

CAGEX 관측자료를 이용한 LOWTRAN7의 대기 복사 전달 모의에 대한 조사

장광미 · 권태영 · 박경윤

시스템공학연구소

Study on the LOWTRAN7 Simulation of the Atmospheric Radiative Transfer Using CAGEX Data.

Kwang-Mi Jang, Tae-Yong Kwon, and Kyoung-Yoon Park

Systems Engineering Research Institute

Abstract

Solar radiation is scattered and absorbed by atmospheric compositions in the atmosphere before it reaches the surface and, then after reflected at the surface, until it reaches the satellite sensor. Therefore, consideration of the radiative transfer through the atmosphere is essential for the quantitative analysis of the satellite-sensed data, specially at shortwave region. This study examined a feasibility of using radiative transfer code for estimating the atmospheric effects on satellite remote sensing data. To do this, the flux simulated by LOWTRAN7 is compared with CAGEX data in shortwave region. The CAGEX (CERES/ARM/GEWEX Experiment) data provides a dataset of (1) atmospheric soundings, aerosol optical depth and albedo, (2) ARM(Aerosol Radiation Measurement) radiation flux measured by pyrgeometers, pyrhelimeter and shadow pyranometer and (3) broadband shortwave flux simulated by Fu-Liou's radiative transfer code. To simulate aerosol effect using the radiative transfer model, the aerosol optical characteristics were extracted from observed aerosol column optical depth, Spinhirne's experimental vertical distribution of scattering coefficient and D' Almeida's statistical atmospheric aerosols radiative characteristics. Simulations of LOWTRAN7 are performed on 31 samples of completely clear days. LOWTRAN7's result and CAGEX data are compared on upward, downward direct, downward diffuse solar flux at the surface and upward solar flux at the top of the atmosphere(TOA). The standard errors in LOWTRAN7 simulation of the above components are within 5% except for the downward diffuse solar flux at the surface (6.9%). The results show

that a large part of error in LOWTRAN7 flux simulation appeared in the diffuse component due to scattering mainly by atmospheric aerosol. For improving the accuracy of radiative transfer simulation by model, there is a need to provide better information about the radiative characteristics of atmospheric aerosols.

Keyword : radiative transfer, atmospheric effects, LOWTRAN7

요 약

위성 탐사 지구 관측 자료, 특히 가시광선 영역의 자료는 태양광이 지구 대기계와 복잡한 상호작용을 거친후 위성센서에 의해서 감지되어 수집된 것이다. 따라서 가시광선 영역의 지구 관측 위성 자료를 정량적으로 분석하기 위해서는 대기의 산란과 흡수에 의한 대기효과에 대한 정량적 보정이 필요하다. 본 연구에서는 대기효과에 대한 정량적 보정을 위해서 복사 전달 모델의 활용 가능성을 조사하였다. 이를 위해 위성 원격탐사 응용 분야에 이용되고 있는 복사 전달 모델 중의 하나인 LOWTRAN7의 복사 전달 모의 결과 중 단파 자료를 복사 관측 자료인 CAGEX 자료와 비교하였다. CAGEX 관측 자료는 대기복사 모델의 검정을 위하여 NASA Langley Research Center에서 수집한 자료로써, 1)대기 sounding, aerosols, 구름의 특성 자료, 2) 지구복사계, 직달일사계, 차광 전천일사계에 의해 측정된 ARM(Aerosol Radiation Measurement) 자료, 3) Fu-Liuo 모델에 의해 모의된 장파, 단파 flux 등의 자료로 구성되어 있다. 대기복사 전달 모의를 위하여 에어로졸의 광학적 특성은 CAGEX의 column optical depth, Spinhirne의 산란 계수 수직 분포와 D' Almeida의 에어로졸 복사 특성 값으로부터 도출되었다. LOWTRAN 7의 복사 모의는 완전히 맑은 날에 해당하는 31개의 경우에 대하여 수행되었으며, 이 모의 결과 중 단파영역에서의 지표면에서의 상향복사와 지표면으로의 하향직달복사 및 하향 확산 복사 그리고 대기 상단에서의 상향 복사를 CAGEX 관측 자료와 각각 비교 하였다. 비교 결과 CAGEX 자료에 대한 LOWTRAN7 결과의 표준 오차는 지표면에서의 하향 확산 복사(6.9%)를 제외한 모든 복사 항목들이 5%이내였다. 이 결과로 보아 하향 확산 복사항의 오차가 가장 크며 이 오차가 관련된 나머지 항목의 오차를 일으키는 역할을 하는 것으로 추측할 수 있다. 결론적으로 지표면에서의 하향 확산 복사 항목은 에어로졸에 의해 생기는 항목이므로 향후 복사 전달 모델을 고려할 때 에어로졸의 산란에 의한 부분이 더 고려 된다면 복사 전달 모델을 이용하여 정량적으로 대기 효과를 보정하는데 오차를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

위성 원격탐사는 지구 환경 특성을 감시하는데 효과적인 도구로 알려져 있다. 위성 탐사 지구 관측 자료, 특히 가시광선 영역의 자료는 태양광이 근원이며, 이 광은 지표면에 도달되기전에 대기

성분(에어로졸 입자, 질소, 산소등의 분자등)에 의해 흡수 혹은 산란되거나 지표면에 의해 반사되어 다시 대기층을 통과한 후 위성센서에 감지되어 수집된다(Fig. 1). 따라서 가시광선 영역의 지구 관측 위성자료로부터 지표면 알베도, 반사도, 온도와 같은 지구 환경 특성 정보를 추출하기 위해서는 대기 성분에 의한 태양광의 산란과 흡수의 고려가 필수적이다. 그러나 이 문제는 대기 광학 성분이 시간과 공간에 따라 다양하게 변하는 기상 변수 및 에어로졸에 의해 많은 영향을 받을 뿐만 아니라 지표면의 반사 계수가 viewing geometry에 의해 많은 영향을 받기 때문에 복잡하다.

대기 보정을 위해 현재까지 제시된 방법으로는 직접방법과 간접방법이 있다(Kaufman et al., 1996). 간접방법은 에어로졸의 영향을 거의 받지 않는 NDVI와 같은 새로운 원격탐사 함수를 정의하여 지표면 특성 정보를 획득한다. 그리고 직접 방법은 대기에 관련된 모든 물리 변수들을 라디오존데, 에어로졸 프로파일 그리고 다른 탐사 기구들에 의해 관측 수집하여 이를 입력 자료로 하여 대기-지표면 시스템에 대한 복사 전달 방정식을 푸는 것이다. 이 방법은 입력 자료를 얻기 위

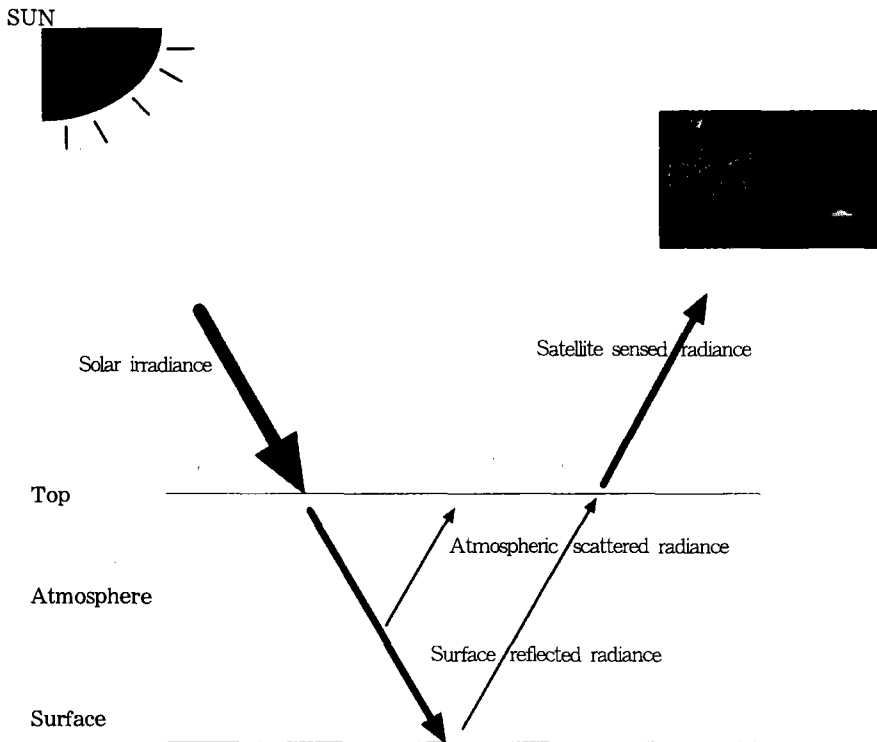


Fig. 1. Diagram of satellite sensed radiance.

$R = R^* + R_s \cdot T / (1 - s\rho')$, R : Satellite sensed radiance, R* : Atmosphere scattered radiance, R_s : Surface reflected radiance, T : Upward total transmission into the satellite viewing direction, s : Atmospheric albedo, ρ' : regional average surface reflectance

한 관측 실험에 비용이 많이 들 뿐만 아니라 복사전달 모델을 운용하는데 컴퓨터 계산 시간도 많이 요구된다. 그러나 이 복사 전달 모델은 복사 전달에 영향을 주는 모든 물리 변수 들을 고려할 수 있는 잇점이 있다(Mitchell et al., 1992). 현재 운용중인 복사 전달 모델로는 LOWTRAN7 (Kneizys et al., 1988), MODTRAN(Berk et al., 1989), 5S(Tanre et al., 1990), 6S (Tanre et al., 1997), Fu-Liou d-four-stream code (Fu et al., 1992) 등이 있다.

본 연구에서는 대기효과에 대한 정량적 보정을 위해서 복사 전달 모델 모의 가능성을 조사하였다. 복사전달 코드 의 활용을 위해서는 복사전달 모델의 운용을 위해 입력 자료인 관측 자료가 필요한 것 외에도 이들 code 의 검증 을 위한 ground truth 자료가 필요하다. 그러나 지금까지는 이런 관측 입력 자료와 검증을 위한 ground truth 자료의 활용이 용이하지 않았기 때문에 이러한 시도가 어려웠지만 이번에 NASA에서 CAGEX (CERES/ARM/GEWEX Experiment) 실험에 의해 생성된 자료를 인터넷을 통해 제공하고 있다(Charlock et al., 1996). 따라서 본 연구에서는 원격탐사 분야에서 대기 보정을 위해 널리 쓰이고 있는 LOWTRAN7 code의 활용 가능성 조사를 위하여 LOWTRAN7 복사전달 모의 결과와 CAGEX의 자료 중 ARM(Atmospheric Radiation Measurement) 자료를 비교하였다.

II. 자료 및 방법

복사 전달 모델을 이용하여 가시광선 영역의 복사 모의 조사를 위해서는 복사 전달 모델의 운용을 위해 입력 자료인 대기 sounding, 에어로졸 특성 등 관측 자료와 이 복사 전달 모델의 검증을 위한 ground truth 자료가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위한 자료인 CAGEX(CERES/ARM/GEWEX Experiment) 자료를 인터넷(<http://snowdog.larc.nasa.gov:8081/cagex.html>)에서 제공받았다.

CAGEX 자료는 NASA Langley Research Center에서 수집한 자료로써 지표면과 대기 복사 수지(복사 flux의 연직 프로파일) 모델의 개발, 수정 및 검증을 위해 제공되는 자료이다. 관측 실험은 ARM SGP(Southern Great Plains) CART(Cloud and Radiation Testbed) site에서 행해졌으며 이는 오클라호마와 캔사스의 경계 지역에 위치해 있다(Fig. 2). CAGEX 3×3 격자(각 격자 : 0.3° × 0.3°)는 ARM Central Facility의 중심부로 36.61°N, 97.49°W에 위치하며 고도는 대략 315m이다. 관측 자료는 1994. 4. 5부터 4. 31까지 26일간 오전 9시부터 오후 5:30분까지 30분 간격(1일 18개 sets)으로 구성되어 있다.

CAGEX 자료의 연직 해상도는 지표면 기압에 따라서 45-50층으로 가변적이다. 수직 간격은 대기 상단에서부터 0.4, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 100mb층으로 나누어지고 100mb부터 700mb까지는 25mb씩 나누어진다. 또한 지표면으로부터 40mb가 감소할때까지는 10mb간격이고 거기서부터 지상 100mb가 감소할때까지는 20mb간격이고 그 이상 700mb까지는 25mb간격으로 나뉘어졌다. 만일 이때 700mb 부근에서 간격이 10mb이하로 남는다면 700mb는 무시한다. Fig. 3은 연직 구성을 그림으로 나타낸 것이다. 왼쪽부터 지면 기압이 1013mb, 1003, 900mb로 각각 50층, 49층, 45층인 경우이며

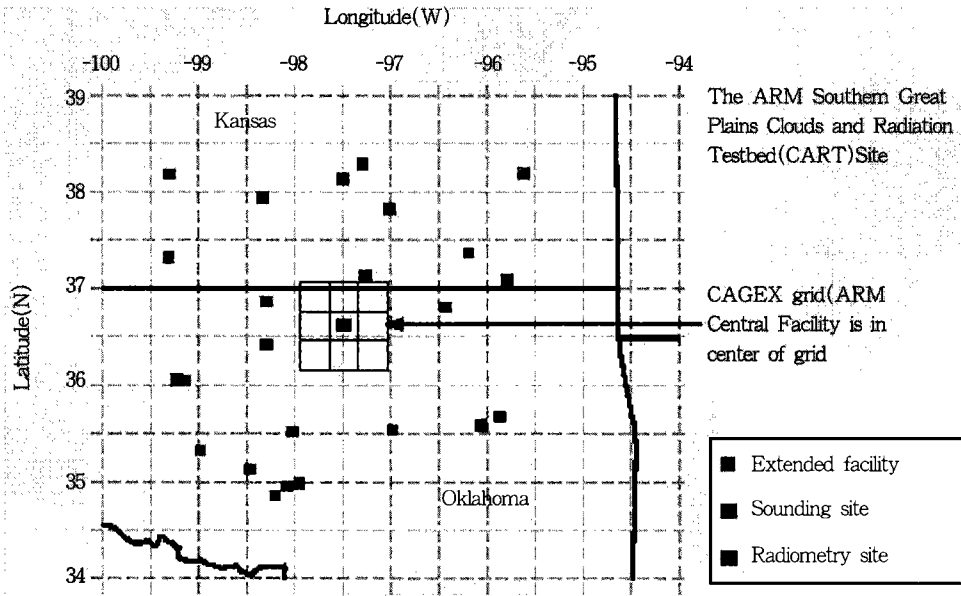


Fig. 2. The CERES/ARM/GEWEX Experiment(CAGEX). Map of CAGEX horizontal 3 by 3 grid with ARM surface facilities.

가운데 그림은 700mb가 무시된 경우이다.

CAGEX 실험에서 제공되는 자료는 크게 관측된 자료인 복사전달 모델 입력자료, 복사전달 모델에 의해 모의된 자료 그리고 복사 모델 검증을 위한 자료인 관측 자료 등 세가지이다.

복사모델 입력 자료로 제공되는 것은 기압, 기온, 수증기 혼합비, 오존혼합비 등의 대기 soundings, 태양 천정각, 태양상수, 지표면 알베도와 반사도, 에어로졸의 광학 두께 및 위성에서 측정된 구름 특성 자료 등이다. 본 연구에서는 기온과 상대습도는 표준 NWS(Numerical Weather Service) 라디오존데 자료로부터 데이터를 내삽해서 얻었다. 100hPa이상의 기온은 TOVS로부터 얻었고 sounding에서 대류권 상층의 상대습도는 불확실하므로 300hPa이상에서의 상대습도는 LOWTRAN 기후학에서 얻었다. 오존은 SBUV2(Solar Backscatter Ultraviolet radiometer2) 측정값으로부터 얻었다. 또한 태양 천정각에 대한 계산 과정은 Iqbal(1983)을 따랐다. 태양천정각은 31point 태양천정각의 코사인의 평균(30분 동안 매분 간격으로 계산한 값의 평균)을 얻어서 이 평균 코사인의 역함수를 취하였다. 시간적에 따라 31개 천정각이 CAGEX 시간에 모아졌다. 예를 들면 CAGEX 시간 단계 1(1409 GMT)에 대한 천정각은 1354 GMT부터 1424GMT까지 1분 간격으로 31개의 천정각을 사용하여 계산되어졌다. 태양 상수는 1365.0 w/m²를 사용하여 년도와 일에 대해 조정하였다. 이 관계식은 식(1)과 같다.

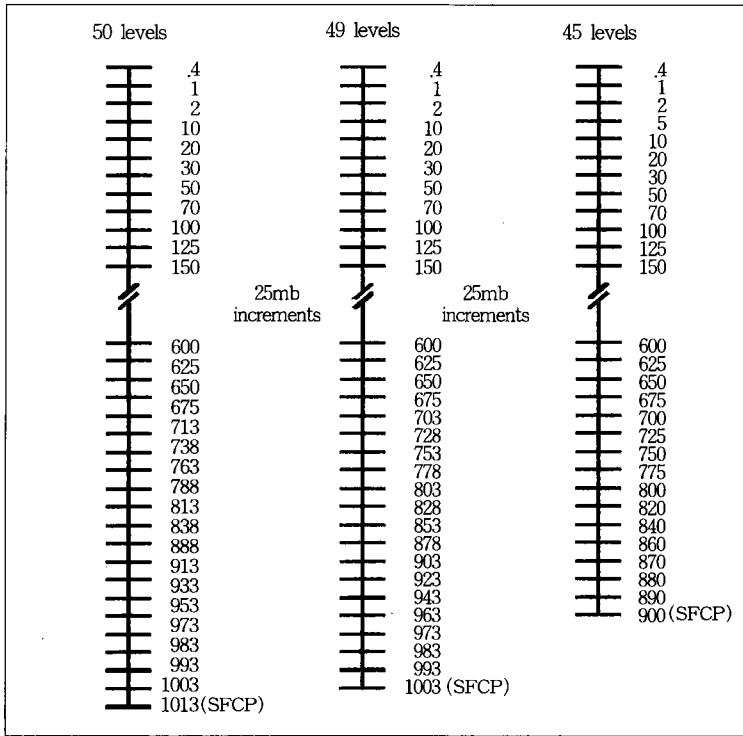


Fig. 3. Diagram of the vertical resolution of CAGEX

$$\text{태양 상수} = 1365.0 * r \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $r = 1 + a_0 * \sin((2*\pi/365,25)*(nd-365,25/4))$

$a_0 = 0,0167381$

$nd = 1958\text{년 } 1\text{월 } 4\text{일부터의 일수}$

알베도는 ARM의 상향 및 하향 전천일사계 측정값으로부터 계산되었고 반사도는 0.2와 4.0 microns 사이에 6개의 band에 대해 밴드반사도와 가중치로 제공된다. 이는 Briegleb et al.(1985)에서 키가 짧은 초지상의 밴드 반사도를 얻은 것으로 Table1 과 같다. CAGEX 반사도는 각 밴드에 대해 Briegleb et al.(1985) 가중치와 알베도(0.2106)를 곱해서 얻는다. 에어로졸 광학 두께는 ARM 결과이다. ARM은 MFRSR(Multi Filter Rotating Shadowband Radiometer) 를 이용하여 5개 단파 밴드 (0.412, 0.498, 0.606, 0.663, 0.856 microns)에 대해 측정하였다. 대륙에 대한 에어로졸의 단일 산란 알베도(single scattering albedo)와 비대칭 파라메타(asymmetry parameter)는 D' Almeida et al.(1991)의 에어로졸 광학특성 통계 테이블로부터 추출하였다. 그리고 에어로졸의 연직 분포는 Spinhirne et al.(1993)의 MicroPulse Lidar(MPL) 실험식에 의해 얻어졌다.

Table1. Short grass/meadow Spectral reflectances at 0.55° solar zenith angle provided by Briegleb et al.(1985)

spectral band	weight
0.2-0.7	0.1129
0.7-1.3	0.2831
1.3-1.9	0.3359
1.9-2.5	0.3359
2.5-3.5	0.3359
3.5-4.0	0.3359

CAGEX에서 제공되는 복사전달 모의 결과는 복사 전달 모델 중의 하나인 Fu-Liou d-four-stream code에 의해 모의된 것이다.

복사 모델 검증 자료는 관측된 대기 상·하단의 장파 및 단파 복사이다. 대기 상단의 flux 데이터는 GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite) 자료이고 지표면의 장파 및 단파 flux는 30분 평균을 취하기 위하여 시간적으로 1분 간격의 고해상도로 측정하였다. 장파 복사는 지구 복사계로, 단파 복사는 직달광과 산란광에 대해 각각 직달일사계, 차광전천일사계로 측정하였다. 본 연구에서는 복사 전달 모델을 이용하여 대기 보정을 하기 위해 복사전달 코드 LOWTRAN7의 모의를 조사하기 위하여 인터넷에서 제공된 CAGEX 자료와 LOWTRAN7의 모의 자료를 비교하였다. 연구는 크게 세 부분으로 나누어 진행하였다(Fig. 4).

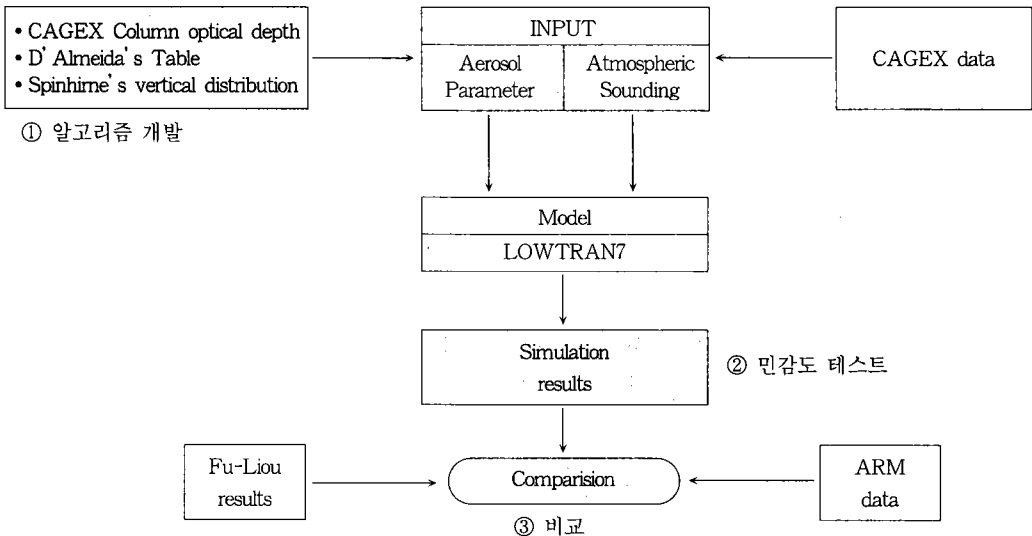


Fig. 4. Diagram of study area

첫번째로 복사 전달 모델에 의한 대기의 복사 모의를 위해서는 대기 물리에 관련된 정확한 모델 입력 자료가 필요하다. LOWTRAN7은 미국 AFGL에서 개발한 복사 전달 코드로써 0-50,000cm⁻¹범위에서 20cm⁻¹의 파장해상도로 대기복사 요소의 수직 분포를 계산하는 Band model method이다. 이 모델의 입력 자료는 모델에서 제공되는 대기 및 에어로졸 모형과 사용자 중심의 입력 자료를 구분하여 활용할 수 있다. 사용자 중심의 입력 자료는 크게 대기 sounding과 대기 가스 분포 그리고 에어로졸 변수들로 나눌 수 있다. 대기 sounding에는 기압, 기온, 그리고 가변 가스로 수증기, O₃, 고정된 가스로 CO₂, N₂O, CH₄, CO, O₂, N₂, HNO₃ 등이 있고 에어로졸 변수들로는 각 층의 소산계수(layer extinction coefficient), 파장의 함수인 단일 산란 알베도, 흡수 계수(absorption coefficient), 소산계수(extinction coefficient), 비대칭 파라메타 등이 있다. 이 중 대기 sounding과 가스 분포는 CAGEX 자료와 현재까지 나와 있는 여러 방법에 의해 유도될 수 있으나 에어로졸 변수들은 CAGEX 자료에서 관측된 대기주 광학 두께만 제공하기 때문에 D'Almeida(1991)의 광학 특성 테이블에 의해서 파장의 함수인 단일 산란 알베도, 흡수 계수, 소산계수, 비대칭 파라메타 등을 유도하고, 이 변수들과 관측된 대기주 광학 두께 및 Spinhime(1993)의 에어로졸 산란의 연직 분포 실험식에 의해 각 층의 소산계수를 유도한다. 이 에어로졸 광학 특성 도출에 관련된 부분은 3장에서 자세히 논의될 것이다.

두번째로 LOWTRAN7 코드가 대기중의 에어로졸에 얼마나 민감하게 반응하는지를 알아보기 위해 입력 자료를 모델에서 제공되는 대기 및 에어로졸 모형과 사용자 중심의 입력 자료를 변화시키는 간단한 사례연구를 통해서 LOWTRAN7 코드의 대기 중 에어로졸 영향의 민감도를 검토하였다.

세번째로 CAGEX 관측 자료와 첫번째 단계에서 유도된 에어로졸 특성 값을 이용하여 LOWTRAN7 코드에 의해 대기 복사 요소들을 모의하고 그 모의 결과를 CAGEX 관측 자료 중 ARM 자료 즉, 지구복사계, 직달일사계, 차광전천일사계에 의해 측정된 자료와 비교하여 대기효과에 대한 정량적 보정을 위한 LOWTRAN7 코드의 모의를 검증하였다.

III. 에어로졸 광학 특성 추출 방법

대기 성분은 태양광을 산란 또는 흡수한다. 따라서 위성자료, 특히 가시광선 영역의 자료는 태양광이 지표면에 도달되기전에 대기 성분(에어로졸 입자, 질소, 산소등의 분자등)에 의해 흡수 또는 산란되거나 지표면에 의해 반사되어 위성센서에 의해서 감지된 신호로써 수집된다(Fig. 1). 따라서 가시광선 영역의 지구관측 위성자료로부터 지표면 알베도, 지표면 온도와 같은 지구 환경 특성 정보를 추출하기 위해서는 대기 성분에 의한 태양광의 산란과 흡수의 고려가 필수적이다.

본 연구에서는 가능한한 대기의 모든 물리 변수들을 고려하여 복사전달 방정식을 풀어서 대기 효과를 보정하는 복사전달 모델의 모의를 조사하고자 한다. 이 방법에 의해 대기 효과를 보정하기 위해서 복사전달 모델을 운용하는데 입력 자료들이 필요하다. 2장에서 기술한대로 LOWTRAN7

모델의 입력 자료는 모델에서 제공되는 대기 및 에어로졸 모형과 사용자 중심의 입력 자료를 구분하여 활용할 수 있으나 실제 대기를 모의하기 위해서는 사용자 중심의 자료가 입력되어야 한다. 사용자 중심의 입력 자료 중 대기 sounding에는 기압, 기온, 그리고 가변 가스로 수증기, O_3 , 고정된 가스로 CO_2 , N_2O , CH_4 , CO , O_2 , N_2 , HNO_3 등이 있고 에어로졸 변수들로는 각층의 소산계수와 파장의 함수인 단일 산란 알베도, 흡수 계수, 소산계수, 비대칭 파라메타 등이 있다. 이 중 대기 sounding과 가스 분포는 2장에서 기술한대로 CAGEX 자료와 라디오존데 및 위성 자료에 의해 비교적 정확하고 쉽게 획득할 수 있다. 그러나 에어로졸 변수들은 CAGEX 자료에서는 관측된 대기주 광학 두께(column optical depth)만 제공하기 때문에 모델 입력 자료로 필요한 에어로졸 광학 특성 자료의 추출에 필요한 방법들이 개발되었다.

LOWTRAN7 코드의 모의를 위해서는 0.20-300.00 μm 까지 47개의 파장에 대해 0.55 μm 에서 1의 값을 갖도록 정규화된 단일 산란 알베도, 흡수 계수, 소산계수, 비대칭 파라메타 등이 필요하다. 이를 위해 D'Almeida et al.(1991)의 에어로졸의 광학 특성 테이블에 의해서 이들 광학 특성 값을 도출하였다. D'Almeida et al.(1991)은 에어로졸의 광학 특성을 0.30-40.00 μm 파장에 대해 장소(해양, 육지, 청정지역, 오염지역 등)에 따라서 8단계의 상대습도의 함수로 테이블화 했다. 40.00 μm 이상의 파장에 대한 광학 특성 값은 우리의 관점이 단파장 영역에 있으므로 40.00 μm 와 같은 값을 취하여도 큰 무리가 없을 것으로 보아 40.00 μm 에서의 광학 특성 값을 사용하였다. 0.55 μm 에서 단일 산란 알베도(ω)는 상대습도의 함수로써 Fig. 5과 같이 나타내어진다. Fig. 5은 상대습도가 높아짐에 따라서 단일 산란 알베도(ω) 값도 높아지는 것을 나타낸다.

그리고 각층의 소산계수는 CAGEX에서 제공하는 관측된 대기주 광학 두께, 위에서 구한 광학 특성 값들 및 Spinhirne(1993)의 에어로졸 산란의 연직 분포 실험식을 이용하여 아래와 같은 여러 단계를 거쳐서 도출할 수 있다.

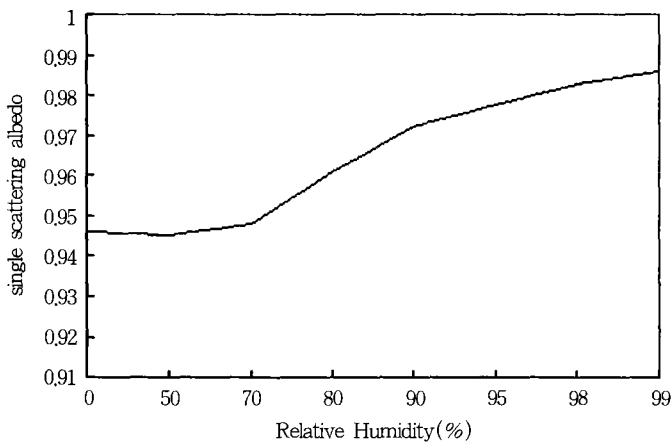


Fig. 5. Vertical distribution of aerosol single scattering albedo dependent on relative humidity.

각 층의 정규화된 소산계수를 구하기 위한 제 1단계는 Spinhirne(1993)의 라이더 측정 실험식인 식 (2)를 이용하여 에어로졸 산란 계수 (σ_s)의 연직 분포를 구하는 것이다. 식 (2)는 여러번의 라이더 측정 실험(Platt et al, 1988, Starr D.O. 1987)을 바탕으로 얻어진 식으로 대류권에서 변화가 심한 에어로졸 산란 계수를 잘 표현하기 위해서 지표면(0m)에서 17,000m까지 1m간격의 고해상도로 계산하도록 되어 있다. 그리고 경계층에서의 에어로졸 산란의 불연속을 고려하기 위해 배경 분포 값에 0.05km^{-1} 을 더하였다(식 (3)). Fig. 6는 고도에 따른 산란 계수를 나타낸 것이다. 고도 17km까지는 고도가 증가함에 따라서 산란 계수가 지수 함수적으로 감소하는 것과 1km 부근에서 불연속이 있는 것을 잘 나타내고 있다.

$$\sigma_s(h) = \sigma_0(1 + a)2\exp(h/b)/[a + \exp(h/b)]^2 + f(1 + a)2\exp(h/b')/[a + \exp(h/b')]^2 \dots\dots\dots (2)$$

$\sigma_s(h)$: Aerosol Scattering Coefficient at altitude h.

$\sigma_0, a, a', b, b', f$: constants.

For boundary layer, $0 < h < 1\text{km}$,

$$\sigma_s(h) = \sigma_s(h) + 0.05 \text{ km}^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

제 2단계에서는 D' Almeida et al.(1991)의 광학 특성 테이블로부터 추출한 각 층에서 단일 산란 알베도와 제 1단계에서 구한 산란 계수의 연직 분포를 이용하여 비정규화된 소산계수의 연직 분포를 구한다. Fig. 7은 비정규화된 소산계수의 연직 분포를 나타내며 비정규화된 소산계수는 고도

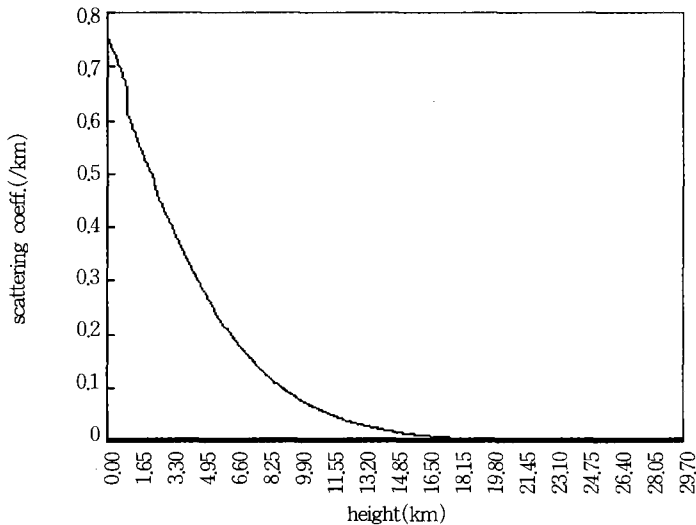


Fig. 6. Vertical distribution of aerosol scattering coefficient obtained spinhirne(1993)'s Micro Pulse Lidar measurement equation.

가 증가함에 따라 감소하는 것을 나타내고 있다.

제 3단계에서는 각 층의 광학 두께(layer optical depth)를 각 층의 소산계수와 각 층의 두께(layer thickness)의 곱으로 표현할 수 있기 때문에 이 관계에 의해 각 층의 두께와 제 2단계에서 구한 소산계수 이용하여 각 층의 광학 두께를 추출한다. Fig. 8은 각 층의 광학 두께를 나타낸 히스토그램이다. 고도가 낮은 쪽은 소산계수가 크지만 층 간격이 고해상도로 나누어져 있기 때문에 적은 값으로 나타났으나 고도가 높은 쪽은 층 두께가 크지만 소산계수 값이 작기 때문에 적은 값으로 나타났다. 따라서 만일에 층 두께를 등 간격으로 나눈다면 저층에서 가장 높은 값으로 나타날 것이다.

마지막 단계로 비정규화된 각층의 광학 두께는 관측된 대기주 광학두께와 계산된 광학두께의 비와 비정규화된 소산계수(Fig. 7)와의 곱으로 구한다. 계산된 대기 주 광학 두께는 Fig. 8의 각층의 광학 두께를 전 층에 대해 합하여 구한다. 또한 5개의 채널에서 관측된 대기주의 광학 두께는 Harrison et al.(1994)의 알고리즘에 의해 제의된 방법으로 지표면에서 직달광과 확산광의 MFRSR (Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer) spectral measurement로부터 획득할 수 있다. 본 연구에서는 이 중 0.55 μ m에서의 대기주의 광학 두께를 사용하였다. Fig. 9는 CAGEX에서 측정된 단파장 영역의 5개 band의 광학 두께를 나타낸 것으로 파장이 짧을수록 높은 값을 나타내고 있으며 이는 파장이 짧을수록 에어로졸에 의한 산란이 많이 일어난다는 사실과 잘 일치한다. 위의 방법으로 계산된 광학 두께와 측정된 광학 두께(Fig. 9)의 비와 비정규화된 소산계수(Fig. 7)를 곱하여 각 층의 정규화된 소산계수를 구하면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에 의하면 각 층의 정규화된 소산계수는

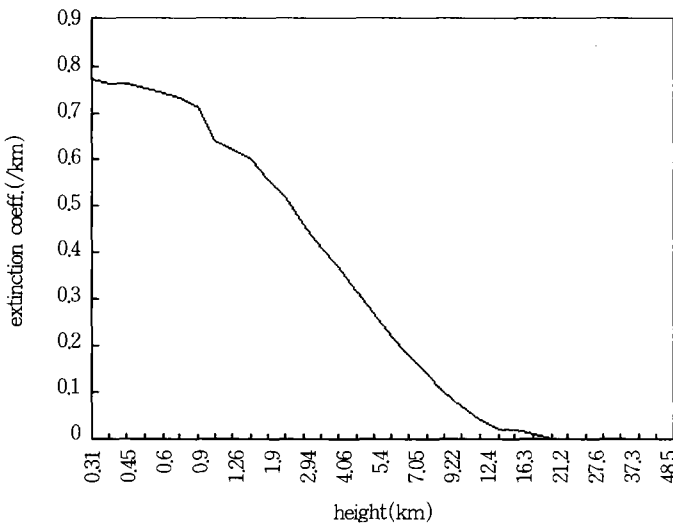


Fig. 7. Vertical distribution of unnormalized aerosol extinction coefficient.

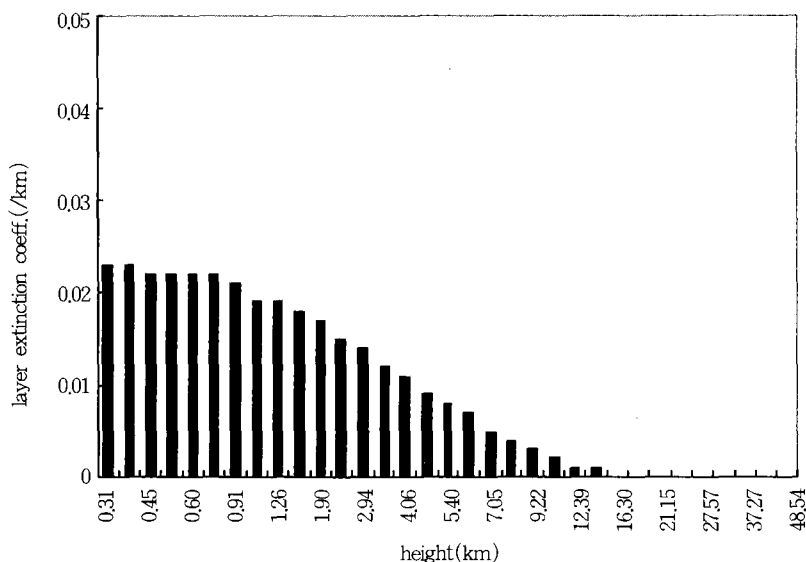


Fig. 10. The histogram of normalized layer extinction coefficient at the each layer.

낮은 층에서 더 높은 값을 보이고 있다.

결론적으로 본 연구에서는 사용자 중심의 입력 자료로 대기 sounding과 이상에서 도출한 에어로졸 변수들 즉, 각 층의 소산계수와 파장의 함수인 단일 산란 알베도, 흡수 계수, 소산계수, 비대칭 파라메타 등을 이용하여 LOWTRAN7 코드에 의해 복사 전달을 모의 하였다.

IV. LOWTRAN7 코드 모의에 의한 대기 중 에어로졸 영향의 민감도 실험

본 연구에서는 LOWTRAN7 코드가 대기중의 에어로졸을 얼마나 민감하게 모의하는지 알아보기 위해 CAGEX 관측데이터 중 맑은 날의 29개 데이터에 대해 입력 자료를 모델에서 제공되는 대기 및 에어로졸 모형과 사용자 중심의 입력 자료를 변화시키는 간단한 사례연구를 하였다. 각 사례의 특성은 Table 2와 같이 대기 sounding와 에어로졸 변수에 대해 모델에서 제공하는 입력 자료를 이용하는 경우와 사용자가 정의한 입력 자료를 이용한 경우로 나누었다. 사례 1의 경우는 대기 sounding 으로 US Standard 대기와 에어로졸에 대해서는 Rural 23km의 시정을 채택하였으며 사례 2의 경우는 대기 sounding은 CAGEX 관측 자료를 이용하고 에어로졸에 대해서는 Rural 23km의 시정을 채택하였다. 그리고 사례 3은 대기 sounding와 에어로졸에 대해 둘다 CAGEX 관측 자료를 이용하였다. 각 사례의 결과는 Table 3에 제시한 바와 같이 단파장 영역에 대해서 지표면에서의

상향 복사, 지표면으로의 하향 직달 복사 및 하향 확산 복사 그리고 대기 상단에서의 상향 복사 등에 대해 비교되어졌다.

이 절에서는 각 사례의 항목별로 LOWTRAN 모의 결과의 경향을 파악하고자 Table 3에서 29개 데이터셀에 대해 각 항목별로 단순 평균 취하여 제시하였다. 측정값에 대한 모의 값의 오차에 관한 정확한 비교는 더 자세한 통계방법이 필요하다. 이 방법은 사례 3과 측정값에 대한 비교로 다음 장에서 자세히 논의되고 있다.

Table 3에 의하면 지표면에서의 상향복사의 경우 사례 1, 2, 3은 지상 측정 값(CAGEX ARM)보다 각각 $20.80W/m^2$, $7.70W/m^2$, $2.90W/m^2$ 정도 적은 flux로 모의되었다. 즉, 입력자료로 대기 sounding과 에어로졸 변수로 각각 US standard대기와 모델에서 제공하는 23km시정을 이용한 경우보다 대기 sounding으로 CAGEX 관측 자료를, 에어로졸 변수로 모델에서 제공하는 23km시정을 이용한 경우가 측정값에 더 근사하게 나왔고 이것보다 대기 sounding과 에어로졸 변수 둘다 CAGEX 관측자료를 이용한 경우가 가장 측정값에 근사하게 나왔다.

대기 상단에서 상향 복사의 경우 사례 1, 2는 측정값(CAGEX ARM)보다 각각 $21.29W/m^2$, $23.81W/m^2$ 정도 높은 flux로 모의 되었고 사례 3은 $5.12W/m^2$ 적은 값으로 모의되었다. 대기 상단에서 상향 복사도 지표면으로의 하향 확산 복사와 마찬가지로 대기 sounding만 고려 했을때보다 대기 sounding과 대기 에어로졸을 동시에 고려한 경우에 측정값에 더 근사하게 모의 되었다.

지표면으로의 하향 직달 복사는 측정값보다 사례 1, 2는 각각 $102.15W/m^2$, $23.26W/m^2$ 정도 적은 값으로, 사례 3은 $10.72W/m^2$ 정도 더 큰 값으로 모의 되어 사례 3이 측정값에 가장 근사하게 모의

Table 2. Experiment case

Experiment	Atmosphere	Aerosols
case 1	US Standard	Rural 23km Visibility
case 2	CAGEX	Rural 23km Visibility
case 3	CAGEX	CAGEX
CAGEX ARM	ground truth flux	

Table 3. Fluxes obtained from case experiments(29 data sets)

unit : flux(Wm^{-2})

case \ flux	Upward at surface	Upward at TOA	Downward Direct at surface	Downward Diffuse at surface
CAGEX ARM	144.44	186.13	653.47	106.83
Liou	148.69	195.13	686.32	111.16
Exp1	123.64	207.42	551.33	201.09
Exp2	136.74	209.94	630.21	181.83
Exp3	141.54	181.01	664.19	107.47

되었다.

지표면으로의 하향 확산 복사는 측정값보다 사례 1, 2, 3에서 각각 94.26W/m^2 , 75.00W/m^2 , 0.64W/m^2 정도 더 큰 값으로 모의 되어 사례 3이 측정값에 가장 근사하게 모의 되었다.

이상에서 각 복사 항목별로 사례를 살펴본 결과 복사 모델 입력 자료로 대기 sounding과 에어로졸 변수에 대해 각각 모델에서 제공하는 US standard 대기와 시정 23km를 사용한 경우(사례 1)와 대기 sounding과 에어로졸 변수에 대해 각각 CAGEX 대기와 모델에서 제공하는 시정 23km를 사용한 경우(사례 2)와 대기 sounding과 에어로졸 변수에 대해 동시에 CAGEX 대기를 사용한 경우(사례 3)에 사례 3이 CAGEX ARM 관측치에 가장 근사하게 모의 되었다. 특히 사례 1과 사례 2는 지표면에서의 하향 산란 복사에서 과다하게 큰 Flux 값으로 모의되었다. 이는 지표면으로의 하향 산란 복사는 에어로졸에 의해 가장 많은 영향을 받고 사례 1, 2에서 실제 대기의 에어로졸을 고려하지 않음으로 인한 차이값으로 사료 된다. 따라서 복사전달 모델을 이용하여 대기복사를 모의하고자 할 때는 반드시 에어로졸을 고려하여야 한다. 또한 복사 전달 모의에서 대기 sounding만 고려한 경우보다 대기 sounding과 에어로졸을 동시에 고려한 경우에 지표면으로의 하향 확산 복사가 실제 값에 가깝게 모의된 것은 LOWTRAN7이 에어로졸에 의한 영향을 민감하게 모의 하는 것으로 추측 할 수 있다.

사례 3은 Fu-Liou모델의 모의 결과 값보다 전 항목에서 측정값에 근사하게 모의되었다. 따라서 간단한 이 사례 연구를 통해 LOWTRAN7에 의한 가시광선 영역의 모의는 에어로졸 변수에 민감하게 반응하는 것으로 판단하였다.

V. 복사 전달 모의 및 ARM 자료와 비교

본 연구에서는 대기효과에 대한 정량적 보정을 하기 위해 복사 전달 모델 LOWTRAN7 code의 활용 가능성을 조사하였다. 이를 위해 CAGEX 실험 자료의 총 468 자료군 중에서 완전히 맑은 날 31 개 자료군을 이용하여 대기 sounding과 3장에서 기술된 알고리즘을 이용하여 에어로졸 광학 특성 변수들을 추출하여 이들을 입력 자료로 하여 복사 전달 모델 LOWTRAN7을 이용하여 대기복사를 모의하였다. 모의 결과 중 단파장 영역에 한하여 지표면에서의 상향 복사, 지표면으로의 하향 직달 복사, 하향 확산 복사, 대기 상단에서의 상향 복사에 대해 LOWTRAN7 모델 모의 결과 값, CAGEX의 ARM 복사 측정값 그리고 CAGEX에서 제공하는 복사전달 모델 모의 결과인 Fu-Liou 모델의 모의 결과 값을 비교하였다. Fig. 11은 CAGEX ARM 복사 측정값과 LOWTRAN7의 지표면에서의 상향 복사, 지표면으로의 하향 직달 복사, 지표면으로의 하향 확산 복사, 대기 상단에서의 상향 복사를 각각 Fig. 11 (a), (b), (c), (d)에 도시하였다. Fig. 11에 의하면 단파장 영역에서 지표면에서의 상향 복사, 지표면으로의 하향 직달 복사는 LOWTRAN7 모델에 의한 모의 결과 값과 CAGEX ARM 측정값이 비교적 잘 일치하였다. 그러나 지표면으로의 하향 확산 복사, 대기 상단에서의 상향 복사는 LOWTRAN7 모델에 의한 모의 결과 값과 CAGEX ARM 측정값이 약간 차

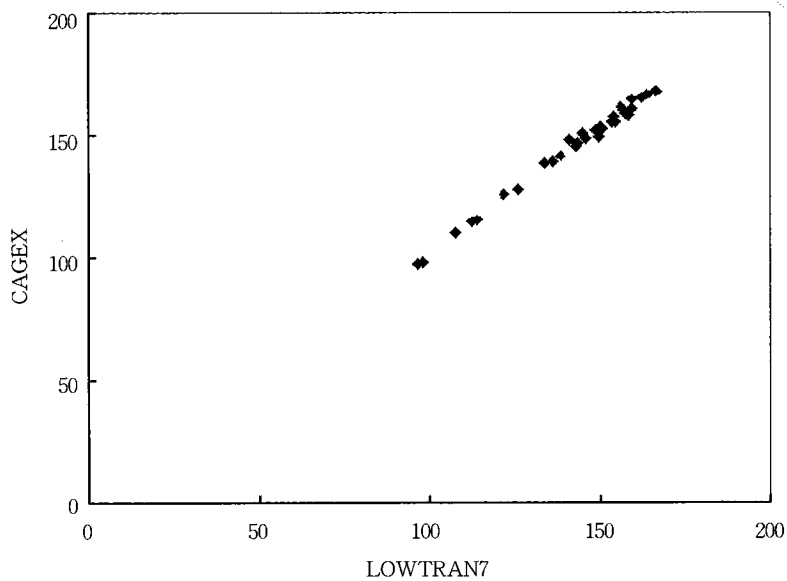


Fig. 11. Calculations with LOWTRAN7 compared with observations for clear-sky conditions:
(a) upward shortwave flux at the surface (Unit : Wm^{-2}).

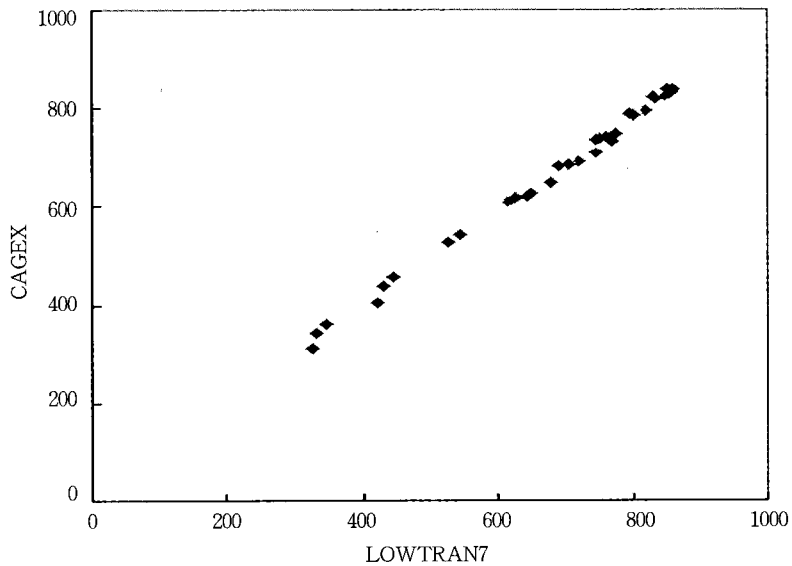


Fig. 11. Continued: (b) downward direct shortwave flux at surface (Unit : Wm^{-2}).

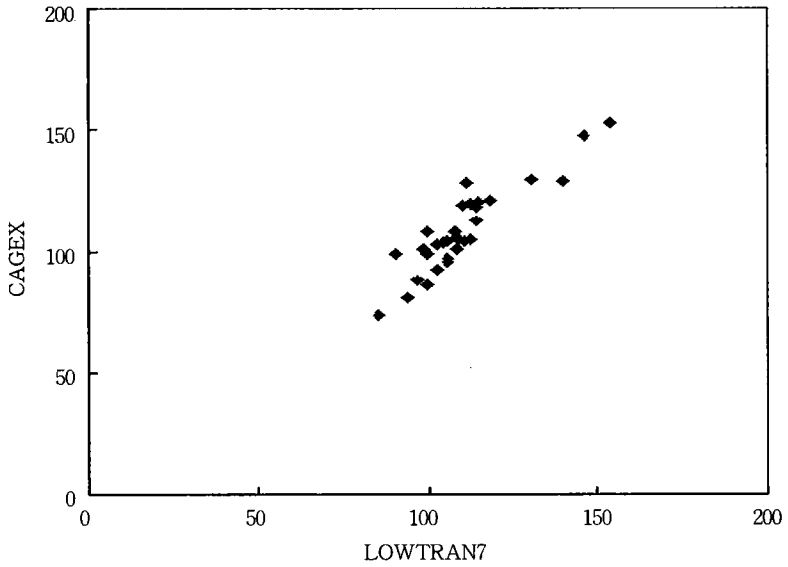


Fig. 11. Continued : (c) downward diffuse shortwave flux at the surface(Unit : Wm^{-2})

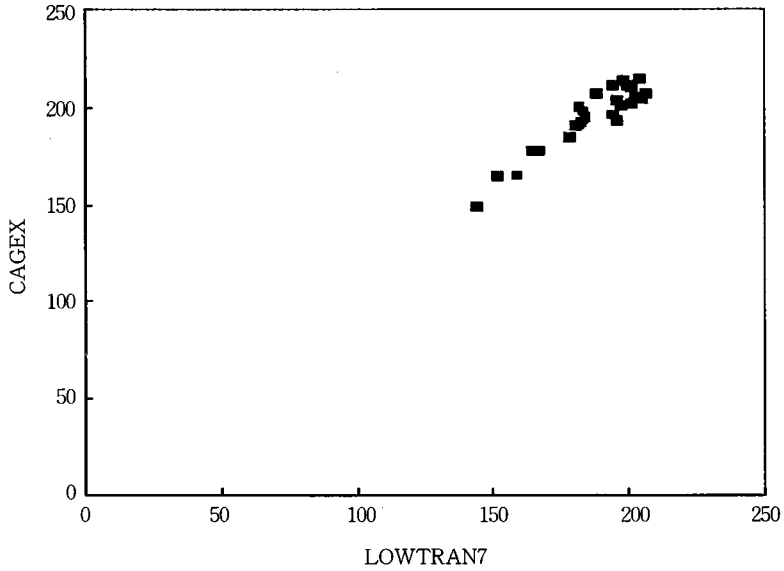


Fig. 11. Continued : (d) upward shortwave flux at the TOA(Unit : Wm^{-2}).

Table 4. Comparison between model simulations and observations of radiance flux component.

(W/m²)

	variable	Upward at surface	Upward at TOA	Downward direct at surface	Downward diffuse at surface
difference between LOWTRAN7 and CAGEX	absolute deviation	1.5	5.2	10.4	6.0
	standard error	1.9	6.1	12.9	7.5
	standard error(%)	1.3	3.3	1.9	6.9
	mean	-2.2	6.9	15.1	1.9
difference between Fu-Liou and CAGEX	absolute deviation	0.9	5.0	11.1	6.7
	standard error	1.2	6.1	14.0	8.2
	standard error(%)	0.8	3.3	2.1	7.6
	mean	3.8	8.4	30.3	2.8

이가 나는 것을 볼 수 있다. 지표면으로의 하향 확산 복사는 에어로졸에 의한 산란의 영향을 가장 많이 받는 항목이므로 LOWTRAN7 코드가 에어로졸의 영향을 모의하는데 오차가 발생하였을 것으로 추측된다.

LOWTRAN7 코드가 측정값을 얼마나 근사하게 모의 할 수 있는지를 통계적으로 확인하기 위해 완전히 맑은 날 31개 자료군에 대해 단파장 영역에 대해서 지표면에서의 상향 복사, 대기 상단에서의 상향 복사, 지표면으로의 하향 직달 복사, 지표면으로의 하향 확산 복사등의 항목에 대해서 Fu-Liou 모의 값과 LOWTRAN7 모의 값을 CAGEX의 ARM 관측치와 각각 비교하였다. Table 4는 LOWTRAN7 모의 결과와 CAGEX ARM 측정값과의 차(Δ (LOWTRAN7-CAGEX))와 Fu-Liou 모델 결과와 CAGEX ARM 측정값과의 차(Δ (Fu-Liou-CAGEX))의 값에 대해 각각 절대변이, 표준편차, 표준오차, 평균을 비교하였다.

Table 4에 의하면 지표면으로의 하향 직달 복사는 Δ (LOWTRAN7 -CAGEX)의 절대변위, 표준편차, 표준오차 그리고 평균값이 각각 10.4W/m², 12.9W/m², 1.9%, 15.1W/m²로 측정값에 근사하게 모의되었고 이 결과는 Δ (Fu-Liou - CAGEX)의 절대변위 11.1W/m², 표준편차 14.0W/m², 표준오차 2.1% 그리고 평균값 30.3 W/m²보다 측정값에 더 근접하게 모의되었다는 것을 알 수 있다. 지표면에서의 하향 확산 복사는 Δ (LOWTRAN7 -CAGEX)의 절대변위, 표준편차, 표준오차 그리고 평균값이 각각 6.0W/m², 7.5W/m², 6.9%, 1.9W/m²로 측정값과 비교적 큰 차이로 모의되었으나 Δ (Fu-Liou-CAGEX)의 절대변위 6.7W/m², 표준편차 8.2W/m², 표준오차 7.6%, 그리고 평균값 2.8W/m²보다는 모든 변수가 적은 값이어서 Fu-Liou의 모의 결과보다 측정값에 더 근접하게 모의되었다는 것을 알 수 있다. 지표면에서의 상향복사는 Δ (LOWTRAN7-CAGEX)의 평균값이 -2.2W/m²로 대체로 측정값보다 적은 값으로 모의되었으나 절대 변위가 1.5W/m², 표준편차가 1.9W/m² 그리고 표준 오차가 1.3%이어서 LOWTRAN7 모의 결과는 측정값과 비교적 잘 일치한다. 이 값들이 Δ (Fu-Liou-CAGEX)의 절대변위 0.9W/m², 표준편차 1.2W/m², 표준 오차 0.8%, 평

균 3.8W/m^2 등과도 비교적 일치한다. 다만 Δ (LOWTRAN7-CAGEX)이 Δ (Fu-Liou-CAGEX)보다 표준 오차가 약간 높게 나타나는 것에 대해서는 LOWTRAN7 모델은 지표면에서의 상향 복사값을 직접 생성해 주지 않기 때문에 사용자가 모의된 각 항목의 복사값과 관련 변수들을 이용하여 산출하여야 하기 때문에 이 과정에서 미소한 오차가 발생 할 수 있을 것으로 설명할 수 있다. 그러나 LOWTRAN7에 의해 모의된 결과는 측정값에 아주 근접하였다. Δ (LOWTRAN7-CAGEX)의 대기 상단에서의 상향 복사는 평균값이 6.9W/m^2 로 측정값에 비해서는 더 높은 값으로 모의되었지만 Δ (Fu-Liou-CAGEX)의 평균값 8.4W/m^2 에 비하면 측정값에 더 근사하게 모의되었다. 또한 Δ (LOWTRAN7-CAGEX)의 절대변위가 5.2W/m^2 , 표준편차가 6.1W/m^2 그리고 표준 오차가 3.3%이어서 Δ (Fu-Liou-CAGEX)의 절대변위가 5.0W/m^2 , 표준편차가 6.1W/m^2 그리고 표준 오차가 3.3%과 비교 해 볼 때 LOWTRAN7의 모의 결과는 Fu-Liou의 모의 결과와도 거의 일치한다.

이상의 결과를 종합해볼 때 CAGEX ARM 값에 대한 LOWTRAN7 모의 값의 표준 오차는 다른 항목(지표면에서의 상향 복사 1.3%, 대기 상단에서의 상향복사 3.3%, 지표면으로의 하향 직달 복사 1.9%)에 비해 지표면으로의 하향 산란 복사(6.9%)가 크다는 것을 알수 있다. 가시광선 영역에서의 지표면으로의 하향 산란 복사는 주로 에어로졸에 의한 태양광의 산란에 의해 일어나므로 이 오차가 크다는 것은 에어로졸에 의한 산란을 정확히 모의하지 못하기 때문으로 해석되고 이 오차는 복잡한 지표면-대기시스템에 의해 다른 복사 항목들의 오차 발생에 영향을 주는 것으로 판단된다. 따라서 이 에어로졸에 의한 산란 효과를 잘 고려하면 LOWTRAN7을 이용하여 대기 복사를 모의할 때 지표면으로의 하향 산란 복사 뿐만 아니라 다른 항목의 오차도 줄일 수 있어 전체적으로 관측치에 더욱 근사한 대기 복사 모의를 할수 있을 것으로 기대된다. 또한 지표면에서의 하향 산란 복사 항목의 측정값에 대한 오차는 Fu-Liou의 모의 값(7.6%) 보다 LOWTRAN7 모의 값(6.9%)이 더 적었다. 따라서 이들 결과를 통해 대기 복사 전달모델을 이용하여 대기효과를 보정하는데 있어서 에어로졸에 관한 고려가 더 이루어진다면 LOWTRAN7 코드는 적절한 복사전달 코드라고 판단 된다.

VI. 요약 및 결론

위성 탐사 지구 관측 자료, 특히 가시광선 영역의 자료는 태양광이 지구 대기계와 복잡한 상호작용을 거친후 위성센서에 의해서 수집된다. 따라서 가시광선 영역의 지구 관측 위성 자료를 정량적으로 분석하기 위해서는 대기의 산란과 흡수에 의한 대기효과에 대한 정량적 보정이 필수적이다. 본 연구에서는 위성 자료의 대기효과에 대한 정량적 보정을 위해서 복사 전달 모델의 모의 가능성을 조사하기 위하여 현재 원격 탐사 분야에서 대기 보정에 널리 활용되고 있는 LOWTRAN7 코드의 복사 모의를 조사하였다. 이를 위해 LOWTRAN7 복사 전달 모의 결과와 CAGEX 자료 중 ARM(pyrgometers, pyrheliometer, shadow pyranometer) 관측 자료를 비교하였다. 연구 내용을 요약

하면 아래와 같다.

- (1) 대기 복사 모델을 이용한 정확한 복사 전달 모의를 위해서는 대기 sounding 및 에어로졸에 대한 자세한 입력 자료가 필요하다. LOWTRAN7 모델의 입력 자료는 모델에서 제공되는 대기 및 에어로졸 모형과 사용자 중심의 입력 자료를 구분하여 활용할 수 있으나 실제 대기를 모의하기 위해서는 사용자 중심의 자료가 입력되어야 한다. 사용자 중심의 입력 자료 중 대기 sounding에 관한 자료는 라디오 존데 자료나 위성 자료등에 의해 비교적 쉽게 획득할 수 있으나 에어로졸 변수에 관한 자료는 CAGEX 자료에서와 같이 관측된 대기주 광학 두께만 제공할 수 있기 때문에 이 자료로부터 에어로졸 광학 특성을 도출하는 방법의 개발이 요구된다. 본 연구에서는 CAGEX 관측 자료의 일부인 대기주 광학 두께, D'almeida의 대기 에어로졸 광학 특성 테이블, Spinhime의 산란 계수의 연직 분포 식을 이용하여 에어로졸 복사 특성값을 도출하는 방법이 개발되었다.
- (2) 대기 복사 전달 모델의 대기 sounding과 에어로졸 민감도를 조사 및 이해하기 위하여 입력 자료를 사례별로 변환 시키면서 모의하여 그 결과와 관측 자료를 비교하였다. 모델에서 제공하는 입력 자료와 사용자가 정의하는 입력 자료 (CAGEX 자료)를 사용하는 경우, LOWTRAN7 에 의한 가시광선 영역의 모의는 에어로졸 변수에 민감하게 반응하였다. 따라서 LOWTRAN7 코드는 대기 sounding 보다 에어로졸 특성 변화에 의해 flux 가 크게 영향을 받는다는 것을 보였다.
- (3) CAGEX 관측 자료와 (1)에서 추출된 에어로졸 변수들을 이용하여 LOWTRAN7 코드에 의해 단파장 영역에서 대기 복사 항목들을 모의하였고 이 모의 결과를 CAGEX 관측 자료 중 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 자료와 비교하였다. 비교 결과 LOWTRAN7 모의 결과는 CAGEX ARM 측정값에 비해 표준 오차가 지표면에서의 하향 직달 복사, 지표면에서의 하향 확산 복사의 경우 각각 1.9%, 6.9%로 모의되었고 Fu-Liou 모의결과는 CAGEX ARM 측정값에 비해 표준 오차가 지표면에서의 하향 직달 복사, 지표면에서의 하향 확산 복사의 경우 각각 2.1%, 7.6%로 모의되어 LOWTRAN7 모의 결과는 Fu-Liou 모의 결과보다 적은 차이지만 측정값에 더 정확하게 모의되었다.

이 결과에 의하면 CAGEX 측정값에 대한 LOWTRAN7 모의 값이 지표면에서의 하향 직달 복사 (1.9%)에 비해 지표면에서의 하향 산란 복사(6.9%) 의 표준 오차가 크다는 것을 알수 있다. 가시광선 영역에서의 지표면에서의 하향 산란 복사는 주로 에어로졸에 의한 태양광의 산란에 의해 일어나므로 이 오차가 크다는 것은 에어로졸에 의한 산란을 정확히 모의하지 못하기 때문으로 해석된다. 또한 CAGEX 측정값에 대한 LOWTRAN7 모의 값의 표준 오차가 지표면에서의 상향 복사와 대기 상단에서의 상향복사도 5% 이하로 측정값에 근사하게 모의 되었다. 또한 지표면에서의 하향 산란 복사의 오차는 복잡한 지표면-대기시스템에 의해 다른 항목들의 오차 발생에 영향을 준다. 따라서 이 에어로졸에 의한 산란 효과를 잘 고려하면 LOWTRAN7을 이용하여 대기 복사를 모의할 때 지표면에서의 하향 산란 복사 뿐만 아니라 다른 항목의 오차도 줄일 수 있어 전체적으

로 더욱 정확한 대기 복사 모의를 할수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구(과제번호: P00262)는 정보통신부 정책지정과제로 수행되었습니다. 대기 에어로졸 기후학에 관한 문헌을 제공해준 광주과학원 김영준 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- Berk, A., L. S. Bernsteins, D. C. Robertson, 1989. MODTRAN : Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122
- Briegleb, B. P., P. Minnis, V. Ramanathan, and E. Harrison, 1986. Comparison of regional clear-sky albedos inferred from satellite observations and model computations, *J.Climate Appl. Meteor.*, 21:1168-1171.
- Clarlock, T.P. and T.L.Alberta, 1996. The CERES/ARM/GEWEX Experiment(CAGEX) for the retrieval of radiative fluxes with data, *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- D'Almeida G. A., P. Koepke, E. P. Shettle, 1991. *Atmospheric Aerosols Global Climatology and Radiative Characteristics*, A Division of Science and Technology Corportion, Hampton, Virginia, USA
- Fu Q., and K.-N. Liou, 1992. On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 49: 2139-2156.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation.*, Academic Press, Toronto, Ontario, Canada
- Kaufman, Yoram J. and Didier Tanre, 1996. Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: From AVHRR to EOS-MODIS, *Remote Sens. Environ.*, 55:65-79.
- Kneizys, F. X. E. P. Shettle, L.W. Abreu, J. H. Chetwynd, G.P. Anderson, W. O. Gallery, J.E. A. Selrby and S. A. Clough, 1988. User Guide to LOWTRAN7, AFGL-TR-88-0177
- Harrison, L., J. Michalsky, and J. Berndt, 1994. Automated multifilter rotating shadow-band radiometer, an instrument for optical depth and radiation measurement. *Appl. Opt.*, 33:5118-5132.
- Mitchell, R.M. and D.M. O'Brien, 1993. Correction of AVHRR shortwave channels for the effects of atmospheric scattering and absorption, *Remote Sens. Environ.*, 46:129-145.
- Platt, C.M.R. et al., 1988. An experimental cloud lidar pilot study(ECLIPS), International Council of scientific Unions and World Meteorological Organization, Rep. WMO/TD-No. 251

- Spinhime, J. D., 1993. Micro Pulse Lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(1), 48-54
- Starr, D.O. 1987. A cirrus cloud experiment: Intensive field observations planned for FIRE, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67: 119-124.
- Tanre, D., C. Deroo, P. Duhaut, M. Herman and J.J. Morcrette, 1990. Discription of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S, *Int. J. Remote Sensing*, 11(4):659-668.
- Tanre, D., J. L. Deuze, M. Herman, and J.J. Morcrette, 1997. Second Simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An Overview, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 675-686