

# 간이형 먼지 센서의 종류 및 성능 현황

○ 안진홍 | (주)이노서플  
대표이사  
E-MAIL : jhahn9305@gmail.com

## 1. 서론

입자 상 물질(PM, Particulate matter), 흔히 말하는 미세 먼지는 공기 질을 결정하는 중요한 변수이다. 입자 상 물질의 크기는 우리 호흡기의 흡입 및 침착 특성에 매우 밀접하게 관련되어 있으며 그 크기에 따라 입자의 질량 농도로써 지름이 10  $\mu\text{m}$  이하인 PM10, 2.5  $\mu\text{m}$  이하인 PM2.5 및 1.0  $\mu\text{m}$  이하인 PM1.0으로 구분한다.

세계 보건 기구(World Health Organization, WHO)에서는 미세먼지를 1군 발암 물질로 분류하고 있다. 미세 먼지가 위험한 이유는 그 크기가 매우 작아 우리 몸의 코, 구강 및 기관지에서 걸러지지 않고 폐포 깊숙이 침투하여 다양한 질병의 원인이 되고 있기 때문이다. 특히 고농도의 미세 먼지를 단기간에 노출하였을 경우 폐 염증, 호흡기 증상 등이 발병될 수 있으며 장기간 노출 시에는 폐 기능 감소 및 만성폐쇄성폐질환이 증가할 수 있다. 또한 초미세먼지인 PM2.5의 노출은 심근경색, 뇌졸중 및 부정맥 등을 유발할 수 있어 더욱 위험할 수 있다.

이러한 위험성에 기인하여 2016년 정부는 미세먼지 해결 기술 개발을 9대 국가 전략 프로젝트 중 하나로 선정하였다. 이 프로젝트 중의 하나로 미세 먼지의 측정 및 예보가 한 축에 자리잡고 있다. 미세 먼지 농도를 측정하기 위해 미국의 EPA(Environment

Protection Agency)에서 승인된 장비로는 임팩터, 싸이클론, TEOM 및 베타선 측정법이 있다. 또한 광산란 방식을 이용한 SidePak, DustTrak (TSI Inc.) 및 Dust monitor(Grimm Inc.)등이 있다. 그러나 이러한 장비들은 매우 고가의 측정기이며 어느 특정 장소에 위치하여 미세 먼지 농도를 측정하는 역할을 한다. 이는 미세 먼지의 심한 노출 환경에 있는 곳 및 실내 환경의 측정에는 도움이 되지 못하고 있다. 이에 따라 최근에는 휴대형 미세 먼지 측정기의 수요가 급격하게 증가하고 있는 추세이다.

이러한 요구들에 의해 제조사들은 공기 오염을 측정하기 위한 보급형 센서를 개발하고 판매를 시작하고 있다. 또한 보급형 센서의 기술 수준은 사물인터넷(IoT)과 연동하여 매우 빠른 속도로 그 기술이 성장하고 있다. 비록 보급형 센서들은 매우 단순한 측정 원리를 가지고 있지만 저가이며 휴대가 가능하여 널리 사용되고 있다. 우리 주변에서 가장 흔히 볼 수 있는 것이 공기청정기 내에 설치되어 있는 센서를 들 수 있다.

최근에 보급형 센서는 일반적으로 2가지 측정 원리를 가지고 있다.

첫째로는 광원으로 적외선 LED(Infrared emitting diode, IRED)를 사용하며 수광부로 phototransistor (PT)를 사용하는 방식을 들 수 있다(그림 1. 참고). 그림 1.에서 볼 수 있듯이 오염 물질이 관측 체적

(viewing volume)을 지나갈 때 입자는 빛에 의해 산란되고 수광부에 의해 측정된 빛의 산란 강도는 먼지의 농도에 비례하게 된다. 이러한 원리를 이용한 장치들은 입자의 개수 및 크기를 알 수 없고 전체적인 먼지의 양을 측정하게 된다. 대표적인 장치로는 일본의 Shinyei Inc.에서 생산되는 PPD42NS 모델과 Sharp Inc.에서 생산되는 GP2Y1010AU0F 및 (주)삼영에서 생산되는 DSM501A 모델을 들 수 있다. 위의 3가지 모델은 그림 2와 같이 공통적으로 Low Pulse Occupancy의 비율에 따른 미세 먼지의 농도를 구하게 된다.

둘째로는 광원으로 Laser diode를 적용하고 수광부로 photodiode를 적용한 단일 입자 계수 방식(Single Particle Light Scattering)을 들 수 있다(그림 3. 참고) 그림 3.에서 볼 수 있듯이, 미세 먼지가 관측 체적을 지나갈 때 입자는 레이저에 의해 산란되고 산란된 빛은 photodiode에 의해 전기적 신호로 변환된다. 이때 전기적 신호는 입자의 크기에 비례하여 전기적 펄스 신호로 나타나고 이 펄스의 높이에 따라 입자의 크기 정보를 알 수 있다. 입자의 크기 및 개수 정보를 기반으로 미세 먼지의 질량 농도로 환산하여 PM 농도 정보를 얻을 수 있다. 대표적인 장치로는 Dylos Inc.의 DC1100 및 DC1700, Plantower의 PMS1003 및 PMS3003, (주)이노서플의 PSM-305모델을 들 수 있다.

표 1.은 현재까지 상용화되고 기존 연구가들에

의해 평가되었던 보급형 미세 먼지 센서의 간단한 사양을 요약해 놓은 것이다.

다음 2절에서는 이러한 보급형 미세 먼지 센서의 성능 시험 방법 및 센서별 성능 결과에 대해 언급하고자 한다.

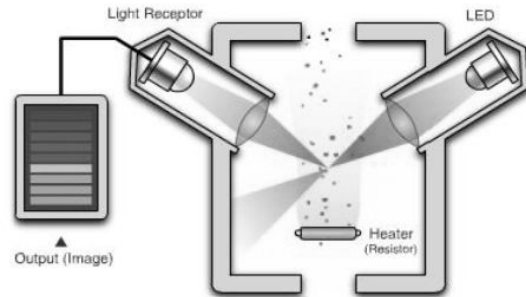


그림 1. IRED 방식의 미세 먼지 센서 측정 원리 (출처: Shinyei 홈페이지)

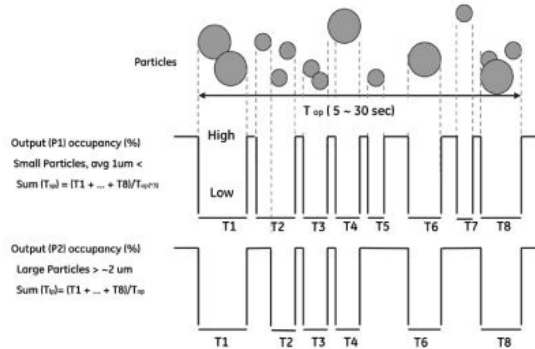


그림 2. IRED 방식의 미세 먼지 센서의 신호처리 예

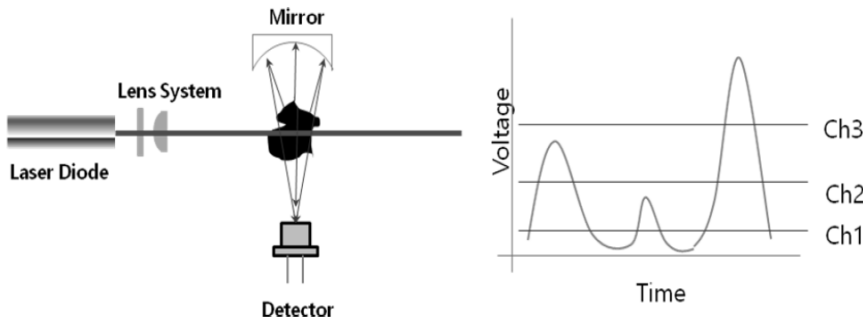
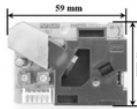
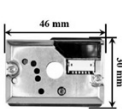
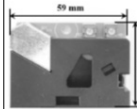





그림 3. 단일 입자 계수 방식을 이용한 미세 먼지 센서 측정 원리

표 1. 보급형 미세 먼지의 종류 및 사양

모델명	PPD42NS (Shinyei)	GP2Y1010A U0F (Sharp)	DSM501A Samyoung	DC1700 DC1100 (Dylos)	PMS3003 PMS1003 (Plantower)	PSM305 (Innociple)
모양						
측정 용도	PM 10 / PM2.5	PM 10 / PM2.5	PM 10 / PM2.5	Particle Counts	Particle Size and Counts, PM10, PM2.5	Particle Size and Counts, PM10, PM2.5, PM1.0
측정 원리	Infrared Light Scattering	Infrared Light Scattering	Infrared Light Scattering	Laser Light Scattering	Laser Light Scattering	Laser Light Scattering
최저 측정 입자 크기	~ 1 $\mu\text{m}$	N/A	~ 1 $\mu\text{m}$	>0.5 $\mu\text{m}$ and 2.5 $\mu\text{m}$	>0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 and 10 $\mu\text{m}$	>0.5, 1.0 and 2.5 $\mu\text{m}$
측정 농도	28,000 #/liter	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,400 $\mu\text{g}/\text{L}$	~106#/cm <sup>3</sup>	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (~150,000 #/L)
응답시간	60 sec	1 sec	60 sec	60 sec	1 sec	6 sec
Built-in Fan	N	N	N	Y	Y	Y
Output Signal	Pulse Width modulation	Analog Output	Pulse Width modulation	RS232	UART	UART
Power	5 V	5 V	5 V	12 V	5 V	12 V
Cost (USD)	\$15	\$10	\$13	\$425 /\$200	\$20	\$47

\* 언급된 모델 및 사양은 각 사의 제품 스펙에 기초하여 작성한 것임

## 2. 본 론

본 절에서는 표1에 보여 드린 보급형 센서의 성능 시험 결과에 대해 설명드리고자 한다. 많은 연구가들에 의해 보급형 미세 먼지 센서에 대한 성능 시험을 진행해 왔으나 그 평가 기준이 모호하여 시

험 방법에 따라 그 성능 결과가 달리 해석되는 경향도 보인다.(참고 문헌 참조) 그러나 현재 국내에서는 시험 평가 표준안을 제시하며 만들어가는 중에 있으며 미국의 Air Quality Sensor Performance Evaluation Center(AQ-SPEC)에서는 보급형 센서의 표준 성능 시험 방법에 대해서 논의 중에 있다.

## 2.1 보급형 미세 먼지 성능 평가 장치 및 방법

보급형 미세 먼지의 성능 시험은 크게 시험 챔버 내에서 성능 시험을 진행하거나 대기 중에서 평가하는 방식을 취하고 있다. 전자의 시험 방법은 온도 및 습도가 일정하게 유지하는 조건에서 임의의 입자를 발생시켜 챔버내로 주입한 후, 기준 측정기와 피 측정기 사이의 상관관계를 분석하는 방법이다. 주로 챔버 내의 시험에서 기준 측정기로는 광산란 방식의 계측기를 도입하여 비교하는 방식을 주로 사

용한다. 반면 대기 중에서 시험하는 방식은 비교적 FRM(Federal Reference Method) 또는 FEM(Federal Equivalent Method)의 방식을 도입한다.

일반적으로 보급형 미세 먼지의 평가를 통해 입자의 농도에 따른 선형성, 정확성 및 측정 한계 정도를 평가한다. 또한 환경 변수로 온도 및 습도의 영향도 평가하기도 한다.

그림 4.는 AQ-SPEC의 시험 평가 시스템에 대한 계략도를 나타낸다.

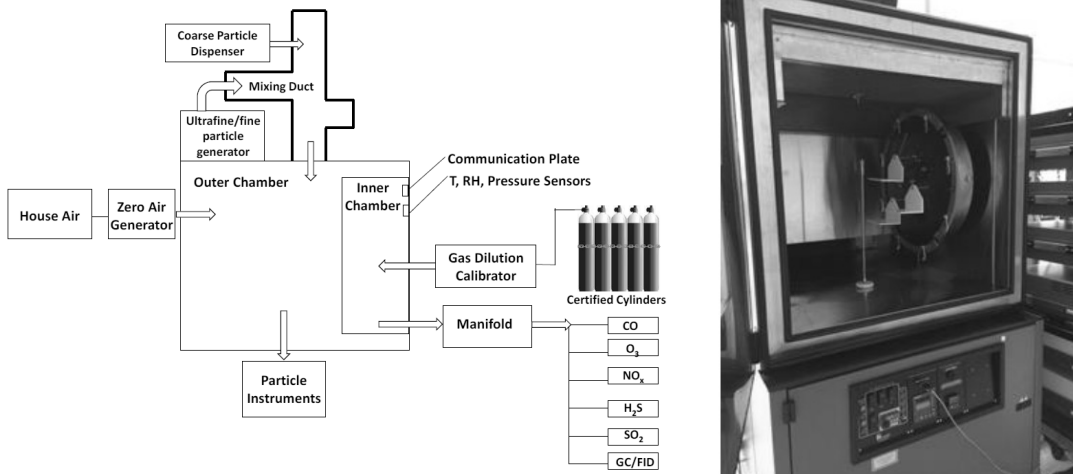


그림 4. AQ-SPEC의 미세 먼지 센서 시험 챔버 계략도

## 2.2 IRED 방식의 미세 먼지 센서 성능 시험

IRED 방식을 채택한 미세 먼지 센서는 일본의 Shinyei 및 Sharp에서 개발한 모델이 대표적이다. Yang Wang et al.은 58 x 58 x 28 cm의 소형 챔버내에서 위 모델에 대한 성능을 평가하였다. 기준 계측 장비로는 TSI사의 SidePak을 이용하였으며 시험 챔버 내의 입자 농도의 균일도는 15% 이내로 유지시켰다.

시험의 결과는 선형성 및 측정의 정확성에 대해 평가하였다. 평가시 입자의 농도는 0 ~ 5 mg/m<sup>3</sup> 정도의 높은 수준에서 진행하였다.

그림 5.는 각 센서에 대한 평가 결과를 보여 준다. 그림 5.에서 볼 수 있듯이 대체로 우수한 선형성 (>R2 = 0.9)을 보이고 있음을 알 수 있다. 다만 그 측정 농도의 오더수준이 mg/m<sup>3</sup>으로 일반적인 환경이 아닌 조건이다.

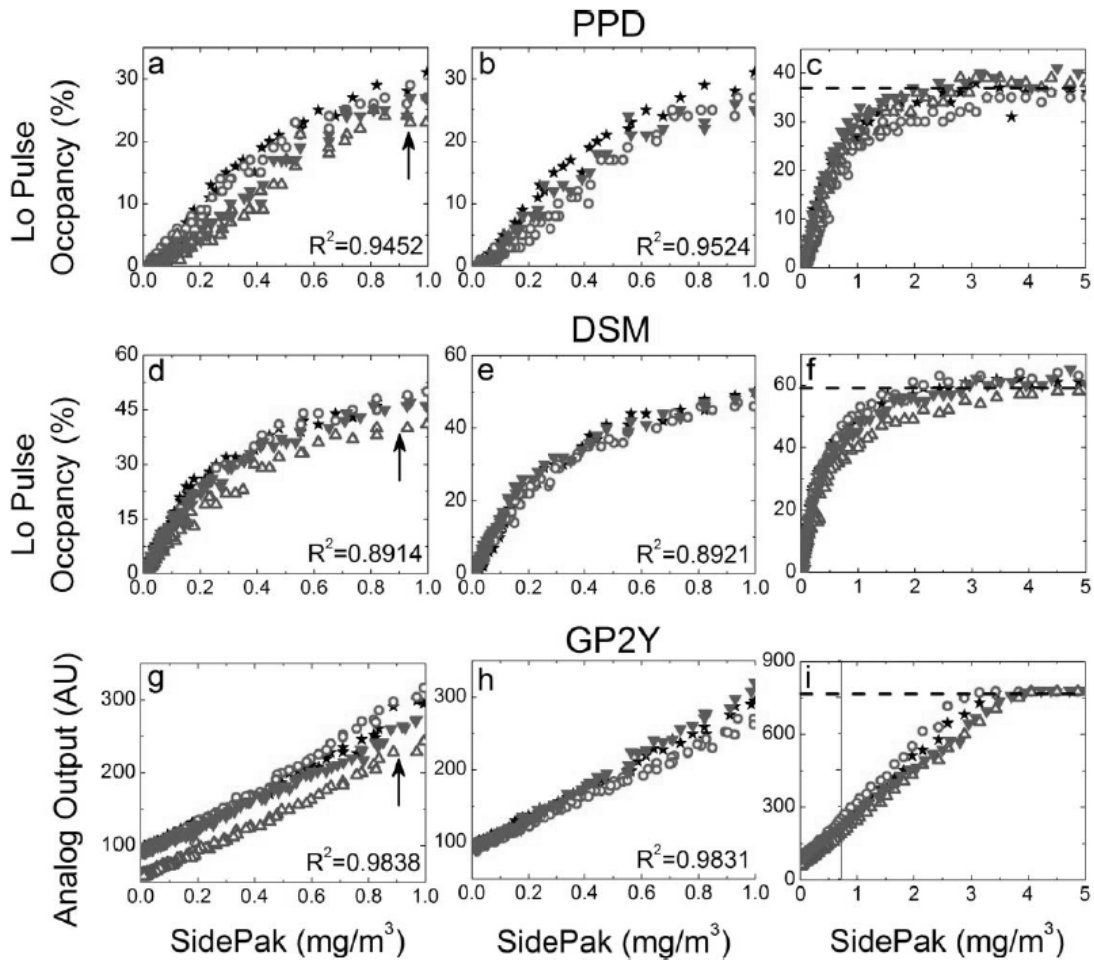


그림 5. Shinyei Inc.에서 생산되는 PPD42NS 모델과 Sharp Inc.에서 생산되는 GP2Y1010AU0F 및 (주)삼영에서 생산되는 DSM501A의 시험 챔버내 성능 시험 결과 (Yang Wang et al, 2016)

그러나 미국 EPA의 Field 시험 보고에 따르면 Shinyei의 PPD42NS 센서는 빛, 바람 등에 민감하게 반응한다고 보고하고 있다. 미국 EPA에서는 이러한 영향을 최소화하여 성능 시험을 진행하였다. 기준

계측기로는 Grimm사의 Dust monitor를 사용하였으며 그 결과 선형성 R<sup>2</sup>= 0.1516으로 매우 좋지 않은 결과가 도출되었다. 이때의 평균 농도가 약 25 μg/m<sup>3</sup>이하였다. 그 결과는 그림 6.에 도시하였다.

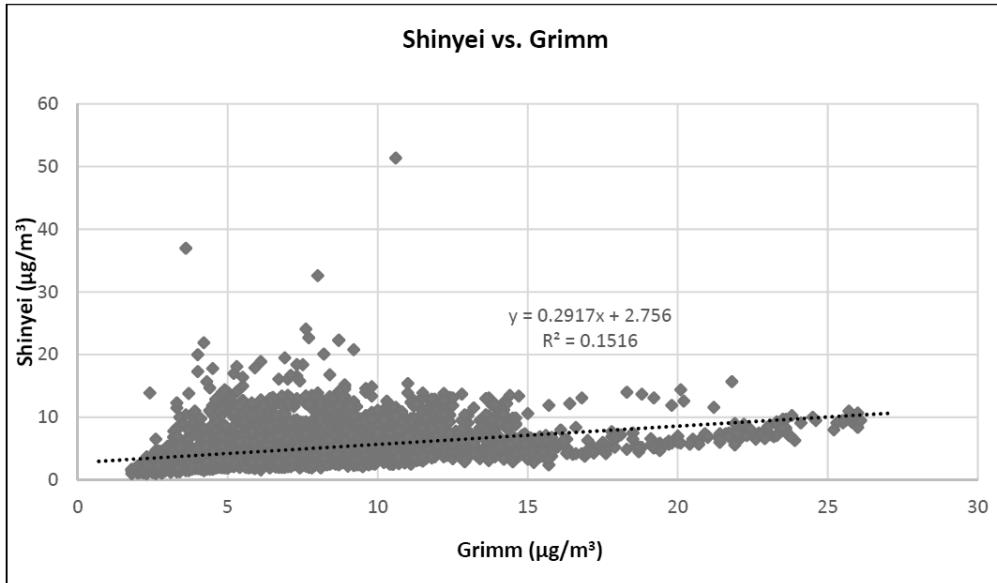


그림 6. Shinyei사의 PPD42NS 센서와 Grimm사의 Dust monitor의 Field 시험 평가 (EPA/600/R-14/464, 2014)

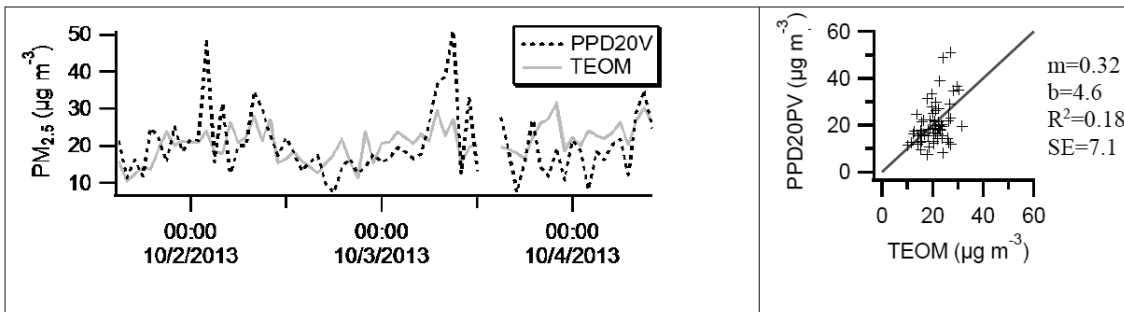


그림 7. 도로에서 TEOM과 Shinyei PPD42NS 센서의 비교

또한 Karoline K. Johnson et al.의 시험 결과 역시,  $R^2=0.18$  정도로 좋지 않은 결과를 도출하였다. 그들은 도로에서의 미세 먼지 농도를 측정하였으며 기준계측기로 TEOM을 사용하였다. 전체적인 추세는 유사하게 나타나지만 낮은 농도 영역에서는 선형성이 좋지 않게 나타났다. (그림 7. 참고)

그림 7.의 결과들을 볼 때, IRED 방식의 미세 먼

지 센서는 기본적인 원리를 보면 입자의 농도가 높을 경우 측정 효율이 높아지기 때문에 일반적인 환경인 저농도에서는 그 효율성이 다소 떨어지는 것을 알 수 있으며 다수의 시험 결과에서도 증명이 되고 있다. 다만 정량적인 분석이 아닌 농도 변화에 따른 반응성이나 추세 분석용으로는 그 활용성이 있을 것으로 보인다.

### 2.3 단일 입자 계수 방식의 미세 먼지 센서

최근에 레이저 다이오드를 이용한 단일 입자 계수 방식의 센서들이 출시되고 있다. 이러한 센서의 구성은 대부분 광원으로 파장이 650 nm 급 레이저 다이오드 모듈을 채택하고 있다. 레이저 다이오드 모듈의 일반적인 출력은 3~5 mW 정도를 가지며, 그 수명은 약 3,000시간 정도이다. 광원의 출력이 일반적으로 사용하는 고가의 Particle Counter 등에 비해 약 1/10 정도로 매우 낮아 입자 크기 분해능 등 측정에 대한 성능이 다소 저하된다.

일반적으로 단일 입자 계수 방식의 광학부의 구성은 광원으로 Laser Diode, Laser의 빛을 입자가 지나가는 노즐부에 집중시키는 초점 렌즈 및 산란된 빛을 수광부로 집중시키는 광학 거울등으로 구성된다.

최근에 개발된 보급형 미세 먼지 센서는 초점 렌즈 및 광학 거울을 사용하지 않은 제품들이 출시되고 있다. 제1절에서 설명한 Dylos사의 DC1100/DC1700 및 Plantower사의 PMS1003/PMS3003 모델 등이다. 이 제품들의 특징은 광원을 최대한 photodiode에 근접시켜 입자에 의해 산란된 작은 빛을 감지시키는 기술이다.

그림 8.은 Plantower사의 PMS3003모델에 대한 계략도를 보여준다. Dylos사의 DC1100/DC1700과 유사한 광학 구조이다.

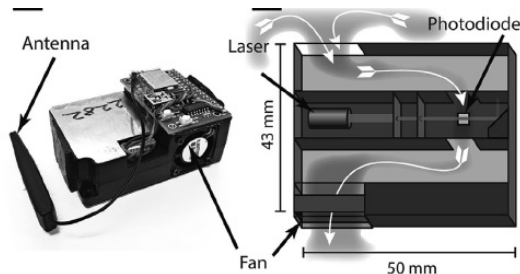


그림 8. Plantower사의 PMS3003의 계략도 (K.E. Kelly et al, 2017)

그림 8.에서 볼 수 있듯이, 레이저 다이오드 전면 에 빛의 퍼짐을 방지하기 위해 작은 구멍을 두었으며 이 구멍을 통과한 빛은 수광부인 photodiode에 매우 근접하게 지나가게 된다. Plantower사의 PMS1003/3003모델은 최저 0.3  $\mu\text{m}$ 를 측정할 수 있으며 6개의 측정 채널로 구분된다. 샘플링은 Fan에 의해 강제 흡입하는 시스템이다.

K.E.Kelly et al(2017)은 Plantower사의 PMS1003 모델을 이용하여 대기 및 시험실에서 그 성능을 검증하였다. 대기에서의 측정은 간이 백엽상에 센서를 설치하여 측정하였다. 그들은 풍동을 이용한 시험실 내 PMS1003 모델에 대해 평가를 수행하였다. 시험 입자로 alumina oxide로 밀도 4 g/cm<sup>3</sup>, 입자의 질량 평균 농도(mass median diameter)가 4.9  $\pm$  1.7  $\mu\text{m}$ 를 사용하였다. PMS 1003모델의 검출 한계는 1~3.22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도로 나타났다. 이 센서를 이용하여 대기중에서 평가를 수행하였다. 시험기간 동안 PM2.5의 평균 농도는 17.5~20.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 그림 9.는 측정 기간 동안 각 측정기의 농도 변화 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 PMS1003모델은 농도 변화에 따라 잘 반응하는 것을 볼 수 있다.

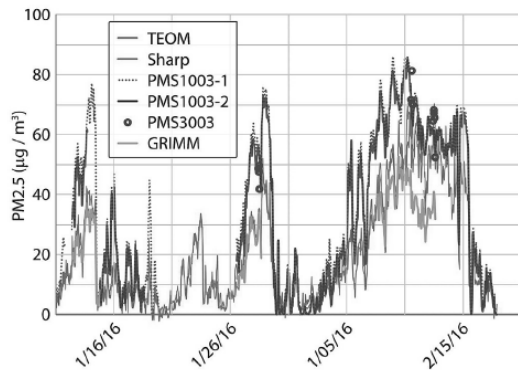


그림 9. TEOM과 보급형 센서들간의 PM2.5 농도 비교(K.E. Kelly et al, 2017)

그림 10.은 FEM(TEOM)방식과 PMS1003의 상관관계를 분석한 그래프이다.

그림 10.에서 볼 수 있듯이 PMS1003 센서들간의 상관관계는 R2=0.99이상으로 매우 좋은 관계를 보여준다. 반면 PM2.5의 농도가 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 될 경우, 그 농도를 약 1.5배이상 높게 측정하였다. 그러나 전체적인 상관관계는 R2=0.85 이상으로 좋은

결과를 보였다. 그림 11.은 PMS1003센서의 보정 계수에 대한 그래프이다. 그림에서 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하에서는 좋은 선형성을 보이며 전체적인 농도 영역으로 볼때에는 지수 함수적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

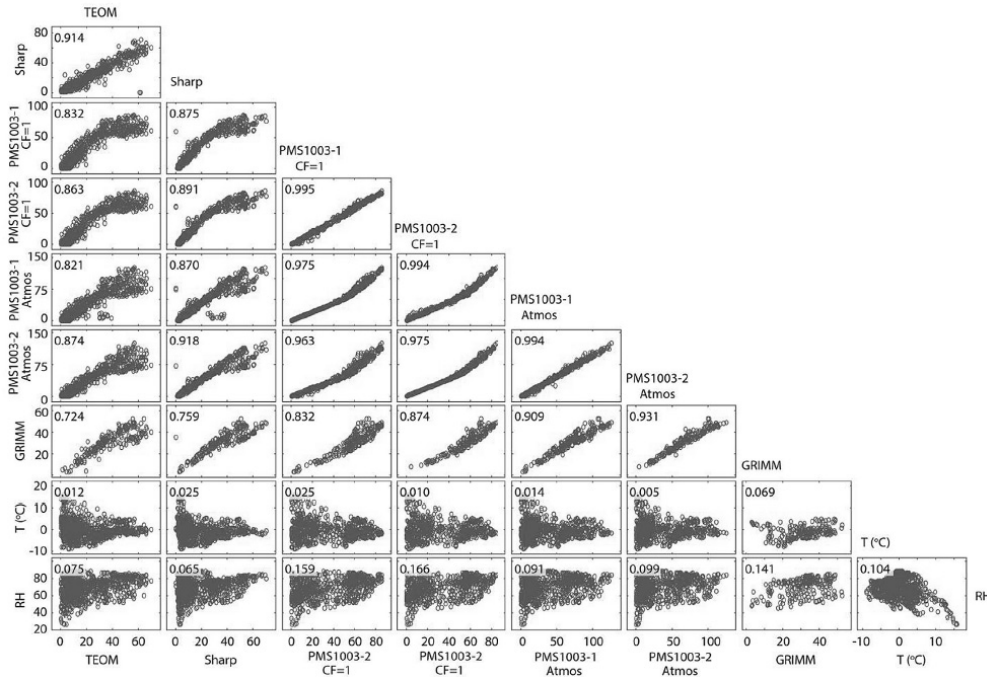


그림 10. 각 측정기 간의 PM2,5 농도에 대한 상관 관계 (K.E. Kelly et al, 2017)

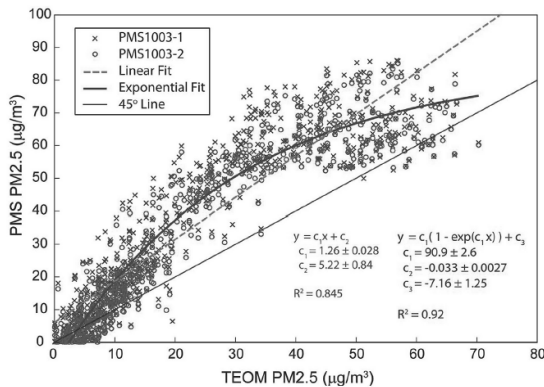


그림 11. PM2.5 농도에서 PMS1003의 지수 및 선형 보정 식 (K.E. Kelly et al, 2017)

다음은 미국 EPA에서 시험한 Dyllos DC1100의 성능 시험 결과를 보여준다. (EPA/600/R-14/464) 대기 중에서 시험을 진행하였으며 그림 12.와 같이 센서를 설치하였다.

Dylos DC1100은 0.5  $\mu\text{m}$  이상 및 2.5  $\mu\text{m}$ 이상의 크기를 측정하며 각각의 크기에 따른 입자 개수로 측정한다. Dylos DC1100 모델은 입자 계수와 질량 농도간의 환산 팩터가 없으며 제조사 역시 제공하지 않는다. EPA에서는 Dylos DC1100의 모든 데이터를 5분 평균화하여 Grimm사의 Dust monitor과 비교 분석하였다. 그림 13. 및 그림 14.는 농도에 따



른 추세 그래프와 상관관계를 분석한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적인 농도 변화에 따라 반응

성은 좋으나 상관관계에 있어서는  $R^2=0.533$ 으로 좋지 않았다.



그림 12 Dylos DC1100센서 설치 사진(EPA/600/R-14/464)

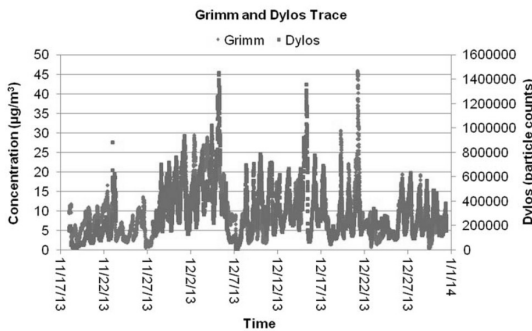


그림 13. Dylos DC1100과 GRIMM Dust monitor과의 농도 변화 그래프 (EPA/600/R-14/464)

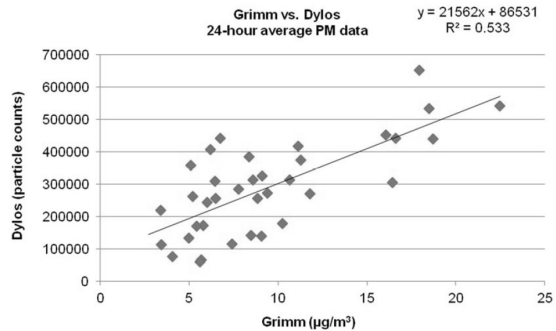


그림 14. Dylos DC1100과 Grimm Dust monitor 간의 상관관계 (EPA/600/R-14/464)

다음은 ㈜이노서플의 PSM-305에 대한 자체 평가 결과를 공유하고자 한다. PSM-305모델은 단일 입자 계수 방식을 적용하고 있다. Plantower의 모델과 Dylos의 모델과의 가장 큰 차이점은 레이저의 빔을 샘플링 입구에 모으기 위한 plano-convex cylindrical lens를 도입하고 산란된 빛을 수광부에 집광시키기 위한 광학 거울을 적용한 것이다. 이에 입자는 광학

계 내부의 광학 거울과 수광부의 중앙 사이로 유입이 되어 입자의 측정 손실을 최소화한 기술을 적용한 센서이다. PSM-305 모델은 최소  $0.5 \mu\text{m}$ 이상 측정하며 3개 채널로 분리된다.

그림 15.는 ㈜이노서플의 PSM-305 센서 내부 사진을 보여 준다



그림 15. (주)노서플의 PSM-305 센서 광학계 내부

그림 16.은 소형 챔버내에 KCl입자를 발생시켜 자체 측정된 결과를 보여 준다. 기준 계측기로는 미

국의 Particle Plus사의 AQM-7000모델을 사용하였으며 이 모델은 광산란 방식의 공기 질 측정기이다. 시험은 입자의 농도가 최대  $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 자연 감소가 될 때, 센서의 반응성을 측정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 기준 측정기와 유사한 방향으로 감소되고 있음을 볼 수 있다. 또한 PM1.0, PM2.5 및 PM10 모두 동일한 현상을 볼 수 있다.

그림 17은 2017년 4월27일에서 5월3일까지 대기 중에서 PM2.5를 측정된 결과이다. 농도 변화에 따른 반응성 및 선형성 ( $R^2=0.89$ )로 우수하게 나타났다.

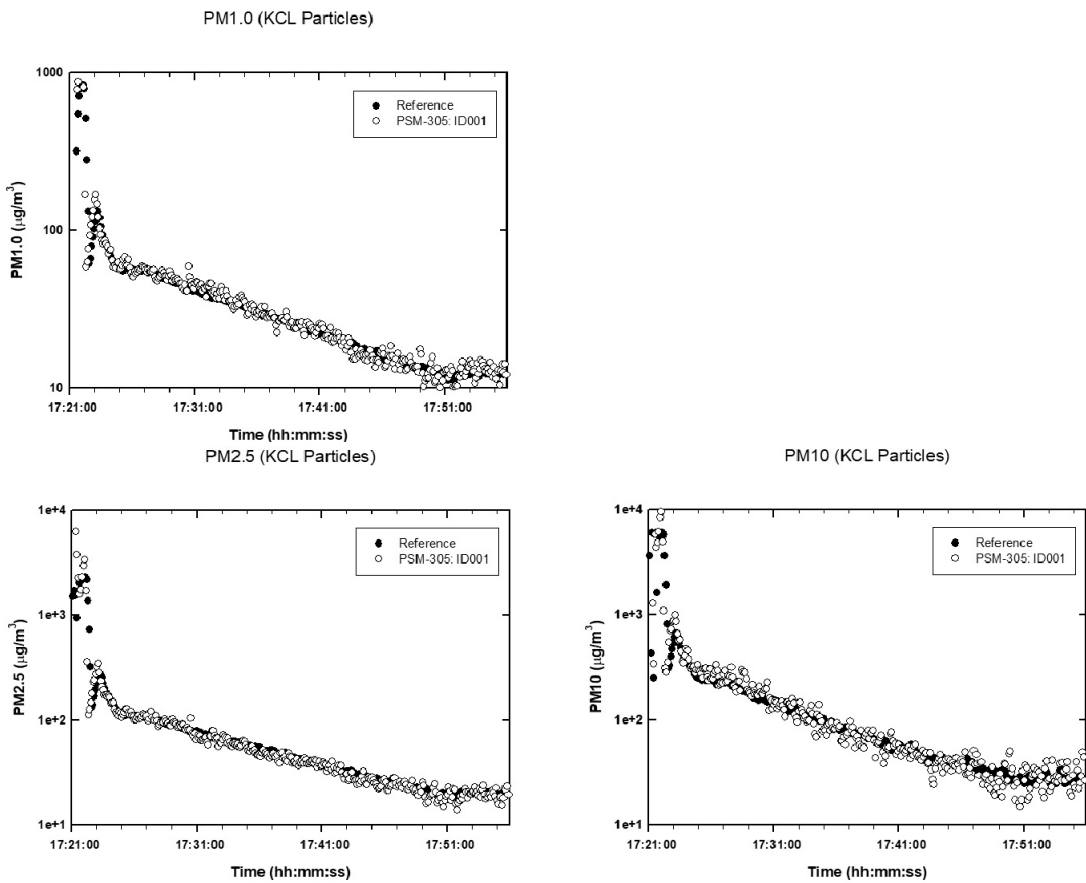


그림 16. (주)노서플 PSM-305와 기준기와의 농도 변화 그래프

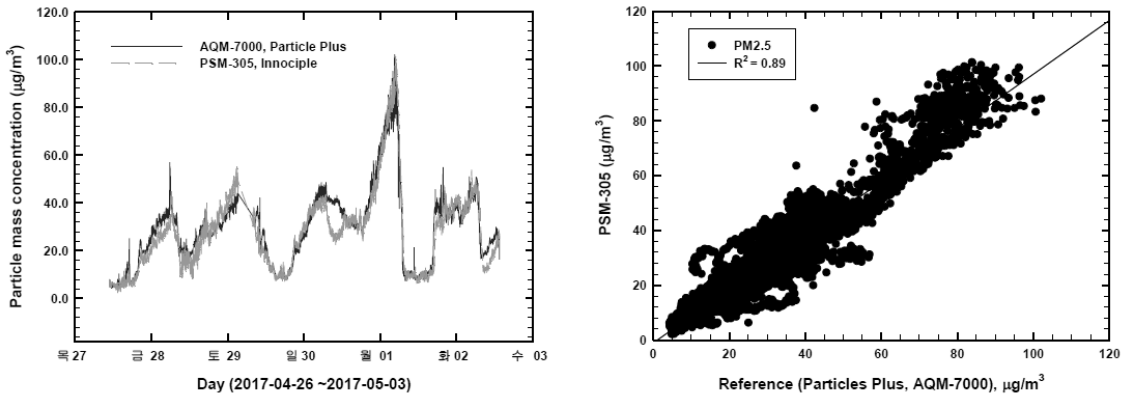


그림 17. (주)이노서플 PSM-305의 농도변화 및 상관관계 분석

### 3. 맺음말

이상에서 본 바와 같이 보급형 미세 먼지 센서의 종류는 크게 2가지 형식으로 되어 있다. 광원으로 IRED 방식과 레이저 다이오드를 적용한 방식으로 나눌 수 있다. 과거 2년전 만해도 대부분 IRED 방식의 센서가 주를 이루었지만 최근에는 단일 입자 계수 방식의 센서가 도입이 되고 있다. 2절에서 언급했던 IRED 방식의 센서는 매우 저렴한 가격이 가장 큰 장점이다. 반면 일반 환경과 같은 저 농도에서는 그 성능을 확보하기는 어려운 측정 원리를 가지고 있으며 연구 결과에서도 증명되고 있다. 그러나 작업 환경 등 고농도에 노출되어 있는 곳에서는 그 용도가 충분히 가치 있을 것이라고 생각된다. 광원으로 레이저 다이오드를 사용하는 단일 입자 계수 방식은 많은 장점들을 보여주고 있다. 동일 센서간의 상관관계가 매우 우수하여 제품간의 측정 오차를 줄여 공간 상 또는 전체적인 오염 농도에 대한 측정 신뢰성을 확보할 수 있다. 또한 측정 한역시 매우 낮아 일반 환경에서도 충분히 활용 가치가 높을 것으로 보인다. 다만 어느 일정 농도 이상에서 과측정되는 현상에 대해 기술적으로 극복할 수 있다면 보급형 센서로서의 파급력이 매우

클 것으로 생각된다. 또한 IRED 방식에 비해 다소 높은 가격을 형성하고 있어 향후 가격 경쟁력을 확보하는 관점도 중요할 것이라 생각된다. 현재까지 이러한 보급형 센서의 정량적 평가에 대한 기술적 검토가 이루어지지 않아 평가에 따라 다소 다른 결과가 도출되기도 한다. 다행스럽게도 국내 및 미국에서 보급형 센서의 평가에 대한 기준을 정립하고자 하는 연구가 수행되고 있다는 점에서 향후 제조사들의 통일화된 데이터가 확보될 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 기본 성능 데이터를 통해 사용자가 어느 목적으로 활용하느냐에 따라 센서 방식을 선택하고 제품을 선택할 수 있을 것이다. 외부 환경 및 측정의 목적에 따라, 적절한 센서의 선택이 무엇보다 중요할 것으로 생각된다. 향후 다양한 보급형 미세 먼지 센서를 이용하여 공기 중 미세 먼지의 농도 모니터링을 강화하면 시시각각 변하는 환경에 대응하여 효율적으로 관리할 수 있을 것으로 판단된다.

#### - 참고문헌 -

1. Yang Wang, Jiayu Li, He Jing, Qiang Zhang, Jingkun Jiang and Pratim Biswas, 2015, "Laboratory evaluation and calibration of three

- low-cost particle sensors for particulate matter measurement", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 49, pp. 1063-1077.
2. Sinan Sousan, Kirsten Koehler, Geb Thomas, Jae Hong Park, Michael Hillman, Andrew Halterman & Thomas M. Peters, 2016, "Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 50, No., 5, pp.462-473.
  3. K.E. Kelly, J.Whitaker, A.Petty, C. Widmer, A.Dybwad, D. Sleeth, R. MArtin, A.Butterfield, 2017, "Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor", *Environmental Pollution*, Vol. 221, pp.491-500.
  4. D.M. Holstius, A.Pillariseti, K.R.Smith and E.Seto, 2015, "Field calibrations of a low-cost aerosol sensors at a reguratory monitoring site in Califorina", *Atmos.Meas.Tech. Discuss.*, Vol.7, pp.605-632.
  5. Aakash C. Rai, Prashant Kumar, Francesco Pilla, Andreas N. Skouloudis, Silvana Di Sabatino, Carlo Ratti, Ansar Yasar, David Rickerby, 2017, "End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring", *Science of the Total Environment*, Vol. 607-608, pp. 691-705.
  6. Samuel Jones, T.Renee Anthony, Sinan Sousan, Ralph Altmaier, Jaehong Park and Thomas M., Peters, 2016, "Evaluation of a low-cost aerosol sensors to access dust concentration in a swine building", *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 60, No.5, pp. 597-607.
  7. Karoline K. Johnson, Michael H. Bergin, Armistead G. Russell, Gayle S.W. Hagler, 2016, "Using low cost sensors to measue ambient particulate matter concentrations and on-road emission factors", *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, Vol. 10, pp. 5194.
  8. Andrea Polidori, Vasileios Papapostolou, Hang Zhang, 2016, *Laboratory Evaluation of Low-Cost Ait Quality Sensors: AQ-SPEC.*
  9. Ron Williams, Amanda Kaufman, Tim Hanley, Joann Rice, Sam Garvey, 2014, "Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors", EPA/600/R-14/464.