

광학기반 간이형 먼지센서의 환산질량농도 표시에 관한 성능평가방법

○ 안강호 | 한양대학교 기계공학과
교수
E-Mail : khahn@hanyang.ac.kr

1. 서론

대기중 먼지(PM10, PM2.5)가 인체에 유해하다는 것은 여러 연구결과 및 보도를 통하여 일반인들에게 널리 알려져 있다. 이와 더불어 국민 생활향상에 따라 건강 및 복지에 대한 관심이 높아지고 야외 활동 및 운동 등 실외 활동이 활발해짐에 따라 자연스럽게 공기 오염과 건강에 더욱 많은 신경을 쓰고 있다. 대기중 먼지는 2013년 10월 WHO에서 1군 발암물질로 발표하였으며, 서울대 김 호 교수팀은 2002년부터 2013년까지 한국인 100만 명을 분석하여 대기중 먼지가 10 mg/m^3 증가할 경우 파킨슨병 등 신경계질환이 1.6배 증가한다는 것을 발표하였다. 2017년 3월 30일자 Nature 지는 중국발 미세먼지(PM2.5)로 한국과 일본에서 30,900명이 조기 사망 하였다는 결과가 보고되기도 하였다. [6, 7, 8, 9]

이와 같이 먼지가 인체에 미치는 영향이 크다는 연구결과가 속속 발표되고 언론에서 많이 언급되어짐에 따라 국민들은 이에 대한 대처로 공기 중 먼지를 제거할 수 있거나 숨쉬는 공기중 먼지의 농도에 관한 관심이 크게 증대하였다. 특히, 가정에서 먼지를 제거하는 공기청정기의 경우 최근에 시판되는 제품들은 공기중 먼지의 농도를 질량농도로 표시하여 거의 실시간으로 먼지의 농도를 알아볼

수 있게 표시하고 있다. 그러나 시판되고 있는 공기청정기에 부착된 먼지 센서는 LED나 레이저를 이용하여 먼지에서 산란되는 빛의 양을 이용하여 먼지의 개수와 크기를 측정하게 된다. 따라서 이러한 광학적 방법으로 먼지를 측정할 경우 먼지의 크기와 개수에 대한 정보를 쉽게 얻을 수 있으나 질량농도를 직접적으로 얻을 수 없다.

현재 기술로 질량농도를 실시간으로 측정할 수 있는 간이형 센서 (low cost dust sensor)는 없는 것으로 보이고, 고가의 질량농도 측정기를 공기청정기에 적용하는 것은 무리가 있어 산업계에서는 광학적 방법을 이용한 저가의 먼지센서를 사용하여 먼지의 개수와 크기 데이터를 이용하여 질량농도로 환산 표시하고 있다. 따라서 이 환산과정에서 실제 질량농도와 차이가 발생할 수 있다. 즉, 먼지의 종류나 형상에 따라 밀도가 달라지며 이에 대한 정보를 광학기반 먼지센서는 인지할 수 없어 오차가 발생할 수 있다.

최근에 발표되고 있는 광학기반 간이형 먼지센서의 성능평가에 대한 해외의 연구결과를 보면 센서의 보정이 잘 되었을 경우 가격대비 성능이 고가의 질량농도 측정기 센서에 비해 매우 우수한 것으로 발표되고 있다.[1,2,3,4,5] 또한 간이형 먼지센서의 경우 가장 큰 장점 중에 하나가 공기중 먼지의 농도변화를 거의 실시간으로 보여줄 수 있다는 것

이다. 기존의 질량농도 센서의 경우 측정 자료가 약 1시간 단위로 표출되어, 1시간 동안 인체가 고농도의 먼지에 노출되어도 호흡하고 있는 공기질 제어에 대한 어떠한 행동도 취할 수 없는 무방비 상태에 노출될 수 있다.

따라서 본 표준안을 제안하게 된 목적은 간이형 먼지센서가 여러 가지 좋은 점이 있어도 기존의 환경기준에서 사용하는 질량농도표시에 대한 문제로 인하여 사용할 수 없게 되는 것을 슬기롭게 극복하고 새로운 기술이 접목된 센서를 사용할 수 있게 함으로서 국민 건강과 복지에 작으나마 기여할 수 있기를 바라는 목적으로 제정하게 되었다. 이를 위하여 2016년 가을부터 업계, 연구소, 학계 및 협회 소속 위원들로 구성하여 수차례에 걸쳐 회의 및 토론을 통하여 간이형 먼지센서 표준안을 만들게 되었다. 본 표준안을 만들기 위하여 해외의 유사 표준안이나 시험방법에 대한 자료를 찾았으나 참고할 만한 자료가 없었다. 본 표준안은 지금 현재 미진한 점이 있을 수 있으나 여러 차례의 실험을 통하여 기존에 생산 또는 개발되고 있는 간이형 먼지센서를 평가해 본 결과 만족할 만한 결과를 도출할 수 있었다.

해외에서 사용하는 Low Cost Dust Sensor라는 단어를 본 논문에서는 간이형 먼지센서로 표기하기로 하고, 공기청정기나 에어컨에 내장된 먼지센서(일체형 또는 내장형)와 IoT용 또는 일반인용(citizen science) 광학기반 먼지센서(독립형)를 통칭하는 것으로 한다.

2. 평가방법의 적용범위

본 평가 방법은 공기청정기용/에어컨 등에 사용하는 광학기반 광학 먼지센서와 IoT용/일반인용 광학기반 먼지센서의 질량농도 혹은 개수농도를 표시하는 간이형 먼지센서에 적용할 수 있다. 본 평가방법에서 먼지센서를 평가하는 온도(18~28℃)와 습도(40~70%)가 실내 기준으로 되어있어, 독립형 광학기반 먼지센서(IoT용, 일반인용)의 경우 야외

에 설치하여 운영하게 되면 평가시 온도/습도와 다르게 되어 평가 결과를 그대로 적용할 수 없다. 특히, 레이저의 경우 온도에 민감하여 레이저의 출력이 외부 온도변화에 따라 변할 수 있으니 이 점 유의 바란다. 그리고 간이형 먼지센서의 경우 센서 내부에 흐르는 유동을 발생시키는 방법이 자연대류나 소형 팬을 사용하여 공기를 흡입하는 관계로 이 센서를 야외에 적용할 경우 바람에 의한 영향으로 센서의 측정값을 신뢰하기 어렵다. 따라서 이러한 점에 유의하기 바란다.

본 평가방법은 크게 공기청정기/에어컨 등에 삽입된 먼지센서(일체형 또는 내장형)의 성능평가 부분과 독립형 먼지센서로 나눌 수 있다. 공기청정기 등에 삽입된 일체형 먼지센서의 성능평가는 기본적으로 공기청정협회에서 이미 시행하고 있는 CA 인증 시험법을 사용하여 진행한다. 간이형 먼지센서(독립형)는 덕트내에서 먼지의 농도를 시간에 따라 점차적으로 감소시켜 가면서 먼지센서와 기준계측기의 측정값과 비교하여 평가한다.

3. 광학기반 먼지센서의 질량농도 표시법

간이형 먼지센서의 경우 빛을 이용하여 먼지에서 산란된 빛의 양에 따라 먼지의 크기와 개수를 측정하게 된다. 이 정보를 이용하여 내부 프로그램에서 측정된 먼지의 크기와 개수를 이용하여 먼지의 공기중 농도를 질량농도로 표시하게 된다.

따라서 이러한 계산과정에서 먼지의 밀도를 정확히 알 수 없으므로 질량농도로 표시하는 것에는 일정한 오차를 수반하게 된다. 따라서 본 표준안에서는 이러한 점을 고려하여 기존의 대기환경기준에서 표시하는 PM_{xx} 와 차별하여 PM_{xxoc} (optically equivalent PM_{xx} mass)로 표시하기로 한다.

4. 시험 입자

성능평가에 사용되는 표준입자는 KCl을 사용하

는 것을 원칙으로 하며, 기존에 업계에서 사용하던 담배연기, Arizona Road dust, fly ash, KANTO roam 등을 사용하여 간이형 먼지센서를 평가할 수 있다. 그러나 담배연기는 PM₁₀에 해당하는 큰 먼지를 발생시키기 어렵고, 실내에서 법적으로 금연이 되었으며, 기존에 사용하던 표준 담배는 일본이나 중국의 특정브랜드 제품의 담배를 사용하도록 되어있어, 이는 학문적으로나 사회적 현상에 비춰 적절하다고 생각하지 않고 또한 담배를 이용한 먼지센서를 평가할 때 냄새와 평가자의 건강을 고려하여 담배연기를 이용한 간이형 먼지센서의 평가는 고려하지 않는 것이 좋을 것 같다. Arizona Road dust, fly ash, KANTO roam 등도 batch에 따라 입자의 분포나 밀도 등이 항상 일정하지 않아 표준입자로 사용하는 데는 문제가 있다.

KCl을 간이형 먼지센서 평가용 표준입자로 사용하고자 하는 주 요인은 밀도나 순도가 일정한 KCl을 누구나 쉽게 구매할 수 있으며, 또한 가격적인 측면에서 센서 개발시 부담을 많이 줄일 수 있다. 단, KCl의 경우 상대습도가 80% 이상 되면 고체상으로 유지되지 않아 입자의 크기가 변할 수 있으니 이점 유의하기 바란다.

5. 먼지센서의 질량농도 시험범위

간이형 미세먼지센서의 질량농도 시험범위는 표 1.에 나타내었다.

표 1. 시험용 미세먼지의 최대, 최소 질량농도 범위 (단위 : mg/m³)

최소 질량농도 Min	센서표시	최대 질량농도 Max
20	PM10oe	300
8	PM2.5oe	100
5	PM1.0oe	90

6. 기준계측기

간이형 먼지센서의 질량농도측정 특성을 평가하기 위해서는 공정시험법에 따라 필터로 먼지를 일정시간 포집하여 포집된 먼지의 무게를 저울로 측정한다. 이럴 경우 고가의 저울과 이 저울의 정도를 유지하기 위한 설비, 그리고 매우 숙련된 시험평가자가 있어야한다. 이러한 문제점을 조금이나마 줄이기 위해 간이형 먼지센서의 성능평가를 위하여 기준계측기를 이용하는 방법을 채택하였다. 이 기준계측기는 필터를 이용한 중량법으로 측정된 값과 ± 10 %의 오차범위내에 속하면 기준계측기로 사용할 수 있다. 인증시에는 인증기관에서 사용하는 기준계측기는 간이형 먼지센서 시험시점 1년 이내에 중량법으로 측정된 값과 ± 10 %의 오차 범위내에 속하는 기기를 기준계측기로 사용하여 평가하여야 한다.

7. 시험 평가 장치

시험 평가 장치의 개략도는 그림 1.에 나타내었다. 평가 장치는 크게 시험입자 발생부와 시험 덕트로 구성되었다. 시험입자 발생부는 KCl 용액을 분무하여 입자(액적)를 발생시키는 atomizer부와 이때 발생된 전하를 제거하는 중화기(Neutralizer), 분무된 액적을 건조시키는 공기를 공급하는 부분으로 구성되어 있다. 이 입자발생부는 일정한 크기분포를 갖는 KCl입자를 일정한 농도로 발생시킨 후, 발생 입자의 농도를 시간에 따라 점차적으로 감소시켜 주는 기능을 가져야 한다. 이렇게 발생된 시험입자는 시험 덕트(test duct)로 유입된다. 이 시험 덕트의 단면적의 크기는 임의로 만들 수 있으며 단지 다음 조건을 만족하여야 한다. 즉, 덕트의 시험체 시험위치에서 덕트의 단면을 4등분하여 각 4각형의 중심부에서 측정(그림 1의 1,2,3,4,5번 위치)한 유속은 0.1±0.05 m/s내에 존재하여야 한다. 덕트내 유속을 느리게 정의한 이유는 미세먼지 센서가 자

연대류 또는 팬을 이용하여 공기를 흡입하기 때문에 덕트내 유속이 빠를 경우 센서의 성능에 지장을 줄 수 있다. 그리고 3개의 시험체의 단면적의 합이 덕트의 단면적의 10%를 넘어서는 안 된다. 만약 기준계측기가 덕트 내부에 위치할 경우 기준계측기의 단면적과 시험체 3개의 단면적의 합이 덕트 단면적의 10%를 넘어가면 안 된다.

그리고 시험 덕트내에서 미세먼지 농도 균일도는 유속측정위치에서 측정한 5곳의 농도평균값과 5곳 각각의 농도가 평균농도의 $\pm 15\%$ 이내를 만족하여야 한다. 즉, 측정점 어느 한 곳의 측정값이 평균농도의 $\pm 15\%$ 를 넘어서는 안 된다.

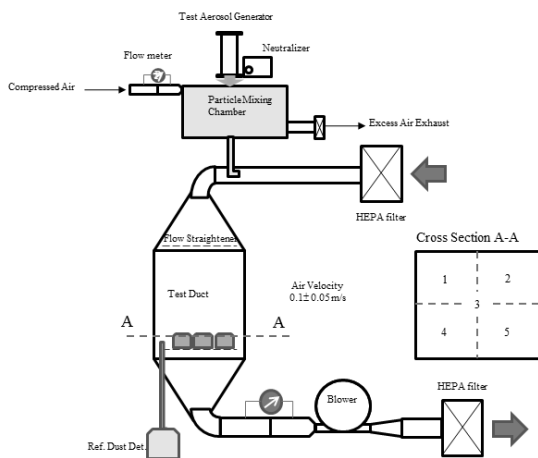


그림 1. Schematic diagram of a low cost dust sensor testing system

8. 먼지센서 시험방법

8.1 일체형 먼지센서 (공기청정기, 에어컨등에 내장된 간이형 먼지센서)

공기청정기의 먼지센서와 기준계측기의 설치위치 선정 및 시험평가는 “실내공기청정기 SPS-KACA002-132:2016”기준에 따른다. 챔버는 공기청정기 성능

평가용 챔버를 사용하여 진행하며 기준계측기의 먼지 흡입부는 공기청정기에 장착된 먼지센서 흡입부에서 5cm 떨어진 곳에 설치하며 기준계측기의 미세먼지 흡입부(샘플링프로브) 길이는 30 cm를 넘지 않아야 한다. 먼지 흡입파이프 재질은 스테인레스 스틸로 한다. 일체형 먼지센서의 데이터는 측정초기(Max 농도)에서 측정말기(Min 농도)에 이르는 시간에 최소 30개 이상 데이터가 추출되어야 한다. 단, 챔버크기에 비해 공기청정기의 용량이 커서 30 개 이상의 데이터 획득이 어려운 경우 공기청정기의 풍량을 조절하여 시험을 실시할 수 있다.

8.2 독립형 먼지센서 (IoT 용, 일반인용 먼지센서)

시험체 3개를 시험덕트의 중앙에 위치시킨 후, 입자발생기에서 입자의 농도를 조절하여 측정초기 최대농도(Max)에서 측정말기 최소농도(Min)로 일정한 비율로 감소시킨다. 만약 먼지의 농도가 시간에 따라 일정한 비율로 줄어들지 않으면 log 그래프 상에서 1차회귀 직선이 일직선으로 표시되지 않게 된다. 이때 시험체에서 최소 30개 이상의 데이터가 획득되어야 한다. 단, 덕트내 먼지의 농도를 일정한 속도로 변화시킬 수 없으면 먼지의 농도를 단계적으로 변화시켜 30개의 데이터를 획득하면 되나, 미세먼지의 농도는 최소한 5단계(최대농도와 최소농도 포함하여 등 농도 간격으로)의 변화를 주어야 한다.

9. 성능 평가

3개의 시험체에서 각각의 1차 회귀직선(linear regression line)을 구하여(최대, 최소 농도범위내의 값을 사용) 기준계측기의 최대 미세먼지 농도에서 시험체의 1차 회귀직선의 값이 $\pm 30\%$ 를 벗어나지 말아야 하고, 기준계측기의 최소 미세먼지 농도에서 시험체의 1차 회귀직선의 값이 $\pm 50\%$ 를 벗어나지 말아야 한다.

그림 2.에 시험체의 합격/불합격 판정 방법을 도
시화 하였다. 기준계측기의 미세먼지농도 측정결과
가 점선으로 표시되었으며, 이 직선은 y-축을 log
스케일로 하고 x-축을 측정시간으로 하여 측정값을
1차 회귀직선을 구하여 표시한 것이다. 이 기준계
측기의 회귀선에서 미세먼지의 최대농도(표 1 참
조)의 $\pm 30\%$ 와 최소농도(표 1 참조)의 $\pm 50\%$ 내
에 시험체의 1차 회귀선의 값이 모두 존재하여야 한
다. 만약 최대 또는 최소농도 위치에서 시험체의 1
차 회귀선 값이 일부라도 벗어나게 되면 불합격 처
리 된다. 예를 들면, 그림 2에서 직선으로 표시된
시험체1의 경우 합격이 되고, 1점쇄선으로 표시된
시험체2의 경우 불합격 처리된다.

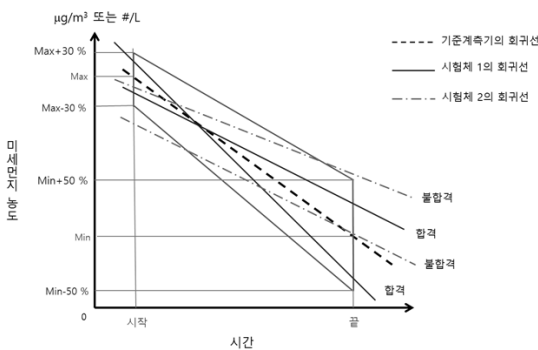


그림 2. 시험체의 합격, 불합격 판정 예시

윗 조건을 3개의 시험체가 모두 합격이 되어야
시험평가 결과 합격 판정이 된다. 합격 부여는
PM10_{0e}, PM2.5_{0e}, PM1_{0e}에 대하여 각각 부여한다.

- 참고문헌 -

1. K.E. Kelly et. al., "Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor" *Environmental Pollution* 221, (2017) 491-500
2. K. Johnson, et. al., "Using Low Cost Sensors to Measure Ambient Particulate Matter Concentrations

- and On-Road Emissions Factors" *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, doi:10.5194/amt-2015-331, (2016)
3. E. Austin, et. al., "Laboratory Evaluation of the Shinyei PPD42NS Low-Cost Particulate Matter Sensor" *PLOS one*, DOI:10.1371/journal.pone.0137789 Sept. 14, (2015)
4. S. Steinle, et. al., "Personal exposure monitoring of PM2.5 in indoor and outdoor microenvironments, *Science of the Total Environment*, 508, (2015) 383-394.
5. D. Holstius, et. al., "Field calibration of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California" *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 1121-1131, (2014)
6. IARC (2013), Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths, http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf
7. Hyewon Lee, Woojae Myung, Doh Kwan Kim, Satbyul Estella Kim, Clara Tammy Kim & Ho Kim (2017), Short-term air pollution exposure aggravates Parkinson's disease in a population-based cohort, *Scientific Reports* 7, Article number: 447411
8. Yu-Mi Jeon, Mi-young Lee (2016), Airborne nanoparticles (PM0.1) induce autophagic cell death of human neuronal cells, *J. Appl Toxicol.*, 36, 10, pp.1332-1342.
9. 박순애, 신현재 (2017), 한국의 미세먼지(PM2.5)의 영향요인 분석, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(1), pp. 227-248.