

GMS-5 위성의 가시자료를 이용한 동아시아 지역의 에어로솔 광학두께 추정

엄영대 · 손병주*

서울대학교 지구환경과학부

(2005년 10월 21일 접수; 2005년 11월 28일 승인)

Estimation of Aerosol Optical Thickness over East Asia Using GMS-5 Visible Channel Measurements

Young-Dae Urm and Byung-Ju Sohn*

School of Earth and Environmental Sciences
Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 21 October 2005; in final form 28 November 2005)

Abstract

One algorithm has been developed for retrieving aerosol optical thickness from GMS-5 visible channel measurements, and then the algorithm was applied for obtaining the geographical distribution of aerosol optical thickness over East Asia during April 2002. Algorithm employs a look-up table based upon radiative transfer calculations with solar geometry, aerosol optical thickness, and surface albedo as inputs. Validation was conducted by comparing retrieved aerosol optical thickness with measured values from ground-based sky radiation measurements at Anmyon Do, Korea. It was found that the correlation coefficient is 0.71 with -0.03 of bias and 0.34 of root mean square error, suggesting that the algorithm developed in this study can be used for estimating aerosol optical thickness in a quantitative sense.

Key words: aerosol optical thickness, GMS-5, aerosol model, surface albedo

1. 서론

대기 중의 에어로솔은 태양 복사 에너지를 산란시키고 흡수하여 복사수지를 변화시켜 기후에 직접적인 영향을 줄 뿐 아니라 구름의 응결핵으로 작용하여 지구 복사수지에 간접적인 영향을 주고 있다 (IPCC, 2001). 특히 지구 기후에 대한 대기 에어로솔의 효과는 기후 변화를 규명하고 예측함에 있어 불확실을 야기하는 주원인을 제공하고 있다 (IPCC, 2001). 에어로솔이 기후에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 전 지구규모에서

에어로솔의 농도, 크기 분포, 구성 및 광학적 특성의 이해가 전제된다. 주로 육상에서 이루어지는 지상 관측은 에어로솔의 물리적 특성 및 화학적 특성에 대한 자세한 중요한 정보를 제공한다 (Huebert *et al.*, 2003). 그러나 지역에 따라 에어로솔의 시간적, 공간적인 분포 특성이 매우 다양하게 나타나고 있어 지상관측만으로는 전 지구 규모의 에어로솔에 대한 특성과 이동에 대한 종합적인 이해는 그 한계가 있다 (Higurashi *et al.*, 1999). 이러한 이유로 해양을 포함한 전지구 규모의 에어로솔의 광학적 특성을 규명하기 위해 인공위성 관측자료를 사용하는 것은 자연스러운 일이다.

인공위성을 이용한 에어로솔의 연구는 비록 센서가 에어로솔 탐사를 목적으로 제작되지 않았더라도 지표요소를 포함한 다양한 지구물리변수를 복원함에 있어서 대기보정을 위해 에어로솔의 효과를 고려하게 되었고, 따라서 인공위성 관측에 의한 에어로솔 측정

*Corresponding Author: Prof. Byung-Ju Sohn, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Mail Code NS80, Seoul, 151-747, Korea
Phone : +82-2-880-7783, Fax : +82-2-872-8156
E-mail: sohn@snu.ac.kr

의 가능성이 제기되었다 (Gordon and Wang, 1994).

극궤도 위성을 이용하여 에어로솔의 광학적 특성을 밝히는 연구는 이미 여러 연구자들에 의해서 행해져 왔다. Higurashi and Nakajima (1999)는 NOAA AVHRR 센서에 있는 두 채널 ($0.64 \mu\text{m}$, $0.87 \mu\text{m}$) 관측자료를 사용하여 조건표 (LUT: Look-up Table) 방법을 통해 $0.5 \mu\text{m}$ 에서의 에어로솔의 광학적 두께와 Ångström 지수를 복원하였다. 유사한 복원방법이 ADEOS (Advanced and Directionality Earth Observing Satellite)의 POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance) 관측치에 적용되기도 하였다 (Goloub *et al.*, 1999). 그러나 이러한 인공위성 방법은 그 적용이 주로 해양 지역에 국한되어 이루어졌다. 해양 지역의 인공위성 관측에서 sunglint를 제외하면 해수 표면에서 반사되는 광량은 매우 작다. 따라서 레일레이 산란과 에어로솔에 의한 산란효과 만으로도 대기상단에서의 복사량을 잘 기술할 수 있으며, 따라서 잘 알려진 레일레이 산란을 제거할 때 에어로솔의 광학적 두께를 육지에서의 산출에 비해 정확한 산출이 가능하다 (Gordon and Wang, 1994). 그러나 육지에서의 표면 알베도는 해양에 비해 커서 에어로솔의 광학적 두께를 복원할 경우 복원하고자 하는 지역의 표면 알베도가 고려되어야 한다.

그러나 극궤도 위성의 가시광 관측이 한 지역을 기준으로 약 1회 정도 이루어지고 있고 관측영역도 관측 폭을 갖는 국지적인 시공간의 관측 한계가 존재한다. 이러한 이유로 최근 극궤도 위성 관측에 의한 에어로솔 산출이 비교적 성공적으로 이루어지고 있음에도 불구하고 넓은 영역에 걸쳐 발생하여 이동을 하는 황사와 같은 에어로솔을 감시하고자 하는 경우 그 이용가치는 매우 작다. 이와 대조하여 정지기상위성에 탑재된 가시채널은 그 수가 극궤도 위성에 비하여 적고 관측 정확도가 낮아 에어로솔 산출물의 정확도는 떨어지나 관측영역이 광대하고 관측회수가 많아 황사발생 및 이동경로 등의 활용에서 많은 가능성을 제시하고 있다.

이 연구에서는 정지기상위성의 활용을 목적으로 표면 알베도를 위성자료로부터 산출할 수 있을 때, 표면 알베도와 대기상부 알베도사이의 차를 이용하여 에어로솔 광학두께의 계산이 가능하다고 가정하여 정지기상위성의 가시채널 관측자료로부터 에어로솔의 광학적 두께를 산출하는 방법을 개발하였다. 이를 위해 일본의 GMS-5 (Geostationary Meteorology Satellite 5) VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)

가시광선 채널 알베도 자료와 복사전달 모델을 이용하여 동아시아 지역의 표면 알베도를 산출하였다. 이후 복사 전달 모델에서 작성된 LUT를 이용, 산출된 지표면 알베도와 태양의 천정각, 그리고 대기 상부에서의 알베도를 적용하여 에어로솔의 광학두께를 추정하였다. 추정된 에어로솔 광학두께의 검증을 위해 안면도 지구대기 관측소에서 skyradiometer로 관측한 지상 관측 자료로부터 얻은 에어로솔의 광학적 두께와 비교하였다.

2. 알고리즘

2.1 알고리즘의 구성

GMS-5는 1995년에 발사되어 적도상 140°E , 고도 약 $36,000 \text{ km}$ 에 위치하여 관측을 수행한 정지궤도 위성으로 2005년 4월 현재 수명을 다한 위성이다. 본 연구에서는 동아시아 영역 (25°N - 45°N ; 95°E - 145°E)에서 1시간 간격의 GMS-5 가시광선 채널 (0.55 - $0.90 \mu\text{m}$)의 알베도 자료를 복사전달 모델을 사용하여 구축한 LUT에서의 알베도와 비교함으로써 에어로솔의 광학적 두께를 산출하는 알고리즘을 개발하였다.

Figure 1은 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. LUT의 구축을 위해 주어진 표면 알베도 (α_s), 태양 천정각 (θ_0), 에어로솔 광학두께 (τ_a)를 입력자료로 하여 복사 전달모델을 수행하며, 입력자료에 대응하는 대기상단에서의 알베도 (α_p)를 계산한다. 따라서 α_p 는 LUT를 통해 (α_s , θ_0 , τ_a)와 연결되어 (α_p , α_s , θ_0) 값으로부터 inversion을 통해 τ_a 를 구하게 된다.

GMS-5 위성의 픽셀자료를 선택한 동아시아 연구영역에서 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 간격으로 격자화하며, 각 격자점에 대한 위도, 경도, 시간에 따른 복사 전달 모델의 입력 자료를 구축한다. Inversion에 필요한 α_p 로서 GMS 관측치가 사용되고, θ_0 는 주어진 시간과 장소에서 계산이 가능하므로 (Liou, 2002), LUT의 구축을 위해서는 표면 알베도의 산출이 필요하다. 표면알베도 산출에 대한 설명은 2.4 절에 제시하였다. 이후 산출한 광학두께는 skyradiometer 관측자료와 비교하여 산출 알고리즘의 정확도를 판단하였다.

2.2 에어로솔 모델

LUT 구성을 위한 복사전달 모델의 수행에는 에어

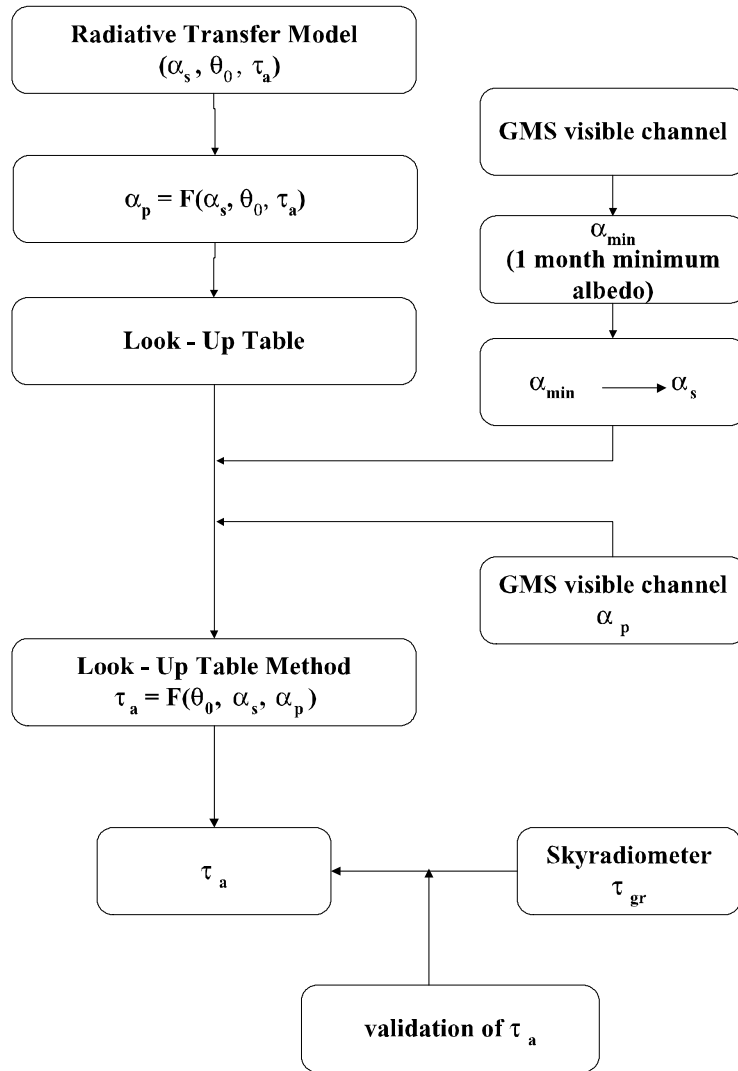


Fig. 1. A schematic diagram for the retrieval of aerosol optical thickness from GMS-5 visible channel measurements.

로솔 모델의 구축이 선결되어야 한다. 모델 에어로솔의 크기분포는 두 개의 모드 (n=1,2)를 갖는 로그-정규 분포를 갖는다고 가정한다 (Shettle, 1984).

$$\frac{dV}{d\ln r} = \sum_{n=1}^2 C_n \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\ln r - \frac{\ln R_n}{\ln S_n} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서 첨자 n은 모드를 나타내며, C_n은 각 모드에서 최대값을, R_n은 각 모드에서의 에어로솔의 반경을 나

타내며, r은 에어로솔 반경을, S_n은 ln r의 표준 편차를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 식 (1)의 변수 값으로 Higurashi *et al.* (1999)에 의해 사용된 R₁=0.17 μm, R₂=3.44 μm, S₁=1.96, S₂=2.37을 모델 입력 변수로 사용하였다. 식 (1)에서 결정되지 않은 두 모드에서의 상수인 C₁과 C₂는 이 사이의 비 γ (= C₂/C₁)가 식 (2)에 나타낸 Ångström 지수 α에 의해 표현될 수 있는 사실을 이용한다.

$$\tau_{\lambda_2} = \tau_{\lambda_1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\alpha(\lambda_1, \lambda_2)} \quad (2)$$

이러한 이유는 γ 가 에어로솔 사이즈를 나타내고 있으며 Ångström 지수 역시 에어로솔 사이즈의 정보를 포함하고 있기 때문이다. Ångström 지수는 일반적으로 에어로솔의 사이즈가 클 때 그 값이 작으며, 반대로 사이즈가 작을 때 그 값이 크다. Fig. 2는 에어로솔 사이즈를 달리하면서 Mie 산란을 계산하고 이로부터 얻은 γ 와 α 의 관계를 나타낸다. 그림은 γ 가 클 때 Ångström 지수의 값이 비선형으로 작아짐을 보이고 있다.

계수의 비 γ 는 한 채널의 관측으로는 결정할 수 없으므로 지상관측 자료와 비교하여 최적의 결과를 도출하는 값을 입력자료로 사용하여 고정하였다. 이러한 접근 방법은 Costa *et al.* (2004a, 2004b)에서도 볼 수 있다. 에어로솔의 사이즈 분포에서 γ 를 변화시키며 광학두께를 산출하였다. Fig. 3은 γ 가 각각 0.1, 2.0, 5.0 일 때 계산된 에어로솔 광학두께와 지상 관측 광학두께를 비교한 산점도이다. Ångström 지수의 변화에 따른 rms 차이와 편차, 상관 계수를 함께 제시하였다. 상수 γ 가 0.1, 2.0, 5.0에 해당하는 Ångström 지수는 각각 1.65, 1.09, 0.70로 입자의 크기가 증가하고 있음을 보인다. 통계치는 α 의 값이 클 경우, 즉 에어로솔 입자의 크기가 비교적 작게 가정된 경우 미미한 음의 바이어스가 나타나 지상 관측 자료에서 얻은 에어로솔의 광학두께보다 비교적 낮게 복원이 되고 있음을 보인다. 상대적으로 α 가 작게 입력되는 경우 계산된 광학두께는 지상 관측 자료보다 크다. 이 연구에서는 최적의 통계결과를 나타내는 $\alpha=1.09$ 를 에어로솔 모델의 사이즈 분포의 파라미터로 입력하였다.

에어로솔의 광학성질을 결정하는 굴절 지수 ($m_r - im_i$) 중 흡수를 나타내는 허수부분인 m_i 의 최적치를

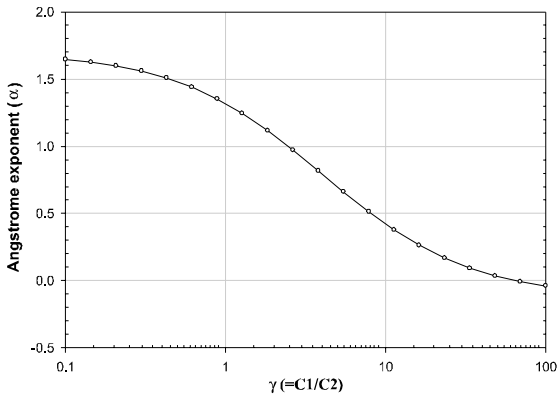


Fig. 2. Relationship between Ångström exponent (α) and peak ratio (γ) of bi-modal log normal size distribution of aerosols.

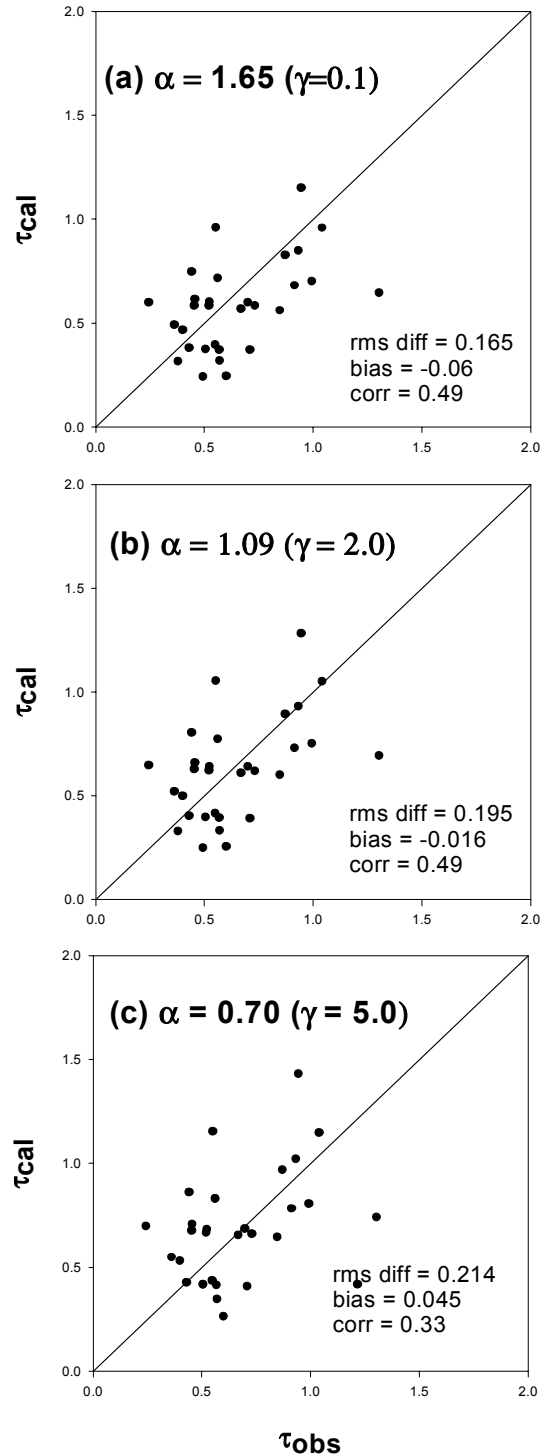


Fig. 3. Scatter plot of observed (τ_{obs}) vs. calculated aerosol optical thickness (τ_{cal}) for different Ångström exponents, i.e. (a) $\alpha=1.65$, (b) $\alpha=1.09$, and (c) $\alpha=0.70$. Peak ratio γ is also given.

인기 위해 m_i 를 변화시키며 광학두께를 산출하였다. Fig. 4는 m_i 가 각각 0.001, 0.005, 0.01일 때 나타나는 광학두께와 지상 관측값을 비교한 그림이다. 이때 실수부분인 m_r 은 1.5로 고정하였다. 그림에 rms 오차와 편차, 상관 계수를 함께 제시하였다. 굴절 지수의 허수 부분이 상대적으로 작게 입력된 경우 에어로솔에 의한 흡수 정도가 작게 계산되므로 지상에서 관측한 자료로부터 구해진 에어로솔의 광학적 두께보다 더 작게 계산되는 음의 바이어스가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 반대로 굴절 지수의 허수 부분으로 상대적으로 큰 경우 복사 전달 모델에서 에어로솔에 의한 흡수 정도가 크게 계산되므로 지상 관측 자료로부터 구해진 에어로솔의 광학적 두께보다 크게 계산되는 양의 바이어스가 나타남을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최적의 통계결과를 나타내는 0.005를 굴절지수의 허수 부분으로 하여 $1.5-0.005i$ 의 굴절지수를 사용하였다.

2.3 LUT 구성

LUT의 작성을 위해 사용한 복사 전달 모델인 Rstar5b는 일본 동경대 CCSR (Center for Climate System Research)에서 개발된 모델로 대기 분자와 에어로솔 입자에 의한 복산란 효과를 고려하고 있다 (Nakajima *et al.*, 1986). Rstar5b는 기체의 흡수를 고려하기 위해 0.2-200 μm 사이의 파장대에서 LOWTRAN 7의 투과도 자료를 사용하고 있다.

복사 전달 모델의 입력 자료로서 태양의 천정각 (θ_0), 표면 알베도 (α_s), 0.5 μm 에서의 에어로솔의 광학적 두께 ($\tau_{0.5}$)를 사용하였다. 이 때 태양의 천정각은 0°에서 70°까지 5°간격으로 14개의 입력 자료를 주었고, 표면 알베도는 0에서 0.2까지 0.02간격으로 11개의 입력 자료를 주었다. 그리고 0.5 μm 에서의 에어로솔의 광학적 두께는 0에서 3.0까지 0.3 간격으로 11개로 분리하여 입력하였다. 따라서 LUT는 (14, 11, 11)의 3차원 어레이를 갖는다. 각각의 어레이는 이에 해당하는 GMS-5 관측밴드에서의 대기상단 알베도를 갖는다. 이들 자료는 Fig. 1에서 나타난 것처럼, 관측당시의 태양 천정각 (θ_0), GMS-5 관측 대기상단 알베도 (α_p), GMS-5 추정 표면 알베도 (α_s)를 입력하여 광학두께로 전환시킨다. 따라서 광학두께의 복원은 표면알베도의 추정을 전제로 하고 있다.

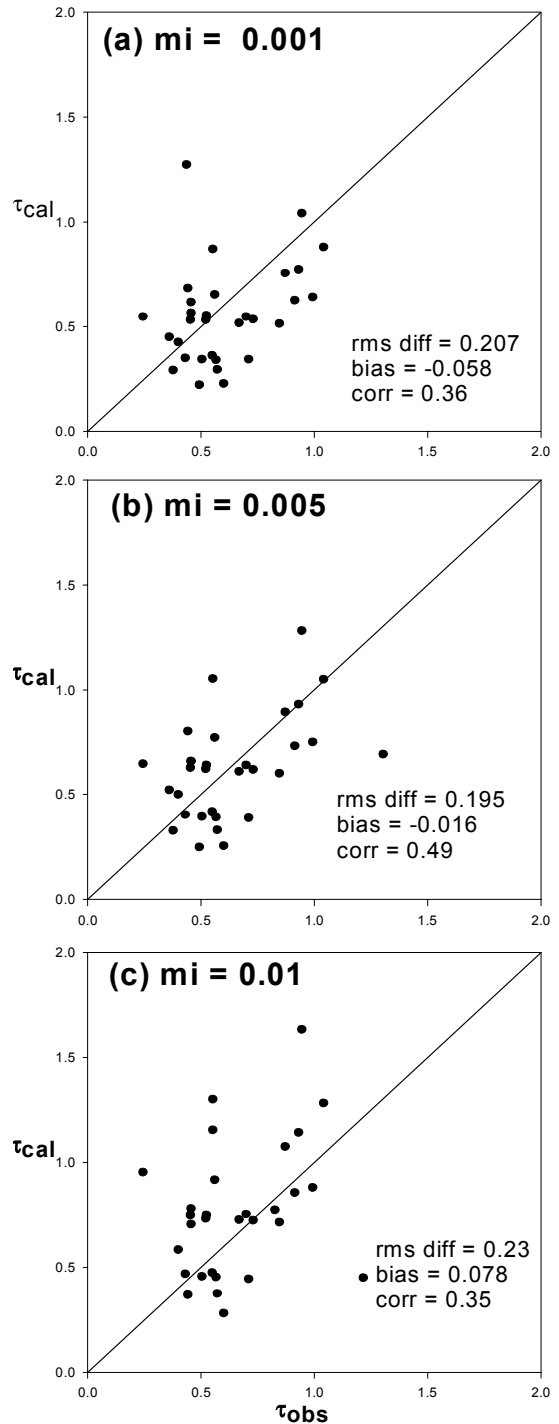


Fig. 4. Scatter plot of observed (τ_{obs}) vs. calculated aerosol optical thickness (τ_{cal}) for different refractive indices, i.e. (a) $m_i = 0.001$, (b) $m_i = 0.005$, (c) $m_i = 0.01$. The real part is 1.5.

2.4 표면알베도 산출

Fig. 5는 표면알베도 산출을 위한 흐름도이다. 표면 알베도 자료의 산출을 위해 GMS 가시광 관측자료로부터 1개월 기간에 각 격자점에서 나타나는 동일시간에 관측한 GMS-5 자료에 대해 최저알베도 (α_{\min})를 구축하며, 이로부터 레일레이 산란과 배경 에어로솔의 산란을 보정하여 표면알베도를 얻는다. 각 관측시간대에 따라 변화하는 최저알베도 산출은 주어진 관측시간에서 1개월 동안 태양의 위치가 크게 변하지 않는다는 가정 아래 어느 타겟에 대한 정지위성의 관측각은 항상 같으므로 두방향 문제를 최소화 할 수 있기 때문이다. 월 최저 알베도는 에어로솔의 영향이 최저인 대기 상태 ($\tau_{0.5}=0.1$)로 간주하였다. 산란의 보정시 복사전달 모델을 이용하며 표면 알베도를 변화시켜 최저알베도를 생산하는 해를 찾는 반복법 방법을 사용하였다. 따라서 이 연구에서 사용한 표면 알베도는 지표의 변화가 1개월 동안 큰 변화가 없을 것이라는 가정 하에 대기의 산란이 최저가 되는 시점을 선택하여 산출한 알베도를 의미한다. 그러나 이러한 가정은 식생의 변화가 가시적으로 일어날 경우 표면알베도도 변하게 되므로 에어

로솔 광학두께의 에러를 유발할 것이며 이 연구에서 개발하고자 하는 알고리즘의 한계로 작용할 것이다.

2.5 알고리즘의 검증

GMS-5 가시광 관측치로부터 추정된 에어로솔의 광학적 두께를 검증하기 위해 지상에서 관측한 에어로솔의 광학두께와 비교하였다. 비교를 위해 2000년 4월과 2002년 4월 동안 충남 태안군 안면도에 위치한 지구대기 관측소 (36.517°N, 126.317°E)에서 PREDE skyradiometer (POM - 01L)를 사용하여 0.315, 0.400, 0.500, 0.675, 0.870, 0.940, 1.020 μm 에서 관측한 파장별 직달 및 산란일사량 관측자료를 이용하였다. 태양광은 매 20분마다 직달일사량의 관측으로부터 시작하여 산란일사를 다른 산란각에 대해 관측한다. 관측한 태양복사량은 에어로솔의 광학두께, 체적 스펙트럼, 산란위상함수, 단산란 알베도 등을 산출하는데 이용한다 (Nakajima *et al.*, 1996). 복원알고리즘과 민감도, 복원 요소 등에 대한 자세한 정보는 Lee *et al.* (2002), Aoki and Fujiyoshi (2003), Oh *et al.* (2003), Kim *et al.* (2004, 2005)에서 찾을 수 있다. 관측치와

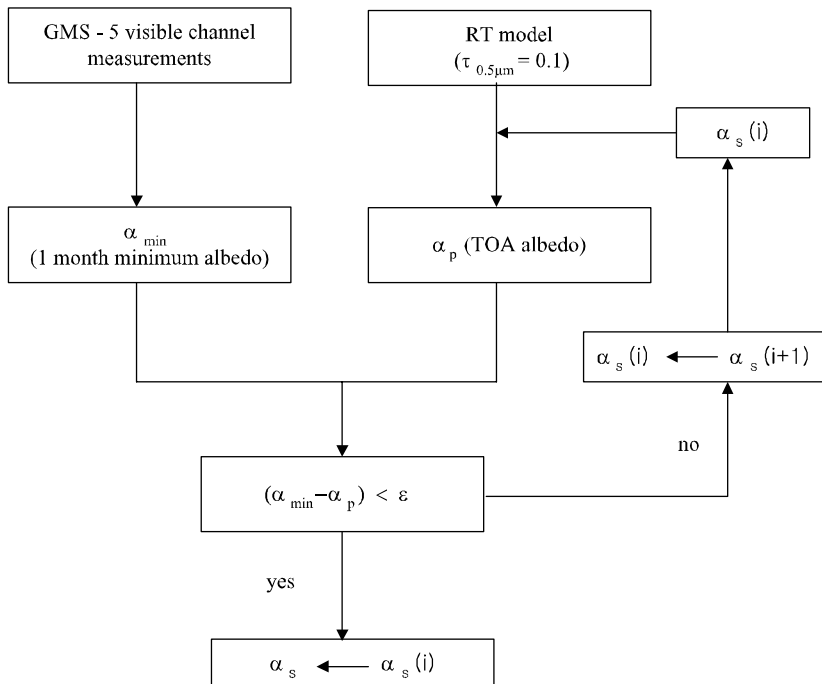


Fig. 5. A schematic diagram for surface albedo retrieval.

의 비교를 위한 $GMS-5$ 광학두께는 관측장소의 위경도와 가장 가까운 화소를 선택하였으며 위성관측 시간에 상응하는 지상관측 자료를 비교하였다.

2000년 4월과 2002년 4월 동안 $GMS-5$ 에서 관측한 가시광선 영역의 Top of the Atmosphere (TOA) 알베도 자료, 태양 천정각, 표면 알베도를 LUT에 적용하여 이에 해당하는 에어로솔의 광학적 두께를 산출하였으며, 지상 관측 에어로솔 광학두께와 비교를 Fig. 6에 제시하였다. 비교결과는 $GMS-5$ 위성에서 산출한 에어로솔 광학두께가 관측치와 비교하여 0.71의 상관관계를 나타내고 있으며, 편이와 rms 차이는 각각 -0.034, 0.338를 보이고 있다. 이로 미루어 $GMS-5$ 위성 자료로부터 복원한 에어로솔의 광학적 두께가 지상 관측 자료로부터 구해진 에어로솔의 광학적 두께와 비교하여 양호함을 알 수 있다.

2.6 광학적 두께의 산출과 공간 분포

동아시아 지역에서의 에어로솔 광학두께의 지리적 분포를 살펴보기 위해 2002년 4월 중 발생한 황사의 경우와 맑은 날의 경우를 사례로 선정하여 연구에서 개발된 알고리즘을 적용하여 $GMS-5$ 가시광 자료로부터 에어로솔 광학두께를 산출하였다. $GMS-5$ 가시광선 채널의 알베도 자료는 구름선별을 거쳐 구름 픽셀

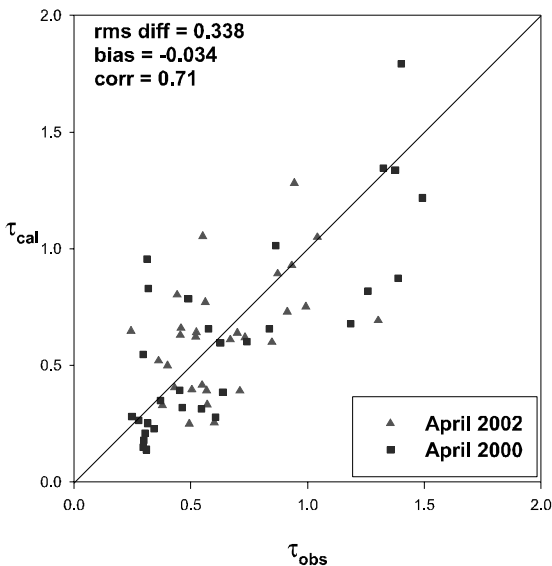


Fig. 6. Scatterplot of τ_{obs} and τ_{cal} for April 2000 and 2002 at Anmyeon Do.

를 제거한 후 위, 경도 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 간격으로 격자화 되었으며 각 격자에서 태양의 천정각을 계산하였다. 각 시간별 표면 알베도와 $GMS-5$ 관측 TOA 알베도 자료를 함께 LUT에 적용하여 동아시아 지역의 각 격자점에서의 에어로솔 광학적 두께를 복원하였다.

Fig. 7은 한반도에서 황사가 관측되었던 2002년 4월 8일 0230, 0330, 0430 UTC에 복원한 에어로솔의 광학적 두께의 지리적 분포를 나타낸다. 복원 결과는 02시 30분 (한국시간 11:30)에 우리 나라 전역에 걸쳐 광학적 두께가 0.9-1.5 사이로 높게 나타나고 있으며, 이로 미루어 황사가 전국에 걸쳐 분포하고 있음을 볼 수 있다. 03시 30분과 04시 23분의 복원 결과 역시 유사한 크기의 광학적 두께가 전국적으로 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며 시간이 경과함에 따라 한반도에 나타난 광학적 두께가 높은 지역이 점차 동해상으로 이동하고 있는 모습을 보여준다.

한편 Fig. 8은 맑은 경우에 해당하는 2002년 4월 14일 0230, 0330, 0423 UTC에 복원한 에어로솔 광학적 두께를 나타낸다. 중부지방을 중심으로 하여 황해와 동해연안에서는 0.3 이하의 광학두께가 나타나고 있으나 내륙의 경우 그 값이 증가하는 양상을 보이고 있다. 즉, 태백산맥 일대의 상대적으로 낮은 값과 서울, 경기 일대의 상대적으로 높은 광학두께의 분포가 나타난다. 한편 남부지방에서는 큰 값이 국지적으로 나타나고 있어 구름의 제거가 완전히 이루어지지 않았음을 시사하고 있다. 이 연구에서 사용한 구름제거 방법은 단순한 운정온도와 대기 상단 알베도를 절대적인 기준으로 사용하고 있어 보다 정교한 구름선별 알고리즘 적용이 요구된다. 그러나 안면도에서의 지상 관측 자료와는 잘 일치하는 것으로 판단된다. 즉, 4월 14일의 경우 안면도 지상관측은 에어로솔의 광학적 두께가 0.5 미만으로 비교적 작게 나타나고 있었다. 본 연구에서 사용한 알고리즘으로 에어로솔의 광학적 두께를 복원한 결과 역시 4월 14일의 경우에는 에어로솔의 광학적 두께가 전국적으로 0.6 미만으로 복원되어 지상 관측 자료로부터 구해진 에어로솔의 광학적 두께와 비교적 잘 일치하였다.

3. 요약 및 결론

이 연구에서는 정지기상위성 $GMS-5$ 가시광선 채널 TOA 알베도 자료로부터 에어로솔 광학두께를 산출하는 알고리즘 개발하고 이를 검증하였다. 알고리즘은 표

면 알베도, 태양의 천정각, 에어로솔 광학두께의 변화에 따라 TOA 알베도와 지표알베도 사이의 차가 나타나는 조건표 방법을 사용하였다. 조건표 작성을 위해 다양한 조건의 입력자료를 사용하여 복사전달 모델을 수행하였으며, 복사전달모델 내부의 에어로솔 모델은 bi-modal log normal 분포를 갖는다고 가정하였다. 이 에어로솔 모델 구성에 필요한 파라미터는 지상관측치로부터 역 추정하여 사용하였다. 즉, 파라미터 변화에 따른 광학두께의 모의와 관측치의 비교를 통해 에러가 가장 작은 파라미터를 선택하여 에어로솔 모델을 구체화하였다. 즉, 에어로솔 모델의 계수비는 Angström 지수가 에어로솔 사이즈를 표현할 수 있는 성질을 이용하

여 $\alpha=1.09$ 를 사용하였으며, 모델 에어로솔의 굴절 지수로 1.5-0.005i를 사용하였다.

알고리즘의 검증을 위해 GMS-5 에어로솔 광학두께를 2002년 4월 4일부터 2002년 4월 18일까지 안면도에서 관측한 광학두께와 비교하였다. 비교결과 위경도 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 격자에서 산출한 에어로솔 광학두께는 지상관측과 비교하여 0.71의 상관관계를 나타냈으며, 편이와 rms 차이는 각각 -0.034, 0.338를 보였다. 검증이 비록 안면도 한 지점에서 제한적으로 이루어졌지만 정지위성에서 관측한 가시광선 자료를 이용하여 정량적인 광학두께의 산출이 이루어질 수 있음을 시사하고 있다. 이러한 해석은 황사가 발생한 경우와 맑은 대기

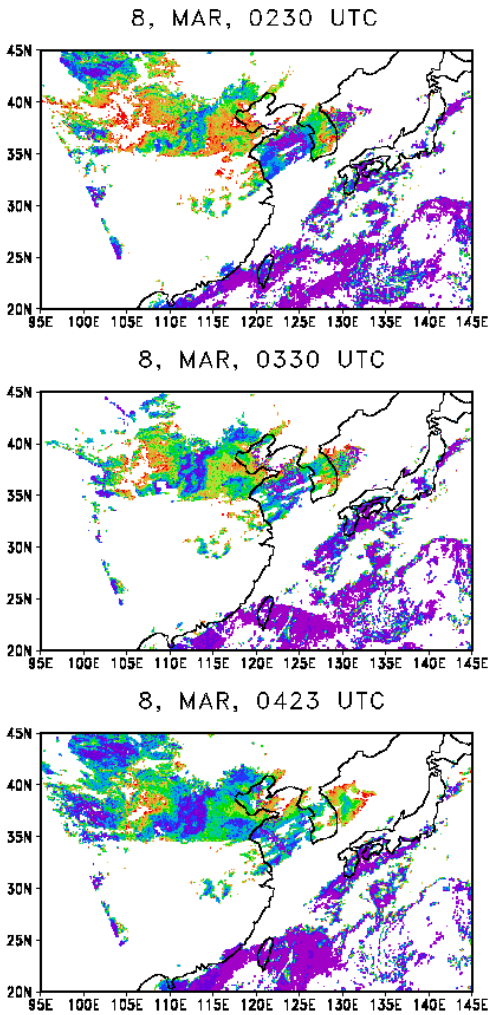


Fig. 7. Aerosol optical thickness retrieved from GMS-5 visible measurements on 8 April 2002.

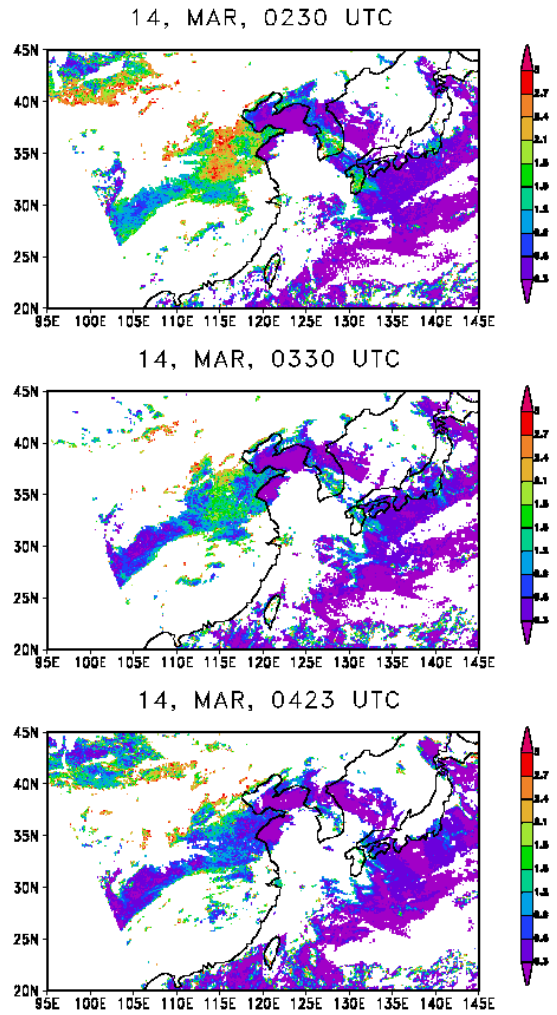


Fig. 8. Aerosol optical thickness retrieved from GMS-5 visible measurements on 14 April 2002.

의 경우에 산출한 광학두께 분포에서도 가능하다.

이 연구에서 제시한 알고리즘은 케이스 연구의 범주에 머무르고 있으나 기본적인 접근 방법은 육지를 포함한 지역에서의 광학두께 산출이 가능하리라 판단된다. 그러나 이에 대한 철저한 에러 분석이 필요할 것으로 생각한다. 가장 큰 에러 요인으로 표면 알베도의 결정을 들 수 있을 것이다. 위성 알베도의 관측이 태양광의 입사각과 위성의 관측각, 그리고 방향각에 따라 달라지는 양방향 성질을 갖고 있고 표면 알베도가 육상에서의 식생의 변화 등에 따라 변화하는 성질을 가지고 있음을 고려할 때 보다 정량적인 광학두께의 산출을 위해서는 이들은 고려한 표면 알베도 산출 기법이 개발되어야 할 것이다. 또한 이 연구에서 사용한 GMS-5 위성의 가시채널 관측 복사휘도는 절대보정이 이루어지지 않은 자료이다. 그럼에도 불구하고 연구결과는 채널 관측의 절대보정이 이루어지는 경우 보다 정확한 에어로솔 산출이 이루어질 수 있음을 시사하고 있다.

사 사

이 논문은 기상청 지원 통신해양기상위성 (COMS) 기상자료처리 시스템 구축 과제에서 지원받았다. 건설적인 의견을 제시해 주신 두 분 심사자에게 감사드린다.

참고문헌

- Aoki, K., and Y. Fujiyoshi, 2003: Sky radiometer measurements of aerosol optical properties over Sapporo, Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 493-513.
- Costa, M. J., A. M. Silva, and V. Levizzani, 2004a: Aerosol characterization and direct radiative forcing assessment over the ocean. Part I: Methodology and sensitivity analysis. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 1799-1817.
- Costa, M. J., V. Levizzani, and A. M. Silva, 2004b: Aerosol characterization and direct radiative forcing assessment over the ocean. Part II: Application to test cases and validation. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 1818-1833.
- Goloub, P., Tanré, J. L. Deuzé, M. Herman, A. Marchand, and F. M. Bréon, 1999: Validation of the first algorithm applied for deriving the aerosol properties over the ocean using the POLDER/ADEOS measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **37**, 1586-1596.
- Gordon, H.R., and M. Wang, 1994: Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm. *Applied Optics*, **33**, 443-452.
- Higurashi, A., T. Nakajima, B. N. Holben, A. Smirnov, R. Frouin, B. Chatenet, 1999: A study of global aerosol optical climatology with two Channel AVHRR remote sensing. *J. Clim.*, **13**, 2011-2027.
- Higurashi, A., and T. Nakajima, 1999: Development of a two channel aerosol retrieval algorithm on global scale using NOAA AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924-941.
- Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell, G. Shi, Y. J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), 8633, doi:10.1029/2003JD003550, 2003.
- IPCC, *Climate change 2001, Scientific Basis*, Houghton, J. T., L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, 881pp, 2001.
- Kim, D.-H., B.J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, 2005: Aerosol radiative forcing over East Asia determined from ground-based solar radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, **110**, D10S22, doi:10.1029/2004JD004678.
- Kim, D.-H., B.J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Takamura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2004: Aerosol optical properties over east Asia determined from ground-based sky radiation measurements, *J. Geophys. Res.*, **109**, D02209, doi:10.1029/2003JD003387.
- Lee., S.-S., B.J. Sohn, D.-S. Shin, H. Fukushima, and T. Nakajima, 2002: Optical characteristics of the Asian dust from sky radiation measurements in Spring 1998. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 161-170.
- Liou, K.N., 2002: *An introduction to atmospheric radiation*, Academic Press, 577pp.
- Masuda, K., Y. Mano, H. Ishimoto, M. Tokuno, Y. Yoshizaki, and N. Okawara, 2002: Assessment of the nonsphericity of mineral dust from geostationary satellite measurements. *Rem. Sens. Env.*, **82**, 238-247.
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersion. *Appl. Opt.*, **35**, 2672-2686.
- Nakajima, T., and M. Tanaka, Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **35**, 13-21, 1986.
- Oh, S.-N., B.-J Sohn, and S.-S. Lee, 2004: Aerosol optical and radiative properties observed at Anmyeon and Jeju, Korea in the Spring of 2000 and 2001. *Environmental Monitoring and Assessment*, **92**, 95-115.
- Shettle, E. P., 1984: Optical and radiative properties of a desert aerosol model, *International Radiation Symposium (IRS): Current problems in atmospheric radiation*, G. Fiocco Ed., 74-77, A. Deepak, Hampton, Va.