flexible, easy to handle	
Disadvantage		Only plane parallel atmosphere and slow calculation		