

논문

2000년부터 2022년 기간 동안 북극 지역의 에어로솔 복사강제력 강화

Enhanced Aerosol Radiative Forcing in the Arctic Region from 2000 to 2022

이권호^{1),2),*}, 이규태²⁾

¹⁾국립강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾국립강릉원주대학교 복사위성연구소

Kwon-Ho Lee^{1),2),*}, Kyu-Tae Lee^{2),*}

¹⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University (GWNU), Gangneung, Republic of Korea

²⁾Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University (GWNU), Gangneung, Republic of Korea

접수일 2023년 11월 17일
수정일 2023년 11월 22일
채택일 2023년 11월 28일

Received 17 November 2023
Revised 22 November 2023
Accepted 28 November 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)33-640-2319
E-mail : kwonho.lee@gmail.com

Abstract We analyzed the observational patterns and trends of atmospheric aerosols in the Arctic region above 60°N latitude from 2000 to 2023. Aerosol measurements are based on observations from 15 ground stations operated by AEROSOL Robotic NETwork (AERONET) and the ultraviolet observing satellites. Results showed that Aerosol Optical Thickness (AOT) over the Arctic region has gradually decreased ($-0.057 \text{ AOT/year} \times 1000$) over the past 24 years. This decrease is more evident ($-1.180 \text{ AOT/year} \times 1000$) in the period before 2016. However, from 2016 until recently, AOT has increased significantly ($6.461 \text{ AOT/year} \times 1000$). This increase was most pronounced in North America and North Asia, and was associated with an increase in fine particles. Due to the increase of fine particles, the aerosol radiative forcing has shown regional variations, and we found that it has increased by about a factor of two compared to before 2016. These trends in aerosol radiative forcing may have implications for future aerosol growth as well as climate change.

Key words: Aerosol, Aerosol optical thickness, Radiative forcing, Climate change

1. 서론

북위 60도 이상의 극지 지역은 북반구 대기 순환 및 에너지 변화에 중요한 역할을 하기 때문에 대기 순환에 미치는 북극의 영향을 이해하는 것은 매우 중요하다 (Box *et al.*, 2019; Screen *et al.*, 2018). 북극 지역은 대기와 해양 순환의 동적 요인으로 작용하여 지구 대기와 해양의 열과 물순환에 영향을 미친다 (Timmermans and Marshall, 2020). 해빙 범위와 기온의 변화와 같은 북극의 변화는 특히 북반구의 대기 순환 패턴에 광범위한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 최근의 연구 결과들에서는 북극은 기후 변화에 민감하여 전 세계

평균보다 빠른 속도로 온난화를 나타내고 있으며, 이러한 극지 환경의 변화는 극지방 제트 기류의 교란으로 이어져 중위도 지역의 기후 시스템을 변화시킬 수 있다 (Rantanen *et al.*, 2022; Previdi *et al.*, 2020). 따라서, 극지 지역은 지구의 에너지 균형을 조절하는 데 중추적인 역할을 하므로, 북극의 환경변화를 이해하는 것은 기상이변, 해수면 상승, 지역 기후 변화 등 광범위한 기후 관련 영향을 예측하고 이에 대응하는 데 필수적이다.

극지에서 에어로솔은 자연적 및 인위적 발생원 모두에서 발생할 수 있다. 자연적인 원인으로는 해염, 해양 생물성 배출, 화산 활동 등이 있으며, 인위적인 원

인은 인접한 중위도 지역에서 생성된 오염성 입자의 장거리 수송이 고려될 수 있다. 초기의 연구에서는 1974년부터 2006년까지의 약 30년 기간 동안 북극의 에어로솔 광학두께(Aerosol Optical Thickness; AOT)의 변화는 연간 $-1.6\% \sim -2.0\%$ 사이로 감소하는 추세를 보고하였다(Tomasi *et al.*, 2007). 가장 최근의 북극 지역 에어로솔의 통계분석 결과에서는 2003~2019년 동안 북극에서 AOT 값이 음의 추세와 양의 추세를 반복하여 나타남을 보였으며, 이는 황산염/인위적 오염의 전반적인 감소와 바이오매스 연소성 스모크의 현저한 증가로 인한 것으로 보고되었다(Xian *et al.*, 2022). 특히, 북극 기후 변화 연구에서 기후 모델은 바이오매스 연소 배출량과 연도별 변동성 및 추세를 고려할 것을 권장하였다. 북극 지역에 영향을 미치는 에어로솔의 순 효과는 주로 냉각효과(Cooling effect)이며(Najafi *et al.*, 2015; Fyfe *et al.*, 2013), 북극 연무의 감소가 지역적 온난화의 증가에 기여함을 보고하였다(Acosta Navarro *et al.*, 2016).

최근 수십 년 동안 중위도 지역의 급속한 도시화 및 산업화와 함께 인구 및 에너지 수요 증가로 인해 대기 에어로솔의 영향은 지역 규모의 몬순 패턴을 변화시키는 것으로 나타났다(Menon *et al.*, 2002). 또한 온실가스 농도 증가와 연계된 에어로솔의 효과는 극지 지역에서 대류권을 온난화시키는 것으로 보고되었다(Westervelt *et al.*, 2020; Acosta Navarro *et al.*, 2016). 특히, 대기 중의 에어로솔의 불확실성은 입자의 광학적 및 물리적 특성의 변동성을 야기하며 대기 복사 수지 과정에서 영향을 미치게 된다(IPCC, 2014). 에어로솔에 의한 이해도를 높이기 위하여, Aerosol RobotiC NETwork (AERONET)와 같은 지상관측 네트워크에서는 분광복사계(Spectro-radiometer)를 이용한 연속 분광 관측 정보를 통하여 에어로솔 광학 특성과 함께 미세물리적 특성값을 산출하고 있다(Dubovik and King, 2000; Holben *et al.*, 1998). 이러한 지상관측 네트워크 정보는 에어로솔의 시공간 분포 정보를 제공하며, 복사강제효과(Aerosol Radiative Forcing Effect)를 산출할 수 있는 중요 수단이다.

본 연구에서는 북위 60도 이상의 극지 지역의 지상 관측 네트워크에서 장기간 관측된 에어로솔 정보에 대한 시공간적 변화와 복사강제력에 대한 영향력을 평가하였다. 이를 위하여 북극 지역을 포괄하는 관측 지점에서 2000년대 초반부터 가장 최근까지의 관측 자료를 이용하여 각 관측지점별 에어로솔의 변화추세를 정량화하였다. 그리고, 각 지역별 에어로솔에 의한 복사강제력의 분석을 통하여 북극 지역에서 에어로솔 복사강제력으로 인한 기후변화 효과에 관한 증거를 제시하는 것을 목적으로 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 지상관측 자료

연구 대상지역은 북위 60도 이상의 북극 지역이며, AERONET 관측지점 중 10년 이상의 관측 자료를 생산하고 있는 15개 지점(Bonanza_Creek, Barrow, Kuopio, Yakutsk, Andenes, Hyytiala, Resolute_Bay, Hornsund, Thule, PEARL, OPAL, Kangerlussuaq, Helsinki, Yellowknife_Aurora, Ittoqqortoormiit)을 선정하여 지상관측 자료를 수집하였다(그림 1). 각 자료 목록에 대한 지리적 위치에 관한 상세 설명은 표 1과 같다. 15개 관측지점 중 9개 지점(Bonanza_Creek, Barrow, Resolute_Bay, Thule, PEARL, OPAL, Kangerlussuaq, Yellowknife_Aurora, Ittoqqortoormiit)은 북미 지역과 그린랜드가 포함된 서경쪽에 위치하고 있고, 나머지 6개 지점은 북유럽과 북아시아 지역이 포함된 동경쪽에 위치하고 있다. 그리고 관측지점 중 가장 북쪽에 위치한 지점은 PEARL(-156.665°E , 71.312°N)이다.

사용된 AERONET 자료는 Version 3 알고리즘(Sinyuk *et al.*, 2020)을 사용하여 생산된 Level 2.0 Aerosol Direct 자료와 Aerosol Inversion 자료를 사용하였다. Level 2.0 자료는 기 산출된 에어로솔 자료에 대하여 최종 보정값을 적용하여 필터 성능 저하, 기타 가능한 기기 문제 또는 데이터 이상으로 인한 이상값을 제거하여 품질을 높인 자료이다. 두 자료 중 Direct 자료는

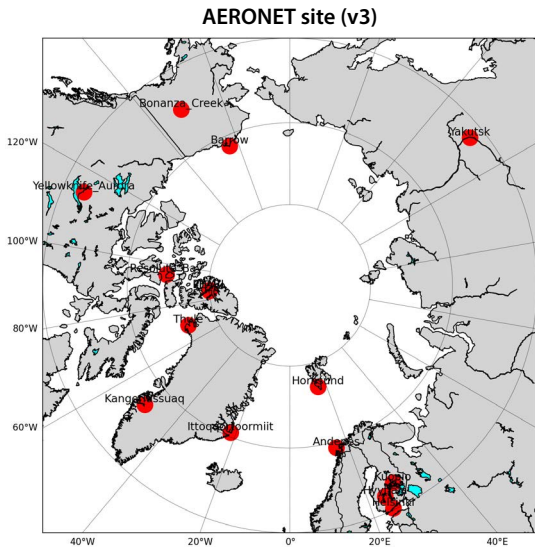


Fig. 1. Region of interest in this study. Blue points represent selected ground AERONET observation sites at Bonanza_Creek, Barrow, Kuopio, Yakutsk, Andenes, Hyytiala, Resolute_Bay, Hornsund, Thule, PEARL, OPAL, Kangerlussuaq, Helsinki, Yellowknife_Aurora, Ittoqqortoormiit, respectively.

Table 1. Geographical locations of the selected ground AERONET observation sites used in this study.

Site name	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Elevation (m)
Bonanza_Creek	-148.316	64.743	353
Barrow	-156.665	71.312	8
Kuopio	27.634	62.892	105
Yakutsk	129.367	61.662	118.5
Andenes	16.009	69.278	379
Hyytiala	24.296	61.846	191
Resolute_Bay	-94.969	74.705	35
Hornsund	15.540	77.001	12.44
Thule	-68.769	76.516	225
PEARL	-86.417	80.054	615
OPAL	-85.939	79.990	5
Kangerlussuaq	-50.621	66.996	320
Helsinki	24.961	60.204	52.8
Yellowknife_Aurora	-114.376	62.451	220.8
Ittoqqortoormiit	-21.951	70.485	68

직달 일사 관측을 통하여 대기 투과도 및 광학두께값을 산출하며, Inversion 자료는 직달 및 산란 일사 관측으로부터 에어로솔 입자의 크기분포와 광흡수도 등

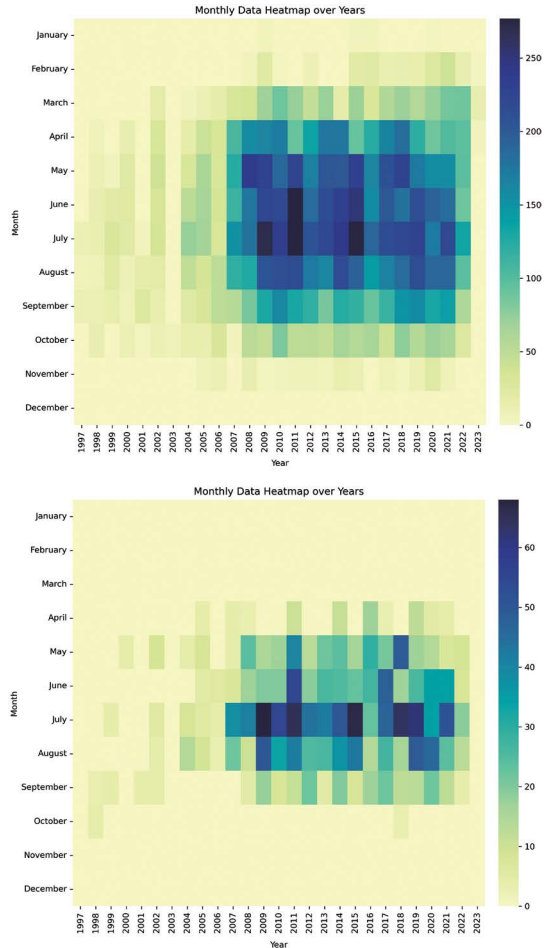


Fig. 2. Heatmaps of available day numbers of AERONET Level 2.0 AOT (top) and inversion (bottom) data from 1997 to 2023.

미세물리 특성값을 계산한 값을 포함한다. 그림 2는 전체 관측 기간 동안의 사용가능한 일의 수를 나타내는 히트맵이다. 극지 지역은 태양 고도각이 낮고 기상 조건이 열악하여 겨울철에 관측일 수가 매우 제한적이거나, Direct 자료 생산을 위한 관측조건을 만족하는 날은 대부분 4~10월에 집중되어 있다. 산란광을 이용하는 Inversion 자료의 경우는 더욱 관측일수가 제한적임에도 불구하고, Direct와 마찬가지로 5~9월 사이에 유효관측일수가 집중되어 있다.

AERONET 관측망에서 사용중인 복사관측장비인

CE-318은 7개의 채널 (중심파장 = 340 nm, 380 nm, 440 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm, 939 nm, 1020 nm)에서 직달과 산란 태양광을 측정한다. CE-318 장비의 광도계 센서는 파장 분해능 약 10 nm FWHM, 약 1.2°의 관측 시야각을 가지며, 센서의 대기 관측을 위한 로봇팔 그리고 관측 자료의 송수신을 위한 통신장치로 구성되어 있다. CE-318의 광도계는 대기 상대 광경로값 ($= 1/\cos\theta_0$) 값이 7 미만인 조건, 즉 태양이 관측 수평면보다 위에 위치한 낮 동안 직사광 또는 산란광을 측정한다. 직사광 측정은 7개 파장 대역에서 이루어지며, 각 파장별 총 광학두께 (τ_{tot})의 계산은 식 (1)과 같이 대기 상단에서 지구로 입사하는 복사량 (I_0)과 이 복사에너지가 지구 대기를 통과하는 상대적인 광 경로(m) 그리고 복사관측 기기가 관측하는 복사량 (I)에 의한 Beer-Bouguer 법칙을 사용하여 결정된다.

$$\tau_{tot} = -\frac{1}{m} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1)$$

에어로솔 광학두께는 식 (1)에서 결정된 τ_{tot} 으로부터 레일리 산란(Rayleigh Scattering)에 의한 광학두께 (τ_{ray}), 오존 및 기타 미량 기체의 흡수에 의한 광학두께 (τ_{gas})를 보정하여 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\tau_{aer} = \tau_{tot} - \tau_{ray} - \tau_{gas} \quad (2)$$

또한 이 장비는 태양의 주 평면(태양 방위각과 동일한 고정 방위각으로 산란각을 변경하여 관측)을 따라 4개 파장 대역(440 nm, 675 nm, 870 nm 및 1020 nm)의 산란광을 측정함으로써, 에어로솔 크기분포(입자 반경 범위 0.1~15 μm), 산란 위상 함수 및 굴절률을 역산하여 산출한다(Dubovik and King, 2000).

2.2 위성관측 자료

지상관측 자료의 시공간 변화 특성을 뒷받침하기 위하여 인공위성관측 자료를 사용하였으며, 최근까지 다양한 성능의 인공위성이 운영되고 있다(Lee and Bae, 2023; Lee *et al.*, 2022). 관측 자료 중 The SCaning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmosphere

ric CHartography (SCIAMACHY), the Ozone Monitoring Instrument (OMI)와 the Global Ozone Monitoring Experiment 2 (GOME2)를 이용한 자외선 흡수성 에어로솔 인덱스(Ultraviolet Absorbing Aerosol Index, AAI)를 사용하였다. SCIAMACHY AAI (Tilstra *et al.*, 2012)는 2002년 7월부터 2004년 12월 기간 동안의 자료를 수집하였고, OMI AAI (Torres *et al.*, 2007)는 2005년 1월부터 2020년 12월까지의 자료를 수집하였으며, GOME-2 AAI (Tilstra *et al.*, 2010)는 2021년 1월부터 2023년 10월 기간까지의 자료를 사용하였다.

AAI는 지구 대기 중에 자외선을 흡수할 수 있는 에어로솔의 부하량을 나타내며, 주 유형은 사막 먼지와 바이오매스 연소성 입자이다. AAI는 자외선 파장의 영역인 340 nm 및 380 nm에서 위성이 관측하는 반사율을 이용하여 측정된다.

$$AAI = -100 \left(\log_{10} \left[\frac{I_{\lambda_2}^{meas}}{I_{\lambda_1}^{meas}} \right] - \log_{10} \left[\frac{I_{\lambda_2}^{calc}}{I_{\lambda_1}^{calc}} \right] \right) \quad (3)$$

위 식에서 λ_1 과 λ_2 는 자외선 영역의 두 파장이다. meas와 calc는 각각 위성이 관측한 값과 에어로솔이 없는 조건에서 이론적으로 위성이 관측하는 복사량을 계산한 값이다.

3. 결과 및 토의

3.1 에어로솔 시공간 트렌드

에어로솔 광학두께는 대기 투과도를 측정하여 대기 칼럼 내에 입자에 대한 총 부하량과 미세 물리 속성을 파악하기 위하여 사용된다. CE-318 장비가 관측하는 7개 파장 중에서 대표적으로 500 nm 파장의 에어로솔 광학두께 (τ_{500})를 이용하여 각 관측지점별 변화 트렌드를 분석하였다. 각 관측지점별 관측 시작일이 상이하나, 대체적으로 2000년대 초반부터 최근까지 관측 자료가 생성되고 있다. 장기간 동안 각 관측지점별 자료의 통계적 분석을 통하여 북극 지역의 에어로솔의 시공간 변화 특성을 평가하는 것이 가능하다.

그림 3은 각 관측지점별 최초 관측이 시작된 관측된

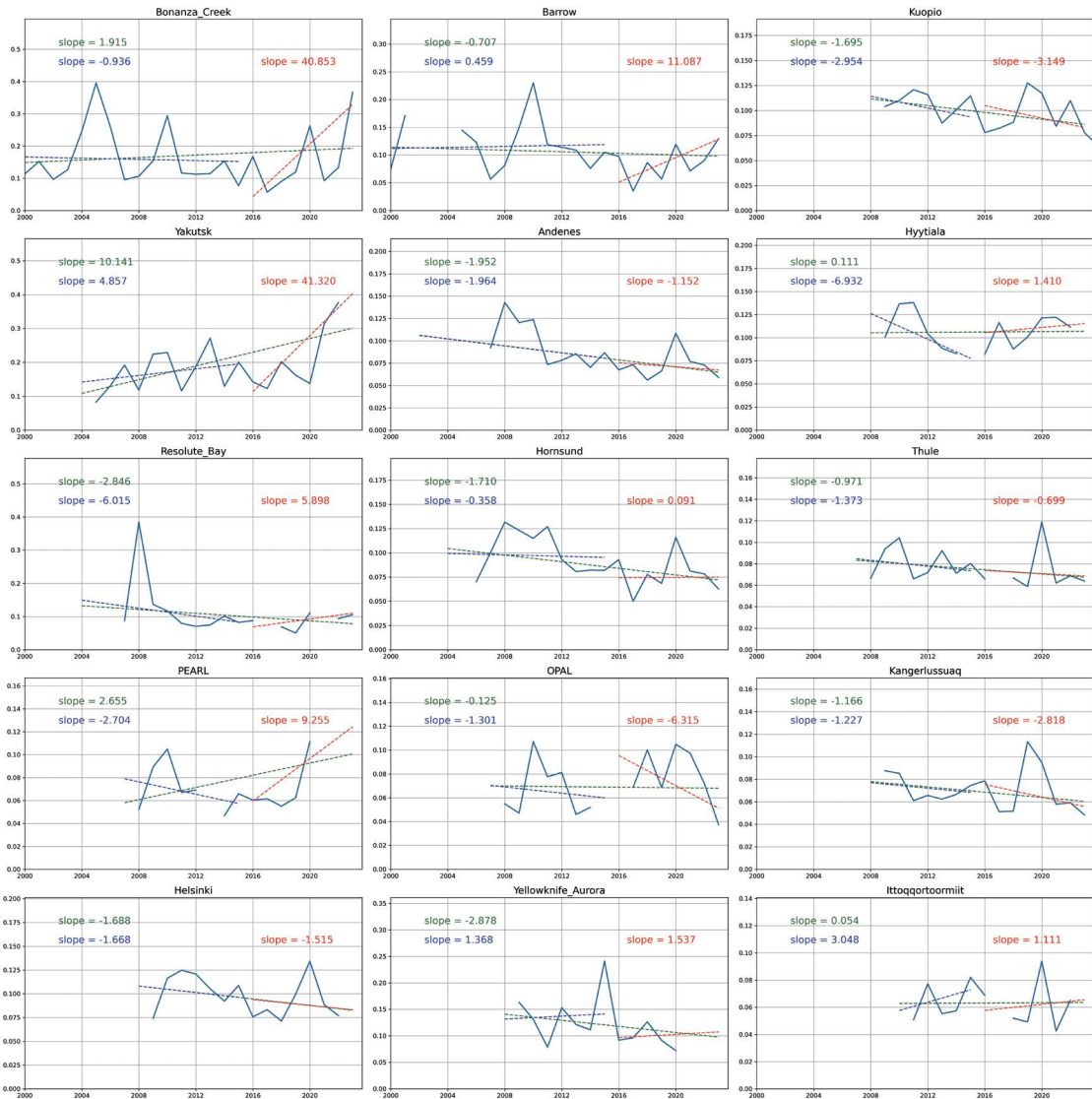


Fig. 3. Time series of aerosol optical thickness at 500 nm at Bonanza_Creek, Barrow, Kuopio, Yakutsk, Andenes, Hyttiala, Resolute_Bay, Hornsund, Thule, PEARL, OPAL, Kangerlussuaq, Helsinki, Yellowknife_Aurora, Ittoqqortoormiit. Linear regression lines ($\Delta\text{AOT}/\Delta\text{year} \times 1000$) are shown as green line with data for whole period, blue line with data before 2016, and red line with data before 2016, respectively.

이후 가장 최근인 2023년 10월까지의 전체 관측기간에 대한 에어로솔 광학두께값의 연평균 시계열 변화 그래프를 나타낸다. 관측기간 상위 5순위 지역에 대한 평균 에어로솔 광학두께값은 Yakutsk ($\tau_{500} = 0.186 \pm 0.074$) > Bonanza_Creek ($\tau_{500} = 0.160 \pm 0.087$) > Yellowknife_Aurora ($\tau_{500} = 0.122 \pm 0.043$) > Resolute_Bay ($\tau_{500} =$

0.109 ± 0.074) > Hyttiala ($\tau_{500} = 0.107 \pm 0.018$) > Kuopio ($\tau_{500} = 0.102 \pm 0.016$)의 순으로 나타났다. 아시아 대륙 내부의 Yakutsk (61.662°N)는 가장 북쪽에 위치한 PEARL (80.054°N) ($\tau_{500} = 0.070 \pm 0.020$)이나 Hornsund (77.001°N) ($\tau_{500} = 0.091 \pm 0.023$)에 비하여 약 0.116 (265.7%), 0.095 (204.4%) 높은 수준으로 나타

났다. 북극에 가까울수록 에어로솔의 인위적 배출원이 드문 것을 고려하면, Yakutsk의 최대값은 관측지점 주변의 인위적 배출과 이 지역에서 흔히 발견되는 바이오매스 연소의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

연구 대상지역 내 에어로솔의 증감률을 알아보기 위하여 각 지점별 시계열 관측 자료를 이용하여 선형 회귀 분석을 수행하였으며, 그림 3에서 녹색 점선으로 선형회귀직선을 포함하였다. 각 지역별 선형회귀식의 기울기값($\Delta AOT/\Delta year \times 1000$)은 Yakutsk와 PEARL에서 10.141, 2.655로 증가율을 나타내지만, 다른 지점에서는 모두 음의 기울기값을 나타내므로 감소율을 나타낸다. 이 결과를 보면 극지 지역에서 에어로솔의 트렌드는 대체적으로 감소 경향을 나타내는 것으로 판단할 수 있다.

그러나, 관측이 시작된 이후 가장 최근까지의 장기간의 경향성이 아닌 특정 시점을 기준으로 이전과 이후로 나누었을 때 그 경향성은 다르게 나타난다. 즉, 2016년을 기점으로 이전과 이후로 나누어 회귀분석을 수행한 결과는 그림 3에서 파란색과 빨간색 점선으로 회귀직선을 각각 표시하였다. 이 결과에서는

2016년 이전까지 관측 자료에 대한 회귀 직선의 기울기값은 Yakutsk를 제외하고 모두 감소하는 경향을 보였다. 2016년 이후부터 가장 최근까지의 관측값을 이용한 회귀직선의 기울기가 양의 값을 나타내는 지점은 Bonanza_Creek, Barrow, Yakutsk, Hyytiala, Resolute_Bay, Hornsund, PEARL, Yellowknife_Aurora, Ittoqortoormiit의 9개 지점이다. 이 지점들은 모두 2016년 이후부터 최근까지 에어로솔의 부하량이 증가한 것을 증명한다. 그리고 주목할 만한 점은 Yakutsk를 제외한 모든 관측지점에서 2020년의 가장 높은 값이 관측된다는 것이다.

최근의 AOT의 증가가 대기 중 수분의 증가에 따른 흡습성장과의 관련성을 찾기 위하여 각 관측지점에서의 동일 기간 동안 대기에 존재하는 총 수분량인 가강수량(Precipitable Water Vapor, PWV, 단위=cm)의 변화를 비교하였다. 그림 4는 각 관측지점에서의 PWV에 대한 시계열 변화와 연도별 변화율을 나타낸다. 이 결과에서는 Bonanza_Creek, Yakutsk, Andenes, Hyytiala, Resolute_Bay, Thule, PEARL, OPAL, Yellowknife_Aurora, Ittoqortoormiit에서 2016년 이후 증가추세

Table 2. Yearly mean, standard deviation, linear regression slope with intercept before 2016.

Site name	Mean	Standard deviation	Slope ($\times 1000$)	Intercept
Bonanza_Creek	0.161	0.080	-0.936	2.038
Barrow	0.115	0.040	0.459	-0.805
Kuopio	0.104	0.014	-2.954	6.046
Yakutsk	0.169	0.054	4.857	-9.591
Andenes	0.093	0.021	-1.964	4.038
Hyytiala	0.102	0.022	-6.932	14.045
Resolute_Bay	0.116	0.083	-6.015	12.203
Hornsund	0.097	0.021	-0.358	0.818
Thule	0.079	0.014	-1.373	2.841
PEARL	0.068	0.017	-2.704	5.506
OPAL	0.065	0.019	-1.301	2.681
Kangerlussuaq	0.073	0.010	-1.227	2.541
Helsinki	0.102	0.018	-1.668	3.457
Yellowknife_Aurora	0.137	0.048	1.368	-2.616
Ittoqortoormiit	0.065	0.012	3.048	-6.069
Average	0.103	0.032	-1.180	2.476
Standard deviation	0.033	0.024	3.013	6.049

Table 3. Yearly mean, standard deviation, linear regression slope with intercept after 2016.

Site name	Mean	Standard deviation	Slope ($\times 1000$)	Intercept
Bonanza_Creek	0.186	0.119	40.853	-82.317
Barrow	0.090	0.033	11.087	-22.300
Kuopio	0.094	0.020	-3.149	6.454
Yakutsk	0.259	0.106	41.320	-83.186
Andenes	0.071	0.016	-1.152	2.398
Hyytiala	0.110	0.011	1.410	-2.737
Resolute_Bay	0.090	0.020	5.898	-11.822
Hornsund	0.075	0.018	0.091	-0.110
Thule	0.071	0.018	-0.699	1.482
PEARL	0.092	0.025	9.255	-18.598
OPAL	0.073	0.025	-6.315	12.827
Kangerlussuaq	0.066	0.023	-2.818	5.757
Helsinki	0.088	0.019	-1.515	3.147
Yellowknife_Aurora	0.102	0.016	1.537	-3.001
Ittoqortoormiit	0.062	0.015	1.111	-2.182
Average	0.102	0.032	6.461	-12.946
Standard deviation	0.053	0.033	14.786	29.813

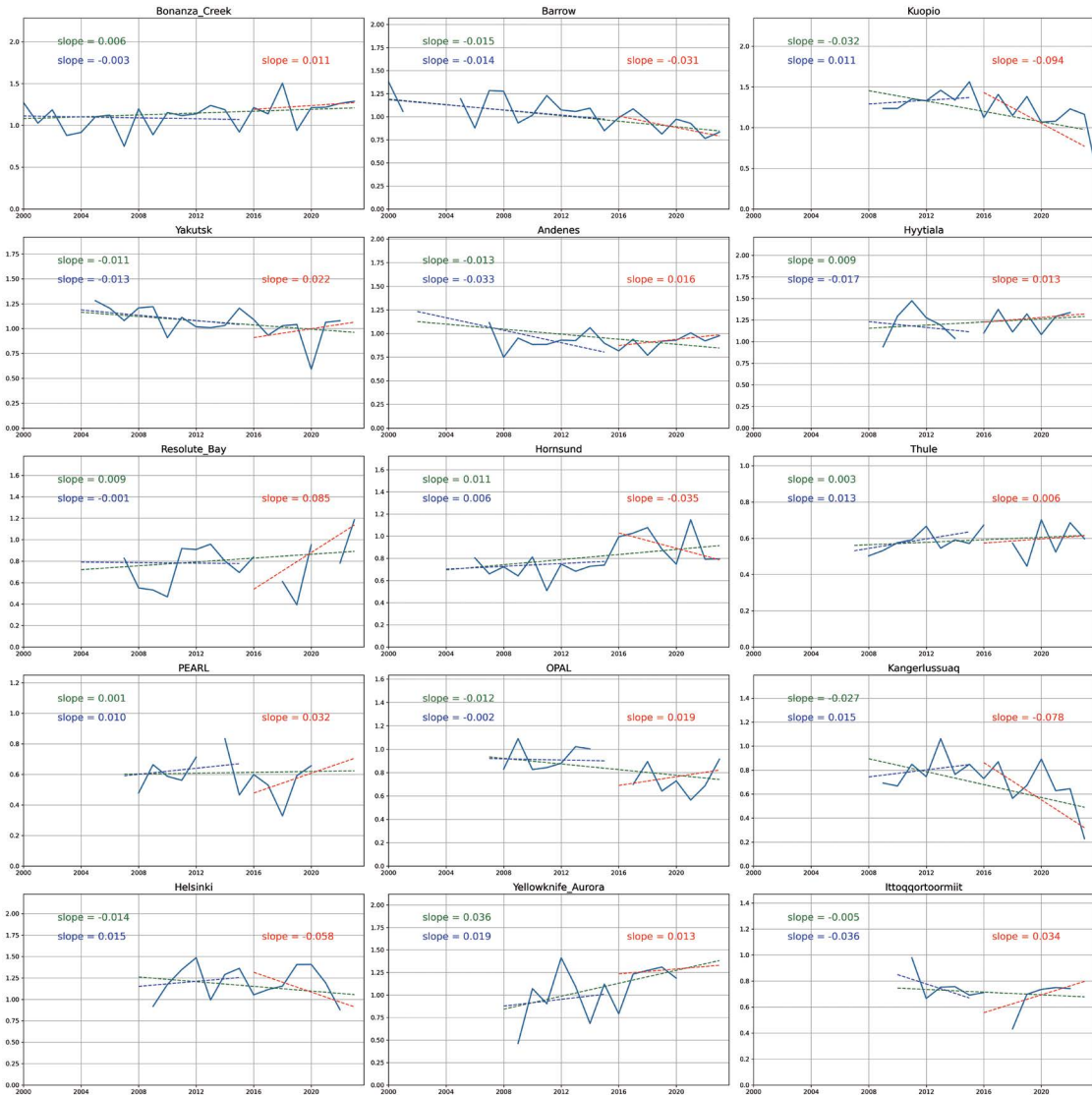


Fig. 4. Time series of precipitable water vapor (cm) over Bonanza_Creek, Barrow, Kuopio, Yakutsk, Andenes, Hyytiala, Resolute_Bay, Hornsund, Thule, PEARL, OPAL, Kangerlussuaq, Helsinki, Yellowknife_Aurora, Ittoqqortoormit. Linear regression lines ($\Delta AOT/\Delta year \times 1000$) are shown as green line with data for whole period, blue line with data before 2016, and red line with data after 2016, respectively.

가 발견되나, 변화율의 크기가 크지 않고, 지역별로 나타나는 최대 피크가 AOT의 변화와는 다른 양상을 나타내고 있으므로, 입자의 흡습성장에 따른 AOT의 증가와의 관련성을 찾기 위하여 보다 상세한 실지 관측 자료가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 에어로솔 크기분포

에어로솔 부피크기분포 (Volume size distribution; VSD)는 AERONET Inversion 산출물로부터 획득 가능하며, 각 관측지점별 크기분포 정보를 이용하여 해당 지역의 에어로솔의 미세물리적 특성을 파악할 수 있다. 일반적으로 에어로솔 입자 크기분포는 반경이

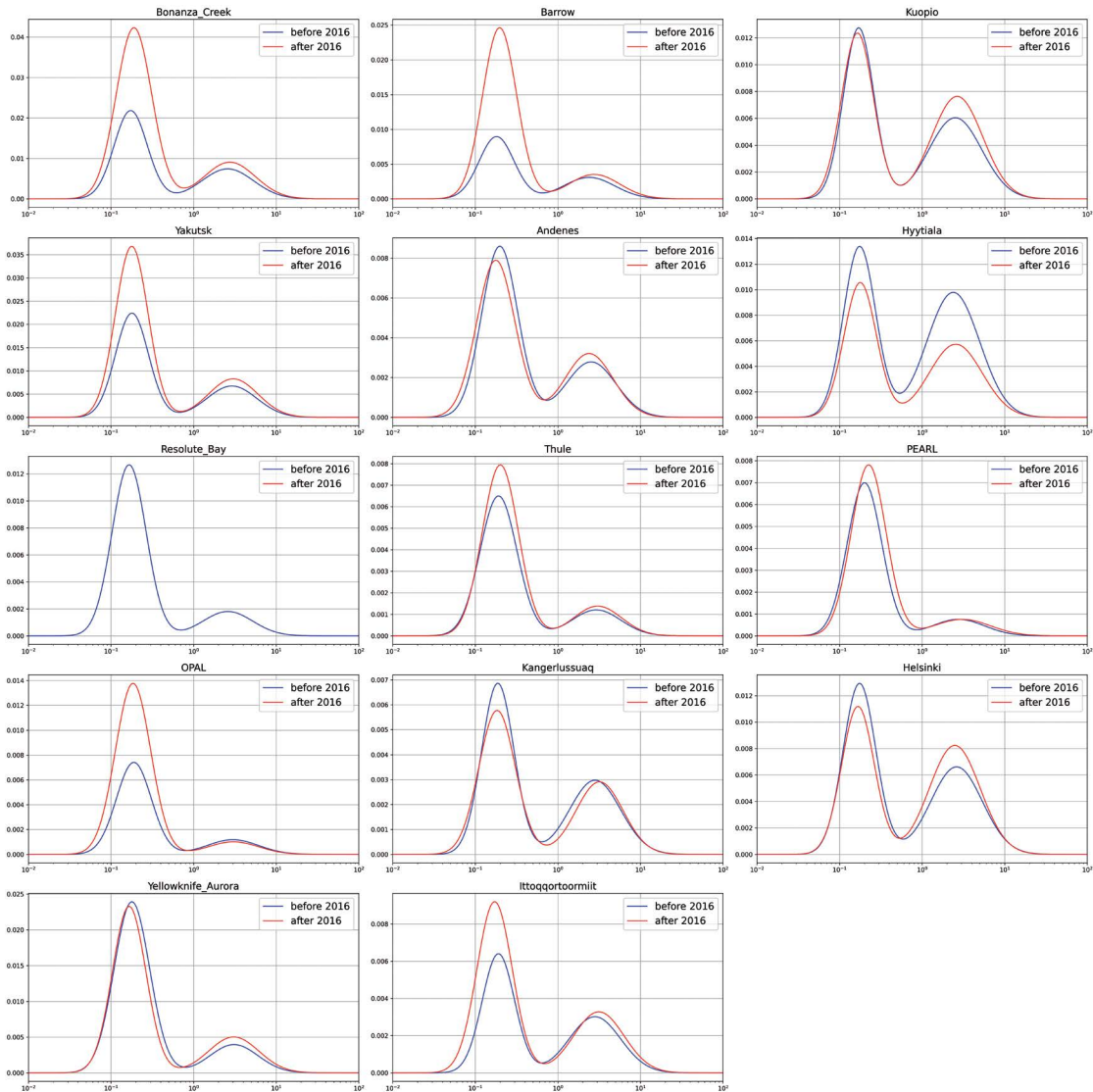


Fig. 5. Mean volume size distributions with data before 2016 (blue line), and data after 2016 (red line), respectively.

약 1.0 μm보다 작은 것을 미세 모드(fine mode), 반경이 1.0 μm보다 큰 것을 조대 모드(coarse mode) 에어로솔로 구분하는 쌍봉 모드 로그화된 정규분포(bimodal lognormal distribution)로 설명할 수 있으며, 다음의 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{C_f}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_f} \exp \left[-\frac{(\ln r_f - \ln r)^2}{2\sigma_f^2} \right]$$

$$+ \frac{C_c}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_c} \exp \left[-\frac{(\ln r_c - \ln r)^2}{2\sigma_c^2} \right] \quad (4)$$

위 식에서 $\frac{dV}{d \ln r}$ 는 단위 면적당 로그 입자 반경에 대한 부피농도 ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)이다. C, r_m , σ 는 각각 총 부피농도, 평균 반경, 표준편차이며, 아래첨자 f와 c는 각각 미세 모드와 조대 모드를 의미한다.

그림 5는 전역의 9개 지점에서의 2016년 이전과 이

Table 4. Mean, standard deviations, linear regression slope with intercepts after 2016.

Site name	(a) VCF (before 2016)	(b) VCC (before 2016)	(c) VCF (after 2016)	(d) VCC (after 2016)	(c)/(a)	(d)/(b)
Bonanza_Creek	2.525E-02	1.335E-02	5.285E-02	1.624E-02	0.478	0.822
Barrow	1.090E-02	5.502E-03	2.933E-02	6.259E-03	0.371	0.879
Kuopio	1.359E-02	1.120E-02	1.388E-02	1.364E-02	0.979	0.821
Yakutsk	2.581E-02	1.174E-02	4.210E-02	1.428E-02	0.613	0.822
Andenes	1.085E-02	4.854E-03	1.054E-02	5.389E-03	1.029	0.901
Hyytiala	1.513E-02	1.811E-02	1.195E-02	1.064E-02	1.266	1.702
Resolute_Bay	1.514E-02	3.135E-03	NA	NA	NA	NA
Thule	8.401E-03	2.066E-03	1.003E-02	2.311E-03	0.838	0.894
PEARL	8.445E-03	1.375E-03	9.534E-03	1.500E-03	0.886	0.917
OPAL	9.033E-03	2.121E-03	1.703E-02	1.784E-03	0.531	1.189
Kangerlussuaq	7.759E-03	5.290E-03	7.367E-03	4.771E-03	1.053	1.109
Helsinki	1.485E-02	1.192E-02	1.277E-02	1.464E-02	1.163	0.814
Yellowknife_Aurora	2.992E-02	6.671E-03	2.736E-02	8.818E-03	1.093	0.757
Ittoqqortoormiit	7.227E-03	5.417E-03	1.135E-02	5.788E-03	0.637	0.936

후에 대한 평균적인 VSD를 나타낸다. 각 지점에서 미세 모드 및 조대 모드에 대한 최대값은 미세 모드의 체적 농도 크기가 2016년 이전에 비하여 2016년 이후에 더욱 높은 것으로 나타났다. Bonanza_Creek, Barrow, Yakutsk, OPAL의 경우, 미세 모드 에어로솔의 최대 체적 농도는 2016년 이전과 이후에 각각 0.029 및 0.046 $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 2016년 이전의 VSD가 높은 지점은 Andenes, Hyytiala, Helsinki, Yellowknife_Aurora로서, 미세 모드와 조대 모드에서 모두 높았으므로, 2016년 이후 미세 모드 입자가 증가한 다른 지역의 에어로솔의 성상과는 다른 것을 알 수 있다. 표 4는 각 지역별 VSD에 대한 모드별 부피농도값을 비교한 결과 리스트이다.

3.3 에어로솔 복사강제력

그림 6과 그림 7은 각각 2006년 이전과 이후에 기간 동안 각 관측지점별 평균 에어로솔 복사강제력(Aerosol radiative forcing, ΔF (W/m^2))이다. 복사강제력은 단 파장영역(0.2~4.0 μm)에서 에어로솔이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 대한 복사플럭스를 비교한 값으로, 대기권 상단(Top of Atmosphere, TOA)과 하단(Bottom of Atmosphere, BOA)에서 각각 식 (5), (6)과 같이 계산된다. AERONET에서는 Global

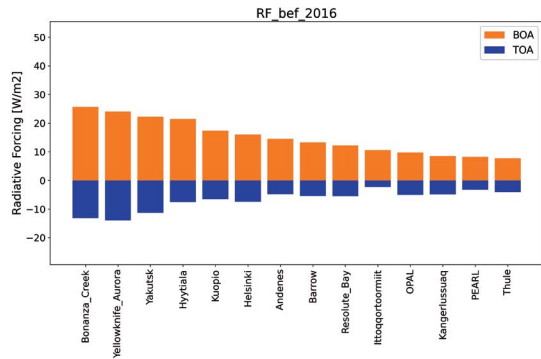


Fig. 6. Aerosol radiative forcing at top of atmosphere (TOA) and bottom of atmosphere (BOA) before (top) before 2016 period.

Atmospheric Model (GAME) 복사 전달 모델을 사용하여 에어로솔과 미량 기체에 대한 흡수도 그리고 위 성관측 자료를 이용한 지표면 알베도를 입력값으로 계산된 복사 플럭스를 사용한다 (Dubuisson *et al.*, 1996; Scott, 1974).

$$\Delta F_{TOA} = F_{TOA}^{10} - F_{TOA}^1 \quad (5)$$

$$\Delta F_{BOA} = F_{BOA}^{10} - F_{BOA}^1 \quad (6)$$

위 식에서, F^1 , F^{10} 는 각각 상향과 하향 복사 플럭스 (W/m^2), 위첨자 0는 에어로솔이 없는 조건을 의미한

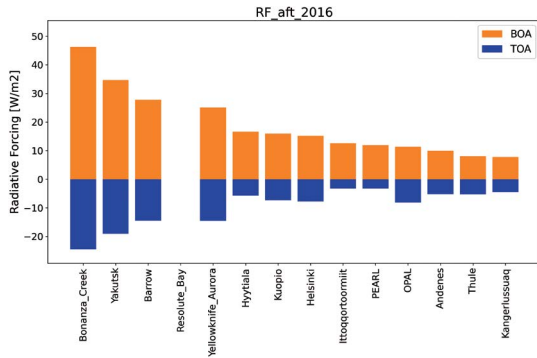


Fig. 7. Aerosol radiative forcing at top of atmosphere (TOA) and bottom of atmosphere (BOA) before (top) and after 2016.

다. 일반적으로, 대기 중의 에어로솔 입자의 증가는 지표에 도달하는 복사량을 감소시키는 것과 우주로 반사되거나 방사되는 복사에너지량을 증가시키는 역할을 하게 된다. 따라서 TOA에서는 음의 값, BOA에서는 양의 값을 나타낸다.

그림 6의 결과에서는 2016년 이전의 에어로솔 관측 결과에 대한 ARF로서 전체 지역에서 평균 ARF 범위는 약 $15.143 \pm 6.176 \text{ W/m}^2$ (BOA), $-6.801 \pm 3.612 \text{ W/m}^2$ (TOA)이었다. 관측지점 중 상대적으로 높은 ARF 값을 기록한 곳은 Bonanza_Creek (25.719 W/m^2) > Yellowknife_Aurora (24.053 W/m^2) > Yakutsk (22.237 W/m^2) > Hyttiala (21.531 W/m^2)의 순이었으며, 최소 값은 Thule (7.737 W/m^2)로 나타났다. 이러한 지역적 차이는 AOT 값이 높은 관측지점에서 큰 영향을 받는 것이 분명하다.

그림 7의 2016년 이후의 ARF 값은 이전에 비하여 증가된 결과를 나타낸다. 전체 지역에서 평균 ARF 범위는 약 $18.717 \pm 11.581 \text{ W/m}^2$ (BOA), $-9.476 \pm 6.641 \text{ W/m}^2$ (TOA)로서, 2016년 이전에 비하여 약 23.6% (BOA), 39.3% (%)가 증가한 결과를 보인다. 즉, 2016년부터 최근까지의 에어로솔의 증가로 인하여 지표부근의 복사강제효과가 더욱 증가하여 온난화 효과가 커짐을 의미한다. 이러한 복사강제력의 증가는 Kuopio, Andenes, Hyttiala, Kangerlussuaq, Helsinki를 제외한 모든 지역에서 나타났다. 이 5개 지점

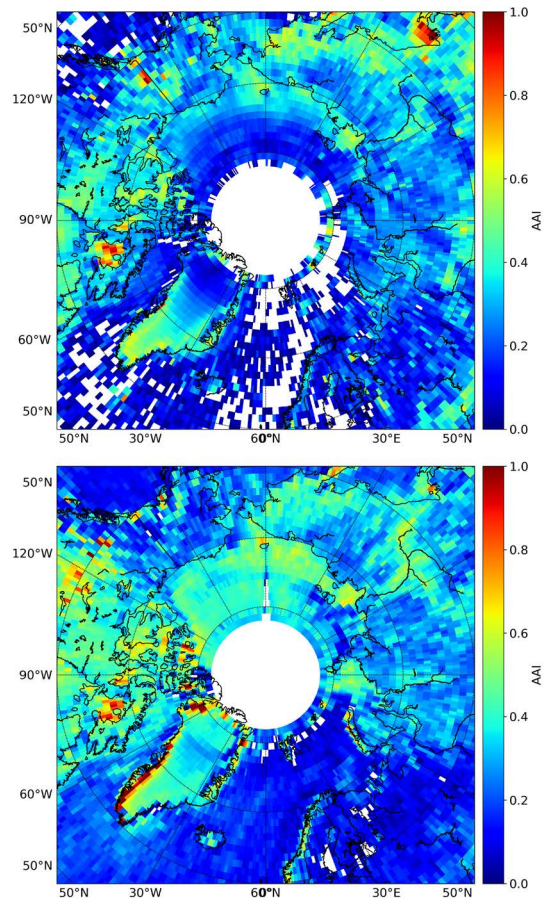


Fig. 8. UV absorbing aerosol index from the SCIAMACHY, OMI, GOM2 satellite observation data during 2002~2016 (top) and 2017~2023 (bottom).

은 북유럽의 인접 지역 내에 위치하고 있으므로 유사한 관측 특징을 가지는 것으로 보인다. 가장 큰 값을 가지는 Bonanza_Creek에서는 46.283 W/m^2 (BOA), -24.495 W/m^2 (TOA)이었다. 이 결과는 Pyo and Lee (2022)에서 2015~2019년 기간 동안의 서울과 강릉에서의 평균 ARF 값으로 제시된 48.4 W/m^2 (BOA), 35.36 W/m^2 (BOA)과 비교할 만한 수치이다.

이상의 장기간 북극 지역 지상관측 자료를 이용하여 2016년을 기준으로 에어로솔의 지점별 분포와 대기 중의 부하량은 서로 다른 특성을 가지는 것을 확인하였으며, 그림 8의 위성관측 자료에서도 이와 동일

한 에어로솔의 시공간 분포 특성을 확인하였다. 2002년부터 2016년 동안의 AAI는 북위 70~80도 사이의 고위도 지역에서는 상대적으로 낮은 에어로솔 분포를 나타내고 있으나, 2017~2023년 기간 동안에는 많은 증가를 하였음이 보인다. 특히, 북유럽 지역의 AAI 값의 분포 범위의 변화는 매우 미미한 반면, 북미와 북아시아 대륙과 인접한 지역에서는 에어로솔의 부하량이 증가된 것을 알 수 있다.

이렇게 지역적으로 불균일한 에어로솔의 분포와 최근의 급격한 부하량의 증가는 지상관측 자료의 시공간적 추세 변화와 일치한다. 따라서, 앞에서 산정된 에어로솔의 증가로 인한 복사강제효과는 대기 중에서 태양 복사의 흡수로 인한 지역 규모의 기후변화와 연관성을 찾을 수 있을 것이다. 이로 인하여 기류의 혼합 특성 변화 및 대류권 온도 이상을 초래할 수 있을 것이며, 이는 북극 지역뿐 아니라 인접한 중위도 지역에서도 대기의 되먹임 작용의 결과로 나타날 수 있을 것이다. 기후변화와 관련된 보다 상세한 연구 결과는 본 연구의 범위를 벗어나므로, 향후 추가 연구를 통하여 북극 지역 에어로솔의 증가 원인과 이로 인한 대류권 온도 이상에 관하여 분석할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 북위 60도 이상의 북극 지역에서 장기간 지상 및 위성으로 관측된 에어로솔 광학 특성 및 미세물리 자료를 이용하여 연구 대상지역의 에어로솔의 시공간 변화 분포 특성을 분석하였다. 2000년 3월부터 2023년 6월까지 15개 지상 AERONET 관측지점에서의 에어로솔 광학두께와 입자 크기분포를 분석한 결과, 전체 관측 기간 동안의 에어로솔 광학두께는 지속적으로 감소하는 것으로 나타났으나, 2016년 이후의 변화 추세는 과거에 비하여 미세 입자 성분의 급속한 증가를 보임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 특히 북미와 북아시아 지역에서 크게 나타나고 있어 지역적인 편차를 가지는 것을 발견하였다.

에어로솔에 의한 복사강제력은 2016년 이전과 이후의 비교를 통하여 최근에 약 1°C로 가장 높다는 것을 발견하였다. 북극지역의 에어로솔 부하량의 증가로 인한 복사강제력의 증가는 최근 보고되고 있는 북극 온난화의 강화(Rantanen *et al.*, 2022)와 관련이 있을 것으로 판단된다. 이러한 북극 지역의 에어로솔 증가 추세는 북위 60~80도 사이의 지역에서 주로 증가된 것으로 보이며, 이는 북미 지역과 북아시아 지역의 바이오매스 연소 활동의 증가 또는 장거리 이동성 먼지의 수송으로 인한 가능성이 높을 것이다. 바이오매스 연소성 입자 또는 먼지성 입자와 같은 자외선 흡수 에어로솔의 존재를 확인할 수 있는 위성관측 기반의 AAI 자료 분석 결과는 이러한 가설을 뒷받침 해준다. 2016년 이후의 북극 지역 대부분에서 자외선 흡수 에어로솔의 부하량이 증가한 것으로 발견하였으며, 주로 북미와 북아시아 지역에서 자외선 흡수 에어로솔의 발생 빈도와 크기가 크게 증가하였음을 확인하였다.

북극 지역에서 증가하고 있는 에어로솔의 부하량에 따른 복사강제력은 대기의 복사 가열 속도를 증가시켜 온난화 및 물 순환에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 대기가 가열되면 상승기류와 함께 수증기 함유량이 증가하여 대류권 온난화에 긍정적인 피드백을 제공하기 때문이다. 이와 관련된 향후 추가 연구를 통하여 에어로솔에 의한 가열과 관련된 대기 환경 변동성에 관하여 연구가 진행될 예정이다. 이는 북반구 대기 순환에서 북극의 역할을 조사하는 것은 지구 기후 역학에 대한 이해를 증진하고 기후 변화 완화 및 적응 전략을 개선하는 데 필수적인 것이다.

또한, 본 연구와 같이 북극 지역의 지점별 관측 자료를 분석하는 경우에는 환경조건과 지리적 위치로 인하여 몇 가지 제한점이 존재한다. 북극 지역의 낮은 태양고도와 기상조건, 위성관측 영역 등의 원인으로 사용 가능한 계절적 변동성이 매우 큰 것과, 특정 지점의 이벤트성 사례 발견 시 원인-과정-영향권에 대한 종합적인 해석이 어려운 점이다. 따라서, 이러한 한계를 극복하기 위하여 보다 장기적이고 광역적인 관

측과 모델링 자료를 연계하여 분석하는 노력이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 해양·극지기초원천기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2021M1A5A1075532).

References

- Acosta Navarro, J.C., Varma, V., Riipinen, I., Seland, Ø., Kirkevåg, A., Struthers, H., Iversen, T., Hansson, H.C., Ekman, A.M.L. (2016) Amplification of Arctic Warming by Past Air Pollution Reductions in Europe, *Nature Geoscience*, 9(4), 277-281. <https://doi.org/10.1038/ngeo2673>
- Box, J.E., Colgan, W.T., Christensen, T.R., Schmidt, N.M., Lund, M., Parmentier, F.W., Brown, R.D., Bhatt, U.S., Euskirchen, E.S., Romanovsky, V.E., Walsh, J.E., Overland, J.E., Wang, M., Corell, R.W., Meier, W.N., Wouters, B., Mernild, S.H., Mård, J., Pawlak, J., Olsen, M.S. (2019) Key Indicators of Arctic Climate Change: 1971-2017, *Environmental Research Letters*, 14, 045010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc1b>
- Dubovik, O., King, M.D. (2000) A Flexible Inversion Algorithm for Retrieval of Aerosol Optical Properties from Sun and Sky Radiance Measurements, *Journal of Geophysical Research*, 105, 20673-20696. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
- Dubuisson, P., Buriez, J.C., Fouquart, Y. (1996) High Spectral Resolution Solar Radiative Transfer in Absorbing and Scattering Media, Application to the Satellite Simulation, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 55(1), 103-126. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(95\)00134-4](https://doi.org/10.1016/0022-4073(95)00134-4)
- Fyfe, J., von Salzen, K., Gillett, N., Avara, V.K., Flato, G.M., McConnell, J.R. (2013) One Hundred Years of Arctic Surface Temperature Variation due to Anthropogenic Influence, *Scientific Reports*, 3, 2645. <https://doi.org/10.1038/srep02645>
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A. (1998) AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, Remote Sensing of Environment, 66, 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 659-740. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Lee, K., Wong, M.S., Li, J. (2022) Review of Atmospheric Environmental Change from Earth Observing Satellites, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(1), 2287-1160. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.147>
- Lee, K.H., Bae, M.S. (2023) Satellite Observation Based Air Quality Study, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, 39(5), 571-587, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.571>
- Menon, S., Hansen, J., Nazarenko, L., Luo, Y. (2002) Climate Effects of Black Carbon Aerosols in China and India, *Science*, 297, 2250-2253. <https://doi.org/10.1126/science.1075159>
- Najafi, M., Zwiers, F., Gillett, N. (2015) Attribution of Arctic Temperature Change to Greenhouse-gas and Aerosol Influences, *Nature Climate Change*, 5, 246-249. <https://doi.org/10.1038/nclimate2524>
- Previdi, M., Janoski, T.P., Chiodo, G., Smith, K.L., Polvani, L.M. (2020) Arctic Amplification: A Rapid Response to Radiative Forcing, *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL089933. <https://doi.org/10.1029/2020GL089933>
- Pyo, S., Lee, K. (2022) Estimation of Aerosol Radiative Forcing Using Deep Learning Technique, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 669-686, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.5.669>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvarinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., Laaksonen, A. (2022) The Arctic has Warmed Nearly Four Times Faster than the Globe Since 1979, *Communications Earth and Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Scott, N.A. (1974) A Direct Method of Computation of the Transmission Function of an Inhomogeneous Gaseous Medium-I: Description of the Method, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*,

- 14(8), 691-704. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(74\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0022-4073(74)90116-2)
- Screen, J.A., Bracegirdle, T.J., Simmonds, I. (2018) Polar Climate Change as Manifest in Atmospheric Circulation, *Current Climate Change Reports*, 4, 383-395. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0111-4>
- Sinyuk, A., Holben, B.N., Eck, T.F., Giles, D.M., Slutsker, I., Korkin, S., Schafer, J.S., Smirnov, A., Sorokin, M., Lyapustin, A. (2020) The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2, *Atmospheric Measurement Technique*, 13, 3375-3411. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3375-2020>
- Tilstra, L.G., de Graaf, M., Aben, I., Stammes, P. (2012) In-Flight Degradation Correction of SCIAMACHY UV Reflectances and Absorbing Aerosol Index, *Journal of Geophysical Research*, 117, D06209. <https://doi.org/10.1029/2011JD016957>
- Tilstra, L.G., Tuinder, O.N.E., Stammes, P. (2010) GOME-2 Absorbing Aerosol Index: Statistical Analysis, Comparison to GOME-1 and Impact of Instrument Degradation, *Proceedings of the 2010 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*.
- Timmermans, M.-L., Marshall, J. (2020) Understanding Arctic Ocean Circulation: A review of Ocean Dynamics in a Changing Climate, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2018JC014378. <https://doi.org/10.1029/2018JC014378>
- Tomasi, C., Vitale, V., Lupi, A., Di Carmine, C., Campanelli, M., Herber, A., Treffeisen, R., Stone, R.S., Andrews, E., Sharma, S., Radionov, V., von Hoyningen-Huene, W., Stebel, K., Hansen, G.H., Myhre, C.L., Wehrli, C., Aaltonen, V., Lihavainen, H., Virkkula, A., Hillamo, R., Ström, J., Tolodano, C., Cachorro, V.E., Ortiz, P., de Frutos, A.M., Blindheim, S., Frioud, M., Gausa, M., Zielinski, T., Petelski, T., Yamanouchi, T. (2007) Aerosols in polar regions: a historical overview based on optical depth and in situ observations, *Journal of Geophysical Research*, 112(D16). <https://doi.org/10.1029/2007JD008432>
- Torres, O., Tanskanen, A., Veihelmann, B., Ahn, C., Braak, R., Bhartia, P.K., Veefkind, P., Levelt, P. (2007) Aerosols and Surface UV Products from Ozone Monitoring Instrument Observations: An overview, *Journal of Geophysical Research*, 112(D24S47). <https://doi.org/10.1029/2007JD008809>
- Westervelt, D.M., Mascioli, N.R., Fiore, A.M., Conley, A.J., Lamarque, J.-F., Shindell, D.T., Faluvegi, G., Previdi, M., Correa, G., Horowitz, L.W. (2020) Local and Remote Mean and Extreme Temperature Response to Regional Aerosol Emissions Reductions, *Journal of Geophysical Research*, 125, 3009-3027. <https://doi.org/10.5194/acp-20-3009-2020>
- Xian, P., Zhang, J., O'Neill, N. T., Toth, T.D., Sorenson, B., Colarco, P.R., Kipling, Z., Hyer, E.J., Campbell, J.R., Reid, J.S., Ranjbar, K. (2022) Arctic Spring and Summertime Aerosol Optical Depth Baseline from Long-term Observations and Model Reanalyses - Part 1: Climatology and Trend, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 9915-9947. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9915-2022>

Authors Information

- 이권호 (국립강릉원주대학교 복사위성연구소, 대기환경과학과 교수) (kwonho.lee@gmail.com)
- 이규태 (국립강릉원주대학교 복사위성연구소 특별연구원) (klee@gwnu.ac.kr)