

해안지역 에어로졸 관측 시 건조공기 희석 방식의 제습 효과 분석

김정은*

국립기상과학원 예보연구부

(접수일: 2024년 10월 16일, 수정일: 2024년 11월 6일, 게재확정일: 2024년 11월 8일)

Analysis of Aerosol Dehumidification Efficiency Using the Dry Air Dilution Method at Anmyeon-do

Jeong Eun Kim*

Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 16 October 2024; revised 6 November 2024; accepted 8 November 2024)

Abstract This study evaluates the efficiency of dry air dilution method as an alternative to traditional heating methods for aerosol sample conditioning in high-humidity environment. The system was installed at Anmyeon-do Global Atmosphere Watch (GAW) station, where high humidity levels and elevated dew point temperatures are typical, especially during summer. From 2017 to 2018, when heating method was used, it was challenging to maintain the relative humidity (RH) below 40% in the aerosol sample inlet, with the RH frequently exceeding 60% during July and August. After introducing the dry air dilution system in 2019 and 2020, the RH in the instrument remained below 40% for most of the year, including during peak humidity periods. Analysis showed that, compared to heating, the dry air dilution system achieved an average RH reduction rate of 45~72% in high-humidity conditions, while heating achieved only 23~60%. Despite higher initial costs, the dry air dilution system can be a cost-effective solution for long-term aerosol observations, ensuring reliable data quality in coastal and high-humidity environments. Future studies should focus on optimizing the system for diverse climate conditions to broaden its applicability in global atmospheric monitoring networks.

Key words: Aerosol sampling, Dilution drying, Dry air dilution, Heated inlet

1. 서 론

에어로졸은 태양빛을 산란, 흡수하며, 구름 알베도나 구름 수명, 특성을 변화시키거나, 검댕 등은 눈이나 얼음의 알베도를 변화시킴으로써 지구 복사 평형을 변화시키는 등 복사강제력으로 작용한다(IPCC, 2013). 이와 같은 에어로졸-태양복사의 복잡한 상호작용은 기후예측에 있어 큰 불확실성을 제공할 수 있다. 이러한 이유로 세계기상기구(World Meteorological

Organization; WMO) 지구대기감시(Global Atmosphere Watch; GAW) 프로그램에서는 기후강제력과 관련한 신뢰도 높은 에어로졸의 시공간 분포 특성을 결정하려는 노력을 하고 있다(WMO, 2016). WMO/GAW 에어로졸 과학자문위원회에서는 전지구적으로 장기간 연속 관측되어야 할 우선순위가 높은 에어로졸 측정 항목으로 총대기 기주 특성(aerosol optical depth, 후방산란계수의 연직분포)과 지상의 광산란계수와 광흡수계수 등 에어로졸 광학 특성, 그리고 입자크기와 질량농도 등 물리 특성, 그리고 화학 특성을 제안한다.

에어로졸은 성분에 따라 특정 상대습도에서 수분을 흡수하여 크기와 광학적 특성이 변하므로(Tang, 1996; Wallace and Hobbs, 2006; Lewis et al., 2009) 지상 설치(in-situ) 에어로졸 관측에서는 대기 중 에어로졸을

*Corresponding Author: Jeong Eun Kim, Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6564, Fax: +82-64-738-6514
E-mail: narci76@korea.kr

건조한 상태로 측정하며, 이는 관측 품질을 보증하는 중요 조건 중 하나이다. 따라서 에어로졸의 흡습성이 광학적 특성에 미치는 영향을 최소화하고, 다른 지점 간 에어로졸 특성을 비교할 수 있도록 관측장비에 유입되는 공기의 상대습도를 낮추는 것이 필요하다. 세계기상기구 지구대기감시프로그램에서는 상대습도 40% 이하로 유입 공기를 조절하도록 권고하며, 이를 위해 제안하는 대기 중 에어로졸 유입 공기의 건조 방법은 1) 실리카 확산 건조, 2) 건조공기 희석, 3) 멤브레인 건조, 4) 가열(heating) 등 네 가지이다(WMO, 2016). 각 건조 방법의 장단점을 알고 관측 대상이나 환경에 맞는 적절한 방법을 선택하는 것이 중요하다. 실리카 확산 건조는 유입 공기가 화학적 건조제인 실리카겔이 담긴 튜브를 통과하게 하여 수분을 제거하는 것으로 상대적으로 적은 비용으로 관리가 가능하지만 건조 능력이 떨어지는지 상대습도를 모니터링하면서 주기적으로 재생, 교체하여 사용해야 한다. 또한 건조제를 통과하는 동안 초미세영역의 에어로졸은 확산으로 인한 손실(diffusion loss) 가능성이 있다(Baron and Willeke, 2001). 건조공기 희석 방식은 압축 시스템(compressor)으로 생성된 건조한 공기를 여과하여 측정하고자 하는 공기에 유입시켜 희석하는 방법으로, 따뜻한 해양 지역에서 사용된다(Andrews, 2019). 건조한 공기를 직접 주입함으로써 이슬점 온도를 낮추기 때문에 습도를 효과적으로 조절할 수 있으나, 정확한 유량을 감시, 기록하고 희석된 건조 공기의 비율만큼 사후 농도 보정이 이루어져야 한다. 멤브레인 건조의 경우에는 대체로 적은 유량으로 측정하는 장비에 사용이 가능하며 고가의 멤브레인을 주기적으로 교체해야 하므로 유지 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 이 방식에서는 Nafion membrane을 적용한 상용화 제품들이 있다. 가열방식은 가열튜브의 설치가 간편하고 유지관리가 용이하기 때문에 많은 관측소에서 적용되고 있다. 그러나, 높은 온도로 인한 반휘발성(semi-volatile) 에어로졸의 손실 가능성이 있으므로, 이를 최소화하기 위해 40°C가 넘지 않도록 적절하게 가열해야 한다. 또한, 차가운 실내의 전도성 튜브를 통과할 때 재응축되지 않도록 인렛 단열에 신경을 써야 한다. 이러한 이유 때문에 가열 방식은 WMO GAW 에어로졸 세계표준센터(World Calibration Center for Aerosol Physics; WCCAP)에서는 가장 낮은 수준으로 권고하고 있는 건조 방식이다. 안면도 지구대기감시소에서는 에어로졸 광학특성 관측 시 가열방식을 사용하였으나, 2018년에 실시된 WMO-GAW WCCAP의 현장 점검 권고에 따라 에어로졸 광학 특성 관측 장비에 건조공기 희석을 통한 에어로졸 제습 시스템을 구축하였다.

본 연구에서는 가열방식의 대안으로 도입한 건조공

기 희석 방식의 운영 체계를 소개하고, 이를 통해 안면도의 에어로졸 광학 특성 관측 시 유입공기의 제습 효과를 분석하고자 한다.

2. 관측 방법

2.1 관측 장소의 기상 특성

안면도 지구대기감시소의 기온은 7월과 8월에 최고이며, 9월까지 20°C 이상을 유지하다가 천천히 하강한다(Fig. 1a). 상대습도 역시 7월과 8월에 70% 이상으로 매우 높게 유지되고 있으며, 특히 2018년과 2019년에는 90%를 초과하는 사례도 다수 존재한다. 5월과 9월에는 상대습도의 변동성이 크며, 일부 기간에 50% 이하로 내려가는 경우도 관측된다(Fig. 1b). Figure 3은 안면도의 기온과 상대습도로부터 계산한 이슬점 온도의 연중 변화이다. 이슬점온도는 여름철(6~8월) 동안 20°C 이상으로 높은 수준을 보인다(Fig. 1c). 특히 2017년과 2018년에는 24°C 이상으로 상승한 경우도 관측되었다. 반면, 여름철을 제외하면 이슬점온도가 15°C 이하로 내려가는 경우가 대부분이므로, 건조한 상태를 유지하기 쉬운 환경으로 해석할 수 있다. 위 자료들을 통해 안면도의 여름철은 고온 및 고습 환경이 특징적이므로 에어로졸의 흡습 성장이 매우 활발하게 나타날 것으로 추정할 수 있으며, 특히 이슬점온도가 높아지면 에어로졸 시료의 상대습도를 조절이 어려워질 수 있다.

2.2 건조공기 희석 방식의 에어로졸 제습 시스템

건조공기 희석 방식은 압축 시스템을 통해 생성된 건조 공기를 외부 공기와 혼합한 후 장비에 유입시키는 방식이다. 이를 위해, 본 연구에서는 건조공기를 생성하는 장비(compressor)로 Model CDA10 clean dry air package (Puregas 社)를 설치하였다. 이 장치는 흡입된 주변 공기를 압축한 후, 흡착제(dessicant)를 통과시켜 공기의 수분을 제거하고 필터를 거쳐 깨끗한 건조 공기를 생성한다. 이후, 이 깨끗한 건조 공기는 에어로졸 인렛으로 유입되어 에어로졸 시료를 희석하여 상대습도를 조절한다.

건조공기 희석을 통한 에어로졸 관측 시 가장 중요한 요소는 관측 농도를 보정할 수 있도록 건조공기의 정확한 유량을 측정하고 기록하는 것이다. Figure 2에 제시된 것처럼 건조공기는 인렛에 유입되기 전의 유량과, 관측장비가 흡입하는 전체 유량은 유량계(TSI4146)를 통해 정확히 측정된다. 이 유량계들은 표준유량계를 이용하여 주기적으로 유량을 교정하여, 보정된 후에도 대기 중 에어로졸 농도를 보다 정확히 산출할 수 있게 한다.

Figure 2에서 F0는 외부에서 유입된 에어로졸이 포

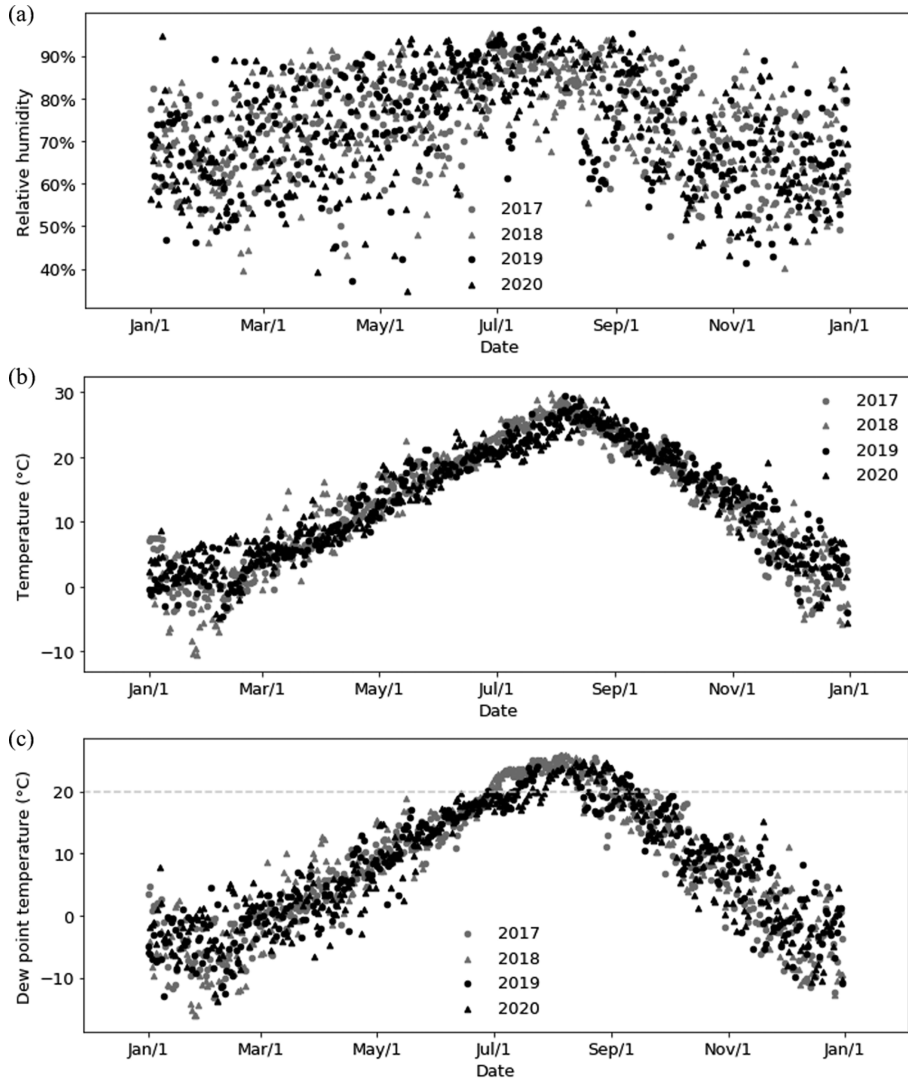


Fig. 1. Annual variation of (a) relative humidity, (b) temperature and (c) dew point temperature at Anmyeondo Korea Global Atmosphere Watch from 2017 to 2020.

함된 시료의 유량을 의미하고, 이 공기는 건조공기 (F_1)와 혼합되어 관측장비로 유입된다(F_2). 따라서 실제 측정하고자 하는 외기의 에어로졸 시료 유량(F_0)은 관측장비 유량과 건조공기 유량의 차이($F_2 - F_1$)로 산출되며, 외부에서 유입된 에어로졸의 농도(C_a)는 장비에서 관측된 농도(C_m)으로부터 아래 식(1)과 같이 보정하여 사용한다.

$$C_a = C_m \times \frac{F_2}{F_2 - F_1} \quad (1)$$

건조공기의 희석 비율이 높아지면, 실제 농도가 낮

게 평가될 가능성이 있으므로 건조공기의 유량은 관측장비 유량의 1/4~1/3 수준으로 조절하였다. 유량의 조절은 Fig. 2에서와 같이 rotameter를 이용하였으며, 유량 조절이 가능한 밸브를 사용할 수도 있다.

건조공기 유입에 따라 상대습도 조절 효과를 확인하기 위해 네펠로미터(TSI Model 3563) 내부에서 관측된 상대습도 자료를 활용하였다. 상대습도의 연중 변화는 유사하지만, 매해 상대습도는 다르므로, 외기의 상대습도에 대한 상대적 변화율을 평가하였다. 2017~2018년은 에어로졸 유입공기 제습을 위해 주로 가열방식을 사용하였고, 2019년부터는 건조공기 희석

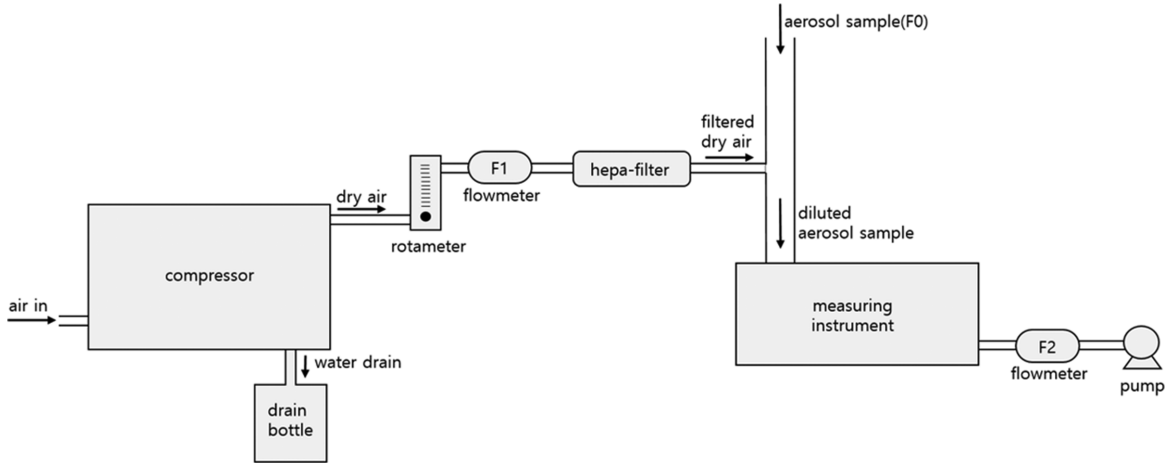


Fig. 2. Schematic of aerosol sample dilution system.

방식으로 대체하였다.

3. 결과 및 토의

가열방식을 주로 사용하던 2017년과 2018년에 관측된 네펠로미터 내부의 상대습도는 여름철을 제외하

고는 대체로 40% 이하를 유지하였으나, 7월과 8월에는 최대 65.5%까지 증가하였다(Fig. 3b). 이 기간 동안 관측일의 87%에서 일평균 상대습도가 40%를 초과하였으며, 그 중 5일은 60%를 초과하였다(Fig. 3a). 이는 가열방식만으로는 이슬점온도가 높은 7월과 8월에 에어로졸 시료의 상대습도를 원하는 수준으로 조

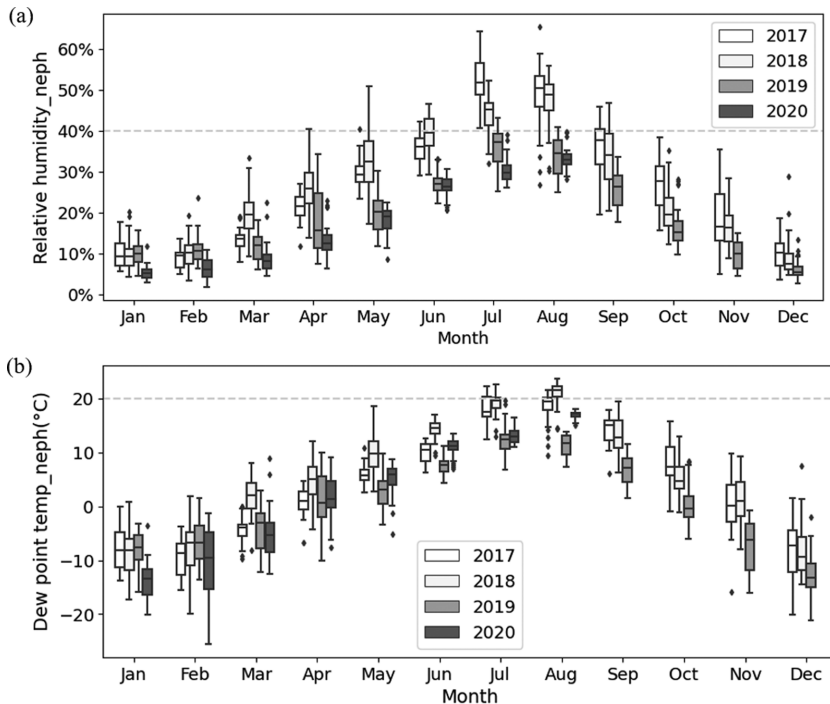


Fig. 3. Daily variation of (a) relative humidity and (b) dew point temperature inside the nephelometer at Anmyeondo Korea Global Atmosphere Watch from 2017 to 2020.

절하는 것이 매우 어렵다는 것을 보여준다.

네펠로미터 장비 내부는 상대습도가 40% 이하로 유지되도록 최대 10°C까지 높아지도록 가열이 되고 있음에도 불구하고(Anderson et al., 1998), 관측된 이슬점온도는 최대 24°C에 달하여 관측실 내부 기온인 22~25°C 와 유사하였다(Fig. 3b). 이로 인해, 제습된 에어로졸의 이슬점온도가 관측실 내부 기온보다 높아지는 경우 응축이 발생할 가능성이 있으므로, 제습 후의 이슬점온도와 관측실 내부 온도 차이를 충분히 고려할 필요가 있다.

반면, 건조공기 희석 방식으로 유입 공기를 제습한 2019년과 2020년의 네펠로미터 내부 상대습도는 대부분의 기간의 일평균 상대습도가 40% 이하로 유지되었으며, 40%를 초과한 날은 전체 기간의 7.2%인 8일에 불과했다(Fig. 3a). 이 시기의 네펠로미터 내부의 이슬점 온도는 최대 19.6°C로, 실내온도보다 충분히 낮게 유지되어 에어로졸 응축 가능성을 최소화하였다. 2019년부터 2020년까지 이슬점온도 변화량이 $7.4 \pm 1.8^\circ\text{C}$ 로, 2017~2018년의 $3.9 \pm 1.8^\circ\text{C}$ 보다 약 2배 향상된 효과라고 할 수 있다(Figs. 1c, 3b).

각 제습 방식의 상대적 변화율(%)에서도 건조공기 희석 방식이 더 효율적인 것을 확인하였다. 특히, 외기 상대습도가 80% 이상인 여름철의 경우, 가열방식은 약 23~60%의 감소를 보인 반면, 건조공기 희석 방식의 경우 45~72% 감소율을 보여, 고습 환경에서 건조공기 희석 방식이 에어로졸 시료의 상대습도를 더 효과적으로 제어할 수 있음을 나타낸다(Fig. 4). 연중 다양한 습도 조건에서도, 건조공기 희석 방식으로 상대적으로 안정적인 제습 성능을 보였다. 봄, 가을철의 상대적으로 낮은 습도 환경(30~60%)에서도 건조공기 희석 방식을 통한 상대습도 감소율은 약 61~92%로, 가열 방식을 통한 상대습도 감소율인 45~90%에 비해 효과적으로 나타났다. 한편, 겨울철의 습도 감소율은 제습 방식에 따른 차이가 크게 두드러지지 않았다.

제습 방식의 계절별 효율을 종합적으로 평가해보면 가열 방식은 봄, 가을, 겨울과 같이 상대적으로 낮은 습도 환경에서도 가열 방식으로 비용 효율적인 제습이 가능할 수 있으나, 여름철 고습 환경에서는 안정적으로 상대습도를 낮추기 어려워 장기적인 데이터 품질을 보증하기에는 한계가 있을 수 있다. 특히, 기온이 낮은 계절에는 가열 방식이 에어로졸 반환발성 성분의 손실을 일으킬 가능성이 있으므로, 이러한 문제를 방지하기 위해서도 건조공기 희석 방식을 상시적으로 사용하는 것이 더욱 적합할 수 있다.

다만, 관측소의 환경이나 운영 상황에 따라 제습 방식의 성능이 다를 수 있으므로 향후 연구에서는 다양한 기후 조건에서 두 제습 방식을 동시에 비교하여 각 방식의 계절별 제습 효율성을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 특히, 여름철의 고습 조건과 겨울철의 저온 조건에서 제습 방식에 따른 에어로졸 특성의 변화와 측정 오차를 분석하여, 장기적으로 신뢰성 있는 에어로졸 관측 자료를 확보할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 가열 방식을 대체하여 도입한 건조공기 희석 방식의 에어로졸 제습 효과를 평가하였다. 2017년과 2018년의 가열 방식 사용 시 상대습도를 40% 이하로 유지하는 데 한계가 있었으나, 2019년과 2020년에 건조공기 희석 방식을 도입한 후에는 대부분의 기간 동안 상대습도 40% 이하를 유지할 수 있었다. 특히, 건조공기 희석 방식의 도입은 실내 기온과 장비 내부 이슬점온도 차이를 줄여 장비 내부에서 에어로졸이 응축될 가능성을 크게 감소시켜 장기적인 관측 자료 품질을 보장할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 습도가 높은 해안가 환경에서 기존 제습 방식보다 건조공기 희석 방식이 장기적으로

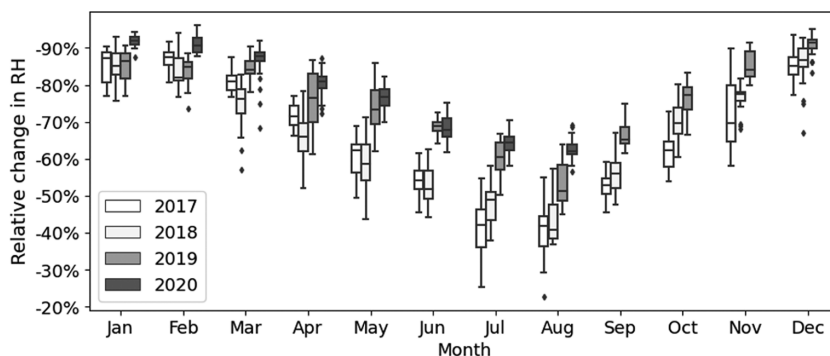


Fig. 4. Relative change (%) of relative humidity of the nephelometer (dehumidified) to that of ambient air from 2017 to 2020.

더 효과적임을 보여준다.

다만, 초기 설치 비용이 다른 방식에 비해 높다는 점은 단점으로 작용할 수 있으나, 장기적인 유지 비용이나 운영 효율성을 고려했을 때 도입의 경제적 타당성은 충분하다. 또한, 대기 중 에어로졸 농도가 낮은 상황에서는 건조공기 유입에 따른 농도 보정 오차가 발생할 가능성이 있으므로 건조공기 유입 비율을 최적화할 수 있는 정밀한 모니터링이 필요하다. 다양한 환경 조건에서 건조공기 희석 방식의 성능을 최적화하기 위해 시스템 개선 및 비용 효율성을 높이는 연구가 이어진다면 더욱 많은 관측소에서 적용될 수 있는 효과적인 에어로졸 제습 기법으로 자리매김할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구-재해기상·목표관측·분석 활용기술 개발(KMA2018-00123)」의 지원을 받았습니다. 연구에 활용된 장비의 설치와 운영을 지원해준 안면도 지구대 기감시소 최홍우 연구원에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Anderson, T. L., and J. A. Ogren, 1998: Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer. *Aerosol Sci. Technol.*, **29**, 57-69, doi:10.1080/02786829808965551.
- Andrews, E., and Coauthors, 2019: Overview of the NOAA/ESRL federated aerosol network. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 123-135, doi:10.1175/BAMS-D-17-0175.1.
- Baron, P. A., and K. Willeke, 2001: *Aerosol measurement*. 2nd Edition, Wiley and Sons, 170-180.
- Lewis, K. A., and Coauthors, 2009: Reduction in biomass burning aerosol light absorption upon humidification: roles of inorganically-induced hygroscopicity, particle collapse, and photoacoustic heat and mass transfer. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8949-8966, doi:10.5194/acp-9-8949-2009.
- Tang, I. N., 1996: Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients. *J. Geophys. Res.*, **101**, 19245-19250, doi:10.1029/96JD03003.
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 2006: Atmospheric science: an introductory survey. *Academic Press*, New-York, 345 pp.
- WMO, 2016: *WMO/GAW Aerosol measurement procedures, guidelines and recommendations*, 2nd Edition, 2016 (Gaw Report No.227), World Meteorological Organization, 93 pp.