

클린룸용 미세입자계측기 기술동향

○ 김태성 | 성균관대 기계공학부
교수
E-Mail : tkim@skku.edu

강상우 | 한국표준과학연구원, 과학기술연합대학원 대학교
교수
E-Mail : swkang@kriss.re.kr

1. 서론

기체 중 부유하는 고체 또는 액체 성분의 미세 입자로 정의되는 에어로졸은 다양한 분야에서 그 중요성이 높아지는 추세이다. 대기오염에 의한 환경문제가 대두되는 현 상황에서 세계보건기구(WHO)는 2013년 초미세 먼지(PM2.5)를 1급 발암 물질로 지정한 바 있으며 우리나라에서도 초미세 먼지의 규제를 환경정책기본법으로서 시행하고 있다. 스마트폰의 대중화로서 촉발된 미세 반도체 공정과 초고해상도 디스플레이 개발 경쟁 또한 현재는 상용화 제품 기준으로 최소 10 nm 에 이르는 회로 집적도와 1,000 pixel per inch (PPI) 를 넘어서는 디스플레이 해상도의 개발에 미치게 됨에 따라 고집적도 회로 내 입자 오염에서 비롯된 생산 수율 저감을 극복하기 위해 미세 입자 분석이 필수적인 실정이다. Journal of aerosol science 와 Aerosol science and technology 등을 비롯한 다수의 저널에서는 각 나라별 대기환경 상태와 향후 전망, 그리고 반도체 등의 디바이스 개발 및 제조 분야에서의 입자영향성 평가 등 많은 연구결과가 보고되고 있다. 이렇듯 미세 입자는 우리 생활 속에서 밀접한 영향을 끼치는데 관련 분야에서 미세

입자 제어를 위해서는 다양한 미세입자 특성이 요구된다. 대기 환경 분야에서 입자의 부유 농도와 성분이 환경과 인체에 미치는 영향과 큰 연관성이 있음이 보고된 바 있으며 반도체, 디스플레이와 배터리 등의 물리화학 제조업 분야에서는 입자의 성분과 크기별 분포 특성이 제품 수율 뿐만 아니라 성능 개선에도 활용 가능성이 알려져 있다. 현재 시장에서는 다양한 방법으로 입자의 크기, 수농도 및 성분 등을 분석할 수 있는 미세입자 계측기가 개발되고 있다. 본 고에서는 과거부터 지금까지 개발된 다양한 반도체용 미세입자 계측기와 관련 기술동향을 소개하고자 한다.

2. 미세입자 계측기

2.1 미세입자 계측기 개발

1970년대부터 이어진 대기 오염도의 분석과 에어로졸에 관련된 연구를 통해 다양한 계측 방법을 활용하는 입자 측정장치가 개발 되었다. 초기의 미세 입자 측정은 포집법을 이용한 장치로서, 측정

공간을 펌프 등을 이용하여 음압 상태로 만들고, 미세 입자가 지나가는 경로에 필터 등의 여과지를 배치하여 입자를 일정 시간 동안 포집한 후 필터의 무게 변화 또는 포집된 필터에 조사된 β 선의 흡수량을 확인하는 방식으로 이루어졌다. 위와 같은 포집법은 실시간 측정이 어려워 급격한 환경 변화에 적용하기 어렵고, 측정 압력 조건 또한 대체적으로 대기압에 국한되는 단점이 있으나 질량 농도 측정의 정확성을 바탕으로 PM10 미세 입자의 실내 공기질 공정 시험 기준으로 활용되고 있다. 포집법을 이용한 미세 입자 계측 장치는 이 후 입자 포집 경로를 변경 하는 등 개선을 통해 필터 또는 접착 미디어에 입자를 단계적으로 포집하는 다단 임팩터와 유체 원심력을 활용하는 사이클론 기술을 응용, 접목하게 되었다. 포집법이 갖는 한계인 실시간 측정이 가능하도록 광학 및 전기력을 응용하는 미세 입자 측정장치 또한 개발이 이루어졌다.

광학을 응용하는 미세 입자 측정방법은 광 산란법 또는 광 소멸법을 응용하여 입자를 측정하게 되는데, 측정 공간을 관통하는 입사광에 의해 산란되거나 또는 일부 소멸되고 남은 광을 포토 디텍터나 photomultiplier tube (PMT) 등의 장치를 이용해

전기적 신호로 변환, 입자의 크기 및 개수 농도를 측정한다. Optical particle counter (OPC) 그리고 in-situ particle monitor (ISPM) 등의 다양한 광학 기반의 계측기는 실시간 측정이 가능하고 대기압에서부터 진공까지 넓은 압력대에서 입자 측정 결과를 제공할 수 있어 반도체 공정 설비 내 입자의 측정에 응용 가능하다. 또한 광 산란 방식의 특성으로부터 대기 중 입자를 손쉽게 측정할 수 있는 휴대용 미세 입자 측정 장치 개발에도 응용 가능하다. 하지만 0.2 μm 미만의 입자 측정이 어렵고 측정 공간 내 환경적 요인에 의해 측정 정확도가 떨어지는 단점이 존재한다. 이러한 문제를 일부 극복하고자 미세 입자 표면에 부탄올이나 물 등을 응축시킨 후 해당 응축핵을 광 산란방식으로 측정하는 condensation nucleus counter (CNC) 또는 condensation particle counter (CPC)로 불리는 응축액 계수기가 개발되었다. CPC 는 differential mobility analyzer (DMA)라 불리는 전기력을 응용하는 미세 입자 분류장치와 결합하여 상업적으로 scanning mobility particle sizer (SMPS)라 칭해진다. DMA는 내부의 전기장과 가압을 통한 유동에 의해 하전시킨 미세 입자를 특정 크기별로 배출하도록 해 입자를 분류한다. 이 후 분류된 입자를 CPC 를 통해 계수함으로써 SMPS 가 동작하게 된다. SMPS는 실시간 측정이 가능하고 넓은 범위에서의 입자 수농도 분포를 확인할 수 있는 장점이 있으나 느린 측정속도에 더해 일부 개선에도 불구하고 10-1 Torr 미만의 압력대에 존재하는 희박환경에서의 미세 입자 측정이 어려운 단점이 있다. 1995년 미네소타 대학에서 개발된 particle beam mass spectrometer (PBMS) 는 전기적 방법을 응용하여 진공 내에 존재하는 미세 입자의 크기분포를 실시간으로 측정하기 위한 장비이다.¹⁾ 차압을 통해 진공 공간 내 에어로졸을 포집하고 유체역학적으로 분류된 입자를 하전시켜 내부의 전기장에서 분류한 후 하전입자의 전류를 측정하여 입자 수농도 분포를 구한다. PBMS는 기존 ISPM 보다 더 작은 입자 측

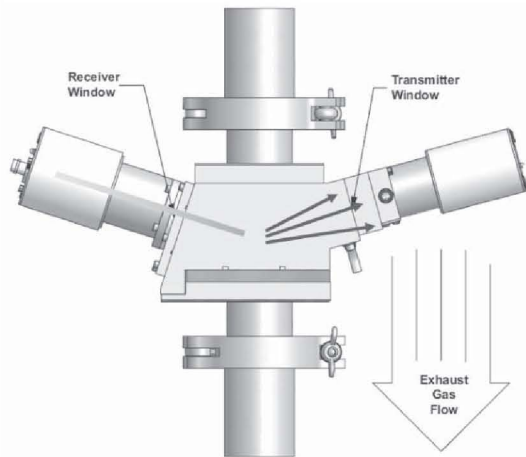


그림 1. INFICON Stiletto® 광 산란 입자 측정장치

정이 가능하나 전체적으로 큰 장치 크기로 인해 휴대성과 적용성이 떨어지며, 입자의 성분 측정이 어려워 다양한 종류의 입자가 산재하는 반도체 제조 환경에 적용하기 어려운 단점이 있다. 이 외에 반도체 제조 공정에서 웨이퍼 표면에 내려앉아 고착된 오염된 입자를 측정하기 위해 개발된 표면 부착 입자 계측기 (wafer surface scanner) 가 개발되어 널리 사용되고 있다. 표면 부착 입자 계측기는 웨이퍼 표면과 웨이퍼 상의 오염 입자에 레이저를 조사하여 광 산란법 입자 측정장치와 유사한 방법으로 입자를 측정하며 최소 0.05 μm 크기의 입자 측정이 가능하도록 개발이 이루어지고 있다.²⁾

2.2 광학 기반 실시간 입자 측정장치 (ISPM)

광학 기반의 입자 측정장치는 발광부로부터 측정공간 그리고 디텍터로 이어지는 간결한 구조에 의해 소형화가 용이하여 휴대성이 높은 계측기 개발이 가능하다. 이를 통해 휴대용 미세 입자 계측기 및 OPC, 표면 부착 입자 계측기, 그리고 ISPM에 이르기까지 다양한 계측기의 원리로 이용된다.

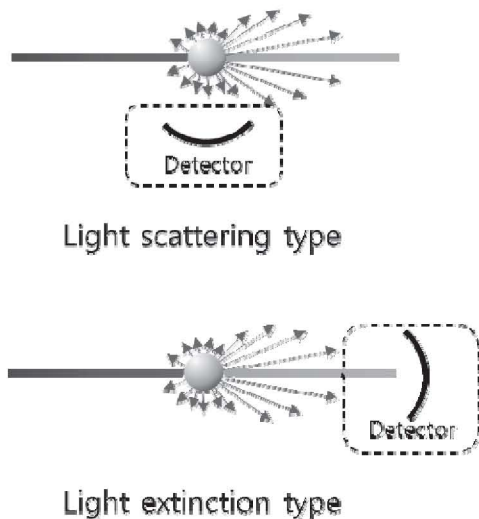


그림 2. 광 산란 및 광 소멸 입자 측정 광도

이 중 진공공간에 부유하는 희박한 미세 입자를 측정하기 위해 개발된 ISPM은 Rayleigh 및 Mie 이론을 기반으로 한 입자 표면 광 산란 및 소멸 현상을 원리로 입자의 크기 및 수농도 특성 분석이 가능케 한다.³⁾ 광 산란법을 응용한 미세 입자 계측기는 입자 표면에서 산란된 빛을 광도의 측면에서 광 검출기를 통해 측정하는 방식으로서 최소 0.2 μm 에 이르는 입자를 높은 효율로 측정 가능하다.

여기에 사용되는 광 검출기는 대표적으로 photodetector 와 PMT가 있으며 photodetector의 경우 넓은 범위의 광 강도를 수렴할 수 있으나 낮은 광 분해능을 갖는 단점이 있다. PMT는 이와 반대로 높은 광 분해능을 가지나 photodetector 대비 낮은 광 강도에서 포화 현상이 일어나는 단점이 있다. 입자 표면에서 산란된 광은 강도가 매우 낮기에 photodetector 대비 높은 광 분해능을 갖는 PMT를 활용 가능하다. 하지만 낮은 광 강도를 갖는 산란 광 특성에 의해 측정공간을 구획하는 window 오염과 측정공간 배관 직경의 증가가 계측 강도에 영향을 미치게 되며 사용성이 저하된다. 이를 극복하기 위해 광 소멸법을 응용하여 개발된 ISPM의 경우 넓은 배관에 적용이 가능하나 높은 측정 광 강도로 인해 포화현상이 발생하는 PMT 사용이 제한된다.

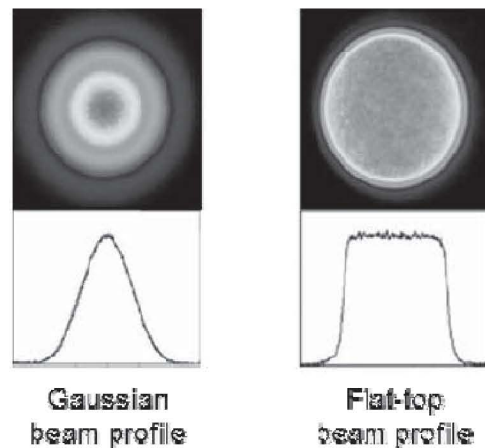


그림 3. Gaussian 및 Flat-top 분포 광원

또한 배관 내 전체 면적의 약 1~2% 정도만이 검출부로 활용되는 집속광을 이용하기에 층류유동 등에 의한 입자 불균일 분포가 발생할 시 측정 정확도가 낮아지는 단점이 존재한다.

이에 더하여 현재 상용화 된 ISPM은 Gaussian 분포를 갖는 광원에 의해 광 단면 중심과 주변의 측정 광 강도가 달라져 측정 크기의 부정확도와 측정 효율 저감 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상을 해결하기 위해 광 소멸방식에 등강도의 광원을 갖는 Flat-top ISPM 을 개발함과 함께 실제 공정에서의 평가가 진행되고 있다.

2.3 실시간 입자 복합특성 분석 장치

PBMS는 공기역학적 흐름을 통해 입자를 배경 기체와 분리, 집속하여 측정부 중앙을 지나는 입자빔을 생성하는 입자 집속 렌즈를 포함한다. 입자 집속 렌즈는 여러 개의 판형 오리피스스를 포함하고 있으며 각각의 오리피스스를 통과함에 따라 입자는 점진적으로 집속된다.⁴⁾ 이 후 집속된 입자빔은 내부에 위치한 전자총에 의해 하전된 후 deflector 라 불리는 편향판을 지나게 된다.

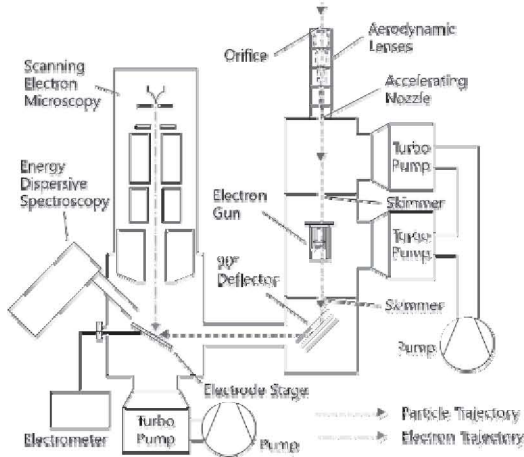


그림 4. 실시간 입자 복합특성 분석장치 구조도

편향판은 3장의 금속망이 평행하게 배치되어 있으며 내부의 전기장에 의해 하전된 입자 경로를 90° 굴절시킨다. 굴절되는 입자 크기는 편향판 내 전기장 세기에 따라 달라지므로 입자를 크기별로 분류시킬 수 있다. 최종적으로 입자의 하전량으로부터 비롯된 전류를 측정하여 최종적으로 전체 공정 특성 확인을 위한 시간별 입자 매개 전류 및 입자 크기별 수농도를 확인할 수 있다. PBMS 내부로의 입자 포집을 위해서는 측정하고자 하는 진공 챔버 내 압력과의 차압이 필요하여 1기 이상의 분자 펌프가 전체 구성에 포함된다. 이러한 구조는 일반적으로 미세 입자 형상 및 성분 분석에 널리 쓰이는 scanning electron microscope (SEM) 와 energy

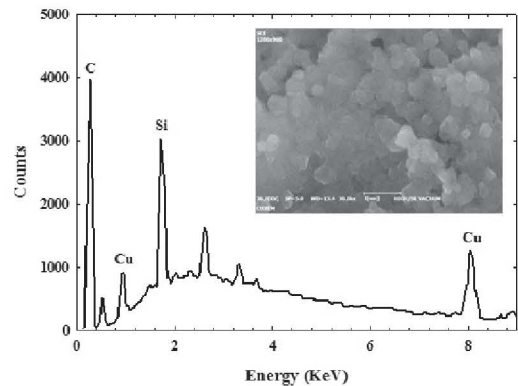
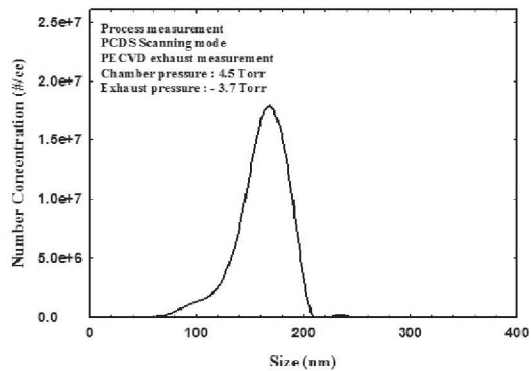


그림 5. PCDS를 이용한 SiN 증착공정에서의 입자 복합특성 측정

dispersive (X-ray) spectroscopy (EDS) 를 결합하는데 적합한 조건이 된다. Particle characteristics diagnosis system (PCDS) 라 명명된 실시간 입자 복합 특성 분석장치는 PBMS에 SEM과 EDS가 결합된 형태를 갖고 있으며, 실시간으로 입자 개수농도를 측정하고 입자 형상 및 성분을 함께 측정하고자 개발되었다. 개발된 PCDS 는 SMPS를 이용한 교정 평가 결과를 바탕으로 현재 다양한 반도체·디스플레이 제조 공정 내 발생 입자 평가에 활용되어 신뢰성 향상을 진행하고 있다.⁵⁾

3. 결론

대기환경과 각종 제조회장에서 미세 입자의 영향이 커짐에 따라 미세 입자 분석을 위한 계측기 또한 발전되고 있다. 그러나 각 분야에서 미세 입자의 다양한 정보를 필요로 함에도 불구하고 여전히 계측기는 측정 영역이나 측정 가능한 결과에 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 부분적인 개선과 더불어 일부 한계를 가지는 계측기들을 결합하여 그 활용성을 높이는 시도 또한 지속적으로 이루어지고 있다. 개선된 계측기의 효용성을 평가하기 위해 실제 사용환경에서의 평가도 함께 진행중에 있다. 향후 미세 입자 계측기의 발전 및 개선을 위해서는 실 사용환경 평가 결과에서 드러난 장치 측정한계와 장치 크기 등의 물리적 적합성 등의 문제점을 해결할 수 있는 더욱 다양한

시도와 효용성 평가가 연속적으로 이루어져야 할 것이다.

- 참고문헌 -

1. Ziemann, P. J., Liu, P., Rao, N. P., Kittelson, D. B., & McMurry, P. H., 1995, Particle beam mass spectrometry of submicron particles charged to saturation in an electron beam, *J. Aerosol Sci*, 26(5), 745-756
2. Donovan, R.P., 2011, Off-Wafer Measurement of Contaminants, in *Contamination-Free Manufacturing for Semiconductors and Other Precision Products*, Marcel Dekker, Inc., 27-77.
3. Bohren, C. F., and Huffman, D. R., 1983, *Absorption and scattering of light by small particles*, New York: John Wiley and Sons
4. Wang, X., Kruis, F. E., and McMurry, P. H., 2005, Aerodynamic focusing of nanoparticles: I. Guidelines for designing aerodynamic lenses for nanoparticles, *Aerosol Sci. and Tech.*, 39, 611-623
5. Kim, D., Mun, J., Kim, H.-U, Yun, J.-Y., Kim, Y.-J., Kim, T.-W., Kim, T., & Kang, S.-W., 2016, Development of particle characteristics diagnosis system for nanoparticle analysis in vacuum. *Rev. Sci. Instrum*, 87, 023304