

논문

AERONET 선포토미터 데이터를 이용한 한반도 평균 에어로졸 광학적 특성의 장기 변동 추세 연구

A Long-term Trend of Annual Average Aerosol Optical Properties in the Korean Peninsula using AERONET Sun/Sky Radiometer Data

노영민*

국립부경대학교 환경공학과

Youngmin Noh*

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2021년 4월 5일
수정일 2021년 5월 3일
채택일 2021년 5월 10일

Received 5 April 2021
Revised 3 May 2021
Accepted 10 May 2021

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

Abstract In this study, the AERONET sun/sky radiometer data observed at 7 domestic sites (Seoul_SNU (37.46°N, 126.95°E), Yonsei_University (37.56°N, 126.94°E), Anmyeon (36.54°N, 126.33°E), Gwangju_GIST (35.23°N, 126.84°E), Gosan_SNU (33.29°N, 126.16°E), Gangneung_WNU (37.77°N, 128.87°E), Hankuk_UFS (37.34°N, 127.27°E)) since 2003 were combined into one data, and this data was analyzed to confirm the variation of AOD and particle size of the domestic atmospheric aerosol. AOD was calculated in total of four types: total (AOD_T), Asian dust (AOD_D), coarse-mode pollution particles (AOD_{CP}), and fine-mode pollution particles (AOD_{FP}) using depolarization ratio and particle size distribution. The annual variation rates of AOD_T, AOD_D, AOD_{CP}, and AOD_{FP} were all decreasing to -0.0085, -0.0005, -0.0008, and -0.0073/year, respectively. In % variation, only AOD_{CP} was -24.2%, and AOD_T, AOD_D, and AOD_{FP} showed similar values of -16.3, -16.0, and -15.5%, respectively. Contrary to the decrease in AOD, Ångström exponent and fine-mode Ångström exponent, which are factors related to particle size, show a trend of increasing rate to 0.0065 and 0.0035/year, and % variation to 7.2 and 2.9%, respectively.

Key words: AOD, Ångström exponent, Asian dust, Coarse-mode pollution, Fine-mode pollution

1. 서론

일반적으로 미세먼지로 표현되는 대기 에어로졸은 현재 국내에서 가장 이슈가 되는 환경문제이다. 대기 에어로졸은 일반 시민들이 일상 생활에서 직접적으로 접하는 대기질에 영향을 주고 건강상의 유해성으로 공중보건 문제에도 중요한 역할을 하는 요소이다. 또한, 기후변화에 영향을 주는 중요한 요소 중 하나이다(IPCC, 2013). 대기 에어로졸은 시민들의 생활이 이루어지는 지표면뿐만 아니라 상층 대기에도 분포하며 기류를 타고 국가 간 장거리 이동이 이루어지는 물질로 관측과 연구에 있어 공간적 분포의 확인을 위

하여 위성, 라이더, 선포토미터와 같은 원격탐사 기술이 많이 활용된다(Noh, 2018; Noh and Lee, 2013).

현재 미세먼지 농도는 지속적으로 감소하는 추세이다. 2003년에 각각 70과 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 전후이던 PM₁₀과 PM_{2.5}의 연평균 농도는 2017년에는 각각 40과 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소되었다(Yeo and Kim, 2019). 미세먼지 농도는 지속적으로 감소하는 추세이나 시민들이 미세먼지에 대한 체감은 오히려 나빠지고 있다. 2018년에 통계청에서 39,000명을 대상으로 실시한 미세먼지 관련 조사에서 82.5%가 '미세먼지 문제에 대하여 불안하다' 응답하였다. 시민들의 불안감 증가는 2015년 이후 PM_{2.5}에 대한 예보제가 도입된 이후 언론의

지속적은 노출 등 관심의 증가가 한 원인일 수 있다. 하지만, 이 외에 미세먼지의 질량 농도가 감소한 것에 비하여 시민들의 체감 정도가 개선되지 않은 것 또한 원인일 수 있다. 시민들의 미세먼지 체감 정도는 시정변화로부터 확인할 수 있다. 시정은 인간의 시각으로 물체를 인식할 수 있는 최대 거리를 말하며 미세먼지, 특히 $PM_{2.5}$ 의 농도에 직접적인 영향을 받는다(Baik *et al.*, 1994; Kim, 1988). Joo *et al.* (2021)은 부산과 울산의 2015년부터 2019년까지의 시정자료와 $PM_{2.5}$ 자료의 분석을 통하여 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하는 정도에 비하여 시정이 개선되는 효과가 적음을 확인하였다.

시정처럼 시민들이 대기 중에 분포하는 미세먼지에 대한 체감정도를 관측하여 수치화한 것이 에어로졸 광학적 두께(Aerosol Optical Depth: AOD)이다. 위성과 선포토펠터 등 원격탐사 기술로 산출되는 빛의 산란과 흡수 정도를 파악하여 미세먼지에 대한 정보를 파악하는 장비는 AOD를 산출한다. 원격탐사 기술을 이용한 대기 에어로졸의 연구는 2000년대까지는 AOD의 수치를 이용하여 기후변화에 미치는 영향 파악에 초점을 맞추었으나 최근에는 대기환경에 미치는 영향, 특히 미세먼지의 농도 분포를 확인하는데 연구의 초점이 맞추어지고 있다(Noh *et al.*, 2020; Noh, 2018; Nam *et al.*, 2017).

본 연구는 국내에서 2000년 이후 장기적으로 관측이 수행된 AERONET의 선포토펠터 관측 데이터에 대기 에어로졸을 황사, 조대오염입자(Coarse-mode pollution particle)와 미세오염입자(Fine-mode pollution particle)로 구분하는 분석 기법을 적용하여 전체 대기 에어로졸과 종류별 에어로졸의 AOD를 산출하였다. 그리고, 입자 크기에 대한 정보를 제공하는 파장역지수(Ångström Exponent, α)와 전체 에어로졸에서 미세오염입자가 차지하는 비율인 Fine-mode ratio (F-ratio)를 산출하여 입자크기의 변화에 대하여 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 미세먼지의 농도 변화와 광학적 특성 변화를 확인하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 분석 자료

본 연구에는 국내에서 2003년도부터 2019년까지 측정된 AERONET sun/sky radiometer (이하 선포토펠터) version 3, Level 2.0 자료를 분석에 활용하였다. 2003년 이후 선포토펠터 장기 관측이 수행된 국내 관측소는 서울(Seoul_SNU: 37.46°N, 126.95°E), 연세(Yonsei_University: 37.56°N, 126.94°E), 안면(Anmyeon: 36.54°N, 126.33°E), 광주(Gwangju_GIST: 35.23°N, 126.84°E), 제주 고산(Gosan_SNU: 33.29°N, 126.16°E), 강릉(Gangneung_WNU: 37.77°N, 128.87°E), 한국외국어대학교(Hankuk_UFS: 37.34°N, 127.27°E)의 7곳이 있다. 하지만, 2003년 이후 연도별 변화 경향을 확인할 수 있는 관측 데이터의 연속성을 가진 곳은 전무하였다. 이에 본 연구에서는 국내 7곳의 선포토펠터 관측소에서 관측된 일평균 자료를 전부 합하여 하나의 데이터 셋으로 만들고 이를 분석하여 한반도에서 AOD와 입자 크기의 특성 변화를 파악하였다. 표 1에는 연도별 관측일수와 전체 관측일이 표시되어 있다. 2006, 2008, 2010년 관측 자료는 연간 관측일 수가 30일 이하로 연평균 특성을 분석하기에 어려움이 있어 분석에서 제외하였다. Lee *et al.* (2020)은 version 2와 version 3 데이터의 비교를 통하여 AOD의 값은 두 버전에서 큰 차이가 없음을 확인하였다. 본 연구에서는 AOD를 기본 분석 자료로 활용하였기에 기존 연구에서 확인된 결과와 비교 연구에 무리가 없을 것으로 판단하였다.

2.2 종류별 AOD 산출

황사는 다른 에어로졸과는 광흡수와 산란 특성이 명확히 구분된다(Russell *et al.*, 2010; Eck *et al.*, 2005). 황사는 2000년까지 국내 대기의 주요한 에어로졸 중 하나로 봄철의 대기 환경에 많은 영향을 미쳤으나 근래에 와서는 발생빈도가 많이 줄어들고 있다(Wang *et al.*, 2017; Kang *et al.*, 2016). 본 연구에서는 황사를 제외한 오염입자의 AOD의 장기 변동 추세와 특성

Table 1. The number of annual and total observation days and annual average and total values of AOD_T, AOD_D, AOD_{CP}, AOD_{FP}, α , α_f , F-ratio.

Year	#	AOD _T	AOD _D	AOD _{CP}	AOD _{FP}	α	α_f	F-ratio
2003	50	0.88±0.52	0.039±0.057	0.053±0.031	0.8±0.53	1.18±0.23	1.57±0.24	0.87±0.11
2004	80	0.66±0.31	0.042±0.063	0.038±0.031	0.59±0.32	1.28±0.33	1.69±0.30	0.87±0.14
2005	45	0.83±0.38	0.051±0.070	0.058±0.041	0.73±0.39	1.22±0.27	1.67±0.28	0.86±0.13
2007	56	0.75±0.35	0.061±0.090	0.057±0.046	0.64±0.38	1.12±0.30	1.65±0.35	0.83±0.17
2009	55	0.74±0.34	0.049±0.090	0.053±0.031	0.65±0.33	1.27±0.26	1.72±0.22	0.87±0.11
2011	96	0.7±0.36	0.038±0.072	0.049±0.034	0.62±0.36	1.33±0.27	1.75±0.27	0.88±0.12
2012	204	0.74±0.38	0.042±0.092	0.046±0.028	0.66±0.39	1.32±0.28	1.74±0.26	0.87±0.12
2013	210	0.75±0.33	0.051±0.066	0.05±0.033	0.66±0.32	1.24±0.24	1.67±0.27	0.87±0.10
2014	164	0.77±0.41	0.052±0.077	0.042±0.042	0.69±0.40	1.26±0.25	1.66±0.29	0.88±0.11
2015	185	0.7±0.36	0.033±0.059	0.039±0.026	0.64±0.36	1.32±0.25	1.68±0.28	0.9±0.09
2016	350	0.69±0.33	0.035±0.069	0.037±0.034	0.63±0.33	1.3±0.29	1.63±0.26	0.89±0.11
2017	232	0.66±0.34	0.023±0.041	0.045±0.027	0.6±0.34	1.36±0.24	1.77±0.29	0.89±0.10
2018	178	0.69±0.38	0.066±0.090	0.039±0.027	0.6±0.37	1.19±0.31	1.66±0.29	0.85±0.13
2019	85	0.61±0.29	0.031±0.052	0.042±0.028	0.55±0.27	1.34±0.26	1.72±0.29	0.88±0.10
Total	1990	0.72±0.36	0.043±0.074	0.044±0.033	0.64±0.36	1.28±0.28	1.69±0.28	0.88±0.12

변화를 파악하는 것에 주요 목적이 있기에 AOD를 먼저 황사와 황사 외 오염입자의 AOD로 구분하였다. 그 이후 오염입자를 입자 크기에 따라 조대와 미세 오염입자로 구분하여 모든 종류를 포함하는 전체 AOD (AOD_T), 황사의 AOD (Dust AOD, AOD_D), 조대오염입자의 AOD (Coarse-mode pollution AOD, AOD_{CP}), 미세오염입자의 AOD (fine-mode pollution AOD, AOD_{FP})의 총 4가지의 AOD를 산출하였다. AOD의 구분 방식은 다음과 같다.

먼저 관측된 대기 에어로졸에서 황사와 황사 외 에어로졸로의 구분이 필요하다. 황사와 황사 외 에어로졸의 구분은 식(1)로 표현되는 황사비 (Dust ratio; R_D)를 이용하여 산출할 수 있다 (Shimizu *et al.*, 2004).

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

여기서, δ_p 는 입자 편광소멸도 (particle depolarization ratio)로 δ (부피 편광소멸도 (linear volume depolarization ratio)로부터 산출할 수 있다 (Shin *et al.*, 2012). δ_1 과 δ_2 는 각각 순수 황사와 황사 입자가 포함되지 않은 순수 오염입자의 δ_p 로서 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.

먼저, 식(1)에서 산출된 R_D 를 활용하여 황사와 오염입자를 포함하는 전체 광학적 두께 (AOD_T)에서 황사 입자의 광학적 두께 (AOD_D)를 산출하였다.

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

여기서, S_D 와 S_T 는 각각 황사 입자와 전체 에어로졸의 라이다 비를 나타내며, 전체 에어로졸의 라이다 비는 AERONET Version 3에서 제공하는 값을 사용하고, 황사 입자의 라이다 비는 황사 발원지인 둔황 (Dunhuang, (40.49°N, 94.95°E))에서 측정된 결과를 바탕으로 44 sr의 값을 적용하였다 (Noh *et al.*, 2017). λ 는 파장을 표시하며 본 연구에서 전체 에어로졸, 황사, 오염 입자의 광학적 두께는 440 nm의 파장에서 산출하였다.

AERONET에서는 입자 크기에 따라 AOD를 조대입자의 AOD (coarse-mode AOD: AOD_C)와 미세입자의 AOD로 구분된 값을 제공한다. 미세입자의 AOD

는 황사의 영향이 없어 AOD_{FP}로 적용할 수 있다. AOD_C는 조대입자인 황사와 조대오염입자로 구성되어 있어 식(3)과 같이 AOD_C에서 AOD_D를 제거하여 AOD_{CP}를 산출할 수 있다.

$$AOD_{CP\lambda} = AOD_{C,\lambda} - AOD_{D,\lambda} \quad (3)$$

2.3 변동 추세 분석

한반도에서 관측되는 에어로졸의 광학적 두께와 특성 변화에 대한 변동 추세를 파악하기 위하여 산출된 종류별 AOD, Ångström exponent (α), fine-mode Ångström exponent (α_F), 그리고 조대입자 비율 (F-ratio) 자료를 이용하여 선형 회귀 분석 (Linear regression analysis)을 수행하였다. 이를 통하여 AOD와 입자 크기 변화에 대한 기본적인 변동 추세를 확인하였다. 또한, 각 파라미터 별 변동 추세의 정도 비교를 위하여 각 파라미터의 백분율 변동 (%)을 다음의 방식으로 계산하였다.

$$V(\%) = (mN/\bar{u}) \times 100 \quad (4)$$

여기서 \bar{u} 는 사용가능한 데이터의 평균값, N은 사용가능한 데이터 수, m은 선형 회귀의 기울기를 나타낸다.

3. 종류별 장기 변동 추세

3.1 월별 AOD 변화

연간 변동을 살펴보기 전에 국내 대기 에어로졸의 계절에 따른 종류별 AOD와 입자 크기 특성 변화를 확인하였다. 그림 1은 AOD_T, AOD_D, AOD_{CP}, AOD_{FP}로 구분된 월별 AOD를 보여준다. AOD_T는 1월에 0.88 ± 0.43 으로 가장 높은 값을 보이고 감소하여 4월에 0.65 ± 0.29 를 보인 뒤 다시 6월의 0.86 ± 0.29 로 증가한다. 그 이후 9월에 0.57 ± 0.24 의 최저값을 보인 뒤 다시 증가하는 추세를 보인다. 한국을 포함하는 동북아시아 지역에서 AOD의 계절적 변화는 봄이나 여름에 높은 값을 보이고 가을이나 겨울에 낮은 값을

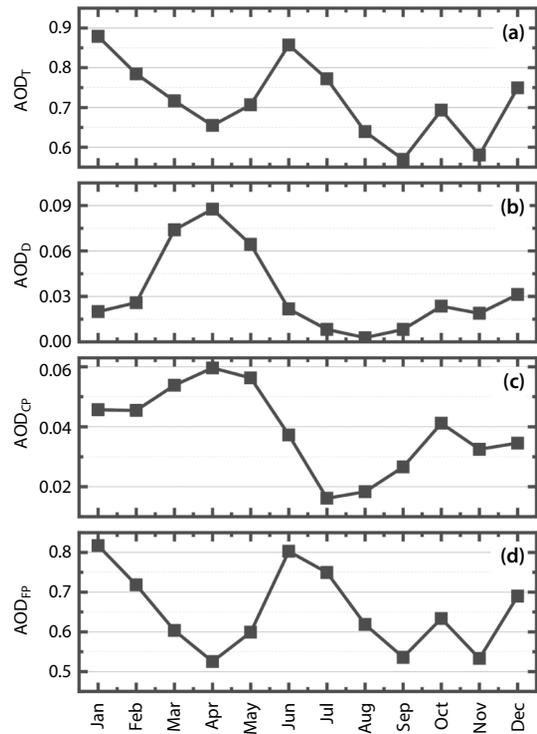


Fig. 1. Monthly variation of total AOD (AOD_T) (a), Dust AOD (AOD_D) (b), Coarse-mode pollution AOD (AOD_{CP}) (c), and Fine-mode pollution AOD (AOD_{FP}) (d).

보인다고 알려져 있다 (Wu *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2009). 2010년 이전에 관측된 데이터들은 봄에 높은 AOD의 주요 원인으로 황사를 지목한다 (Wang *et al.*, 2011). 하지만, 2010년 이후 황사의 발생 비율은 점점 감소하는 추세에 있어 황사로 인한 봄철의 높은 AOD의 발생 빈도는 과거에 비하여 줄어들고 있다 (Wang *et al.*, 2017; Kang *et al.*, 2016).

AOD_D는 봄인 3, 4, 5월에만 각각 0.07 ± 0.10 , 0.09 ± 0.10 , 0.06 ± 0.08 로 높은 값을 보이고 그 이외의 달에는 0.03 이하의 낮은 값이 측정되었다. 8월에는 0.002 ± 0.007 로 최저치를 보였다. AOD_{CP}는 4월에 0.06 ± 0.03 으로 최고치를 보이고 봄, 가을, 겨울에 높고 여름에 낮은 값을 보였다.

그림 2는 각 종류별 AOD가 전체 AOD에서 차지하는 월별 비율을 보여준다. AOD_{FP}가 4월에 78.1%의

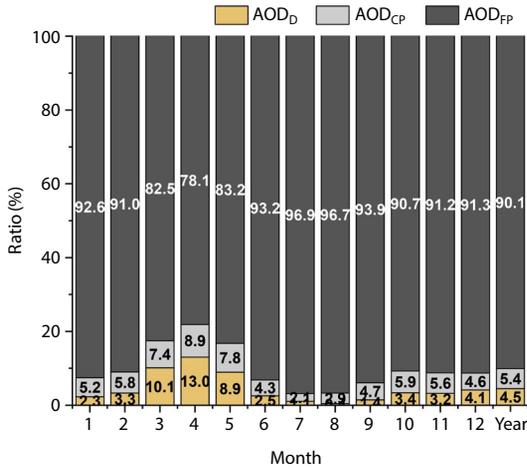


Fig. 2. Monthly ratio of each type of AOD to total AOD.

최소값을 보이고 7월에 96.9%로 최대값으로 국내에서 측정된 에어로졸의 대부분은 AOD_{FP}로 구성되는 것을 알 수 있다. AOD_{FP}의 높은 비율로 인하여 AOD_T는 AOD_{FP}와 동일한 월별 분포를 보이는 것으로 판단된다. AOD_D는 3, 4, 5월에 각각 10.1, 13.0, 8.9%로 높은 값을 보이고, 7월과 8월에 각각 1.1과 0.4% 낮은 값을 보여 계절적 영향이 높음을 알 수 있다. AOD_{CP}도 3, 4, 5월에 각각 7.4, 8.9, 7.8%로 높은 값을 보이고 7월과 8월에 각각 2.1과 2.9%로 낮은 값을 보여 계절적 차이를 보였다. 이는 AOD_D의 계절적 차이와 높은 상관 관계가 있는 것으로 판단된다. 황사는 몽골과 고비 사막 등에서 발원하여 편서풍을 타고 장거리 수송되어 국내 대기에 영향을 주게 된다. 이 황사가 이동될 때 황사뿐만 아니라 중국에서 발생한 오염입자도 같이 수송되게 되는데 (Shin *et al.*, 2015), 이 때 중국에서 발원한 조대 오염입자도 같이 수송되어 황사의 농도가 높은 봄에 높은 비율을 보이는 것으로 판단된다. 여름에는 편서풍 대신 남동풍이 불어 중국 등지로부터 수송되는 에어로졸의 영향이 적어져서 AOD_D와 AOD_{CP}가 낮은 비율을 보이는 것으로 판단된다.

그림 3은 α , AOD_{FP}로 산출된 Ångström Exponent (α_F), F-ratio의 월별 변화를 보여준다. 그림 3(a)는

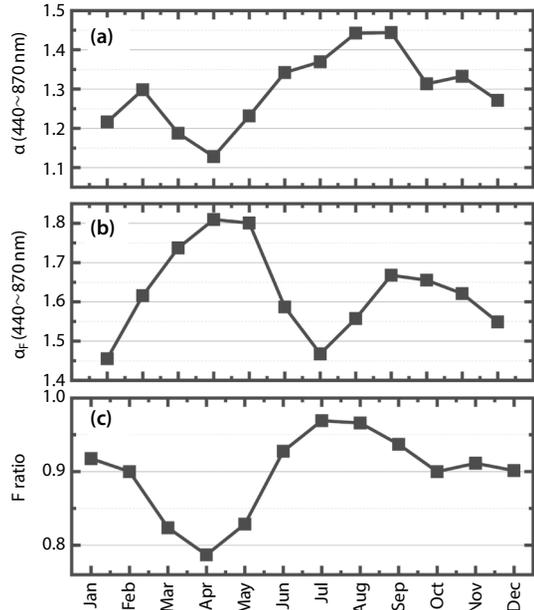


Fig. 3. Monthly variation of total Ångström Exponent (a), Fine-mode Ångström Exponent (α_F) (b) and Fine-mode ratio (c).

AOD_T에 대한 입자 크기 변화를 확인할 수 있는 α 로서 여름에 높은 값을 보이고 봄에 낮은 값을 보이고 있다. 이는 그림 1(b)의 AOD_D의 월별 분포에서 알 수 있듯이 조대 입자로 구성된 황사가 많이 발생할 경우 전체 대기 에어로졸에서 황사와 조대 오염입자의 비율이 증가되어 α 를 낮추게 된다. 여름의 경우에는 높은 상대습도의 영향으로 미세입자의 산란효과가 증가되어 α 가 높은 값을 보이고 있다. α_F 는 α 와 반대되는 경향으로 4월과 5월에 1.81 ± 0.23 과 1.80 ± 0.26 로 가장 높은 값을 보이고 7월에 1.47 ± 0.25 로 가장 낮은 값을 보이고 있다. PM_{2.5} 이하의 미세입자는 1차 생성보다는 광화학 반응을 통한 2차 생성된 입자가 주요 성분이다 (Hatakeyama, 2017; Han *et al.*, 2015). 2차 생성된 입자는 대부분 흡습성의 특징을 지니는데, 여름에 높은 상대습도의 영향으로 미세오염입자의 크기가 증가되어 빛에 대한 산란 특성이 높아져 AOD_{FP}는 증가시키고 α_F 는 낮추는 것으로 판단된다. 그림 3(c)에서 확인되는 F-ratio의 계절적 변화도 α 의 월별 변

화를 뒷받침한다. 봄에는 황사와 조대오염입자의 비율이 높아져 α 를 낮추고 여름에는 미세오염입자의 비율이 높아져 α 를 높이게 되는 것이다.

3.2 AOD 변동 추세

표 1에는 본 연구에서 분석된 각 요소(AOD_T , AOD_D , AOD_{CP} , AOD_{FP} , α , α_F , F-ratio)의 연 평균값과 전체 평균값이 정리되어 있다. AOD_T 의 전체 평균값은 0.72 ± 0.36 이었다. 그림 4는 연평균 AOD_T 의 2003년부터 2019년까지의 변화를 보여준다. AOD_T 는 2003년에 0.88 ± 0.52 로 최고값을 보인 이후 매년 지속적으로 감소하여 2019년에는 0.61 ± 0.29 로 최소값을 기록하였다. 근래의 위성과 선포도미터를 이용한 동북아시아 지역의 AOD 변화는 감소 경향이 약하거나 약간 증가하는 경향이 관찰되었다(Leeuw *et al.*, 2018; Sogacheva *et al.*, 2018; Nam *et al.*, 2017). Nam *et al.* (2017)은 2004년부터 2015년까지 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, collection 6)로 수집한 데이터를 기반으로 중국 북부 및 북동부 지역에서는 AOD가 현저한 증가를 보이고 한반도에서는 정체된 추세를 보인다고 보고하였다. Sogacheva *et al.* (2018) 및 Leeuw *et al.* (2018)은 각각 ATSR (Along-Track Scanning Radiometers) 및 MODIS 데이터를 분석하여 1995년부터 2011년까지 550 nm에서 AOD의 증가를 발견했지만 2011년 이후에는 AOD의 감소 추세를 보인다고 하였다. 이상과 같이 선행 연구들은 2010년 이전에는 AOD가 증가하는 추세가 많았던 반면 2010년 이후 최근으로 올수록 감소하는 경향을 확인한 연구가 많았다. 표 2에는 각 요소의 연간 변화율에 대한 선형회귀분석을 통한 변화율과 % variation이 적시되어 있다. AOD_T 의 변화율과 % variation은 각각 $-0.0085/\text{year}$ 과 -16.3% 였다. 본 연구에서 확인된 연간 AODs 변화는 대기 에어로졸의 질량 농도 변화와 일치하고 있다. 비록 본 연구에서는 국내 AERONET 사이트에서 측정된 데이터를 하나의 데이터로 통합하여 분석하였기에 각 해당연도의 사이트별로 발생할 수 있는 관측일 수나 지역적 차이가 결과의 불확실성을 높일 수 있는 가능성은 있

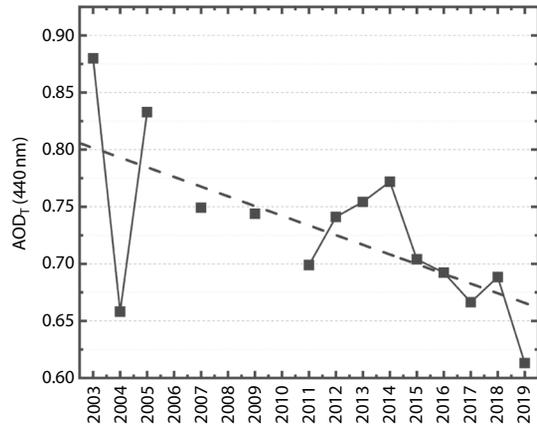


Fig. 4. Annual average total AOD (AOD_T) at 440 nm in Korea from 2003 to 2019. The dashed line is the linear regression analysis fit.

Table 2. Summary of linear regression analysis and % variation results in the period 2003~2019.

	Slope (/year)	% variation (%)
AOD_T	-0.0085	-16.3
AOD_D	-0.0005	-16.0
AOD_{CP}	-0.0008	-24.2
AOD_{FP}	-0.0073	-15.8
α	0.0065	7.2
α_F	0.0035	2.9
F ratio	0.0013	2.1

으나 분석 결과 전체적 경향은 잘 보여주고 있는 것으로 판단된다. 한국을 포함한 동북 아시아 지역의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도는 2000년 이후 분명하게 감소 추세를 보이고 있다. Lang *et al.* (2017)은 베이징에서 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 연간 평균 농도가 2000년부터 2015년까지 일반적으로 각각 매년 1.5 및 $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 감소한다고 밝혔다. Wang *et al.* (2017)은 중국의 3개 대도시, 즉 베이징, 상하이, 광저우의 $PM_{2.5}$ 질량 농도가 2002년 $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2015년 $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소했다고 보고했습니다. Nam *et al.* (2017)은 또한 중국 북부의 대부분의 거대 도시에서 표면 PM_{10} 농도가 거의 선형적으로 감소함을 확인하였다. Lang *et al.* (2017) 대기 에어로졸 질량 농도의 이 같은 감소 추세는 주로 지난 수십 년 동안 시행된 대기 오염 제

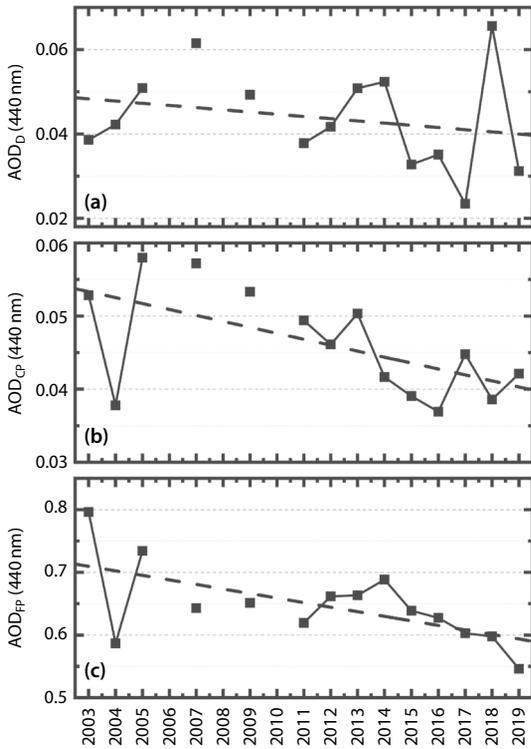


Fig. 5. Annual average Dust AOD (AOD_D) (a), Coarse-mode pollution AOD (AOD_{CP}) (b) and Fine-mode pollution AOD (AOD_{FP}) (c) at 440 nm in Korea from 2003 to 2019. The dashed line is the linear regression analysis fit.

어 조치에 기인한다고 밝혔다.

그림 5에서 확인되는 AOD_D , AOD_{CP} , AOD_{FP} 의 연평균 변화도 모두 감소하는 추세를 보이고 있다. AOD_D 의 변화율은 $-0.0005/\text{year}$ 로 낮지만, % variation은 -16.0% 로 AOD_T 와 유사한 비율로 감소하고 있었다. Asian dust의 발생이 감소하는 경향은 Lee *et al.* (2015)에서도 확인된다.

AOD_{CP} 의 변화율은 $-0.0008/\text{year}$ 로 낮지만, % variation은 -24.2% 로 가장 높은 비율로 감소하고 있는 것을 보여준다. AOD_{FP} 의 변화율은 $-0.0073/\text{year}$ 로 AOD_D 와 AOD_{CP} 에 비하여 높은 변화율을 보이지만, % variation은 -15.8% 로 AOD_T , AOD_D 와 유사한 값을 보였다. 그림 2에서 확인되었듯이 전체에서 AOD_{FP} 가 차지하는 연평균 비율이 90.1% 로 AOD_T 의 감소율인 -16.3% 는 대부분 AOD_{FP} 의 감소로부터 기

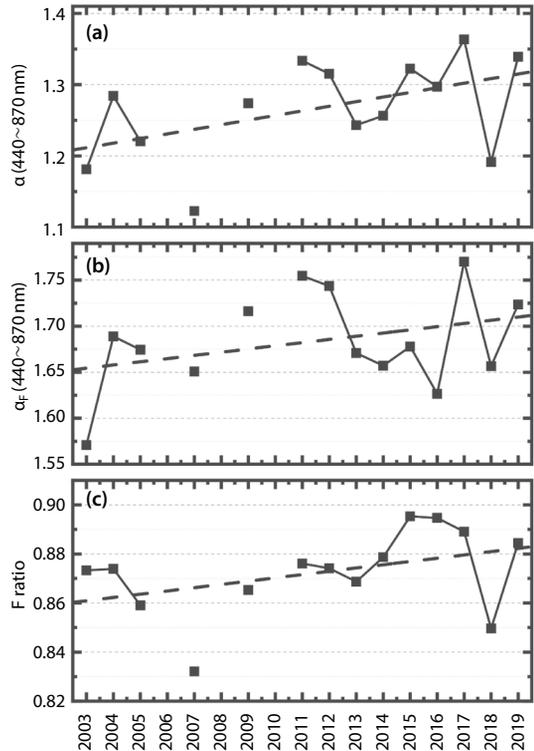


Fig. 6. Annual average Ångström Exponent (α) (a), Fine-mode Ångström Exponent (α_F) (b) and Fine-mode ratio (F-ratio) (c) in Korea from 2003 to 2019. The dashed line is the linear regression analysis fit.

인한 것으로 판단된다. 현재의 국내 대기환경 정책은 미세먼지 감소에 초점을 맞추어 추진중인데, 감소 목표는 미세먼지의 질량 농도 감축에 우선하고 있다. 질량 농도 감소에는 2차 생성보다는 1차 생성을 억제하는 것이 효과적이고, 조대입자 위주로 감소를 했을 때 높은 효과를 보인다. AOD_{CP} 의 감소비율이 AOD_D 나 AOD_{FP} 보다 높은 것은 이 같은 국내 대기환경 정책에 영향을 받은 것으로 판단된다.

4. 에어로졸 입자 크기 변화

그림 6은 2003년부터 2019년까지 α , α_F , F-ratio의 연간 변화를 보여준다. 선형 회귀 분석으로 산출된 세 요소의 연간 변화율은 각각 0.0065 , 0.0035 ,

0.0013/year로 모두 증가하는 추세를 보여준다. α , α_F , F ratio의 % variation은 각각 7.2, 2.9, 2.3%로 AOD_T에 대한 입자 크기에 대한 정보를 제공하는 값이 가장 높게 나타났다. α 는 2007년에 1.12 ± 0.04 로 가장 낮은 값을 보였고, 그 이후 1.20 이상의 높은 값을 보이며 매년 증가하는 추세를 보이다 2018년에 1.19 ± 0.03 의 낮은 값을 보였다. 2007년과 2018년의 AOD_D는 각각 0.06 ± 0.09 와 0.07 ± 0.09 로 다른 년도에 비하여 높은 값이 관측됨을 그림 5(a)에서 확인할 수 있어 2007년과 2018년의 낮은 α 는 높은 AOD_D로부터 유발된 것으로 판단된다.

그림 5와 6을 비교하면 AOD_{FP}는 감소하는 반면 α_F 는 증가하고 있는데, 이는 PM_{2.5}의 농도가 감소 추세인 것처럼 미세 오염입자의 발생량이 줄어들어 AOD_{FP}가 감소는 하고 있지만, 최근으로 올수록 과거에 비하여 입자 크기가 더욱 작은 미세오염입자가 생성되고 있음을 의미한다. 또한, F-ratio도 증가하는 추세인데, 이는 전체 대기 에어로졸에서 미세 오염입자의 비율이 증가되고 있다는 것을 나타낸다. 이러한 변화의 원인은 그림 5(a)에서 확인되듯이 AOD_D가 감소하고 있는 것이 하나의 원인일 수 있다. 하지만, AOD_{CP}의 % variation이 -24.2%로 AOD_D와 AOD_{FP}에 비하여 높은 감소 비율을 보이는 것을 고려할 때, 미세먼지 저감 정책 등으로 전체 미세먼지의 농도는 줄어들고 있으나, 제거 공정 등 미세먼지를 제거하는 과정에서 제거가 쉬운 1차 생성에서 주로 발생하는 조대입자의 제거 비율이 높아 최근으로 올수록 AOD_T에서 AOD_{FP}의 비율이 증가되는 것으로 판단된다. 미세오염입자의 크기가 최근으로 올수록 작아지는 것도 입자크기가 적은 2차 생성 오염입자가 전체에서 차지하는 비율이 높아지는 것에서 유발되는 것으로 판단된다.

료를 분석하여 국내 대기 에어로졸의 AOD변화와 입자 크기 변화를 확인하였다. 대기 에어로졸의 크기와 종류에 따라 구분된 AOD_T, AOD_D, AOD_{CP}, AOD_{FP}의 연간 변화율은 각각 -0.0085, -0.0005, -0.0008, -0.0073/year로 모두 감소하는 추세였다. % variation은 AOD_{CP}만 -24.2%로 높게 나타나고 AOD_T, AOD_D, AOD_{FP}는 각각 -16.3, -16.0, -15.5%로 유사한 값을 보였다. AOD_{CP}의 % variation이 높은 것은 지속적으로 수행되어온 국내 미세먼지 저감정책의 결과로, 미세먼지에 대한 기준인 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 표시되는 질량농도 저감을 위하여 배출원에서 직접 생성되는 1차 생성 입자, 그리고 미세입자보다는 조대입자의 제거를 우선적으로 추진한 정책과 방안에서 기인한 것으로 판단된다.

AOD가 감소하는 것과는 반대로 입자 크기에 관련된 요소인 α 와 α_F 는 변화율이 각각 0.0065와 0.0035/year, % variation이 7.2와 2.9%로 증가하는 추세를 보여주고 있다. 또한, F-ratio도 증가하고 있는데 이는 근래로 올수록 미세입자의 비율이 높아짐을 의미한다. 이러한 결과 또한, 대기 중에 분포하는 미세먼지의 입자 크기가 과거에 비하여 근래로 올수록 작아지고 있다는 것을 의미하는 것으로 조대입자 위주의 제거 정책으로 AOD_{CP}의 감소율이 가장 높은 것을 설명해준다.

미세입자의 비율이 높아지고 미세입자의 크기가 더욱 적어질수록 미세먼지의 기준인 질량농도의 저감효과는 적어지고, 같은 질량 농도일지라도 미세입자가 많으면 AOD는 높아질 수 있다. 이는 결국 시정을 나쁘게하는 효과를 유발하여 시민들이 느끼는 미세먼지 저감 효과를 줄이게 된다. 따라서, 미세먼지 저감의 체감 효과를 높이기 위해서는 2차 생성 억제 등 저감정책의 변화가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 국내 7곳에서 관측된 AERONET 선포도미터 자료를 합하여 하나의 데이터로 만들고, 이 자

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2020년)에 의하여 연구되었음.

References

- Baik, N.J., Kim, T.O., Kim, Y.P., Moon, K.C. (1994) Cause and Verification of Visibility Impairment Phenomenon: Related to Seoul Area Visibility Study, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 10(1), 1-23, (in Korean with English abstract).
- Eck, T.F., Holben, B.N., Dubovik, O., Smirnov, A., Goloub, P., Chen, H.B., Chatenet, B., Gomes, L., Zhang, X.-Y., Tsay, S.-C., Ji, Q., Giles, D., Slutsker, I. (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. <https://doi.org/10.1029/2004JD005274>
- Han, T., Liu, X., Zhang, Y., Qu, Y., Zeng, L., Hu, M., Zhu, T. (2015) Role of secondary aerosols in haze formation in summer in the Megacity Beijing, *Journal of Environmental Science*, 31, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.08.026>
- Hatakeyama, S. (2017) Aerosols. In: Izuta T. (eds) *Air Pollution Impacts on Plants in East Asia*. Springer, Tokyo.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *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.
- Joo, S.-H., Naghmeh, D., Noh, Y.-M. (2021) A study on the Characteristic Variations of Fine Particle in Busan and Ulsan through Particle Extinction Efficiency Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 80-90, In printing, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.080>
- Kang, L., Huang, J., Chen, S., Wang, X. (2016) Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961~2010, *Atmospheric Environment*, 125, 188-198.
- Kim, P.S. (1988) Physical characteristics of atmospheric aerosols in Seoul: Scattering of visible light, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 4(2), 28-37, (in Korean with English abstract).
- 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 Air Quality Research*, 17, 412-425. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.07.0307>
- Lee, J.H., Koo, J.H., Kim, S.M., Lee, T.Y., Lee, Y.G. (2021) Comparison of Aerosol Properties in the Korean Peninsula Between AERONET Version 2 and 3 Data Set, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57, 629-643. <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00221-2>
- Lee, Y.G., Ho, C.H., Kim, J.H., Kim, J. (2015) Quiescence of Asian dust events in South Korea and Japan during 2012 spring: Dust outbreaks and transports, *Atmospheric Environment*, 114, 92-101.
- de Leeuw, G., Sogacheva, L., Rodriguez, E., Kourtidis, K., Georgoulas, A.K., Alexandri, G., Amiridis, V., Proestakis, E., Marinou, E., Xue, Y., van der A, R. (2018) Two decades of satellite observations of AOD over mainland China using ATSR-2, AATSR and MODIS/Terra: data set evaluation and large-scale patterns, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 1573-1592. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1573-2018>
- 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., Lee, K.-H. (2013) Characterization of Optical Properties of Long-range Transported Asian Dust in North-East Asia, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(2), 243-251, (in Korean with English abstract).
- 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.
- Noh, Y.M. (2018) A Study on the Variation of Aerosol Optical Depth according to Aerosol Types in Northeast Asia using Aeronet Sun/Sky Radiometer Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34 (5), 2383-5346, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.668>
- Noh, Y.-M., Kim, D.-H., Choi, S.-C., Choi, C.-K., Kim, T.-G., Kim, G.-H., Shin, D.-H. (2020) High Resolution Fine Dust Mass Concentration Calculation Using Two-wavelength Scanning Lidar System, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6-3), 1681-1690, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7780/kjrs.2020.36.6.3.5>
- Russell, P.B., Bergstrom, R.W., Shinozuka, Y., Clarke, A.D., DeCarlo, P.F., Jimenez, J.L., Livingston, J.M., Redemann, J., Dubovik, O., Strawa, A. (2010) Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1155-1169.

- 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., Müller, D., Lee, C., Lee, K.-H., Shin, D.-S., Kim, Y.-J., Noh, Y.-M. (2015) Vertical variation of optical properties of mixed Asian dust/pollution plumes according to pathway of air mass transport over East Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 6707-6720.
- Sogacheva, L., de Leeuw, G., Rodriguez, E., Kolmonen, P., Georgoulas, A.K., Alexandri, G., Kourtidis, K., Proestakis, E., Marinou, E., Amiridis, V., Xue, Y., van der A, R.J. (2018) Spatial and seasonal variations of aerosols over China from two decades of multi-satellite observations – Part 1: ATSR (1995~2011) and MODIS C6.1 (2000~2017), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 11389-11407. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11389-2018>
- Wang, Y., Xin, J., Li, Z., Wang, S., Wang, P., Hao, W.M., Nordgren, B.L., Chen, H., Wang, L., Sun, Y. (2011) Seasonal variations in aerosol optical properties over China, *Journal of Geophysical Research*, 116, D18209. <https://doi.org/10.1029/2010JD015376>
- Wang, J.D., Zhao, B., Wang, S.X., Yang, F.M., Xing, J., Morawska, L., Ding, A.J., Kulmala, M., Kerminen, V.M., Kujansuu, J., Wang, Z.F., Ding, D.A., Zhang, X.Y., Wang, H.B., Tian, M., Petaja, T., Jiang, J.K., Hao, J.M. (2017) Particulate matter pollution over China and the effects of control policies, *Science of Total Environment*, 584, 426-447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.027>
- Wu, Y., Zhu, J., Che, H., Xia, X., Zhang, R. (2015) Column-integrated aerosol optical properties and direct radiative forcing based on sun photometer measurements at a semi-arid rural site in Northeast China, *Atmospheric Research*, 157, 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.021>
- Yeo, M.-J., Kim, Y.-P. (2019) Trends of the PM₁₀ Concentrations and High PM₁₀ Concentration Cases in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249>
- 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)