

MODIS 관측자료를 이용한 러시아 산불 영향 하에 발달한 구름의 미세 물리적 특성 연구

김신영* · 손병주**†

*기상연구소 지구환경시스템연구팀, **서울대학교 지구환경과학부

MODIS-estimated Microphysical Properties of Clouds Developed in the Presence of Biomass Burning Aerosols

Shin-Young Kim* and Byung-Ju Sohn**†

*Global Environment System Research Lab., National Institute of Meteorological Research Seoul 156-720, Republic of Korea

**School of Earth of Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Republic of Korea

Abstract : An algorithm was developed to retrieve both cloud optical thickness and effective particle radius considered the aerosol effect on clouds. This study apply the algorithm of Nakajima and Nakajima (1995) that is used to retrieve cloud optical thickness and effective particle radius from visible, near infrared satellite spectral measurements. To retrieve cloud properties, Look-up table (LUT) was made under different atmospheric conditions by using a radiative transfer model. Especially the vertical distribution of aerosol is based on a tropospheric aerosol profile in radiative transfer model.

In the case study, we selected the extensive forest fire occurred in Russia in May 2003. The aerosol released from this fire may be transported to Korea. Cloud properties obtained from these distinct atmospheric situations are analysed in terms of their possible changes due to the interactions of the clouds with the aerosol particle plumes. Cloud properties over the East sea at this time was retrieved using new algorithm. The algorithm is applied to measurements from the MODerate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) onboard the Terra spacecrafts.

As a result, cloud effective particle radius was decreased and cloud optical thickness was increased during aerosol event. Specially, cloud effective particle radius is hardly greater than $20\mu\text{m}$ when aerosol particles were present over the East Sea. Clouds developing in the aerosol event tend to have more numerous but smaller droplets.

Key Words : MODerate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), cloud properties retrieval, aerosol, radiative transfer model, biomass burning.

요약 : 본 연구에서는 에어로솔의 간접 효과를 고려한 구름의 광학두께와 유효입자반경을 산출하기 위해 새로운 알고리즘을 개발하였다. 구름의 미세물리적 특성을 산출하기 위해 Nakajima and Nakajima (1995)의 방법을 응용하였다. 다양한 대기상태에서 복사전달모델을 이용하여 미리 계산한 서로 다른 LUT 을 적용하여 최종 산출물인 구름광학두께와 유효입자반경을 산출하였다.

접수일(2008년 5월 14일), 수정일(1차 : 2008년 5월 31일, 2차 : 6월 15일), 게재확정일(2008년 7월 7일).

† 교신저자: 손병주(sohn@snu.ac.kr)

러시아지역에 산불이 있었던 2003년 5월 한반도 주변을 사례로 선택하였다. 이 때 발생한 에어로솔은 대기 흐름을 따라 한반도까지 도달하여 한반도 주변의 날씨에 매우 많은 영향을 주었다. 본 연구에서는 이 시기에 러시아 지역의 산불로 인하여 발생한 에어로솔이 한반도 주변의 구름에 어떠한 영향을 주는지 알아보았다. 이 사례의 알고리즘 적용을 위해 Terra위성에 탑재된 분광계인 MODIS자료를 사용하였다.

사례분석 결과, 에어로솔이 있는 시기에는 유효입자반경이 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 구름은 거의 존재하지 않았음에 비해, 에어로솔이 거의 없는 시기에는 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 구름도 다수 존재하였다. 즉, 에어로솔의 영향 하에 발달한 구름은 구름광학두께는 크고, 유효입자반경은 작은 구름이라는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 에어로솔이 구름의 미세물리적 특성을 변화시킨다는 것을 보여준다.

1. 서 론

대기중의 에어로솔은 태양복사에너지를 산란 또는 흡수하여 기후 변화에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 구름의 응결핵으로 작용하거나 구름의 광학적 성질, 운량, 수명 등을 변화시켜 기후에 간접적인 영향을 준다. 이처럼 에어로솔은 기후변화의 물리적 과정에 밀접한 관련이 있으며 직, 간접적인 효과를 통하여 지구대기의 복사과정에 매우 중요한 역할을 한다(Twomey *et al.*, 1974). 에어로솔이 존재할 경우, 에어로솔이 구름 응결핵으로 작용하여 구름의 형성에 매우 큰 변화를 가져오게 된다는 것은 많은 선행연구에서 보여주었다(Bréon *et al.*, 2002; Kawamoto and Nakajima, 2003; Rosenfeld, 1999). 또한 에어로솔은 바람을 타고 전지구로 이동하여 대기상태에 영향을 미치기 때문에 전 지구차원에서 대기의 상태를 변화시킨다(Koppmann *et al.*, 1992; Swap *et al.*, 1996). 그러므로 기후변화에 있어서 에어로솔의 직, 간접적인 영향을 연구하는 것은 매우 중요하다. 특히 한반도는 최근 에어로솔의 농도가 증가함에 따라 에어로솔의 종류와 강도에 따라 대기 복사에 매우 많은 영향을 주고 있다(Yoon *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005; Oh *et al.*, 2004).

본 연구에서는 에어로솔에 의해 변화하는 구름의 미세물리적 특성을 고려한 구름특성산출 알고리즘을 개발하고, 이를 2003년 러시아 산불 사례에 적용하여 한반

도 주변의 구름특성을 산출함으로써 에어로솔의 간접효과를 파악하고자 한다.

2. 자 료

본 연구에서는 MODerate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) 자료를 사용하였다. MODIS는 미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 Earth Observing System (EOS) 프로그램에 의해 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 분광계이다. MODIS는 $2330 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 의 관측 폭을 가지며 $0.405 \sim 14.385 \mu\text{m}$ 파장 범위의 36 개의 band로 구성되어 있다. 그리고 각 band에 따라 250 m ($1 \sim 2$ band), 500 m ($3 \sim 7$ band), 1 km ($8 \sim 36$ band)의 공간 분해능을 가지고 있다. MODIS의 36 개의 band 중 본 연구에서는 중심파장이 $0.645 \mu\text{m}$, $1.645 \mu\text{m}$, $8.5 \mu\text{m}$, $11 \mu\text{m}$ 인 1, 6, 29, 31번의 band를 사용하였다(Table 1). $8.5 \mu\text{m}$ 를 중심파장으로 하는 29 번 band와 $11 \mu\text{m}$ 를 중심파장으로 하는 31번 band는 구름의 상을 구하는 데에 사용되었고 $0.645 \mu\text{m}$ 를 중심으로 하는 1번 band와 $1.645 \mu\text{m}$ 를 중심으로 하는 6번 band는 구름광학두께와 유효입자반경을 구하는 데에 사용되었다.

Table 1. Characteristics of MODIS band using this study

Band	$\lambda (\mu\text{m})$	$\Delta\lambda (\mu\text{m})$	Resolution (m)	Purpose
1	0.645 (0.62 ~ 0.67)	0.050	250	cloud optical thickness, cloud effective particle radius
6	1.640 (1.628 ~ 1.652)	0.025	500	
29	8.5 (8.40 ~ 8.70)	0.300	1000	
31	11.030 (10.780 ~ 11.280)	0.500	1000	cloud phase

3. 알고리즘 개발

구름의 미세물리적 특성으로 대표되는 값은 구름의 광학두께와 유효입자 반경이다. 구름광학두께와 유효입자반경은 수증기의 흡수 및 비흡수 파장대에서의 복사휘도의 함수의 차이를 이용하여 산출한다. 이를 이용하여 복사전달모델에서 미리 계산된 복사휘도를 관측값과 대응시켜 최적의 구름광학두께와 유효입자반경을 산출한다.

본 연구에서는 구름의 미세물리적 특성을 산출하기 위해 Nakajima and Nakajima (1995)의 방법을 응용하여 알고리즘을 개발하였다(Fig. 1). 이 방법은 장면분석과 태양천정각(solar zenith angle: θ_0) 검사를 통해 해당화소가 청천화소이거나 야간 화소일 경우 알고리즘을 수행하지 않는다. 즉, 구름이 없는 맑은 날이나 야간 시간대의 화소는 제외하고 구름이 있는 주간 시간대의 화소들만 알고리즘을 수행한다. 그리고 지면정보, 기하학적 입사각정보, 구름상의 분류에 따라 서로 다른 Look-up table (LUT)을 적용시켜 최종 산출물인 구름광학두께와 유효입자반경을 동시에 산출한다.

구름의 미세물리적 특성을 산출할 때 구름상 산출에 대한 연구가 가장 먼저 선행되어야 한다. 구름상이 액체상인지 얼음상인지에 따라서 적용되는 LUT가 달라지기 때문이다. Fig. 2는 multi-spectral method를 이용

하여 구름상을 산출하는 과정에 대한 기본적 선행연구에 관한 것이다(Gosse et al., 1995).

구름상에 따라서 각 파장에서의 refraction의 허수부, 즉 각 파장에서의 흡수율이 다른 값을 가지고 있다 (Fig. 2). 구름상이 얼음상일 때, $8.5 \mu\text{m}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 사이에서의 흡수율이 $11 \mu\text{m}$ 와 $12 \mu\text{m}$ 사이의 흡수율보다 훨씬 크다. 반면에 구름상이 액체상일 때는 $8.5 \mu\text{m}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 사이에서의 흡수율이 $11 \mu\text{m}$ 와 $12 \mu\text{m}$ 사이의 흡수율보다 훨씬 작다. 결론적으로 $8.5 \mu\text{m}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 사이의 밝기 온도차이(brightness temperature difference, BTD_{8.5}-

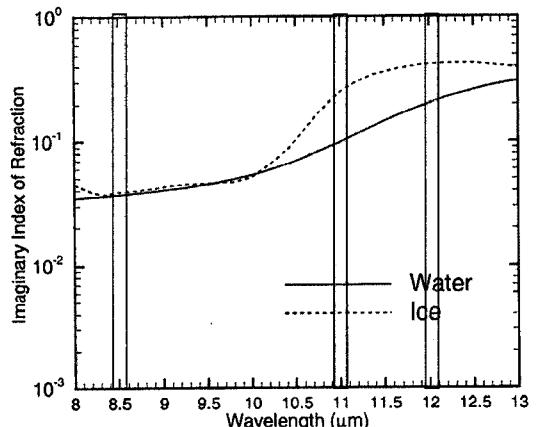


Fig. 2. Imaginary indices of refraction for water (solid line) and ice (dashed line) over wavelength ranging from $8 \mu\text{m}$ to $13 \mu\text{m}$ (Goss et al., 1995).

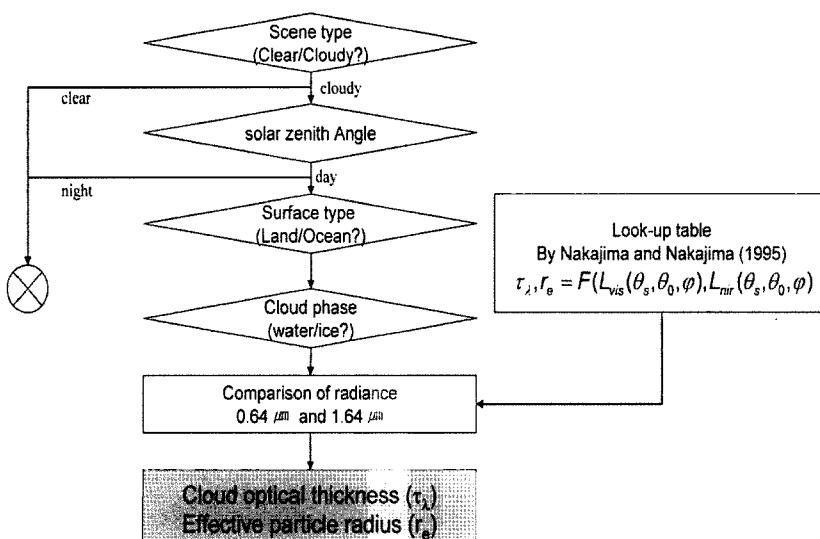


Fig. 1. Flow chart to retrieve cloud optical thickness and effective particle radius.

11.0)와 $11.0 \mu\text{m}$ 과 $12.0 \mu\text{m}$ 사이의 밝기 온도차이 (brightness temperature difference, $\text{BTD}_{11.0-12.0}$)에 따라 구름상을 산출 할 수 있다. Fig. 2에 따르면 얼음상의 구름은 $\text{BTD}_{8.5-11.0}$ 가 $\text{BTD}_{11.0-12.0}$ 보다 더 큰 반면에 액체상의 구름은 $\text{BTD}_{8.5-11.0}$ 가 $\text{BTD}_{11.0-12.0}$ 보다 더 작다. 이러한 BTD의 차이를 이용한 구름상 산출 방법으로 구름상의 임계값을 정하고 그 임계값을 기준으로 구름상을 결정할 수 있다(Baum et al., 2000). 본 연구에서는 복사전달모델 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART)을 이용하여 구름상의 임계값을 결정한 후, 구름상을 2종류(액체상과 얼음상)로 구분하여 알고리즘을 수행하였다.

구름광학두께가 5, 8, 16, 32인 경우, 유효입자반경이 0.2 ~ 20.0까지 변하는 다양한 상황에서 복사전달모델 SBDART를 통해서 $\text{BTD}_{8.5-11.0}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 밝기온도 (Brightness temperature, TB_{11})의 관계를 계산하였다. 계산한 결과, 구름상이 액체상인지 얼음상인지에 따라 TB_{11} 과 $\text{BTD}_{8.5-11.0}$ 의 값이 구분되는 것을 알 수 있다 (Fig. 3). TB_{11} 이 260K 이하일 경우는 모두 얼음상이고 TB_{11} 이 260K 이상일 경우, $\text{BTD}_{8.5-11.0}$ 이 -0.5K 이상일 경우는 얼음상, -0.5K 이하일 경우는 액체상이다. 이 계산 결과를 기본으로 액체상과 얼음상의 임계값을 Table 2와 같이 결정하였다.

구름상 산출 알고리즘이 마련된 후, 가시 채널과 근적외 채널의 복사회도의 함수인 구름광학두께와 유효입자반경을 산출하기 위해 복사전달모델 SBDART을 이용하여 LUT을 미리 계산해야 한다.

액체상의 경우, 구름광학두께를 9개 ($\tau = 1, 2, 4, 6,$

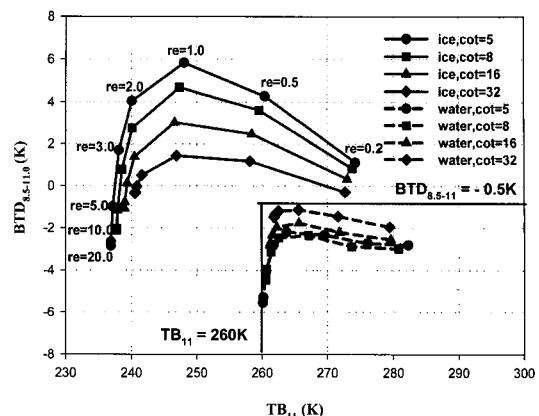


Fig. 3. Radiative transfer model calculation of $\text{BTD}_{8.5-11.0}$ versus TB_{11} for ice and water clouds. The calculation is carried out under various cloud effective particle radius (re) from 0.2 to 20.0 (numbers marked in the graph) and cloud optical thickness (cot) with 5, 8, 16, and 32.

$9, 14, 20, 30, 50$, 유효입자반경을 8개 ($\text{r}_e = 2, 4, 6, 9, 12, 15, 20, 30$), 태양 천정각 (solar zenith angle; θ_0)을 8개, 위성 천정각 (sensor zenith angle; θ_s)을 9개의 값으로 모수화하여 LUT을 만들었다(Table 3). 또한 얼음상의 경우도 Table 3의 조건에 따라 LUT을 만들었다. 이 때 구름상에 따라 서로 다른 LUT을 적용하여 구름광학두께와 유효입자반경을 산출한다. 이것은 구름상에 따라 구름광학두께와 유효입자반경의 특성이 다르게 나타나기 때문이다. 특히 얼음입자의 경우, 구름광학두께가 작은 입자와 유효입자반경이 큰 입자가 많이 존재하므로 더 세심하게 다루어야 한다. LUT을 작성할 때, 에어로솔의 효과를 고려하기 위해 에어로솔의 연직 모델을 모델의 입력자료로 사용해야 하는데 본 연구에서는 대류권 에어로솔 모델을 사용하였다. Table 3

Table 2. The threshold for determination of cloud phase. Cloud phase is inferred from $\text{BTD}_{8.5-11.0}$ and TB_{11}

Cloud phase	Water cloud	Ice cloud
Threshold	$\{\text{TB}_{11} > 275\text{K}\}$ or $\{260\text{K} < \text{TB}_{11} < 275\text{K}$ and $\text{BTD}_{8.5-11.0} < -0.5\}$	$\{\text{TB}_{11} < 260\text{K}\}$ or $\{\text{TB}_{11} > 260\text{K}$ and $\text{BTD}_{8.5-11.0} > -0.5\}$

Table 3. Grid values used to build the LUT

Grid parameter	Number of values in the grid	Cloud phase	
		Liquid water	Ice
Cloud optical thickness (τ)	9(10)	1, 2, 4, 6, 9, 14, 20, 30, 50	0.1, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 48, 64
Cloud effective radius (re)	8	2, 4, 6, 9, 12, 15, 20, 30	5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120
Solar zenith angle (θ_0)	8		0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
Sensor zenith angle (θ_s)	9		0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80

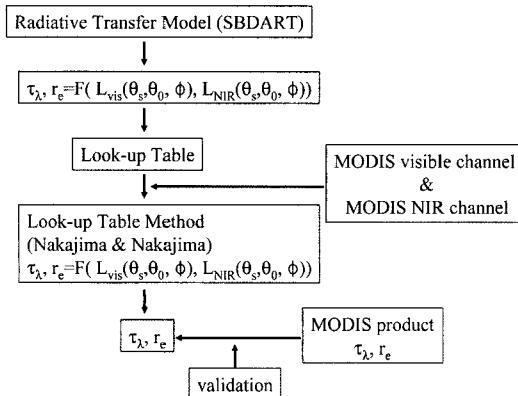


Fig. 4. Flow chart to retrieve the cloud optical thickness and effective particle radius from MODIS data.

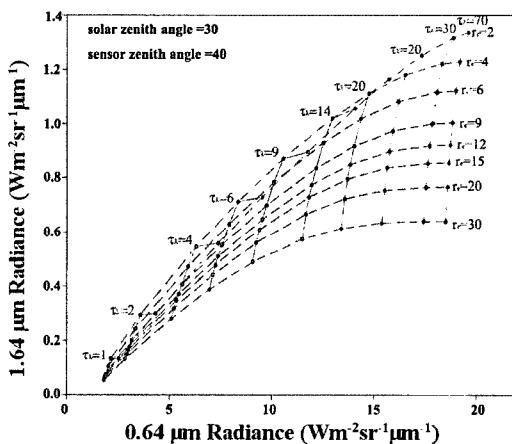


Fig. 5. Relationship between the radiance at $0.64 \mu\text{m}$ and $1.64 \mu\text{m}$ when cloud phase is water.

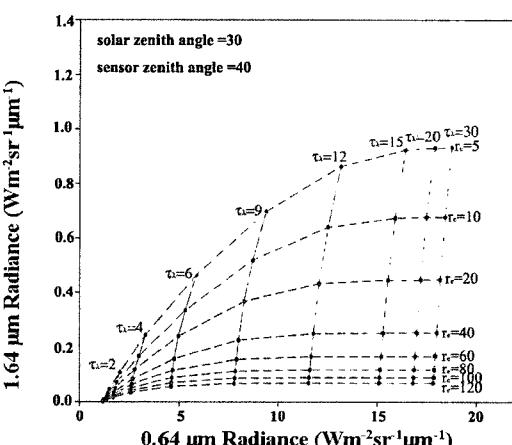


Fig. 6. Relationship between the radiance at $0.64 \mu\text{m}$ and $1.64 \mu\text{m}$ when cloud phase is ice.

을 기준으로 계산한 LUT 중 태양 천정각이 30° , 위성 천정각이 40° 인 경우, 구름상을 ice와 water로 분류하여 구름광학두께와 유효입자반경의 함수인 $0.64 \mu\text{m}$, $1.64 \mu\text{m}$ 복사회도를 각각 도식하였다(Fig. 5 ~ 6). 그 결과, MODIS의 $0.64 \mu\text{m}$ (band 1)와 $1.64 \mu\text{m}$ (band 6)의 복사회도를 이용하여 구름광학두께와 유효입자반경을 산출할 수 있음을 알 수 있었다.

위의 연구 결과에 따라 MODIS의 가시채널 ($0.64 \mu\text{m}$)과 근적외 채널 ($1.64 \mu\text{m}$)의 복사회도를 LUT의 복사회도에 대응시켜 구름광학두께와 유효입자반경을 산출한다(King et al., 1998; Nakajima and King, 1990). 이 때 MODIS 복사회도와 LUT의 복사회도가 정확히 일치하지 않을 경우 적절히 내삽하여 구한다(Fig. 4).

4. 사례 분석

2003년 러시아에서 발생한 산불은 3월부터 7월까지 계속 되었으며, 특히 5월은 러시아 곳곳에서 11,533건의 대규모 산불이 발생했다(Fig. 7). 5월은 이러한 산불로 인하여 발생한 대규모의 에어로솔이 한반도에 영향을 미치기도 했다(Lee et al., 2005). 특히 2003년 5월 19일 ~ 22일에 한반도 주변에 짙은 연무가 발생했다(임주연 등, 2004). 이러한 짙은 연무가 존재할 당시에 발생한 구름은 에어로솔의 영향으로 평상시와 다른 미세물리적 특징을 가진다(Costa et al., 2003; Cattani et al., 2004). 본 연구에서는 2003년 5월 19일 ~ 22일의 기간동안 한반도 주변의 기상특성을 살펴보고 한반도 지역에서 발생한 연무가 어느 곳에서 기인한 것이며 어떤 특성을 갖는지 알아보았다(Table 4).

2003년 5월 19일부터 5월 22일까지의 일기도를 살펴보면 러시아-몽고 국경지역에 위치했던 저기압이 한반도를 통과하면서 우리나라에는 북풍의 영향을 받는다. 지속적으로 불어오는 북풍은 러시아 몽고지역에서 발생한 에어로솔을 한반도로 이동시켰다. 그리고 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) 모델을 이용하여 2003년 5월 19일 ~ 22일 00UTC에 한반도 동해안지역의 공기덩이

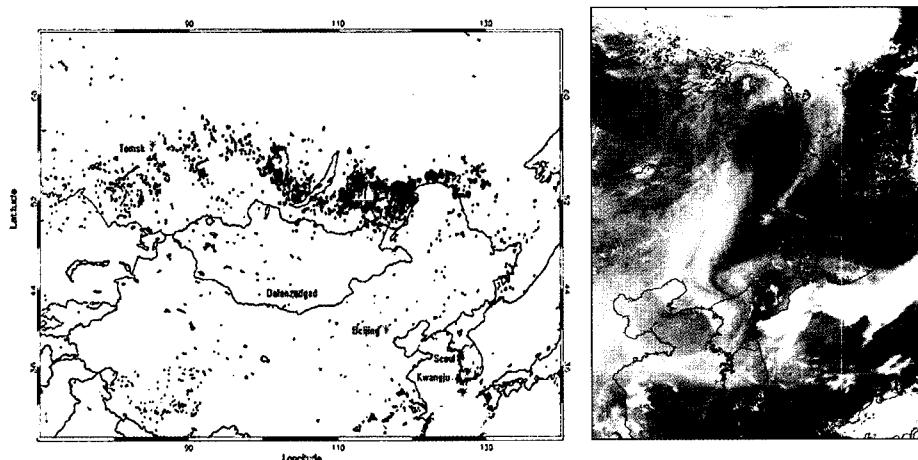


Fig. 7. Fire positions from MODIS fire product during the period 1-23 May 2003. Total number of hot spots during this period was 11,533 (left). Fires and smokes in Russia and China on 19 May 2003 (right).

Table 4. Meteorological characteristics of the Korean Peninsula in 19 ~ 22 May 2003

	Characteristics
Weather chart	continuous northerly wind
Backward trajectory (144 hours)	Backward trajectory analysis using the HYSPLIT model show southward movement of the forest fire emissions toward the Korean Peninsula.
Aeronet observation	aerosol optical thickness (AOT) - high value (4.4)

를 144시간 전으로 Backward trajectory한 결과, 러시아 산불 지역에 위치하고 있던 공기덩어리가 한반도 지역으로 이동하였음을 알 수 있었다. 5월 19일 ~ 22일 한반도 지역의 연무를 발생시킨 에어로솔은 약 6일 전 러시아 산불 지역에 위치한 공기 덩이가 이동해 온 것이라고 판단할 수 있다. 또한 이 시기의 안면도의 Aerosol

robotic network (Aeronet)의 관측 결과를 사용하여 에어로솔의 특성을 살펴보면, 5월 19일 ~ 22일은 다른 날짜에 비해 에어로솔의 광학두께 (aerosol optical thickness, AOT)가 4.4까지 도달하는 큰 값을 가진다

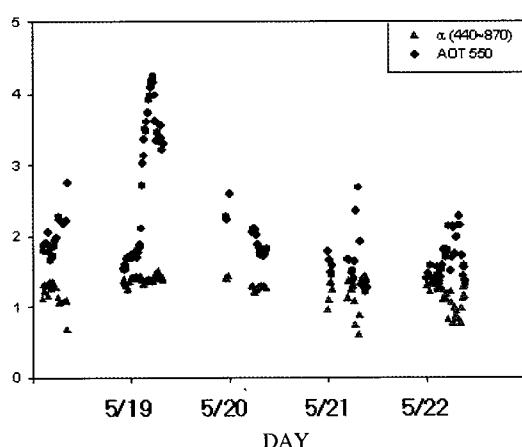


Fig. 8. AERONET sunphotometer-derived AOT at 550 nm and Ångström parameter (α) at Anmyun on 19 ~ 22 May 2003.

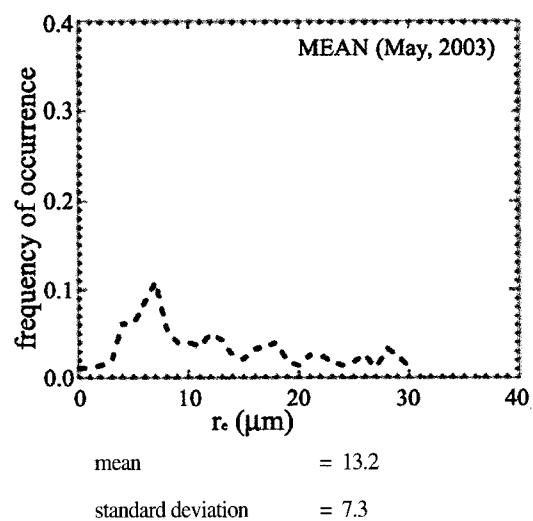


Fig. 9. Frequency Histogram of monthly mean value of effective particle radius (May 2003).

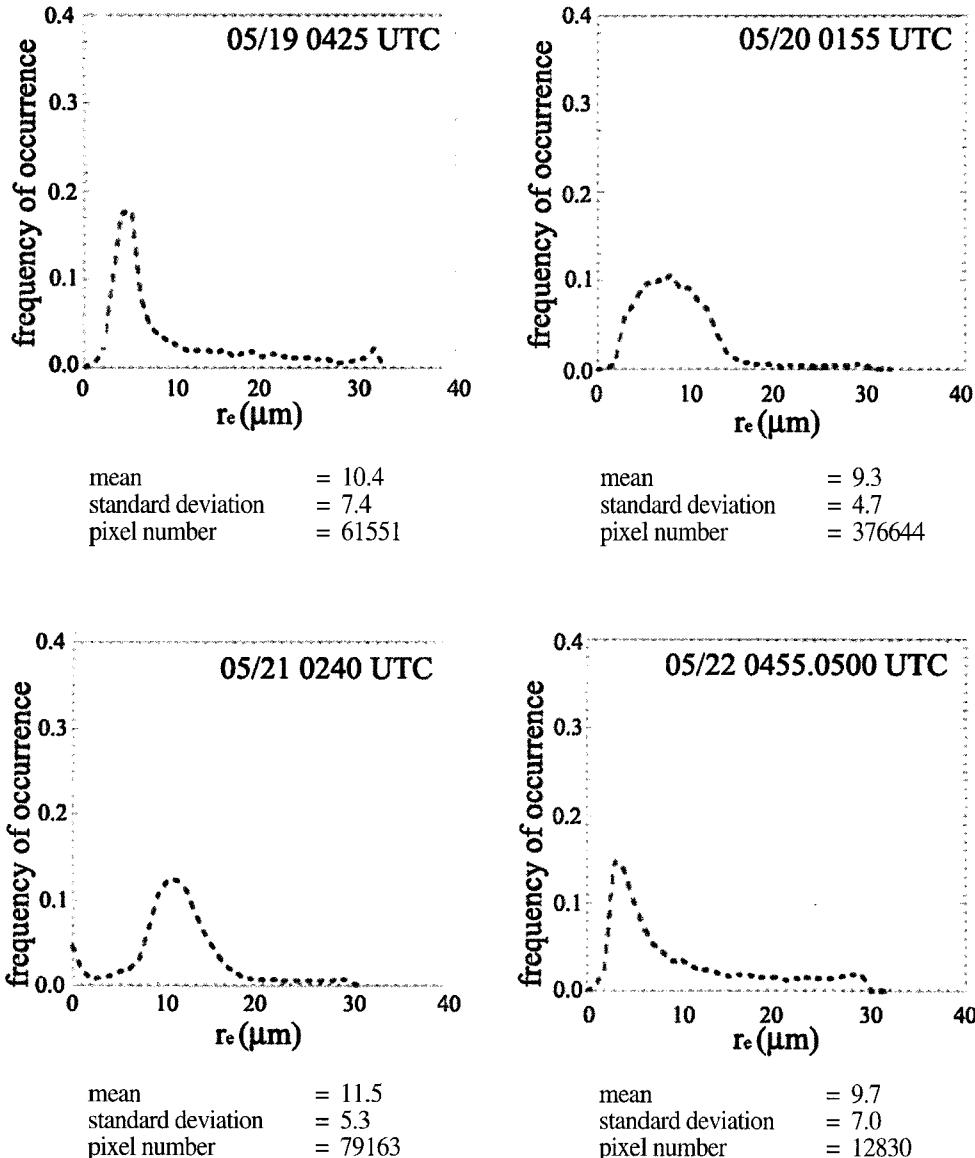


Fig. 10. Frequency histogram of effective particle radius. Mean values and standard deviations of cloud effective particle, obtained for water clouds over the ocean in the analysed areas.

(Fig. 8). 또한 Ångström지수 ($440\text{ nm} \sim 870\text{ nm}$ 영역에서 측정)는 파장에 대한 에어로솔의 광학적 두께의 민감도를 나타내는 변수이다. 일반적으로 에어로솔의 입자가 작을수록 Ångström지수는 큰 값을 갖는다(곽종희 외, 2005). 5월 19일 ~ 22일의 일정한 값을 갖는 Ångström 지수는 같은 종류의 에어로솔이 지속되며, 그 에어로솔은 입자의 크기가 비교적 작다는 것을 의미한다. 위의 특성들을 종합해보면 이 시기에 연무를 구성하는 에어로솔은 러시아 산불에서 기인한 것

이라고 확인할 수 있다.

위에서 소개한 새로운 알고리즘을 사용하여 한반도를 중심으로 하는 2003년 5월 19일 0425UTC, 20일 0155UTC, 21일 0415UTC, 22일 0455, 0500UTC의 구름광학두께와 유효입자반경을 계산하였다. RGB영상과 비교하였을 때, 새로운 알고리즘을 이용하여 계산한 구름광학두께와 유효입자반경이 정확하게 복원되었음을 알 수 있었다. 에어로솔이 존재할 때, 구름과 에어로솔의 상호작용으로 구름의 응결핵이 증가하여 구름의

Table 5. Mean values and standard deviations of cloud effective particle radius

	May, 2003 (monthly mean)	19, May 2003	20, May 2003	21, May 2003	22, May 2003
Mean	13.2	10.4	9.3	11.5	9.7
Standard deviation	7.3	7.4	4.7	5.3	7.0

광학두께는 커지고 구름입자의 크기는 감소한다는 것을 확인 할 수 있었다(Twomey, 1974).

에어로솔의 영향으로 유효입자반경이 얼마나 작아졌는지 알아보기 위해 에어로솔이 있는 날과 없는 날의 유효입자반경의 빈도수를 비교했다(Fig. 9~10). 2003년 5월 중 에어로솔이 거의 없는 날을 선택하여 월평균 유효입자반경의 빈도수(Fig. 9)와 에어로솔이 많이 있는 날인 5월 19일 ~ 22일의 평균 유효입자반경의 빈도수(Fig. 10)를 비교하였다. 이 때, 한반도 동해안 상의 총 운형 구름을 타겟으로 하였다. 그 결과, 연무가 없는 한 달 가량의 평균 유효입자반경 값은 약 13.2인데 반해, 19일은 10.42, 20일은 9.33, 21일은 11.48, 22일은 9.65로 현저히 작은 값을 갖는다(Table 5). 또한 연무가 있는 날은 크기가 큰 구름입자 ($\text{유효입자반경} > 20$)의 빈도수는 거의 0에 가깝거나 매우 작은데 비해, 연무가 거의 없는 날은 크기가 큰 입자 ($\text{유효입자반경} > 20$)의 빈도수가 비교적 큰 값을 가지고 있다. 즉, 연무가 있는 시기의 구름은 연무가 없는 시기의 구름보다 유효입자반경이 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 ~ 10에서의 결과를 표준화하기 위해 누적빈도수를 계산하였다(Fig. 11). 2003년 5월 연무가 없는 날의 평균 누적 빈도수는 실선으로, 2003년 5월 연무가 많이 있을 때, 즉 5월 19일 ~ 22일까지의 누적 빈도수는 점선으로 표현하였다. 연무가 있는 날은 구름 유효입자반경의 누적 빈도수가 $15 \mu\text{m}$ 이하에서 급격히 상승하여 $20 \mu\text{m}$ 에서는 90%이상에 도달하는데 비해 (20일은 98%까지 도달), 연무가 없는 날은 $20 \mu\text{m}$ 이상에서도 완만한 곡선을 그리면서 상승하여 $20 \mu\text{m}$ 에서 82% 까지만 도달하고 있다. 연무가 있는 날은 유효입자반경이 $20 \mu\text{m}$ 이상인 구름입자는 거의 없으나 연무가 없는 날은 유효입자반경이 $20 \mu\text{m}$ 이상인 구름입자도 상당수 존재한다. 그리고 연무가 있는 날은 $15 \mu\text{m}$ 이하에서 급격히 상승하는 것으로 보아 유효입자반경이 $15 \mu\text{m}$ 이하의 구름 입자들이 대부분을 이루고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 연무가 없는 날은 입자의 크기가 큰 구름이 존재함에 비해 연무가 있는 날은 입자의 크기가 큰 구름이 거의 존재 하지 않는다.

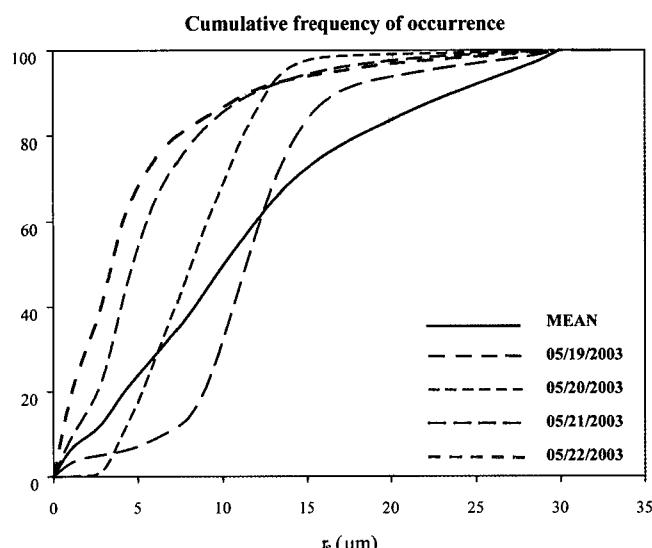


Fig. 11. Cumulative frequency histogram of effective particle radius.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 에어로솔의 간접 효과를 고려한 구름 특성을 산출하기 위해 새로운 알고리즘을 개발하였다. 그리고 개발한 알고리즘을 이용해 계산한 구름의 미세 물리적 특성 중 구름광학두께와 유효입자반경이 에어로솔로 인해 어떻게 변화하는지 알아보았다. 이 때, 복사 전달모델(SBDART)에서 $0.6 \mu\text{m}$ 과 $1.6 \mu\text{m}$ 의 복사휘도를 사용하여 LUT를 만들고 MODIS 관측값을 사용하여 구름광학두께와 유효입자반경을 동시에 산출하였다. 또한 TB₁₁과 BTD₁₁₋₈의 적절한 임계값을 구한 후, 그러한 임계값에 따라 해당 화소의 구름상을 결정하였다.

러시아지역에 산불이 있었던 2003년 5월 한반도 주변을 사례로 선택하였다. 이 시기에 발생한 에어로솔은 대기 흐름을 따라 한반도까지 도달하여 한반도 주변의 날씨에 매우 많은 영향을 주었다. 본 연구에서는 이 시기에 러시아 지역의 산불로 인하여 발생한 에어로솔이 한반도 주변의 구름에 어떠한 영향을 주는지 알아보았다. 산출결과 에어로솔이 있는 시기에 구름광학두께는 증가하고 유효입자반경은 감소하였다. 특히 에어로솔이 있는 시기에는 유효입자반경이 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 구름은 거의 존재하지 않음에 비해, 에어로솔이 거의 없는 시기에는 $20 \mu\text{m}$ 이상의 큰 구름도 다수 존재하였다. 즉, 에어로솔의 영향하에 발달한 구름은 구름광학두께는 크고, 유효입자반경은 작은 구름이라는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 에어로솔이 구름의 특성을 변화시킨다는 것을 보여준다.

사사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2103)의 지원으로 수행되었습니다. 건설적인 의견을 주신 익명의 두 분 심사자께 감사드립니다.

참고문헌

곽종흠, 서명석, 김맹기, 곽서연, 이태희, 2005. 스카이 라디오미터(Sky-radiometer)로 관측된 공주

지역 에어로솔의 광학적 특성, 한국지구과학회지, 26(8): 790-799.

임주연, 전영신, 조경미, 이상삼, 신혜정, 2004. 2003년 5월의 연무 관측시 에어로솔의 기상, 물리, 화학 특성, 한국대기환경학회지, 20: 697-711.

Baum, B. A., P. F. Soulen, K. I. Strabala, M. D. King, S. A. Ackerman, W. P. Menzel, and P. Yang, 2000. Remote sensing of cloud properties using MODIS Airborne Simulator imagery during SUCCESS. II. Cloud thermodynamic phase, *J. Geophys. Res.*, 105: 11,781-11,792.

Bréon, F. M., D. Tanré, and S. Generoso, 2002. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite, *Science*, 295: 834-838.

Cattani, E., M. J. Costa, F. Torricella, V. Levizzani, and A. M. Silva, 2003. Comparison of cloud microphysical properties retrieved from different algorithms during aerosol transport events. *Proc. 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, Weimar, Germany, 29, Sept.-3 Oct., 678-685.

Costa, M. J., E. Cattani, F. Torricella, A. M. Silva, and V. Levizzani, 2004. Cloud microphysical properties retrieval in the presence of strong aerosol events. *Proc. 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, Weimar, Germany, 29, Sept.- 30 Oct., 671-677.

Gosse, S., D. Labric, and P. Chylck, 1995. Refractive index of ice in the 1.4-7.8 μm spectral range. *Appl. Opt.*, 34: 6582-6586.

Kawamoto, K. and T. Nakajima, 2003. Seasonal variation of cloud particle size from AVHRR remote sensing, *Geophys. Res. Lett.*, 30: 1810-1813.

Kim, D. H., B. J. Sohn, T. Nakajima, and T. Takamura, 2005. Aerosol radiative forcing over East Asia determined from ground-based solar radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, D10(D10S22), doi:10.1029/

- 2004JD00467.
- King, M. D., S. C. Tsay, S. Platnick, M. Wang, and K. N. Liou, 1998. Cloud retrieval algorithms for MODIS: optical thickness, effective particle radius, and thermodynamic phase. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document ATBDMOD-05 (NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., 1996), available at http://modis-atmos.gsfc.Vasa.gov/_docs/atbd_mod05.pdf.
- Koppmann, R., R. Bauer, F. J. Johnen, C. Plass, and J. Rudolph, 1992. The Distribution of Light Nonmethane Hydrocarbons over the Mid-Atlantic: Results of the Polarstern Cruise ANT VII/1, *J. Atmos. Chem.*, 15: 215-234.
- Lee, K. H., J. E. Kim, Y. J. Kim, J. Kim, and W. von Hoyningen, 2005. Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003. *Atmos. Env.*, 39: 85-99.
- Nakajima, T. and M. D. King, 1990. Determination of the Optical Thickness and Effective Particle Radius of Clouds from Reflected Solar Radiation Measurements. Part I: Theory, *J. Atmos. Sci.*, 47, 1878-1893.
- Nakajima, T. Y. and T. Nakajima, 1995. Wide-area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX regions, *J. Atmos. Sci.*, 52: 4043-4059.
- 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.
- Rosenfeld, D., 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 26: 3105-3108.
- Swap, R., M. Garstang, S. A. Macko, P. D. Tyson, W. Maenhaut, P. Artaxo, P. Kallberg, and R. Talbot, 1996. The long range transport of southern African aerosols to the tropical South Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 101: 23,777-23,791.
- Twomey, S. and T. Cocks, 1989. Remote sensing of cloud parameters from spectral reflectance in the near-infrared, *Beitr. Phys. Atmos.* 62: 172-179.
- Yoon, S. C., J. G. Won, A. H. Omar, S. W. Kim, and B. J. Sohn, 2005. Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data, *Atmos. Env.*, 39: 6620-6630.