

초소형 에어로졸 컨디셔너를 내장한 광산란 초미세먼지 센서 시스템의 구현 및 성능평가

백승훈*, 손명희^o

Implementation and Evaluation of a Light Scattering Fine Particulate Matter Sensor System with a Tiny Aerosol Conditioner

Sung Hoon Baek*, Myunghee Son^o

요 약

초미세먼지는 호흡기 및 심혈관 질환에 대한 위험성의 증가와 관련이 있다. 초미세먼지(PM2.5)의 농도는 시간에 따라 크게 변하기 때문에 연속적인 실시간 측정이 중요하다. 또한, 초미세먼지인 에어로졸은 높은 습도 환경에서 수분을 흡수하여 입경이 성장한다. 이러한 흡습성장은 초미세먼지 측정에 큰 오차를 발생시킨다. 상대습도를 낮추기 위해서, 대부분의 초미세먼지 센서들은 크고 전력을 많이 사용하는 간접 가열 방식을 사용한다. 이 논문은 실시간 연속 초미세먼지 측정기의 시스템 구조와 이것의 소형 습도 제어 장치의 구현 방식을 제안한다. 이 제안한 소형 습도 제어 장치는 작고 전력 효율이 좋아서 이동형 장치에 설치될 수 있다. 이 초미세먼지 측정기는 서버로 무선랜을 통해 데이터를 전송하는데, 클로닝 공격 및 위변조를 막을 수 있는 시간 토큰 제한 기법 및 해싱을 사용하여 데이터를 보호한다. 습도가 크게 변하는 30일 동안 우리가 구현한 센서 시스템은 측정된 데이터와 국립환경과학원 중부권 측정소에서 측정된 데이터를 비교한 결과 높은 정확도를 가지는 것으로 확인되었다.

키워드 : 센서, 미세먼지, 광산란, 초소형 에어로졸 컨디셔너, 위변조

Key Words : Sensor, Particulate matter, Light scattering, Tiny aerosol conditioner, Tampering

ABSTRACT

The fine particulate matters are associated with an increased risk of respiratory and cardiovascular deceases. The mass concentration of the fine particulate matter (PM2.5) can dramatically change, so it is necessary to continuously measure the PM2.5 mass concentration. In addition, aerosols can grow up by absorbing water in a high relative humidity. This hygroscopic growth can make an error to monitor the PM2.5 mass concentration. To lower relative humidity, the most of PM monitors include an indirect heating device, which is big and consumes a large electrical energy. This paper proposes the system architecture of the continuous PM monitor and the implementation method of a small direct heating device (is called Tiny Aerosol Conditioner), which is small, has a high energy-efficiency, can be made as a portable device. This continuous PM monitor periodically transmits measured data to a server through wireless LAN. The data can be protected from cloning attack and tempering by time-token constraint scheme and hashing. During 30 days with great changes of relative humidity, the proposed device was compared with the measured results of National Institute of Environmental Research of South Korea and was proven to be of high accuracy.

* 본 논문은 2020년 중원대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌습니다.

※ 본 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다(2020-DD-RD-0487-01).

• First Author : Jungwon University Department of Computer Engineering, shbaek@jwu.ac.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : Gonggam Sensors Co., Ltd., regina@ggsensors.com, 정희원

논문번호 : 202106-124-R-U, Received June 4, 2021; Revised July 6, 2021; Accepted July 9, 2021

I. 서 론

초미세먼지는 2013년 세계 건강 기구(WHO)산하 국제 암연구소(International Agency for Research on Cancer: IARC)에서 그룹1 발암성물질로 분류할 정도로 흡입시 건강을 악화시키는 사회적 문제이다. 특히 초미세먼지가 호흡기 및 심장 혈관 사망률에 영향을 미친다[1]. COVID-19 팬데믹을 겪으면서 초미세먼지와 COVID-19에 대한 직접 관련성에 대한 다수의 연구 결과가 나오고 있고, 미국 인구의 98%를 대표하는 3,000개 이상의 카운티에서 수집된 결과에서는 초미세먼지 농도가 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 할 때 COVID-19 중증 위험이 8% 증가한다는 연구결과가 있었다[2].

건강과 관련된 초미세먼지 흡입을 최소화하기 위해서는 정확한 연속 측정 기술이 매우 중요하다. 그러나 연속성이 우수한 센서는 정확성이 나쁘고, 정확성이 우수한 측정기는 초단위 연속측정이 불가능한 문제가 있다.

미세먼지를 측정하는 방법은 크게 3가지로 분류하는데, 중량농도법, 베타선 측정법, 및 광산란법이 있다. 중량농도법은 대기 중 공기를 하루 동안 포집해서 포집된 공기의 무게를 측정하는 방법으로 미국 환경청을 포함한 전 세계의 기준측정방법이다. 측정 정확성은 우수하지만 정보 제공까지 소요되는 시간이 하루 이상 걸린다. 국내 에어코리아에서 제공하는 정보는 베타선 측정법으로 약 42분정도 대기 공기를 포집하고 필터에 쌓인 미세먼지에 베타선을 투과시켜 감쇄되는 양을 측정하는 간접 측정 방법이 많이 사용되고 있다. 에어코리아에서 제공하는 실시간 정보는 1시간 단위로 공기질을 측정할 수 있다.

광산란법은 대표적인 연속측정이 가능한 장치로 초단위의 실시간으로 공기질을 측정할 수 있다. 크기가 작아 IoT (Internet of Things) 기술과 접목하여 다양한 분야에 응용할 수 있다[3].

광산란법은 레이저 광원이 입자에 빛을 투사했을 때 입자에 의해 산란되는 빛의 양을 감지하는 방식인데, 산란패턴은 미세먼지 입자크기에 따라 미(Mie) 산란을 주로 하지만 입자 크기가 커지면 직진성을 갖으면서 광 특성이 변하는 성질이 있다.

질산암모늄, 황산암모늄, 무기염과 같은 화학적 조성으로 구성된 초미세먼지들은 다습환경에서 흡습하는 성질로 고체상태의 입자가 흡습을 통하여 액체 상태로 액상화 되면서 입경이 3~4배까지 커지는 성질이 있다[4,5]. 이와 같이 고체상태의 미세먼지 입자가 흡습 현상을 통하여 액상화되는 최저 상대습도를 조해 상

대습도라고 한다. 조해 상대습도는 입자들의 성분에 따라 다르고, 온도가 높을수록 낮아지고, 혼합물이 단 일물질보다 낮다[6-8].

상대습도를 제어하지 않는 소형 광산란 법의 측정 장치들은 상대습도와 먼지입자의 조성에 따라 상이한 결과를 출력한다[9-13].

실제 대기 환경은 시시각각 화학적 조성과 기상상태가 바뀌기 때문에 머신러닝 기술을 통하여 실제 대기 환경을 모두 학습하는 것은 불가능하다. 그러므로 광산란식 PM (Particulate Matter) 센서로 흡습 에어로졸이 그대로 유입되지 않도록 센서 전단계에서 에어로졸 컨디셔너가 흡습이전 상태의 에어로졸로 전처리 과정을 수행해야 한다.

본 연구에서는 일상생활에서 가장 많이 사용하고 있는 광산란법 측정기의 다습환경에서의 정확성에 대한 문제점을 분석하고 이를 해결하기 위한 방법으로 초소형 에어로졸 컨디셔너를 개발하였으며, 이것은 기계적 및 전자회로적으로 작은 크기로 설계되었다. 흡습 미세먼지가 광산란법 측정기로 유입될 때 에어로졸 컨디셔너에서 전처리 건조 과정을 거쳐 미세먼지 센서가 흡습된 미세먼지로 인한 산란광 패턴이 바뀌지 않도록 안정적인 산란광을 유지함으로써 광산란법 측정기의 정확성을 향상시켰다. 또한, 측정기가 서버로 보내는 데이터의 위변조 및 서버에 대한 클로닝 공격을 피할 수 있도록 설계되었다.

국가측정망의 국가측정장치인 베타선 측정법과 비교 분석함으로써 측정기기의 신뢰성과 초소형 에어로졸 컨디셔너의 성능 검증을 확인하였다.

II. 설계 및 구현

황사와 유기탄소화합물은 무기염만큼 에어로졸 수분 흡수에 기여하지 않는다[5]. 무기염의 경우 상대습도 35~45% 범위에서 흡습으로 인한 에어로졸의 입경이 커지기는 하지만 상대습도가 약 67%에서 고체 에어로졸이 액상화되는 조해점이 관찰되고 입경 성장이 관찰된다[4]. 사용이 편리하고 실시간 측정이 가능한 광산란법 미세먼지 측정기의 경우 상대습도에 의한 에어로졸 입경 크기 변화는 산란광의 특성을 바꾸기 때문에 부정확한 측정 결과를 초래한다. 본 연구에서 개발한 광산란법 미세먼지 측정기를 위한 초소형 에어로졸 컨디셔너 (Tiny Aerosol Conditioner: TAC)는 다습 환경에서 조해점보다 낮은 55%RH로 에어로졸을 건조시킬 수 있는 장치로 그림 1 및 그림 2와 같이 수 cm의 매우 작은 장치로 개발 되어 광산란 미세먼

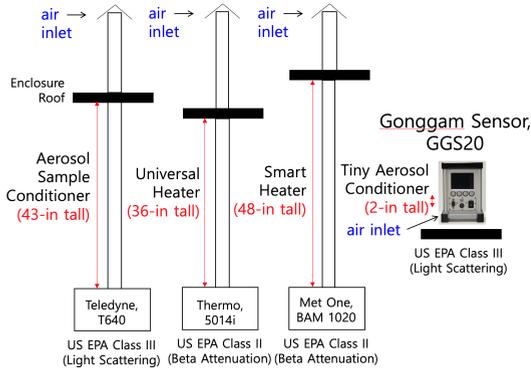


그림 1. 히터를 가지는 PM_{2.5} 측정 장비들과 히터 크기 비교
Fig. 1. PM_{2.5} monitors with a heater and the comparison of their heater size.

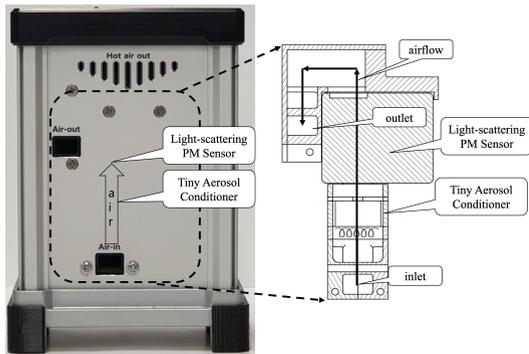


그림 2. 흡습 미세먼지를 위한 초소형 에어로졸 컨디셔너 (TAC)를 포함하는 GGS20
Fig. 2. GGS20 with a Tiny Aerosol Conditioner (TAC) for hygroscopic PM.

지 측정기 내부에 장착되도록 하였다.

그림 1은 대기환경에서 미세먼지의 흡습으로 인한 측정 정확도 오류 발생을 해결하기 위하여 히터를 장착한 대표적인 초미세먼지 측정 장치인 US EPA (Environmental Protection Agency) Class II (베타산 방식)^[15,16], EPA Class III (광산란방식) 인증 획득 계측기^[17]와 본 연구에서 개발한 GGS20 계측기를 나타낸다

국내 PM_{2.5} 국가측정소에 설치된 장치는 그림 1에서 Thermo사 5014i 모델^[15]과 Met One사 BAM1020^[16]이 설치되어 운영되고 있다. EPA Class III 인증을 받은 광산란식 미세먼지 장치인 Teledyne의 T640은 흡습 에어로졸을 건조시키기 위하여 109.2cm에 이르는 긴 히터 봉 타입의 Aerosol Sample Conditioner를 가지고 있어 흡습 미세먼지를 상대습도 35%~40%RH로 건조시킨 후 광산란 PM_{2.5} 센서로 유입시키는 구조이다^[17].

Thermo사의 모델 5014i는 91.4cm의 히터봉 간접 가열 방식으로 동절기에는 히터를 상대습도가 아닌, 특정 온도를 유지하는 방식으로 가동하고 있다. 시료 공기가 통과하는 금속 재질의 흡입구(inlet) 튜브 주위에 가열 장치 (그림 1의 히터)를 부착하여, 히터가 흡입구 튜브를 데우고 데워진 튜브는 시료 공기를 데우는 방식이 간접 가열식이다. 튜브 안에 다중 흡을 사용하여 접촉면을 증가시키는 방법도 사용된다^[18,19].

본 연구에서 개발된 초소형 에어로졸 컨디셔너를 장착한 공감센서 GGS20은 직접 가열 방식으로 55%RH로 흡습미세먼지를 건조시킨다. 직접 가열 방식에서는 코일 형태의 발열체가 공기에 직접 접촉하여 공기를 가열한다. 직접 가열방식은 공기와 닿는 면적이 넓기 때문에, 그림1과 같이 기준이 간접 가열식에 비해서 작은 크기로 제작될 수 있다.

그림 2는 흡습 미세먼지를 위한 초소형 에어로졸 컨디셔너(Tiny Aerosol Conditioner: TAC)를 구비한 장치의 흡입구/배기구 외관과, TAC를 포함한 센서 부의 단면도를 보여준다.

본 연구에서 개발한 TAC 단면도와 흡입구 배기구가 있는 장치 외관이 그림 2에 나타나있다. 이 구조를 보면 아래에 공기 흡입구가 있고 위에 배출구가 있다. 즉, 공기가 아래에서 위로 흘러가는 구조이다. 초소형 에어로졸 컨디셔너에서는 가열에 필요한 에너지만 사용하고 공기의 흐름을 바꾸기 위한 에너지를 사용하지 않도록 설계하여, 에너지 소비 효율이 향상되었다. GGS20은 65mW의 소형 팬을 사용하고 있는 반면, 그림 1에 보여진 기존의 방식들은 본 연구와 반대로 위에서 아래로 공기를 포집하는 펌프가 필요한데 thermo사의 5014i 장비의 경우에는 펌프가 488W의 전력을 소모한다^[15].

흡입구에서 들어간 공기는 코일형태의 히터에서 가열되어 상대습도가 낮아지고 에어로졸에서 흡습된 수분이 증발한다. 데어진 공기는 TAC 온습도 센서에서 온도 및 습도를 측정하고 코일의 전류를 제어하여 PID (Proportional Integral Derivative) 기법으로 공기의 습도를 일정하게 제어한다.

습도가 일정하게 제어된 공기는 PM센서에서 광산란 기법으로 초미세먼지 농도를 측정한다. PM센서 내부의 팬은 공기를 순환시킬 뿐만 아니라 회전수를 측정하여 공기의 유량을 측정한다.

대기 중 섭씨 40도 이상에서 대기화학반응으로 물질의 손실이 발생할 수 있기 때문에^[14,20-22] 초소형 에어로졸 컨디셔너 내부의 히터 가열 온도가 40℃를 넘지 않도록 제어된다. 상온이 20℃이고 상대습도가

90%일 때에, 9℃도 더 상승하면 상대습도가 55%로 낮아진다. 그렇기 때문에 주로 데워진 공기는 40℃를 넘지 않는다.

본 연구에서는 광산란식 미세먼지 측정기에서 측정에 필요한 공기양이 매우 적기 때문에 히터의 가열 온도를 40℃ 이하로 제어하면서 직접 가열방식의 초소형 에어로졸 컨디셔너를 설계 및 개발 할 수 있었다. 공기와 접촉 면적을 넓게 하여 최소 전력으로 실시간 가열이 가능하도록 하였다.

실제 외기 상대 습도 90%를 초소형 에어로졸 컨디셔너를 통과한 후 상대 습도가 55%로 감소하는데에 사용된 소비전력은 약 0.5 W이다.

발열체는 니켈코일 코일 형태로 제작되었으며, PWM (Pulse Width Modulation)으로 발열체의 전류를 제어한다. 발열체 뒤에 측정된 온도 및 습도를 이용한 PID 제어으로써 발열체를 통과한 공기의 습도가 일정하게 유지된다.

초소형 에어로졸 컨디셔너의 직접 가열 방식에 따른 과열과 화재를 방지하기 위해서 본 연구에서는 초소형 에어로졸 컨디셔너 내부 온도를 제어하도록 구현하였다.

흡습 미세먼지를 초소형 에어로졸 컨디셔너에서 상대습도 55%로 건조시키기 위한 내부 온도 제어 방법은 다음과 같다.

외기 온도, 외기 상대습도, 및 내부 온도가 주어지면 수식을 이용하여 내부 습도를 얻을 수 있다.

외기 온도를 T , 외기 상대습도를 rh , 내부 상대습도의 목표값을 rh_t 라고 하면, 이 목표값을 얻을 수 있는 내부 온도를 T_t 라고 하자.

그러면 T , rh , 및 rh_t 로부터 T_t 를 다음 수식으로 얻을 수 있다.

$$T_t = a \times 237.3 / (7.5 - a), \quad (1)$$

$$\text{단 } a = \frac{7.5 \times T}{237.3 + T} + \log_{10} \left(\frac{rh}{rh_t} \right).$$

내부 온도 T_t 는 초소형 에어로졸 컨디셔너가 흡습 미세먼지의 상대습도를 55%로 관리하기 위한 목표 온도가 되고 이 값을 MCU (Microcontroller Unit)로 전달하여 자동제어 기법으로 히터를 목표 온도까지 가열할 수 있다.

TAC의 크기를 초소형으로 제작함으로써 얻을 수 있는 장점은 그림 1에서 보여준 기존 측정기들이 사용하는 커다란 히터봉에 비하여 설치와 관리가 매우

쉽고, 저전력으로 실시간 상대습도 제어가 가능하다는 것이다.

그림 3은 제안하는 장치의 회로 블록 다이어그램이다. MCU인 STM32F4는 32비트 ARM Cortex M4인 CPU, 다수개의 SPI (Serial Peripheral Interface) 버스, UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter), 및 PWM (Pulse Width Modulation)을 출력할 수 있는 핀들을 가지고 있다.

TAC의 온도(Temperature) 및 상대습도(Relative Humidity) 제어를 위해서 외기 온습도를 측정할 수 있는 센서(Ambient T/RH sensor)를 구비하고 있으며, 환기팬(Ventilation FAN)은 보드에서 발생하는 열을 제거하여 정확한 외기 온도를 측정할 수 있게 한다.

UART를 외부 통신(Ext. Comm.)수단으로 갖고 있으며, 컴퓨터와 이것으로 연결하여 CLI (command line interface) 방식의 여러 가지 조작을 수행할 수 있다.

초미세먼지 측정을 위한 PM (Particulate Matter) 센서로서 Honeywell에서 만든 HPM115CO-004를 사용하였다.

TAC에 있는 코일 히터는 전력 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)으로 구동되고 PWM방식으로 전력을 제어한다. 보드의 오류로 TAC온도가 정상범위를 벗어나면 열 퓨즈(Thermal Fuse)로 전선이 끊어지기 때문에 화재를 예방할 수 있다. 코일 히터 (Coil Heater), TAC T/RH (Temperature, Relative Humidity) 센서, 및 공기 통로는 단열, 정전기 방지, 절연 기능을 갖춘 하우징으로 싸여있다.

microSD카드에는 측정된 데이터를 60년 동안 저장할 수 있다. WiFi모듈을 통하여 서버로 데이터를 전송한다. GPS에서 얻은 위치정보로 측정 데이터의 위치를 지도위에 표시될 수 있으며, GPS로 얻은 정확한 시간 정보는 시간 토큰 제한 (time-token

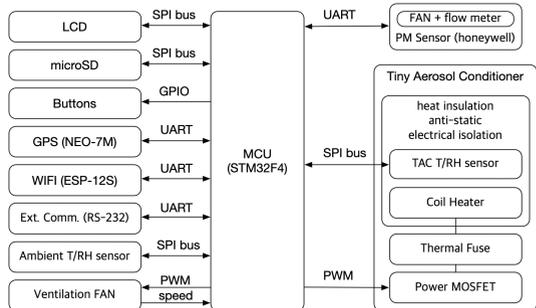


그림 3. 제어장치 블록 다이어그램
Fig. 3. The block diagram of the control device.

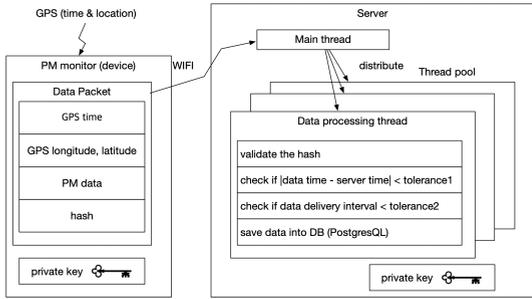


그림 4. 데이터 위변조를 막는 시간 토큰 제한 데이터 전송 보안 방식에 대한 다이어그램
 Fig. 4. The block diagram of a time token constraint data transmission to prevent from data tampering.

constraint) 기법을 이용하여 데이터의 위변조를 막는 데 사용된다.

그림 4는 데이터 위변조를 막는 시간 토큰 제한 보안 방식에 대한 다이어그램을 보여주고 있다. 장치와 서버는 동일한 개인키(private key)를 가지고 있으며 이 개인키로 SHA-256^[23]을 이용해 장치가 보낼 데이터에 해시(hash)를 만들고 이 해시를 전송할 데이터 패킷(Data Packet)에 포함시킨다. 데이터 패킷은 장치의 위치를 나타내는 GPS의 시간, 위도, 및 경도 정보와; 초미세먼지 측정값(PM data)을 포함하고 있다. 서버는 이 해시를 통하여 데이터 패킷의 위변조를 감지할 수 있다.

서버의 메인 쓰레드(main thread)는 장치가 보내는 데이터에 응답하고, 쓰레드 풀(thread pool) 중에서 대기 중에 있는 한 쓰레드로 처리를 넘긴다. 다중 프로세서의 병렬성을 높이기 위해서 다중 쓰레드를 사용한다.

각 쓰레드는 장치에서 데이터를 수신받아 개인키로 해시를 점검하여, 데이터 패킷(시간, GPS 위치, PM 측정값)이 위변조 되었는지를 확인한다. 위변조가 없다면, 서버의 시간과 데이터 패킷의 시간이 오차범위 내인지, 기설정된 시간 이내에 받은 것은 아닌지 점검한 후에 데이터베이스로 데이터를 저장한다. 데이터베이스로서 엔터프라이즈급 DBMS의 기능과 차세대 DBMS의 많은 기능을 제공하는 오픈소스 DBMS인 PostgreSQL을 사용하였다.

원래의 데이터 패킷을 복사한 클론을 서버에 주기적으로 보내는 클로닝 공격을 받을 수 있다. 그래서 서버는 해시에 문제가 없다고 판단하지만 오래된 데이터를 받음으로써 데이터의 시간적 유효성에 공격을 당하게 된다. (초미세먼지는 시간과 관련된 데이터이기 때문이다.) 이것을 막기 위해서 데이터 패킷에

GPS로부터 받은 시간을 포함시킨다. 이 시간 정보는 해시로 보호되고 있어서 변조할 수가 없다. 서버는 데이터 패킷의 시간과 서버의 시간 차이가 일정 수준 이내이어야 그 데이터가 유효하다고 판단한다. 이러한 기법을 시간 토큰 제한 기법이라고 한다^[24].

장치는 정해진 주기로 데이터를 보낸다. 그런데 악의적으로 서버의 부하를 증가시킬 목적으로 복사된 데이터를 아주 많이 보내는 클로닝 공격을 받을 수 있다. 그래서 서버는 기 설정된 주기보다 이르게 받은 데이터를 무효처리한다.

이처럼 작은 크기로 다양한 IoT 기술을 포함하여 연속적으로 PM 데이터를 네트워크로 제공할 수 있기 때문에 다양한 응용분야에 널리 사용될 수 있다^[3,25].

III. 실험 환경

3.1 측정장소 및 측정기간

광산란법 측정기의 흡습 미세먼지에 대한 측정 오류를 해결하기 위하여 본 연구에서 개발된 초소형 에어로졸 컨디셔너의 성능 평가 시험을 위해 대전광역시 구성동에 2020년 11월 3일부터 12월 2일까지 30일간 진행하였다. 실외 설치를 위하여, 제안하는 시스템인 공감센서 GGS20(이하 GGS라 함)은 정전기 차단 폴리카보네이트로 제작된 방우함에 넣어 설치되었고, 데이터 수집 및 분석을 위하여 서버와 무선통신을 위하여 LTE (Long-Term Evolution) 라우터가 방우함에 장착되었다.

3.2 미세먼지 측정방법 및 데이터 수집

3.2.1 베타선법 측정기

대전광역시 위치한 국립환경과학원 중부권대기환경연구소에서는 Met One사의 BAM1020장비로 측정된 1시간 데이터를 에어코리아에 업로드한다. 에어코리아에 등록된 측정소 이름은 [대전]대전 문화동(집중)이다. GGS가 설치된 대전 구성동과는 약 6.6km 떨어져 있으나 측정기간 중 대기정체로 인하여 거리에 따른 오차는 크게 발생하지 않았다.

3.2.2 광산란법 측정기

TAC를 내장한 GGS는 구성동에 설치하였으며 초단위 측정데이터를 10분 단위 평균값을 계산하여 서버로 전송하며, 서버는 PostgreSQL 데이터베이스 및 자체 개발한 2차원 지리적 메모리 데이터베이스에 저장한다. 모든 데이터는 PostgreSQL에서 얻을 수 있으

나, 1시간 이내의 데이터는 메모리 데이터베이스를 통하여 빠른 2차원 지리적 검색이 가능하다.

3.2.3 자료 수집

국가측정소 실시간 측정 기준이 1시간단위이기 때문에, GGS의 분단위 데이터들을 시간단위의 평균값을 계산하여 국가측정소 데이터와 비교하였다. 30일간 전체 데이터 추이를 분석하기 위한 일 평균 기상정보와 PM2.5 데이터는 표 1과 같다. 에어코리아에서 문화동(집중)데이터(NIER: National Institute of Environmental Research, 국립환경과학원)를 다운로드 하였다. 측정기간 동안의 기상정보(Mean Wind Speed, Mean RH, Min. RH)는 대전지방기상청에서 측정된 정보를 기상자료 개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 가져왔다.

측정 기간 중 평균 상대습도가 55%를 초과한 경우는 30일 중 23일이었고, 새벽시간에는 상대습도가 항상 55%이상이었다. 또한 30일 중 대기정체는 23일간 발생하였고 나머지 7일도 대기확산이 원활할 정도의 풍속은 없었다.

IV. 실험

4.1 일 평균 데이터비교

본 연구를 통한 초소형 에어로졸 컨디셔너의 실제 대기 환경에서의 동작 성능을 파악하고 결과를 국가 대기측정망 데이터와 비교하여 검증하기 위하여 측정 결과를 그림 5에 나타내었다.

NIER 측정기 결과값에 대하여 GGS 측정기 결과값을 분석해보니 30일간 평균 PM_{2.5}농도는 GGS가

표 1. 일 평균 풍속 및 PM2.5 데이터
Table 1. Daily mean wind speed and PM2.5 data.

Date (MM-DD)	Mean Wind Speed (m/s)	RH (%)		PM _{2.5} (µg/m ³)	
		Mean	Min.	GGS	NIER
11-03	2.1	56.8	35	5	8
11-04	1.3	57.1	21	7	9
11-05	0.8	63.5	32	17	21
11-06	0.7	77.3	49	25	30
11-07	1.3	69.4	25	28	34
11-08	2	53.4	12	22	21
11-09	1.4	47.6	21	5	9
11-10	1.4	54.9	26	10	13
11-11	0.9	59.9	28	13	16
11-12	0.9	62.8	31	26	28
11-13	0.9	75	51	36	45
11-14	0.7	73.6	34	46	48
11-15	0.9	75.3	42	40	47
11-16	0.7	79.5	51	82	74
11-17	1.6	80.4	55	50	45
11-18	0.8	95.5	85	40	31
11-19	2.5	88	73	7	10
11-20	2.4	77.1	73	10	12
11-21	2.1	69.9	50	21	17
11-22	1.7	82.3	66	18	16
11-23	1.5	65.1	34	13	15
11-24	0.9	51.8	20	15	18
11-25	1.1	65.8	38	22	26
11-26	1	66	33	48	45
11-27	1.9	63.6	49	36	30
11-28	2	54	26	14	13
11-29	1	69.5	54	12	13
11-30	1.3	70.4	44	18	11
12-01	1.1	54.8	23	26	29
12-02	1.1	48.5	29	20	22

36.53µg/m³을 NIER이 36.67µg/m³을 나타낼 정도로 상당히 잘 맞는 것으로 나타났다. 현장 설치 시험 기간인 11월은 대기 상태가 표 1에 보이는 것처럼 평균

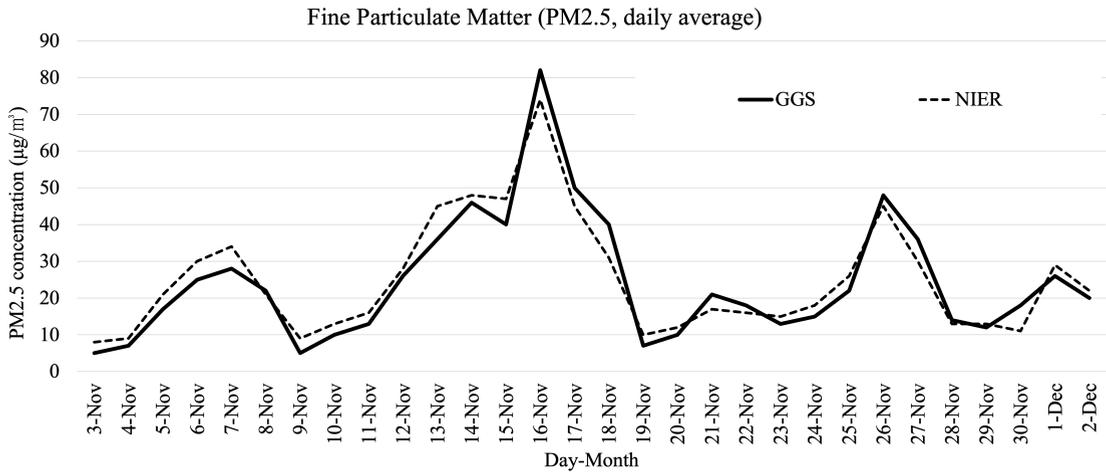


그림 5. GGS와 NIER에서 측정된 PM2.5 농도의 비교
Fig. 5. Comparison of PM2.5 concentration between GGS and NIER.

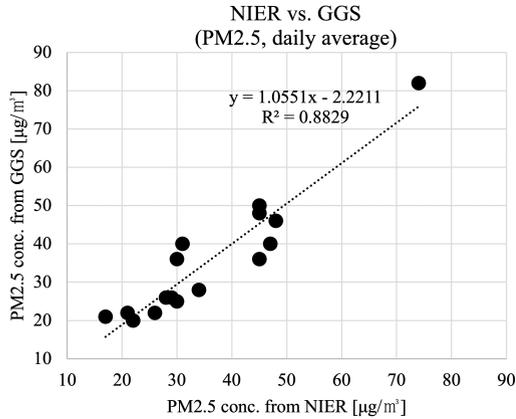


그림 6. GGS와 NIER의 일평균 PM2.5 비교
Fig. 6. Comparison of the PM2.5 concentrations from GGS and NIER in daily average.

풍속 최대값은 2.5m/s로 매우 안정적인 상태였다.

NIER과 GGS에서 측정된 PM_{2.5}결과에 대한 하루 평균 데이터에 대한 상관성 검증을 위해 회귀분석을 실시하였고, 그 결과 그림 6의 좌측 그래프에 보여준 것처럼, 결정계수(R²)는 0.9318 (상관계수 R=0.965), 기울기는 1.06, 절편은 -1.62으로 높은 상관성을 보였다. US EPA의 광산란식 측정기(class III)의 형식승인기준에서는 상관계수 R이 0.95이상, 기울기가 0.88에서 1.12사이 이내이고 절편은 -7에서 7사이여야 한다. 그림 6의 결과는 이 기준 안에 들어간다 [26].

4.2 시간 평균 데이터비교

국가측정소 데이터는 실시간 데이터로 1시간 단위 데이터를 제공한다. GGS는 초단위 데이터를 제공하지만 국가측정소 데이터와 비교를 위하여 1시간 평균 데이터를 계산하여 비교하였다.

NIER와 GGS의 거리 때문에 공기 흐름에 따른 시간 지연이 발생할 수 있다. 그림 6의 시간 단위 평균 데이터에 대한 PM_{2.5} 측정값에 대한 회귀 분석을 통한 결과를 보면 이런 시간 지연에 대한 영향을 확인할 수 있다, NIER와 GGS의 기울기는 약 1.05이고 결정계수(R²)는 0.82이었다. 하루단위 비교에 비해서 낮은 결정계수를 보였다. 하지만, 미국 EPA의 광산란식 측정기 인증기준에서는 하루 평균 데이터를 사용한다.

시간 평균 데이터를 분석한 결과 초소형 에어로졸 컨디셔너가 외기 상대습도가 55%보다 높을 때 광산란법 측정기의 측정 오류가 발생하지 않도록 목표 상대습도까지 잘 건조시키고 있다는 것을 알 수 있다. 보통 상대습도가 80%이상으로 높으면 흡습 미세먼지

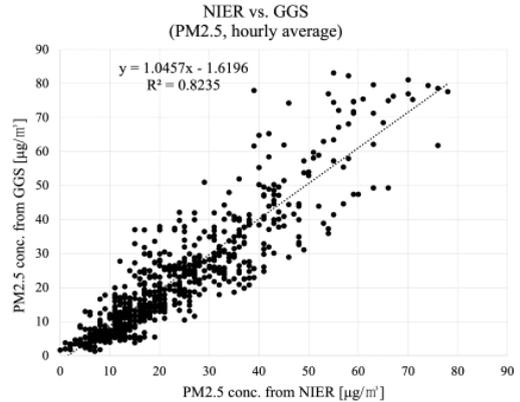


그림 7. GGS와 NIER의 시간평균 PM2.5 농도 비교
Fig. 7. Comparison of the PM2.5 concentrations from GGS and NIER in hourly average.

의 입경크기는 2배정도 커져서 농도가 2배정도 높게 나오는 경향이 히터가 없는 광산란 미세먼지 측정기에서 나타나는데 본 시험 결과에서 보듯이 초소형 에어로졸 컨디셔너를 탑재한 GGS 측정기에서는 이러한 현상이 나타나지 않고 있음을 확인하였다. 또한 초소형 에어로졸 컨디셔너 내부의 히터가 40℃ 이상으로 과열되지 않도록 제어함으로써 저평가 되는 현상도 시험 결과 나타나지 않았다.

본 연구를 통하여 처음 시도된 초소형 직접 가열방식 에어로졸 컨디셔너가 제대로 동작함으로써 기존 국가측정기에 설치된 복잡하고 크고 고전력을 소비하는 장비에 비하여 설치가 쉽고 저전력을 사용하는 GGS 측정기의 국가측정망 설치 가능성에 대하여 긍정적인 성능평가 결과를 얻었다.

V. 결 론

초소형 에어로졸 컨디셔너에서 사용하는 직접 가열식 흡습 미세먼지 건조 방법은 본 연구에서 제시하는 새로운 기술이다. 직접 가열은 간접 가열보다 작은 크기로 설계할 수 있다. 소량의 공기를 사용하는 광산란법에 직접 가열식을 사용하였을 때에는 소량의 공기를 고효율로 가열할 수 있어, 장치의 소형화가 가능하다.

PID제어 방식으로 센서로 유입되는 공기의 습도를 일정하게 유지한다. 하지만 안전을 위하여 주어진 수학적 습도 대신 온도를 제어함으로써 과열로 인한 사고를 방지한다.

장치가 측정된 데이터는 무선 네트워크로 서버로 전송할 수 있으면 서버의 데이터는 사용자가 원격으

로 확인이 가능하다. 장치와 서버 사이의 데이터 위변조를 막기 위해서 장치는 해시 및 GPS의 시간을 사용한 시간 토큰 제한 방식을 사용하였다.

다습환경에서 흡습으로 인하여 입경이 성장하는 흡습 미세먼지는 산란광을 수광하여 측정하는 PM센서에서는 산란패턴에 영향을 직접 미치지 때문에 측정 정확성이 크게 저하되는 문제로 지적되었다. 본 연구에서는 광산란식 미세먼지 센서의 동작원리를 고려하여 미세먼지가 흡습으로 인하여 입경이 커져도 광특성이 바뀌지 않도록 원래 입경 크기로 관리가 가능한 초소형 에어로졸 컨디셔너를 개발하였다. 이 장치의 성능 평가를 위하여 대기 상태가 안정적이면서 상대 습도가 아침/저녁으로 높은 기간에 국가측정소에 설치하여 30일간 측정 결과 분석을 통하여 성능을 평가한 결과 초소형 에어로졸 컨디셔너가 회기 분석 결과 US EPA 인증 조건을 만족하는 높은 결정계수로 동작함을 확인하였다.

References

- [1] J. Lelieveld, et al., "Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions," *Eur. Heart J.*, vol. 40, no. 20, pp. 1590-1596, 2019.
- [2] X. Wu, et al., "Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States," *MedRxiv*, 2020.
- [3] D. G. Bae, K. C. Jeong, S. M. Oh, and B. C. Park, "Development of fine dust detection module using dust sensor and low power IoT communication," in *Proc. Symp. KICS*, pp. 1024-1026, 2020.
- [4] C. S. Sloane and W. H. White, "Visibility: Anevolving issue," *Environ. Sci. & Technol.*, vol. 20, no. 8, pp. 760-766, 1986.
- [5] D. E. Day and W. C. Malm, "Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity: A comparison between measurements made at three different sites," *Atmospheric Environ.*, vol. 35, no. 30, pp. 5169-5176, 2001.
- [6] S.-B. Lee, G.-N. Bae, M. C. Kim, Y.-M. Lee, and K.-C. Moon, "Effect of relative humidity on the growth of atmospheric aerosols in water," *Particle and Aerosol Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 69-81, 2006.
- [7] I. N. Tang and H. R. Munkelwitz, "Composition and temperature dependence of the deliquescence properties of hygroscopic aerosols," *Atmospheric Environ.*, vol. 27A, no. 4, pp. 467-473, 1993.
- [8] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, "*Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*," John Wiley & Sons, Inc., pp. 234-541, 1998.
- [9] C. H. Jung, J. H. Park, and Y. P. Kim, "Change of the size-resolved aerosol concentration due to relative humidity," *Particle and Aerosol Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 69-78, 2013.
- [10] D. E. Day, W. C. Malm, and S. M. Kreidenweis, "Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity," *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, vol. 50, pp. 710-716, 2011.
- [11] M. Branis, "The concentration of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system," *Atmospheric Environ.*, vol. 40, pp. 348-356, 2006.
- [12] C. T. Chang and C. J. Tsai, "A model for the relative humidity effect on the readings of the PM-10 beta gauge monitor," *J. Aerosol Sci.*, vol. 34, pp. 1685-1697, 2003.
- [13] C. T. Chang, C. J. Tsai, C. T. Lee, S. Y. Chang, M. T. Cheng, and H. M. Chein, "Differences in PM-10 concentrations measured by beta gauge monitor and high-vol sampler," *Atmospheric Environ.*, vol. 35, pp. 5741-5748, 2001.
- [14] W. C. Malm, D. E. Day, and S. M. Kreidenweis, "Light scattering characteristics of aerosols as a function of relative humidity: part I - a comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the theoretical models," *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, vol. 50, pp. 686-700, 2011.
- [15] Teledyne Advanced Pollution Instrumentation, "*User manual model T640 PM mass monitor*,"

2018.

[16] Thermo Fisher Scientific, “*Model 5014i Beta Instruction Manual*,” 2009.

[17] Met One Instruments, “*BAM 1020 Particulate Monitor Operation Manual*,” 2016.

[18] C. G. Woo, K. J. Hong, H. J. Kim, Y. J. Kim, B. Han, J. An, and S. N. Chun, “Development and performance evaluation of the porous tube dilutor for real-time measurements of fine particles from high humidity environments,” *Particle and Aerosol Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 105-110, 2017.

[19] C. F. Deuerling, J. Maguhn, H. O. Nordsieck, R. Warnecke, and R. Zimmermann, “Measurement system for characterization of gas and particle phase of high temperature combustion aerosols,” *Aerosol Sci. and Technol.*, vol. 44, pp. 1-9, 2010.

[20] P. H. McMurry and M. R. Stolzenburg, “On the sensitivity of particle size to relative humidity for Los Angeles aerosols,” *Atmospheric Environ.*, vol. 23, pp. 497-507, 1989.

[21] D. S. Kang, J. E. Oh, S. Y. Lee, H. J. Shin, H. K. Bong, J. Choi, and D. S. Kim, “Development of drying systems for accurate measurement of particulate matter by means of optical particle measuring instruments,” *Particle and Aerosol Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 191-203, 2018.

[22] H.-C. Chen, “A multi-issued tag key agreement with time constraint for homeland defense sub-department in NFC environment,” *J. Netw. and Comput. Appl.*, vol. 38, pp. 88-98, 2014.

[23] S. Gueron, S. Johnson, and J. Walker, “SHA-512/256,” *2011 Eighth Int. Conf. Info. Technol.: New Generations*, IEEE, 2011.

[24] N. Malcolm and Z. Wei, “The timed-token protocol for real-time communications,” *Computer*, vol. 27, no. 1, pp. 35-41, 1994.

[25] M. Lee, H. Choi, J. Ha, S. Lee, and B. An, “Fine dust prediction using machine learning,” in *Proc. Symp. KICS*, pp. 495-496, Nov. 2019.

[26] Environmental Protection Agency, “*Test*

procedure for class II and class III methods for PM 2.5 and PM₁₀,” Legal Information Institute, 2007.

백 승 훈 (Sung Hoon Baek)



1997년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업

1999년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사

1999년 1월~2005년 1월 : 한국전자통신연구원 연구원

2008년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학전공 박사

2008년 9월~2011년 2월 : (주)삼성전자 책임

2011년 3월~현재 : 중원대학교 컴퓨터공학과 부교수
<관심분야> 초미세먼지 측정, 운영체제, 컴퓨터 스토리지, 머신러닝

[ORCID:0000-0002-6779-4998]

손 명 희 (Myunghee Son)



1997년 8월 : 충남대학교 항공우주공학과 졸업

2000년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사

2005년 8월 : 충남대학교 정보통신공학과 박사

2000년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원 (창업휴직)

2011년 3월~2012년 3월 : (주)스마트에코텍 대표

2020년 7월~현재 : (주)공감센서 대표

<관심분야> 초미세먼지 센서, 머신러닝, ICT융합 친환경차, 유무선통신프로토콜

[ORCID:0000-0002-9307-234X]