

부유분진 측정용 파티클 센서의 기술과 응용사례

부유분진 측정 센서의 지식 및 역할에 대한 이해를 돕기 위해 당사에서 개발된 파티클 센서를 예시로 하여 분진 측정 센서에 대한 전반적인 원리와 센서 응용 및 적용 방향을 제시하고자 한다.

권 병 국

서론

건물의 에너지 절약화와 첨단화가 진행됨에 따라 밀폐되어 있는 실내공간의 환경은 점점 악화되는 현상을 나타내고 있다. 그러므로 하루 활동시간의 80% 이상을 실내 공간에서 거주하는 현대인들에게는 쾌적하고 위생적인 실내 환경 조성이 절실히 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위한 방법으로 실내 환경에 대한 일반적인 공기조화 요소인 온도, 습도, 기류, 복사열의 열환경 제어와 더불어 다양한 호흡기 질환을 유발하는 실내 공기 오염도 제어 대상이 되고 있다. 실내공기환경 분석에 의하면 실내 공기에 포함된 먼지중 입자의 크기가 비교적 큰 것들은 시간이 지나면서 실내 바닥으로 침강을 하지만 담배연기와 같이 입자 크기가 1.0 μm 이하의 경우는 침강하지 않고 공기 중에 떠다니는 부유 분진으로 존재하게 된다. 최근 들어 이러한 부유분진 오염과 인체 건강에 대한 피해 관련 연구가 활발히 진행됨에 따라 미국 및 유럽 선진 각국에서는 실내 환경의 기준을 PM10(입경 10 μm) 대기 기준에서 인체에 더욱 밀접한 영향을 미치는 분진들이 분포되어 있는 PM2.5(입경 2.5 μm)로 기준을 강화하여 오염기준을 재평가하고 있다. 따라서 오염 분진이 제어된 청정 공기는 실내 생활환경 관리에 대한 필수 조건이 되고 있다. 또한, 분진 제어 기술은 산업기술의 첨단화와 생산성 향상에 대한 해결책의 일환으로 관심이 급격히 증가되고 있다. 입경이 0.18 μm 이하의 입자를 제어하는 반도체 산업, 세라믹 등과 같은 신소재 개발 및 제조 분야를 비롯하여 병원, 제약

관련 산업 등 무균 환경을 유지하는 산업에서도 초정정 공간의 오염제어가 필요하다. 이와 같이 다양한 산업분야의 분진제어는 일반적으로 넓은 지역의 청정도를 제어하는 클린룸 시스템과, 좁은 범위를 제어하는 국소 청정 방식을 사용하고 있다. 그러나 모든 생산 장비 및 시설에는 분진 발생에 대한 위험 가능성이 내재되어 있으며, 돌발적인 분진 오염에 대한 피해는 재정적으로 막대한 손해를 입히게 될 수 있다. 그러므로 대기환경 및 산업현장 분야에서 분진에 대한 정확한 제어를 위한 분진 측정 기술은 매우 중요한 핵심 기술이다.

본 지면에서는 부유분진 측정 센서의 지식 및 역할에 대한 이해를 돕기 위해 당사에서 개발된 파티클 센서를 예시로 들어 센서에 대한 전반적인 개요와 정밀 산업 및 실내 공기질(indoor air quality : IAQ) 센서 응용에 대한 적용 방향을 제시하고자 한다.

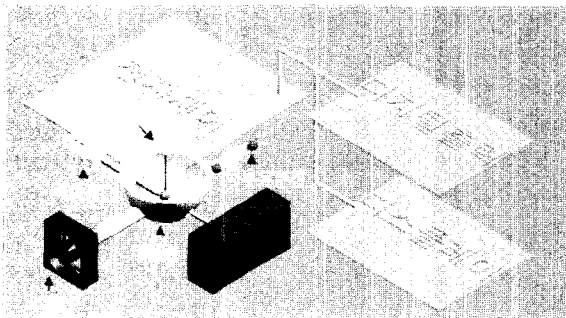
파티클 센서

당사에서 개발된 파티클 센서는 측방광산란 방식을 이용하여 분진에 의해 산란된 광량을 검출, 분석함으로써 분진입자의 개수와 크기 분포를 측정한다. 이 같은 광산란 측정방식은 입자의 크기를 이론적으로 계산할 수 있고, 측정 방법이 비교적 간편하여 일반적인 파티클 측정센서의 분진 측정 방법으로 사용되고 있다. 본 센서의 구성은 그림 1과 같이 광원, 광학계, 검출계 및 팬으로 구성되어 있다. 광원은 크기가 작고, 가격이 저렴한 이점이 있는 반도체 레이저를 사용하였다. 반도체 레이저는 견고하고 낮은 전압과 적은 전류에서 동작하며, 수명이 길다는 뛰어난 장점을 가지

권 병 국 (주)신성이엔지 기술연구소 (kweonbk@shinsung.co.kr)

고 있다. 이 때문에 소형센서에 사용하기가 적합하다. 광학계는 타원반사경으로 구성되어있다. 타원반사경은 흡입된 분진에 의해 발생된 레이저 산란광을 효과적으로 집광하여 포토트랜지스터(phototransistor)로 보낼 수 있도록 개발하였다. 검출계는 포토트랜지스터에 의해 측정된 정보를 분석하는 역할을 하며, 전자제어부, 디지털 출력부 및 디스플레이부로 구성되어있다. 광산란 측정 방식은 측정입경과 비례하여 산란광량이 발생하므로 입경이 작아질수록 검출되는 신호대 잡음비(S/N)도 작아져서 신호처리가 매우 어렵다. 그러므로 입경이 적은 입자의 산란광을 검출하기 위한 검출장치로 APD(avalanche photo diode), 광증배관(photo multiplicier) 등이 사용되고 있지만, 본 제품의 검출기는 검출회로 응용이 편리하고 가격이 저렴한 포토트랜지스터를 사용하였다. 포토트랜지스터는 들어오는 광량에 비례하여 전류가 발생하게 되므로 포토트랜지스터에서 발생된 전류를 전압으로 변환, 증폭시킴으로써 분진의 개수와 크기를 분석할 수 있다.

본 센서의 분진입자 분석을 위한 검출회로는 차동증폭방식을 사용하였다. 이 회로의 특징은 산란광에 의해 측정된 전압과 기준전압을 비교하여 두 입력 신호의 차이를 증폭하므로 양 입력단자에 공통으로 입력된 노이즈(noise) 신호 성분을 효과적으로 제거할 수 있다. 검출회로에 의해 출력된 전압 신호들은 디지털부 및 디스플레이부에 의해 디지털(digital) 신호와 아날로그(analog) 신호 2종류로 변환되므로 필요한 장비 및 장치에 선택적으로 사용할 수 있도록 되어있



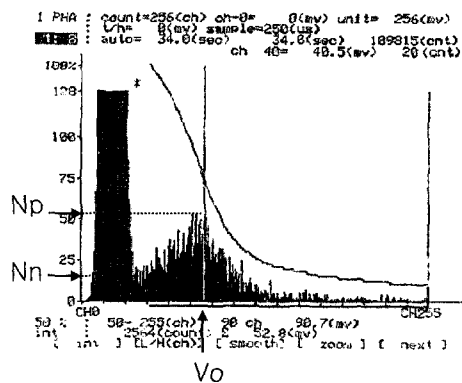
[그림 1] 파티클 센서 구성도

다. 센서에 내장되어 있는 팬은 센서의 외부 흡입공기를 일정한 유량로 유지시켜주고, 분진 입자를 센서 밖으로 배출함으로써 센서 광학계에 대한 오염 방지 역할을 한다.

일반적으로 파티클 센서 성능에 영향을 주는 인자들은 다음과 같다. 1) 입자 굴절율의 불확실 2) 입자 모양의 불규칙 3) 산란량의 불균일 분포 4) 전자회로 노이즈 등이다. 위와 같은 원인으로 입경이 같은 크기의 입자일지라도 센서의 출력 펄스는 정확히 일치하지 않는다. 이와 같은 오차를 센서의 측정입경 정확도라 한다. 이 밖에도 센서의 성능을 평가하는 항목으로는 계수 효율, 최소측정입경 등이 있다. 계수 효율이란 측정하는 공기 샘플 안에 포함되어 있는 실제 입자수와 센서가 검출한 입자수의 비를 의미하는 것이다. 그러나 샘플 공기 안에 포함된 분진 개수를 측정하기가 불가능하므로 센서의 계수 효율을 정확히 계산할 수 없다. 일반적인 계수효율 측정 방법은 측정 대상이 되는 파티클 카운터의 최소측정입경보다 적은 최소측정입경을 갖는 파티클 카운터를 기준으로 하여 상대비교한다. 파티클 센서의 최소 측정 입경은 비교 측정 계수 효율이 30 ~ 50 %인 입경을 의미한다.

그림 2는 당사 개발 제품인 파티클 센서의 입경 응답전압 측정 결과로써 표준 입자인 폴리스티렌 라텍스(poly styrene latex ; PSL)를 청정수에 희석시켜

$$10 < \frac{Nn}{Np} \times 100 \leq 50 (\%) \quad (1)$$



[그림 2] 0.4 μm 표준분진 입자 측정 결과

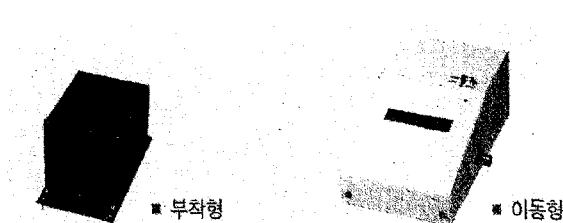
분진 발생장치에 의해 발생시킨 후 센서에 의해 검출한 데이터이다. 그림 2의 x축은 분진 입径의 크기를 의미하며 단위는 "voltage"이고, y축은 측정입경 개수를 의미하며 단위는 "개"이다. 그림 2의 좌측 위쪽에 있는 "*" 이하의 "voltage"값은 배경노이즈(background noise)를 의미하며, 우측의 가우시안 모양의 모드는 센서의 분진입경 측정의 분포도를 나타내고 있다. "한국 공업규격 광산란식 자동 입자 계수기 규정(KS B 6336 -1992)"에 의하면 그림 2에 나타난 Np 와 Nn 값이 식(1)을 만족하는 경우 가우시안 모드(Vo)는 응답전압을 의미한다. 그러므로 본 센서의 0.4 μ m 입경의 응답전압은 90.7 mV 이다.

당사에서 개발된 파티클 센서의 특징은 소형으로 휴대하기 편리하고, 원하는 곳에 설치하기가 용이하다. 또한, 실시간으로 분진을 측정하며, 컴퓨터와 인터페이스에 의해 자료를 저장 또는 응용할 수 있다. 당사의 파티클 센서는 성능 및 모델 다양화로 그림 3과 같이 부착형과 이동형으로 개발되고 있다. 부착형 센서는 클린룸과 같은 초청정지역 지하상가나 지하철역사 등에 청정 감시 시스템을 구성하여 연속적인 측정으로 청정도 유지를 관리할 수 있다. 이동형 파티클 센서는 휴대용으로 특정지역의 청정도 측정기능뿐만 아니라, PM2.5 센서의 기능도 포함하도록 개선하면 실내공기질 측정 센서로 사용이 가능하다.

파티클 센서 적용사례

청정도 모니터링 시스템

반도체 생산에 있어서 클린룸의 중요성이 증대되고,



[그림 3] 파티클센서 제품 종류

병원, 식품 등 공기중의 분진에 부착되어 있는 박테리아나 바이러스 같은 미생물의 환경오염 문제가 날로 심각해지고 있다. 그러므로 공장 내부와 작업 공간내의 부유분진 제어가 생산 수율 및 2차 감염의 중요한 요인으로 부각되면서 다양한 방법의 환경관리 기술이 개발되고 있다. 부유분진 제어를 위한 청정도 측정 방법의 개발 로드맵인 표 1에 의하면 측정 기술은 크게 3 가지로 분류 할 수 있다.

- 1) 필터(filter), β -ray 등을 사용하여 입자의 질량을 측정하므로 정확도를 향상시키는 방법.
- 2) DMA(differential mobility analyzer), AE(aerosol, electrometer) 등과 같이 전기적 특성을 측정하여 분해능의 효과를 높이는 방법.
- 3) 응축핵 계수기(condensation particle counter), 광학입자 계수기(optical particle counter) 등과 같이 광학적인 특성을 이용한 단일 입자를 연속적으로 측정하는 방법이 있다. 현재 사용되고 있는 부유입자 측정 장비들은 구조가 복잡하거나 장비 특성상의 문제로 청정관리 구역의 지속적인 측정이 불가능함으로 정기적인 측정방법을 적용하여 청정도를 측정하고 있다. 그러나 당사의 파티클 센서는 정확하고 편리한 청정도 관리를 위하여 그림 4와 같은 중앙모니터링 시스템을 구성하여 청정구역의 청정도를 지속적으로 관리 하므로, 청정도의 신뢰를 증가시킬 뿐만 아니라 번거로운 측정 절차에 의한 분진 오염을 예방 할 수 있으며, 예기치 않은 돌발 상황에 즉각적인 대처가 가능하도록 개발되었다.

<표 1> 파티클 측정 장비 technical roadmap

	1950	1960	1980	1990	2010	
Scattering Measurement	Halogen Lamp	Solid Laser	Gas Laser	Semiconductor Laser		소형화 연속측정
Electric Mobility Measurement	Impactor Electric Current		SMP Spectrometer		DMA Electric Current	고분해능
Mass Measurement	Filter weight	Beta-ray Attenuation		PMS Technique		정확도향상
측정방법	Particle Size (μ m)					개발 목적

실내공기질 측정 환경 센서

최근 대중매체의 보도에 의하면 전철역사와 같은 지하공간에서 뿐만이 아니라 산후조리원에서 실내의 유해분진이 발생하여 신생아에게 해를 입히는 등 실내 공기질의 관리는 심각한 사회문제로 야기되고 있다. 조선일보의 2001년 환경 특집 기사에 의하면 서울, 부산, 대구, 인천의 지하철 실내공기 오염은 매우 심각하여 이산화탄소(CO₂)와 함께 주요 오염원으로 꼽히는 미세먼지의 경우, 서울 지하철의 평균 농도가 일본 도쿄 지하철에 비해 노선에 따라 최고 50% 이상 높은 것으로 나타났다. 그림 5와 같이 공기중에 포함되어 있는 다양한 미세분진은 대부분 호흡기관에 의해 분리되지 않고 통과함으로 건강한 성인도 위험에 노출되고 있는 것으로 조사되어졌다. 미국 환경부(EPA)는 PM2.5(입경 2.5 μm) 이하의 오염 입자를 신체에 위험한 크기로 분류하고 입자가 기도에서 확산되는 과정을 규명하였으며, 다양한 연구 보고서에 의해 공기중 미세분진이 인체에 악영향을 주는 역학적 증거들을 제시하고 있다. 그 예로는 심장 근육에 도달하는 산소의 부족, 허파내의 발열이 이와 같은 결과라고 설명하고 있다. 현재 우리나라의 실내공기질 관리는 환경부에 의해 지하공간의 공기질 기준을 PM10(입경 10 μm) 평균치로 적용하고 있으나, 선진국 기준과 같이 인체에 밀접한 피해를 주는 입자들을 효율적으로 규제하기 위해 PM2.5(입경 2.5 μm)를 제어대상으로 재규정하기 위한 노력이 진행되고 있다.

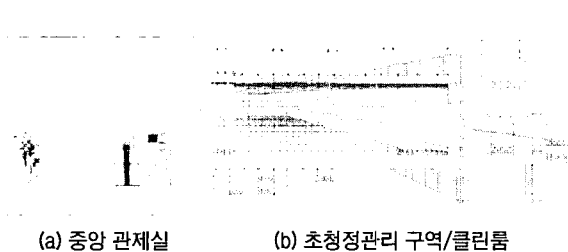
당사에서 개발된 파티클 센서는 PM2.5(입경 2.5 μm) 적용 센서로서 전환이 가능하다. 그러므로 실내

공기질의 쾌적화를 위해 분진의 정확한 측정 분석으로 공기조화장비의 최적 운전 조건을 확보하여 장비의 성능을 극대화 시킬 수 있고, 합리적인 운전제어에 의한 에너지 절약과 장비의 인공지능제어를 위한 기반을 제공할 수 있다.

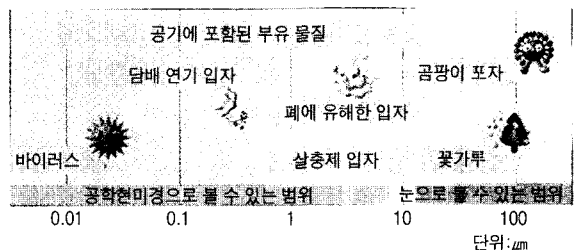
결론

공기중 부유 입자를 정확히 측정하고 제어하는 기술은 산업적 측면이나, 생활 환경측면에서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 그러므로 당사에서는 파티클 센서의 국내 제작 기술과 측정 기술을 확보함으로써 파티클 센서 국산화 기술의 기반을 구축하였다. 당사에서 개발된 파티클 센서의 부유분진 측정 최소 입경은 0.3 μm 이다. 이와 같은 분진 측정 성능은 “KS B 6741-1995”의 한국산업표준협회의 기준으로 “청정도 1 등급”을 측정 할 수 있는 센서 성능이다. 본 센서의 적용 분야는 광파이버 산업, 반도체 산업 등과 같은 초청정 산업 분야와 수술실, 신생아실, 무균 실험실과 같은 생물학적 청정도를 유지해야 하는 청정구역의 감시 시스템으로 적용이 가능하므로 제품생산의 수율 증가와 생산성 절감에 기여할 수 있다.

당사는 실내공기질 측정에 적합한 데이터 출력을 위해 “개수/lpm”에 대한 출력 방식을 “mg/m³” 출력 방식으로 개선하고, 임팩터(impactor)를 개발하여 실내공기질 규격 PM2.5(입경 2.5 μm)에 적용할 수 있는 센서가 생산 단계에 있다. 그러므로 당사는 본 센서를 이용하여 빌딩 공조 청정시스템, 지하상가/지하철역 청정시스템, 향온향습기, 룸 에어컨 등에 부착하



[그림 4] 클린룸 모니터링 시스템



[그림 5] 인체 유해 분진 분포

여 공조장비의 최적 환경조성을 위한 자동제어 분야에 응용할 계획이다. 또한 최소측정입경이 0.1 μm 이하의 부유분진을 측정 할 수 있는 파티클 센서를 개발하여 최첨단 공정인 반도체 메모리 분야 등에 적용하기 위한 청정도 측정 시스템 개발에 노력하고 있다.

참고문헌

1. "광산란식 자동 입자 계수기", B 6336, 1992.
2. Parker C. Reist, "Aerosol Science and Technology", Second Edition.
3. Jan Carsten Hansen, 1999, "Size Distributions out of Static Light Scattering".
4. A. V. Zvyagin and K. Goto, 1998, "Mie scattering of evanescent waves by a dielectric sphere".
5. J. D. Pendleton, 1982, "Mie scattering into solid angles", J. Opt. Soc. Am 71, 1029-1033.
6. 한국기계연구소, 1989, "초청정용 입자크기 분포 분석장치 개발".
7. S. Masuda and K., Takahashi, 1996, "Aerosols".
8. Shigeo Hayashi, 1999, "Finite Angular Resolution Mie Scattering Measurements of Sono-luminescing Bubbles" J. Appl. Phys. Vol.38 6562-6563.
9. G. Mie Ann, 1908, Phys. 25, 377.
10. S. Chang. and S. S. Lee, 1997, Opt. Commun. 151, 286. 