

진공공간 내 나노급 오염입자의 실시간 진단시스템 개발

<http://dx.doi.org/10.5757/vacmac.2.3.11>

강상우, 김태성

Development of real-time nanoscale contaminant particle characteristics diagnosis system in vacuum condition

Sang-Woo Kang and Taesung Kim

Particle characteristics diagnosis system (PCDS) was developed to measure submicron particle characteristics by modulation of particle beam mass spectrometry (PBMS) with scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS). It is possible to measure the particle size distribution in real-time, and the shape, composition can be measured in sequence keeping vacuum condition. Apparatus was calibrated by measuring the size classified NaCl particle which generated at atmospheric pressure. After the calibration, particles were sampled from the exhaust line of plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) process and measured. Result confirms that PCDS is capable for analyzing particles in vacuum condition.

1. 소개

스마트폰 시장의 급격한 성장에 힘입어 고성능 반도체 및 고화질 디스플레이의 수요 또한 급격히 증가하게 되었다. 이러한 수요에 힘입어 메모리 및 칩의 경우 20 nm 이내의 선 폭을 갖게 되고 디스플레이의 경우에는 기존보다

4배 향상된 ultra-high definition (UHD) 해상도에 이르는 상용 제품이 출시되는 등 제품의 집적도가 크게 향상되었다. 의도하지 않은 방향으로 공정에 유입되는 오염입자는 제품 불량률 유발하여 공정 수율에 영향을 미치게 되는데, 고성능 부품 수요에 의한 공정 집적도 향상은 나노급 오염입자가 수율에 끼치는 영향을 더 높이는 계기가 되었다 [1]. 1% 수율 하락은 2% 이상의 수익 손실을 가져오는 기존의 보고 [2]가 있었으며 이에 따라 오염입자의 영향, 발생원 및 최적의 제거방법을 모색하기 위해 입자 특성 분석이 여러 방향에서 시도되었다. 기존에 오염입자를 분석하기 위한 방법으로는 입자를 포집하여 별도의 분석 장치를 이용, 특성을 분석하는 비실시간 방법이 이용되었고, 대부분 transmission electron microscopy (TEM) 및 scanning electron microscopy (SEM) 등 전자현미경 기술을 이용해 분석되었다. 이러한 장비는 포집된 입자의 형상, 성분 및 결정성 등 다양한 정보를 정확히 측정할 수 있는 장점이 있지만, 별도의 웨이퍼 및 글라스를 이용하여 입자 포집을 하는데 드는 추가 비용 [3] 및 샘플 준비과정 중 발생하는 산화 문제(테이터 왜곡), 그리고 공정문제를 빠르게 대처해 수율 저감에 빠른 대응이 어렵다는 비실시간 장치로서의 단점을 갖고 있었다. Scanning mobility particle sizer (SMPS)로 명명된 입자의 직경별 수송도를 실시간으로 측정할 수 있는 장치가 개발되었

〈저자 약력〉

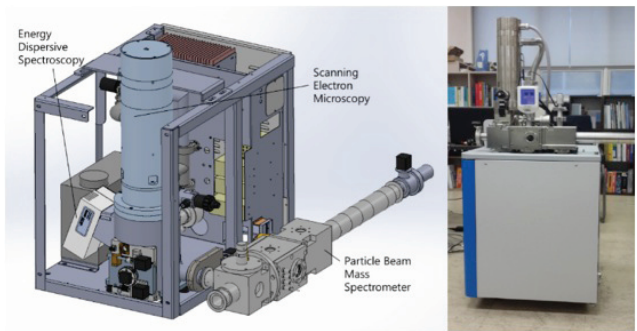
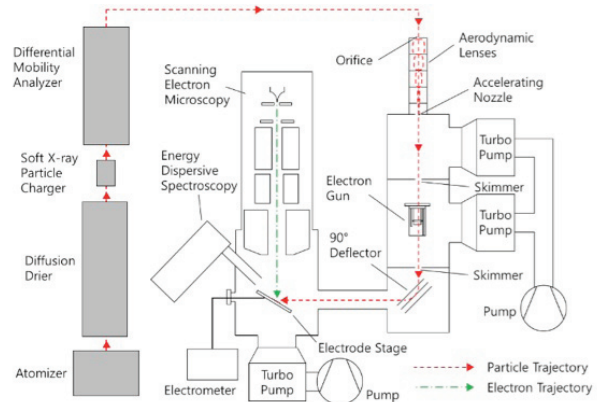
- 강상우 박사는 2004년 포항공과대학교에서 화학공학 박사학위를 받았으며 2006년에 삼성전자에서 한국표준과학연구원으로 이직하여 현재 책임연구원과 UST 차세대소재공학과 교수를 겸임하고 있다 (swkang@kriss.re.kr)
- 김태성 교수는 2002년 미국 미네소타대학에서 기계공학 박사학위를 받았으며, 같은 해부터 Seagate Technology에서 연구원으로 근무하다가 2005년에 성균관대학교 기계공학부 교수로 부임하여 재직 중이다. (tkim@skku.edu)

며 그 정확도를 통해 상용화 되었으나, 대기압에서만 사용이 가능한 제한조건으로 인해 반도체 및 디스플레이 산업의 진공공정에서 발생하는 오염입자를 실시간으로 진단하기에는 적합하지 않았으며, 사용 진공영역을 확장하기 위한 low pressure differential mobility analyzer (LPDMA) 를 비롯[4, 5, 6] 다양한 장비가 개발되었으나, 최저 10^{-1} Torr의 저진공 영역까지만 측정 가능한 개선이 이뤄지는 등 10^{-3} Torr에 이르는 진공공정 챔버 진공영역에 존재하는 입자를 실시간 측정하는데 어려움이 있었다. 1995년 미국 미네소타 대학에서 개발된 particle beam mass spectrometer (PBMS) 입자측정장치는 기존에 개발된 장치의 측정가능환경을 개선하여, 진공 내 존재하는 입자의 직경 및 수농도 분포, 즉 입경분포를 실시간으로 측정 가능하도록 개발되었다. 하지만 PBMS는 협소한 반도체 제조공정 장비 사이의 공간에 적용하기에는 기존 측정장치 대비 장치 크기가 크다는 점과 하전된 입자의 전류값을 통해 입자의 입경분포를 측정하기에, 유입되는 입자의 성분을 측정하거나 직접적인 유입입자 확인을 통한 측정장치 교정이 어려워 기존의 비 실시간 방법에 추가적으로 의존해야 하는 단점이 있다. 이에 표준과학연구원과 성균관대 연구팀은 기존의 PBMS 기술의 소형화와 함께, SEM 및 energy dispersive (X-ray) spectroscopy (EDS) 기술이 결합되어 오염입자의 입경분포, 성분 및 입자형상을 한 장치 내에서 실시간으로 측정이 가능한 particle characteristics diagnosis system (PCDS)라 불리는 나노급 오염입자 복합특성분석 시스템을 개발하였다. 본 글에서는 개발된 PCDS의 원리 및 분석방법, 그리고 실제 공정에서의 분석결과를 통해 진단시스템으로의 활용 가능성 및 진단 효율성을 보여드리고자 한다.

2. 나노입자 복합특성 분석장치 개발 및 원리

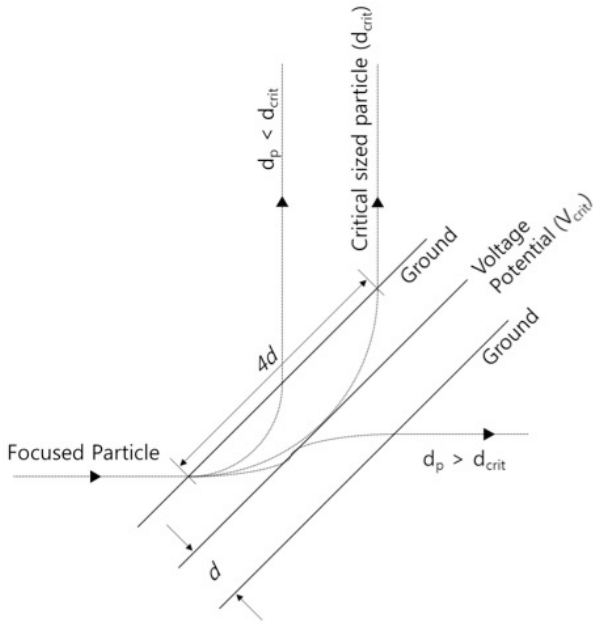
PCDS의 구조는 그림 1에 나타나 있으며, 입경분포 측정 모듈, 입자 형상 분석 모듈 및 입자 성분 분석 모듈 각각의 결합으로서 PBMS와 SEM 그리고 EDS 모듈들이 결합된 형태로 나타난다.

PBMS는 이름에서도 나타나 있듯이 공기역학적 흐름을 통해 입자를 집속하여 입자가 축 중앙으로 모여있는 형태의 입자 빔을 생성할 수 있는 입자 집속렌즈를 포함한다. 렌즈의 구성요소인 오리피스의 구경 조절을 통해 입자 빔



[Fig. 1] Schematic diagram and design images of particle characteristics diagnosis system and its calibration process.

확산 정도를 제어할 수 있으며, 이에 따라 측정부까지 이동하는 입자의 손실을 최소화 할 수 있고 [7], 챔버압력 또한 1.0×10^{-4} Torr 미만으로 유지되는 특성 상 SEM 및 EDS 모듈을 결합하는데 최적화된 장비로 선택되었다. 입자 손실이 최소화 됨에 따라 최종 측정부에서 입자 포집이 가능하며, 포집을 통해 SEM 및 EDS 분석이 가능하다. 공기역학 집속렌즈는 여러 개의 판형 오리피스를 포함하고 있으며 각각의 오리피스를 통과함에 따라 입자는 점진적으로 집속되어 좁은 빔 형태로 나타난다 [8]. 집속된 입자는 가속노즐을 지나며 가속되고 이 과정에서 입자와 함께 유입된 잔류기체 분자는 확산된다. 이 후 입자빔은 챔버 구획을 위해 장착된 판형 오리피스 형태의 스키머 (2 mm 직경) 를 거치며 전자총에 의해 하전된다 [9]. 확산된 잔류기체가 하전과정에 유입될 시 전자총에서 발생하는 전자의 흐름에 영향을 미치게 되므로 스키머 유입 전에 배출된다. 이후 하전된 입자는 입자 빔 진행방향으로부터 45°로 장착된 디플렉터로 진행된다. 디플렉터는 3



[Fig. 2] Particle trajectories classified by each size at the deflector.

장의 금속 망이 샌드위치 형태로 배치되어 있으며, 디플렉터의 동작원리 및 입자 이동경로는 그림 2에 나타나 있다. 입자의 하전에 의한 전기적 에너지 값 대비 운동에너지의 값이 디플렉터 중앙 금속망에 걸리는 퍼텐셜보다 작을 때 입자는 90°로 휘어져 진행하게 되고 이후 전도성 금속판 표면에 포집된다. 전도판은 최소 10⁻¹⁵ A까지 측정 가능한 전류계와 연결되어 있으며 입자의 하전량을 측정한다. 측정방법은 크게 두가지 방법이 있는데, 전체 공정에서 발생하는 개략적인 입자농도 및 공정변화를 확인하기 위한 모니터링 모드, 그리고 입자 크기분포를 확인하기 위한 스캐닝 모드가 있다. 모니터링 모드에서는 대부분의 입자를 꺾을 수 있도록 디플렉터에 높은 퍼텐셜을 유지시키며 일정 시간 간격으로 측정되는 전류값을 기록한다. 스캐닝 모드에서는 디플렉터 전압을 점진적으로 증가시키며 각 시점마다 전류값을 기록한다.

스캐닝 모드에서 기록된 전류값을 토대로 크기분포를 구하게 되는데 이 때 측정 전류값 I(V)는 디플렉터에 걸리는 퍼텐셜 V에 대한 함수로서 나타난다 [7].

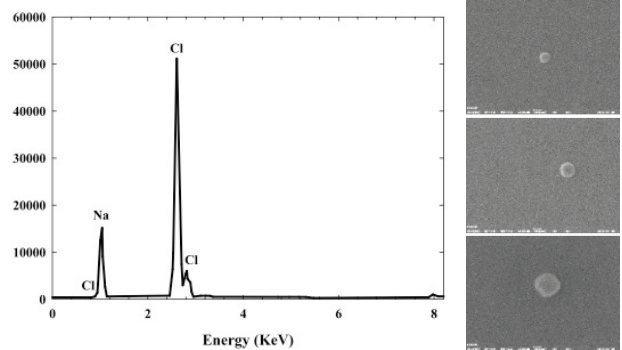
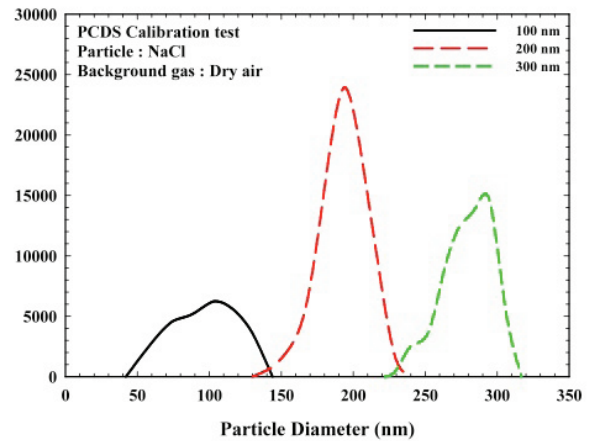
$$V = m_p u_p^2 / 2Az_p e$$

m_p , u_p 및 z_p 는 각각 입자의 질량, 속도 및 하전값을 나타내며 A는 입자빔에 대해 45°로 배치된 디플렉터 각도에 의한 비례상수이다. 이 때 입자의 질량, 속도 및 하전값은 $m(d_p)$, $u(d_p)$, 그리고 $z(d_p)$ 로서 입자 직경에 의한 함수이며 이에 따라 측정 전류값은 다음과 같이 나타난다 [10].

$$I(V) = \int_0^{D_p(V)} \frac{dn_p}{d \log(D_p)} z_p(D_p) \eta(D_p) \dot{Q} e d \log(D_p)$$

각각의 전류값 I(V)는 앞서 설명한 바와 같이 디플렉터 전압을 점진적인 계단꼴로 변화시킴으로써 얻어지며 전류값을 통해 환산되는 입자의 입경별 수농도 분포는 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{dn_p}{d \log(D_p)} = \frac{dI}{dV} \frac{dV}{d \log(D_p)} \frac{1}{z_p(D_p) \eta(D_p) \dot{Q} e}$$



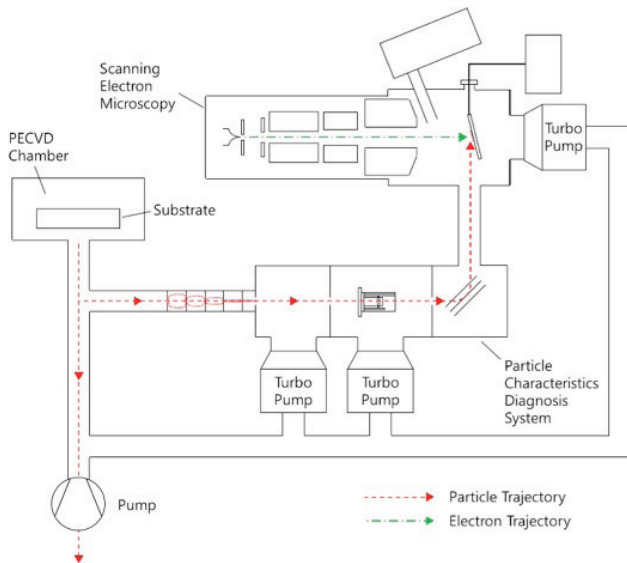
[Fig. 3] Sample particle analyses results by PCDS

전도성 표면에 포집된 입자는 10만배의 배율 및 최대 30 kV의 가속전압을 갖는 SEM 모듈 및 133 eV의 에너지 분해능을 가지며 1,000 Kcps의 input 카운트 속도를 갖는 EDS 모듈을 이용하여 형상 및 성분을 각각 분석할 수 있다.

3. 공정 내 입자 분석

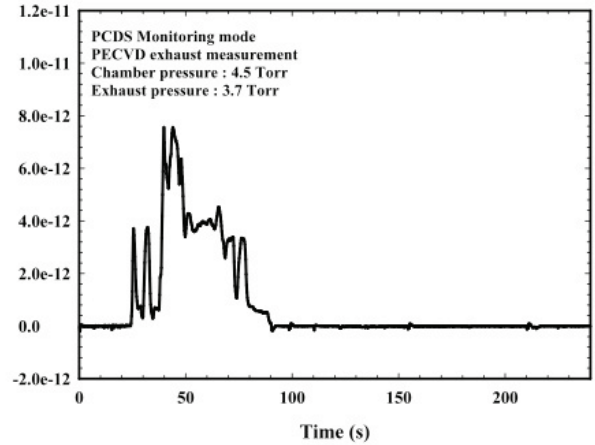
진공 공간 내 입자의 실시간 분석 가능 여부를 확인하기 위해 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 를 이용, 공정 배기라인에서 발생하는 입자를 PCDS로 측정하였다.

실제 공정 측정 전 장치 검증 및 교정을 위하여 표본입자 측정 및 분석을 진행하였으며 이러한 과정은 그림 1 에 붉은색 점선으로 나타내었다. 표본입자로는 NaCl을 이용하여 atomizer 및 dryer를 이용하여 발생시킨 입자를 SMPS를 통해 100, 200 및 300 nm 의 크기별로 분류시켜 PCDS에 유입시켰으며, 이 때 측정 크기 및 성분 등의 일치 정도를 확인하였다 (그림 3). 표본 입자 교정평가 후에는 4.5 Torr의 공정챔버압 환경에서 PE-Nitride 공정을 통해 발생시킨 입자를 측정하였으며, 측정장치 구성의 최소화 및 간략화를 위하여 PECVD의 roughing

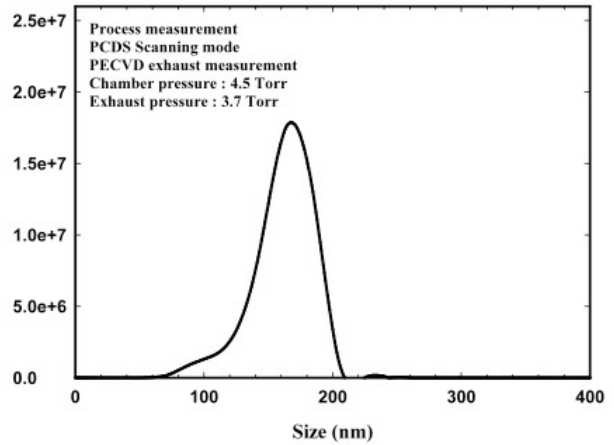


[Fig. 4] Schematic diagram of PECVD generated particle measurement using PCDS.

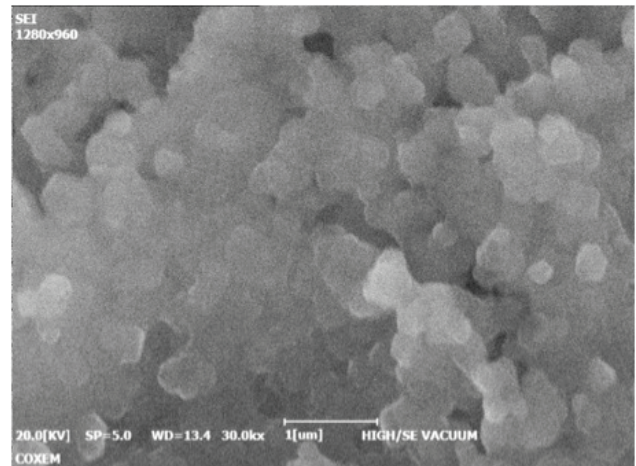
(a) Process monitoring results of particles from the exhaust line of PECVD, deflection voltage is 1200 V



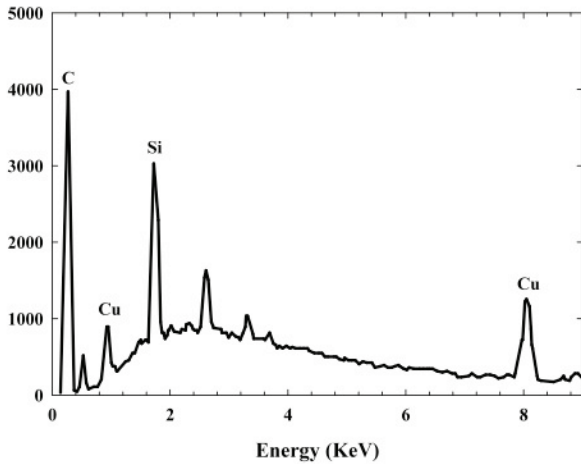
(b) Scanning mode at the deposition process



(c) SEM imaging



(d) EDS analysis of particle.



[Fig. 5] PCDS measurement results of particles from the exhaust line of PECVD.

pump에 PCDS의 배기라인을 연결하여 측정구성을 하였다 (그림 4).

PECVD의 배기라인으로 유입, PCDS에 포집된 입자의 측정결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 전체 공정 모니터링 결과이며 대부분의 입자를 편향시킬 수 있도록 1200 V의 디플렉터 전압을 건 상태에서 포집된 입자의 전류값을 측정하였다. 이후 입경분포를 측정하였으며, 디플렉터 전압은 20 V 간격으로 0에서 2000 V까지 모니터링 모드에서 측정전류값이 일정한 구간인 55 ~ 65 초 측정구간에서 총 10초간 스캐닝 측정을 하였다 (그림 5(b)). 형상 확인을 위한 SEM 이미지에서 볼 수 있듯이 피 구상형 결정의 크기는 200 nm보다 작아 보이며 이는 스캐닝 측정결과에서 나타나는 최빈 크기인 176 nm과 일치되는 결과를 확을 할 수 있었다(그림 5(c)). 그림 5(d)는 크기 분석 후 EDS 성분분석한 결과이며, 공정 주 성분인 Si를 확인할 수 있었다. 이 외 전도성 포집판의 주 성분인 Cu 또한 확인할 수 있었다.

4. 결론

공정 수율에 영향을 끼치는 오염입자는 그 손실에 의해 분석 및 제어 필요성이 점차 커지고 있다. 이에 따라 나노급 오염입자를 분석할 수 있는 여러 장치가 개발된 바 있으나, 실시간 측정이 불가하거나, 측정 능력의 한계 등 여러 단점이 존재하였다. 각각의 단점이 보완된 실시간 측정장치의 개발 필요성에 의해 본 연구진을 통해 개발된 PCDS가 개발되었으며 교정 및 실제 공정 평가과정을 통해 공정 수율을 높이는데 기여 가능한 입자 측정 장치로서의 활용성을 확인할 수 있었다. 차 후 일부 측정정확도의 개선 및 십 수 나노미터 크기의 공정 집적도에 최적화된 측정장치의 개발이 필요할 것으로 예상된다.

References

- [1] M. Nagai, J. Electrochem. Soc. **154**, J387-J392 (2007).
- [2] J. F. O'Hanlon and H. G. Parks, J. Vac. Sci. Tech. A **10**, 1863 (1992).
- [3] K. M. Takahashi and J. E. Daugherty, J. Vac. Sci. Technol. A **14**, 2983-2993 (1996).
- [4] T. Seto, T. Nakamoto, K. Okuyama, M. Adachi, Y. Kuga, and K. Takeuchi, J. Aerosol Sci., **28**, 193-206 (1997).
- [5] K. Seol, S. Y. Tsutani, R. P. Camata, J. Yabumoto, S. Isomura, Y. Okada, K. Okuyama, and K. Takeuchi, J. Aerosol Sci., **31**, 1389-1395 (2000).
- [6] J. H. Mun, D. G. Cho, Y. J. Kim, J. B. Choi, S. W. Kang, J. Y. Yun, Y. H. Shin, and T. Kim, J. Nanosci. Nanotechnol. **11**, 6275-6282 (2011).
- [7] P. J. Ziemann, P. Liu, N. P. Rao, D. B. Kittelson, and P. H. McMurry, J. Aerosol Sci. **26**, 745-756 (1995).
- [8] X. Wang, F. E. Krus, and P. H. McMurry, Aerosol Sci. and Tech. **39**, 611-623 (2005).
- [9] P. J. Ziemann, P. Liu, D. B. Kittelson, and P. H. McMurry, J. Phys. Chem. **99**, 5126-5138 (1995).
- [10] T. Kim, Ph. D. Thesis, University of Minnesota (2002).