

에어로졸 종류 구분을 위한 MODIS 에어로졸 자료의 적용

이동하 · 이권호 · 김영준[†]

광주과학기술원 환경공학과 환경 모니터링 신기술 연구센터

Application of MODIS Aerosol Data for Aerosol Type Classification

Dong Ha Lee, Kwon Ho Lee, and Young Joon Kim[†]

Advanced Environmental Monitoring Research Center (ADEMRC) Dept. of Environmental Science & Engineering
Gwangju Institute of Science & Technology (GIST)

Abstract : In order to classify aerosol type, Aerosol Optical Thickness (AOT) and Fine mode Fraction (FF), which is the optical thickness ratio of small particles (<1 μ m) to total particles, data from MODIS (MODerate Imaging Spectraradiometer) aerosol products were analyzed over North-East Asia during one year period of 2005. A study area was in the ocean region of 20°N ~ 50°N and 110°E ~ 150°E. Three main atmospheric aerosols such as dust, sea-salt, and pollution can be classified by using the relationship between AOT and FF. Dust aerosol has frequently observed over the study area with relatively high aerosol loading (AOT>0.3) of large particles (FF<0.65) and its contribution to total AOT in spring was up to 24.0%. Pollution aerosol, which is originated from anthropogenic sources as well as a natural process like biomass burning, has observed in the regime of high FF (>0.65) with wide AOT variation. Average pollution AOT was 0.31 ± 0.05 and its contribution to total AOT was 79.8% in summer. Characteristic of sea-salt aerosol was identified with low AOT (<0.3), almost below 0.1, and slightly higher FF than dust and lower FF than pollution. Seasonal analysis results show that maximum AOT (0.33 ± 0.11) with FF (0.66 ± 0.21) in spring and minimum AOT (0.19 ± 0.05), FF (0.60 ± 0.14) in fall were observed in the study area. Spatial characteristic was that AOT increasing trend is observed as closing to the eastern part of China due to transport of aerosols from China by the prevailing westerlies.

Key Words : MODIS, MOD04, AOT, FF, Aerosol type classification.

요약 : 에어로졸 종류별 구분을 위하여, 2005년 한해 동안 동북아시아지역을 대상으로 MODIS 에어로졸 자료인 에어로졸 광학두께(AOT)와 미세입자 비율(FF)을 분석하였다. 동북아시아 (북위 20~50도, 동경 110~150도)의 해양에서 관측된 에어로졸 자료를 이용하였다. AOT와 FF의 상호관계를 이용하면 주요 3가지 대기 오염 에어로졸인 먼지입자, 해양입자, 오염입자를 구분할 수 있다. 먼지입자의 경우 주로 높은 AOT (>0.3)와 낮은 FF(<0.65)의 특징으로 봄철 빈번히 발생한다. 2005년 봄철 평균 AOT에 대한 먼지입자의 기여도가 24.0%로 다른 계절보다 큼을 알 수 있다. 주로 인위적으로 발생하는 오염입자의 경우 높은 FF(>0.65)와 넓은 AOT범위에서 관측되었다. 여름철 오염입자의 평균 AOT는 0.31 ± 0.05 이고 전체 AOT

2006년 5월 23일 접수 ; 2006년 10월 14일 수리.

[†] 교신저자: 김영준(yjkim@gist.ac.kr)

에 대한 기여도는 79.8%로 여름철 오염입자에 의한 영향이 큼을 알 수 있었다. 해염입자의 특징으로는 대부분의 AOT가 0.1이하로 낮은 AOT(<0.3)값이 나타났으며 FF의 경우 먼지입자보다는 크고 오염입자보다는 낮은 범위의 값이 주로 나타났다. 계절적으로 봄철(0.33 ± 0.11)에 가장 높은 AOT값이 나타났으며(FF: 0.66 ± 0.21), 가을철 가장 낮은 AOT(0.19 ± 0.05)값이 나타났다(FF: 0.60 ± 0.14). 공간분포 특징으로는 중국연안으로 갈수록 높아지는 AOT특징이 나타났고, 이는 편서풍대에 속하는 관측지역의 지형학적인 특징으로 인해 중국대륙의 공단지역에서 발생한 에어로졸의 이동 때문인 것으로 여겨진다.

1. 서론

에어로졸은 대기 중에 부유하고 있는 작은 입자로써 태양 복사광을 산란/흡수하여 지구 에너지 균형에 영향을 미친다. 또한 구름응결핵(CCN; Cloud condensation nuclei)으로써 구름입자와의 상호작용으로 구름의 물리적 특성을 변화시켜 결과적으로 구름의 복사특성과 강우과정에 영향을 미친다(Twonmey, 1977; Rosenfield and Lensky, 1998). 또한 에어로졸은 시정 거리를 감소시키며, 호흡기를 통한 인체 유입으로 인간의 건강에 영향을 미치는 대기 오염물질이기도 하다. 이러한 에어로졸은 주로 자연적인 원인에 의해 생성되는 먼지(Dust)와 해염입자(Sea-salt)뿐만 아니라, 인위적인 원인으로 발생하는 오염입자(Mainly Carbon and Sulfate particles)로 구분할 수 있으며 종류에 따라 각각의 고유한 물리적, 화학적 특성을 가지고 있다.

한편, 동북아시아 지역은 전 세계적으로 중요한 에어로졸 발생지로서 해마다 봄철 발생하는 중국내륙기원의 황사(Chun *et al.*, 2001), 해양에서 발생하는 해염입자, 그리고 산업화된 도시지역에서 발생하는 오염입자(이권호 외 2004a; 이권호, 김영준, 2004b)에 영향을 받고 있다. 특히, 인공위성 원격탐사자료를 이용한 에어로졸 연구는 광범위한 영역을 지속적으로 관측할 수 있는 장점이 있어서 지난 수년 동안 에어로졸 특성 관측을 중심으로 이루어졌다(King *et al.*, 1999). 이러한 대기 에어로졸에 관한 연구는 다양한 위성센서(NOAA/AVHRR, SeaWiFS, MODIS, MISR 등)를 이용하여 관측된 자료를 바탕으로 이루어지고 있다. AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)은 바다표면의 온도와 식생지수(vegetation index)를 관측하는 목적으로 주로 이용되고, SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)는 해양생태계에 관한 연구를 위하여 해색(Ocean color)을 관측하는 주된 목적이 있

다. 이러한 목적에 맞는 정확한 자료의 생산을 위하여 대기 보정 알고리즘을 사용하는데, 이 알고리즘을 통하여 에어로졸 자료를 생산하고 이용할 수 있다(Kuring *et al.*, 1999). MODIS (MODerate Imaging Spectroradiometer)와 MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer)의 경우 다채널 센서를 이용하여 대기, 육지, 해양, 복사과정에 관한 다양한 정보를 제공함으로써 대기 에어로졸의 기원과 이동에 관한 연구에 활발히 이용되고 있다(Lee *et al.*, 2005).

MODIS(MODerate Imaging Spectroradiometer)는 미국의 지구환경관측 계획(EOS; Earth Observing System)을 수행하기 위해 1999년과 2002년에 각각 테라와 아쿠아 위성에 탑재된 센서로서 $0.41 \sim 5\mu\text{m}$ 범위의 36개의 분광채널을 가지고 있다. 광범위한 파장영역과 3가지의 공간해상도(250m, 500m, 1km)를 가지는 특성으로 인하여 에어로졸 관측에 적합한 조건을 가지고 있다. 에어로졸 관측은 $0.47 \sim 2.13\mu\text{m}$ 사이의 7개 채널을 이용하고, 에어로졸 광학두께(AOT; Aerosol Optical Thickness)와 에어로졸 크기 분포 정보(FF; Fine Fraction)에 관한 MODIS만의 독특한 자료를 제공한다(Remer *et al.*, 2005). 특히 MODIS 에어로졸 관측자료의 정확성은 육상에서 $\pm 0.05 \pm 0.2\tau$ (Chu *et al.*, 2002)과 해상에서 $\pm 0.03 \pm 0.05\tau$ (Remer *et al.*, 2002)와 같이 보고되어 에어로졸 관측에 용이하다.

일반적으로 에어로졸 종류별 크기분포는 그림 1과 같이 입자크기에 따라 3 종류인 초미세입자(Ultra-fine particles), 미세입자(Fine particles), 조대입자(Coarse particles)로 나눌 수 있다. 초미세입자는 주로 가스에서 입자로 상변화에 의해서 생성되며 대기 중 체류시간이 수초 내로 짧아 쉽게 미세입자로 응집한다. 미세입자는 바이오매스 연소와 산불에 의해서 생성되는 Sulfate와 Soot과 같이 직경 $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 입자들을 포함하는 반면 조대입자는 주로 물리적 작용에 의한 기원으로 입자 크기가 $2.5\mu\text{m}$ 이상인 먼지입자와 해염

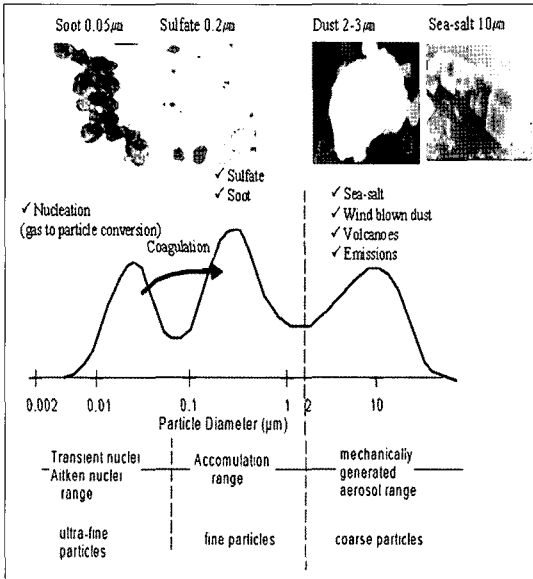


Fig. 1. Aerosol surface area distribution with the main modes and interesting particles by Whitby, K. T. and Cantrell, B. K., 1976.

입자로 구성되어 있다. 인공위성 원격탐사에서 에어로졸 크기 구분을 이용하여 자연적으로 발생된 에어로졸과 인위적으로 발생된 에어로졸을 구분할 수 있다. 인위적으로 발생된 에어로졸은 주로 미세입자 범위(유효반경 $0.1\mu\text{m} < \text{reff} < 0.25\mu\text{m}$)에 많이 분포하는 반면 자연적으로 발생된 에어로졸은 유효반경이 $1\sim 2.5\mu\text{m}$ 에 주로 존재한다(Kaufman *et al.*, 2001; Tanre *et al.*, 2001). 따라서 미세입자와 조대입자간의 비율 산출과 AOT와의 상호관계 이용은 AOT만으로 구분하기 어려운 에어로졸 종류와 기원을 구분할 수 있게 한 중요한 방법이다. 본 연구에서는 AOT와 FF의 관계를 이용하여 3가지 주요 에어로졸의 종류를 구별하였고 이를 바탕으로 계절별 평균 AOT에 대한 각 종류별 기여도를 산출하였다.

II. 자료 및 방법

본 연구에서는 MODIS에 의해 관측된 에어로졸 자료를 분석하기 위하여 MODIS 에어로졸 표준 자료인 MOD04_L2자료(Version 4.2.4)를 이용하였다. MODIS 에어로졸 해상 알고리즘은 육지보다 지표 반사도가 비교적 균일하고 낮은 바다표면에서 이루어지기 때문에 육상 알고리즘보다 높은 정확성을 가진다

(Tanre *et al.*, 1999; King *et al.*, 1999). 또한 에어로졸 크기 분포($0.08\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$)에 관한 정보도 제공하는데 이것은 6개의 밴드영역($0.55\mu\text{m}\sim 2.13\mu\text{m}$)에서 Look-Up Table(LUT)에 미리 가정된 11개의 크기분포(5가지 미세입자 영역과 6가지 조대입자 영역)를 이용하여 계산된 반사도와 위성 센서를 통해 관측된 반사도의 차이를 이용하여 다음과 같은 식으로 계산된다(Remer *et al.*, 2005).

$$\rho_{\lambda}^{LUT}(\tau_{0.55}^{tot}) = \eta \rho_{\lambda}^f(\tau_{0.55}^{tot}) + (1 - \eta) \rho_{\lambda}^c(\tau_{0.55}^{tot}) \quad (1)$$

여기서, ρ_{λ}^{LUT} 은 총 파장 반사도, $\tau_{0.55}^{tot}$ 은 $0.55\mu\text{m}$ 에서의 총 광학두께, ρ_{λ}^f 와 ρ_{λ}^c 는 총 파장 반사도에 대한 미세입자와 조대입자 각 모드의 대기 반사도이고, η 는 반사도 부가변수이다. $0.55\mu\text{m}$ 파장에서의 총 광학두께($\tau_{0.55}^{tot}$)는 두가지 종류인 미세입자에 의한 광학두께($\tau_{0.55}^f$)와 조대입자에 의한 광학두께($\tau_{0.55}^c$)의 합으로 구해지고, η 는 범위가 0~1로써 미세입자 광학두께에 대한 총 광학두께의 비율로 계산되며 다음과 같다.

$$\tau_{0.55}^{tot} = \tau_{0.55}^f + \tau_{0.55}^c \quad (2)$$

$$\eta = \tau_{0.55}^f / \tau_{0.55}^{tot} \quad (3)$$

연구대상지역은 북위 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 동경 $110^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 의 사각형 영역으로 중국 남·동부, 황해, 한반도 전역, 일본과 북태평양 지역을 포함하는 동북아시아지역의 해역

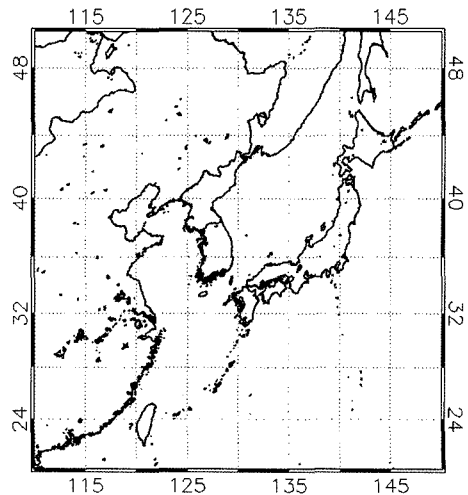


Fig. 2. ROI(Research Of Interesting area): Longitude: $110\sim 150^{\circ}\text{E}$ / Latitude: $20\sim 50^{\circ}\text{N}$.

에 해당한다(그림 2). 앞서 언급한 AOT와 FF의 상호관계를 이용하여, 관심지역에 대한 대기 에어로졸의 종류별 분포 상태를 파악하기 위하여 2005년 한해 동안의 관측 자료를 이용하였다. 그리고 공간해상도의 균일한 격자화를 위하여 한 격자당 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (약 10km^2)의 해상도를 가지도록 평균화 하였다. AOT와 FF의 상호관계에 의한 종류별 구분은 Barnaba and Gobbi, (2004)의 지중해 지역에 관한 논문과 같이 3가지 주요 대기 에어로졸(먼지입자, 해양입자, 오염입자)을 대상으로 하였다. 중국내륙 사막지역에서 물리적 작용에 의해 건조한 봄철 빈번히 발생하여 장거리 이동해오는 먼지입자(Dust aerosol), 바람의 작용으로 바다 표면에서 생성되는 해양입자(Maritime aerosol), 그리고 북태평양 연안 지역들로부터 인위적이거나 자연발생으로 유입되는 오염입자(Pollution aerosol)가 이에 해당한다. 이러한 종류별 구분을 이용하여 봄(3, 4, 5월), 여름(6, 7, 8월), 가을(9, 10, 11월), 겨울(12, 1, 2월)의 2005년 한해 동안의 계절별 AOT 특성과 총 AOT와 FF에 대한 각 종류별 에어로졸의 기여도를 계산하였다. 또한 각 픽셀당 7일 이하의 관측일수를 기록한 경우 AOT 및 FF 산출에서 제외하였다.

III. 결과

본 연구의 관측지역인 동북아시아지역에서의 3가지 대표적인 에어로졸의 구분 기준을 제시하기 위해 적합한 사례를 찾아 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 각 사례에 해당하는 MODIS RGB 영상, AOT, FF 분포도이다. 주로 봄에 빈번히 발생하는 대기현상인 먼지입자의 경우 한반도지역에서 황사가 관측된 4월 20일 황해지역에서, 미세입자 영역에 주로 분포하는 오염입자의 경우 중국발생의 오염에어로졸이 황해상으로 유입되는 8월 28일 황해지역에서, 구름의 영향이 없으며 외부에서 유입되는 오염에어로졸이 거의 없는 청정대기에 해당하는 해양입자의 경우 9월 15일 동해해상에서, 각각 관측되었고 붉은 상자영역으로 표시하여 나타내었다. 먼지입자 (a)와 오염입자 (b)의 경우 AOT가 둘 다 높은 값을 나타내 AOT만으로는 구별이 어렵다. 반면 RGB영상에서는 먼지입자의 경우 황색을, 오염입자의 경우 연회색

으로 시각적인 차이점이 있다. 이러한 시각적 차이는 입자의 물리적(입자크기, 모양 등) 광학특성(산란, 흡수)에 영향을 받기 때문에 이 성질을 이용하면 대표적 입자의 종류를 구분할 수 있다. 입자의 구분은 입자의 크기에 따라 작은 입자(Carbon, Sulfate)와 큰 입자(Dust, Sea-salt)로 구분이 되며 광학특성에 따라 흡수성(Carbon, Dust), 비흡수성(Sulfate, Sea-salt)으로 구분된다.

이러한 서로 다른 물리적 특징을 가지는 에어로졸의 구분 기준을 제시하기 위하여 그림 3에서 획득된 에어로졸 종류별 AOT와 FF의 상호관계를 그림 4로 나타내었다. 각 종류별 특징으로는, 조대입자가 많은 먼지입자의 경우 $AOT > 0.3$ 과 $FF < 0.65$ 에서 관측되었으며 대부분의 경우 AOT가 0.6~1.0 사이에 분포하는 특징이 있다. 해양입자의 경우 매우 낮은 AOT (< 0.35)와 비교적 큰 FF (< 0.65)의 범위에 해당하는 특성을 보였다. 특히 대부분의 해양입자는 AOT의 값이 약 0.1로써 나타났는데 이는 Smirnov *et al.* (1995)에서 보고된 청정바다지역에서 오염물의 유입이 없는 순수 대기에 의한 AOT의 값이 $AOT \leq 0.1$ 인 특징과 유사함으로 대기오염의 영향이 없는 경우에 해당한다. 오염입자의 경우 AOT값 변화 범위가 넓은 반면, 공통적으로 미세입자 영역($FF > 0.65$)에 분포하는 특성을 보였다. 따라서 그림 4과 같이 먼지입자의 경우 $AOT > 0.3$ 과 $FF < 0.65$, 해양입자의 경우 $AOT < 0.3$ 과 $FF < 0.65$, 그리고 오염입자의 경우 AOT변화에 상관없이 $FF > 0.65$ 에 해당하는 분류기준을 제시하였다.

분류기준의 타당성을 검증하기 위하여 몇 가지의 다른 경우에 적용하여 그림 5와 같이 나타내었다. 그림 5(a)는 RGB영상에서 2005년 4월 13일 중국동부지역에서 황해지역으로 연회색의 연무(haze)가 유입되는 경우이다. 이 영역내의 AOT가 높게(> 1.0) 나타났고, 제시된 분류기준의 적용으로 인해 오염입자에 의한 영향임을 확인할 수 있었다. 그림 5(b)의 경우 6월 23일 중국 동부지역의 대규모 화재지역에서 발생한 스모크 플룸(붉은색 영역)으로 인하여 대부분의 황해지역이 높은 AOT(> 1.0)값을 나타냈으며 분류기준에 의해서 오염입자로 구분되었다. 반면 그림 5(c)의 경우는 11월 6일에 발생한 황사가 관측된 날로써, RGB영상에서 황사가 유입되는 황해 북부지역으로 황색의 대기 에어로졸(황색

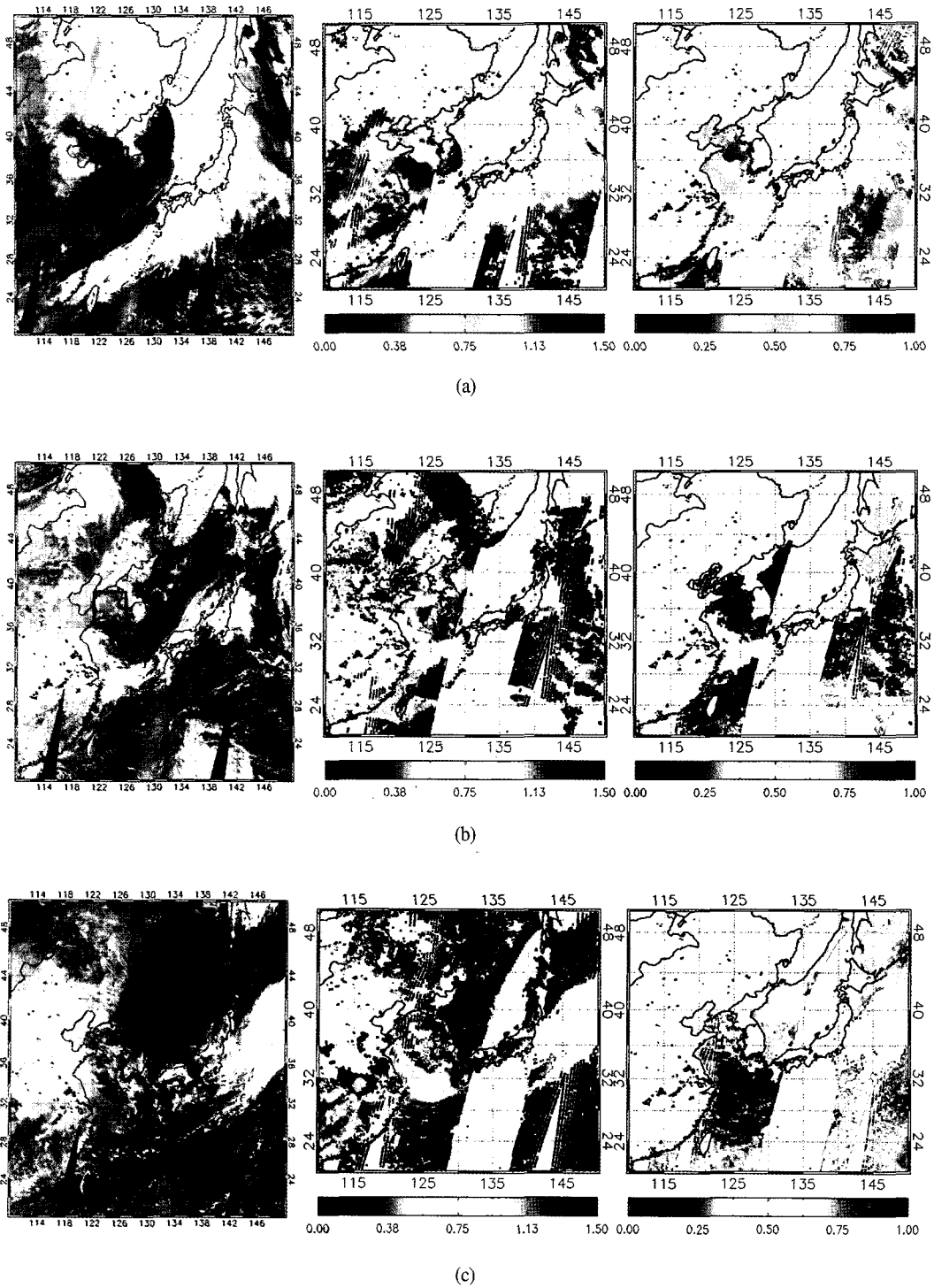


Fig. 3. RGB(left), AOT(middle), and FF(right) images of different cases of (a) Asian dust on 20, April, (b) Pollution on 28, August, and (c) Maritime on 15, September, respectively. Note the red boxes in RGB images are the data sampling areas for threshold value determination in Fig. 3.

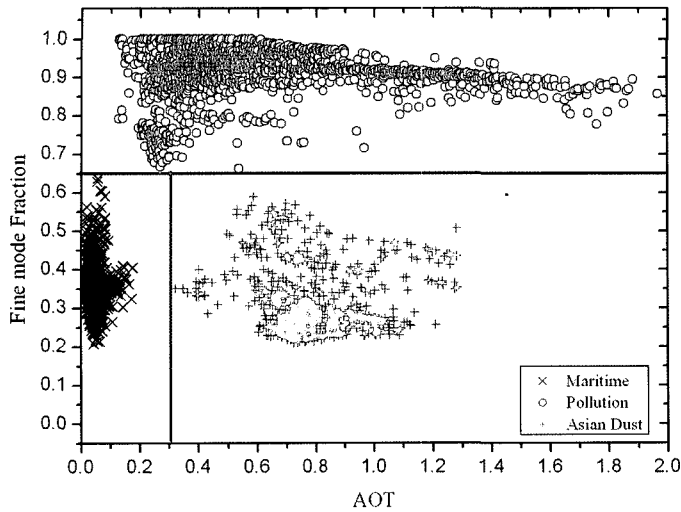


Fig. 4. Classification of aerosols into 3 categories such as (a) Dust case which shows the property of high AOT with low FF, (b) Pollution case whose property is high AOT with high FF, (c) Clear day case of low AOT and FF; the origin chart.

영역)이 나타났다. 이 역시 AOT가 2이상으로 높은 값을 나타냈으며 다른 사례와는 달리 낮은 FF로 제시된 분류 기준에 의해 먼지입자로 구분되어 나타났다. 또한 황해 남부지역 역시 높은 AOT를 보였으나 이는 연회색의 연무로서 오염입자로 구분되었다. 이로써 제시된 분류 기준의 사례연구에 대한 적용이 동북아시아 지역의 대표적인 대기 에어로졸을 잘 구분하는 것을 알 수 있었다.

한편, 2005년 한해 동안 계절에 따른 각 종류별 에어로졸의 기여도를 계산하기 위하여 봄(3, 4, 5월), 여름(6, 7, 8월), 가을(9, 10, 11월), 겨울(12, 1, 2월)로 나누어 각 계절별 AOT와 FF값을 산출하였다. 각 픽셀이 가지는 계절평균 AOT값은 AOT_s 로 나타내었으며 다음의 식으로 계산하였다.

$$AOT_s = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} AOT_i \quad (4)$$

여기서 s 는 계절, N_s 는 계절별 각 픽셀에서의 관측 일수, AOT_i 는 i 일에 관측된 AOT 값으로 총 관측 AOT의 합을 관측일수로 평균화하였다. 또한 각 픽셀에 대한 계절별, 종류별 AOT의 값은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$AOT_{s, type} = \frac{1}{N_{s, type}} \sum_{i=1}^{N_{s, type}} AOT_{type, i} \quad (5)$$

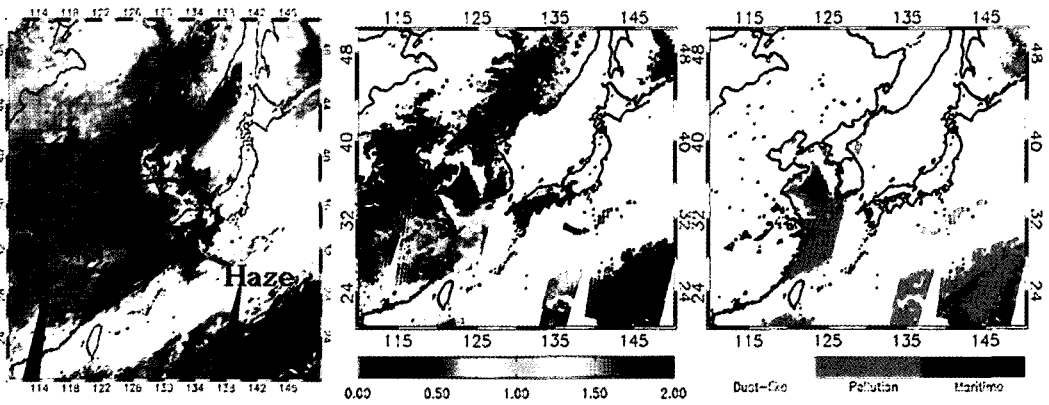
여기서 $type$ 는 각 종류별 에어로졸(먼지입자, 해염입자,

오염입자), $N_{s, type}$ 는 각 계절에 관측된 종류별 에어로졸의 관측일수이고 $N_s = \sum_1^3 N_{s, type}$ 이다. $AOT_{s, type}$ 는 각 계절에 대한 3가지 종류의 에어로졸의 각각의 평균값을 의미하기에 전체 평균 AOT에 대한 종류별 에어로졸의 기여도를 나타내기 위해서 다음과 같은 식을 사용하였다.

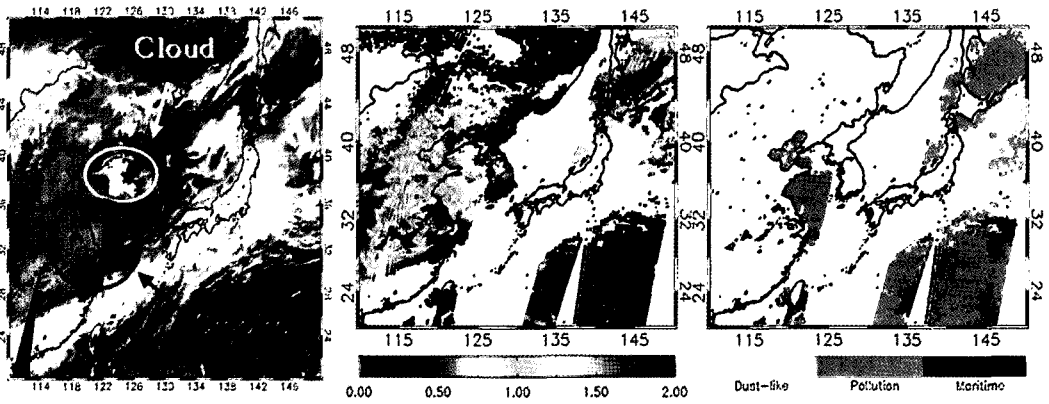
$$AOT^*_{s, type} = f_{s, type} \cdot AOT_{s, type} \quad (6)$$

여기서 $AOT^*_{s, type}$ 는 계절별 평균 AOT인 AOT_s 에 대한 각 종류별 기여도를 의미하고 $f_{s, type}$ 은 전체 관측 픽셀수에 대한 각 종류별 픽셀수의 비로서 구해지며 3가지 타입의 합이 1을 나타낸다. $AOT_{s, type}$ 은 식 (5)에서 산출된 값이고 FF에 대해서도 AOT로 동일한 방법으로 산출하였다. 위의 식들에 의해 구해진 AOT와 FF에 대한 값을 표 1과 표 2에 각각 나타내었으며 공간적 분포특성을 위해 계절별 평균 AOT와 종류별 기여도를 그림 6에 나타내었다. 자료의 신뢰성을 높이기 위하여 관측일수가 7일 이하의 픽셀은 계산에서 제외하였다. 이렇게 제외되거나 자료가 없는 경우 흰색으로 표시하여 구분하였다.

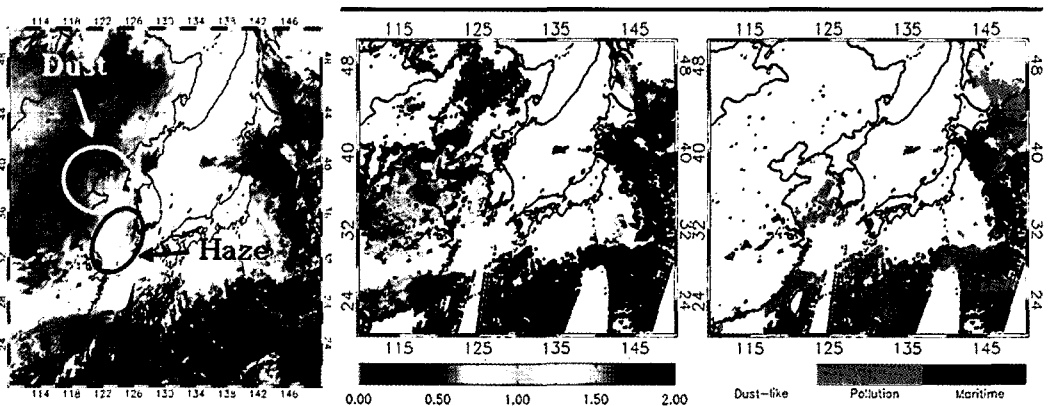
그림 6에 나타난 공간적 특징으로는 연중 한반도를 기준으로 동해지역보다 황해지역의 AOT가 높았으며 중국연안으로 갈수록 높아지는 경향이 나타났다. 이는 북태평양으로 갈수록 낮아지는 AOT값과 상반되는 것



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. RGB(left), AOT(middle), Type classified(right) images for application of threshold values into other cases on (a) 13 April, (b) 23 June, and (c) 6 November, respectively.

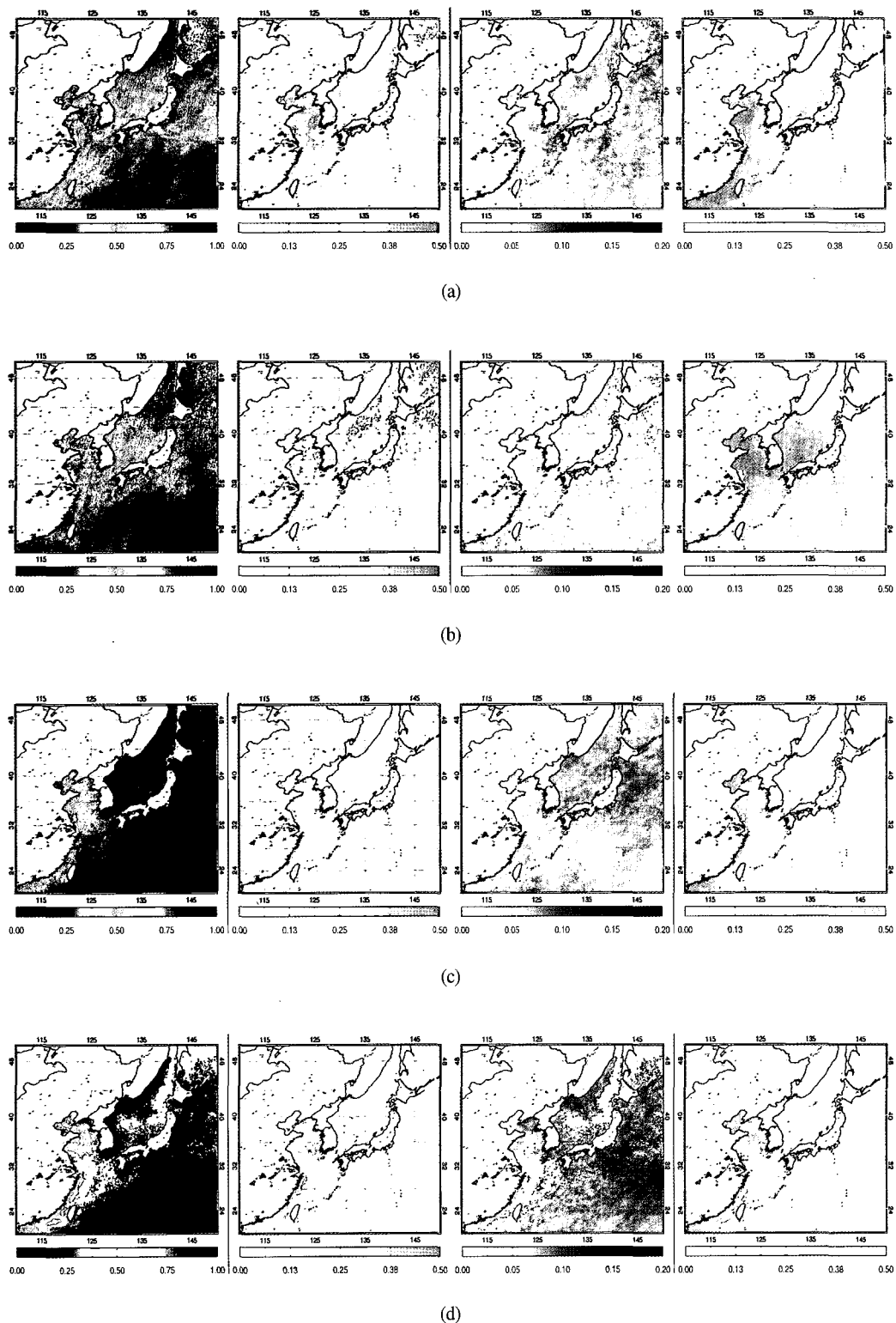


Fig. 6. Seasonal variability of each aerosol type of AOTs(left), Asian dust(middle-left), Maritime(middle-right), and Pollution(right) aerosol in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter, respectively.

Table 1. Seasonal average and standard deviation values of each type aerosol ($AOT_{type} \pm s.d.$), the each fraction to total mean AOT ($AOT_{type}^* \pm s.d.$), and total AOT ($AOT \pm s.d.$).

	$AOT_{S, type} \pm s.d.$			$AOT_{S, type}^* \pm s.d.$ ($AOT_{S, type}^* / AOT_{S, total}$) in %			$AOT_S \pm s.d.$
	Dust	Maritime	Pollution	Dust	Maritime	Pollution	
Spring	0.66 ± 0.28	0.17 ± 0.02	0.35 ± 0.06	0.08 ± 0.03 (24.0%)	0.05 ± 0.01 (15.7%)	0.20 ± 0.03 (60.3%)	0.33 ± 0.11
Summer	0.61 ± 0.57	0.14 ± 0.03	0.31 ± 0.05	0.02 ± 0.02 (9.2%)	0.03 ± 0.01 (11.0%)	0.23 ± 0.04 (79.8%)	0.28 ± 0.09
Fall	0.47 ± 0.13	0.12 ± 0.01	0.24 ± 0.05	0.02 ± 0.01 (12.8%)	0.06 ± 0.01 (32.0%)	0.11 ± 0.02 (55.3%)	0.19 ± 0.05
Winter	0.42 ± 0.09	0.14 ± 0.01	0.25 ± 0.06	0.03 ± 0.01 (15.7%)	0.09 ± 0.01 (45.0%)	0.08 ± 0.02 (39.3%)	0.20 ± 0.05
Total	0.54 ± 0.27	0.14 ± 0.02	0.29 ± 0.06	0.04 ± 0.02 (15.5%)	0.06 ± 0.01 (25.1%)	0.14 ± 0.03 (59.4%)	0.24 ± 0.07

Table 2. Seasonal average and standard deviation values of each type aerosol ($FF_{type} \pm s.d.$), the each fraction to total mean FF ($FF_{type}^* \pm s.d.$), and total FF ($FF \pm s.d.$).

	$FF_{S, type} \pm s.d.$			$FF_{S, type}^* \pm s.d.$ ($FF_{S, type}^* / FF_{S, total}$) in %			$FF_S \pm s.d.$
	Dust	Maritime	Pollution	Dust	Maritime	Pollution	
Spring	0.50 ± 0.13	0.50 ± 0.18	0.79 ± 0.18	0.06 ± 0.02 (9.2%)	0.15 ± 0.04 (23.1%)	0.45 ± 0.10 (67.6%)	0.66 ± 0.21
Summer	0.51 ± 0.10	0.50 ± 0.05	0.84 ± 0.02	0.02 ± 0.01 (2.5%)	0.11 ± 0.03 (15.2%)	0.62 ± 0.05 (82.2%)	0.75 ± 0.22
Fall	0.49 ± 0.07	0.45 ± 0.02	0.79 ± 0.01	0.03 ± 0.01 (4.4%)	0.23 ± 0.03 (38.3%)	0.35 ± 0.04 (57.3%)	0.60 ± 0.14
Winter	0.48 ± 0.08	0.43 ± 0.03	0.75 ± 0.02	0.04 ± 0.02 (6.6%)	0.26 ± 0.03 (50.0%)	0.23 ± 0.05 (43.4%)	0.53 ± 0.15
Total	0.49 ± 0.07	0.46 ± 0.03	0.80 ± 0.02	0.03 ± 0.01 (5.4%)	0.20 ± 0.02 (32.0%)	0.39 ± 0.05 (62.6%)	0.63 ± 0.17

으로 지형학적 특징에 의한 중국지역에서 유입되는 대기 에어로졸의 영향으로 여겨진다. 2005년 한해 동안의 평균 AOT는 0.24 ± 0.07 이고 평균 FF는 0.63 ± 0.17 로 나타났다. 계절별 특징으로는 관측지역 평균 AOT가 가을(0.19 ± 0.05)과 겨울철(0.20 ± 0.05)에 비해 봄(0.33 ± 0.11)과 여름(0.28 ± 0.09)에 높게 나타났고 0.5이상의 AOT가 나타난 픽셀 역시 봄과 여름에 많은 지역에서 나타났다. 2005년의 황사의 발생빈도가 3월 1회, 4월 9회, 11월 2회로 총 10회가 봄철 발생했으며, 봄철 평균 AOT 0.33 ± 0.11 에 대한 먼지입자의 기여도는 0.08 ± 0.03 로써 24.0%를 차지한다. 이는 타 계절 (여름; 9.2%, 가을; 12.8%, 겨울; 15.7%) 먼지입자의 기여도보다 훨씬 높은 값으로 봄철 먼지입자에 의한 영향이 큼을

알 수 있다. 여름철의 경우 평균 AOT는 0.28 ± 0.09 로써 먼지입자의 기여도가 9.2%로 낮은 반면, 오염입자의 기여도는 AOT의 경우 0.23 ± 0.04 (79.8%)이고 FF의 경우 0.62 ± 0.05 (82.2%)로 미세입자인 오염입자에 의한 영향이 큼을 알 수 있다. 이는 여름철 집중적으로 나타난 중국지역의 바이오매스 연소로 생성된 대기 에어로졸의 장거리이동에 의한 영향인 것으로 여겨진다 (Barnaba and Gobbi, 2004).

계절 평균 FF의 경우 여름철 0.75 ± 0.22 로 가장 높아 미세입자에 의한 영향이 크고 가을(0.60 ± 0.14)과 겨울(0.53 ± 0.15)로 갈수록 미세입자의 영향이 작아지는 특징이 나타났다. 특히 가을철과 겨울철의 평균 AOT값이 비슷하지만, FF의 경우 서로 차이가 나는 것으로 에

어로졸의 종류별 기여도가 중요함을 알 수 있다. 가을과 겨울철의 경우 기온이 낮은 겨울철 오염입자의 AOT 기여도가 43.4%로 가을철 오염입자의 기여도(57.3%)에 비해 낮고, 해염입자 AOT 기여도가 가을철 38.3%에서 겨울철 50.0%로 높은 특징이 나타났다. 이는 가을과 겨울의 기온차이에 의해 겨울철 광화학반응에 의한 2차 오염물의 발생 감소가 원인으로 오염입자의 기여도가 줄고 상대적으로 해염입자의 기여도가 증가한 특징을 MODIS AOT와 FF 관측자료를 통하여 잘 설명할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

MODIS 위성으로 관측된 AOT와 FF자료를 이용하여 2005년 한해 동안 동북아시아의 대기 에어로졸의 대표적인 종류별 특성에 관하여 분석하였다. AOT와 FF를 이용하여 주 에어로졸 타입을 3가지(먼지입자, 해염입자, 오염입자)로 구분할 수 있는 기준을 제시하였으며, 이를 바탕으로 계절별 평균값과 계절별 평균값에 대한 종류별 입자들의 기여도를 계산하였다. 계절별 특징으로는 봄철 대륙 기원의 황사에 의한 영향으로 먼지입자의 AOT에 대한 기여도가 크고, 여름철의 경우 광화학반응에 의해 생성되는 2차 오염에어로졸이 주로 분포하는 오염입자의 영향이 큰 특징이 나타났다. 또한 겨울과 가을철로 갈수록 오염입자의 기여도가 줄고 해염입자의 기여도가 커지는 특징을 보이는데, 이는 기온에 따른 광화학반응의 감소로 인한 것으로 에어로졸의 계절별 변화 특성을 잘 설명한다. 공간적 특징으로는 오염입자의 발생이 많은 중국연안지역 AOT값이 높고 태평양으로 갈수록 낮아지는 경향이 나타났다. 이는 북반구 편서풍대에 속하는 동북아시아의 지형학적 영향에 의한 것으로 오염발생원이 많은 중국대륙에 가까울수록 AOT가 높아지는 특징을 보였다.

결론적으로, MODIS 위성 자료인 에어로졸 광학 파라미터 자료는 에어로졸의 종류별 특징을 구분하는데 유용하다. 특히 본 연구에서는 에어로졸 종류 구분을 위한 AOT와 FF의 기준을 제시하였고, 이를 통해 먼지입자, 해염입자, 오염입자간의 종류별 특징을 분석함으로써 대기오염원으로서의 에어로졸의 변화추이와 각 종류

별 기여도를 파악 할 수 있었다.

사 사

본 연구는 광주과학기술원 환경 모니터링 신기술연구센터(ADEMRC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다. MODIS 자료를 제공한 미국 NASA에 감사드립니다.

참고 문헌

- 이권호, 홍천상, 김영준, 2004a. MODIS와 TOMS 자료를 이용한 2001년 동북아시아 지역의 대기 에어로졸 모니터링, 대한원격탐사학회지, 20(2): 77-89.
- 이권호, 김영준, 2004b. 인공위성 자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아산불 시 발생한 에어로졸의 증장거리 모니터링, 한국대기환경학회지, 20(4): 437-450.
- Barnaba F. and G. P. Gobbi, 2004. Aerosol seasonal variability over the Mediterranean region and relative impact of maritime, continental and Saharan dust particles over the basin from MODIS data in the year 2001, *Atmos. Chem. Phys.*, 4: 2367-2391.
- Chu, D. A., Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Remer, L. A., Tanré, D., Holben, and B. N., 2002. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval overland, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2001GL013205.
- Chun, Y., K. Boo, J. Kim, S. Park, and M. Lee, 2001. Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, *J. Geophys. Res.*, 106(D16): 18461-18469.
- Kaufman, Y. J., A. Smirnov, B. N. Holben, and O. Dubovik, 2001. Baseline maritime aerosol: Methodology to derive the optical thickness and scattering properties, *Geophys. Res. Lett.*,

- 28: 3251-3254.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D., Boucher, and O., 2002. A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419: 215-223.
- King, M. D., Y. J. Kaufman, D. Tanre, and T. Nakajima, 1999. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: Past, present, and future. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80: 2229-2259.
- Kuring, N., R. Simmon, and J. Acker, 1999. SeaWiFS observes transport of Asian dust over the Pacific Ocean, http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/OCDST/asian_dust.html.
- Lee, K. H., J. E. Kim, Y. J. Kim, J. Kim, and W. Von Hoyningen-Huene, 2005. Impact of the Smoke Aerosol from Russian Forest Fires on the Atmospheric Environment over Korea during May 2003, *Atmos. Environ.*, 39(2): 85-99.
- Remer, L. A., Tanré, D., Kaufman, Y. J., Ichoku, C., Mattoo, S., Levy, R., Chu, D. A., Holben, B. N., Dubovik, O., Ahmad, Z., Smirnov, A., Martins, J. V., and Li, R.-R., 2002. Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2001GL013204.
- Remer L. A., Kaufman Y. J., Tanré D., Mattoo S., Chu D. A., Martins J. V., Li R. R., Ichoku C., Levy R. C., Kleidman R. G., Eck T. F., Vermote E., and Holben B. N., 2005. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation, *Journal of Atmospheric Sciences*, 62(4): 947-973.
- Rosenfield, D. and I. M. Lensky, 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 2457-2476.
- Smirnov, A., Yershov, O., and Villevalde, Y., 1995. Measurement of aerosol optical depth in the Atlantic and Mediterranean Sea, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 2582: 203-325.
- Tanré, D., L. A. Remer, Y. J. Kaufman, S. Mattoo, P. V. Hobbs, J. M. Livingston, P. B. Russell, and A. Smirnov, 1999. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution over ocean from the MODIS Airborne Simulator during TARFOX. *J. Geophys. Res.*, 104: 2261-2278.
- Tanré, D., Y. J. Kaufman, B. N. Holben, B. Chatenet, A. Karnieli, F. Lavenu, L. Blarel, O. Dubovik, L. A. Remer, and A. Smirnov, 2001. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum, *J. Geophys. Res.*, 106, 18: 205-218.
- Twomey, S. A., 1997. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34: 1149-1152.
- Whitby, K. T. and B. K. Cantrell, 1975. Atmospheric Aerosols - Characteristics and Measurement, ICESA Conference Proceedings, *IEEE #75-CH 1004-1 ICESA*, paper 29-1: 6.

