

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 13, No. 4: December 2017 pp. 141-150

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2017.12.30.141>

남북극 과학기지에서의 에어로졸 광학 깊이 변동성

구 자 호^{1)*} · 최 태 진²⁾ · 조 예 슬¹⁾ · 이 하 나¹⁾ · 김 재 민³⁾ · 안 다 현¹⁾ · 김 준¹⁾ · 이 윤 곤³⁾

¹⁾연세대학교 대기과학과, ²⁾극지연구소, ³⁾충남대학교 대기과학과

(2017년 9월 24일 투고, 2017년 9월 28일 수정, 2017년 9월 29일 게재확정)

The variation of aerosol optical depth over the polar stations of Korea

Ja-Ho Koo^{1)*}, Taejin Choi²⁾, Yeseul Cho¹⁾, Hana Lee¹⁾, Jaemin Kim³⁾,
Dha Hyun Ahn¹⁾, Jhoon Kim¹⁾, and Yun Gon Lee³⁾

¹⁾*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University*

²⁾*Korea Polar Research Institute*

³⁾*Department of Atmospheric Sciences, Chungnam National University*

(Received 24 September 2017; Revised 28 September 2017; Accepted 29 September 2017)

Abstract

Using the NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) reanalysis for aerosol optical depth (AOD) and satellite-observed carbon monoxide (CO) data, we examined the basic pattern of AOD variations over the three polar stations of Korea: Jangbogo and King Sejong stations in the Antarctica, and Dasan station in the Arctic area. AOD values at King Sejong and Dasan station show the maximum peaks in spring, which looks associated with the high amount of atmospheric CO emitted from the natural burning and the biomass burning. Jangbogo station shows the much less AOD compared to other two stations, and seems not strongly affected by the transport of airborne particles generated from mid-latitude regions. All three polar stations show the AOD increasing trend in general, indicating that the polar background air quality becomes polluted.

Keywords: Aerosol optical depth (에어로졸 광학 깊이), Arctic (북극), Antarctic (남극),
Carbon monoxide (일산화탄소)

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-7616

E-mail : zach45@yonsei.ac.kr

1. 서론

북극 및 남극 극지 지역의 대기 환경은 흔히 청정한 상태인 것으로 알려져 있다. 하지만 산업화 이후 전세계적으로 대기 오염이 심각해지는 현상을 겪으면서 극지 대기 환경 역시 그 영향에서 자유롭지 못한 상황이다(Law and Stohl, 2007). 예컨대 북극 연무(Arctic haze) 현상 같은 경우 북극의 겨울 및 봄철에 주로 중위도에서 발생한 대기 입자상 물질들이 북극으로 유입 후 축적되어 발생하며 태양 복사와의 상호 작용에 의해 북극 지역 복사 강제력의 변화를 크게 줄 수 있는 여지를 지니고 있다. 특히 블랙카본(black carbon) 계열의 복사 흡수성을 크게 가지는 에어로졸이 지표 눈표면에 침전되는 경우 지표 반사도 역시 바꿀 수 있기 때문에 극지 기후에도 상당한 영향을 미칠 수 있다(McConnell et al., 2007). 남극의 경우는 북극 보다 대기 오염 물질 배출원으로부터 더욱 고립되어 있는 편이지만 남아메리카 및 아프리카에서 생체 연소(biomass burning) 작용에 의해 주로 배출되는 오염물질들이 남극 대기 오염에 미치는 영향이 발견되고(Stohl and Sodemann, 2010) 사막 지역으로부터 모래 입자 역시 장거리 수송으로 유입되는 것들이 확인되고 있기에(Li et al., 2008) 역시 대기 에어로졸의 현황 연구의 필요성이 존재한다.

북극 및 남극의 대기 에어로졸 오염의 정도를 모니터링 하는 과정에서 가장 어려운 부분은 혹독한 기상 조건 및 고립된 지역적 특성에 의해 지상에서 상시 관측을 운용하기 쉽지 않다는 점에 있다. 실제로 극지 에어로졸 대다수의 관측들이 집중 관측 캠페인을 통해서 이루어지고 있는 실정하기에 장기적인 특성을 살펴보는 일이 쉽지 않은 측면이 있다. 게다가 관측에 적합한 입지 조건 선정이 쉽지 않아서 넓은 극지역을 조밀하게 감시하기에도 어려움이 크다. 위성 관측의 경우 이러한 어려움을 일정 부분 극복할 수 있으나 대기 중 에어로졸의 양적 변화를 추적할 수 있는 위성 관측 산출물인 에어로졸 광학 깊이(Aerosol Optical Depth, AOD)의 경우 주로 자외선 및 가시광선 영역에서 산출되기 때문에 해빙에 의해 높은 지표 반사도를 가지는 극지역의 경우 그 산출 정확도가 많이 낮아지는 경향이 있다. 다만 대기 감시 기체 중 일부는 적외선 영역에서 산출되고

있어서 극지 대기 오염 감시에 유용하게 쓰이고 있다. 이러한 자료의 한계를 극복하기 위해 최근에는 가용한 모든 관측 및 모델링 자료를 통계적으로 조합하는 자료동화 방법을 통해 재분석(reanalysis) 자료를 생산, 구축하여(Randles et al., 2017) 극지 대기 에어로졸 특성 분석에 활용하고 있다.

대한민국은 현재 남극에서 두 지점, 북극에서 한 지점에 과학 기지를 설치, 운용 중에 있다. 그러나 아직까지 과학 기지가 설치된 지역 상공의 에어로졸이 어떠한 시간적 변동성을 나타내고 있는지, 장기간 평균적인 특성이 어떻게 나타나는지에 대해 살펴본 연구가 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 국제적으로 활용도가 높은 미국 항공 우주국(NASA)의 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications 버전 2(MERRA-2) AOD 자료를 이용하여 북극 다산 과학 기지, 남극 세종 및 장보고 과학 기지 상공에서의 에어로졸 농도의 기본적인 변동성을 살펴보고 이를 일산화탄소(Carbon monoxide, CO) 위성 관측 자료와 비교하여 중위도 지역에서 발생하는 화재/연소 현상의 기여도를 살펴 보았다.

2. 분석 지역 및 자료

대한민국이 극지에 운용 중인 과학 기지들의 위치는 그림 1과 같이 요약된다. 남극 세종 과학 기지(62.13°S, 58.47°E)는 1988년에 남극 반도 끝 맥스웰 만(Maxwell Bay) 연안에 건설되어 현재까지 운용 중이고 최근 2013년에는 동남극 테라노바 만(Terra Nova Bay) 근처에 장보고 과학 기지(74.37°S, 164.14°E)가 건설되어 새롭게 극지 관측 활동을 수행 중에 있다. 세종 기지와 장보고 기지의 위치를 통해 두 관측소에서의 연구 결과를 이용하면 남극의 서쪽과 동쪽의 특성을 비교 분석할 수 있음을 엿볼 수 있다. 북극 다산 과학 기지(78.55°N, 11.56°E)는 2002년에 개설되어 현재까지 관측 업무를 수행 중에 있으며 북극에서도 북대서양 지역의 특성을 잘 보여주는 지역에 위치하고 있다.

이 세 지역의 에어로졸의 양적 변화를 살펴보기 위해 MERRA-2 AOD 자료를 이용하였다. MERRA-2 재분석 AOD 자료는 NASA에서 보유한 여러 기상

관측 자료, 에어로졸 관련 지상 및 위성 관측 자료, Goddard Earth Observing System 모델 버전 5(GEOS-5) 자료 등을 근간으로 자료 동화 과정을 거쳐 생성된 자료이다(Randles et al., 2017). AOD 자료는 0.5 x 0.625° 격자에 맞춰 제공된 자료를 사용했으며, 매일 0시부터 3시간 간격으로 산출되고 있는 자료를 일 평균하여 사용하였다. 본 연구에서는 이어서 언급할 일산화탄소 자료와 비교하여 2000년대의 극지역 에어로졸의 특성을 살펴보기 위해 2001년부터 2016년까지의 자료를 이용하여 분석을 진행하였다.

소 과정에서 배출된 물질들이 극지 대기 환경에 지대한 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Law and Stohl, 2007). 이러한 영향력을 살펴보기 위해서 위성으로 관측한 일산화탄소 자료를 AOD와 비교하여 살펴보았다. 일산화탄소의 경우는 일반적으로 대기 중에 4-5개월 정도 체류하는 것으로 알려져 있어서 중위도 지역 배출원의 영향을 살펴보기 좋고, 극지에서 관측에 어려움을 가지는 자외선, 가시광선이 아닌 적외선 원격탐사 방식으로도 산출될 수 있어 자료 확보가 용이하다. 본 연구에서는 2002년 발사된 NASA Aura 위성에 탑재된 Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) 기기 관측으로 산출된 일산화탄소 자료(Worden et al., 2013)를 AOD와 비교 분석에 사용하였다. 일산화탄소 자료는 AIRS 관측에서 4.58-4.50 μm(2183-2220 cm⁻¹) 채널을 이용하여 산출된다.

3. 결과 및 토의

먼저 기본적으로 남극과 북극 상공 AOD 패턴의 최근 10년 평균을 살펴보았다 (Fig. 2). 남극의 경우 (Fig. 2a) 절대적으로 낮은 AOD의 값을 보이나 미세하게 서남극이 동남극 지역보다는 높은 AOD값을 보이는데 이는 상대적으로 남아메리카와 같이 대기 오염 물질 배출량이 높은 지역에 근접해 있기 때문인 것으로 보인다. 북극의 경우(Fig. 2b)는 유라시아 및 시베리아와 인접한 지역에서 가장 높은 AOD 값이 나타남을 확인할 수 있고 그 뒤를 이어 중앙아시아 및 유럽 북부, 캐나다 북부 순으로 AOD값 크기가 낮아지는 것을 살펴볼 수 있다. AOD 평균의 크기는 북반구에서 절대적으로 높기 때문에 북극 다산 과학 기지에서 가장 높은 AOD를 살펴볼 수 있을 것으로 예상된다.

이어서 월별 및 계절별 평균 AOD의 변동성에 대해서 살펴보았다. 그림 3a에서 3c까지는 월별 MERRA-2 AOD 값을 장보고, 세종, 다산 과학기지에 대해서 비교한 결과를 보이고 있다. 장보고 기지의 경우 남위 74도 정도에 위치하여 남극 와도 (Antarctic vortex)의 영향력 아래 중위도 지역 기류와는 크게 차단되어 있기 때문에 다른 두 과학기지도 더욱 더 청정한 공기질의 특성을 보이고 있다.

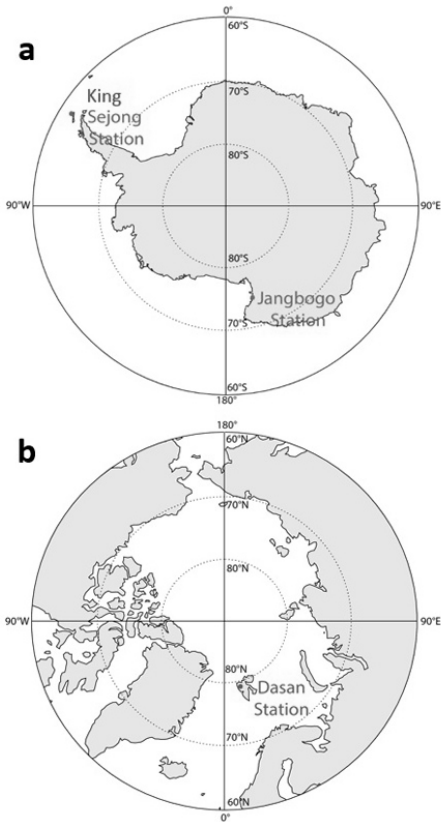


Fig. 1. The location of (a) King Sejong and Jangbogo station in the Antarctica, and Dasan station in the Arctic area

극지 대기 에어로졸 오염 농도에 가장 큰 영향을 끼치는 요인 중 하나로 중위도로부터의 오염 물질의 수송을 꼽을 수 있다. 특히 자연 화재 및 생체 연

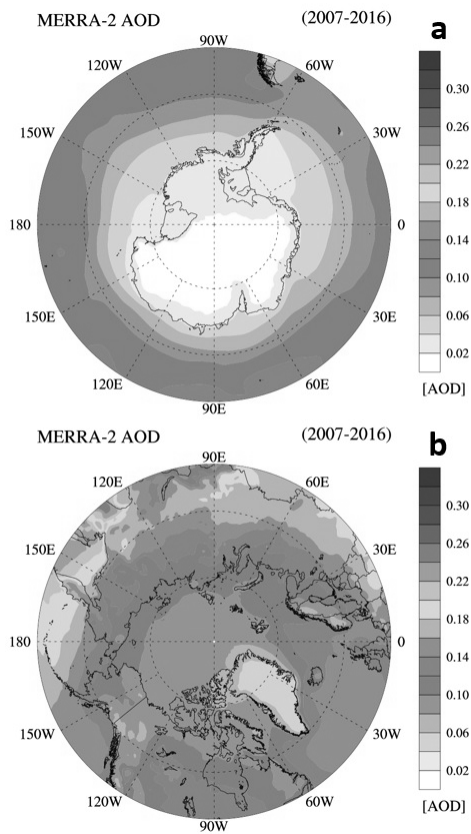


Fig. 2. The recent decadal (2007–2016) mean of MERRA–2 AOD over the (a) Antarctic and (b) Arctic area

AOD의 평균값은 12월, 1월 남극 여름철에 가장 크게 나타나고 있으며 이 시기에도 0.05를 넘지 않는 것이 확인된다. 한편 가장 낮은 시기는 3월부터 7월까지로 대략 0.02 정도의 AOD 값을 평균적으로 보이고 있다. 즉 장보고 기지 여름철에는 AOD가 높은 반면 태양 일사가 거의 존재하지 않는 늦가을, 겨울철에는 낮은 AOD값을 보이므로 남극 외부 중위도로부터의 오염 물질 유입의 영향보다는 광화학 작용의 활성화에 따른 에어로졸 생성의 변동성의 특징으로 장보고 기지 월별 평균 AOD 변화를 추정해 볼 수 있다.

장보고 기지에 비해 세종 과학 기지 상공의 AOD는 약 두 배 정도 높은 값을 보이고 있다. 가장 높은 AOD 값을 나타내는 시점은 10월로 역시 장보고 기지와 차이점을 보이는 반면 최소값은 비슷하게 남

반구 겨울에 해당하는 4월에서 7월까지 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 또 하나 장보고 기지와외의 큰 차이는 매월 AOD의 표준편차가 높게 나타나고 있다는 점인데, 이를 통해 장보고 기지의 에어로졸 농도 변화는 거의 일정하게 유지되는 반면 상대적으로 저위도에 위치한 세종 기지에서는 외부 요인에 따라 AOD의 변동성이 좀 더 높게 나타날 수 있음을 생각해볼 수 있다.

북극 다산 기지의 경우 남극 장보고 및 세종 과학 기지보다 높은 고위도에 위치하고 있지만 북반구 대기 오염이 남반구보다 높게 나타나기 때문에 AOD의 값 역시 다른 과학기지에 비해 높게 나타남을 확인할 수 있다.

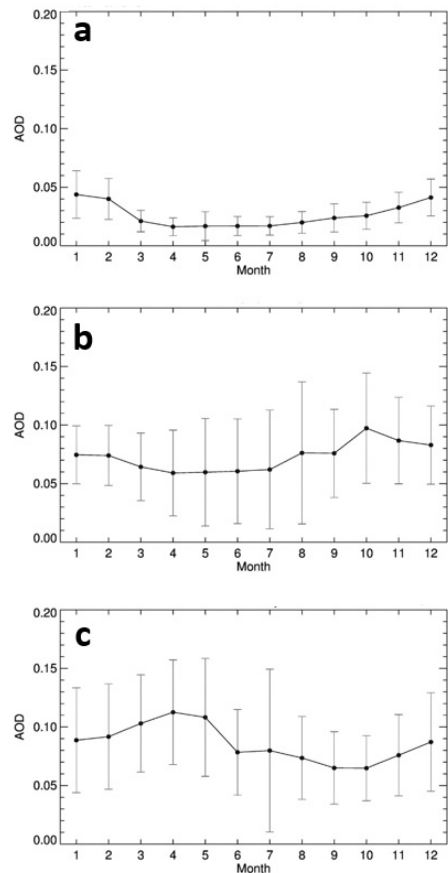


Fig. 3. The monthly mean of AOD in (a) Jangbogo, (b) King Sejong, and (d) Dasan station. Vertical bars indicate the extent of monthly standard deviation.

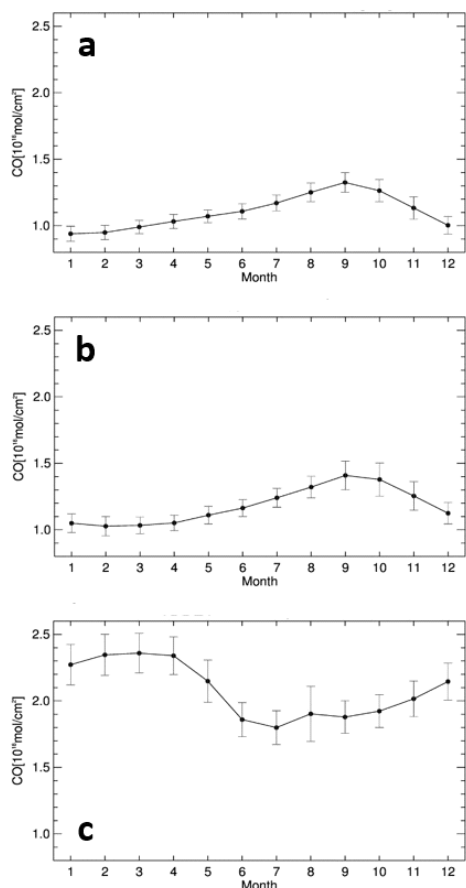


Fig. 4. The monthly mean of carbon monoxide (CO) in (a) Jangbogo, (b) King Sejong, and (d) Dasan station. Vertical bars indicate the extent of monthly standard deviation.

다산 기지에서는 AOD의 연중 최고치가 3, 4, 5월 봄철에 집중 되는 것을 확인할 수 있는데 이는 이 시기 북극에서 주로 발생하는 북극 연무(Arctic haze) 현상과 연관된 것으로 짐작되며(Shaw, 1995), 일부 지상관측 자료의 분석결과(Tomasi et al., 2007) 와도 유사성을 보인다. 이후 급격하게 AOD값은 감소하면서 10월 부근에 최솟값을 보이다가 다시 겨울로 접어들면서 증가하는 모습을 보인다. 이와 같은 월별 변동성은 북반구 상공 오존 전량의 변화 경향(Park et al., 2011)과도 상당히 흡사한 면을 보이고 있는데, 향후 좀 더 넓은 범위의 대기 순환 특성과 연계하여 살펴볼 필요가 있는 것으로 여겨진다.

앞서 언급했듯이 자체적인 오염원이 거의 존재하지 않는 남북극 상공의 대기 에어로졸 농도의 변동성은 낮은 위도 지역에서의 배출량에 크게 영향을 받을 수 있다. 남북극 부근에서 가장 높은 에어로졸을 배출할 수 있는 현상으로 자연 화재 및 생체 연소 과정을 생각할 수 있으므로, 그 과정에서 배출되는 일산화탄소 자료의 월별 특성을 AOD 변동성에 비교하여 분석을 진행하였다 (Fig. 4). 그림 4a, 4b를 보면 남극 장보고 및 세종 과학기지 상공의 일산화탄소 농도는 유사하게 9월에 최댓값, 남반구 여름철에 최솟값을 나타내는 특성을 보이고 있는데 이는 선행연구에서 제시된 남반구 지역 지상관측 일산화탄소 크기의 변동성(Edwards et al., 2006)과도 일치하는 것으로 확인된다. 반면 북극의 경우는 2, 3, 4월에 높게 나타나고 6, 7월 여름에 낮게 나타나는 현상을 보이는데 이 역시 겨울, 초봄에 북반구에서 일산화탄소 배출량이 높게 나타나는 경향을 보인 선행연구 내용(Koo et al., 2017)과 일관성을 보인다.

AOD 변화와 일산화탄소의 연관성이 계절적으로 어떻게 나타나는지 살펴보고자 3-4-5월(March-April-May, MAM), 6-7-8월(June-July-August, JJA), 9-10-11월(September-October-November, SON), 그리고 12-1-2월(December-January-February, DJF)로 구분하여 분위수를 계산, 비교해보았다 (Fig. 5). 비교 결과 북극 다산 및 남극 세종 과학 기지의 경우는 AOD값과 일산화탄소 크기의 변화 양상이 상당히 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 두 기지 모두 AOD와 일산화탄소의 가장 높은 수치를 봄(북반구에서는 MAM, 남반구에서는 SON)에 공통적으로 보이고 있음이 흥미로운 부분인데 생체연소에 의한 블랙카본 배출량이 봄에 높게 나타나는 경향이 있다는 선행연구(Bond et al., 2013) 결과와 연관성이 높은 것으로 보인다. 반면 장보고 기지에서는 AOD와 일산화탄소의 계절 변동성의 상관성이 오히려 반대로 나타나는 경향이 있는(AOD가 높은 시기에 반대로 일산화탄소가 낮은 경향) 것처럼 보인다.

그림 6은 1월부터 12월까지 AOD와 일산화탄소 기후학적 월 평균 값 사이의 상관관계를 살펴본 그림으로서 앞선 분석 결과와 마찬가지로 남극 세종 및 북극 다산 기지에서의 AOD와 일산화탄소의 양의 상관관계가 잘 나타나고 있다. 특히 다산 기지의 경우 그 상관관계가 훨씬 더 뚜렷하게 나타나는 것

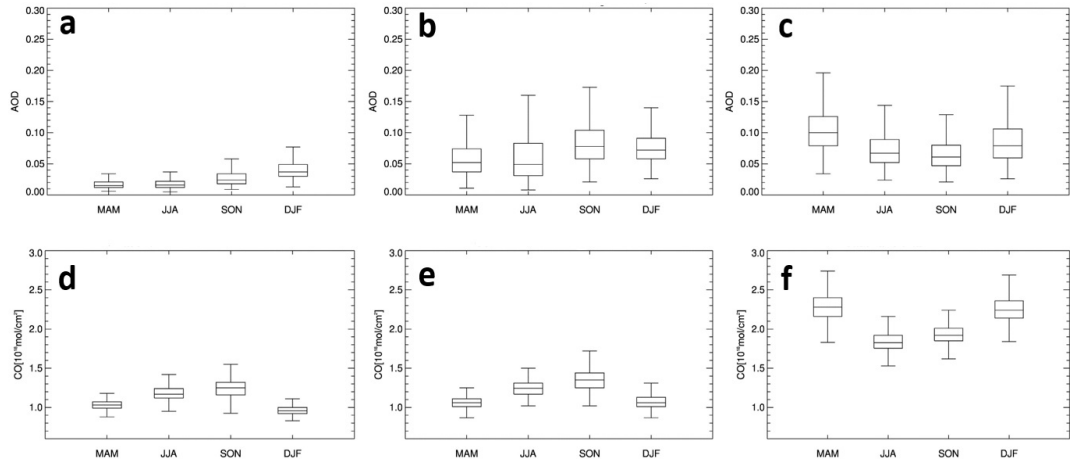


Fig. 5. The seasonal mean of AOD in (a) Jangbogo, (b) King Sejong, and (d) Dasan station, and seasonal mean CO in (d) Jangbogo, (e) King Sejong, and (f) Dasan station. Vertical bars indicate the extent of seasonal standard deviation.

을 통해 북극 에어로졸 변동성에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 생체 연소 및 화재에서 발생하는 대기 오염 물질이라는 사실이 분명히 드러난다. 특이한 부분은 장보고 기지에서 보이는 AOD와 일산화탄소 사이의 상관관계 지수가 약 -0.47 정도로 음의 상관성을 나타낸다는 점이다. 즉 장보고 기지 지역 대기 에어로졸 변동성이 중위도 지역으로부터의 수송의 영향에 크게 좌우되지 않음을 의미한다.

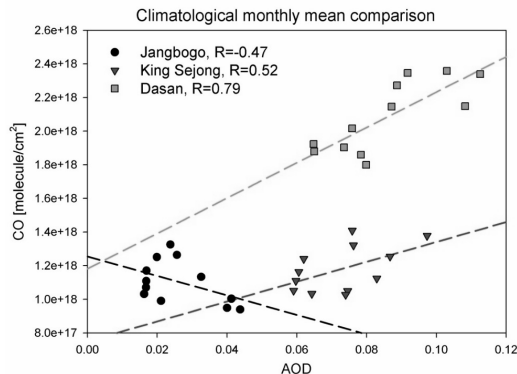


Fig. 6. Correlations between monthly mean AOD and CO at Jangbogo (circle), King Sejong (triangle), and Dasan (square) stations

월별, 계절별 변동성 분석에 이어서 AOD값이 극

지 기지 상공에서 장기간 어떻게 변해왔는지를 살펴해보았다. 최근의 변동성에 중점을 두고자 2000년대 시점을 기준으로(2001년부터 2016년까지) 세 과학기지의 AOD 값에 대한 분석을 진행하였다(Fig. 7). 에어로졸 농도 장기간 변동성의 분석에서 평균값을 사용할 경우 특징적인 고농도/저농도 사례 또는 높은 오차들이 걸러지지 않고 모두 포함될 수 있기 때문에 중간값(median)과 같은 백분위수(percentile) 통계값을 이용해서 분석하는 것이 보다 더 정확할 수 있다는 최근 연구 결과(Yoon et al., 2016)에 근거하여 본 연구에서도 매년 MERRA-2 AOD의 10th, 50th, 90th 백분위수 값을 선택하여 그 추이를 살펴보는 분석을 진행하였다. 높은 백분위수(90th percentile) 값은 고농도 사례의 변동성을, 낮은 백분위수(10th percentile) 값은 배경대기 오염도의 변동성을 살펴볼 수 있는 지표라고 볼 수 있다.

그림 7의 패턴을 전체적으로 살펴보면 남북극 과학 기지 상공에서 중간값의 시간적 변동성은 모두 미약하게 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 이런 특성은 과거 2000년대 초까지의 AOD 감소 추세 분석 결과(Tomasi et al., 2007)와 잘 비교해서 살펴볼 필요가 있다. 기본적으로 전반적인 증가 추세 결과는 극지 대기 에어로졸의 오염도가 최근 조금씩 증가하고 있는 상황을 의미하는 것으로 생각된다.

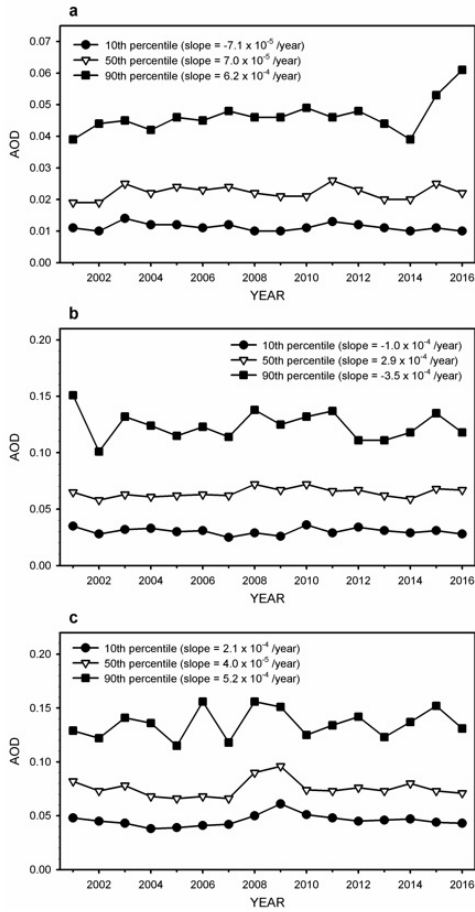


Fig. 7. Trend of annual 10th (circle), 50th (triangle), and 90th (square) percentiles of AOD at (a) Jangbogo, (b) King Sejong, and (c) Dasan stations

남극 기지 상공보다는 북극 다산 기지 상공에서 증가하는 트렌드가 조금 더 일반적으로 잘 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 10th, 50th, 90th percentile AOD가 모두 증가하는 특성으로 보아 고농도 에어로졸의 배출이 높은 상황이 좀 더 빈번하게 발생하면서 전체 배경대기 오염농도의 상승을 이끌고 있는 것으로 생각할 수 있다. 다만 최근 북반구에서의 일산화탄소 배출량은 꾸준한 감소 추이를 보이기 때문에(Worden et al., 2013) 앞서 언급한 AOD와 일산화탄소의 상관성 이외의 다른 원인을 생각해볼 필요가 있을 것으로 보인다.

이러한 추세 분석을 선형 회귀 분석을 이용해 계절별로 나누어서 살펴보고 그림 8처럼 정리해보았다. 그림 8에서는 AOD 증가 추세가 10⁻⁴/년 보다 큰 변화가 존재하는지 여부를 기준으로 하여 증가/감소 추세를 강한 증가(strong increase, SI), 약한 증가(weak increase, WI), 약한 감소(weak decrease, WD), 강한 감소(strong decrease, SD) 4단계로 구분하여 표시하였다. 흥미롭게도 세 과학기지 상공에서 전반적으로 유사하게 MAM, JJA 시기에 AOD의 강한 감소를, SON, DJF 시기에 AOD의 강한 증가 추세를 주로 보이는 것을 확인할 수 있다. 남극 장보고 기지에서는 DJF 시기에 강한 증가, MAM 시기에 강한 감소가 나타나고 나머지 시기에는 크게 특별한 추세가 나타나지 않는 편이다. 한편 남극 세종 기지는 남극 겨울에 해당하는 JJA 기간을 제외하고는 나머지 계절에서 모두 일반적인 AOD 증가 추세를 보이고 있어서 훨씬 더 대기 에어로졸 농도 증가의 특징

	Jangbogo			King Sejong			Dasan		
	10th	50th	90th	10th	50th	90th	10th	50th	90th
MAM	WD	SD	SD	SI	SI	SD	SD	SD	SD
JJA	WD	WI	WD	SD	SD	SD	WD	SD	WD
SON	WI	WI	SI	WD	SI	SI	SI	SI	SI
DJF	SI	SI	SI	SI	SI	WI	WD	SI	SI

Fig. 8. Seasonal trends of 10th, 50th, and 90th percentile AOD at Jangbogo, King Sejong, and, Dasan stations. SI implies a strong AOD increase ($> 10^{-4}$ /year), WI implies a weak AOD increase($< 10^{-4}$ /year), SD implies a strong AOD decrease($< -10^{-4}$ /year), and WD implies a weak AOD decrease($> -10^{-4}$ /year).

을 잘 보여준다. 이런 추세 분석 결과 역시 같은 남극임에도 장보고 기지와 세종 기지 사이 대기 에어로졸 변동성을 설명하는 원인이 다를 수 있음을 보여주고 있다.

북극 다산기지의 경우 가을, 겨울에 해당하는 SON, DJF 기간에 AOD의 증가를, 봄, 여름에 해당하는 MAM, JJA 기간에 AOD의 감소 추이를 보이고 있는데, 앞서 북극에서 AOD와 일산화탄소의 최고치 모두 봄에 나타나고 있다는 분석결과와(Fig. 5) 일반적으로 북반구 일산화탄소 변동 추이가 감소세에 있음을(Worden et al., 2013) 고려할 때, 화재 및 생체 연소 현상의 증가 및 관련 오염입자 배출의 증가로 다산 기지 AOD 변동성을 설명하기는 어려울 것으로 보인다. AOD가 낮은 SON 시기에 강한 증가 추세를 보이는 것을 감안하면 인위적 활동의 증가에 의한 배경대기 에어로졸 오염도의 증가라는 측면을 고려해야 할 것으로 보인다. 향후 추가 연구를 통해 관련 영향 인자를 분석해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 남극 장보고 및 세종 과학 기지, 북극 다산 기지 상공의 대기 에어로졸 농도 변화를 살펴보기 위해 MERRA-2 재분석 자료의 AOD 값을 분석해보았다. 북극 다산 기지와 남극 세종 과학 기지에서는 AOD의 크기가 봄에 가장 높게 나타나는 특성을 확인할 수 있었다. 반면 남극 장보고 기지 상공 AOD는 다른 두 지역보다 훨씬 더 낮게 나타났으며 남반구 여름 시기에 가장 높은 값을 나타내는 차이점을 보였다. 장보고 기지에서 다른 두 기지에 비해 AOD 월별 변동성 작게 나타나는 편인데 흔히 월별 변동성에 영향을 미치는 대규모 대기 순환 및 대기 광화학 작용의 강도가 어느 정도 중위도의 영향 범위에 있는 극지 지역과 달리 장보고 기지와 같이 고립된 지역에서는 큰 영향력을 발휘하지 못하기 때문인 것으로 보인다. 극지 대기 에어로졸 농도에 큰 영향을 줄 수 있는 중위도 지역 화재/연소 과정의 영향력을 살펴보기 위해 AIRS 위성 관측 일산화탄소 자료를 이용하여 비교 분석을 진행한 결과, 북극 다산 기지 및 남극 세종 기지의 AOD 변화량은 일산화탄소와 높은 양의 상관성을 나타내는 반면

장보고 기지에서는 이런 특성을 발견하기 어려웠다.

최근 극지 대기 에어로졸 농도의 변화를 살펴보기 위해 2001년부터 최근까지의 AOD 변동성을 살펴보고 세 관측소에서 모두 점진적인 AOD 증가 추세를 발견할 수 있었다. 다만 계절별 추세 분석 결과 AOD 및 일산화탄소가 높게 나타나는 계절이 아닌 시기에 오히려 AOD가 크게 증가하는 경향을 확인할 수 있었기에 화재/연소로 인해 배출되는 물질 이외의 다른 대기 입자 배출원(예컨대 산업 현장 및 인위적인 활동에 의한 배출) 향후 추가 분석을 통해 생각해볼 필요가 있을 것으로 보인다. 이 과정에서 특히 생체연소 과정과 연관성이 큰 블랙카본 및 갈색카본(brown carbon)과 같은 입자상 물질과 메탄올(CH_3OH) 및 포름알데히드(CH_2O) 같은 탄화수소(hydrocarbon) 계열 기체상 물질의 관측이 AOD 변화량 이해에 도움이 될 것으로 보인다. 이와 같은 연구들은 현재 남극 기후 변동성을 살펴보는 과정에서도 중요한 정보를 제공해줄 수 있을 것으로 생각된다. 특히 성층권 대기 오존의 복원이 예상되고 있는 현재, 그에 따른 기후 변동성이 극지 대기 조성에 미치는 영향 및 명확히 설명되지 않은 여러 극지 대기 기후의 특성들(예: 서남극과 동남극의 대기 현상 차이)을 살펴보는 데 도움이 될 수 있는 정보로서 본 연구의 의미를 생각해볼 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 극지연구소 위탁과제(PE17010)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 이 연구의 일부는 기상청 기상기술개발사업(KMIPA2015-5010)의 지원으로 수행되었습니다(This work was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI, PE17010). Also, this work was funded by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program under Grant KMIPA KMIPA2015-5010).

참고문헌

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Bernsten, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, S. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunta, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G., and Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 118, 5380-5552.
- Edwards, D. P., Emmons, L. K., Gille, J. C., Chu, A., Attié, J.-L., Giglio, L., Wood, S. W., Haywood, J., Deeter, M. N., Deeter, M. N., Massie, S. T., Ziskin, D. C., and Drummond, J. R. (2006). Satellite-observed pollution from southern hemisphere biomass burning, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111, D14312.
- Koo, J.-H., Walker, K. A., Jones, A., Sheese, P. E., Boone, C. D., Bernath, P. F., and Manney G. L. (2017). Global climatology based on the ACE-FTS version 3.5 dataset: Addition of mesospheric levels and carbon-containing species in the UTLS, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 186, 52-62.
- Law, K. S., and Stohl, A. (2007). Arctic air pollution: origins and impacts, *Science*, 315, 1537-1540.
- Li, F., Ginoux, P., and Ramaswamy, V. (2008). Distribution, transport, and deposition of mineral dust in the southern ocean and Antarctica: contribution of major sources, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113, D10207.
- McConnell, J. R., Edwards, R., Kok, G. L., Flanner, M. G., Zender, C. S., Saltzman, E. S., Banta, J. R., Pasteris, D. R., Carter, M. M. and Kahl, J. D. W. (2007). 20th-Century Industrial Black Carbon Emissions Altered Arctic Climate Forcing, *Science*, 317, 1381-1384.
- Park, S. S., Kim, J., Cho, N., Lee, Y. G., and Cho, H. K. (2011). The variations of stratospheric ozone over the Korean peninsula 1985~2009, *Atmosphere*, 21, 349-359.
- Randles, C. A., Da Silva, A. M., Buchard, V., Colarco, P. R., Darmenov, A., Govindaraju, R., Smirnov, A., Holben, B., Ferrare, R., Hair, J., Shinozuka, Y., and Flynn, C. J. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: system description and data assimilation evaluation, *Journal of Climate*, 30, 6823-6850.
- Shaw, G. E. (1995). The Arctic haze phenomenon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76, 2403-2413.
- Stohl, A., and Sodemann, H. (2010). Characteristics of atmospheric transport into the Antarctic troposphere, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 115, D02305.
- 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., Toledano, C., Cachorro, V. E., Ortiz, P., de Frutos, A. M., Blindheim, S., Frioud, M., Gausa, M., Zielinski, T., Petelski, T., and Yamanouchi, T. (2007). Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 112, D16205.
- Worden, H. M., Deeter, M. N., Frankenberg, C., George, M., Nichitiu, F., Worden, J., Aben, I., Bowman, K. W., Clerboux, C., Coheur, P. F., de Laat, A. T. J., Detweiler, R., Drummond, J. R., Edwards, D. P., Gille, J. C., Hurtmans, D., Luo, M., Martínez-Alonso, S., Massie, S., Pfister, G., and Warner, J. X. (2013). Decadal record of satellite carbon monoxide observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 837-850.

Yoon, J., Pozzer, A., Chang, D. Y., Lelieveld, J., Kim, J., Kim, M., Lee, Y. G., Koo, J.-H., Lee, J., and Moon, K. J. (2016). Trend estimates of AERONET-observed and model-simulated AOTs between 1993 and 2013, *Atmospheric Environment*, 125, 33-47.