



논문

AERONET 선포토미터 데이터를 이용한 동북아시아 지역 대기 에어로졸 종류별 광학적 농도 변화 특성 연구

A Study on the Variation of Aerosol Optical Depth according to Aerosol Types in Northeast Asia using AERONET Sun/Sky Radiometer Data

노영민*
 국립부경대학교 환경공학과

Youngmin Noh*
 Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

접수일 2018년 8월 23일
 수정일 2018년 9월 22일
 채택일 2018년 10월 6일

Received 23 August 2018
 Revised 22 September 2018
 Accepted 6 October 2018

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)51-629-6526
 E-mail : nym@pknu.ac.kr

Abstract This study has developed a technique to divide the aerosol optical depth of the entire aerosol (τ_{total}) into the dust optical depth (τ_D) and the pollution particle optical depth (τ_p) using the AERONET sun/sky radiometer data provided in Version 3. This method was applied to the analysis of AERONET data observed from 2006 to 2016 in Beijing, China, Seoul and Gosan, Korea and Osaka, Japan and the aerosol optical depth trends of different types of atmospheric aerosols in Northeast Asia were analyzed. The annual variation of τ_{total} showed a tendency to decrease except for Seoul where observation data were limited. However, τ_D tended to decrease when τ_{total} were separated as τ_D and τ_p , but τ_p tended to increase except for Osaka. This is because the concentration of airborne aerosols, represented by Asian dust in Northeast Asia, is decreased in both mass concentration and optical concentration. However, even though the mass concentration of pollution particles generated by human activity tends to decrease, Which means that the optical concentration represented as aerosol optical depth is increasing in Northeast Asia.

Key words: Depolarization ratio, Aerosol, Dust, Pollution, AERONET

1. 서 론

대기 에어로졸은 기후변화뿐만 아니라 대기질 및 공중보건 문제 등에 있어 중요한 역할을 하는 물질 중 하나이다(IPCC, 2016). 최근까지 대기 에어로졸이 기후변화에 직·간접적으로 미치는 영향을 파악하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 기후변화는 한 지역이 아닌 전 지구적인 문제이기 때문에 전 지구의 대기 에어로졸 분포 및 특성에 대한 데이터 산출을 위해 위성 관측과 같은 원격탐사 기술을 이용한 에어로졸 관측 및 분석이 수행 중이다.

원격탐사 기술 중 하나인 위성은 동북아시아 전역이나 지구 전체와 같이 광범위한 영역을 신속하게 측정할 수 있어 중국 등으로부터 한반도로 장거리 수송되는 대기 에어로졸을 감시하는데 매우 효과적이다. 하지만, 원격탐사 기술을 이용하여 대기 에어로졸 광학적 농도(AOD: aerosol optical depth)를 산출할 경우 대기 에어로졸이 동일한 질량 농도로 분포하더라도 에어로졸의 종류나 입자 크기에 따라 AOD는 차이를 보이게 된다. 따라서, 원격탐사로 산출한 AOD를 지점 관측의 중량법으로 측정된 에어로졸의 질량 농도와 비교할 경우 다소 큰 차이가 발생하기 때문에

직접 비교는 많은 어려움이 따른다. 일례로 동북아시아 지역에서 PM_{10} 의 질량 농도는 봄철에 가장 높은 값을 보이고, 그 다음이 가을, 겨울 순으로 나타나며 여름철에 가장 낮은 값을 보인다(Nam *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2014). 하지만, 원격탐사 방식을 이용한 위성이나 선포토미터로 관측된 AOD는 여름이 가을과 겨울보다 높은 값을 보이고 있다(Noh *et al.*, 2012a). 하지만, 이와 같은 현상은 강수가 있거나 밤일 경우 원격탐사로 측정이 이루어지지 않는 각각의 측정 조건의 차이에 의해 발생할 수도 있기 때문에 정밀한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

근래의 대기 에어로졸에 대한 주요 연구 흐름은 기후변화에 이어 환경오염물질로써의 이해와 영향파악이 주요 사항이며, 이에 일환으로 원격탐사 기술로 산출한 AOD를 이용하여 좀더 정확한 대기 에어로졸 질량 농도 변환을 위한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 중량법 중심의 지상 지점관측망 만으로는 광범위한 지역을 모두 측정할 수 없기에 대기질 정보의 사각지대가 발생한다. 이는 더욱 정확하고 자세한 대기질 정보를 원하는 대중뿐만 아니라 실황 자료를 활용하고 있는 대기질 예보에 있어서도 정확도를 떨어트리는 요인으로 작용하기 때문에 공간적 한계 극복이 가능한 원격탐사 기술 활용이 절실하다. 또한 원격탐사 기술의 정확성 향상이 수반되어야 하며, 이를 위해 먼저 AOD를 질량 농도로 정확하게 변환하는 기술의 개발이 더욱 절실하다. 대기 에어로졸의 광학적 특성은 종류와 크기에 따라 큰 차이를 보이기에 질량농도 산출을 위해 원격탐사 기술로 대기 에어로졸을 종류와 크기에 따른 구분이 요구된다. 특히, 동북아시아 지역의 주요 대기 에어로졸의 하나인 황사의 경우, 다른 오염 입자와는 크기, 물리적, 광학적 특성이 확연히 구분되기에 이를 먼저 구분하는 기술이 필요하다.

에어로졸의 광학선 산출 요소 중 하나인 편광소멸도(Depolarization ratio, δ ; Shimizu *et al.*, 2004)는 대기 에어로졸 중 황사 구분에 매우 효과적이다. Shimizu *et al.* (2004)는 라이다로 산출한 δ 를 이용하여

황사와 오염 입자를 구분하였고, Noh *et al.*, (2012b)는 라이다의 δ 를 이용하여 황사와 오염 입자를 구분하여 각각의 복사강제력을 산출하였다. 하지만, δ 는 직선 편광을 가지는 레이저를 광원으로 사용하는 라이다 관측을 통해 직접 산출되는 광학적 요소로써 라이다 이외의 원격탐사 기술에서는 매우 제한적으로만 사용되었다. 하지만, Dubovik *et al.* (2006)은 선포토미터로부터 δ 를 산출 기술을 개발하였고, Noh *et al.* (2017)은 라이다와 선포토미터로부터 산출된 각각의 δ 를 비교하여 선포토미터로부터 산출된 δ 의 유용성을 확인하였다. 최근 NASA AERONET은 2018년 1월부터 Version 3 데이터에 δ 값을 직접 제공하고 있다.

본 연구는 NASA AERONET 선포토미터의 δ 자료를 활용하여 전체 AOD에서 황사와 오염 입자를 구분하여 각각의 AOD를 산출하는 기술을 개발하고, 이를 적용하여 동북아시아 지역의 대기 에어로졸 종류별 AOD의 연도별, 계절별 변화를 연구하였다.

2. 연구 방법

2.1 관측 자료 및 지점

본 연구에는 동북아시아의 4개 지역(베이징, 서울, 고산, 오사카)에서 2006년부터 2016년까지 관측된 검보정이 완료된 Level 2.0의 Version 3 일평균 AERONET 자료를 분석하였다. Version 3 자료는 2018년 1월부터 AERONET에서 공개하고 있으며 Version 2에서는 제공되지 않던 440, 675, 870 및 1020 nm에서의 입자편광소멸도(particle depolarization ratio; δ_p , 2.2장에 상세 설명)를 표출하고 있다. AERONET 선포토미터에서 입자편광소멸도를 산출하는 이론적 배경은 Dubovik *et al.* (2006)에 자세히 설명되어 있다. 베이징(39.58°N, 116.22°E)은 황사 발원지에 근접해 있어 황사 입자의 농도와 영향이 다른 세 지점보다 노출빈도가 높고, 동북아시아 지역에서 오염물질의 배출이 월등히 많은 지점이다. 서울 지역은 국내 배출오염

입자와 장거리 수송된 황사 및 오염 입자의 영향을 모두 받는 지역으로 데이터는 연세대학교(37.56°N, 126.93°E)에 관측한 2011년부터 관측된 자료를 사용하였다. 고산(33.29°N, 126.16°E)은 제주도에 위치한 지점으로 인구 밀도가 낮고 대형 산업시설이 없어 다른 관측 지점에 비하여 자체적으로 발생된 오염물질 영향이 적고, 장거리 수송된 황사 및 오염 입자의 영향을 받는 지점이다. 마지막으로 일본 오사카 지점은 긴기(Kinki)대학교(34.65°N, 135.59°E)에서 관측이 수행되었는데 이 지역은 중국으로부터 장거리 수송된 황사와 오염 입자의 영향이 서울과 고산에 비하여 노출 빈도는 적은 지역이지만, 인근 도심지역으로 자

체 배출원으로 인한 영향을 직간접적으로 받는 지역이다.

각 관측 지점의 위치는 그림 1에 표시하였으며, 각 연도별 관측일 수 및 연평균 입자편광소멸도 자료는 표 1에 나타내었다. 베이징의 총 관측일 수는 925일이다. 그리고 서울 407일, 고산 163일 그리고 오사카 215일로, 서울이 타 지역보다 총 관측일 수가 많았다. 고비사막, 내몽골고원 등 황사발원지에 인접한 베이징, 그리고 고산 지역에 δ_p 가 다른 지역보다 높은 경향을 보였으나, 값에 큰 차이를 보이지는 않았다.

2.2 황사비(Dust Ratio, R_D) 산출 및 종류별 광학적 두께 산출

본 연구의 핵심인 황사와 오염 입자 각각의 광학적 두께를 산출하기 위해서는 우선적으로 황사비(Dust Ratio, R_D)의 산출이 필요하고, R_D 산출의 핵심 요소는 δ 이다. δ 는 라이더(LIDAR: Light Detection And Range) 관측으로부터 직접 산출되는 요소로서 입자의 비구형도를 나타내는 척도로 황사와 같은 비구형 입자의 존재유무를 파악하는데 매우 유용한 요소이다. δ 는 공기분자에 의한 산란과 입자의 의한 산란을 모두 포함하는 부피 편광소멸도(linear volume depolarization ratio; δ)와 입자만의 산란을 고려하는 입자 편광소멸도(particle depolarization ratio; δ_p)로 구분된다. δ_p 는 δ 로부터 산출할 수 있다(Shin *et al.*, 2012).

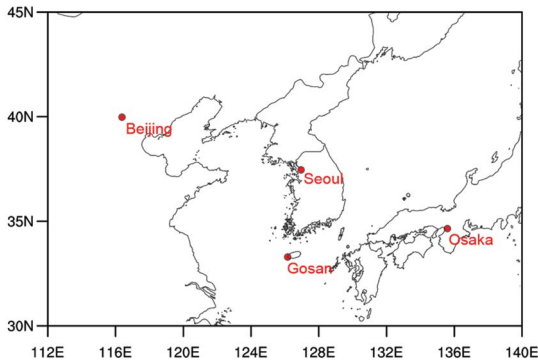


Fig. 1. Map of the observation sites. Measurements with AERONET sun/sky radiometer were performed at Beijing, Seoul, Gosan and Osaka.

Table 1. Annual number of observation days (#) and annual average of particle depolarization ratio (δ_p) at Beijing, Seoul, Gosan and Osaka.

	Beijing		Seoul		Gosan		Osaka	
	#	δ_p	#	δ_p	#	δ_p	#	δ_p
2006	116	0.08 ± 0.08	0		27	0.12 ± 0.09	3	0.003 ± 0.003
2007	77	0.04 ± 0.04	0		11	0.09 ± 0.06	39	0.05 ± 0.06
2008	38	0.08 ± 0.09	0		12	0.06 ± 0.06	32	0.05 ± 0.06
2009	87	0.09 ± 0.07	0		1	0.21 ± 0.15	1	0.003 ± 0.002
2010	117	0.07 ± 0.06	0		0		32	0.05 ± 0.08
2011	97	0.06 ± 0.07	61	0.05 ± 0.05	17	0.08 ± 0.08	3	0.20 ± 0.05
2012	61	0.08 ± 0.06	49	0.06 ± 0.06	25	0.06 ± 0.07	11	0.05 ± 0.07
2013	64	0.06 ± 0.07	66	0.05 ± 0.05	29	0.08 ± 0.05	46	0.05 ± 0.06
2014	94	0.06 ± 0.07	71	0.07 ± 0.06	14	0.07 ± 0.05	5	0.05 ± 0.05
2015	81	0.06 ± 0.07	81	0.04 ± 0.05	14	0.06 ± 0.06	39	0.05 ± 0.06
2016	93	0.05 ± 0.07	79	0.05 ± 0.06	13	0.04 ± 0.04	4	0.05 ± 0.05
AVE. & Total #	925	0.07 ± 0.07	407	0.05 ± 0.05	163	0.08 ± 0.07	215	0.05 ± 0.06

본 연구에서는 AERONET의 Version 3 Inversion의 δ_p 를 이용하여 전체 관측된 에어로졸에서 황사의 비율인 황사비(Dust ratio; R_D)를 산출하였으며 방법은 다음과 같다.

$$R_D = \frac{(\delta_p - \delta_2)(1 + \delta_1)}{(\delta_1 - \delta_2)(1 + \delta_p)} \quad (1)$$

여기서, δ_1 과 δ_2 는 각각 황사와 황사 이외 오염 입자의 δ_p 로서 선행연구로부터 산출된 경험값을 적용한다. 본 연구에서는 Noh *et al.* (2017)의 연구에서 산출된 0.32를 δ_2 로 적용하였다. δ_1 은 0.01을 적용하였다. δ_p 가 δ_1 보다 낮거나 δ_2 보다 높은 값이 산출될 경우에 R_D 는 각각 0과 1로 적용하였다.

산출된 R_D 를 활용하여 황사와 오염 입자를 포함하는 전체 광학적 두께($\tau_{\lambda, total}$)에서 황사 입자의 광학적 두께(τ_D)와 오염 입자의 광학적 두께(τ_p)를 식(2, 3)으로 산출하였다.

$$\tau_{\lambda, D} = \tau_{\lambda, total} \times (1 - R_D) \times \frac{S_{\lambda, D}}{S_{\lambda, total}} \quad (2)$$

$$\tau_{\lambda, p} = \tau_{\lambda, total} - \tau_{\lambda, D} \quad (3)$$

여기서, S_D 와 S_{total} 은 각각 황사 입자와 전체 에어로졸의 라이다 비를 나타내며, 전체 에어로졸의 라이다 비는 AERONET Version 3에서 제공하는 값을 사용하고, 황사 입자의 라이다 비는 황사 발원지인 둔황에서 측정된 결과를 바탕으로 44 sr (Shin *et al.*, 2018)의 값을 적용하였다. λ 는 파장을 표시하며 본 연구에서 전체 에어로졸, 황사, 오염 입자의 광학적 두께는 440 nm의 파장에서 산출하였다.

본 연구에서는 위의 방법을 적용하여 2006년부터 2016년까지 네 지역에서 측정된 일평균 광학적 두께와 편광소멸도를 분석하여 전체 에어로졸의 광학적 두께와 황사와 오염 입자로 구분된 광학적 두께를 산출하였다.

3. 에어로졸 광학적 두께 변화 추세

표 2는 전체 관측 데이터에 대한 전체 및 계절별

Table 2. Total average and seasonal average value of total aerosol optical depth (τ_{total}), particle depolarization ratio (δ_p), dust optical depth (τ_D) and pollution optical depth (τ_p) at Beijing, Seoul, Gosan and Osaka.

		Beijing	Seoul	Gosan	Osaka
τ_{total} (440 nm)	Spring	1.10 ± 0.65	0.77 ± 0.36	0.64 ± 0.26	0.58 ± 0.21
	Summer	1.22 ± 0.77	0.84 ± 0.38	0.78 ± 0.33	0.66 ± 0.24
	Fall	1.17 ± 0.82	0.68 ± 0.37	0.74 ± 0.37	0.48 ± 0.12
	Winter	0.98 ± 0.68	0.81 ± 0.41	0.70 ± 0.29	0.53 ± 0.12
	Total AVE.	1.14 ± 0.73	0.77 ± 0.38	0.68 ± 0.30	0.58 ± 0.21
δ_p (1020 nm)	Spring	0.11 ± 0.08	0.08 ± 0.07	0.10 ± 0.07	0.09 ± 0.07
	Summer	0.04 ± 0.05	0.03 ± 0.03	0.03 ± 0.03	0.01 ± 0.02
	Fall	0.05 ± 0.05	0.04 ± 0.03	0.03 ± 0.06	0.02 ± 0.04
	Winter	0.04 ± 0.05	0.04 ± 0.05	0.08 ± 0.08	0.03 ± 0.04
	Total AVE.	0.07 ± 0.07	0.05 ± 0.06	0.08 ± 0.07	0.05 ± 0.06
τ_D (440 nm)	Spring	0.26 ± 0.27	0.10 ± 0.12	0.01 ± 0.01	0.09 ± 0.10
	Summer	0.07 ± 0.09	0.03 ± 0.03	0.004 ± 0.01	0.01 ± 0.02
	Fall	0.07 ± 0.11	0.03 ± 0.04	0.004 ± 0.01	0.02 ± 0.04
	Winter	0.06 ± 0.11	0.06 ± 0.13	0.007 ± 0.01	0.02 ± 0.03
	Total AVE.	0.13 ± 0.20	0.06 ± 0.10	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.08
τ_p (440 nm)	Spring	0.83 ± 0.65	0.67 ± 0.36	0.62 ± 0.27	0.49 ± 0.21
	Summer	1.38 ± 0.77	0.82 ± 0.37	0.77 ± 0.33	0.65 ± 0.24
	Fall	1.10 ± 0.82	0.65 ± 0.36	0.74 ± 0.36	0.47 ± 0.12
	Winter	0.91 ± 0.69	0.76 ± 0.41	0.70 ± 0.29	0.51 ± 0.18
	Total AVE.	1.01 ± 0.75	0.71 ± 0.37	0.67 ± 0.30	0.53 ± 0.22

δ_p , 평균 τ_{total} , δ_p , τ_D 및 τ_p 값을 보여준다. τ_{total} 의 전체 평균값은 베이징이 1.14 ± 0.73 으로 가장 높은 값을 보였고, 서울 (0.77 ± 0.38), 고산 (0.68 ± 0.30), 오사카 (0.58 ± 0.21)로 베이징에서 멀어질수록 낮은 값을 보였다. 계절적으로는 네 지역 모두 여름에 τ_{total} 가 가장 높은 값을 보였다. 봄의 τ_D 는 베이징이 0.26 ± 0.27 로 다른 세 지역이 0.1 이하보다 높은 값을 보였다. 봄의 δ_p 값은 네 지역에서 큰 차이를 보이지 않았지만 베이징의 τ_D 가 타 지역보다 다소 높게 나타났다. δ_p 는 비구형 입자로 구성된 황사가 많이 분포할수록 높은 수치를 나타내는데 베이징이 황사 발원지에 근접해 있어 황사 입자의 영향을 많이 받았다는 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서의 지역별, 계절별 τ 의 분포 특징은 이전 연구와 큰 차이를 보이지 않았다 (Yu *et al.*, 2009).

산출된 AERONET 선포토미터의 일평균 자료를 2006년부터 2016년까지의 각 월의 월평균과 각 연도의 연평균 자료로 표출하여 least-squares 방법으로 기울기를 구하여 시간에 따른 τ_{total} 의 변화를 분석하였다. 그림 2는 베이징, 서울, 고산, 오사카 네 지점의 440 nm에서의 월평균 및 연평균 τ_{total} 의 변화를 보여준다. 월평균 τ_{total} 자료는 각 달의 관측 횟수 및 기상 상황 등으로 인하여 높은 월별 차이를 보이고 있지만, 표 2에서 확인한 바와 같이 여름에 높은 값을 보이고 겨울에 낮은 값을 보이는 경향이 연도별로 지속되고 있다. 연평균 자료 또한 매년 높거나 낮은 차이를 보이기는 하지만 2006년부터 2016년까지 연도별 τ_{total} 의 변화 추세는 서울을 제외하고는 감소하는 경향을 보이고 있다. 연도별 τ_{total} 의 감소 경향은 베이징이 매년 -0.012 yr^{-1} 로 가장 높은 감소 경향을 보이고, 고산과 오사카에서는 -0.005 yr^{-1} 와 -0.007 yr^{-1} 의 감소 경향을 보였다. 다만, 서울에서는 전반적으로 변화도가 0.005 yr^{-1} 로 τ_{total} 가 증가하는 경향을 보였다.

전반적인 τ_{total} 의 감소 경향은 중국과 한국의 미세먼지 농도 감소 경향과 일치한다. 중국 베이징 지역에서 2000년부터 2015년까지의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 연도별

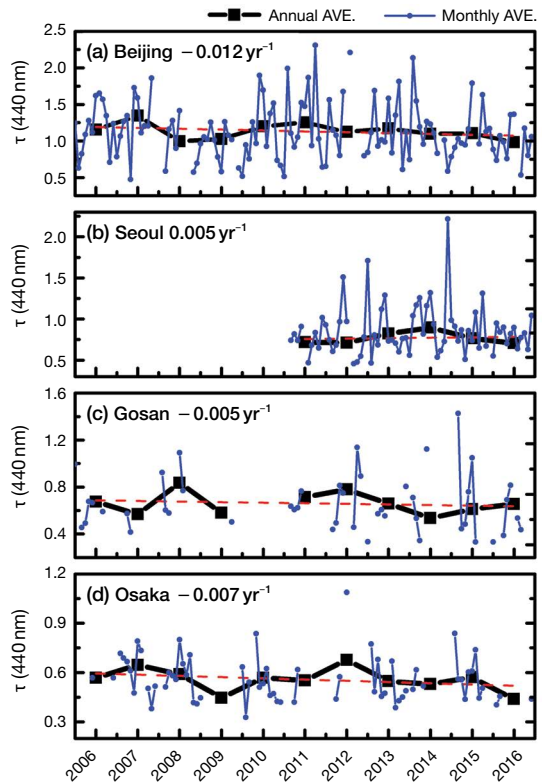


Fig. 2. Annual and monthly average value of total aerosol optical depth (τ_{total}) at 440 nm at Beijing, Seoul, Gosan and Osaka.

농도 경향을 분석한 자료를 확인하면 각각 매년 1.6 및 $4.3 \mu\text{g m}^{-3}$ 씩 감소하고 있어 2000년에 $160 \mu\text{g m}^{-3}$ 이었던 베이징의 연평균 PM_{10} 농도는 2015년에 $100 \mu\text{g m}^{-3}$ 까지 감소함을 확인할 수 있다 (Lang *et al.*, 2017). 서울의 미세먼지 농도는 지속적인 감소 추세를 보이거나 2012년부터는 감소 추세가 정체되는 경향을 보이고 있다 (The Korean Academy of Science and Technology, 2017). 서울에서의 τ_{total} 가 다른 지역과는 달리 증가 추세를 보인 것은 관측 자료가 2011년부터 존재하고 미세먼지 농도 추세가 정체된 것과 관련된 것으로 판단된다. 하지만, τ_{total} 이 감소하는 추세를 보이더라도 PM_{10} 에 비하여 감소 추세는 미약하며 그래프 상에서 감소 추세가 명확하게 표현되고 있지 않다.

그림 3과 4는 각각 황사와 오염 입자로 구분한 일

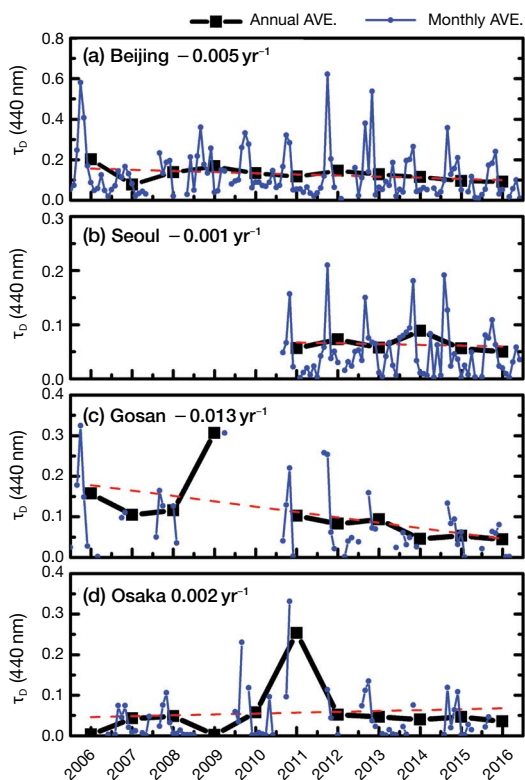


Fig. 3. Annual and monthly average value of dust aerosol optical depth (τ_D) at 440 nm at Beijing, Seoul, Gosan and Osaka.

별, 연도별 평균 τ_D 와 τ_p 의 연도별 그리고 월별 변화 경향을 보여준다. 그림 3의 τ_D 의 월별 변화는 봄에 높은 값을 보이는 특징이 네 지역에서 모두 관측된다. 연평균 τ_D 의 변화는 베이징, 서울, 고산에서 연평균 변화량이 각각 -0.005 , -0.001 , -0.013 yr^{-1} 으로 미약하게 감소하는 경향을 보였다. 오사카의 경우 변화량이 0.002 yr^{-1} 로 증가하는 경향을 보였다.

그림 4에서 보여주는 τ_p 의 월별, 연도별 평균값은 황사의 경우와는 반대로 증가하는 경향을 보인다. 베이징, 서울, 고산의 연평균 τ_p 의 변화 경향은 각각 0.007 , 0.007 , 0.008 yr^{-1} 로 황사 입자의 경우와는 반대로 시간이 흐름에 따라 τ_p 가 증가하는 경향을 보였다. 오사카만 유일하게 경향이 -0.010 yr^{-1} 로 τ_p 가 감소하는 추세를 보였다.

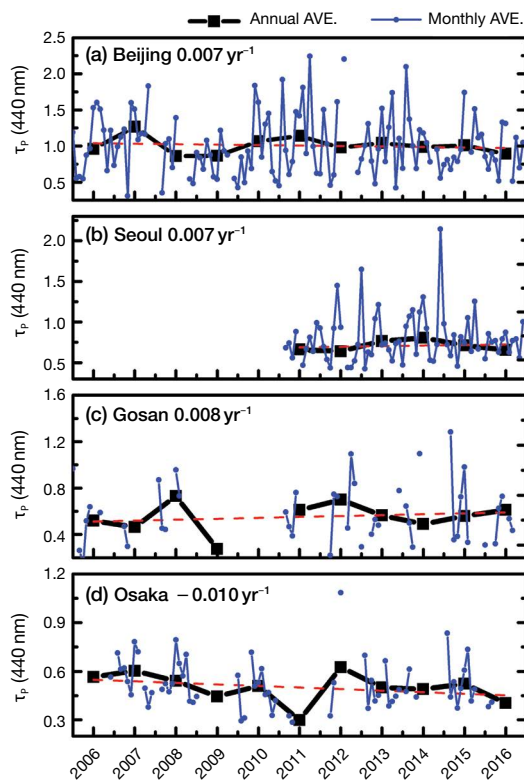


Fig. 4. Annual and monthly average value of pollution aerosol optical depth (τ_p) at 440 nm at Beijing, Seoul, Gosan and Osaka.

4. 에어로졸 종류별 비율의 변화

τ_{total} 에서 τ_D 와 τ_p 가 차지하는 비율의 변화를 확인하고 이를 연평균 값으로 산출하여 그 경향을 확인하였다. 그림 5는 네 지역에서의 τ_D 와 τ_p 비율의 연도별 경향을 보여준다. τ_D 의 비율의 변화는 베이징, 서울, 고산에서 변화율이 -0.005 , -0.003 , -0.023 yr^{-1} 로 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보였다. 오사카는 τ_D 의 농도 변화와 마찬가지로 비율도 변화율이 0.005 yr^{-1} 로 증가하는 추세를 보였다. τ_p 의 비율은 황사의 경우와 반대로 베이징, 서울, 고산에서 변화량이 0.005 , 0.003 , 0.022 yr^{-1} 로 증가하는 경향을 보였다. 오사카는 변화량이 -0.005 yr^{-1} 로 감소하는 경향이였다.

그림 5에서 보여주는 τ_{total} 에서 τ_D 와 τ_p 의 비율 변화

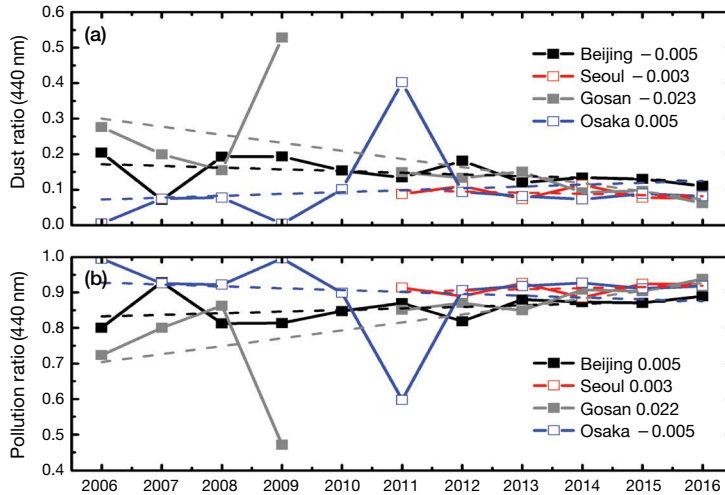


Fig. 5. Dust and Pollution ratio at at Beijing, Seoul, Gosan and Osaka.

는 대기환경정책에 있어 시사하는 점이 크다. 환경 문제, 특히 보건상의 이유로 초미세먼지로 표현되는 $PM_{2.5}$ 의 농도 변화에 대한 관심이 전 세계뿐만 아니라 중국과 한국과 같은 고농도의 $PM_{2.5}$ 가 발생하는 지역에서의 관심은 특히나 높다. 중국과 한국 정부는 미세먼지 및 초미세먼지 저감을 위한 환경정책을 펴서 앞서 언급한 바와 같이 미세먼지의 질량농도는 2015년까지 지속적으로 감소하는 추세를 보였다 (The Korean Academy of Science and Technology, 2017; Lang *et al.*, 2017). 하지만, 국내의 경우 2015년부터는 감소경향이 현격히 둔화되어 감소 추세가 정체된 상태이다. 이러한 상황에서 본 연구결과를 살펴 보면, τ_{total} 로 표현되는 미세먼지 광학적 농도의 경우, τ_{total} 의 연평균 값의 변화는 질량농도의 추세와 마찬가지로 감소하는 경향을 보이거나 그 정도는 매우 약함을 확인할 수 있다. 황사와 오염 입자로 구분된 τ_D 와 τ_P 의 변화 경향은 황사 입자에 의한 광학적 농도는 지속적으로 감소하는 경향이나 오염 입자는 광학적 농도가 오히려 증가하는 추세를 보이고 있다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때, 광학적 농도의 경우 τ_{total} 이 감소하는 경향은 동북아시아 지역에서 발생하는 황사 입자의 농도 감소로부터 유발되었다고 할 수 있다.

오염 입자의 경우는 질량농도는 감소하는 경향을 보이더라도 광학적 농도의 경우는 오히려 증가하고 있는 결과를 본 연구에서는 보여준다. 이 같은 결과를 분석하기 위해서는 대기 에어로졸 종류에 따른 질량 소산효율(Mass Extinction efficiency)의 파악이 필요하다.

황사 입자의 경우 대기 에어로졸 종류에 따른 질량 소산효율이 $0.2 \sim 1.1 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 다른 오염 입자(Sulfate: $6 \sim 8$, Urban particle: $4.5 \sim 7.1 \text{ m}^2/\text{g}$)나 Biomass 입자($2.6 \text{ m}^2/\text{g}$)에 비하여 상당히 낮은 값을 나타낸다 (Hansell *et al.*, 2011; Raut *et al.*, 2009). 이와 같은 대기 에어로졸 종류에 따른 질량소산효율의 차이가 나타내는 의미는 같은 질량농도일지라도 황사 입자는 다른 오염 입자에 비하여 광학적 농도는 낮은 값을 나타냄을 의미한다. Lang *et al.* (2017)은 베이징 지역의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도는 감소하는 추세에서 황산염(SO_4^{2-}), 질산염, 암모늄 같은 2차생성 입자의 농도는 증가하고 있음을 확인하였다. 지상 관측으로부터 분석된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 명확하게 감소하는 경향을 보이거나 τ_{total} 의 감소 경향은 이에 비하여 매우 약하고 황사와 오염 입자로 구분하였을 때, τ_P 가 오히려 증가하는 경향은 과거에 비하여 오염 입자를 구성하

는 입자의 종류가 광소산 효과가 큰, 즉 질량소산효율이 높은 대기 에어로졸의 비율의 증가로부터 유발되었다고 추론할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 AERONET 선포토미터 자료 중 Version 3에서 제공되는 δ_p 를 이용하여 전체 에어로졸의 광학적 두께에서 황사와 오염 입자의 광학적 두께로 구분하는 기술을 개발하였다. 이 분석법을 2006년부터 2016년까지 중국의 베이징, 한국의 서울, 고산, 그리고 일본의 오사카에서 관측된 AERONET 선포토미터 자료 분석에 적용하여 동북아시아 지역의 대기 에어로졸 종류별 광학적 농도 변화 경향을 파악하였다.

τ_{total} 는 관측 데이터가 제한된 서울을 제외하고 모두 감소하는 경향을 보였다. 하지만, 황사와 오염 입자로 구분하였을 때, τ_D 는 감소하는 경향을 보였으나, τ_p 는 오사카를 제외하고 증가하는 경향을 보였다. 이는 동북아시아 지역에서 황사로 대표되는 자연발생적인 대기 에어로졸의 농도는 질량농도와 광학적 농도 모두 감소하나, 인간의 활동으로 발생하는 오염 입자의 농도는 질량농도는 감소하는 경향을 보이더라도 광학적 농도는 오히려 증가하고 있음을 의미한다.

본 연구에서는 대기 에어로졸의 종류를 황사와 오염 입자만으로 구분하였기에 높은 광소산 효과가 어떠한 오염 입자로부터 유발되었는지에 대한 정보는 확인할 수 없었다. 따라서, 향후 연구에는 오염 입자의 종류를 구분할 수 있는 분석 기법을 개발하여 광학적 농도 변화 경향을 확인하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 「기상지진See-At기술개발연구사업」(KMI2018-04010)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Dubovik, O., Sinyuk, A., Lapyonok, T., Holben, B.N., Mishchenko, M., Yang, P., Eck, T.F., Volten, H., Muñoz, O., Veihelmann, B. (2006) Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust, *Journal of Geophysical Research*, 111, <https://doi.org/10.1029/2005JD006619>.
- Hansell Jr., R.A., Reid, J.S., Tsay, S.C., Roush, T.L., Kalashnikova, O.V. (2011) A sensitivity study on the effects of particle chemistry, asphericity and size on the mass extinction efficiency of mineral dust in the earth's atmosphere: from the near to thermal IR, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 1527-1547.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2016) *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- Korea Academy of Science and Technology (KAST) Research Report (2016) *Status of PM_{2.5} Pollution in Northeast Asia*.
- Lang, J., Zhang, Y., Zhou, Y., Cheng, S., Chen, D., Guo, X., Chen, S., Li, X., Xing, X., Wang, H. (2017) Trends of PM_{2.5} and Chemical Composition in Beijing, 2000-2015, *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 412-425.
- Liu, Y.J., Zhang, T.T., Liu, Q.Y., Zhang, R.J., Sun, Z.Q., Zhang, M.G. (2014) Seasonal variation of physical and chemical properties in TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} at a roadside site in Beijing and their influence on atmospheric visibility, *Aerosol and Air Quality Research*, 14, 954-969.
- Nam, J., Kim, S.W., Park, R.J., Park, J.S., Park, S.S. (2017) Changes in column aerosol optical depth and ground-level particulate matter concentration over East Asia, *Air Quality, Atmosphere and Health*. <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0517-5>.
- Noh, Y.M., Müller, D., Lee, H.L., Lee, K.H., Kim, Y.J. (2012a) Columnar aerosol optical and radiative properties according to season and air mass transport pattern over East Asia, *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 4763-4775.
- Noh, Y.M., Müller, D., Lee, H., Lee, K., Kim, K., Shin, S., Kim, Y.J. (2012b) Estimation of radiative forcing by the dust and non-dust content in mixed East Asian pollution plumes on the basis of depolarization ratios measured with lidar, *Atmospheric Environment*, 61, 221-

- 231.
- Noh, Y.M., Müller, D., Lee, K., Kim, K., Lee, K., Shimizu, A., Sano, I., Park, C.B. (2017) Depolarization ratios retrieved by AERONET sun-sky radiometer data and comparison to depolarization ratios measured with lidar, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 6271-6290.
- Raut, J.C., Chazette, P. (2009) Assessment of vertically-resolved PM₁₀ from mobile lidar observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 8617-8638.
- Shimizu, A., Sugimoto, N., Matsui, I., Arao, K., Uno, I., Murayama, T., Kagawa, N., Aoki, K., Uchiyama, A., Yamazaki, A.A. (2004) Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research*, 109, D19S17.
- Shin, S.K., Shin, D.H., Lee, K.H., Noh, Y.M. (2012) Classification of Dust/Non-dust Particle from the Asian Dust Plumes and Retrieval of Microphysical Properties using Raman Lidar System, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 688-696. (in Korean with English abstract)
- Shin, S.K., Tesche, M., Kim, K.C., Kezoudi, M., Tatarov, B., Mueller, D., Noh, Y.M. (2018) On the spectral depolarization and lidar ratio of mineral dust provided in the AERONET version 3 inversion product, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 12735-12746.
- The Korean Academy of Science and Technology, 114 (2017) Status of PM_{2.5} Pollution in Northeast Asia, 6-7.
- Yu, X.N., Zhu, B., Zhang, M.G. (2009) Seasonal variability of aerosol optical properties over Beijing, *Atmospheric Environment*, 43(26), 4095-4101.

Authors Information

노영민 (국립부경대학교 환경공학과 조교수)