

## 저압상태에서 공기역학적 렌즈를 이용한 입자 빔의 생성 및 크기 제어

배 귀 남\*  
(1999년 3월 25일 접수)

### Generation and Size Control of Particle Beams at Low Pressures Using Aerodynamic Lenses

Gwi-Nam Bae

**Key Words:** Particle Beam(입자 빔), Aerodynamic Lens(공기역학적 렌즈), Low Pressure(저압), Visualization(가시화)

#### Abstract

Since it is not possible to generate spatially uniform particle distribution at low pressures in which in-situ particle monitors(ISPMs) are normally operated, it is of interest to investigate the response of an ISPM to particle beams at low pressures. The purpose of this study is to develop technique that can control the size of particle beams. In this study, particle beams were generated at low pressures by using identical aerodynamic lenses, and their shape and size were visualized by collecting uniform sized methylene blue aerosol particles on a filter media. It was found that the size of particle beams depends on the number of lens, the distance between lenses, and the downstream distance from the final lens. The size of particle beams decreases with increasing distance between lenses, and increases with increasing downstream distance from the final lens. The experimental results obtained in this work will be used to investigate performance of an ISPM at low pressures.

#### 기호설명

- $d_n$  : 렌즈 내경  
 $d_p$  : 입자 크기  
 $l_f$  : 렌즈 간격  
 $l_s$  : 마지막 렌즈와 입자 빔 측정위치 사이의 거리  
 $n_f$  : 렌즈 수  
 $Q$  : 질량 유량  
 $S$  : 스톱스 수  
 $S_0$  : 최적 스톱스 수

#### 1. 서론

반도체 칩의 생산수율을 향상시키기 위하여 생산환경의 오염제어에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있으며, 칩의 집적도가 급속히 증가함에 따라 반도체 제조장비 내 입자오염이 중요하게 다루어지고 있다. 현재 입자의 팽 산란 현상을 이용하여 실시간으로 진공중 입자를 측정할 수 있는 계측기(in-situ particle monitor, ISPM)가 개발되어 진공상태에서 공정이 이루어지는 제조장비의 오염제어에 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup>

그런데, ISPM의 이론적 측정효율(detection efficiency)이 20% 이하로 매우 낮고,<sup>(2,3)</sup> 특별한 경우를 제외하면 측정된 웨이퍼 오염도와 ISPM 데이터간의 상관성이 별로 없는 문제점이 지적되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 문제점의 원인을 밝혀내고, ISPM의 응용성을 높이기 위하여 진공상태에서 입자겨

\* 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구소

동과 ISPM의 성능특성에 대한 연구가 최근에 수행되고 있다.<sup>(2,7)</sup>

Bae 등<sup>(4)</sup>의 실험결과에 외하면, 약 10 torr 이상의 감압상태에서는 공간적으로 균일한 입자분포를 만들 수 있으므로, 저자는 이러한 조건에서 ISPM(PMS model Vaculaz-2)의 성능특성을 실험적으로 규명하였다.<sup>(3)</sup>

한편, 에어로졸을 노즐, 오리피스 또는 모세관을 통해 진공 중으로 팽창시키면 에어로졸 빔을 만들 수 있으며, 이러한 기법은 에어로졸 입자를 분석하는데 많이 사용되어 왔다.<sup>(8,9)</sup> 입자를 고효율로 샘플링 공간으로부터 계측기 내부의 측정공간(sensing volume)으로 이송하기 위해서는 확산각이 적은 가는 입자 빔을 만들 필요가 있다. 지금까지는 주로 보호공기(sheath air)를 사용하여 가는 입자 빔을 만들었다. 그런데, 최근에 Liu 등<sup>(9,10)</sup>은 오리피스(thin-plate orifice)를 사용하여 입자의 공기역학적 집중 효과(aerodynamic focusing effect)에 의해 입자 빔을 만드는 연구를 수행하였다. 그리하여 Liu 등<sup>(7)</sup>은 오리피스로 만든 공기역학적 렌즈(aerodynamic lens)를 ISPM의 상류에 설치하여 ISPM(TSI model 7340)의 측정효율을 크게 향상시킬 수 있음을 보여주었다. Schreiner 등<sup>(11)</sup>은 압력이 20~75 mbar(15~56 torr)인 성층권에서 구름 입자의 성분을 분석하기 위하여 공기역학적 렌즈 시스템을 개발하였다.

ISPM은 보통  $10^{-5}$ ~10 torr 범위의 낮은 압력에서 사용되고 있는데,<sup>(1)</sup> 이러한 저압상태에서는 공간적으로 균일한 입자분포를 얻기가 매우 어렵다.<sup>(2,4)</sup> 그리하여 저자는 10 torr 이하의 낮은 압력에서 모든 입자가 ISPM의 측정공간을 지나가도록 Liu 등<sup>(10)</sup>이 개발한 공기역학적 렌즈를 ISPM의 상류에 설치하여 매우 작은 입자 빔을 만들어 ISPM의 성능특성을 규명할 계획이다.

본 연구는 저압상태에서 ISPM의 성능특성 규명을 위한 선행 연구로, ISPM의 성능특성 실험에 필요한 공기역학적 렌즈를 설계하여 이것에 의해 생성되는 입자 빔의 특성을 가시화 실험을 통하여 규명하였다. 즉, ISPM의 성능평가가 실험에 적합한 입자 빔을 생성하고 크기를 제어할 수 있는 기술을 확보하기 위하여 단분산 메틸렌 블루(methylene blue) 입자를 사용하여 저압상태(0.6~6.5 torr)에서 질량유량(mass flow rate,  $Q$ ), 입자 크기( $d_p$ ), 렌즈 내경( $d_n$ ), 렌즈 수( $n_f$ ), 렌즈 간

격( $l_f$ ), 마지막 렌즈와 입자 빔 측정위치 사이의 거리( $l_s$ )에 따라 생성되는 입자 빔의 모양 및 크기 변화에 대한 가시화 실험을 수행하였다.

## 2. 공기역학적 렌즈의 설계

공기역학적 렌즈는 보호공기를 사용하지 않고 가는 입자 빔을 만들기 위하여 개발되었다. 이것은 원래 입자 빔의 질량 분광기(particle beam mass spectrometer, PBMS)에 사용하기 위하여 개발되었으며, 앞에서 언급한 바와 같이 ISPM에도 적용할 수 있다.

Fig. 1은 ISPM의 입구에 오리피스로 만든 공기역학적 렌즈가 설치된 경우 입자의 거동을 개념적으로 나타낸 것이다.<sup>(7)</sup> 입자가 포함된 공기가 오리피스를 빠른 속도로 통과함에 따라 측정 범위의 입자는 관성에 의해 기류를 따라 가지 않고 중심으로 모이게 된다. 즉, 입자의 관성을 지배하는 스토크스 수(Stokes number)를 사용하여 유동조건을 적절히 제어하면, 오리피스를 사용하여 에어로졸 빔을 만들 수 있다. 공기중 입자계수기에서 보호공기를 사용하여 에어로졸 빔을 만들어 측정효율을 높이는 것과 마찬가지로, 공기역학적 렌즈를 사용하여 에어로졸 빔을 측정공간 내로 지나가게 하면 ISPM의 측정효율을 높일 수 있다.

얇은 판의 오리피스에서 입자운동은 스토크스 수( $S$ )에 따라 달라진다. 낮은 압력(즉, 자유 분자 영역)에서 스토크스 수는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.<sup>(7,12)</sup>

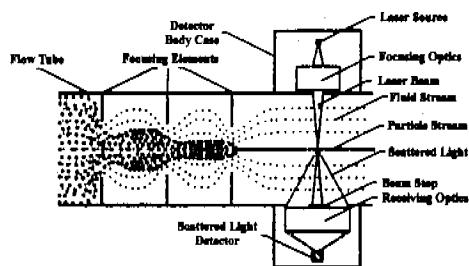


Fig. 1 Schematic diagram showing the aerodynamic focusing effect.

$$S = \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi\alpha}{8}\right)\sqrt{2\pi\gamma^3}} \frac{m\rho_p d_p c^3}{P^2 d_n^3} \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 가스의 질량유량,  $\rho_p$ 는 입자 밀도,  $d_p$ 는 입자 크기,  $d_n$ 는 오리피스 내경,  $P$ 는 오리피스 상류의 압력,  $c$ 는 상류에서 가스의 속도,  $\gamma$ 는 비열비,  $\alpha$ 는 보정계수로 대부분의 가스의 경우 0.9 정도이다.<sup>(7)</sup>

스톡스 수가 렌즈의 레이놀즈 수(Reynolds number)에 따라 0.7~1.5 범위에 있는 최적 스톡스 수( $S_o$ )와 이상적으로 같게 되면, 입자 빔의 크기는 거의 점(zero)에 근접하게 된다.<sup>(7)</sup> 그러나, 최적 스톡스 수와 일치되도록 시스템 변수를 조절하는 것은 실제적으로 어려운 문제이다. Liu 등<sup>(10)</sup>은 동일한 렌즈를 여러 개 사용함으로써 효과

적으로 입자 빔을 만들 수 있음을 발견하였다. 또한, 얇은 관형 오리피스의 경우 최적 스톡스 수가 1 근처임이 실험적으로 밝혀졌다.<sup>(7)</sup>

저압상태에서 ISPM의 성능을 평가하기 위한 실험조건이 Liu 등<sup>(7)</sup>의 경우와 유사하므로, 본 연구에서는 최적 스톡스 수를 1로 가정하여 공기역학적 렌즈를 설계하였다. 먼저 질량유량, 챔버압력, 입자 크기 등으로 구성되는 기준조건(32 sccm인 경우 0.3  $\mu\text{m}$ , 1 torr; 100 sccm인 경우 0.3  $\mu\text{m}$ , 5 torr)을 설정한 후, 식 (1)을 사용하여 기준조건에 대한 렌즈 내경을 결정하였다. 본 연구에서는 내경이 2.3, 4.7 mm인 2개의 렌즈를 선정하였다.

Fig. 2는 식 (1)을 사용하여 구한 공기역학적 렌즈의 작동범위를 나타낸 것이다. 즉, 렌즈 내경과 유량이 일정한 경우 압력(또는 입자 크기)에 따라 입자 빔이 생성될 수 있는 입자 크기(또는 압력) 범위를 나타낸 것이다( $0.7 < S < 1.5$ ). Fig. 2(b)에서 유량이 32 sccm (standard  $\text{cm}^3/\text{min}$ )인 경우 0.3  $\mu\text{m}$ 인 입자의 작동범위는 0.8~1.2 torr이고, 압력이 1 torr일 때의 작동범위는 0.2~0.5  $\mu\text{m}$ 이다.

### 3. 가시화 실험

Fig. 3은 입자 빔을 생성하고 가시화하기 위하여 사용한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 중성능 필터 여지(Hovoglas filter media, technical data grade: HF-0533, Hollingsworth & Vose Company, MA, U.S.A.) 상의 입자 침착 양상을 육안으로 쉽게 확인하기 위하여 메틸렌

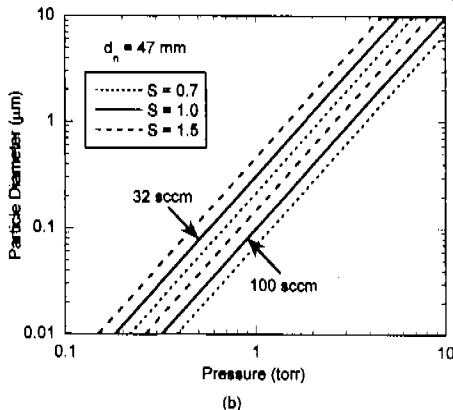
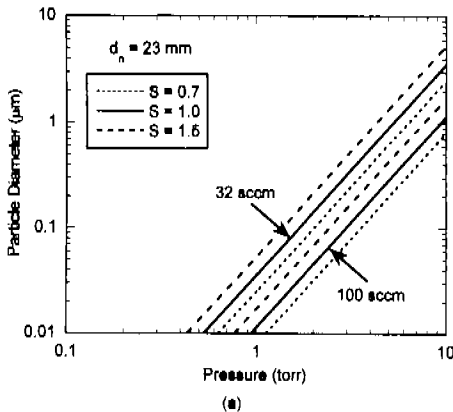


Fig. 2 Operating range of aerodynamic lenses.

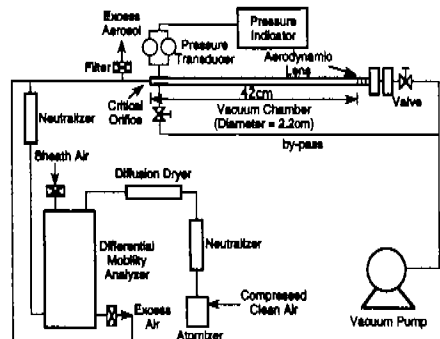


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system.

**Table 1** Optimum chamber pressures.  
( $S_0 = 1$ , unit: torr)

Particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	0.1	0.3	0.5
$Q = 32 \text{ sccm}$ $d_n = 2.3 \text{ mm}$	1.97	2.85	3.68
$Q = 32 \text{ sccm}$ $d_n = 4.7 \text{ mm}$	0.67	0.98	1.26
$Q = 100 \text{ sccm}$ $d_n = 2.3 \text{ mm}$	3.48	5.04	6.50
$Q = 100 \text{ sccm}$ $d_n = 4.7 \text{ mm}$	1.19	1.72	2.23

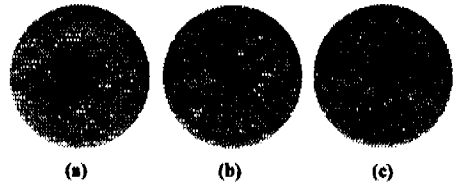
분류 입자빔 사용하였다. 대기압 상태에서 DMA(differential mobility analyzer)<sup>(13)</sup> 분류기법에 의해 단분산 메틸렌 블루 입자빔 발생시켜 임계 오리피스(critical orifice)를 통하여 내경 2.2 cm인 스테인레스 스틸 관으로 만든 진공챔버로 공급하였다. 일정한 질량유량을 진공챔버로 공급하기 위하여 임계 오리피스를 사용하였고, 챔버 내 압력은 압력센서(MKS Instruments Inc.)로 측정하였다. 진공챔버 단면에서의 입자 빔의 특성을 파악하기 위하여 챔버 내 유동 중의 입자빔 필터 여지로 여과한 후 필터 여지 상의 침착 모양을 육안으로 관찰하여 평가하였다.

실험에서는 질량유량(32, 100 sccm), 렌즈 내경(2.3, 4.7 mm), 입자 크기(0.1, 0.3, 0.5  $\mu\text{m}$ )에 따른 입자 빔의 크기를 살펴보았다. 실험은 최적 스톱스 수를 1로 가정하여 식 (1)로부터 구한 최적 챔버압력에서 수행하였고, 이때 최적 챔버압력은 Table 1에 나타낸 바와 같이 0.6~6.5 torr이었다.

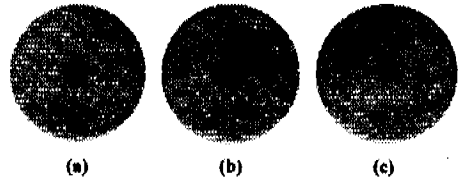
#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 렌즈 수의 영향

입자 빔의 모양 및 크기는 입자 크기, 렌즈 수, 렌즈 간격, 마지막 렌즈로부터의 거리 등에 따라 달라진다. 먼저 렌즈 수가 입자 빔의 크기에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 4는 유량이 100 sccm, 렌즈 내경이 2.3 mm, 입자 크기가 0.3  $\mu\text{m}$ , 렌즈 간격이 5.08 cm인 경우 마지막 렌즈로부터 5.08 cm 떨어진 위치에서 필터 여지로 채취한 입



**Fig. 4** The effect of number of identical aerodynamic lens on the particle beam size. ( $Q = 100 \text{ sccm}$ ,  $d_n = 2.3 \text{ mm}$ ,  $d_p = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $l_f = 5.08 \text{ cm}$ ,  $l_s = 5.08 \text{ cm}$ ) (a)  $n_f = 1$ , (b)  $n_f = 2$ , (c)  $n_f = 3$

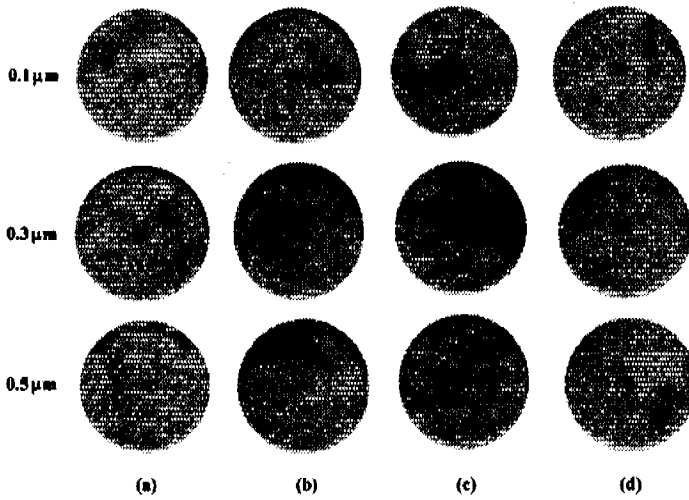


**Fig. 5** The effect of the distance between identical aerodynamic lenses on the particle beam size. ( $Q = 100 \text{ sccm}$ ,  $d_n = 2.3 \text{ mm}$ ,  $d_p = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $l_s = 5.08 \text{ cm}$ ,  $n_f = 3$ ) (a)  $l_f = 2.54 \text{ cm}$ , (b)  $l_f = 5.08 \text{ cm}$ , (c)  $l_f = 7.62 \text{ cm}$

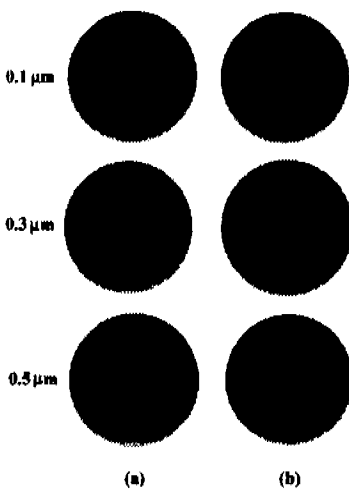
자 빔의 모양을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 여지의 크기는 약 2.2 cm이고, 렌즈 수가 3개일 때 입자 빔의 크기는 1 mm 이하이다. 렌즈가 1개일 경우 입자 빔 주위에도 입자가 분산되지만, 렌즈를 2개 설치하면 입자 빔이 제대로 생성되며, 렌즈를 3개 설치하면 보다 작은 입자 빔이 생성됨을 알 수 있다.

##### 4.2 렌즈 간격의 영향

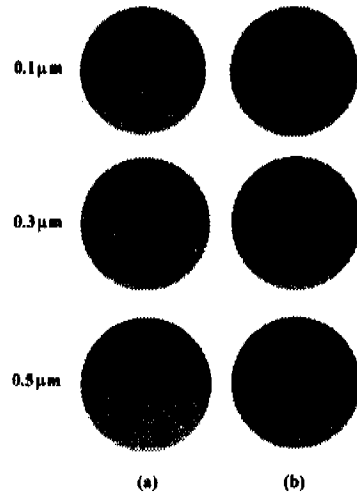
렌즈 수를 3개로 고정하고, 렌즈 간격이 입자 빔의 모양 및 크기에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 렌즈 간격을 3가지(2.54, 5.08, 7.62 cm)로 바꾸어 실험을 수행하였다. Fig. 5는 유량이 100 sccm, 렌즈 내경이 2.3 mm, 입자 크기가 0.3  $\mu\text{m}$



**Fig. 6** Particle beam spots obtained by using three identical aerodynamic lenses for four experimental cases. ( $l_f = 5.08$  cm,  $l_s = 5.08$  cm,  $n_f = 3$ ) (a)  $Q = 32$  sccm,  $d_n = 2.3$  mm, (b)  $Q = 32$  sccm,  $d_n = 4.7$  mm, (c)  $Q = 100$  sccm,  $d_n = 2.3$  mm, (d)  $Q = 100$  sccm,  $d_n = 4.7$  mm



**Fig. 7** Smaller particle beam spots obtained by increasing distance between lenses. ( $l_f = 7.62$  cm,  $l_s = 5.08$  cm,  $n_f = 3$ ) (a)  $Q = 32$  sccm,  $d_n = 4.7$  mm, (b)  $Q = 100$  sccm,  $d_n = 2.3$  mm



**Fig. 8** Larger particle beam spots obtained by increasing downstream distance from the final lens. ( $l_f = 5.08$  cm,  $l_s = 15.24$  cm,  $n_f = 3$ ) (a)  $Q = 32$  sccm,  $d_n = 4.7$  mm, (b)  $Q = 100$  sccm,  $d_n = 2.3$  mm

인 경우 마지막 렌즈로부터 5.08 cm 떨어진 위치에서 필터 여지로 채취한 입자 빔의 모양을 나타낸 것이다. 렌즈 간격이 좁은 경우 입자 빔이 타원형이지만(Fig. 5 (a)), 렌즈 간격이 증가하면 원형으로 바뀌고 빔의 크기도 작아진다(Fig. 5 (b), (c)).

#### 4.3 입자 빔의 크기 제어

동일한 렌즈를 5.08 cm 간격으로 3개 설치하여 유량, 렌즈 내경, 입자 크기에 따른 입자 빔의 모양을 살펴보기 위하여 마지막 렌즈로부터 5.08 cm 떨어진 위치에서 필터 여지로 채취한 입자 빔의 모양을 Fig. 6에 나타냈다. 입자 빔은 대부분 1 mm 이하의 점이다. 특히, 두 번째 열의 입자 빔은 매우 작으며, 선명한 점을 나타내고 있다. 대체로 빔의 크기는 입자 크기가 증가함에 따라 작아지는데, 이것은 빔의 크기가 브라운 운동에 의해 결정된다는 사실과 일치한다.<sup>(9)</sup>

앞에서 렌즈 간격이 증가함에 따라 입자 빔의 크기가 감소하였으므로(Fig. 5), 보다 작은 입자 빔을 만들기 위하여 렌즈 간격을 7.62 cm로 넓힌 경우 입자 빔의 모양을 Fig. 7에 나타냈다. 렌즈 간격이 5.08 cm인 경우(Fig. 6 (b), (c))와 비교하면, 입자 빔이 상당히 감소함을 알 수 있다.

입자 빔은 렌즈의 하류로 내려감에 따라 브라운 운동 등에 의해 확산되므로, 필터 여지와 마지막 렌즈간의 거리를 증가시키면 보다 큰 빔을 얻게 된다. 필터 여지물 마지막 렌즈로부터 15.24 cm 하류에 설치한 경우 입자 빔의 모양을 Fig. 8에 나타냈다. 마지막 렌즈로부터의 거리가 5.08 cm인 경우(Fig. 6 (b), (c))에 비해 입자 빔이 약간 커짐을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 저압상태에서 공기역학적 렌즈를 사용하여 입자 빔을 생성한 후, 가시화 실험을 통하여 입자 빔의 모양 및 크기를 확인하고, 입자 빔의 크기를 제어할 수 있는 기법을 개발하였다. 입자 빔은 렌즈 수, 렌즈 간격, 마지막 렌즈로부터의 거리에 영향을 받으며, 렌즈 간격을 넓히면 보다 작은 입자 빔을 생성할 수 있고, 마지막 렌즈로부터의 거리를 증가시키면 보다 큰 입자 빔을 생성할 수 있음을 알았다. 본 연구결

과를 바탕으로 저압상태에서 에어로졸 빔을 생성하여 ISPM의 성능을 평가할 계획이다.

### 후 기

본 논문은 한국과학재단의 해외연수 지원에 의해 미국의 University of Minnesota에서 수행한 연구결과와 일부이며, Benjamin Y. H. Liu 교수님 비롯한 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Takahashi, K. M., and Daugherty, J. E., 1996, "Current Capabilities and Limitations of In Situ Particle Monitors in Silicon Processing Equipment," *Journal of Vacuum Science and Technology(A)*, Vol. 14, pp. 2983~2993.
- (2) Kinney, P. D., Bae, G. N., Pui, D. Y. H., and Liu, B. Y. H., 1996, "Particle Behavior in Vacuum Systems: Implications for In-Situ Particle Monitoring in Semiconductor Processing Equipment," *Journal of the Institute of Environmental Sciences*, Nov./Dec., pp. 40~45.
- (3) 배귀남, 1998, "감압상태에서 In-Situ Particle Monitor의 성능특성," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제11호, pp. 1564~1570.
- (4) Bae, G. N., Kinney, P. D., Liu, B. Y. H., and Pui, D. Y. H., 1998, "Investigation of Aerosol Spatial Distributions Downstream of a Critical Orifice at Low Pressure," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 28, No. 6, pp. 479~488.
- (5) 안진홍, 안강호, 1998, "임계 오리피스를 통과한 입자의 운동 특성에 관한 수치적 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집 B, pp. 681~686.
- (6) Jin, X., 1995, Sampling and Measuring of Particles in a PECVD Reactor for Semiconductor Film Deposition, Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, MN, U.S.A.
- (7) Liu, P., Rao, N. P., Kittelson, D. B., and McMurry, P. H., 1996, "Optimizing the Detection Efficiency of a Low Pressure, In-Situ Particle Monitor Using Aerodynamic Focusing Lenses," *In*

- Proceedings of the IES 42nd Annual Technical Meetings*, Institute of Environmental Sciences, Orlando, Florida, May 12-16, pp. 217~224.
- (8) Dahneke, B. E., and Cheng, Y. S., 1979, "Properties of Continuum Source Particle Beams. I. Calculation Methods and Results," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 10, pp. 257~274.
- (9) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B., and McMurry, P. H., 1995, "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 22, pp. 293~313.
- (10) Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B., and McMurry, P. H., 1995, "Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: II. Experimental Evaluation of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 22, pp. 314~324.
- (11) Schreiner, J., Voigt, C., Mauersberger, K., McMurry, P., and Ziemann, P., 1998, "Aerodynamic Lens System for Producing Particle Beams at Stratospheric Pressures," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 29, pp. 50~56.
- (12) Fernandez de la Mora, J., Rao, N. P., and McMurry, P. H., 1990, "Inertial Impaction of Fine Particles at Moderate Reynolds Numbers and in the Transonic Regime with a Thin-Plate Orifice Nozzle," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 21, pp. 889~909.
- (13) 안강호, 김남효, 이종호, 배귀남, 1996, "Differential Mobility Analyzer(DMA) 내외 입자 운동 및 특성 분석," *대한기계학회논문집 B*, 제 20권, 제6호, pp. 2005~2013.