

## 지상원격관측 (AERONET)을 통한 한반도 주변 에어로솔 광학특성 분석

### An Analysis of Aerosol Optical Properties around Korea using AERONET

김 병 곤\* · 김 유 준 · 은 승 희

강릉대학교 대기환경과학과

(2008년 6월 28일 접수, 2008년 11월 21일 채택)

Byung-Gon Kim\*, You-Joon Kim and Seung-Hee Eun

*Department of Atmospheric Environmental Sciences, Kangnung National University*

(Received 28 June 2008, accepted 21 November 2008)

#### Abstract

This study investigates long-term trends and characteristics of aerosol optical depth ( $\tau_a$ ) and Ångström exponent ( $\text{Å}$ ) around Korea in order to understand aerosol effects on the regional climate change. The analysis period is mainly from 1999 to 2006, and the analysis sites are Anmyun and Gosan, the background monitoring sites in Korea, and two other sites of Xianghe in China and Shirahama in Japan. The annual variations of  $\tau_a$  at Anmyun and Gosan have slightly systematic increasing and decreasing trends, respectively.  $\tau_a$  at Anmyun shows more substantial variation, probably because of it's being closer and vulnerable to anthropogenic influence from China and/or domestic sources than Gosan. Both values at Gosan and Anmyun are approximately 1.5 times greater than those at Shirahama. The monthly variation of  $\tau_a$  exhibits the highest values at late Spring and the lowest at late-Summer, which are thought to be associated with the accumulation of fine aerosol formed through the photochemical reaction before the Jangma period and the scavenging effect after the Jangma period, respectively. Meanwhile, the episode-average  $\tau_a$  for the Yellow dust period increases 2 times greater than that for the non-Yellow dust period. A significant decrease in  $\text{Å}$  for the Yellow dust period is attributable to an increase in the loading of especially the coarse particles. Also we found no weekly periodicity of  $\tau_a$ 's, but distinct weekly cycle of  $\text{PM}_{10}$  concentrations, such as an increase on weekdays and a decrease on weekends at Anmyun and Gosan.

We expect these findings would help to initiate a study on aerosol-cloud interactions through the combination of surface aerosol and satellite remote sensing (MODIS, Calipso and CloudSat) in East Asia.

**Key words :** Aerosol, Aerosol optical depth, Ångström exponent, Yellow dust

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-640-2326, E-mail : bgk@kangnung.ac.kr

## 1. 서 론

에어로솔은 다른 가스상태의 대기오염물질이 수개월내지 수년동안 대기중에 체류하는 것과는 달리 수일~일주일 가량으로 상대적으로 짧기 때문에 에어로솔의 시·공간적인 분포의 편차를 크게 하는 요인이 되고 있다. 한편으로는 에어로솔중 일부는 성층권까지 뚫고 올라가 대기중에 오래 체류하면서 기후에 장기간 영향을 주는 경우도 있다. 대표적인 예로 El Chichon이나 Pinatubo 화산폭발로 인한 대기중의 에어로솔 부하량 증가가 태양에너지의 투과도 감소로 이어져 대기 냉각효과를 초래했는데, 이는 기후학적인 측면에서 에어로솔의 중요성을 보여준 하나의 계기가 되었다(Michalsky *et al.*, 1994; Robock, 1983). 에어로솔이 대기중 체류시간이 짧은 이유는 중력낙하와 강수에 의한 효과적 인 세정효과 때문인데, 에어로솔은 과포화상태에서 구름의 응결핵 역할을 하면서 구름방울로 활성화될 수 있는 반면에, 강수에 의해 씻겨 제거되는(scavenging) 양면성을 갖고 있다. 또한 건조상태로 지면으로 전이되는 건성침적도 에어로솔 제거과정중의 하나의 요인이다. 특히 에어로솔 크기 중에서  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  크기 영역의 대핵(Accumulation mode) 에어로솔은 대표적인 인위적인 에어로솔로써, 고농도 가스상물질들의 핵화(nucleation), 가스들이 에어로솔에 달라붙는 응결(condensation), 작은 크기의 입자들끼리 달라붙어 성장하는 응고(coagulation) 등의 과정을 거쳐 생성 및 성장한다. 이들은 대기중에서 부유하면서 태양빛을 효과적으로 산란시킬 뿐만 아니라 구름의 주요 응결핵 역할을 한다(Seinfeld and Pandis, 1998).

IPCC 4차보고서(IPCC, 2007)에 의하면 여전히 산업혁명 이후 복사효과중 에어로솔에 의한 영향의 불확실성이 가장 큰 것으로 제시하고 있다. 대기중에 상대적으로 오랫동안 체류하는 이산화탄소, 메탄, CFCs 등의 온실가스는 전지구적으로 고른 공간 분포를 보이면서  $0.34 \sim 1.66 \text{ W/m}^2$ 의 양의 복사효과(가열효과)를 보인 반면에 에어로솔 복사효과는 주로 음의 복사효과(냉각효과)를 나타내고 있다. 에어로솔의 복사효과를 구체적으로 구분하면 에어로솔의 태양빛에 대한 직접적인 산란 및 반사를 설명하는 직접효과와 에어로솔-구름 상호작용을 통한 구름의 반사도 변화나 구름의 체류시간 변화 등에 의한 간접

효과가 있다(김병곤과 권태영, 2006). 그 중 인공위성(MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)이나 지상자동관측(AERONET: Aerosol Robotic Network) 등과 같은 원격관측에 에어로솔 직접효과 산정결과를 보면 각각  $-1.4 \text{ W/m}^2$ ,  $-0.35 \sim -0.5 \text{ W/m}^2$ 으로 제시된 바 있다(Chung *et al.*, 2005). 다양한 에어로솔 성분 중에서 가장 많은 부분을 차지하는 황산염은 태양복사를 효율적으로 산란시키고 반사시킴으로써 냉각으로 작용하는 것으로 알려져 있고, 흡습성(hygroscopic) 때문에 구름과의 상호작용을 통해 에어로솔 간접효과에도 큰 역할을 하는 것으로 보고되고 있다. 다음으로 화석연료의 불완전 연소나 노천 소각 등에 의해 발생하는 검댕(Black carbon)은 황산염과는 달리 소수성(hydrophobic)을 띄는 반면에 태양복사를 흡수하는 성질이 있다(Ackerman, *et al.*, 2000). 그리고 휘발성 유기화합물의 산화과정이나 화석연료의 연소과정에서 발생하는 유기물질은 흡습성을 띄면서 구름의 응결핵으로 작용할 수 있다. 반면에 황사와 같은 에어로솔은 단파를 산란시켜 냉각으로 작용하지만 장파복사에 대해서는 흡수하여 온난화 역할을 하는 것으로 조사되어 순복사량이  $0.1 \sim 0.56 \text{ W/m}^2$ 으로 나타났다(IPCC, 2007).

이러한 직접적인 에어로솔(주로 인위적으로 발생한 대기오염)의 복사효과뿐만 아니라 에어로솔-구름 상호작용에 의한 기후변화 역시 중요한 도전 과제 중의 하나이다. 현재까지 연구결과 에어로솔 간접효과는  $-0.3 \sim -1.8 \text{ W/m}^2$  정도의 냉각효과를 하는 것으로 나타났지만, 이는 에어로솔 증가에 따른 구름 반사도 증가(에어로솔 1차 간접효과 혹은 Twomey 효과; Twomey(1977))에 의한 영향만을 고려한 것으로 구름의 체류시간을 길게 하거나 구름내의 수함량(LWC: Liquid Water Content) 등의 변화(에어로솔 2차 간접효과 혹은 Albrecht 효과; Albrecht(1989)) 등은 제외한 양이다. 최근의 연구결과에 의하면 에어로솔 간접효과는 구름 주변의 습윤 정도(Ackerman *et al.*, 2004), 정적인 안정도 및 유입(entrainment)에 의한 혼합 정도 등의 대기환경 조건(Kim *et al.*, 2008)에 따라 에어로솔 간접효과가 강화 혹은 상쇄될 수 있다고 보고되고 있다. 최근에 다양한 지상원격탐사나 위성 관측을 통해서, 그리고 관측 결과에 기반한 모델링을 통해서 에어로솔 간접효과를 산정하고 있으나 아직까지 정량적인 추정면에서 여전히 이해가

부족하기 때문에 불확실성이 큰 편이고, 현재 전 세계적으로 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있는 실정이다.

이와 같은 복잡한 에어로솔 특성을 파악하는 데에는 연구목적에 따라 다양한 관측방법들이 활용되고 있다. 먼저 지상에서 필터 포집이나  $\beta$ 선 흡수법, TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) 등의 직접 관측 방법이 있으나 이는 지상의 한 지점에서의 에어로솔 질량농도를 얻는 것이기 때문에 대기 컬럼내의 에어로솔 부하량이나 공간적인 분포를 얻는데는 한계가 있다. 반면에 에어로솔의 지상원격관측은 관심지역에서 연직으로 대기 층내의 에어로솔 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 에어로솔 지상원격관측의 대표적인 사례가 연직 에어로솔 자동 탐사 네트워크 (AERONET) 프로그램인데, 1993년에 시작되어 현재는 전세계에 100여개의 관측망을 갖춘 정도로 성장했다 (Holben *et al.*, 1998). 국내에서도 이권호와 김영준 (2004)은 2003년 5월에 발생한 러시아 지역 산불에 대하여 AERONET 자료를 이용한 사례 분석을 통해서 한반도에서 지역적인 규모의 복사 강제효과와 대기오염 유발 가능성을 확인한 바 있고, Kim *et al.* (2006)은 MODIS, Lidar 그리고 AERONET 자료 등의 원격관측자료를 종합하여 에어로솔 광학특성에 대한 계절별, 월별 변동에 대해 분석한 바 있다. 이밖에도 ACE-Asia (Huebert *et al.*, 2003)나 ABC 프로그램 (Nakajima and Yoon, 2005) 등을 통해 황사의 광학특성이나 대기오염물질의 이동에 대한 집중 조사가 이루어졌으나, 주로 봄철기간에 황사의 물리·화학 및 광학특성이 주요 관심 대상이었다. 또한 김병곤과 권태영 (2006)은 지상원격탐사를 이용한 에어로솔-구름 상호작용과 에어로솔 간접효과를 분석한 바 있지만 미국의 Atmospheric Radiation Measurement (ARM) 프로그램 관측자료를 이용한 연구인 관계로 아직까지 한반도 주변의 에어로솔-구름 상호작용의 연구결과는 여전히 미흡한 형편이다.

따라서 본 연구는 향후 에어로솔-구름 상호작용 연구에 기반이 되는 장기간의 전반적인 에어로솔 직접효과를 우선적으로 이해하기 위하여 1999~2006년까지 AERONET 자료를 이용하여 주로 광학두께 ( $\tau_a$ )와 Ångström 지수 ( $\text{Å}$ )의 연변화 및 월별화 등의 현황을 먼저 파악하였다. 그리고 나아가 황사와 비황사기간의 차이, 황사 진행과정중의 광학특성 변화, 그

리고 에어로솔의 주말과 주중의 차이 비교 등을 통해 에어로솔 복사효과를 살펴보았다.

## 2. 분석 방법

AERONET 프로그램에서 주로 활용되고 있는 Sunphotometer는 7개 channel (340, 380, 440, 500, 670, 870, 1020 nm)에서 태양으로부터 오는 직달일사량을 태양을 추적하면서 자동으로 측정하며, 시야각 (field of view)은  $1.2^\circ$ 로 매 15분 간격으로 관측이 이루어진다. 광학두께 측정의 불확실성은 약 0.01이며, 태양복사의 불확실성은  $< \pm 5\%$ 로 보고되었다 (Smirnov *et al.*, 2000). 자세한 측정기 사양과 자료수집 절차는 Holben *et al.* (1998)에 제시되어 있다.

에어로솔 광학두께 ( $\tau_a$ )는 대기중에 부유하는 에어로솔이 태양복사를 얼마나 산란·흡수하여 태양빛을 감쇄시키는 지를 정량화한 인자로서, 에어로솔 복사효과를 산정하거나 위성에서 에어로솔 부하량을 추정하는 등에 필요한 중요한 변수이다.  $\tau_a$ 는 대기 투과도의 역수에 비례하게 되는데, 대기중에 에어로솔 농도가 증가하여 에어로솔 부하량이 많아지면,  $\tau_a$ 가 증가하고 결국 대기의 투과도는 감소하게 되고 결국 태양복사를 산란·반사하여 지상에 도달하는 에너지를 감소하게 되는 것이다.

$$\tau_a = \int_0^z \int_{\lambda} Q_{e,\lambda} \pi r^2 N_a(r, z) dr d\lambda \quad (1)$$

여기서  $Q_{e,\lambda}$ 는 파장  $\lambda$ 에 대한 빛의 소산 (extinction) 효율을 의미하고,  $N_a(r, z)$ 는 에어로솔의 개수농도,  $r$ 은 에어로솔의 반지름,  $z$ 는 연직고도를 의미한다. 본 연구에서는 각 측정소 (안면, 고산, Xianghe, Shirahama) 간 광학특성 비교, 지점에 따른 월변동 및 주중 변동 등 에어로솔이 기후에 미치는 영향을 파악하기 위하여 결측 자료가 가장 적고 통계적으로 유의한 수준의 자료 확보가 가능한 870 nm 파장대의 광학두께를 주로 이용하였다. 에어로솔 광학특성중 중요한 의미를 갖는 Ångström 지수 ( $\text{Å}$ )는 광학두께의 파장대별 의존도를 의미하며 에어로솔 크기를 대변하는 지수로서 에어로솔 크기가 증가할수록 작아진다.

$$\text{Å} = - \frac{\ln \tau_{a,\lambda_1} / \tau_{a,\lambda_2}}{\ln \lambda_1 / \lambda_2} \quad (2)$$

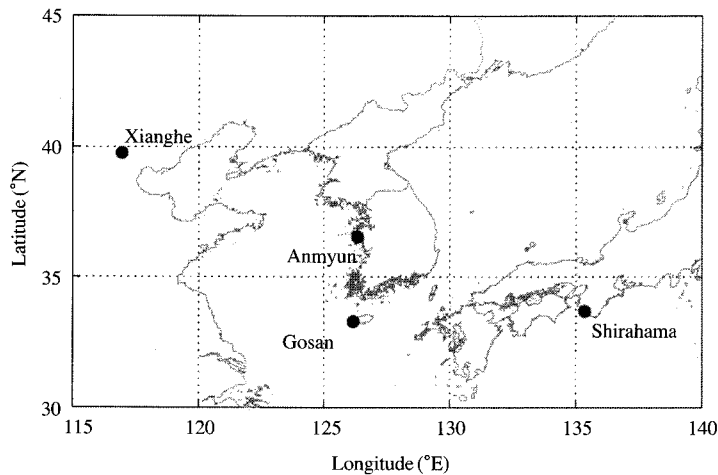


Fig. 1. The study domains and locations of the main remote sites (Anmyun and Gosan) in Korea along with Xianghe (China) and Shirahama (Japan).

Table 1. Locations of AERONET stations used in this study.

Name	Location	Altitude (m)	Coordinate
Xianghe	China	36	N39°45'E116°57'
Anmyun	Korea	47	N36°31'E126°19'
Gosan	Korea	5	N33°16'E126°10'
Shirahama	Japan	10	N33°41'E135°21'

여기서  $\lambda_1$  (500 nm)과  $\lambda_2$  (870 nm)는 서로 다른 두 파장대를 의미한다.

주로 활용된 관측소는 한국의 제주 고산과 안면 관측소자료이며, 비교자료로 중국에서는 Xianghe, 일본은 Shirahama 측정소를 활용하였다(그림 1, 표 1). Xianghe는 Xianghe 관측소 4층 옥상에 Sunphotometer가 설치되어 있고 동쪽으로는 작은 마을과 나머지 방향으로는 농지와 인접하여 있다. 안면은 황해와 인접한 안면도 지구배경대기관측소 옥상에 설치되어 있으며 고산은 제주도 남서쪽끝의 고산 고층기상관측소 옆에 위치하고 있어 인위적인 배출원으로부터 떨어져 있다. 또한 해발 10 m 고도에 위치한 Shirahama 측정소는 주변이 주로 바다에 인접하고 있다.

부가적으로 에어로솔의 기후학적인 영향을 확인하기 위해 주말과 주중의 인간 활동차이에 따른 지역 기후변화에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구에서는  $\tau_a$ 와 지상의  $PM_{10}$  (입자크기가 10  $\mu m$  이하인 입자)

질량 농도에 대하여 Baumer *et al.* (2007, 2008)이 제시한 방법에 따라 주평균과 각 요일별 상대적인 편차(anomaly)를 계산하여 대상기간 전체에 대한 에어로솔의 주기성을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 장기 변동

황사의 장기간 전반적인 연변화 경향을 파악하기 위하여 에어로솔 광학두께 ( $\tau_a$ )와 옴스트롬지수 (Ångström 지수: Å)의 연변화를 그림 2와 3에 나타내었고, 통계적인 값을 정리하여 표 2에 제시하였다. 먼저 안면의  $\tau_a$  평균이 0.22로 고산(0.25)과 유사하였으나, Xianghe (0.46)보다는 거의 절반 수준이었고 Shirahama (0.14)보다는 약 1.5배 수준이었다. 중간값(median)의 전체 연평균은 고산이 0.23으로 안면(0.16)보다 약 1.4배 가량 높았고 마찬가지로 두 지점 모두 Xianghe (0.31) 보다는 작고 Shirahama (0.11) 보다는 크게 나타났다. 결국 장기  $\tau_a$  평균으로부터 중국 동부 해안지대, 한국의 서해안, 그리고 일본 청정지역까지  $\tau_a$  공간적인 경도(gradient)를 확인할 수 있었다.

또한 안면의 경우 Xianghe와 유사하게 평균값과 중간값의 차이가 상대적으로 크게 나타났는데, 이는

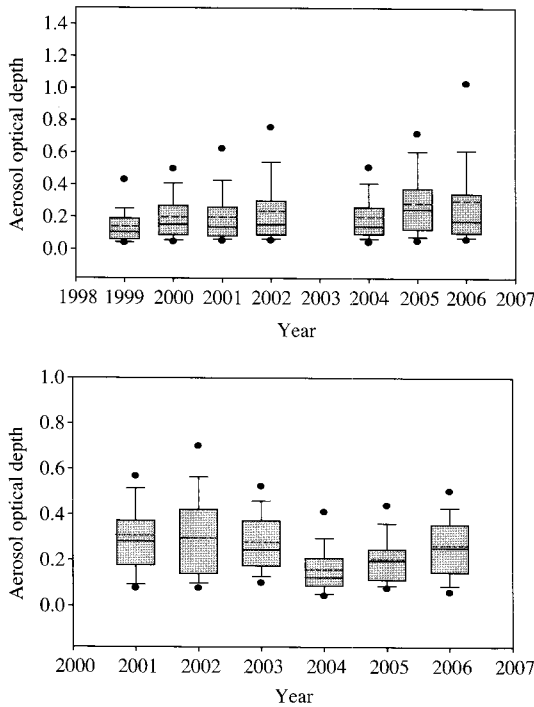


Fig. 2. Annual variations of box plot (1%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, 99%) of  $\tau_a$  (870 nm) at Anmyun (up) and Gosan (down) during 1999~2006. The dashed line denotes the mean value and solid line indicates median.

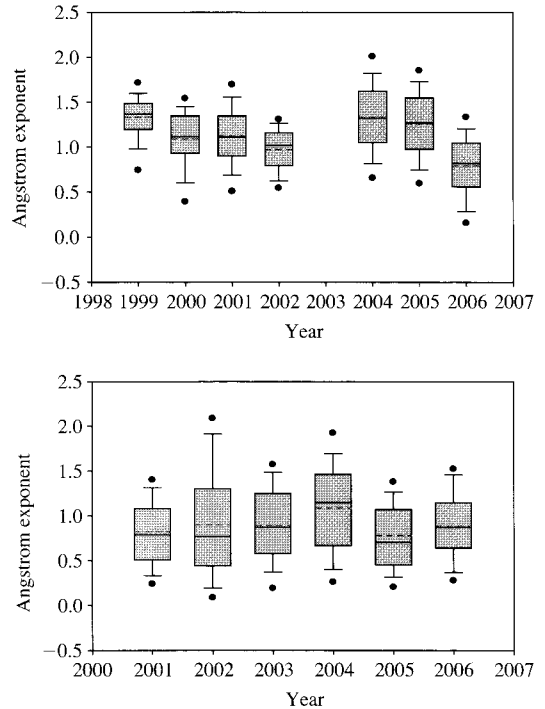


Fig. 3. Annual variations of box plot (1%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, 99%) of  $\text{\AA}$  (500~870 nm) at Anmyun (up) and Gosan (down) during 1999~2006. The dashed line denotes the mean value and solid line indicates median.

극값의 발생빈도가 다른 지역에 비해 많았기 때문에 생각된다. 예를 들면 황사기간중의 컬럼내의 에어로솔 농도가 증가했을 때, 최대값을 끌어올려 평균값이 중간값에 비해 크게 나타나는 것인데, 안면과 Xianghe의 경우 고산이나 Shirahama보다 인위적인 오염원으로부터 상대적인 거리가 가깝기 때문에 이러한 황사나 고농도 에어로솔의 수송에 의한 영향을 자주 받고 있는 것으로 생각된다. 황사가 심했던 2002년과 2005년, 2006년  $\tau_a$ 의 95% 값이 거의 0.8~1.1으로 높은 값을 보였다. 한편 흥미롭게도 안면과 고산의 경우 모두  $\tau_a$  평균값의 연변동을 살펴본 결과 안면의 경우는 1년에 약 0.016 증가하는 ( $R^2=0.69$ ) 반면에 고산의 경우 0.023 감소하는 경향 ( $R^2=0.53$ )을 보였으며 Xianghe와 Shirahama는 뚜렷한 변동을 보이지 않았다(표 2). 아직 10년 미만의 자료들이기 때문에 좀 더 자료가 축적된 후 기후 통

계적인 의미에서 지속적인 경향인지 일시적인 현상인지 판단이 가능할 것으로 생각된다. 그리고  $\tau_a$ 는 4개 관측소와 분석기간 전체에 대해 양의 왜도를 보였는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 황사의 영향을 받을 때 에어로솔 부하량 증가 때문인 것으로 생각된다. 특히 95%이나 99%의 상위 분위수는 안면이 고산에 비해 현저하게 큰 것으로 나타났다.

입자 크기를 대변하는  $\text{\AA}$ 의 경우, 안면과 고산에서는  $\tau_a$ 와 반대로 2002년과 2006년에 평균값 및 중간값 등이 가장 낮게 나타나 봄철에 황사가 빈발했던 것과 관련이 있는 것으로 생각된다. 안면은  $\text{\AA}$ 의 전체 연평균이 1.1(0.9~1.3), 고산의 경우는 0.9(0.8~1.1)로, 평균 입자 크기는 안면이 좀 더 작은 것으로 나타났다. 흥미롭게도 Xianghe의  $\text{\AA}$ 는 1.0(0.7~1.2)로 안면과 고산의 수준과 유사한 반면에 Shirahama 보다는 1.3(1.2~1.4)보다는 뚜렷하게 낮은 수치를

**Table 2. Statistics of  $\tau_p$  (870 nm) obtained at Anmyun, Gosan, Xianghe and Shirahama during 1999~2006.**

Anmyun						Gosan					
Year	Mean	SD	Median	S	No.	Year	Mean	SD	Median	S	No.
1999	0.14	0.11	0.11	1.88	42	1999	NA	NA	NA	NA	NA
2000	0.20	0.15	0.15	1.56	131	2000	NA	NA	NA	NA	NA
2001	0.20	0.17	0.14	1.98	228	2001	0.31	0.22	0.28	3.19	44
2002	0.24	0.21	0.15	1.74	41	2002	0.30	0.17	0.30	0.76	27
2003	NA	NA	NA	NA	NA	2003	0.28	0.13	0.25	0.75	78
2004	0.20	0.17	0.14	2.20	143	2004	0.16	0.11	0.12	1.98	140
2005	0.29	0.21	0.25	1.48	71	2005	0.20	0.10	0.20	0.94	53
2006	0.27	0.26	0.19	2.75	92	2006	0.23	0.15	0.22	1.27	91

Xianghe						Shirahama					
Year	Mean	SD	Median	S	No.	Year	Mean	SD	Median	S	No.
2000	NA	NA	NA	NA	NA	2000	0.08	0.05	0.07	1.13	35
2001	0.50	0.52	0.33	1.98	25	2001	0.15	0.13	0.10	2.56	146
2002	NA	NA	NA	NA	NA	2002	0.15	0.11	0.12	1.71	146
2003	NA	NA	NA	NA	NA	2003	0.13	0.09	0.10	1.85	177
2004	0.37	0.42	0.24	2.04	87	2004	0.13	0.08	0.11	1.94	240
2005	0.38	0.38	0.25	2.02	277	2005	0.16	0.11	0.13	2.11	243
2006	0.58	0.55	0.40	2.30	134	2006	0.16	0.15	0.11	3.81	204

NA: Not available, SD: standard deviation, S: Skewness, No.: data number

**Table 3. Statistics of  $\dot{A}$  (500~870) obtained at Anmyun, Gosan, XiangHe and Shirahama during 1999~2006.**

Anmyun						Gosan					
Year	Mean	SD	Median	S	No.	Year	Mean	SD	Median	S	No.
1999	1.33	0.24	1.37	-0.81	42	1999	NA	NA	NA	NA	NA
2000	1.09	0.33	1.12	-0.75	131	2000	NA	NA	NA	NA	NA
2001	1.12	0.34	1.11	-0.18	228	2001	0.82	0.34	0.79	-0.07	44
2002	0.97	0.25	1.02	-0.66	41	2002	0.90	0.61	0.77	0.76	27
2003	NA	NA	NA	NA	NA	2003	0.89	0.42	0.87	0.08	78
2004	1.33	0.40	1.32	0.05	143	2004	1.08	0.50	1.15	-0.07	140
2005	1.10	0.34	1.13	-0.32	71	2005	0.78	0.36	0.71	-0.01	53
2006	0.94	0.39	0.94	-0.17	92	2006	1.00	0.42	0.99	-0.26	91

Xianghe						Shirahama					
Year	Mean	SD	Median	S	No.	Year	Mean	SD	Median	S	No.
2000	NA	NA	NA	NA	NA	2000	1.42	0.29	1.47	-0.49	35
2001	0.73	0.35	0.70	-0.20	25	2001	1.23	0.33	1.29	-0.46	146
2002	NA	NA	NA	NA	NA	2002	1.17	0.37	1.21	-0.63	146
2003	NA	NA	NA	NA	NA	2003	1.30	0.32	1.34	-0.58	177
2004	1.17	0.26	1.18	-0.83	87	2004	1.23	0.34	1.29	-0.75	240
2005	1.11	0.31	1.16	-0.71	277	2005	1.23	0.34	1.26	-0.39	240
2006	0.90	0.44	0.94	0.22	134	2006	1.27	0.40	1.35	-0.49	204

NA: Not available, SD: standard deviation, S: Skewness, No.: data number

보였다. 이는 중국 동부와 한반도 남서쪽 영역의 에어로졸 입자크기는 유사한 분포를 보이지만 전반적으로 일본 청정지역보다는 조대입자영역의 크기분포

를 가지고 있음을 의미한다. 흥미롭게도 Xianghe를 제외하고 다른 3개 측정소에서 왜도(skewness)가 모두 음의 값을 보여 중국은 입자 크기분포가 전반적

으로 큰 입자쪽으로 치우쳐 있고, 한국과 일본은 상대적으로 작은 크기 방향으로 치우쳐 있음을 의미한다. Å의 연변동을 살펴본 결과  $\tau_a$ 과는 달리 4개 지점 모두 통계적으로 유의한 수준의 증감 경향을 보이지 않았다(표 3).

3.2 월변화

안면과 고산의  $\tau_a$ 과 Å의 월변화 경향을 분석한 결과는 그림 4와 그림 5에 각각 나타냈는데,  $\tau_a$ 의 경우

Kim *et al.* (2006)의 연구결과와 유사하게 초여름 6월의 광학두께가 가장 높게 나타났으며, 장마가 끝난 후인 8월이 가장 낮은 값을 보였다. 안면이 고산에 비해 변동 진폭이 크게 나타났지만 계절적 변동은 서로 유사하게 나타나고 있다. Kim *et al.* (2006)는 초여름에 광학두께가 높게 나타난 원인을 장마전에 강한 일사와 안정한 대기조건에서 광화학반응에 의한 미세입자의 생성 및 에어로솔 누적효과로, 8월에 낮게 나타난 것은 장마 후에 강우후의 에어로솔 세정

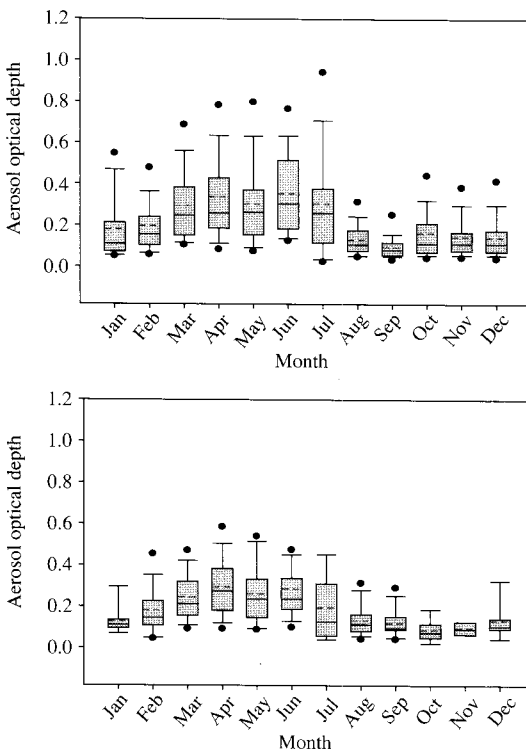


Fig. 4. Monthly variations of box plot (1%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, 99%) of  $\tau_a$  (870 nm) at Anmyun (up) and Gosan (down) during 1999~2006. The plot follows the same manner of Fig. 2.

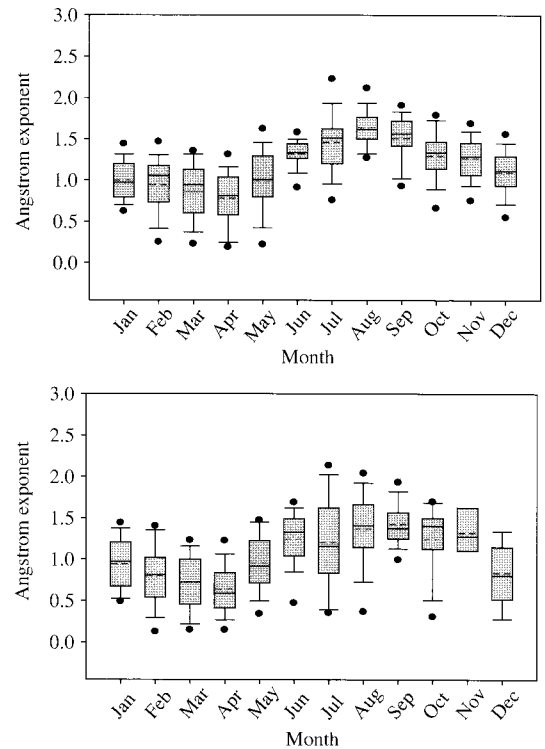


Fig. 5. Monthly variations of box plot (1%, 5%, 25%, 50%, 75%, 95%, 99%) of Å (500~870 nm) at Anmyun (up) and Gosan (down) during 1999~2006. The plot follows the same manner of Fig. 2.

Table 4. Monthly average rainy days and precipitation amount (mm) at Anmyun and Gosan for 1999 to 2006.

	Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rainy days	Anmyun	51	38	46	53	68	60	102	84	61	46	61	70
	Gosan	99	76	85	79	89	94	107	127	82	56	71	85
Precipitation (mm)	Anmyun	184	147	201	548	763	1116	1702	1981	1356	376	333	225
	Gosan	402	357	502	635	970	1109	1993	2075	932	429	470	306

효과 때문에 조대입자들이 제거되었기 때문으로 설명한 바 있다. 표 4는 분석기간 동안 안면과 고산 각각의 월별 강우일수와 강우량을 제시한 것이다. 6월부터 강우량이 증가하지만 강우일수는 감소하여 강우강도가 증가함을 알 수 있고, 7월의 경우에는 장마의 영향으로 강우일수와 강우량이 함께 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 7월 들어서면서  $\tau_a$  분포의 진폭은 증가하지만 평균과 중간값이 감소하는 것을 알 수 있다(그림 4). 전반적으로 안면이 고산(단 자료수가 상대적으로 적음)보다 월별 광학 두께의 진폭이 큰 것을 알 수 있는데 이는 그림 2에서도 언급한 바와 같이 외부로부터의 에어로솔 유입에 의한 영향을 안면이 고산보다 자주 받고 있음을 의미한다. 외부로부터의 유입은 국내 오염원의 영향이거나 편서풍대에 위치하고 있고 산업화가 활발히 일어나고 있는 중국의 산둥반도로부터 약 300~500 km 거리 밖에 떨어져 있지 않기 때문에 중국으로부터의 대기오염물질 이동일 가능성을 간과할 수 없다.

반면에 Å역시 두 지점 모두 봄철에 감소했다가 여름철에 증가하는 경향을 보였는데 봄철에는 황사의 영향으로 입자 크기가 증가하고 있음을 의미한다. 기존의 여러 연구결과에서도 황사기간중에 조대 입자가 증가하고 있음을 보여준 바 있다(Chun *et al.*, 2001; Kim and Park, 2001). 한편 표 4에서도 나타난 바와 같이 장마후(7월과 8월)에는 상대적으로 큰 입자들이 에어로솔 세정효과로 인하여 효과적으로 제거되고 대기중에 잔류한 미세입자에 의한 영향과 여름철의 광화학반응에 의한 미세입자의 생성과 관련된 것으로 생각된다(그림 4).

### 3.3 황사 에피소드 분석

황사기간과 비황사기간중의 에어로솔 광학특성을 비교하기 위하여 1999년부터 2006년까지 기상청이 황사현상으로 발표한 기간(안면 24일, 고산 39일)과 비황사기간(안면 632일, 고산 303일)으로 구분하여  $\tau_a$ 와 Å를 각각 비교하였다. 특정 황사 에피소드에 대하여 황사기간과 비황사기간을 비교한 것이 아니라 황사사례 평균과 비황사사례 평균에 대한 기후통계적인 비교를 의미한다. 그림 6은 안면에서 황사와 비황사사례를 비교한 것인데  $\tau_a$ 는 황사사례 평균이 비황사사례에 비해 평균, 중간값, 95분위수 등이 모두 약 2배 가량 크게 나타난 반면에, Å는 황사기간이

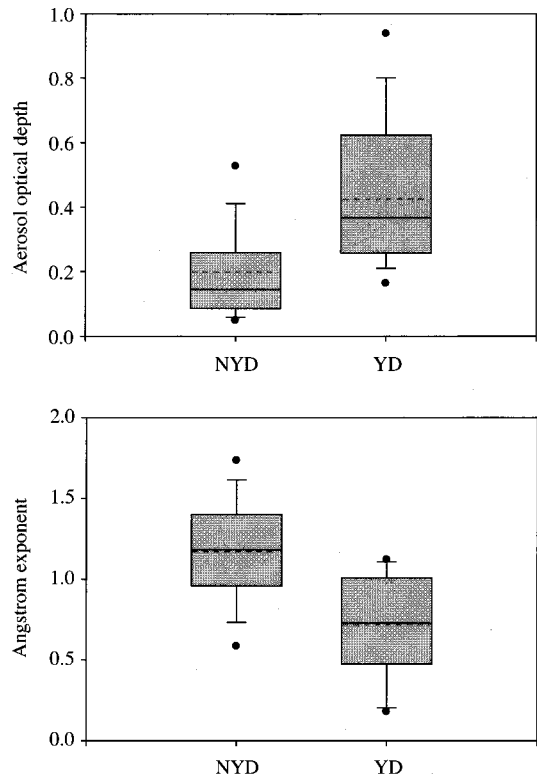


Fig. 6. Comparisons of  $\tau_a$  (870 nm) and Å (500~870 nm) for the Yellow dust (YD) and non-Yellow dust (NYD) periods at Anmyun. The plot follows the same manner of Fig. 2.

비황사기간에 비해 절반 수준으로 나타났고, 고산의 경우도 유사한 경향이 나타났다. 특히 안면과 고산의  $\tau_a$ 의 평균값은 황사기간이 0.39(표준 오차  $\pm 0.03$ )로 비황사기간의 0.21(표준오차  $\pm 0.007$ )에 비해 2배 수준으로 나타났다. 황사와 비황사기간의 에어로솔 복사 강제력을 추정하기 위하여 복잡한 복사전달모델을 이용하는 방법도 있지만 그러기 위해서는 지표면 반사도, 에어로솔의 구체적 특성, 구름방울 크기 및 위치 등 다양한 입력자료가 필요하기 때문에 입력자료의 불확실성으로 인한 추정치의 오차를 증가시킬 수 있는 가능성이 있다. 여기서는 황사 사례 평균과 비황사사례 평균과의 차이를 확인하고자 Jacobs(1999)이 제시한 아래와 같은 간단 모델을 이용하여 에어로솔 직접 복사효과를 산정해 보았다.



$$\Delta F = -\frac{F_S \Delta \alpha^* (1 - \alpha)^2}{4} \quad (3)$$

$$\Delta \alpha^* = \beta \Delta \tau_a \quad (4)$$

여기서  $\Delta F$ 는 복사강제력 ( $W m^{-2}$ ),  $F_S$ 는 태양상수 ( $W m^{-2}$ ),  $\alpha$ 는 지구전체 반사도,  $\Delta \alpha^*$ 는 에어로솔에 의한 반사도 변화,  $\beta$ 는 후방산란도,  $\Delta \tau_a$ 는 황사와 비황사기간의 에어로솔 광학두께의 차이를 의미한다. 후방산란도는 황사와 비황사기간의 차이에 대해 정량적으로 제시한 선행 연구가 없기 때문에 Charlson *et al.* (1992)이 제시한 전지구 평균 0.29와 불확실성 30%를 입력자료로 활용하였다.

식(3)의 간단 모델을 통해 계산한 결과 황사기간의 복사강제력이 비황사기간에 비해  $8.9 W m^{-2}$  ( $-14.3 \sim -4.8 W m^{-2}$ )의 음의 냉각효과를, 그리고 약 76%의 불확실성을 나타내었다. 이는 높은 불확실성을 감안하더라도 지역적인 규모의 복사효과로써는 상당한 양이다. 하지만 황사의 빈도가 전체 구름이 없는 맑은 날의 약 8% 이하로써 황사 에어로솔에 의한 복사효과는 단기간에 강하게 집중되는 것으로 설명된다.

황사가 중국으로부터 발생하여 한반도(여기서는 안면)를 지나 일본으로 진행되는 동안 광학적 특성의 진화 경향을 알아보기 위하여 2005년 각각의 황사사례에 대하여 중국 Xianghe, 안면, 그리고 일본 Shirahama 관측소(그림 1)의 황사 발생기간중의 광학특성을 비교하였다. 단 황사가 실제로 Xianghe를 거쳐 안면, Shirahama를 통과하는 사례를 찾기 어렵고, 전반적인 경향을 파악하는 데에 목적이 있기 때문에 각 지점에서 황사가 관측된 전체 사례에 대하여 분석하였다. 예상했던 대로 발생원지역의 Xianghe의  $\tau_a$ 가 가장 크고 풍하측 방향으로 낮아지는 경향을 보였다(그림 7). 하지만 흥미롭게도 안면과 Shirahama의  $\tau_a$ 는 평균, 중간값, 높은 분위수 등이 전반적으로 유사하게 나타나고 있어, 이 기간 발생한 황사의 영향권이 한반도 주변에 한정되는 것으로 추정되고  $\text{\AA}$ 는 발생원지역에서 전반적으로 낮고 풍하측 방향으로 증가하는 경향을 보였는데, 이는 발생원지역에서 멀어질수록 에어로솔 입자의 중력낙하나 건성침적으로 입자 크기가 점차 작아지고 있음을 정량적으로 보여주는 것이다. 특히 안면  $\text{\AA}$ 의 경우 입자 크기 변동이 큰 점을 확인할 수 있었고, Xianghe의

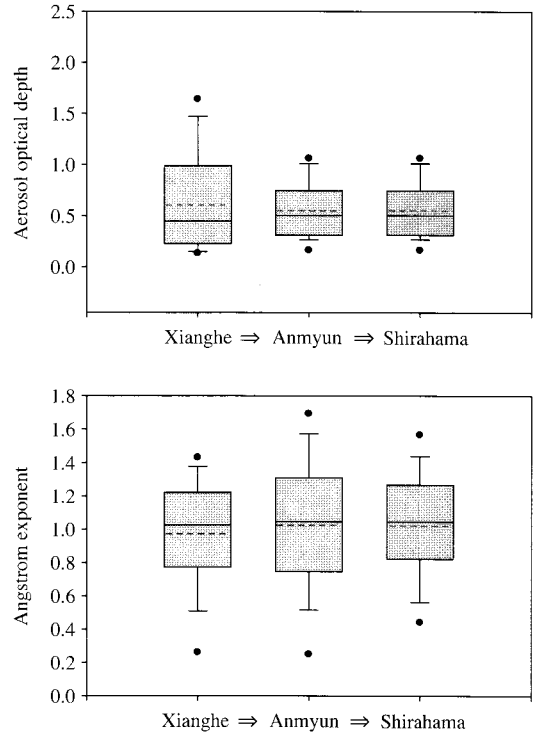


Fig. 7. Comparisons of  $\tau_a$  (870 nm) and  $\text{\AA}$  (500~870 nm) at Xianghe, Anmyun and Shirahama during the dust periods in 2005.

경우는 음의 왜도를 보여 황사발생시의 조대 입자에 의해  $\text{\AA}$ 의 최저치가 나타나는 이유로 판단된다.

### 3.4 주중변동

실제 대기중에서 인위적인 활동 변화에 따른 기후변동을 실험하는 것은 불가능한 일이다. 인간의 활동 변화에 따른 기후 변화를 이해하기 위해서 여러 가지 관측 및 모델링 연구가 수행되고 있지만 각각은 자체의 한계점을 지니고 있다. 하지만 인간은 일주일 주기로 주중에는 산업활동과 자동차 통행량 증가 등으로 대기오염물질이 증가하고 주말에는 반대로 인간 활동이 감소함으로써 대기오염물질이 감소하는 것으로 보고되고 있다(Jin *et al.*, 2005; Marr and Harley, 2002). 최근 연구결과(김병곤 등, 2007; Forster and Solomon, 2003)에 의하면 대기중 조성의 변화는 구름 미세물리과정, 대기 복사 효과, 에너지 수지 등에 영향을 주어 지역적인 기후변화 가능성을 제시한

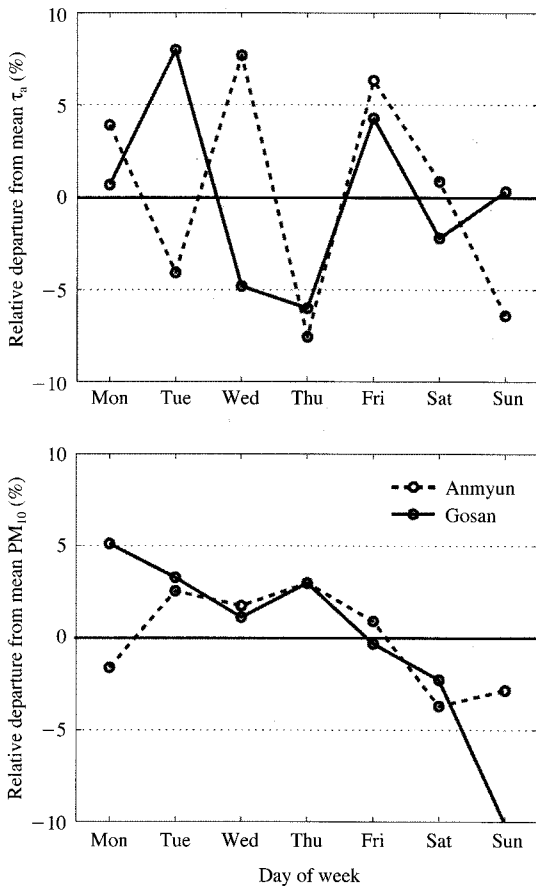


Fig. 8. Mean relative weekly variability of  $\tau_a$  for the Anmyun and Gosan stations.

바 있다. 그래서 본 연구에서 마지막으로 대기오염물질(주로 에어로솔) 변동이 지역적인 기후변화에 어떻게 영향을 주는지를 에어로솔의 주중 변동 관점에서 AERONET 관측자료를 통해 살펴보았다. 그림 8은 Baumer *et al.* (2007, 2008)가 제시한 방법에 따라  $\tau_a$ 의 주중 주기성 분석을 위하여 관측기간 동안 각 요일별  $\tau_a$ 의 주평균값과의 상대적인 편차(anomaly)를 나타낸 것이다. 부가적으로 같은 기간 동안 지상에서 관측한  $PM_{10}$ 의 요일별 편차를 같은 방법으로 계산하여 제시하였다.

$\tau_a$ 는 안면과 고산 모두 주중과 주말의 편차가 뚜렷이 나타나지 않고 있음을 알 수 있으며  $PM_{10}$  농도의 경우는 주중이 주말에 비해 양의 편차를 보였다. 이는 대기 컬럼내의 에어로솔 부하량 차이가 안면이

나 고산과 같은 배경농도 관측소에서 주중 변동에서 나타나지 않았지만 지상 에어로솔 질량농도( $PM_{10}$ )는 주중이 대체적으로 주말에 비해 높게 나타나는 주중 변동이 나타나고 있었다. 최근 김병곤 등(2007)의 서울의 일교차와 에어로솔 주말효과 관련 연구결과에서도 지상  $PM_{10}$  농도는 주말과 주중의 뚜렷한 차이를 확인한 바 있다. 이상의 결과에서 배경농도 관측소인 안면이나 고산에서도 지상부근 에어로솔 농도는 주말효과가 나타나고 있음을 알 수 있었다. 하지만 에어로솔 부하량이 있어서는 관측소 주변 에어로솔 변동보다는 외부로부터의 유입과 같은 다른 요인에 의한 영향에 지배를 받고 있는 것으로 생각된다. 향후 대도시지역으로 분석 범위를 확장하고, 오염물질 배출량 등과의 연계 등을 통해 에어로솔의 주중 변동에 대한 특성 파악이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 동아시아 지역에서 장기간의 전반적인 에어로솔 광학적 특성을 분석하기 위하여 1999~2006년까지의 AERONET 자료를 활용하였다. 안면도의  $\tau_a$  중간값이 고산보다 높게 나타났고, 안면의 경우 평균값이 증가하는 경향을, 고산의 경우는 감소하는 경향을 보였지만 10년 미만의 자료인 관계로 통계적인 유의성을 확보하기 위해서는 장기간의 자료 확보가 요구된다. 하지만 안면이나 고산의  $\tau_a$ 는 중국 Xianghe의 절반 수준이지만 일본의 청정지역이라 할 수 있는 Shirahama보다는 약 1.5배 가량 크게 나타났다. 그리고 안면의  $\tau_a$ 는 고산에 비해 변동폭이 크고, 절대 값도 고산에 비해 큰 것으로 나타나 중국이나 국내 인위적 영향을 정량적으로 나누기는 어렵지만 인위적인 오염원의 영향을 고산보다 자주 받고 있음을 의미한다. 또한 월변화에서는 장마전 초여름에 최대, 장마후 늦여름에 최소값을 나타내는 뚜렷한 패턴을 보였는데, 이는 장마 전에 광화학반응에 의한 에어로솔 생성 및 누적과 장마후에 에어로솔 세정효과 때문으로 생각된다. 한편 Å의 월변동은 봄철에 황사에 의한 조대 입자 증가로 낮게, 장마후 세정효과로 인한 조대입자 제거로 인해 크게 나타났다.

황사와 비황사기간의 에어로솔 광학특성에 대한

분석을 실시한 결과 이미 알려진 바 대로 황사기간중의  $\tau_a$ 가 현저하게 증가하여 약  $-8.9$  ( $-14.3 \sim -4.8$   $W m^{-2}$ ) 정도의 에어로솔 복사효과를 나타냈는데, 단기간(전체 맑은 날의 약 8% 이하)에 에어로솔 흡수의 복사 강제력이 강하게 나타남을 의미한다. 또한 황사 이동중의 변화에 대해서는 황사 발생원 지역에서 멀어질수록  $\tau_a$ 의 감소,  $\Delta$ 의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 부가적으로 인간 활동 변화에 따른 에어로솔 주기적인 변동을 분석한 결과 배경농도지역인 안면과 고산에서는 에어로솔 부하량( $\tau_a$ )의 주중과 주말의 차이가 나타나지 않았지만, 지상  $PM_{10}$  농도에서는 뚜렷한 주중 변동을 확인할 수 있었다.

이상의 결과에서 한반도 주변의 에어로솔의 공간적인 정도 및 뚜렷한 월변동, 황사시와 비황사시의 광학적 특성 차이 그리고 에어로솔의 주기 변동성 등에서 에어로솔의 기후학적인 중요성을 확인할 수 있었다. 향후 본 연구결과를 기초자료로 활용하고 동북아시아에서 위성원격관측(MODIS, Calipso, CloudSat)을 접목하여 기후변화연구에서 가장 불확실성이 크다고 보고되고 있는 에어로솔 간접효과에 대한 분석을 수행할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 신진 교수 연구 지원사업(KRF-2007-C00253)과 2006년 강릉대 학술연구연구 조성비의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 Xiang-He, 안면, 고산, 그리고 Shirahama 각각의 AERONET 측정소 운영을 책임지는 P. Wang 박사, 김영준 교수, B. Holben 박사께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

이원호, 김영준(2004) 인공위성자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아 산불시 발생한 에어로졸의 중장거리 모니터링, 한국대기환경학회지, 20(4), 437-450.  
 김병곤, 권태영(2006) 지상원격탐사를 이용한 에어로솔 간접효과 연구, 한국대기환경학회지, 22(2), 235-247.  
 김병곤, 김유준, 은승희, 최민혁(2007) 서울의 일교차 주말효과와 에어로솔과의 연관성, 대기, 17(2), 147-157.

Ackerman, A.S., O.B. Toon, D.E. Stevens, A.J. Heymsfield, V. Ramanathan, and E.J. Welton (2000) Reduction of tropical cloudiness by soot, *Science*, 288, 1042-1047.  
 Ackerman, A.S., M.P. Kirkpatrick, D.E. Stevens, and O.B. Toon (2004) The impact of humidity above the stratiform clouds on indirect aerosol climate forcing, *432(23/30)*, 1014-1017.  
 Albrecht, B.A. (1989) Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, 245, 1227-1230.  
 Baumer, D. and B. Vogel (2007) An unexpected pattern of distinct weekly periodicities in climatological variables in Germany, *Geophysical Research Letter*, 34, L03819, doi:10.1029/2006GL028559.  
 Baumer, D., R. Rinke, and B. Vogel (2008) Weekly periodicities of aerosol optical thickness over central Europe-evidence of an anthropogenic direct aerosol effect, *Atmospheric Chemistry & Physics*, 8, 83-90.  
 Charlson, R.J., S.E. Schwartz, J.M. Hales, R.D. Cess, J.A.Jr. Coakley, J.E. Hansen, and D.J. Hofmann (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255, 423-430.  
 Chun, Y., J. Kim, J.C. Choi, K.O. Boo, S.N. Oh, and M. Lee (2001) Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 2715-2721.  
 Chung, C.E., V. Ramanathan, D. Kim, and I.A. Podgorny (2005) Global anthropogenic aerosol direct forcing derived from satellite and ground-based observations, *Journal of Geophysical Research*, 110(D24 207), doi:10.1029/2005JD006356.  
 Forster, P.M. and S. Solomon (2003) Observations of a "week-end effect" in diurnal temperature range, *Proceeding of National Academic Science*, 100(20), 11225-11230.  
 Holben, B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak and A. Smirnov (1998) AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66, 1-16.  
 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, 10.1029/2003JD003550.

- Intergovernment Panel on Climate Change (2007) *Climate Change 2007: The Scientific Basis*, Cambridge Univ. Press, NY, 1056pp.
- Jacobs, D. (1999) *Introduction to Atmospheric Chemistry*, Princeton University Press, 266pp.
- Jin, M., J.M. Shepherd, and M.D. King (2005) Urban aerosols and their variations with clouds and rainfall: A case study of New York and Houston, *Journal of Geophysical Research*, 110(D10S20), doi:10.1029/2004JD005081.
- Kim, B.G. and S.U. Park (2001) Transport and evolution of a winter-time Yellow sand observed in Korea, *Atmospheric Environment*, 35(18), 3191-3201.
- Kim, B.G., M.A. Miller, S.E. Schwartz, Y. Liu, and Q. Min (2008) The role of adiabaticity in the aerosol first indirect effect, *Journal of Geophysical Research*, 113(D05210), doi:10.1029/2007JD008961.
- Kim, S.W., S.C. Yoon, J.Y. Kim, and S.Y. Kim (2006) Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements, *Atmospheric Environment*, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.10.044.
- Marr, L.C. and R.A. Harley (2002) Modeling the effect of weekday-weekend differences in motor vehicle emissions on photochemical air pollution in central California, *Environmental Science & Technology*, 36, 4099-4106.
- Michalsky, J.J., R. Perez, R. Seals and P. Ineichen (1994) Degradation of solar concentrator performance in the afremath of mount Pinatubo, *Solar Energy*, 52, 205-213.
- Nakajima, T. and S.C. Yoon (2005) Implementation plan for ABC Gosan campaign: East Asian Regional Experiment, 2005, 73pp. Available at <http://abc-gosan.snu.ac.kr>.
- Robock, A. (1983) The dust cloud of the century, *Nature*, 301, 373-374.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*, John Wiley & Sons Inc., 1326pp.
- Smirnov, A., B.N. Holben, T.F. Eck, O. Dubovik, and I. Slutsker (2000) Cloud screening and quality assurance algorithm for the AERONET database, *Remote Sensing of Environment*, 73, 337-349.
- Twomey, S. (1977) The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149-1152.