

휴대용 실내 미세먼지 농도 측정 장치 개발

김유진* · 최현슬* · 고태식†

Development of a portable system for monitoring indoor particulate matter concentration

Yoo Jin Kim*, Hyun Seul Choi*, Taesik Go†

Abstract Airborne particulate matter(PM) has been a global environmental problem. PM whose diameter is smaller than 10 μm can permeate respiratory organs and has harmful effects on human health. Therefore, PM monitoring systems are necessary for management of PM and prevention of PM-induced negative effects. Conventional PM monitoring techniques are expensive and cumbersome to handle. In the present study, two types of PM monitoring devices were designed for measuring indoor PM concentration, portably. We experimentally investigated the performance of three commercial PM concentration measurement sensors in a closed test chamber. As a result, PM2008 sensor showed the best PM concentration measurement accuracy. Linear regression method was applied to convert PM concentration value acquired from PM2008 sensor into ground truth value. A mobile application(app.) was also created for users to check the PM concentration, easily. The mobile app. also provides safety alarm when the PM₁₀ concentration exceeds 81 $\mu\text{m}/\text{m}^3$. The developed hand-held system enables the facile monitoring of surrounding air quality.

Key Words : Particulate matter(미세먼지), Monitoring(모니터링), Mobile app.(모바일 앱)

1. 서론

미세먼지(PM)는 입자의 크기가 작아 육안으로 보이지 않고 공기 중에 부유하는 입자상 유해 물질을 통칭한다. 입자의 지름이 10 μm 이하의 먼지를 미세먼지(PM₁₀)라고 칭하며, 지름이 2.5 μm 이하의 먼지는 초미세먼지(PM_{2.5})라고

부른다. 이러한 미세먼지는 인체에 쉽게 침투하여 호흡기, 순환기, 암 질환을 유발할 수 있어, 이를 모니터링하고 관리할 수 있는 기법의 개발이 필수적이다⁽¹⁻³⁾.

국내에서는 봄철의 황사뿐만 아니라 가을 및 겨울철 스모그 현상 또한 자주 발생하여 국민의 건강과 생활에 미치는 영향이 커지고 있다⁽⁴⁾. 이러한 외부에서 생성되고 유입되는 미세먼지뿐만 아니라 실내활동을 통해 미세먼지가 발생된다. 미국 USEPA(United States Environmental Protection Agency)에서는 공동주택 내에서의 주방 조리 행위를 실내 미세먼지 농도 증가의 주된 요인으로 보고하였다⁽⁵⁾. 특히 수분이 많이 포함된 음식 조

† Division of Biomedical Engineering,
Jeonbuk National University, Assistant professor
E-mail: tsgo@jbnu.ac.kr

* Division of Biomedical Engineering,
Jeonbuk National University, Undergraduate student

리의 경우, 생성된 초기 입자가 재료 중의 수분과 가열된 기름 등과 응결하여 평소 미세먼지농도 대비 최소 2배에서 최대 60배 높게 발생시킨다.

여러 대기질 측정소에서는 중량 농도법과 베타선 흡수법이 주로 사용되고 있다^(6,7). 중량 농도법은 대기에서 시료를 24시간 동안 여과지에 채취하고 채취 전과 후의 질량 차이를 저울로 직접 수동 측정하여 미세먼지 농도를 측정하는 방식이다⁽⁶⁾. 베타선 흡수법은 베타선이 필터 위에 채취된 먼지를 통과할 때 흡수되는 베타선의 상대적인 세기를 측정하여 포집된 미세먼지의 농도를 측정하는 방식이다⁽⁷⁾. 이 두 방식 모두 정밀한 미세먼지 농도 정보를 제공한다는 장점이 있으나, 값비싸고 부피가 큰 장비가 필요하다는 단점이 있다. 그리고 개인이 인터넷 포털 사이트나 기상청 홈페이지를 통해서 미세먼지의 농도 정보를 획득할 수 있지만, 지역별로 지정된 측정소에서 제공된 미세먼지의 농도 정보여서 개인이 거주하고 있는 장소의 국부적인 미세먼지 농도 정보와는 거리가 있다.

눈으로는 보기 힘든 미세먼지 측정과 관리에 대한 중요성이 지속적으로 대두되는 추세에 따라, 본 연구에서는 저렴한 가격으로 실내에서 활용할 수 있고, 원하는 장소의 미세먼지 농도 정보를 얻을 수 있는 소형 미세먼지 농도 측정기를 설계하였다. 광 산란법을 사용하는 미세먼지 센서를 통해 국부적인 미세먼지 농도를 실시간으로 측정하고, 해당 값을 모바일 앱을 통해 지속적으로 받아볼 수 있는 실내 미세먼지 농도 측정기를 개발하였다. 실내 미세먼지 농도 상승의 대부분을 차지하는 외부 유입 미세먼지 농도 모니터링을 위한 창문 부착형과 조리 시 발생하는 미세먼지 농도 모니터링을 위한 주방 후드 부착형으로 나누어 제작하였고, 미세먼지 농도가 위험균일 경우 소리와 앱 화면을 통한 알림 기능과 더불어 해당 공간의 미세먼지 농도에 따른 적절한 대응을 하도록 제작하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 하드웨어 제작

본 연구에서는 광 산란 방식의 미세먼지 농도 측정 센서를 사용하였다. 광 산란 방식의 미세먼지 농도 측정 센서는 대기 중 부유하고 있는 입자상 물질에 빛을 가하면 미세입자에 의해 빛이 산란되는데, 산란되는 빛의 양은 입자의 질량농도에 비례하고 이로부터 미세먼지의 직경 및 개수를 측정한다⁽⁸⁾. 이러한 광 산란 방식의 미세먼지 농도 센서들은 중량 농도법이나 베타선 흡수법에 비해 측정 정확도가 부족하다는 단점이 있으나, 가격 대비 성능이 우수하고 소형이라는 장점이 있다. 다양한 광 산란 방식의 미세먼지 농도 측정 센서들 중 측정범위가 0.3-10 μm 로 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 를 동시에 측정할 수 있고, 비교적 2만원 대로 센서 가격이 저렴한 PLANTOWER 사의 PMS7003, CUBIC 사의 PM2008, FOSENSOR 사의 FS00202를 사용하여 그 성능을 비교하고 정확도가 높은 센서를 선정하였다.

선택한 미세먼지 센서뿐 아니라 소형 브레드보드, 회로를 연결하는 점퍼케이블, 센서 측정 정보가 화면에 출력되는 LCD 디스플레이 모듈, 온도와 습도를 측정하는 DHT11 온습도 센서, 주방 후드 제어에 활용되는 서보모터, 아두이노 우노, 스마트폰 통신을 위한 블루투스 모듈을 사용하여 크게 창문 부착형, 주방 후드 부착형 두가지 타입으로 제작하여 실내 미세먼지 농도 측정에 활용 가능하도록 제작하였다 (Fig. 1).

전체적인 외관은 CATIA CAD 프로그램을 이용하여 설계하였고 3D 프린터로 출력하여 외장을 완성하였다.

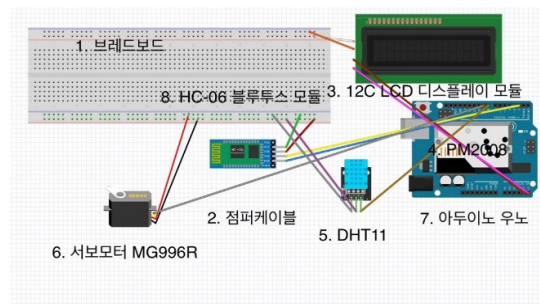


Fig. 1. Arduino sensors to compose the hardware.

2.2 소프트웨어 구성

DHT11 센서에서 현재 온습도에 대한 정보를 받고, 미세먼지 센서로부터 미세먼지 농도 정보를 입력받아 LCD 디스플레이 모듈에 해당 정보를 출력하였고, 블루투스 통신 모듈을 통해 해당 정보를 스마트폰에 전송하도록 아두이노 코드를 작성하였다. 추가적으로 주방 후드 부착형의 경우, 국부 미세먼지 농도가 나쁨 이상일 때, 서보모터가 주방 후드를 작동시키게끔 설정하였다.



Fig. 2. Mobile app. design using App inventor for Android.

모바일 앱은 오픈소스 앱 메이커 중 하나인 App inventor for Android를 활용하여 제작하였다 (Fig. 2). 블루투스 통신을 통해 아두이노 센서 값을 1초에 1 번 온도, 습도, 미세먼지 농도 값을 받고 출력되도록 설정하였다. 또한, 환경부의 한국환경공단에서 제공하는 예보등급⁹⁾을 참고하여 PM₁₀농도가 0-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 경우 ‘좋음’, 31-80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 경우 ‘보통’, 81-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 경우 ‘나쁨’, 151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상일 경우 ‘매우나쁨’을 기준으로, 모바일 앱 오른쪽 하단 부분 상태창에 4단계 미세먼지 농도 변화에 따라 얼굴 이모티콘 모양이 변하여 보다 이해하기 쉽도록 디자인하였다.

2.3 미세먼지 농도 측정 센서 평가

PMS7003, PM2008, FS00202 미세먼지 농도 측정 센서의 성능을 비교하여 높은 정확도를 보

이는 미세먼지 센서를 선정하기 위하여 챔버 내 실험을 진행하였다.

해당 실험은 연소 시, 일산화탄소, 이산화 탄소를 포함한 기체상 물질과 함께 입자상 물질을 생성하는 incense smoke을 사용하여 챔버 안에 미세먼지를 발생시키고¹⁰⁾, 이를 각각의 센서와 산업용 분진 측정기(TESS200, TES Electrical Electronic Corp., Taiwan)로 동시에 측정하였다. 산업용 분진 측정기에서 출력되는 미세먼지 농도는 참값으로 활용하였다. 산업용 분진 측정기는 1분 동안 2.84 L의 외부 공기를 흡입하여 그 속에 포함된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 측정한다. 한편, 본 연구에서 활용한 미세먼지 농도 측정 센서의 경우 1초에 1번씩 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 제공하기 때문에 해당 센서의 성능을 평가할 때 60초 동안의 미세먼지 농도를 평균하여 산업용 분진 측정기로 측정한 미세먼지 농도(참값)와 비교하였다. 실험에 사용한 챔버의 경우, 표면 정전기를 최소화할 수 있도록 유리 와 스테인리스 스틸로 제작하였다¹⁰⁾.

실험 방법은 챔버 안에 일정 시간 동안 incense stick을 사용하여 미세먼지를 생성시킨 후, 생성된 미세먼지가 챔버 내부에 골고루 분포되도록 3 - 4번 가량 챔버 문을 여닫았다¹⁰⁾. 추가로 10분 경과 후, 챔버 안의 미세먼지 농도를 해당 미세먼지 센서와 산업용 분진 측정기로 동시에 측정하였다. 초기 챔버 내부 미세먼지 농도는 총부유입자 지표(TSP index) 기준으로 1000 - 1300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 통제하였다. 센서 정확도는 미

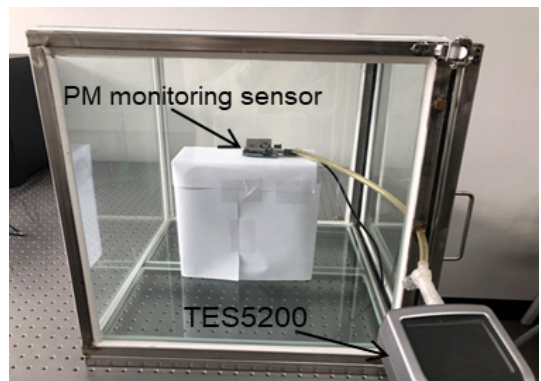


Fig. 3. Photograph of the test chamber.

세먼지 농도는 PM₁₀ 기준, 0 - 1000 µg/m³로 넓은 미세먼지 농도 범위로 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 광 산란 방식의 미세먼지 농도 측정 센서 선정

앞서 설계한 챔버 내 실험을 통해 PMS7003, PM2008, FS00202 미세먼지 농도 측정 센서의 성능을 비교하였다. Fig. 4는 PM₁₀ 농도가 0 - 1000 µg/m³ 범위에서 각 센서에서 측정된 미세먼지 농도 값(measured value)과 산업용 분진 측정기로 측정된 미세먼지 농도 값(ground truth)의 분포이다. 그 결과, 실험한 세가지 센서 중 PM2008 센서가 실험한 범위에서 가장 참값에 가까운 미세먼지 농도($y=x$)를 예측하였다 (Fig. 4).

이를 정량적으로 평가하기 위해 참값을 기준으로 한 제곱근 편차(RMSE)를 계산하였다.

본 실험에서는 각 센서당 $n = 10$ 회 실험하였으며, 는 센서의 측정값을, 는 분진 측정기의 값인 ground truth를 나타낸다.

그 결과, PMS7003 센서는 432.8 µg/m³, PM2008 센서는 256.0 µg/m³, FS00202 센서는 338.0 µg/m³로 각각 나타났다. RMSE 값 비교에서도 PM2008 센서가 가장 참값에 가까운 값이 측정됨을 확인하였다.

앞선 결과를 바탕으로 PM2008을 미세먼지 농도

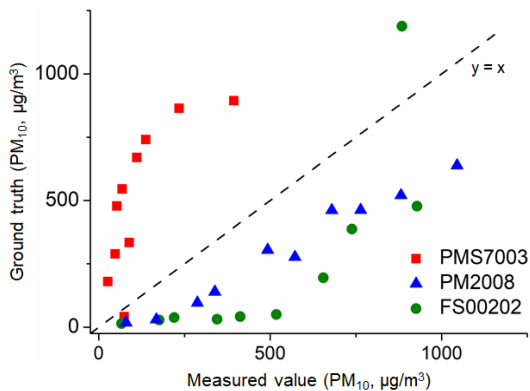


Fig. 4. Comparison of PM₁₀ concentrations measured by individual sensors with their ground truth values.

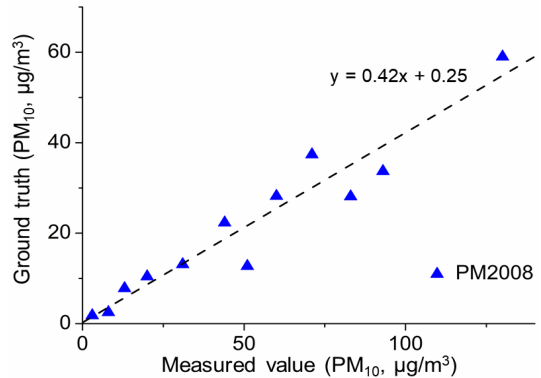


Fig. 5. Linear regression for converting measured PM₁₀ concentration to ground-truth PM₁₀ concentration.

측정 센서로 선정하였으나, 여전히 참값과 차이가 존재하였다 (Fig. 4). 이를 해결하기 위해 선형 회귀 기법(linear regression)을 활용하여 센서로 측정된 값을 참값으로 변환시키는 함수를 도출하였다 (Fig. 5). 도출된 선형 함수를 통해서 PM2008 센서를 활용한 미세먼지 측정값을 보다 참값에 가깝게 변환시켰고, 이렇게 변환된 값을 기반으로 미세먼지 위험수준 분류 및 알람에 궁극적으로 활용하였다.

3.2 실내 공간별 미세먼지 농도 측정

해당 PM2008 센서와 아두이노 센서들을 사용하여 공간별 실내 미세먼지 농도 측정기를 크게 창문 부착형과 주방 후드 부착형 2가지 타입으로 제작하였다 (Fig. 6).

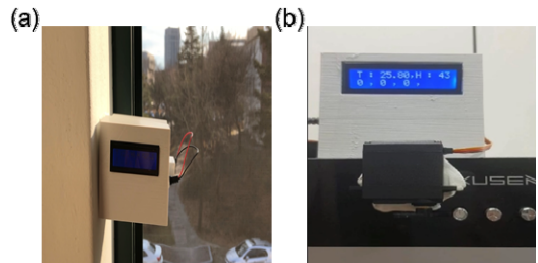


Fig. 6. Two types of indoor PM monitoring sensors. (a) Window attachment type, (b) Kitchen hood attachment type.

창문 부착형은 뒷면에 PM2008센서를 위치하도록 설계함으로써 창문에 부착하여, 외부 공기의 유입을 모니터링할 수 있다 (Fig. 6a). 주방 후드 부착형의 경우 아랫면에 PM2008센서를 위치시켜 조리시 국부적인 미세먼지 농도 모니터링을 보다 용이하게 하였고, 추가적으로 조리시 국부적인 미세먼지 농도가 PM₁₀ 기준 81 µg/m³ 이상일 경우 (환경부 기준 ‘나쁨’ 상태), 서보모터가 주방 후드를 자동적으로 작동시키게 하였다 (Fig. 6b).

2 가지 타입의 미세먼지 농도 측정기 모두 LCD 창을 통해, LCD의 윗줄에는 온도(T), 습도(H), 아랫줄에는 차례대로 PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₁₀ 농도가 올바르게 출력되었다 (Fig. 6b). 본체는 휴대를 위해 DC 9V건전지로 작동되고, 크기는 가로 10 cm × 세로 7 cm × 높이 8.5 cm, 무게는 약 200g, 가격은 6만원대이다.

3.3 모바일 앱

개발한 모바일 앱 실행 시, 주변 환경 정보를 확인할 수 있었다 (Fig. 7). 온도, 습도, PM_{1.0}, 2.5, 10 농도 값들이 정상적으로 1초마다 업데이트되며 사용자에게 정보를 제공하였다. 또한 미세먼지 농도에 따라 얼굴 이모티콘의 변화가 나타나 이용자가 보다 쉽게 국부적인 미세먼지 농도 상태를 확인 가능하였다 (Fig. 7a-c). 또한 PM₁₀ 미세먼지 농도가 81 µg/m³ 이상 ‘나쁨’ 상태일 때, 별도의 알림창이 나타나도록 하였다 (Fig. 7d). 이러한 알림 기능을 통해 사용자는 창문을 여닫음으로써 실내 미세먼지 농도를 낮출 수 있으며, 조리시 발생하는 미세먼지를 저감하기 위해 주방 후드가 서보 모터에 의해 자동으로 작동될 수 있다.

3.4 휴대용 미세먼지 농도 측정 시스템 성능 검증

개발한 휴대용 미세먼지 농도 시스템의 성능을 최종적으로 검증하고자 해당 기기로 얻은 미세먼지 농도와 실제 측정소에서 제공하는 미세먼지 농도를 비교하였다. 2022년 1월 12일 17:00



Fig. 7. User-friendly mobile app. for PM concentration monitoring.

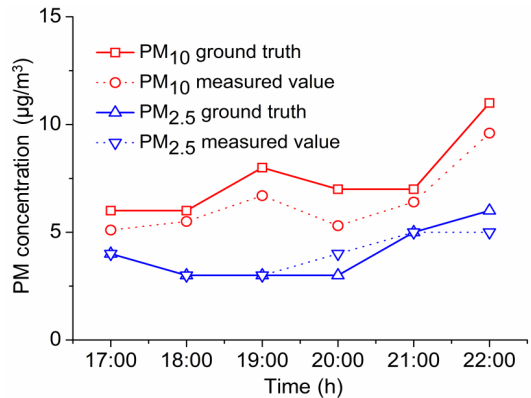


Fig. 8. Field-test of the developed PM monitoring system.

- 22:00 동안 전라북도 익산시 부송동에서 개발한 기기를 사용하여 미세먼지 농도(measured value)를 측정하였고, 근처 원광대학교 사범대학

측정소에서 제공하는 미세먼지 농도(ground truth)와 비교하였다 (Fig. 8). 그 결과, PM₁₀, PM_{2.5} 모두 개발한 기기를 사용하여 측정소에서 제공하는 정보와 거의 비슷하게 미세먼지 농도에 대한 정보를 획득할 수 있었다. PM₁₀ 농도의 경우, 참값에 비해 측정값이 약간 낮게 측정되었다. 이러한 결과는 선형 회귀 기법을 사용하여 참값에 가깝게 변환시킬 때, 0 - 15 µg/m³ 저농도에서 실제 농도값보다 변환된 농도 값(선형 함수 상의 값)이 과소평가(underestimation)되어 나타난 것으로 보인다 (Fig. 5).

4. 결론

본 연구에서는 미세먼지 관리에 대한 경각심이 증대됨에 따라, 창문 부착형, 주방 후드 부착형 두가지 종류의 소형 실내 미세먼지 농도 측정 장치를 고안하였다.

정확한 미세먼지 농도 측정을 위한 센서 선정을 위해 챔버 내 실험을 진행하여, 실험한 세 종류의 센서들 중 PM2008 센서가 가장 참값과 가까운 미세먼지 농도값을 측정하였으며, 선형 회귀 방식을 적용하여 보다 참값에 가깝도록 변환하였다. 선택된 PM2008 센서를 포함하여 두가지 종류에 따라 각각 하드웨어를 제작하였다. 그리고 소프트웨어 설계 과정을 통해 센서를 통한 측정 값이 LCD 패널에 잘 출력되도록 하였으며, 모바일 앱 제작을 통해 사용자가 실시간 미세먼지 농도를 쉽게 알 수 있게 하였다. 또한 미세먼지 농도가 ‘나쁨’ 상태일 때, 알람창과 경고음이 울리고, 주방후드 버튼을 자동으로 눌러 작동되게 하였다.

본 연구를 통해 설계한 미세먼지 농도 측정 시스템은 사용자가 눈에 보이지 않는 미세먼지 농도에 대한 정보를 쉽고, 휴대가 간편하며, 공간의 제약없이, 비교적 저렴한 가격으로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 현재 거주하고 있는 국부적인 장소의 미세먼지 농도를 확인 및 위험을 알림으로써 사용자의 적절한 대응을 도울 수 있기 때문에 미세먼지로 인한 악영향을 저감하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2021R1C1C1010063).

REFERENCE

- 1) Zhang, R.F. *et al.*, 2018, “Morphology and property investigation of primary particulate matter particles from different sources,” *Nano Res.*, Vol.11, pp.3182–3192.
- 2) Brook, R.D. *et al.*, 2010, “Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association,” *Circulation*, Vol.121, pp.2331–2378.
- 3) Oh, J., Kim, H., Lee, J.E., Yang, J.H., Kim, K.C., 2021, “A study on visualization of fine dust captured by FOG droplet,” *Journal of the Korean Society of Visualization*, Vol.19(3), pp.39-45.
- 4) 서울특별시보건환경연구원, 2021, “2020년 서울대기질 평가보고서,” pp.1-146.
- 5) Thomas, K.W. *et al.*, 1993, “Particle total exposure assessment methodology (PTEAM) 1990 study: method performance and data quality for personal, indoor, and outdoor monitoring,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, Vol.3(2), pp.203-226.
- 6) Noble, C.A. *et al.*, 2001, “Federal reference and equivalent methods for measuring fine particulate matter,” *Aerosol Sci. Technol.* Vol.34, pp.457-464.
- 7) Chueinta, W., Hopke, P.K., 2001, “Beta gauge for aerosol mass measurement,” *Aerosol Sci. Technol.* Vol.35, pp.840–843.
- 8) Alfano, B. *et al.*, 2020, “A review of low-cost particulate matter sensors from the developers’ perspectives,” *Sensors*, Vol.20(23), pp.6819.
- 9) 에어코리아 한국환경공단, <https://www.airkorea.or.kr/web/dustForecast>

(Accessed on 2022. 02. 28).

- 10) Ryu, J., Kim, J.J. *et al.*, 2019, “Removal of fine particulate matter (PM2.5) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration,” *Environ. Pollut.*, Vol.245, pp.253-259.