

PM 관측을 위한 스파르탄 시스템

엄수진¹⁾ · 박상서^{1)*} · 김준²⁾ · 이서영²⁾ · 조예슬²⁾ · 이승재¹⁾ · Ehsan Parsa Javid¹⁾

¹⁾울산과학기술원 도시환경공학과, ²⁾연세대학교 대기과학과

(접수일: 2023년 1월 6일, 게재확정일: 2023년 2월 19일)

Introducing SPARTAN Instrument System for PM Analysis

Sujin Eom¹⁾, Sang Seo Park^{1)*}, Jhoon Kim²⁾, Seoyoung Lee²⁾, Yeseul Cho²⁾,
Seungjae Lee¹⁾, and Ehsan Parsa Javid¹⁾

¹⁾*Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Korea*

²⁾*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea*

(Manuscript received 6 January 2023; accepted 19 February 2023)

Abstract As the need for PM type observation increases, Surface Particulate Matter Network (SPARTAN), PM samplers analyzes aerosol samples for PM mass concentration and chemical composition, were recently installed at two sites: Yonsei University at Seoul and Ulsan Institute of Science and Technology (UNIST) at Ulsan. These SPARTAN filter samplers and nephelometers provide the PM_{2.5} mass concentration and chemical speciation data with aerosol type information. We introduced the overall information and installation of SPARTAN at the field site in this study. After installation and observation, both Seoul and Ulsan sites showed a similar time series pattern with the daily PM_{2.5} mass concentration of SPARTAN and the data of Airkorea. In particular, in the case of high concentrations of fine particles, daily average value of PM_{2.5} was relatively well-matched. During the Yonsei University observation period, high concentrations were displayed in the order of sulfate, black carbon (BC), ammonium, and calcium ions on most measurement days. The case in which the concentration of nitrate ions showed significant value was confirmed as the period during which the fine dust alert was issued. From the data analysis, SPARTAN data can be analyzed in conjunction with the existing urban monitoring network, and it is expected to have a synergetic effect in the research field. Additionally, the possibility of being analyzed with optical data such as AERONET is presented. In addition, the method of installing and operating SPARTAN has been described in detail, which is expected to help set the stage for the observation system in the future.

Key words: SPARTAN, In-situ measurement, Fine dust, Aerosol properties, Chemical ions

*Corresponding Author: Sang Seo Park, Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Unist-gil 50, Eonyang-eup, Ulju-gun, Ulsan 44919, Korea.
Phone: +82-52-217-2895, Fax: +82-52-217-0113
E-mail: sangseopark@unist.ac.kr

1. 서론

미세먼지는 공기 중에 떠다니는 아주 작은 입자상 물질(Particulate Matter; PM)을 말하며, 여러 배출원의 영향에 따라 그 종류와 농도가 상당히 달라진다(Park et al., 2003; Streets et al., 2009). 특히 인구 증가 및 산업형태의 고도화로 인해 오염물질의 배출량이 증가함에 따라(e.g., Fenger, 1999), PM은 현대 사회에서 주로 인위적 배출에 의한 대기오염의 척도로 고려되어 왔다(e.g., Costa et al., 2014; Zaman et al., 2021). PM은 입자의 직경에 따라 직경의 크기가 10 마이크로미터 미만인 PM_{10} 과 2.5 마이크로미터 미만인 $PM_{2.5}$ 로 구분된다. 특히 $PM_{2.5}$ 는 폐질환과 조기사망의 중요한 원인으로 꼽힌다(Li et al., 2018). 이는 크기가 작은 입자가 같은 질량농도일 때의 큰 입자보다 그 수와 표면적이 넓기 때문에 유해물질을 더 많이 흡착할 수 있으며, 작은 입자크기일 때 기관지로의 흡수가 더 쉽기 때문이다(Hsu et al., 2016). 실제로 $PM_{2.5}$ 의 농도가 입방 미터 당 10 마이크로 그램이 증가할 때 심혈관계 관련 질환의 입원 발생위험이 2%가 증가한다는 사실이 조사되기도 하였다(KEI, 2013). 이처럼 PM은 대기오염과 직접적으로 관련되어 인류의 건강에 중요한 영향을 끼치므로 그 특성을 정확하게 이해하고 파악할 필요가 있다.

$PM_{2.5}$ 는 주로 기체상 오염물질로부터 대기중 화학 반응을 통한 2차 생성에 의해 형성된다(Lingjuan, 2015). $PM_{2.5}$ 를 생성시키는 다양한 전구물질에는 황산화물, 질소산화물, 암모니아, 휘발성 유기화합물 등이 있는데, 이에 따라서 최종 PM 산물이 황산염, 질산염 등으로 나타난다(Kadowaki, 1986). 이러한 구성요소를 확인하기 위해서는 공기를 직접 채취해 분석하는 작업이 필요하나, 기존의 국내 PM 관측망으로는 한계가 있다. 한국환경공단의 에어코리아(AirKorea) 자료에 따르면, 현재 국내에서 PM 성분에 대한 자료를 제공하는 곳은 총 10개 지점점으로, 권역별로 한 개 지점밖에 존재하지 않는다. 또한 성분 분석에 대해서도 주요 금속성분(칼슘, 망간, 납, 니켈, 아연으로 총 5개종)에 대한 자료만 제공하고 있다. 화학이온의 분포를 이용하면 PM의 구성물질을 추정할 수 있는데, 예를 들어 Xuan et al. (2022)에서 미세 토양의 질량 추정을 위해 칼륨, 마그네슘, 나트륨, 알루미늄의 농도를 이용한 방정식이 사용되었다. Ni et al. (2013)에서는 해염입자의 질량 계산을 위해 나트륨, 마그네슘, 칼륨, 염화 이온이 이용되었다. 따라서 PM의 성분 별 분석이 자세하게 이루어지기 위해서 더 다양한 종류의 화학이온의 분석이 필요하다. 이온 관측의 필요성에 따라, in-situ 현장 관측을 기반으로 하는 자료 수집이 수행되어야 한다(e.g., Pathak et al., 2004).

스파르탄(Surface Particulate Matter Network; SPARTAN)은 시간단위 $PM_{2.5}$ 자료와 필터관측을 통해 입자의 화학정보를 모니터링 할 수 있는 관측 네트워크이다(<https://spartan-network.org>; Snider et al., 2015). 스파르탄은 다양한 화학이온에 대한 질량농도를 제공하는데, 이는 에어코리아에서 제공하는 주요 금속 성분뿐만 아니라, 황산염, 질산염, 나트륨, 인산염, 아질산염 등의 무기화합물에 대한 분석도 이루어진다. 또한 티타늄, 납, 비소, 카드뮴 등의 미량 원소들 또한 분석되어, 총 30개의 종에 해당하는 자료를 제공한다. 따라서 스파르탄 필터관측은 미세먼지의 주요 성분인 황산염, 질산염뿐만 아니라 미량 원소에 대해서도 다양한 자료 획득이 가능하다.

해당 측기 네트워크는 전세계에 약 35개의 측정소가 존재하며 국내에는 연세대학교(서울)와 울산과학기술원(울산)에서 현재 운영 중이다. 스파르탄은 기본적으로 실시간 에어로졸 광학측정장비인 Aerosol Robotic Network (AERONET) (Holben et al., 1998; <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>)과 함께 설치하여 운영된다. 이는 지상과 위성자료의 $PM_{2.5}$ 검증을 목적으로 구성되어(Snider et al., 2015), 동일한 관측 지점에서 연계분석이 가능하다는 장점을 가진다. 스파르탄 필터관측을 통해 미세먼지 농도 및 구성에 대한 지상 측정값을 제공하여 AERONET 광학자료의 검증에도 활용 가능하다. 따라서 화학이온의 질량농도 모니터링뿐만 아니라, 광학자료와 분석에서의 시너지 효과 또한 기대할 수 있다. 또한 국내의 기존 AERONET 관측지점에 새롭게 도입될 경우, 주요 화학이온 및 미량원소의 국내 자료 망 구축 또한 가능할 것으로 보인다.

본 기술노트는 스파르탄 관측 네트워크를 소개하고 해당 측기를 이용하여 향후 원활한 관측의 운영 기반을 마련하기 위해 작성하였다. 또한 스파르탄을 통해 관측된 연세대학교와 울산과학기술원의 초기 분석 결과에 대한 분석을 수행하였다. 이를 통해 기기의 세부 설정 및 작동법뿐만 아니라, 관측 운영 방법을 제시하여 해당 측기의 관측 자료에 대한 기초적인 정보를 제공하고자 한다. 2장에서는 관측기에 대한 소개 및 설치, 운영방법을 상세히 설명한다. 3장에서는 수집된 자료에 대한 간단한 소개와 분석을 제시하였다.

2. 관측기기 소개 및 관측과정

2.1 필터스테이션과 네펠로미터

스파르탄은 AirPhoton 사의 필터 스테이션(SS5)과 네펠로미터(IN102)가 독립된 개체로서 함께 운영된다(<https://airphoton.com>). 필터 스테이션은 필터 기반 관측을 수행하며, 직접 공기를 흡입하여 수집된 입자의 질량분석을 통해 화학이온들에 대한 자료를 제공한다.

또한 네펠로미터 관측의 경우, 측정기로 유입된 입자를 분석하여 산란되는 인공 빛의 양을 측정함으로써 산란계수를 얻을 수 있다(Charlson et al., 1969; Dolgos and Martins, 2014; Ahern et al., 2022). 네펠로미터는 국내 대기오염 모니터링을 목적으로 주로 사용되었는데(e.g., Kim et al., 2001; Kim et al., 2005; Lee et al., 2010), 스파르탄의 네펠로미터 또한 그 역할을 수행할 수 있을 것으로 보인다. 또한 해당 측기의 네펠로미터는 산란특성에 대한 정보뿐만 아니라, 필터 스테이션의 자료와 결합하여 시간별 PM_{2.5} 질량농도 또한 제공하므로 활용성이 높다. 따라서 스파르탄 네트워크 구축을 통해 입자의 성분과 입자 크기 별 산란특성, 질량 농도에 대한 정보를 함께 얻을 수 있으며(Snider et al., 2015), 이를 이용하여 보다 포괄적인 연구가 가능하다.

필터 스테이션은 필터장치와 컨트롤 박스로 구성되어 있다. 필터 장치에는 분당 5리터의 공기를 흡입할 수 있는 사이클론 흡입구가 있으며, 흡입된 공기는 약 1미터의 관을 통해 필터 카트리지에 포집된다. 필터 카트리지는 가로 15.5 센티미터, 세로 7.5 센티미터 길이의 흰색 부속품이며 Fig. 1에서 보듯이 금속망을 가진 8개의 홀이 존재한다. 첫번째 홀부터 여섯 번째 홀까지는 PM_{2.5} 만을 포집하며, 여덟 번째 홀은 PM₁₀ 만을 포집하기 때문에 총 7개의 홀만 관측에 이용된다(SPARTAN, 2021). 각각의 홀마다 포집된 입자들이 분석되는데, 단순 질량농도 뿐만 아니라 각각의 화학종 마다 농도 자료를 얻을 수 있다.

필터 스테이션 관측은 9일간 매일 3시간씩 PM_{2.5}에 대해 이루어지며, PM_{2.5} 측정이 끝난 직후 PM₁₀ 관측이 30분 동안 수행된다. 또한 9일 주기의 관측이 한 카트리지가 당 6번씩 수행되어 한 번의 관측 주기마다

Table 1. The sampling time during the 9-day period of each PM filter using in Yonsei University and UNIST (SPARTAN, 2021).

Day	PM _{2.5}	PM ₁₀
1	9:00-12:00	12:00-12:30
2	12:00-15:00	15:00-15:30
3	15:00-18:00	18:00-18:30
4	18:00-21:00	21:00-21:30
5	21:00-0:00	
6		0:00-0:30
7	0:00-3:00	3:00-3:30
8	3:00-6:00	6:00-6:30
9	6:00-9:00	9:00-9:30

9일 평균의 자료가 6개씩 생성된다. 따라서 54일마다 필터 교체와 자료 추출이 이루어지므로 운영이 용이하다. 필터 관측의 특성상, 해당 측기 또한 실시간 분석이 이루어지지 않아 컴퓨터 장비 및 분석 프로그램이 추가적으로 사용되지 않는다. 또한 자료 모니터링을 위한 상주 인원이 요구되지 않으며 필터 카트리지가 수거 및 SD카드 확인만 이루어지면 자료획득이 가능하다. 따라서 비교적 적은 자원과 인력으로 운영될 수 있어 활용성이 높다. 또한 꾸준한 필터 교체가 이루어질 때 연속적인 관측자료 수집이 가능하므로 특정 지점의 장기자료 구축의 측면에서도 이점을 가진다. 또한 측정 샘플을 직접 획득할 수 있어 입자 분석에서 더욱 자세한 특성 파악이 가능하다.

Table 1은 필터 스테이션의 관측 주기에 대한 표이다. 해당 스케줄은 관측소가 위치한 곳의 로컬타임을 기준으로 수행되므로 주의한다. 1일차 관측이 시작되면, 오전 9시에 시작된 PM_{2.5} 관측은 오후 12시에 중

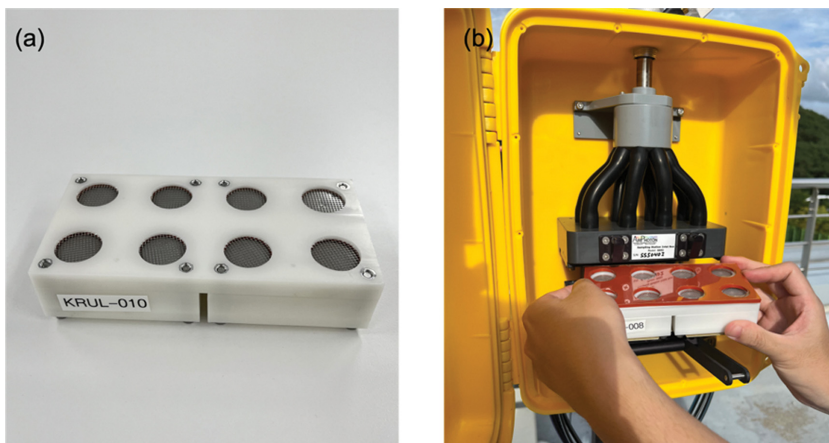


Fig. 1. A filter cartridge of SPARTAN filter station and an example of installing filter.

료되며 1번 흡이 사용된다. PM_{10} 관측은 즉시 오후 12시부터 12시 30분까지 30분간 이루어지며 8번 흡이 사용된다. 다음날인 2일차 관측은 오후 12시부터 3시간 30분 동안 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 관측이 차례로 진행된다. 따라서 10일 차부터 다시 오전 9시부터 관측이 이루어지게 되며 2번 흡과 8번 흡이 사용된다. 결과적으로 $PM_{2.5}$ 의 경우 9일간 총 24시간 흡입된 6개의 자료가, PM_{10} 의 경우 54일 동안 총 24시간 흡입된 1개의 자료가 생성된다(SPARTAN, 2021).

스파르탄의 네펠로미터는 필터 스테이션과 독립적으로 공기를 흡입하여 산란특성에 대한 정보를 제공한다. 450, 532, 632 nm의 파장을 가진 빛을 이용해 관측이 수행되며 약 15초마다 유량 분석이 이루어진다(Snider et al., 2015). 초기 자료를 얻은 뒤 후처리 과정을 거치면 시간 평균과 일평균 자료를 얻을 수 있는데, 이 과정에서 질량 농도가 함께 추정된다(Snider et al., 2015). 네펠로미터의 산란 매개변수는 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 모두에 대해서 제공되나, 질량농도의 경우는 현재 $PM_{2.5}$ 에 대해서만 자료가 공개되고 있다(<https://spartan-network.org>).

해당 스파르탄의 시간 및 일별 PM 농도는 필터로부터 계량된 입자 무게와 네펠로미터 자료의 조합으로 결정된다(Snider et al., 2015). 필터관측 단독으로는 9일씩의 누적 자료만을 얻을 수 있는 것과 비교하면 상당히 큰 차이이다. 결과적으로 네펠로미터의 자료는 필터스테이션의 비교적 낮은 시간분해능을 보완하는 역할을 하여, 국내 미세먼지 관측망 자료와의 연계 분석을 통해 다양한 분석을 진행할 수 있다.

2.2 기기 설치법

원활한 관측을 위해서 기기 설치와 운영이 적절하게 이루어져야 한다. 해당 설치법 및 운영법은 스파르탄 설치 가이드(SPARTAN, 2021)로부터 발췌되었으며, 일부 경험적인 지식 또한 함께 서술하였다. 먼저 필터 스테이션과 네펠로미터 모두 직접 공기를 흡입하여 관측하는 기기이므로, 최대한 바닥과 지형지물의 간섭을 피해야 한다. 건물의 옥상과 같이 최대한 차폐가 없는 지형을 선정해야 하는데, 주위의 물체와 5 m 이상 떨어지는 것이 좋다. 이 때, 바닥에서 흡입구의 높이를 2 m 이상 띄우는 것이 함께 권장된다. Figure 2에서 보듯이, 이 경우에 필터 스테이션과 네펠로미터 각각의 흡입구 높이가 비슷해야 한다는 것도 또한 주의할 점 중 하나이다. 추가적으로, 필터 스테이션을 설치할 때 컨트롤 박스보다 필터 장치의 위치를 1 m 이상 높게 두어야 한다. 이는 흡입된 공기의 흐름이 원활하도록 하기 위해 국내 사이트 운용과정에서 고안된 방법이다.

스파르탄은 삼각대 등의 설치용 기반이 함께 제공되지 않기 때문에 설치할 위치에 단단히 고정시킬 수 있는 기동을 확보할 필요가 있다. 만약 기반이 불안정하거나, 적절한 위치에 설치가 불가능하다면 구조물을 직접 제작할 수도 있다. Figure 2a에서 보이는 것처럼, 연세대학교 관측소는 일정 높이의 테이블 위에 또 다른 구조물을 설치하여 기기와 결합시킨 모습이다. 또한 울산과학기술원 관측소는 너비가 다른 철제 프레임 두가지를 결합하여 설치하였다(Fig. 2b). 기기의 연결선이 비바람에 노출되는 것을 방지해야 하

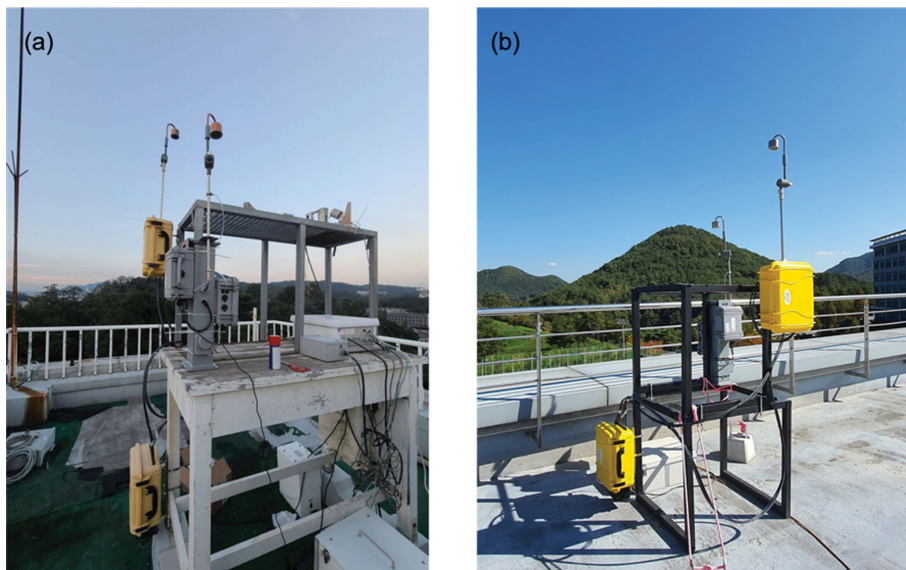


Fig. 2. Examples of installing SPARTAN for (a) Yonsei University in Seoul and (b) UNIST in Ulsan.

므로 방수가 가능한 상자를 함께 설치하는 것이 중요하다. 또한 110볼트 전원이 확보되어야 하므로 변압기를 사용하는 것이 바람직하며, 안정적인 전원 공급을 위해서 무정전 전원 공급장치(UPS)를 함께 두는 것도 좋다.

2.3 필터 스테이션 운영법

필터 스테이션의 경우, 필터 카트리지의 교체가 주기적으로 이루어져야 한다. 필터를 장착한 뒤 관측 시작 54일째가 되었을 때, 오전 9시 30분이 되면 관측이 종료된다. 이는 1일차 9시에 관측을 시작함에 따라 결과적으로 54일차에 오전 6시부터 오전 9시 30분까지 관측이 수행되기 때문이다(Table 1). 또한 해당 관측스케줄은 임의로 측정 시작 시간대를 변경할 수 있으나, 추후 설명될 ‘기본 스케줄 스크립트’를 사용해 해당 주기를 변경없이 사용하는 것을 권장한다. 관측이 종료되면 컨트롤 박스 화면에서 “Finished”라는 문구를 확인할 수 있다. 해당 문구를 확인한 뒤 필터 카트리지 교체 작업을 당일 내 진행하면 되는데, 프로세스는 다음과 같다.

2.3.1 자료확보 및 기기 재설정

우선 컨트롤 박스를 열고 SD카드를 꺼낸 뒤 저장된 자료를 모두 확보한다. 그 후 SD카드 내의 파일을 모두 삭제한 뒤 script.aps 파일을 새로 삽입하고, 카드를 원래의 위치에 다시 넣는다. 해당 파일은 필터 스테이션의 기본 스케줄 스크립트로 기기의 자동 운영을 가능하게 한다. 이때, 태블릿 또는 스마트폰을 사용해 작업하는 것은 바람직하지 않다. PC가 아닌 경우, SD카드를 읽거나 쓸 때 임시파일이 생성되어 기기의 원활한 작동을 방해하기 때문이다. 따라서 PC로 작업하는 것을 권장하며, 주기적인 SD카드 포맷이 필요하다.

2.3.2 필터 교체 전 점검

자료를 확보한 뒤, 유량 점검 작업을 실시한다. L렌치를 사용해 필터 장치에서 흡입구의 회색 부분을 분리한 뒤 유량계를 연결한다. 필터 카트리지가 장착된 상태로 1번부터 8번 홀까지 유량 점검을 실시해야 한다. 해당 작업은 두 가지 위치에서 이루어지므로, 2인 이상이 함께 수행하는 것이 바람직하다. 우선, 컨트롤 박스의 버튼을 조작해 Functional tests - Pneumatics Tests 항목으로 진입한 뒤 Vac 버튼을 눌러 공기가 흡입되는 상태로 만든다. 해당 기능 작동 시 모터음의 큰 소리가 나며, 컨트롤 박스의 화면과 필터장치의 유량계에서 5에 가까운 값의 lpm (Liter per minute)이 나타나게 된다. 이때 화면에 나타난 A 값을 데이터 시트에 기입해야 한다. 간혹 오류로 인해 화면의 숫

자가 0에 가까운 값으로 나타나는 경우가 있는데, 이 경우 기기의 전원을 종료 후 재가동하면 해결된다.

카트리지의 번호를 확인한 뒤 해당하는 데이터 시트를 꺼내어 "End Flow Measurement" 항목을 작성하는데, 화면에 나타난 A의 lpm값을 Internal - 1 항목에 기입한다. 이와 함께 필터장치의 유량계 값을 External - 1 항목에 기입한다. 유량계 값 확인 시 눈과 유량계 추의 중심이 수평이 된 상태에서 값을 읽어야 한다. 이때, 유량계는 세로로 직각이 되어야 하며 눈금의 간격이 0.2이므로 주의해서 확인한다. Next 버튼을 누르면서 8번 밸브까지 차례대로 작성하는데, 7번 밸브는 사용하지 않는 값으로 생략한다. 8번 밸브 테스트 시에는 더 강한 소음이 나는데, 이는 정상 상태이므로 우려할 필요가 없다. 이 경우 A가 아닌 B 값만 시트에 작성하는데, 일반적으로 1.5에 가까운 값이 확인되어야 하며 유량계의 값 또한 그러하다. 유량 측정이 모두 완료되면 Vac을 눌러 공기 흡입을 중지한 뒤 Exit을 눌러 종료한다.

이후 데이터 시트에 필터 제거 일자와 담당자 이름, 관측 기간 등을 적절하게 기입해야 한다. 마지막으로 필터장치를 열고 손잡이를 내려 필터 카트리지를 주의하며 분리한다. 분리된 카트리지를 해당 번호의 비닐에 넣어 밀봉하고 데이터 시트와 함께 한번 더 감싼 뒤 박스를 포장한다. 교체 과정에서, 고무와 금속 가스켓을 제외한 흰색 부분만 밀봉해야 하므로 주의가 필요하다.

2.3.3 필터 교체 및 가동

새로운 필터 카트리지를 꺼내 필터장치에 장착한다. 이때, Fig. 1b처럼 순서대로 금속 가스켓, 필터 카트리지, 고무 가스켓, 필름 가스켓을 쌓아올려야 한다. 위 아래의 고리를 건 후에 손잡이를 밀어 올려 고정음이 나도록 장착하고 필터 장치를 닫는다. 이때 필터 카트리지는 Fig. 1처럼 라벨이 붙어있는 쪽을 볼 수 있도록 설치한다. 카트리지 장착 후 유량 점검을 새롭게 실시해야 하기 때문에 컨트롤 박스에서 밸브 테스트 기능을 작동한다. 밸브 번호가 1A 일 때의 유량을 5 lpm에 맞추어야 하는데, 아래쪽에 A, B 조절 나사 중 A 나사만 조작해서 컨트롤 박스 화면의 숫자를 최대한 5에 가깝게 조절해야 한다. 그 후 A 나사는 절대 건드리지 않도록 주의한다. 곧바로 필터장치의 유량계 값을 확인하는데, 이때의 값 또한 5에 가까워야 한다. 값이 4 이하로 매우 낮은 경우, 카트리지를 다시 장착한다. 대부분의 경우 10번 내외의 시도를 통해 4.8 정도의 값을 얻을 수 있다. 최대 10%까지의 오차까지는 관측에 허용되므로 4.5에서 5.5 사이의 값이라면 큰 문제는 없다.

필터 카트리지 설치 시 4.5 이하의 유량 값을 보이

는 것은 공기의 불필요한 누출이 이루어지기 때문이다. 이를 최소화하기 위해 연세대학교 관측소에서는 투명 필름으로 가스켓을 직접 제작해 사용해왔으며 울산과학기술원 또한 그 방식을 따르고 있다. 이 필름 가스켓은 코팅 용지로 제작 가능하며, 고무 가스켓 위에 올려서 사용된다. 해당 방법을 적용할 때 같은 조건에서 최소 0.2 이상의 유량 확보가 가능함이 확인되었다.

안정적인 유량 값을 얻었다면 더 이상 필터 카트리지를 재 장착하지 않고 다음 단계로 진행한다. 밸브 1부터 밸브 6까지 확인을 차례로 진행하며, 새로운 데이터시트에서 “Start Flow Measurements” 항목에 Internal과 External 값을 차례로 기록한다. 밸브 8 항목에서는 오직 B 나사만을 이용하여 값을 1.5로 조절한다. 이때의 유량계 값은 정상적인 상태라면 1.4에서 1.6 사이의 값이 확인된다. 유량 측정이 모두 완료되면 Vac을 눌러 공기 흡입을 중지한 뒤 Exit을 눌러 종료한다.

이후 기기의 시스템 시간 설정에서 현지시각과 기기의 시각이 동일한지 확인한다. Sampling Settings - Sampling Mode 항목으로 진입해 Sampling Mode가 “./script.aps”로 선택되어 있는지 확인해야 한다. 만약 아니라면, EDIT를 눌러 설정을 변경해준다. 그 후 New tray 버튼을 누른 뒤 화면의 카트리지 ID를 설치한 카트리지 번호와 동일하게 설정한다. 모든 과정이 끝난 후 초기 화면으로 돌아와서 Mode: Script와 Cartr:00NN가 나타난 것을 마지막으로 확인한 뒤 START를 누른다. 그다음 Script를 선택하고 마지막으로 Run을 누르면 완료된다. 정상적으로 관측준비가 이루어졌다면, 다음날 오전 9시에 새로운 관측이 시작된다.

2.3.4 마무리 작업

최종적으로 데이터시트에 필터 교체 당일의 날짜, 기상 상태, 설치 위치와 담당자 이름 등을 기입해야 하며, 다음 교체 전까지 상자와 함께 잘 보관해 둔다. 교체된 카트리지와 해당 데이터시트는 잘 포장하여 미국 워싱턴 대학에 위치한 스파르탄 담당 팀으로 배송을 보내야 한다. 교체 전 SD카드로부터 확보한 자료는 해당 지점의 공유 폴더에 업로드한다. 그 후 분석된 자료는 스파르탄 웹 사이트(<https://spartan-network.org>)를 통해 확인할 수 있다.

필터 교체 후 주의할 점은, 바로 다음날에 기기가 잘 작동을 시작했는지 확인해야 한다는 것이다. 관측 준비가 끝나면 화면에 X/8이라는 문구가 뜨는데, 이는 다음날 오전 9시부터 1A/8로 변해야 하며, 유량 펌프의 소리 또한 확인가능해야 한다. 매우 낮은 확률로 기기가 작동을 하지 않는 경우도 있는데, 이는

대개 SD카드를 포맷해 주지 않아 생기는 문제이므로 적절한 조치를 취해야 한다. 관측이 시작되면 54일 동안 자동 관측이 진행되나, 관측 일정을 파악해서 펌프가 작동되어야 할 시간에 잘 진행이 되고 있는지 틈틈이 확인하는 것을 권장한다.

예를 들어, 관측 1일째에는 1A/X라는 글자와 함께 오전 9시에서 오후 12시까지 펌프가 작동하며, 그 후 8B/X라는 글자가 오후 12시부터 30분간 나타난다. 또한 관측 12일째에는 2A/X와 8B/X 라는 글자가 오후 9시부터 다음날 오전 12시 30분까지 차례로 나타난다. 이러한 관측 스케줄에 맞게 펌프가 작동되지 않는다면, 해당 지점 관리자와 의논한 뒤 관측을 종료하거나 조치를 취해야 한다. 결과적으로 1A에서 6A까지 순차적으로 밸브가 변하며, 그 사이에 30분씩 8B라는 글자가 나타난다. 이는 Table 1의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 관측 주기를 따르므로 잘 숙지해두는 것이 좋다.

2.4 네펠로미터 운영법

네펠로미터는 일반적으로 컴퓨터를 통해 기기를 제어하며 자료를 얻는다. 예를 들어, 일부 국내 에어로졸 특성연구(e.g., Kim et al., 2005; Park et al., 2015)에서 사용된 TSI 사의 Integrating Nephelometer 3563는 자체 소프트웨어를 제공하며 외부 컴퓨터를 통해 제어한다(Sheridan and Ogren, 2006). Airphoton 사의 네펠로미터(IN102) 역시 외부 컴퓨터와의 연결이 가능하지만, 스파르탄 네트워크에서는 SD카드 내에 저장된 초기자료를 추후 분석하도록 운영되므로 간단한 자료 추출만이 아래와 같이 요구된다.

관측시작 전, 네펠로미터의 날짜와 시각 설정을 위해 time.txt 파일을 수정하여 적용해야 한다. 네펠로미터 역시 필터 스테이션과 동일하게 로컬타임을 기준으로 시각을 설정한다. 이때, 텍스트 파일 내부 지정된 시각을 현재 시각보다 약 1분가량 빠르게 맞추어 수정한 뒤, SD카드에 삽입한다. SD카드를 삽입한 채로 네펠로미터의 전원을 켜면 상단의 불빛이 빠른 속도로 반짝이는데, 이때 SD카드를 바로 제거하면 시간 설정이 완료된다. 다음으로 전원을 끄고 SD카드에 config.txt 파일을 첨부, 다시 기기에 삽입한 뒤 전원을 켜면 관측이 시작된다. 이때 기기의 왼쪽편에 Clean Air Reference 시스템이 있는데, 이 기기의 스위치를 Auto로 두어야 한다.

관측 시작 30초 후에 전원을 끄고 SD카드를 확인해서 자료가 잘 생성되었는지 점검한다. 그 후 config.txt 파일을 다시 첨부해 기기에 삽입한다. 가동 30초 후에 재확인을 통해 자료 상태를 다시 점검하고, 파일 첨부해 한 SD카드를 삽입한 뒤 상자를 닫는다. 해당 과정은 최소 2번의 확인을 통해서 데이터 저장에 오류가 생기는 일을 방지하기 위한 것으로 매우 필수적

이다. 네펠로미터의 경우, 필터 스테이션과는 개별적으로 약 2주마다 자료를 추출하는 것이 권장된다. 이 또한 자료 공유 폴더에 업로드해야 하며, SD카드의 용량이 부족하지 않도록 틱틈이 포맷해주는 것이 좋다.

3. 관측 정보 및 분석 결과

3.1 관측 정보

본 연구에서 다루는 스파르탄 관측은 2012년부터 전세계적으로 네트워크가 구성되었다. 스파르탄 네트워크는 위성기반 지상 PM_{2.5} 관측 개선을 위해서 고안되었는데, 이를 위해 기본적으로 Aerosol Optical Depth (에어로졸 광학두께)를 측정할 수 있는 Sun photometer (태양광도계)가 위치한 곳에 함께 설치된다(Snyder et al., 2015). 국내의 경우 기준에 AERONET Sun photometer (Holben et al., 1998)가 위치한 연세대학교와 울산과학기술원 지점에 스파르탄 관측 장비가 각각 설치되었다. 연세대학교 지점의 경우 2019년부터 관측이 시작되었으며, 현재 6개의 필터 카트리지가 분석되었고, 울산과학기술원의 경우 2021년에 관측이 시작, 그리고 1개의 카트리지만이 분석되었다.

필터 카트리지는 스파르탄 연구팀에 의해 이온 크로마토그래피, 자동 필터 저울, X-Ray Fluorescence를

통해서 분석되는데, 이를 통해 33종의 화학이온 분포 및 주요 입자 유형에 대한 자료를 얻을 수 있다(e.g., McNeill et al., 2020). 이와 함께 PM_{2.5}와 PM₁₀에 대한 누적 질량농도를 알 수 있다. 또한 네펠로미터 자료의 경우, 필터자료와의 조합으로 시간 및 일별 PM 질량농도 자료를 생성할 수 있는데, 이는 2.5 μm 이하 크기인 입자의 경우에만 해당된다. 네펠로미터 단독 자료의 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀에 대한 산란정보를 제공하나, 이 글에서는 분석되지 않았다.

3.2 결과

3.2.1 PM 질량농도 분석

스파르탄에서의 시간별 PM_{2.5} 자료는 네펠로미터와 필터 스테이션 자료의 조합으로 생성된다. 이는 국내 미세먼지 관측망 일평균 자료(Airkorea 제공)와 비교하여 그 성능을 평가해볼 수 있다. 비교를 위해 연세대학교와 울산과학기술원 지점에서 가까운 도시대기 측정 지점들 중 하나를 선정하였는데, 이는 서울 서대문구에 위치한 서대문구 측정소 지점과 울산 울주군에 위치한 범서읍 측정소 지점이다. Figure 3에서 확인할 수 있듯이 국내 에어코리아 자료는 검은색, 스파르탄 자료는 붉은색으로 나타냈다. PM_{2.5} 질량농도는 자료 확보 등의 문제로 연세대학교는 2020년 10

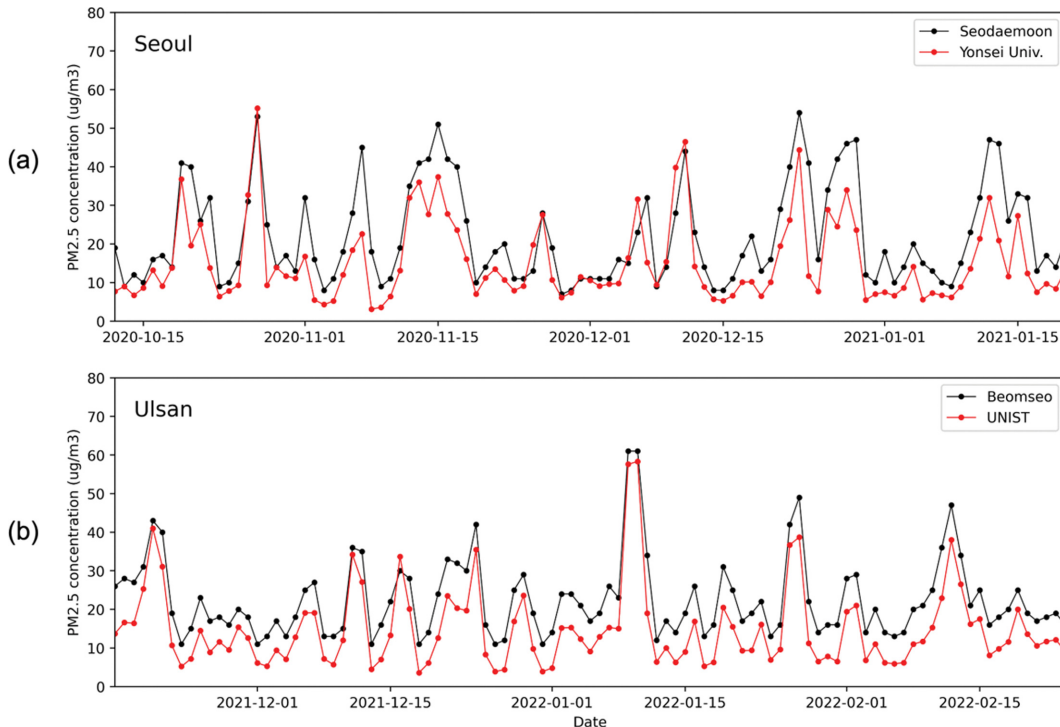


Fig. 3. Time series of SPARTAN PM_{2.5} concentrations (a) Yonsei University and (b) UNIST sites.

월부터, 울산과학기술원의 경우 2021년 11월부터 각각 3개월씩 다른 기간에 대해 분석되었다.

Figure 3a는 연세대학교 스파르탄 자료와 서대문구의 미세먼지 측정 자료를 보여주는데, 대체적으로 PM_{2.5}의 질량농도가 유사한 경향으로 나타나는 모습을 확인할 수 있다. 일부 차이는 존재하나, 최고·최저점을 기록하는 사례들의 경우 동일한 패턴이 잘 확인된다. Figure 3a에서 해당 기간 내 스파르탄 자료에서 10건을 제외한 모든 경우에서 에어코리아 자료가 높은 값을 보였다. 이는 평소 연세대학교 지점이 서대문구 지점보다 미세먼지의 영향을 적게 받는다는 것을 의미하는데, 비교적 지표관측소보다 높은 지형에 위치한 연세대학교 관측소의 위치적 특성에 의해 나타나는 결과일 수 있다.

울산과학기술원 스파르탄 자료 또한 범서 지점의 미세먼지 자료와 유사하게 나타난다(Fig. 3b). 이 역시 최고·최저점의 사례가 나타나는 패턴이 유사하다. 대부분의 사례에서 울산과학기술원 지점의 평균 PM_{2.5} 값이 다소 낮게 나타나며, 해당 기간 중 단 하루만이 범서지점의 자료보다 높은 값을 보였다. 국내 고농도 미세먼지 기준(일평균 50 µg m⁻³)에 가까운 사례가 발생하였을 경우 질량농도의 값이 잘 일치하였으나, 일반적으로 낮은 값을 보이는 경우일 때는 다소 차이가 있다. 이는 비도심 지역에 위치한 울산과학기술원 지점이 범서지점보다 미세먼지의 영향을 더욱 적게 받기 때문일 수 있다.

연세대학교와 울산과학기술원 스파르탄 관측지점들은 국내 관측망과 약 3.55 km, 3.11 km씩 각각 떨어져 있으므로 정확한 성능 비교는 어려울 수 있으나, 특히 고농도 미세먼지 사례 발생 부분에서는 인근 미세먼지 지점의 관측 값 패턴을 잘 나타나고 있는 것으로 보인다. 따라서 스파르탄 자료가 국내 미세먼지 관측망의 보조적인 역할 이상을 할 수 있을 것으로 보이며, 추후 에어코리아 자료와 스파르탄 자료의 연계

분석도 충분히 가능할 것으로 보인다.

3.2.2 유형 분석

Figure 4a는 연세대학교에서 측정된 PM_{2.5} 화학종의 시계열 분포이다. 관측 주기 특성에 따라 해당 결과는 9일마다의 평균값으로 해석할 수 있다. 대부분의 측정일에서 Sulfate, Black Carbon (BC), Ammonium, Calcium 이온의 순서로 농도가 높다. 간혹 특정 이온의 농도가 극단적으로 상승하는 경우가 확인되는데, 특히 2021년 11월 16일부터 9일간 관측된 결과에서 Ammonium Nitrate 이온의 질량농도가 상당히 크게 나타났다. 전체 기간에서 Nitrate 이온의 평균값은 1.81 µg m⁻³로 분석된 것에 반해, 이 기간에는 29.49 µg m⁻³로 약 30배 증가한 수치를 보였다. Figure 5a에서 막대그래프의 값은 9일 평균 PM_{2.5} 농도를 의미하는데, 이 기간에 해당하는 값은 약 70 µg m⁻³로 평균 수치보다 2배 이상 증가한 모습이다. 에어코리아 자료에 따르면, 실제로 이 기간내에 전국 대부분지역은 미세먼지 ‘나쁨’ 이상을 기록했으며, 수도권 및 중부 지역에서는 초미세먼지 주의보가 발령되기도 하였다.

Figure 4a에 나타난 화학이온들은 스파르탄 팀의 RCFM 방정식(Reconstructed Fine Mass Equation)에 따라 PM 유형을 특정하기 위한 방정식에 이용된다. 자세한 사항은 스파르탄 홈페이지의 Data 탭에서 확인할 수 있는데, 이 방정식을 거치면 30여개의 화학이온이 총 8개의 유형으로 추정된다. 이는 Ammoniated Sulfate, Ammonium Nitrate, Sea Salt, Fine Soil, Equivalent BC, Trace Element Oxides, Residual Matter로 나타나게 된다.

Figure 4a의 화학이온에 대한 자료를 통해 추정된 PM 유형들이 바로 Fig. 4b이다. 대부분의 경우 Ammonium Sulfate 유형이 가장 높은 농도를 기록되었다. 이는 Fig. 3a에서 나타난 것처럼, sulfate 이온의 영향이 매우 큰 것에 따른 결과로 보인다. 2021년 11월의 경우,

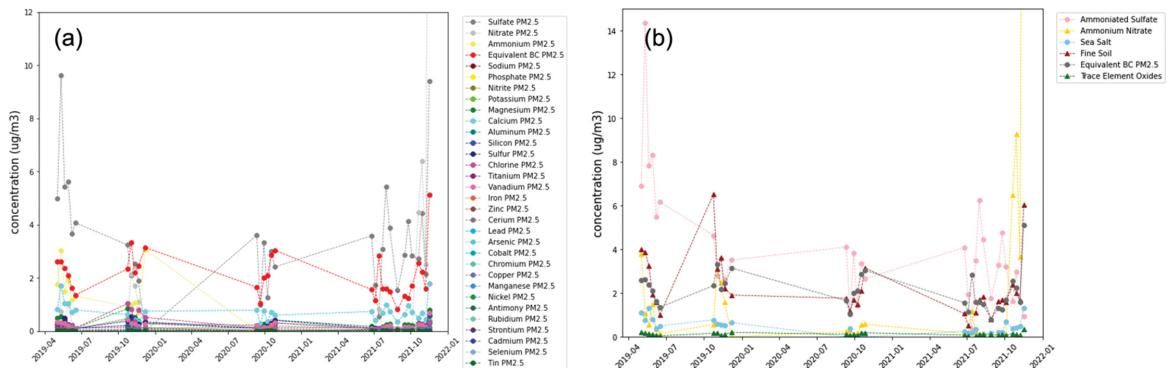


Fig. 4. Time series of (a) chemical ions and (b) reconstructed type in Yonsei University.



Fig. 5. Time series of (a) the PM_{2.5} concentrations (filter-based) and (b) the fraction of major type (major type/total type) in Yonsei University.

비교적 높은 Ammonium Nitrate 유형이 역시 눈에 띄며, 이는 Fig. 3b에 나타난 Nitrate 이온의 높은 질량 농도의 영향으로 보인다.

원활한 분석을 위해 Trace Element와 Residual Matter을 제외한 유형들을 “주요 유형”으로 임의 정의하였다. Figure 5a 에서 막대그래프의 값은 9일 누적된 PM_{2.5} 농도를 의미하는데, 그 중 주황색으로 표시된 부분이 주요 유형의 농도이다. Figure 5b는 이 주요 유형 중 각각의 유형이 차지하는 비율을 퍼센티지로 나타낸 것이다. 대부분의 경우 주요 유형의 질량농도가 전체 PM 중 50% 이상을 차지하기 때문에 Fig. 4b의 유형 분포와 비슷하게 나타나는 것으로 보인다.

Figure 6은 연세대학교와 울산과학기술원 지점의 모든 필터 관측 데이터를 단순 취합한 결과이다. 이 역시 주요 유형에 대해 분석되었는데, 5개의 유형 모두 약 4% 이내의 범위에서 상당히 유사한 분포를 보인

다. 이 중 울산과학기술원의 Ammonium Nitrate 비율이 연세대학교 지점보다 약 3% 높게 나타나는 것이 확인된다. Ammonium Nitrate는 그의 전구물질인 NO₂로부터 산화되어 생성되므로(Matsumoto and Tanaka, 1996), 이는 국내의 평균적인 NO₂ 오염 정도와 다소 다른 결과로 보인다. 일반적으로 서울 및 경기지역의 일평균 NO₂ 수치는 0.03 ppm 이상으로 과거부터 다른 지방 지역보다 큰 값을 보여왔기 때문이다(Nguyen et al., 2015). 하지만 울산과학기술원 지점의 자료는 오직 하나의 필터만이 분석된 결과이기 때문에 이러한 불일치는 자료의 부족에 따른 결과일 수 있다. 실제 해당 1개의 필터가 관측된 2021년 10월 28일부터의 기간은, 앞서 언급되었듯이 연세대학교 지점에서 극단적으로 높은 Ammonium Nitrate 농도가 관측된 기간(2021년 11월 중순)을 포함하므로, 유형의 우세정도가 영향을 받을 수 있다. 따라서 두 지점은 비슷한

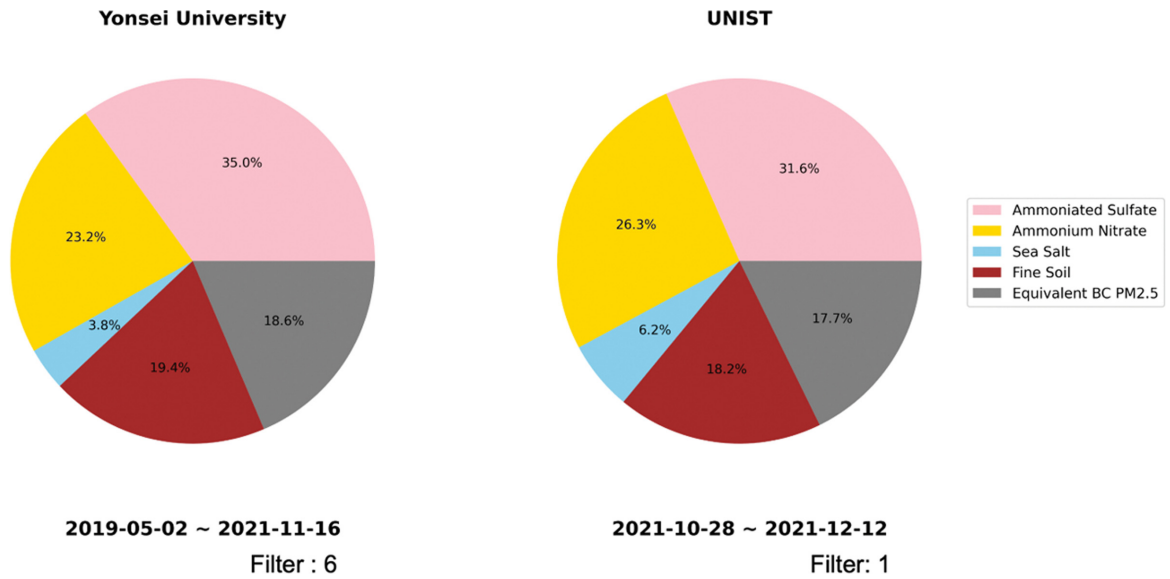


Fig. 6. Pie charts of major PM types from Yonsei University and UNIST.

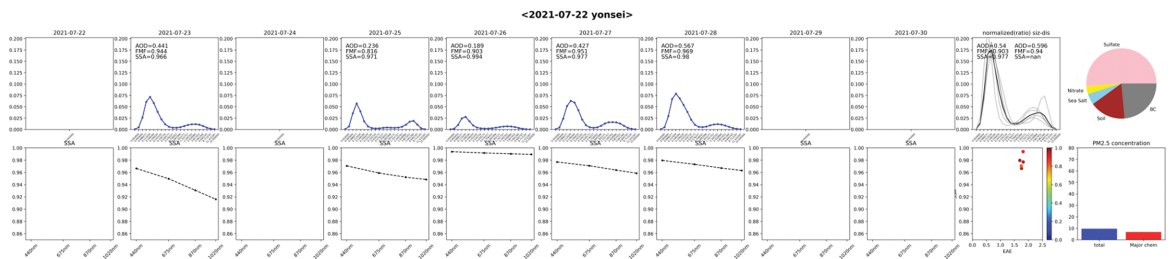


Fig. 7. An example of comparative analysis using AERONET and SPARTAN filter data.

PM 유형 분포를 보인다고 생각될 수 있으나, 이는 단순 합산된 결과이므로 적극적인 비교에는 다소 무리가 있을 수 있다. 하지만 더 많은 자료가 누적된다면 뚜렷한 지역별 유형 특징을 세부 파악할 수 있을 것으로 예상된다.

추가적으로, PM의 유형 자료는 Fig. 7과 같이 AERONET 자료와의 비교분석에서도 사용될 수 있다. 특정 유형이 상당한 비율을 보일 때 해당 기간 동안의 광학자료를 분석하면 그 유형이 가지는 특성을 유추해볼 수 있다. Figure 7의 경우 Ammoniated Sulfate 유형의 비율이 50% 이상으로 나타나는데, 동일 기간 (2021년 7월 22~30일)의 AERONET 일 자료에서 에어로졸 크기 분포의 모습(파란색 그래프)은 미세입자의 높은 분포를 뚜렷하게 보여준다. 또한 평균 단산란 알베도(Single Scattering Albedo; SSA)가 비교적 높은 값을 0.90 이상 보여주므로, 이는 흡수성질이 낮고 입자 크기가 작은 sulfate 유형의 특징을 상당히 잘

드러낸 결과로 해석된다. 추후 다른 유형 사례에 대한 자료를 확보해 분석 시 광학분석자료와 실제 필터 관측 자료의 연관성 또한 분석할 수 있을 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

미세먼지 성분분석을 위해 연세대학교와 울산과학기술원 지점에 스파르탄 관측장비가 설치되었다. 스파르탄은 기존의 네펠로미터 관측과 필터관측 방법을 합한 개념으로서, AERONET Sun-photometer가 가동 중인 지점에서 함께 운영된다. 스파르탄은 필터 카트리지를 통해 직접 흡입한 공기입자를 분석해 화학 이온에 대한 정보를 얻는다. 이에 보조적으로 15초마다 측정되는 네펠로미터 자료를 통해 산란특성, 질량 농도에 대한 자료를 얻는다. 이들은 독립된 개체로서 함께 운영되기 때문에, 입자의 성분과 질량 농도에 대한 정보 등을 함께 얻는 것이 가능해 포괄적인 연구

가 가능하다.

적절한 방법에 따라 관측기기가 설치되어야 하므로 그 방법에 대한 안내 및 경험적 지식을 함께 서술하였다. 이 중에서 탁 트인 지형을 선정해 기기가 주위의 간섭을 받지 않게 하는 것이 중요하다. 또한 54일마다 필터 카트리지의 교체가 주기적으로 이루어져야 하는데, 이때 필터 교체 전 유량 값과 교체 후 값을 모두 기록해야 하는 점을 유념해야 한다. 기기 작동 이후에도 관측기기가 원활히 이행되고 있는지 틈틈이 확인할 필요가 있다.

측기의 설치 이후, 현재까지 연세대학교에서는 2019년 5월부터 관측이 시작되어 총 6개의 필터가, 울산과학기술원에서는 2021년 10월부터 1개의 필터가 분석 완료되었다. 분석된 스파르탄 필터자료를 기반으로 초기분석을 수행하였는데, 스파르탄의 일평균 PM_{2.5} 자료와 국내 도시대기관측망의 미세먼지 자료가 비교 분석 하였다. 대부분의 경우 서울과 울산지역 모두 스파르탄 PM_{2.5} 질량농도와 에어코리아 자료가 유사한 시계열 패턴을 보였다. 특히 고농도의 미세먼지 사례의 경우 비교적 일 평균값이 잘 일치하는 모습을 보인다. 그 외에 나타나는 자료의 일부 차이는 지점의 거리 차이 및 주변 환경 등에 의한 것으로 고려되었다.

PM_{2.5}의 화학이온과 그 유형에 대해서도 분석이 수행되었다. 연세대학교의 스파르탄 관측 기간 중, 대부분의 측정일에서 Sulfate, BC, Ammonium, Calcium 이온의 순서로 농도가 높게 나타났다. Nitrate 이온의 농도가 극단적으로 나타난 사례가 존재했는데, 이는 실제로 국내 미세먼지 경보가 내려졌던 기간으로 확인되었다. 화학이온의 분석 자료는 RCFM 방정식 (Reconstructed Fine Mass Equation)을 통해 PM 유형을 추정할 수 있으며, 이는 Ammoniated Sulfate, Ammonium Nitrate, Sea Salt, Fine Soil, Equivalent BC, Trace Element Oxides, Residual Matter로 나타난다. 이 중 주요 유형에 대해서만 두 지점의 모든 필터 관측 데이터를 단순 취합되어 분석되었다. 두 지점은 4% 내에서 모든 유형들의 비율이 유사하게 나타나, 울산과학기술원 지점의 자료는 오직 하나의 필터만이 분석된 결과이기 때문에 일부 예상과 다른 결과가 나타나는 것으로 보인다.

결과적으로, 화학이온 단일분석과 유형 추정이 된 결과를 비교할 때, 이온 종류에 따라 미세먼지 유형 패턴이 유사하게 나타났다. 또한, 특히 고농도 미세먼지가 발생한 경우 실제 국내 관측 자료와 상당히 유사한 경향이 확인되었다. 따라서 스파르탄의 필터기반 이온 관측은 기존 국내의 질량농도 기반 관측망과 함께 연계 분석될 수 있으며, 연구 분야에서의 상승 효과를 충분히 일으킬 수 있을 것으로 보인다. 추가적으로, AERONET 등의 광학자료와 함께 분석된다

면 화학이온과 입자유형별 광학특성을 파악할 수 있으며, 광학분석자료와 실제 필터관측 자료의 연관성 또한 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 신진연구과제(NRF-2020R1C1C1013628) 및 울산과학기술원 연구과제(No. 1.190139.01)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 스파르탄 자료 분석 지원을 해준 워싱턴 대학(Washington University)의 SPARTAN 그룹에 감사드립니다(We thanks to Crystal Weagle, Brenna Walsh, Chris Oxford, Xuan Liu and Randall Martin to support and analyze the data).

REFERENCES

- Ahern, A. T., F. Erdesz, N. L. Wagner, C. A. Brock, M. Lyu, K. Slovacek, R. H. Moore, E. B. Wiggins, and D. M. Murphy, 2022: Laser imaging nephelometer for aircraft deployment. *Atmos. Meas. Tech.*, **15**, 1093-1105, doi:10.5194/amt-15-1093-2022.
- Charlson, R. J., N. C. Ahlquist, H. Selvidge, and P. B. MacCready Jr., 1969: Monitoring of Atmospheric Aerosol Parameters with the Integrating Nephelometer. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **19**, 937-942, doi: 10.1080/00022470.1969.10469360.
- Costa, S., and Coauthors, 2014: Integrating Health on Air Quality Assessment—Review Report on Health Risks of Two Major European Outdoor Air Pollutants: PM and NO₂. *J. Toxicol. Environ. Health, Part B*, **17**, 307-340, doi:10.1080/10937404.2014.946164.
- Dolgos, G., and J. V. Martins, 2014: Polarized Imaging Nephelometer for in situ airborne measurements of aerosol light scattering. *Opt. Express*, **22**, 21972-21990, doi:10.1364/OE.22.021972.
- Fanizza, C., B. De Berardis, F. Ietto, M. E. Soggiu, R. Schirò, M. Inglessis, M. Ferdinandi, and F. Incoronato, 2018: Analysis of major pollutants and physico-chemical characteristics of PM_{2.5} at an urban site in Rome. *Sci. Total Environ.*, **616-617**, 1457-1468, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.168.
- Fenger, J., 1999: Urban air quality. *Atmos. Environ.*, **33**, 4877-4900, doi:10.1016/S1352-2310(99)00290-3.
- Holben, B. N., and Coauthors, 1998: AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16, doi:10.1016/S0034-4257(98)00031-5.
- Hsu, C.-Y., H.-C. Chiang, S.-L. Lin, M.-J. Chen, T.-Y. Lin,

- and Y.-C. Chen, 2016: Elemental characterization and source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the western coastal area of central Taiwan. *Sci. Total Environ.*, **541**, 1139-1150, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.09.122.
- Kadowaki, S., 1986: On the nature of atmospheric oxidation processes of sulfur dioxide to sulfate and of nitrogen dioxide to nitrate on the basis of diurnal variations of sulfate, nitrate, and other pollutants in an urban area. *Environ. Sci. Technol.*, **20**, 1249-1253, doi:10.1021/es00154a009.
- KEI, 2013: *A Study on the health impact and management policy of $PM_{2.5}$ in Korea (II)*. Korea Environment Institute, 164 pp (in Korean).
- Kim, J., S. C. Yoon, A. Jefferson, and S. W. Kim, 2005: Aerosol hygroscopic properties during Asian dust, pollution, and biomass burning episodes at Gosan, Korea in April 2001. *Atmos. Environ.*, **40**, 1550-1560, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.10.044.
- Kim, K. W., Y. J. Kim, and S. J. Oh, 2001: Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea. *Atmos. Environ.*, **35**, 5157-5167, doi:10.1016/S1352-2310(01)00330-2.
- Kim, Y. J., K. W. Kim, S. D. Kim, B. K. Lee, and J. S. Han, 2006: Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon. *Atmos. Environ.*, **40**, 593-605, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.11.076.
- Lee, H.-H., J. Y. Kim, S.-B. Lee, G.-N. Bae, and S. S. Yum, 2010: Urban Aerosol Number Concentration and Scattering Coefficient in Seoul, Korea, during Winter. *Particle and Aerosol Res.*, **6**, 91-103.
- Lee, M., 2014: An Analysis on the Concentration Characteristics of $PM_{2.5}$ in Seoul, Korea from 2005 to 2012. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 585-594, doi:10.1007/s13143-014-0048-z.
- Li, T., R. Hu, Z. Chen, Q. Li, S. Huang, Z. Zhu, and L.-F. Zhou, 2018: Fine particulate matter ($PM_{2.5}$): The culprit for chronic lung diseases in China. *Chronic Dis. Transl. Med.*, **4**, 176-186, doi:10.1016/j.cdtm.2018.07.002.
- Lingjuan, W.-L., 2015: Insights to the formation of secondary inorganic $PM_{2.5}$: Current knowledge and future needs. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, **8**, 1-13, doi:10.3965/ij.ijabe.20150802.1810.
- Liu, X., J. R. Turner, J. L. Hand, B. A. Schichtel, and R. V. Martin, 2022: A global-scale mineral dust equation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **127**, doi:10.1029/2022JD036937.
- Matsumoto, K., and H. Tanaka, 1996: Formation and dissociation of atmospheric particulate nitrate and chloride: An approach based on phase equilibrium. *Atmos. Environ.*, **30**, 639-648, doi:10.1016/1352-2310(95)00290-1.
- McNeill, J., and Coauthors, 2020: Large global variations in measured airborne metal concentrations driven by anthropogenic sources. *Sci. Rep.*, **10**, 21817, doi:10.1038/s41598-020-78789-y.
- Nguyen, H. T., K.-H. Kim, and C. Park, 2015: Long-term trend of NO_2 in major urban areas of Korea and possible consequences for health. *Atmos. Environ.*, **106**, 347-357, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.02.003.
- Ni, T., P. Li, B. Han, Z. Bai, X. Ding, Q. Wang, and J. Huo, 2013: Spatial and temporal variation of chemical composition and mass closure of ambient PM_{10} in Tianjin, China. *Aerosol Air Qual. Res.*, **13**, 1832-1846, doi:10.4209/aaqr.2012.10.0283.
- Park, J.-S., S.-M. Park, I.-H. Song, H.-J. Shin, and Y.-D. Hong, 2015: Characteristics of visibility impairment by semi-continuous optical and chemical property monitoring of aerosols in Seoul. *J. Korean Soc. Atmos.*, **31**, 319-329, doi:10.5572/KOSAE.2015.31.4.319.
- Park, R. J., D. J. Jacob, M. Chin, and R. V. Martin, 2003: Sources of carbonaceous aerosols over the United States and implications for natural visibility. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4355, doi:10.1029/2002JD003190.
- Pathak, R. K., X. Yao, and C. K. Chan, 2004: Sampling artifacts of acidity and ionic species in $PM_{2.5}$. *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 254-259, doi:10.1021/es0342244.
- Sheridan, P. J., and J. A. Ogren, 2006: *TSI Model 3563 integrating nephelometer operations reference manual*. National Oceanic and Atmospheric Administration, 15 pp.
- Snider, G., and Coauthors, 2015: SPARTAN: a global network to evaluate and enhance satellite-based estimates of ground-level particulate matter for global health applications. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 505-521, doi:10.5194/amt-8-505-2015, 2015.
- SPARTAN, 2021: *SPARTAN SS5 Set-up Instructions*, 14 pp (SPARTAN.PM25@gmail.com).
- Streets, D. G., F. Yan, M. Chin, T. Diehl, N. Mahowald, M. Schultz, M. Wild, Y. Wu, and C. Yu, 2009: Anthropogenic and natural contributions to regional trends in aerosol optical depth, 1980-2006. *J. Geophys. Res.*, **114**, doi:10.1029/2008JD011624.
- Zaman, S. U., M. Yesmin, Md. R. S. Pavel, F. Jeba, and A. Salam, 2021: Indoor air quality indicators and toxicity potential at the hospitals' environment in Dhaka, Bangladesh. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **28**, 37727-37740, doi:10.1007/s11356-021-13162-8.