



<Technical Report>

저비용 센서를 이용한 청정 실험실 실시간 감시

한영철 · 정혜진 · 문장일 · 백종민^{*} · 한창희 · 허순도

극지연구소

요 약

공기여과장치(air filtration system)는 부유 먼지에 의하여 오염되기 쉬운 자연 또는 인공 시료의 미량 성분을 분석하는 실험실에 필수적이다. 일반적으로 공기여과장치는 실험실에 먼지가 제거된 공기를 공급하기 위하여 HEPA (high efficiency particulate air) 또는 ULPA (ultra-low penetration air) 필터를 최종 필터로 갖는 다단식 공기 필터를 사용한다. 그러나 이러한 필터를 사용하는 것이 목표하는 공기 청정도를 보증하지는 않으며, 특히 국내 대기 미세먼지 농도의 잠재적 증가 가능성을 고려할 때 실험실 공기 입자 농도에 대한 주기적인 감시가 요구된다. 본 보고에서는 저비용 센서 모듈(sensor module)과 웹 기반 데이터 로거(data logger)를 사용하여 공기 중 입자 농도를 실시간으로 측정하는 장치(PaMo)를 개발하였다. 이 장치는 추가로 온도 및 습도 센서를 갖추었다. 두 기의 PaMo는 빙하시료 내 미량 성분 분석을 목적으로 하는 극지연구소내 두 청정 실험실에 각각 설치되었고, 2018년 3월 29일부터 6월 24일까지 $>0.3 \mu\text{m}$ 입자 농도와 온도, 상대 습도를 측정하였다. 실시간 모니터링 결과 비록 실내 공기의 입자 농도는 실외 공기에 비례하여 증가하였으나 두 실험실에 설치된 공기여과장치는 각 실험실에 요구되는 청정도를 달성 및 유지하였다. PaMo는 실외 공기 이외의 실내 먼지 기원 추적, 필터 교체시기에 대한 정보 제공, 공기여과장치의 오류 알람에 활용 가능하다. 본 보고는 PaMo가 공기여과장치를 운영하는 실험실에서 값비싼 입자 계수기를 대신하는 간편하고 효과적인 대안이 된다고 제안한다.

주요어: 아두이노, 클린룸, 미세먼지, 공기 필터, 입자 계수기

Yeongcheol Han, Hyejin Jung, Jangil Moon, Jongmin Baek, Changhee Han and Soon Do Hur, 2019, Real-time monitoring of cleanroom laboratories using low cost sensors. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 1, p. 141-148

ABSTRACT: An air filtration system (AFS) is necessary for laboratories that analyze trace components in natural or artificial samples liable to be contaminated by airborne particulates. In general, an AFS employs multi-stage air filters with a HEPA (high efficiency particulate air) or an ULPA (ultra-low penetration air) filter as the final filter to supply particle-free air to a laboratory. However, using these filters does not guarantee the desired cleanliness of air, and routine assessment of the particle levels in laboratory air is required especially given the potential increase in atmospheric fine particles in Korea. In this context, we have developed a real-time particle monitor (PaMo) using a low cost sensor module and a web based data logger. A temperature and humidity sensor was also included in the PaMo. Two PaMo units have been installed in two cleanroom laboratories for ice core research at the Korea Polar Research Institute. The number of particles larger than $0.3 \mu\text{m}$, temperature and relative humidity were monitored from 29th March to 24th June 2018. This real-time monitoring proved that, although the particle concentrations in the room air increased with that in the outdoor air, the AFSs were able to achieve and maintain the cleanliness required for each laboratory. The PaMo will be able to identify particle sources other than the outdoor air, provide a guideline for when to replace filters and notify unexpected AFS failure. We suggest that the PaMo is an easy and effective alternative to expensive particle counters for laboratories that operate AFS.

Key words: Arduino, cleanroom, fine dust, air filter, particle counter

(Yeongcheol Han, Hyejin Jung, Jangil Moon, Jongmin Baek, Changhee Han, Soon Do Hur, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea)

^{*} Corresponding author: +82-32-760-5438, E-mail: highstar1@kopri.re.kr

1. 서 론

대기 중 부유 먼지는 대부분의 실험실이 수행하는 연구에 직간접적으로 영향을 미친다. 예를 들어 미량 원소 조성을 다루는 습식 실험실(wet laboratory)에서는 부유 먼지가 시료나 실험 도구에 침적되면 실험 바탕값(procedure blank)을 높여 잘못된 결과를 초래할 수 있다. 고가의 분석 기기나 컴퓨터, 서버 등의 전자 장비를 운용하는 건식 실험실(dry laboratory)의 경우 먼지는 장비 오작동이나 고장, 수명 단축을 일으킨다.

최근에는 건물에 따라 실내 부유 먼지 농도를 낮추는 공조 설비를 갖추기도 하나, 많은 실험실에서 자체적으로 별도 장치를 갖추고 있다. 간단하게는 시중에 판매되는 공기청정기로부터, 실내 공간 일부를 구획하여 내부 먼지를 제거하는 클린벤치(clean bench) 또는 클린부스(clean booth)를 설치하거나, 필요에 따라 환온·환습 기능을 더한 공조 설비로 실내 전체를 청정 실험실(cleanroom laboratory)로 운용하기도 한다. 이들은 공통적으로 공기를 필터(air filter)에 통과시켜 부유 입자를 제거하는데, 일반적으로 필요로 하는 청정도에 따라 여러 종류의 필터가 단계적으로 사용된다. 이 때, 최종 필터로는 HEPA(high efficiency particulate air) 필터가 보편적이고, 이는 0.3 μm 이상의 크기를 가진 부유 입자를 99.97% 이상 제거한다. 보다 높은 청정도가 요구되는 경우 0.1 μm 이상의 입자를 99.999% 이상 제거하는 울파(ULPA, ultra-low penetration air) 필터를 사용하기도 한다. 공기 필터는 사용 시간이 늘어나면 점차 성능이 떨어지므로 사용 환경과 기간을 고려하여 주기적으로 교체되어야 한다. 공기 흐름상 최종 필터보다 상류에 놓이는 프리필터(pre-filter)는 비교적 큰 먼지의 제거와 더불어 상대적으로 고가인 최종 필터의 수명을 연장시켜 준다. 프리필터로는 통기성 부직포나 유리섬유를 일반적으로 사용하고, 이들을 함께 사용하는 경우 프리필터와 미디엄필터(medium filter)로 구분하여 부르기도 한다.

제조 업체는 성능 보증 하에 공기 필터를 공급하나, 이것이 실험 환경의 청정도를 보증하지는 않는다. 필터를 통과하지 않은 외부 공기 유입이나, 실험 도구와 장비, 실험자로부터 비산하는 먼지가 실험 공간의 먼지 농도를 높일 수 있다. 또한 사용시간이 증가하여 필터 성능이 떨어지면 먼지 농도가 높아질 수

있다. 실외 미세먼지 농도 증가 역시 실내 먼지를 증가시킬 수 있다.

실험 환경의 공기 청정도에 영향을 미치는 인자들을 가능하고 통제하기 위해서는 실내 부유 먼지 양을 직접 측정할 필요가 있다. 시중에는 공기 중 부유 입자를 연속적 또는 비연속적으로 측정하는 장비들이 상용화되어 있고, 주로 클린룸(clean room)을 운용하는 산업체와 연구기관 등이 이들을 사용하고 있다. 그러나 이들 측정기는 성능에 따라 가격이 수백만 원에서 수천만 원으로 높아, 소규모 연구 실험실에서는 활용하기 어려운 단점이 있다.

본 기술보고에서는 국내에서 수 만원 이내로 저렴하고 쉽게 구입할 수 있는 센서(sensor)를 활용하여 실험실 공기의 먼지 농도를 연속적으로 측정할 수 있는 소형 장치(particle monitor, PaMo)를 제작하고, 이를 공기 필터를 갖춘 실험실 내에 설치하여 실험 공간의 청정도 감시와 유지 관리에 어떻게 활용할 수 있는지 보고한다. 이는 부유 먼지량 관찰이 필요하면서 상시 전원 공급과 무선 인터넷망 접속이 가능한 대부분의 실험실에서 활용이 가능하다.

2. 재료 및 방법

2.1 실시간 계측 장비 제작

본 기술보고에서는 두 기(PaMo#1, #2)의 실시간 감시 장비를 제작하였고, 이 때 사용한 부속품은 표 1과 같다. 먼지 센서로는 PMS7003 (Plantower Co., China)을 사용하였다. 이 센서는 레이저 산란방식으로 공기 0.1 L 내 최저 0.3 μm 이상의 입자를 매 초마다 계수하여 출력한다(Tan, 2017). 온습도 측정을 위하여 AM2302 (DHT22; Guangzhou Aosong Electronics Co., China) 센서를 추가하였다. 측정값의 표시를 위하여 LCD (1602 with I²C interface board)를 사용하였다. 센서들의 측정값을 읽어 들이고 그 결과를 처리하여 LCD로 출력하기 위하여 ESP8266EX 보드(WeMos D1, 이하 'D1보드')를 사용하였다. D1 보드는 아두이노 우노(Arduino UNO)보드와 호환되어 공개 프로그램인 스케치(Sketch; www.arduino.cc)로 코딩(coding), 컴파일(compile) 및 보드로 업로드가 가능하다. 또한 와이파이(WiFi)를 통한 인터넷 망 접속과 측정 데이터 전송이 가능하다. 전송된 데이터의 수신과 저장에는 MathWorks사의 IoT (Internet

of Things) 플랫폼인 ThingSpeak (www.thingspeak.com)을 사용하였다. 이 사이트는 PaMo가 접속하여 데이터를 송신할 수 있는 API (application programming interface)를 제공하고 일정량의 데이터 저장 공간을 무료로 제공한다. 또한 수신되는 측정 자료를 통계 처리하여 웹페이지나 스마트폰 어플리케이션에서 실시간 그래프로 보여주고, 저장된 데이터를 아스키(ASCII)형식 파일로 내려 받을 수 있는 기능을 제공한다.

먼지 센서에서 매 초 발생하는 측정값은 노이즈(noise)를 포함하고 있어 적절한 통계 처리가 필요하다. 이 과정은 ThingSpeak에 데이터를 전송한 후 저장된 데이터를 바탕으로 수행 가능하지만, 측정값을 모두 전송할 경우 ThingSpeak 저장공간의 빠른 소모와 저장 데이터의 거대화를 초래하므로 데이터

를 전송하기 전 D1보드에서 처리하는 것이 적절하다. 먼지 센서의 노이즈 특성 관찰을 위하여 약 16분 동안 누적한 측정값($n=980$)을 푸리에 변환한 결과, 14초 이하의 단주기에서는 화이트 노이즈(white noise)로 뚜렷한 주기성이 없으나, 일부 장주기(예: 204초)에서 주기성이 관찰되기도 하였다. 본 기술보고에서는 먼지 센서 측정값을 보드에서 50초 동안 누적 평균하여 단주기 노이즈를 제거한 후 ThingSpeak로 전송하였고, 이 때 앞서 관찰되었던 장주기 주기성은 관찰되지 않았다.

2.2 청정 실험실과 감시장치 설치

빙하코어(ice core) 연구를 목적으로 하는 극지연구소의 서로 다른 두 실험실(빙하실험실과 빙하분석실)에 PaMo#1과 #2를 각각 설치하였다(그림 1). 이

Table 1. Components of PaMo.

Parts	Model (Manufacturer)	Cost
Particle sensor	PMS7003 (Plantower)	<100,000KRW in total
Temperature/Humidity sensor	DHT22 (AM2302; Guangzhou Aosong Electronics)	
Display	LCD 1602 with I2C interface board	
Arduino UNO compatible board	ESP8266EX (D1; WeMos)	
Case, Cable, Fan		

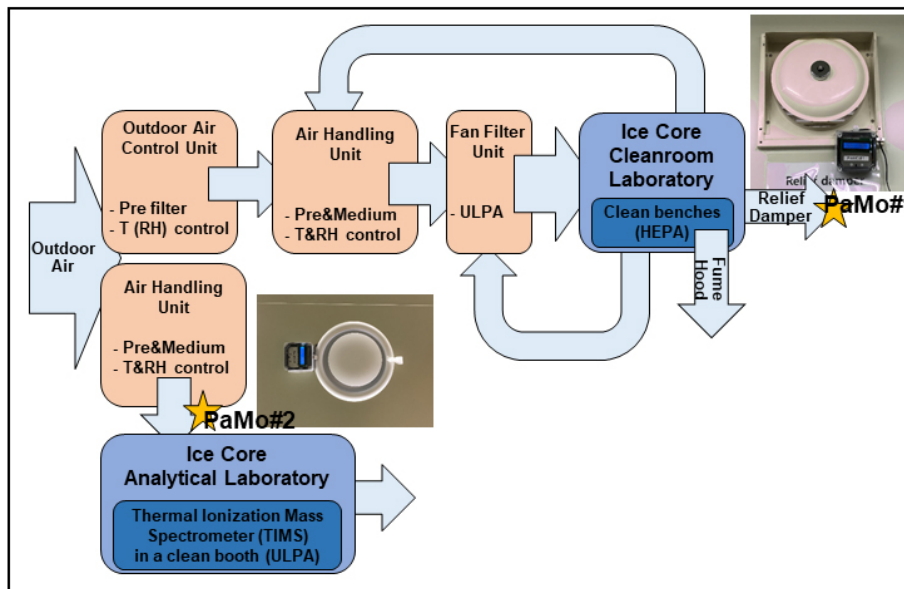


Fig. 1. A schematic diagram for the air flow for the two laboratories at KOPRI and the installed positions of PaMo #1 and #2.

실험실들은 극지역에서 시추한 빙하코어 내 다양한 구성물질들을 프록시(proxy)로 하여 지구의 과거 기후와 환경 변화 기록을 복원하는 연구를 수행하는 곳이다. 이 때 프록시로 활용하는 미량원소(trace element)들의 농도는 보통 pg g^{-1} 이하($<10^{-12} \text{ g g}^{-1}$)로 매우 낮아서 이들의 농도나 동위원소 조성을 분석하기 위해서는 시료 오염을 최소화하는 청정실험환경이 필요하다(Jun *et al.*, 2014).

PaMo#1을 설치한 빙하실험실은 빙하시료 내 극미량 성분의 전처리를 주 목적으로 한다. 이 실험실의 공기여과장치를 포함한 공조 설비 모식도를 그림 1에 나타내었다. 외부 공기는 외조기(outdoor air control unit)에서 부직포 프리필터를 지나고, 이후 향온향습기(air handling unit)에서 다시 프리필터와 미디엄필터를 거친 후 최종적으로 실험실 천장에 설치된 27개 FFU(fan filter unit)의 울파필터를 통과하여 실내로 공급된다. 이 과정에서 외조기와 향온향습기는 냉난방기와 가습기로 실내 온습도를 설정된 값에 수렴시킨다. 실내로 공급된 공기는 여러 경로로 실험 공간을 빠져나가는데, 일부는 다시 FFU로 되돌아가 실내로 공급되고, 일부는 향온향습기로 되돌아가서 외기와 혼합되어 재차 FFU로 공급된다. 일부 공기는 실험실 내부와 외부의 압력 차를 줄이기 위한 릴리프 댐퍼(relief damper)를 통하여 외부로 배출된다. 실험실 내에는 헤파필터를 장착한 7개의 클린벤치가 실내 공기 중 부유 입자를 추가로 제거하여 벤치 내부의 청정도를 높인다. 클린벤치 내부 공기 중 일부는 흡 후드(fume hood)를 통하여 외부로 배출되고, 일부는 실험실 내로 되돌아온다. 벤치 내에서 유해물질이 사용되는 경우 흡 후드의 배기량을 높여 유해물질의 실내 누출을 최소화시킨다. 이처럼 실내 공기가 다양한 경로로 실외로 배출되지만, 실험실 내부는 외부에 비하여 기압이 높은 양압(positive pressure) 상태를 유지하여 외부 공기가 유입되는 것을 막는다. PaMo#1은 릴리프 댐퍼에 설치되어(그림 1) 실험실 내부 공기의 입자 및 온습도를 측정하였다.

빙하분석실에는 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer, TIMS)가 설치되어 있다. 이 실험실에는 외기가 향온향습기의 프리필터와 미디엄필터를 거쳐서 공급된다. 실험실 내에는 울파필터를 장착한 클린부스가 있고 그 내부에 TIMS가 설치되어

있다. 향온향습기에서 공급되는 공기의 청정도를 측정할 수 있는 급기구에 PaMo#2를 설치하였다(그림 1).

PaMo#1과 #2는 사전 테스트를 거쳐 2018년 3월 29일에 해당 위치에 설치되었고, 본 기술보고에서는 같은 해 6월 24일까지 약 3개월 동안 관측한 결과를 바탕으로 이들의 활용 가능성을 논한다.

2.3 외기 먼지 농도와 온습도

외부 공기의 먼지 농도 변화가 실험 환경에 미치는 영향을 가늠하기 위하여 한국환경공단에서 운영하는 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr>) 실시간 자료 중 인천 연수구 극지연구소 건물로부터 가까운 세 관측소(송도, 동춘, 고잔)의 PM2.5 자료($\mu\text{g m}^{-3}$)를 활용하였다. 해당 자료는 매 시간 평균값이 실시간으로 제공되고 있다. 이 가운데 송도 관측소는 극지연구소로부터 직선거리로 1.8 km 떨어져 있어 가장 가깝다. 동춘, 고잔 관측소와의 거리는 각각 5.0, 5.7 km이다. 외부 온도와 습도는 기상청에서 제공하는 AWS(Automatic Weather Station; <http://www.weather.go.kr>) 자료 중 극지연구소 건물에서 가까운 송도, 시흥 두 관측소의 실시간 측정값을 사용하였다. 보다 가까운 송도관측소(직선거리 3.6 km)는 온도 정보만 제공하는 반면에, 시흥관측소(직선거리 11.9 km)는 온도와 습도 자료를 함께 제공하고 있다.

3. 결과 및 토의

3.1 실험실 청정도와 외기 먼지 농도

PaMo#1과 #2가 측정한 $\geq 0.3 \mu\text{m}$ 먼지 농도 변동을 매 시간마다 평균하여 그림 2a와 2b에 나타내었다. 그래프가 단절된 기간은 보드의 인터넷 망 접속이 끊겨 데이터 전송이 중단된 구간이다. 단위는 센서가 출력하는 공기 0.1 L당 입자 수를 세제곱미터당 개수(particles m^{-3})로 환산하였다. 극지연구소 인근 세 관측소에서 측정된 외기의 PM2.5 농도($\mu\text{g m}^{-3}$)는 그림 2c에 나타내었다.

PaMo#1이 설치된 빙하실험실의 $\geq 0.3 \mu\text{m}$ 먼지 농도는 관측기간 동안 0~0.96 particles L^{-1} 의 범위 내에서 변동하였다. 평균값과 중앙값(median)은 각각 0.20 particles L^{-1} 와 0.18 particles L^{-1} 이었다(그림 2a). 빙하분석실 향온향습기를 통과한 공기를 측정한 PaMo#2는 10~872 particles L^{-1} 의 범위 내에서 평균값 230

particles L⁻¹과 중앙값 199 particles L⁻¹의 결과를 보 였다(그림 1b). 극지연구소 인근 세 관측소의 평균 PM2.5는 관측기간 동안 5~90 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 농도 범위를 보였고, 평균값은 23 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이었다.

청정 실험실의 청정도는 단위 부피당 먼지 농도 를 기준으로 등급을 나눈다(Whyte, 2010). 본 기술 보고에서는 청정도를 국제 표준화 기구(International Organization for Standardization, ISO)의 등급 기 준(ISO 14644-1)과, 공식적으로는 2001년에 사용이 중단되었으나 여전히 통용되는 미국 연방 기준(US Federal Standard 209E, FED-209E)을 동등한 등급 에 대하여 병기하였다. 각 기준은 다음의 식을 사용 한다(Whyte, 2010).

$$C_{num} = 10^N \times (0.1/D)^{2.08} \quad (\text{ISO 14644-1})$$

$$C_{num} = N \times (0.5/D)^{2.2} \quad (\text{FED-209E})$$

이 때, C_{num} 은 등급 N에서 단위 부피당(ISO는 m^{-3} , FED-209E는 ft^{-3}) 입자 크기 D(단위: μm)의 최대 허용 개수를 의미한다. 예를 들어, ISO 5는 $\geq 0.1 \mu\text{m}$ 입 자에 대하여 $10^5 \text{ particles m}^{-3}$ 의 최대 허용 농도를 갖는 등급이다. 또, FED-209E의 Class 100은 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 입자에 대하여 $100 \text{ particles ft}^{-3}$ 의 최대 허용 농 도를 갖는 등급이다. 입자 크기 $\geq 0.3 \mu\text{m}$ 에 대한 위 두 등급의 허용 먼지 농도는 각각 $10,200 \text{ particles m}^{-3}$ 와 $300 \text{ particles ft}^{-3}$ 으로 유사하므로, 본 기술보 고에서는 ISO 5 (Class 100)와 같이 표기하였다.

PaMo#1이 측정하 빙하실험실 먼지 농도는 관찰 기간 동안 ISO 5 (Class 100) 범위 내에서 변동하였 고, 외기의 먼지 농도가 상대적으로 낮았을 때 청정 도가 높아져 ISO 4 (Class 10) 기준 이하로 떨어지기도 하였다. PaMo#2는 최종 필터로 미디엄필터를 통 과한 공기를 측정하므로 상대적으로 높은 결과값을 보였으나, 빙하분석실이 ISO 8 (Class 100,000) 기준

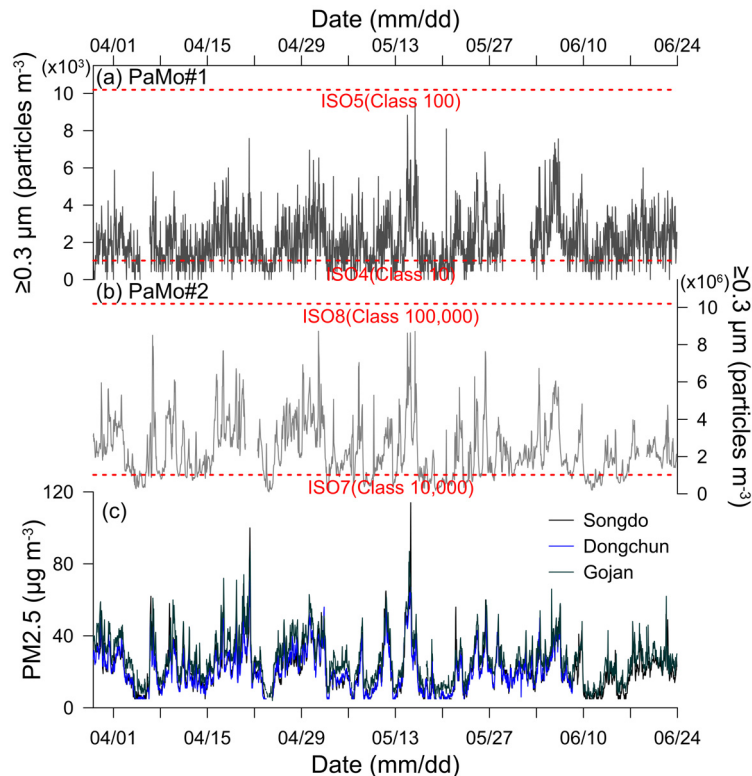


Fig. 2. Hourly averaged airborne particle concentrations (particles m^{-3}) in two ice core research laboratories at KOPRI monitored by (a) PaMo#1 and (b) PaMo#2 from 29 March to 24 June 2018. The upper limits of cleanliness classes defined by ISO14644-1 and FED-209E are indicated with dashed red lines. (c) Outdoor air PM2.5 ($\mu\text{g m}^{-3}$) determined at three different sites (Songdo, Dongchun and Gojan) near the KOPRI building are displayed.

Table 2. Correlation coefficient matrix for the airborne particle levels monitored at different sites. PaMo#1 and #2 counted the numbers of particles larger than $0.3 \mu\text{m}$ in two laboratories at Korea Polar Research Institute (KOPRI), compared with PM2.5 measured at three different sites nearby the KOPRI building.

Correlation coefficient	PaMo#1	PaMo#2	Songdo	Dongchun	Gojan
PaMo#1	1	0.61	0.51	0.52	0.47
PaMo#2		1	0.79	0.79	0.77
Songdo			1	0.94	0.88
Dongchun				1	0.93
Gojan					1

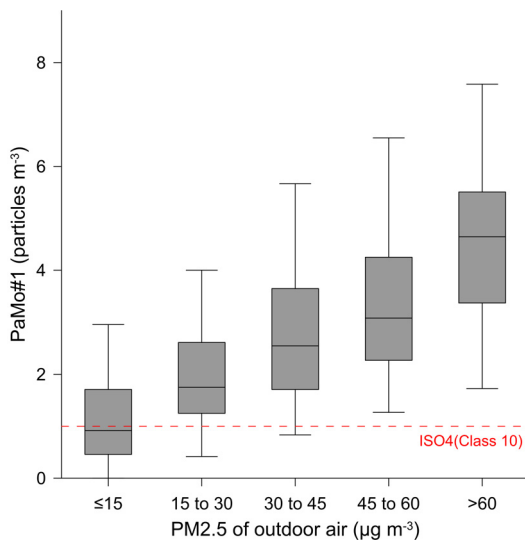


Fig. 3. A box and whisker (1st and 99th percentiles) plot showing the increase of the particle concentration in the cleanroom laboratory due to outdoor airborne particles.

이내로 유지됨을 보여주었다. 빙하분석실 역시 외기 먼지 농도가 낮을 때 상대적으로 청정도가 높았다. $\geq 0.3 \mu\text{m}$ 먼지 농도의 빙하실험실/빙하분석실 비는 평균 0.0010으로, 빙하실험실이 빙하분석실에 비하여 약 1,000배가량 낮은 먼지 농도를 보였다. 이는 빙하실험실이 외조기의 프리필터, 실험실 천장의 울파 필터, 최종 필터를 통과한 공기의 재순환 구조를 추가로 갖추고 있기 때문이다(그림 1).

관측 결과들 사이의 상관관계를 표 2에 정리하였다. PaMo#1의 측정값은 PaMo#2와는 0.6, 외기 PM2.5와는 0.5의 상관계수(correlation coefficient)를 가졌다. PaMo#2 결과와 외기 PM2.5는 0.8의 높은 상관계수를 보였다. 세 관측소에서 측정한 PM2.5 사이의 상관계수는 0.9로 높았다. 실험실내 공기와 외

기 사이의 높은 양의 상관관계는 외기의 먼지 농도가 실내 먼지 농도를 변동시키는 주요 요인인 것을 보여준다.

그림 3은 외기 PM2.5의 농도 구간에 따른 빙하실험실의 먼지 농도 범위를 보여준다. 가로축에는 PM2.5의 구간을 ≤ 15 , 15~30, 30~45, 45~60, $>60 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 나누었다. 각 구간에서 PaMo#1의 농도 범위를 제1, 제2, 제3사분위수와 함께 1%와 99% 값을 끝단으로 갖는 상자 그림(box and whisker plot)으로 표현하였다. 빙하실험실은 외기 PM2.5가 $15 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하일 때에는 중앙값이 ISO 4 (Class 10) 이하로 높은 청정도를 보였다. 외기의 PM2.5가 증가하면서 실험실 내부의 먼지 농도가 역시 증가하였으나 ISO 5 (Class 100) 청정도를 충족하였다. 관측값을 바탕으로 외삽할 경우, PM2.5 농도가 $100 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 증가하더라도 실내 먼지 농도가 ISO 5 (Class 100) 기준 이상으로 증가할 확률이 1% 미만일 것으로 추정된다.

3.2 실험실 온습도 감시

항온항습기는 냉방기, 난방기, 가습기 세 부속 장치를 사전에 설정된 온습도에 따라 작동한다. 제습의 경우 공기를 냉각하여 수분을 제거한 후 재가열하는 방식이다. DHT22 센서를 통하여 얻은 실험실 온도와 습도 자료는 항온항습기의 작동에 대한 정보를 제공해준다. 예로, 그림 4는 5월 27일에 PaMo#1과 #2에서 얻은 온습도 값과 기상청 AWS 자료를 비교한 것이다. 해당일 PaMo#1과 #2의 온도는 $17.9 (\pm 0.3, \text{이하 } 1\text{sd})^\circ\text{C}$ 와 $17.8 (\pm 1.1)^\circ\text{C}$ 로 유지되었다. 같은 시간 외부 온도는 송도관측소에서 $14.4\sim 21.1^\circ\text{C}$, 시흥관측소에서 $13.6\sim 24.0^\circ\text{C}$ 의 범위를 가졌다. 습도는 PaMo#1과 #2가 각각 $76 (\pm 2)\%$, $83 (\pm 7)\%$ 를 보였고, 시흥관측소에서 $32\sim 83\%$ 의 범위를 보였다. 실험

실 내부 온습도는 외부 변동과 비교해볼 때 비교적 안정적으로 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 외부온도와 비교할 때 08:00~20:00에는 냉방기가, 그 외 시간에는 난방기가 작동하였음을 추정할 수 있다. 외부 습도가 내부 습도보다 주로 낮았기 때문에 내부 습도가 가습기에 의하여 높아졌을 것으로 보인다. PaMo#1은 #2에 비하여 보다 정밀하게 온습도가 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 빙하실험실은 외조기가 공급되는 공기의 온도를 일차적으로 조절하고 또한 온습도가 조절된 공기가 재순환하는 구조를 갖추고 있는 반면에 빙하분석실은 외조기와 공기 재순환 구조를 가지고 있지 않기 때문이다(그림 1).

4. 결 론

본 기술보고에서는 시중에서 쉽게 구입할 수 있는 센서들을 활용하여 연구 실험실의 청정도와 온습도를 실시간으로 측정하는 장치의 개발과 활용에 대하여 보고하였다. 이 장치는 외기의 변동에 대하여 실험실 내 먼지 농도와 온습도 유지 여부를 실시간으로 감시할 수 있다. 이는 향후 우려되는 외기 미세먼지 농도와 연교차 증가에 대한 대응 방안으로 활용할 수 있다. 이에 더하여, 외기 이외의 오염원 파

악, 필터 사용 시간 증가에 따른 성능 저하 및 교체 필요성 확인 등에 활용 가능하다. 따라서 이 장치는 청정 실험 공간을 운영하나 고가의 입자 계수기를 활용하기 어려운 실험실에서 선택할 수 있는 대안으로서 가치가 높다고 제안한다. 비록 측정값의 정확도를 높이기 위하여 센서의 검교정이 필요할 수 있으나, 청정 실험실 유지 관리가 목적인 경우 낮은 먼지 농도의 정밀한 정량보다는 먼지 검출에 대한 시계열 자료로 충분히 그 목적을 달성할 수 있다.

위에 열거한 활용상 장점 외에도, 이 장치는 유지보수가 쉽고 확장성이 큰 이점이 있다. 상용품에 비하여 월등히 저렴하여 고장시에도 쉽게 부품 교환이 가능하다. 또한 시중에서 구입 가능한 다양한 센서들을 추가하여 각각의 실험환경에 필요한 정보들을 수집할 수 있다. 특히 본 보고에서 사용된 수동적 실시간 감시 뿐 아니라, 보다 능동적인 용도로 확장 가능하다. 예를 들어, 실내 먼지 농도가 목표로 하는 청정도 이상으로 증가하거나 공조장치의 이상으로 실내 압력이 떨어지는 경우 경고 알람을 원격 전송하거나, 외기의 먼지량에 연동하여 공조장치의 풍량을 조절하는 등의 실험실 감시, 제어 관리가 가능하다. 위험물 누출, 화재, 누수 등의 위험요소에 대하여 실험실 안전 관련 용도 역시 생각해볼 수 있다.

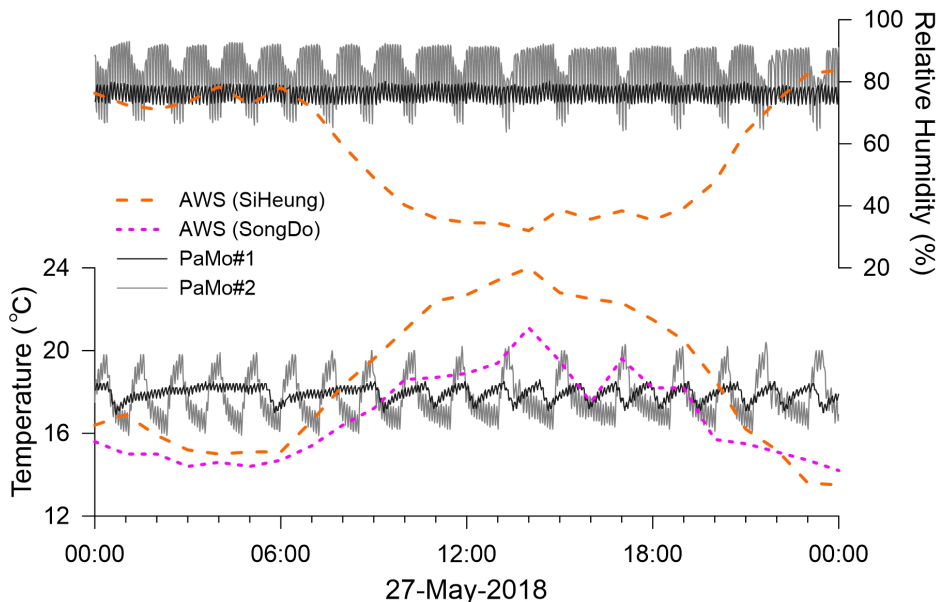


Fig. 4. Relative humidity and temperature monitored by PaMo#1 and #2, compared with Automatic Weather Station data at two different neighboring sites (SiHeung and SongDo).

감사의 글

본 연구는 극지연구소 연구사업 “빙하코어를 활용한 남극 빅토리아랜드 고해상도 기후·환경 복원 연구(PE18040)”의 연구비 지원으로 수행하였습니다. 좋은 의견을 주신 두 분의 심사위원께 깊이 감사드립니다.

REFERENCES

Jun, S.J., Hong, S.B., Hur, S.D., Lee, J., Kang, J.-H., Hwang, H.J., Chung, J.W., Jung, H.J., Han, C. and Hong, S., 2014, Establishment of an ice core processing method and analytical procedures for fundamental proxies. *Ocean and Polar Research*, 36(1), 13-24 (in

Korean with English abstract).

Tan, B.K., 2017, Laboratory evaluation of low to medium cost particle sensors. Master Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 143 p.

US Federal Standard 209E, 1992, Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones. Technical report, General Service Administration, Washington, DC, withdrawn 29 November, 2001.

Whyte, W., 2010, Cleanroom technology: Fundamentals of design, testing and operation. John Wiley & Sons, Chichester, 367 p.

Received : October 29, 2018

Revised : November 22, 2018

Accepted : November 25, 2018