

# 동북아시아 지역에서 황사의 중장거리 이동에 따른 광학적 특성 변화 분석

노영민\*, 이권호\*\*†

\*광주과학기술원 환경공학부, \*\*경일대학교 공간정보공학과

## Characterization of Optical Properties of Long-range Transported Asian Dust in NorthEast Asia

Youngmin Noh\* and Kwon-ho Lee\*\*†

\*School of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology

\*\*Department of Geoinformatics Engineering, Kyungil University

**Abstract :** The optical properties of long-range transported Asian dust were studied by the satellite observations and Sun/sky radiometer measurements from the Aerosol Robotic Network(AERONET) in Northeast Asia. The movement of Asian dust from source regions to downwind areas was tracked by the Ozone Monitoring Instrument(OMI) derived aerosol product imagery. The optical properties of Asian dust were classified for geographical locations, which are source regions such as deserts area in Dunhuang and Inner Mongolia, downwind areas such as Yulin and Beijing, and long-range transported regions such as Korea(Anmyon and Gosan) and Japan(Noto). In general, relatively higher aerosol mass loadings with larger aerosol particles at desert regions were found. Aerosol Optical Depth(AOD) decreased significantly in downwind areas and long-range transported areas, which was accompanied by increased Angstrom exponents. This indicates the effects of aerosol mixing with various pollutants during transport of Asian dust plume on aerosol optical properties. Moreover, relatively high Single-Scattering Albedo(SSA) at 440 nm values ranging from 0.90 - 0.96 and increasing tendency of SSA with wavelength were observed at source region. The spectral dependence of SSA decreased during long-range transport.

**Key Words :** Asian dust, Remote Sensing, AOD, Angstrom exponent, SSA

**요약 :** 본 연구는 인공위성과 지상 원격탐사 자료를 이용하여 동북아 지역에서 발생하는 황사현상의 중장거리 이동에 따른 광학적 특성 변화를 분석하였다. 동북아시아 지역의 Aerosol Robotic Network(AERONET)의 선포토미터 관측 지점 중에 황사의 발원지로 Dunhuang과 Inner-Mongolia, 발원지에 근접한 풍하측 지점으로 Yulin과 Beijing, 그리고 장거리 이동 지점으로 한국의 Anmyon과 Gosan, 일본의 Noto, 이렇게 7곳을 선정하여 자료를 분석하였다. 황사의 발생 및 이동 경로를 파악하기 위하여 자

접수일(2013년 4월 12일), 수정일(1차 : 2013년 4월 16일), 게재확정일(2013년 4월 18일).

† 교신저자: 이권호(khlee@kiu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

외선 원격탐사 기법을 사용하는 인공위성인 Ozone Monitoring Instrument(OMI) 관측자료를 활용하였다. 발원지에서의 단산란알베도는 440 nm에서 0.90에서 0.96 사이의 값으로 높았으나 풍하측이나 장거리 이동 지역에서는 그 값이 감소하였다. 또한, 파장에 따른 단산란알베도 값의 차이는 발원지에서는 높게 나타났으나 이동된 지역에서는 그 차이가 감소하였다. 이러한 장거리 이동에 따른 황사의 광흡수 특성의 변화는 이동 중 탄소입자와 같은 대기 오염물질과의 혼합으로부터 기인하는 것으로 판단된다.

## 1. 서론

기후변화와 관련된 연구에 있어 대기 에어로솔의 역할 규명에 관한 연구는 현재까지 중요한 연구주제이다(IPCC, 2007). 아시아 지역은 황사(Asian dust), smoke 입자, 각종 오염 입자 등 다양한 종류의 대기 에어로솔이 발생하고 있으며 유럽과 아프리카 등 대부분의 지역에서 대기 에어로솔의 발생량이 감소하는 경향과는 달리 아시아 지역은 여전히 증가하는 추세를 보인다(Lee *et al.*, 2006a). 이들 중 주로 봄철에 중국의 타클라마칸 사막과 몽고 등지에서 주로 발생하는 황사는 편서풍의 기류를 타고 태평양으로 이동하여 때로는 아시아 지역의 대기 환경에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라 장거리 이동을 통하여 알래스카 지역과 미국 본토에까지 도달하기도 한다(Husar *et al.*, 2001; Uno *et al.*, 2011). 황사와 같은 대기 에어로솔의 광학특성(에어로솔 광학두께, 단산란계수 등)은 인공위성을 이용한 원격탐사 기법을 이용하여 분석이 가능하며(Lee *et al.*, 2006b; Lee *et al.*, 2004), 지역 대기질 평가 및 대기보정을 위한 응용 연구도 가능해졌다(Lee *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006c).

동아시아 지역에서는 오래전부터 황사의 특성을 연구하기 위하여 Aerosol Characterization Experiment in Asia (ACE-Asia) (Huebert *et al.*, 2003), PACific Dust Experiment (PACDEX) (Stith *et al.*, 2009) 와 같은 국제공동관측이 수행되었으나 여전히 황사는 에어로솔이 복사수지의 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 역할을 밝혀야 할 중요한 연구주제이다. 장거리 이동하는 황사는 이동경로상에 각종 오염물질을 배출하는 공업지역 및 도심지역이 분포하고 있어 이동 중 오염물질과의 혼합이 발생할 수 있다(Song and Carmichael, 2001; Zhang and Iwasaka, 2001; Li *et al.*, 2012). SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 그리고 HCl과 같은 가스상 오염물질이나 황산염, 질산염과 같은 입자상 오염물질과의 혼합 및 반응을 통하여 황사의 조성 및 형태가 변화하기도 한다(Chou *et al.*, 2008). 현재까지 황사와 오염

물질의 혼합에 대한 연구는 실지관측, 실험실 연구, 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 중심으로 이루어졌다(Song *et al.*, 2005; Arimoto *et al.*, 2004; Usher *et al.*, 2002). Wang *et al.* (2011)은 황사의 장거리 이동 중 오염물질과의 혼합은 수시로 발생되며, 이로 인하여 먼지입자의 오염도가 증가한다고 보고하였다. Mori *et al.* (2003)도 황사 발생 시 황사 발원지에서보다 풍하측에 위치한 일본에서 황산염과 질산염 이온의 농도가 더 높음을 보고하였다. 에어로솔의 광학적 특성은 에어로솔의 조성에 직접적인 영향을 받는다(Chen *et al.*, 2007). 하지만 현재까지 황사의 장거리 이동 중 오염물질과의 혼합을 통한 황사의 광학적 특성의 변화에 대한 연구는 제한적이었다. 한국과 일본 등 풍하측에서 관측되는 황사는 순수한 황사입자이기보다는 각종 오염물질과 혼합된 황사가 많으므로 장거리 이동 중 황사의 광학적 특성이 어떻게 변화되는지에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 동북아시아 지역의 인공위성 원격탐사 영상 자료를 분석하여 황사의 발원지에서부터 일본까지 이동하는 황사구름을 추적하고, 황사의 이동 경로상에 위치한 지상관측망인 Aerosol Robotic Network(AERONET)의 선포토미터 자료를 분석하여 장거리 이동에 따른 황사의 광학적 특성 변화를 연구하였다.

## 2. 연구방법

본 연구에서 분석된 황사의 광학적 특성은 2001년부터 2012년까지 측정된 AERONET의 선포토미터로부터 산출된 값 중에서 3월부터 5월 사이에 황사가 포함된 것으로 판단되는 관측일을 선택하여 분석하였다. AERONET은 전 세계 200개 이상의 선포토미터(Cimel sun/sky radiometer)로 구성된 네트워크로서 에어로솔의 광학적 특성값을 제공한다(Dubovik *et al.*, 2002). 본 연구에서는 검/보정된 Level 2.0 데이터를 분석에 사용하였

Table 1. Location of AERONET sites selected for the present study in East Asia

Site	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Number of dusty days
Dunhuang	N 40.038°	E 94.794°	1300	5
Inner-Mongolia	N 42.683°	E 115.95°	1343	4
Yulin	N 38.283°	E 109.72°	1080	27
Beijing	N 39.977°	E 116.38°	92	121
Anmyeon	N 36.539°	E 126.330°	47	38
Gosan	N 33.283°	E 126.167°	0	44
Noto	N 37.334°	E 137.137°	200	107

으며, 4개 파장(440, 670, 870 및 1020 nm)에서의 에어리솔 광학적 두께(Aerosol optical depth,  $\tau$ ), 단산란알베도(Single-scattering albedo,  $\omega$ ), 440과 870 nm의 광학적 두께 값으로부터 산출된 파장먹지수(Angstrom Exponent,  $\alpha_{440-870}$ ), 그리고 입자크기분포(particle size distribution)를 분석하여 장거리 이동에 따른 황사의 광학적 특성 변화를 파악하였다.

Fig. 1은 7곳의 AERONET 관측 지점을 보여주며 Table 1에 각 지점의 위경도, 해발고도 및 관측일수를 표시하였다. 7곳의 관측 지점 중 DunHuang(DH)와 Inner-Mongolia(IM)는 황사 발원지, YuLin(YL)과 Beijing(BJ)는 풍하측, 그리고 AnMyeon(AM), GoSan(GS), NoTo(NT)는 장거리 이동지역으로 분류하였다. 본 연구에서 황사를 판단하

는 기준으로  $\omega$ 를 사용하였다. 관측된 입자의 광흡수 특성을 보여주는  $\omega$ 는 오염입자나 biomass-burning에 의해 발생된 에어리솔일 경우 파장이 증가하면 값이 감소하는 경향을 보이거나 황사의 경우는 반대로 짧은 파장에서 값이 낮고 파장이 길어질수록 값이 높아진다(Dubovik *et al.*, 2002; Russell *et al.*, 2010). 본 연구에서는 이러한 황사의  $\omega$  분포 특성을 이용하여 3월부터 5월까지의 봄철에 관측된 데이터 중 황사가 포함된 데이터로 판단하여 분석에 사용하였다.

황사가 포함된 에어리솔로 판단된 데이터들은  $\alpha_{440-870}$ 를 이용하여 황사와 황사이외의 오염입자등과의 혼합 정도를 파악하였다. 순수한 황사이거나 전체 에어리솔 중에서 황사의 비율이 높을 경우  $\alpha_{440-870}$ 는 0에 가까운 값을 보이며 오염입자의 혼합 정도가 증가할 경우  $\alpha_{440-870}$ 도 높은 값을 보이게 된다(Eck *et al.*, 2005). 황사 발원지인 DH와 IM에서의 관측은 각각 5일과 4일밖에 이루어지지 않아  $\alpha_{440-870}$  값의 변화에 따른 광학적 특성 값의 변화는 분석하지 않았으나, 나머지 5곳은 0.2 간격으로  $\alpha_{440-870}$  값의 변화에 따른 나머지 광학적 특성 값의 변화를 분석하였다. 황사의 발생과 이동을 추적하기 위해서 자외선 영역의 관측 채널을 이용하여 황사를 효과적으로 관측할 수 있는 Ozone Monitoring Instrument (OMI) (Torres *et al.*, 2002)로 관측된 동북아시아

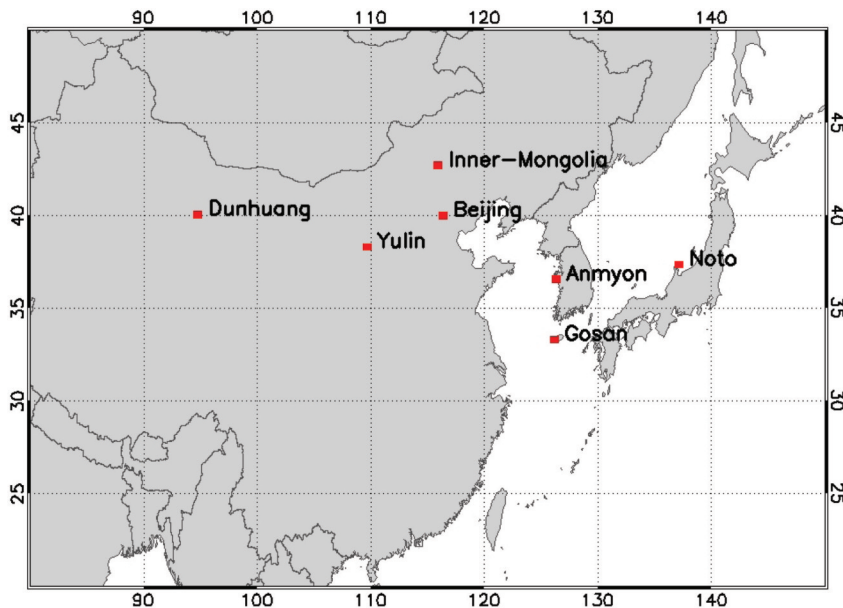


Fig. 1. Location of Dunhuang, Inner-Mongolia, Yulin, Beijing, Anmyeon, Gosan and Noto in East Asia.

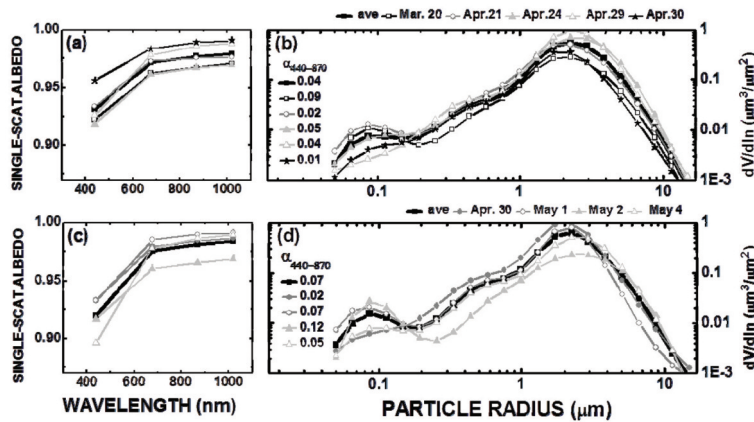


Fig. 2. Single-scattering albedo at 440, 670, 870 and 1020 nm and particle size distribution observed at Dunhunag (a, b) and Inner-Mongolia (c, d).

아 지역의 에어러솔 지수(Aerosol Index; AI)를 분석하였다. OMI 자료로부터 황사의 발생과 이동을 파악하고 황사가 이동하는 시간대에 관측된 선포도미터 자료를 분석하여 장거리 이동에 따른 황사의 광학적 특성 변화를 파악하였다.

### 3. 결과

Fig. 2는 황사 발원지인 DH과 IM에서 각각 5일과 4일 동안 관측된  $\omega$ 와 입자크기분포를 보여준다. 두 지역 모두  $\omega$ 는 440 nm 파장에서 가장 낮은 값을 보이고 파장이 증가함에 따라 증가하여 1020 nm에서 가장 높은 값을 보인다. 입자크기분포도 1  $\mu\text{m}$  이상의 조대입자가 대부분을 차지하고 0.2  $\mu\text{m}$  이하의 미세입자는 매우 낮은 농도만이 측정된다. DH와 IM에서  $\alpha_{440-870}$  값의 평균도 각각 0.04와 0.07로 매우 낮은 값을 보여 두 지역에서 관측된 에어러솔은 순수한 황사에 가까운 것으로 판단된다. Fig. 2(a)와 2(c)에서 보여주듯이 440 nm의 파장에서 가장 낮은  $\omega$  값을 보이는 것은 황사를 구성하는 화학 성분 중 철 성분 때문이다(Moosmüller *et al.*, 2012). 철 성분은 자외선 영역대의 빛을 흡수하는 특징을 가지고 있어 자외선 영역대에서 가까운 440 nm 빛도 흡수하여 낮은  $\omega$ 를 보이나 적외선 영역대에서는 철 성분에 의한 광흡수가 거의 이루어지지 않아 낮은  $\omega$ 를 보이게 되는 것이다.

Fig. 3은 YL과 BJ에서  $\alpha_{440-870}$ 를 이용하여 0.2 간격의

로 관측된 값을 분류하여 각 분류값의 평균 단산란알베도와 입자크기분포를 표시하였다. 분류된 값들의 평균  $\alpha_{440-870}$ 는 Fig. 3(b)와 3(d)에 표시하였다. YL의 경우 파장 증가에 따른  $\omega$  값이  $\alpha_{440-870}$ 가 0.41 이하인 경우에는 Fig. 2에서의 황사 발원지에서와 같은 경향을 보이나  $\alpha_{440-870}$  값이 0.62 이상으로 증가될 때, 파장에 따른  $\omega$  값이 차이가 나타나지 않거나  $\alpha_{440-870}$ 가 1.20에서는 파장에 따라 값이 감소하는 것을 보여준다.

BJ에서는  $\alpha_{440-870}$ 가 증가할 때 파장증가에 따라  $\omega$  값이 증가하는 경향은 보이지만 증가 경향은 감소되는 것을 보여준다. 두 지역에서 가장 낮은  $\alpha_{440-870}$ 가 둘 다 0.08일 때  $\omega$ 는 둘 다 0.88로 황사발원지인 DH과 IM에서 평균값인 0.93과 0.92에 비하여 낮은 값을 보인다. 이러한  $\alpha_{440-870}$  변화에 따른  $\omega$ 의 변화는 미세입자로 구성된 오염입자의 혼합에 의하여 발생하는 것으로 판단된다. 특히,  $\omega$ 의 변화는 관측된 대기 에어러솔의 성분 중 탄소입자(Black Carbon; BC)의 농도에 영향을 받는다(Russell *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2009). Fig. 3(a)와 3(c)에서는  $\alpha_{440-870}$ 가 증가함에 따라 440 nm에서의  $\omega$ 도 각각 0.84에서 0.88, 0.87에서 0.89로 증가되는 경향도 보인다.  $\alpha_{440-870}$ 가 증가한다는 것은 미세입자의 농도가 증가하거나 조대입자의 농도가 감소되는 것을 의미한다.  $\alpha_{440-870}$ 가 증가함에 따라  $\omega$ 가 증가된다는 것은 황사의 농도가 감소함에 황사를 구성하는 철 성분의 농도도 감소하여 짧은 영역대의 빛을 흡수하는 성질이 감소되는 것을 보여준다.

Fig. 3(b)와 3(d)는  $\alpha_{440-870}$ 가 증가함에 따라 조대입자

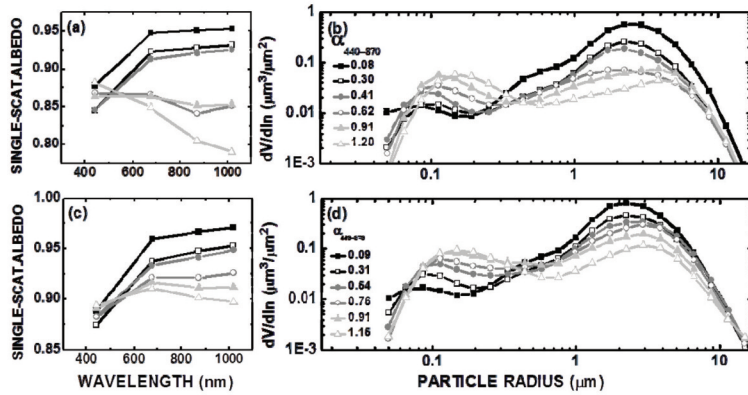


Fig. 3. Single-scattering albedo at 440, 670, 870 and 1020 nm and particle size distribution observed at Yulin(a, b) and Beijing(c, d).

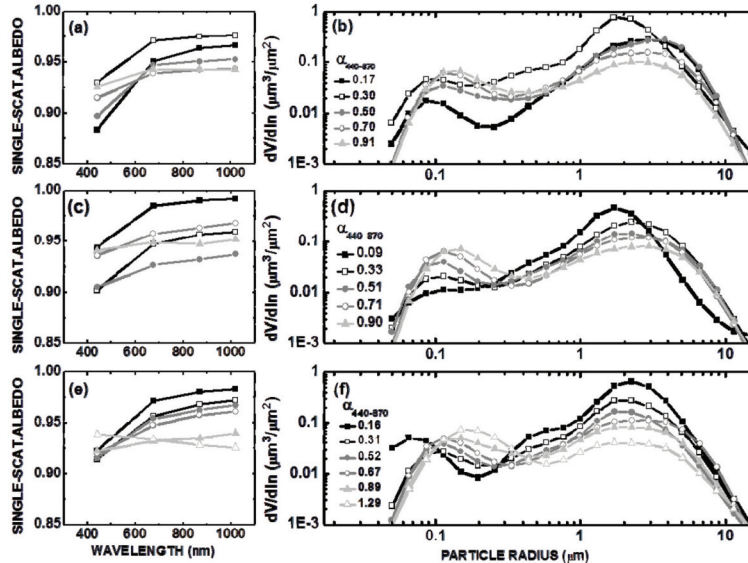


Fig. 4. Single-scattering albedo at 440, 670, 870 and 1020 nm and particle size distribution observed at Anmyon(a, b), Gosan(c, d) and Noto(e, f).

의 농도는 감소하고 미세입자의 농도는 증가함을 보여 준다. YL와 BJ는 오염물질의 배출량이 높은 산업 및 도심지역이고, 오염물질 중에 BC의 농도도 매우 높은 편이다(Lee *et al.*, 2007). 특히, YL 지역은 공업지역일 뿐만 아니라 주위에 석탄광산이 많이 분포하고 석탄을 이용하는 제조시설이 많이 분포하고 있는 지역으로서 BJ 지역보다 높은 BC를 배출하는 곳이다(Hou *et al.*, 2006). Fig. 3에서와 같이 비슷한  $\alpha_{440-870}$  값을 보이더라도 YL에서  $\omega$ 가 파장증가에 따라 일정하거나 감소하는 경향을 보이는 것은 BC의 배출량과 관련된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 황사가 장거리 이동된 지역으로 볼 수 있는

AM, GS 그리고 NT에서의  $\omega$ 와 입자크기분포를 보여준다. 파장에 따라  $\omega$ 가 변화하는 경향은 세 지역에서 모두 YL, BJ와 비슷한 경향을 보이고 있다. AM과 GS를 비교할 경우, 가장 낮은  $\alpha_{440-870}$ 에서 AM에서는  $\omega$ 가 440 nm에서 0.88로 가장 낮은 값을 보이지만 GS에서는 0.94로 가장 높은 값을 보인다. Fig. 4(b)와 4(d)에서 보여주는 입자크기 분포가 이러한 차이를 설명할 수 있다. AM의 경우  $\alpha_{440-870}$ 가 낮더라도 미세세입자가 혼합되어 있음을 보여주나, GS의 경우는 미세입자가 거의 존재하지 않는 분포를 보인다. 이는 황사가 장거리 이동 중 중국의 오염지역을 통과하며 오염입자와 혼합되어 온 사례가 관측된 것이 AM에서 관측되었고, GS의 경우는 오

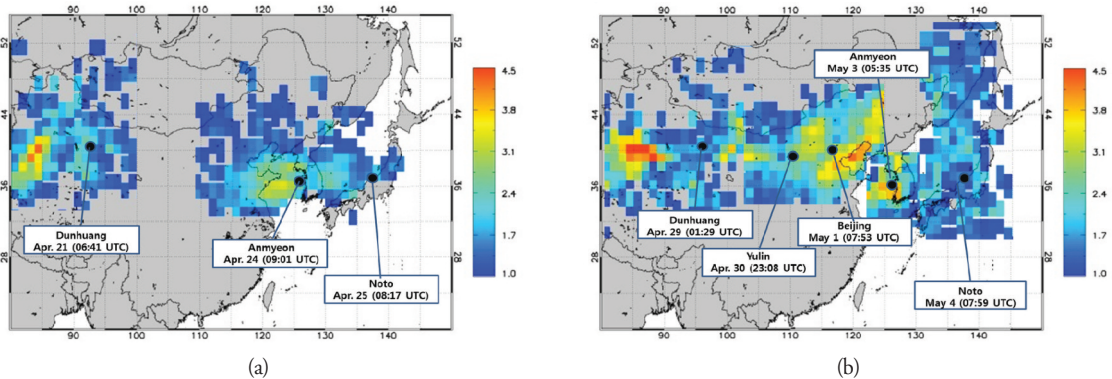


Fig. 5. Satellite image of Asian dust transportation by OMI.

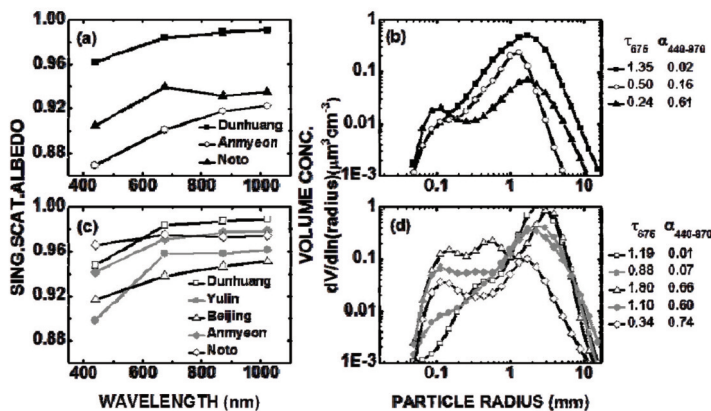


Fig. 6. The variation of single-scattering albedo and particle size distribution according to transportation of Asian dust occurred on April 21 and 29 2001.

염입자와의 혼합 없이 발원지에서 발생한 순수 황사가 높은 고도를 통하여 이동하여 이동 중 오염입자와의 혼합이 최소화 된 사례가 관측된 것으로 고려된다.

Fig. 5는 OMI 자료를 이용하여 2001년 4월 21일과 29일에 발생한 황사의 이동을 파악하고 이동경로상에 위치한 선포도미터 관측 지점 및 시점을 보여준다. Fig. 5(a)에서 4월 21일 DH에서 발생한 황사는 24일에 AM에서, 그리고 25일에 NT 지점을 통과하고 있음을 보여준다. Fig. 5(b)에서는 4월 29일 발생한 황사가 30일에 YL, 하루 뒤인 5월 1일에 BJ, 3일에 AM, 그리고 4일에 NT에서 관측되고 있음을 보여준다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 표시된 각 관측지점에서의  $\omega$ 와 입자크기분포를 보여준다. 4월 21일에 발생한 황사의 경우 발원지인 DH에서는  $\omega$ 가 440 nm에서 0.96으로 높은 값을 보인다. 이 때 675 nm에서의 광학적 두께는 1.35 이고  $\alpha_{440-870}$ 는 0.02이다. 하지만 장거리 이동 지역인

AM과 NT에서는 광학적 두께는 각각 0.50와 0.24,  $\alpha_{440-870}$ 는 각각 0.16과 0.61로 황사가 발원지에서 멀어질수록 전체 에어로솔의 농도는 감소함과 동시에 조대입자의 비율은 적어지고 미세입자의 비율은 높아지는 경향을 보였다.  $\omega$ 는 440 nm에서 AM에서는 0.87로 가장 낮으나 NT에서는 0.90으로 상대적으로 높은 값을 보였다.

4월 29일에 발생한 황사는 AM과 NT외에도 YL과 BJ에서도 선포도미터로 관측이 이루어졌다. 이번 경우에도 황사 발원지인 DH에서는 21일에 발생한 황사와 유사한  $\omega$ 와 입자크기분포를 보여주었다. Fig. 6(d)에서 보여주는 입자크기분포에서 가장 미세먼지 농도가 높게 관측되는 지점은 BJ이고 AM, NT, YL 순으로 발원지인 DH를 제외하고는 YL에서 가장 낮은 미세입자 농도가 관측되었다. 하지만, 440 nm에서  $\omega$ 가 가장 낮은 지역은 YL이고 BJ가 다음으로 낮은 값을 보였다. 미세먼지 농

도가 매우 낮음에도 440 nm에서 가장 낮은  $\omega$ 가 관측되는 것은 YL에서 높은 비율의 BC가 미세먼지 형태로 대기중으로 배출되고, 배출된 BC가 황사와 혼합되어 낮은 광흡수 특성을 보여주는 것으로 판단된다.

장거리 이동지역으로 분류되었으나 중국에서의 오염지역에 근접해 있는 AM은 황사 관측시에도 순수황사 이외에 많은 오염물질이 혼합된 황사가 관측되는 것으로 고려된다. 이데 반하여 NT는 황사가 관측되더라도 고층으로 이동된 황사가 관측되어 황사의 농도도 낮고 이동 중에 오염물질과의 혼합도 적게 이루어진 황사가 주로 관측되는 것으로 판단된다. 또한, 장거리 이동 지역에서의  $\omega$ 가 YL이나 BJ에서 보다 높은 것은 Cheng *et al.* (2009)에서 언급한 바와 같이 발원지에서 발생된 BC가 이동시간 동안 입자 상호간의 반응에 의하여 광흡수 특성이 감소되는 현상과도 연관된 것으로 고려된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 동북아시아 지역에서 황사의 발원지에서부터 한국과 일본에 이르러는 장거리 이동 지역에서 관측된 선평도미터 자료를 분석하여 황사의 장거리 이동 시 발생할 수 있는 황사의 광학적 특성 변화, 그중에서  $\omega$ 로 표시될 수 있는 광흡수 특성의 변화에 대하여 살펴보았다. 발원지에서는 광흡수 특성이 낮은 조대입자로 구성된 황사가 발생되지만 기류를 타고 장거리 이동을 하게 되면서 조대입자는 침하 등으로 비율이 줄어들고 대기중으로 배출된 각종 오염물질과의 혼합으로 광흡수 특성은 증가되는 것으로 판단된다. 황사층이 이동하는 고도분포에 대한 정확한 정보를 파악하지 못하여 고도에 따른 황사와 오염입자와의 혼합 정도에 대해서는 추후 보충 연구가 필요할 수도 있으나, 한국이나 일본에서 관측되는 황사는 순수한 황사라기 보다는 오염입자와 혼합된 황사가 대부분이며, 이 때 관측된 황사의 광학적 특성은 어떠한 경로를 통하여 이동하였으며 이동 중 오염입자와의 혼합이 발생된 정도에 따라 특성이 결정된다고 볼 수 있다.

## 사사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-7080)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Arimoto, R., X.Y. Zhang, B.J. Huebert, C.H. Kang, D.L. Savoie, J.M. Prospero, S.K. Sage, C.A. Schloesslin, H.M. Khaing, and S.N. Oh, 2004. Chemical composition of atmospheric aerosols from Zhenbeitai, China, and Gosan, South Korea, during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research*, 109. doi:10.1029/2003JD004323.
- Chen, H., X. Xia, P. Wang, and W. Zhang, 2007. Ground-based measurements of aerosol optical properties and radiative forcing in North China, *China Particology*, 5(3): 202-205.
- Cheng, Y.F., M. Berghof, R.M. Garland, A. Wiedensohler, B. Wehner, T. Müller, H. Su, Y. H. Zhang, P. Achtert, A. Nowak, U. Po'schl, T. Zhu, M. Hu, and L.M. Zeng, 2009. Influence of soot mixing state on aerosol light absorption and single scattering albedo during air mass aging at a polluted regional site in northeastern China, *Journal of Geophysical Research*, 114, D00G10, doi:10.1029/2008JD010883.
- Chou, C.K., C.T. Lee, C.S. Yuan, W.C. Hsu, C.Y. Lin, and S.C. Hsu, 2008. Implications of the chemical transformation of Asian outflow aerosols for the long-range transport of inorganic nitrogen species Charles, *Atmospheric Environment*, 42(32): 7508-7519.
- Dubovik, O., B.N. Holben, T.F. Eck, A. Smirnov, Y.J. Kaufman, and M.D. King, 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59: 590-608.
- Eck, T.F., B.N. Holben, O. Dubovik, A. Smirnov, P.

- Goloub, H.B. Chen, B. Chatenet, L. Gomes, X.-Y. Zhang, S.-C. Tsay, Q. Ji, D. Giles, and I. Slutsker, 2005. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 110, D06202, doi:10.1029/2004JD005274.
- Hou, X., G. Zhuang, Y. Sun, and Z. An, 2006. Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and fatty acids in PM<sub>2.5</sub> aerosols in dust season in China, *Atmospheric Environment*, 40: 3251-3262.
- Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, 2003. An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *Journal of Geophysical Research*, 108 (D23), 8633.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. *Climate change 2007: the scientific basis*, In: Solomon, S. (Ed.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, New York.
- Lee, K.H., C.S. Hong, and Y.J. Kim, 2004. Atmospheric Aerosol Monitoring Over Northeast Asia During 2001 from MODIS and TOMS data, *Korean J. of Remote Sensing*, 20(2): 77-89 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., D.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006. Application of MODIS satellite observation data for air quality forecast, *J. of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6): 85-862 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., Z. Li, M.S. Wong, J. Xin, Y. Wang, W.M. Hao, and F. Zhao, 2007. Aerosol single scattering albedo estimated across China from a combination of ground and satellite measurements, *Journal of Geophysical Research*, 112, D22S15, doi:10.1029/2007JD009077.
- Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006a. Application of MODIS Aerosol Data for Aerosol Type Classification, *Korean J. of Remote Sensing*, 22(6): 495-505 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.H., K.H. Lee, J.E. Kim, and Y.J. Kim, 2006b. Characteristics of atmospheric aerosol optical thickness over the Northeast Asia Using TERRA/MODIS Data during the Year 2000~2005, *Atmosphere*, 16(2): 85-96 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim, 2006c. Atmospheric aerosol detection and its removal for satellite data, *Korean J. of Remote Sensing*, 22(5): 1-5.
- Li, J., Z. Wang, G. Luo, Y. Sun, and Q. Wang, 2012. Mixing of Asian mineral dust with anthropogenic pollutants and its impact on regional atmospheric environmental and oceanic biogeochemical cycles over East Asia: A model case study of a super-duststorm in March 2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12: 2743-2782.
- Mori, I., M. Nishikawa, T. Tanimura, and H. Quan, 2003. Change in the size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport, *Atmospheric Environment*, 37, 4253-4263, doi:10.1016/S1352-2310(03)00535-1.
- Russell, P.B., R.W. Bergstrom, Y. Shinozuka, A.D. Clarke, P.F. DeCarlo, J.L. Jimenez, J.M. Livingston, J. Redemann, O. Dubovik and A. Strawa, 2010. Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10: 1155-1169.
- Song, H.C and G.R. Carmichael, 2001. A three-dimensional modeling investigation of the evolution processes of dust and sea-salt particles in East Asia. *Journal of Geophysical Research*, 106: 18131-18154.
- Song, C.H., K. Maxwell-Meier, R.J. Weber, V. Kapustin, A. Clarke, 2005. Dust composition and mixing



- state inferred from airborne composition measurements during ACE-Asia C130 Flight #6., *Atmospheric Environment*, 39: 359-369.
- Stith, J.L., V. Ramanathan, W.A. Cooper, G.C. Roberts, P.J. DeMott, G. Carmichael, C.D. Hatch, B. Adhikary, C.H. Twohy, D.C. Rogers, D. Baumgardner, A. J. Prenni, T. Campos, R. Gao, J. Anderson, and Y. Feng, 2009. An overview of aircraft observations from the Pacific Dust Experiment campaign, *Journal of Geophysical Research*, 114, D05207, doi:10.1029/2008JD010924.
- Torres, O., J.R. Herman, P.K. Barthia, and A. Sinyuk, 2002. A long term record of aerosol optical thickness from TOMS observations and comparison to AERONET measurements, *Journal of Atmospheric Science*, 59: 398-413.
- Uno, I., K. Eguchi, K. Yuminoto, Z. Liu, N. Sugimoto, A. Shimizu, and T. Takemura, 2011. Large Asian dust layers continuously reached North America in April 2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7333-7341, doi:10.5194/acp-11-7333-2011.
- Usher, C.R., H. Al-Hosney, S. Carlos-Cuellar, V.H. Grassian, 2002. A laboratory study of the heterogeneous uptake and oxidation of sulfur dioxide on mineral dust particles, *Journal of Geophysical Research*, 107 (D23), 4713. doi:10.1029/2002JD002051.
- Wang, Q., G. Zhuang, J. Li, K. Huang, R. Zhang, Y. Jiang, Y. Lin, and J. S. Fu, 2011. Mixing of dust with pollution on the transport path of Asian dust ? Revealed from the aerosol over Yulin, the north edge of Loess Plateau, *Science of the Total Environment*, 409: 573-581.
- Yang, M., S.G. Howell, J. Zhuang, and B.J. Huebert, 2009. Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China - interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 2035-2050.
- Zhang D and Y. Iwasaka, 2001. Chlorine deposition on dust particles in marine atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 28: 3613-3616.