

# 저압상태에서 공기역학적 렌즈를 이용한 In-Situ Particle Monitor의 성능특성 분석

배 귀 남\*  
(2000년 3월 10일 접수)

## Investigation of the Performance Characteristics of an In-Situ Particle Monitor at Low Pressures Using Aerodynamic Lenses

Gwi-Nam Bae

**Key Words:** In-Situ Particle Monitor(실시간 입자측정기), Particle Beam(입자 빔), Aerodynamic Lens(공기역학적 렌즈), Low Pressure(저압), Detection Efficiency(측정효율)

### Abstract

In-situ particle monitors(ISPMs) are widely used for monitoring contaminant particles in vacuum-based semiconductor manufacturing equipment. In the present research, the performance of a Particle Measuring Systems(PMS) Vaculaz-2 ISPM at low pressures has been studied. We generated the uniform sized methylene blue particle beams using three identical aerodynamic lenses in the center of the vacuum line, and measured the detection efficiency of the ISPM. The effects of particle size, particle concentration, mass flow rate, system pressure, and arrangement of aerodynamic lenses on the detection efficiency of the ISPM were examined. Results show that the detection efficiency of the ISPM greatly depends on the mass flow rate, and the particle Stokes number. We also found that the optimum Stokes number ranges from 0.4 to 1.9 for the experimental conditions.

———— 기호설명 ————

- $C$  : CNC로 측정된 입자 농도
- $d_n$  : 렌즈 내경
- $d_p$  : 입자 크기
- $l_f$  : 렌즈 간격
- $l_s$  : 마지막 렌즈와 ISPM의 측정공간 사이의 거리
- $N$  : ISPM으로 측정된 시간당 입자 수
- $n_f$  : 렌즈 수
- $Q$  : 질량 유량
- $S$  : 스토크스 수

$S_o$  : 최적 스토크스 수

그리스문자

$\eta$  : 측정효율

### 1. 서 론

반도체 칩과 같이 정밀한 제품은 제조공정 주위의 공기오염이 잘 제어된 클린룸(cleanroom) 내에서 만들어지고 있다. 반도체 칩을 생산하는데 다양한 유틸리티(초순수, 고압가스, 화학약품, 웨이퍼 등)가 필요하며, 대부분의 제조공정은 진공 상태에서 이루어지고 있다. 클린룸 기술의 발달로 작업자나 공기로부터의 입자오염 문제는 현재 거의 해결되었고, 1990년대 초반부터 제조장비와 유틸리티의 오염문제가 중요하게 다루어지고 있다.

입자의 광산란 현상을 이용하여 실시간으로 진공중 입자를 측정할 수 있는 계측기(in-situ

\* 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터  
E-mail : gnbae@kist.re.kr  
TEL : (02)958-5676 FAX : (02)958-5689

particle monitor, ISPM)가 개발되어 현재 반도체 제조공정 중의 입자오염을 모니터링하는데 널리 사용되고 있다. 그러나, 측정원리상 ISPM의 측정 효율이 낮고, 특별한 경우를 제외하면 측정된 웨이퍼 오염도와 ISPM 데이터간의 상관성이 별로 없어 제조장비의 오염제어에 효과적으로 활용되지 못하고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup> 이러한 문제점의 원인을 밝혀내고, ISPM의 응용성을 높이기 위해서는 진공상태에서 입자거동과 ISPM의 성능특성이 규명되어야 한다고 생각된다.

지금까지 수행된 ISPM의 성능특성에 대한 연구를 살펴보면, Caldow 등<sup>(2)</sup>이 처음으로 대기압 상태에서 ISPM의 성능특성을 실험적으로 밝혀냈고, 진공상태에서 ISPM의 성능특성에 대한 연구가 Jin과 Liu,<sup>(3,4)</sup> Liu 등,<sup>(5)</sup> 배귀남<sup>(6)</sup>에 의해 수행되었다.

진공상태에서 일반적인 입자거동에 대한 연구는 최근에 Kinney 등,<sup>(7)</sup> Bae 등,<sup>(8)</sup> 안진홍과 안강호,<sup>(9)</sup> Sato 등<sup>(10)</sup>에 의해 수행되었다. 진공상태에서 입자 빔에 대한 연구는 보호공기(sheath air)를 사용하여 많이 수행되었고,<sup>(11-13)</sup> 최근에 공기역학적 렌즈(aerodynamic lens)를 이용한 연구가 수행되었다.<sup>(5,14,15)</sup>

공기역학적 렌즈는 보호공기를 사용하지 않고 가는 입자 빔을 만들기 위해 개발되었다. 입자가 포함된 공기가 오리피스를 빠른 속도로 통과함에 따라 특정 크기의 입자는 관성에 의해 기류를 따라가지 않고 중심으로 모이게 된다. 즉, 입자의 관성을 지배하는 스톡스 수(Stokes number)를 사용하여 유동조건을 적절히 제어하면, 오리피스를 사용하여 에어로졸 빔을 만들 수 있다.

얇은 판의 오리피스에서 입자운동은 스톡스 수(S)에 따라 달라진다. 낮은 압력(즉, 자유 분자 영역)에서 스톡스 수는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.<sup>(5,12)</sup>

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

여기서,  $m$ 은 가스의 질량 유량,  $\rho_p$ 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>(5)</sup>

입자 빔의 크기가 거의 점(zero)에 근접할 때의 스톡스 수를 최적 스톡스 수(optimum Stokes number)라 부르며, 렌즈의 레이놀즈 수(Reynolds number)에 따라 0.7~1.5 범위에 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 ISPM의 측정효율이 최대일 때의 스톡스 수를 최적 스톡스 수( $S_o$ )로 정의하였다.

일반적으로 진공상태에서 ISPM의 성능을 평가하기 위해서는 진공챔버 내에서 공간적으로 균일한 입자분포를 만들어 주어야 한다. Bae 등<sup>(8)</sup>의 실험결과에 의하면, 약 10 torr 이상의 감압상태에서는 균일한 입자분포를 만들 수 있으나, 이보다 낮은 압력에서는 공간적으로 균일한 입자분포를 얻기가 매우 어렵다.<sup>(7,8)</sup> 최근에 Sato 등<sup>(10)</sup>은 인계 오리피스를 대칭으로 설치하여 저압상태(0.2~10 torr)에서도 균일한 입자분포를 얻었다.

저자는 진공상태의 넓은 압력범위에서 ISPM의 성능특성을 파악하기 위하여 압력범위에 따라 2가지 시험방법을 개발하였다. 첫 번째 방법은 감압상태에서 공간적으로 균일한 입자분포를 만들어 ISPM의 성능을 평가하는 것으로, 이전 논문<sup>(6)</sup>에서 자세하게 기술하였다. 두 번째 방법은 저압상태에서 Liu 등<sup>(5,15)</sup>이 개발한 공기역학적 렌즈를 ISPM의 상류에 설치하여 매우 작은 입자 빔을 만들어 ISPM의 성능을 평가하는 것으로, 본 논문에서 기술하였다.

본 연구에서는 공기역학적 렌즈를 이용한 입자 빔의 가시화 실험결과<sup>(16)</sup>를 바탕으로, 저압상태에서 ISPM(PMS model Vaculaz-2)의 성능특성을 밝혀내는 실험을 수행하였다. 즉, 단분산 메틸렌 블루(methylene blue) 입자를 사용하여 질량 유량(mass flow rate), 렌즈 내경, 렌즈 간격, 마지막 렌즈와 ISPM의 측정공간(sensing volume) 사이의 거리 등에 따라 달라지는 입자 빔의 특성이 ISPM의 측정효율(detection efficiency)에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 이때 입자 농도가 측정효율에 미치는 영향도 살펴보고, 또한, 동일 입경에 대한 챔버 압력과 측정효율간의 실험 데이터로부터 최적 스톡스 수를 구하고, 최적 스톡스 수가 ISPM의 측정효율에 미치는 영향도 조사하였다.

## 2. 실험

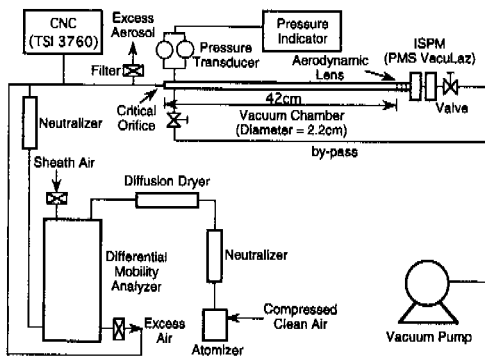


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

보통 입자계수기의 성능평가에서는 시험용 입자로 구형의 PSL(polystyrene latex) 입자(밀도 =  $1.05 \text{ g/cm}^3$ , 굴절계수 =  $1.59-0i$ )를 사용하나, 본 연구에서는 가시화 실험결과<sup>(16)</sup>를 활용하기 위하여 단분산 메틸렌 블루 입자(밀도 =  $1.26 \text{ g/cm}^3$ , 굴절계수 =  $1.57-0.17i$ )를 사용하였다. 굴절계수에 나타난 바와 같이 PSL 입자는 광학적으로 빛을 투과시키는 성질을 갖고 있는 반면에, 메틸렌 블루 입자는 빛을 약간 흡수하는 성질이 있다. 그러므로, 계측기의 광학적 특성에 따라 이들 입자의 크기에 따른 반응특성(산란광)이 다를 수 있다. 공기중 입자계수기의 성능특성에 관한 연구<sup>(17)</sup>에 의하면, 입경이 약  $0.3 \mu\text{m}$ 보다 큰 경우 빛을 흡수하는 성질이 입자의 반응특성에 큰 영향을 미치지않, 입경이 이보다 작은 경우에는 비슷한 반응특성을 나타낸다. 따라서, 본 연구에서 얻은 메틸렌 블루 입자에 대한 실험결과 중에서 측정효율에 대한 것은 PSL 입자의 경우와 유사할 것으로 추정되고, 입자 크기 분포는 입경에 따라 PSL 입자의 경우와 다를 수 있다고 생각된다.

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 대기압 상태에서 DMA(differential mobility analyzer)<sup>(18)</sup> 분류기법에 의해 단분산 메틸렌 블루 입자를 발생시켜 임계 오리피스(critical orifice)를 통하여 내경 2.2 cm인 스테인리스 스틸 관으로 만든 진공챔버로 공급하였다. 일정한 질량 유량을 진공챔버로 공급하기 위하여 임계 오리피스를 사용하였으며, 동일한 질량 유량에서 챔버내 유동특성을 나타내는 레이놀즈 수는 같지

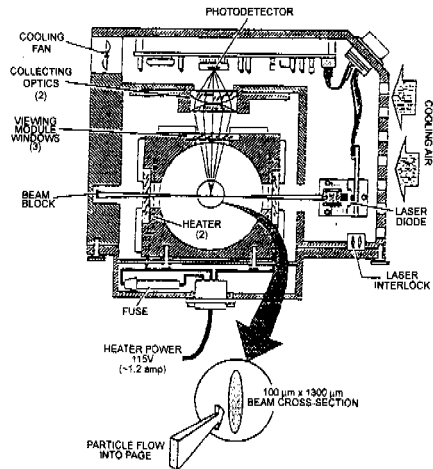


Fig. 2 Optics diagram of the PMS Vaculaz-2 ISPM

만, 챔버 압력에 따라 체적 유량(volumetric flow rate)은 달라지므로 기류 속도도 달라진다.<sup>(3)</sup> 챔버 압력은 압력 센서(MKS Instruments Inc.)로 측정하였다.

본 실험에서는 임계 오리피스로부터 42 cm 하류에 3개의 동일한 공기역학적 렌즈와 ISPM을 설치하여 진공챔버의 단면을 지나가는 입자 수를 측정하였다. 실험에 사용된 ISPM 광학계의 개략도를 Fig. 2에 나타냈다.<sup>(19)</sup> ISPM의 측정효율을 구하기 위한 기준 입자 농도는 응축핵 계수기(condensation nucleus counter, CNC, TSI model 3760)를 사용하여 대기압 상태인 임계 오리피스 상류에서 측정하였다.

실험은 Table 1에 나타낸 바와 같이 질량 유량 ( $Q$ )이 32, 100 sccm(standard  $\text{cm}^3/\text{min}$ )이고, 렌즈 내경( $d_n$ )이 2.3, 4.7 mm일 때 진공챔버 내에서 입자 빔을 최적으로 만들 수 있는 압력조건( $0.6 \sim 6.9 \text{ torr}$ )에서 수행하였다. 이때, 최적 스톱스 수는 1.0으로 가정하였다. 시험 입자로는 입경( $d_p$ )이  $0.1 \sim 0.55 \mu\text{m}$  범위인 단분산 메틸렌 블루 입자를 사용하였다. 입자 농도가 측정효율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 진공챔버로 공급되는 에어로졸의 농도를  $50 \sim 850 \text{ 개/cm}^3$  범위로 변화시켰다. 입자 빔의 가시화 실험결과<sup>(16)</sup>를 바탕으로 기본적으로 3개의 동일한 렌즈를 5.08 cm 간격으로 설치하고, 마지막 렌즈를 ISPM의 입구(연결 부

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

$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$Q = 32$	$Q = 32$	$Q = 100$	$Q = 100$
	sccm $d_n = 2.3$ mm	sccm $d_n = 4.7$ mm	sccm $d_n = 2.3$ mm	sccm $d_n = 4.7$ mm
0.10	1.97	0.67	3.48	1.19
0.15	2.02	0.69	3.56	1.22
0.20	2.33	0.80	4.11	1.41
0.25	2.60	0.89	4.60	1.57
0.30	2.85	0.98	5.04	1.72
0.35	3.08	1.05	5.44	1.86
0.40	3.29	1.13	5.82	1.99
0.45	3.49	1.20	6.17	2.11
0.50	3.68	1.26	6.50	2.23
0.55	3.86	1.32	6.82	2.34

분)에 부착( $l_s = 5.08$  cm)하여 실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입자 농도의 영향

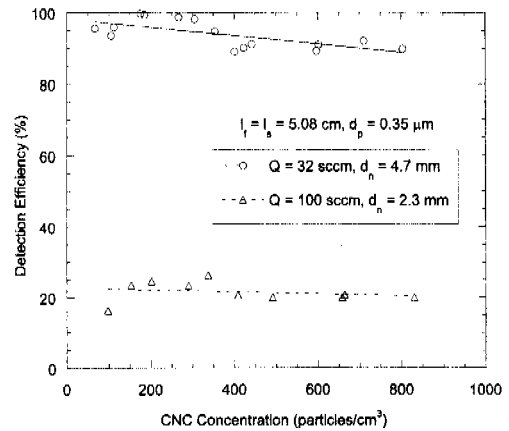
ISPM은 광산란 방식으로 개개의 입자를 측정하는데, 측정공간에 2개 이상의 입자가 동시에 존재하면 입자 수와 크기를 잘못 측정하게 된다. 이러한 현상을 농소공존의 영향(coincidence effect)이라 부르며, 일반적으로 입자 농도가 높아지면 필연적으로 생겨 측정오차를 유발시킨다.

ISPM의 측정효율( $\eta$ )은 식 (2)에 나타난 바와 같이 진공챔버의 단면을 지나가는 총 입자 수( $N_t$ )와 ISPM으로 측정된 입자 수( $N_i$ )의 비로 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{N_i}{N_t} = \frac{60 N}{Q \cdot C} \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 ISPM으로 측정된 시간당 입자 수(개/sec),  $Q$ 는 진공챔버로 유입되는 질량 유량( $\text{cm}^3/\text{min}$ ),  $C$ 는 CNC로 측정된 입자 농도(개/ $\text{cm}^3$ )이다.

$l_f = l_s = 5.08$  cm일 때 두 가지 경우( $Q = 32$  sccm,  $d_n = 4.7$  mm;  $Q = 100$  sccm,  $d_n =$



**Fig. 3** Effect of particle concentration on the detection efficiency

2.3 mm)에 대하여 최적 압력( $S_o = 1.0$ )에서 입경이  $0.35 \mu\text{m}$ 인 입자를 사용하여 입자 농도가 ISPM의 입자 측정에 미치는 영향을 살펴보았다. CNC로 측정된 입자 농도에 따른 ISPM의 측정효율의 변화를 Fig. 3에 나타냈다. 그림을 보면, 대체로 입자 농도가 증가함에 따라 측정효율이 서서히 감소함을 알 수 있다. 유량이 32 sccm인 경우 ISPM의 측정효율은 85~100%로 매우 높으나, 유량이 100 sccm인 경우 15~25%로 낮다.

입자 빔의 가시화 실험결과<sup>(16)</sup>에 의하면, 32 sccm인 경우의 입자 빔은 중심에 잘 집중된 작은 점이지만, 100 sccm인 경우의 입자 빔은 상대적으로 크고 덜 집중된 점이다. 100 sccm인 경우 입자 빔이 좋지 않은 것은 뒤에 언급되듯이 실제 최적 스톱스 수는 약 0.4인데, 이것을 1.0으로 가정하여 실험조건을 설정하였기 때문이다. 따라서, 유량이 100 sccm인 경우 측정효율이 낮은 것은 ISPM의 측정공간을 지나가는 입자의 평균 속도가 32 sccm인 경우에 비해 약 2.5배 빠르고, 입자 빔도 좋지 않기 때문인 것으로 생각된다.

#### 3.2 측정효율

4가지 실험조건에서 입경에 따른 측정효율의 변화물 Fig. 4에 나타냈다. 그림을 보면, 측정효율은 질량 유량에 따라 크게 나르지만, 렌즈 내경이 달라져도 거의 비슷하다. 약  $0.25 \mu\text{m}$ 까지는 입경이 증가함에 따라 ISPM의 측정효율이 증가하지만, 그 후에는 거의 비슷하다. 유량이 32

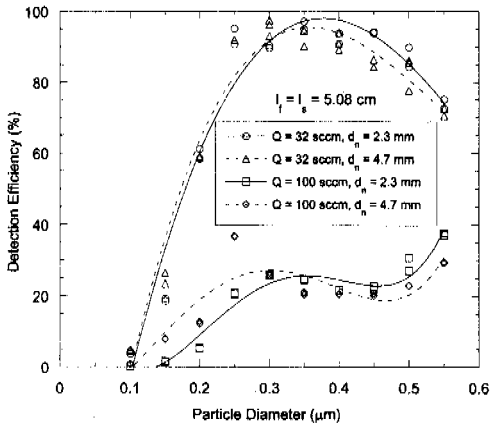


Fig. 4 Dependence of detection efficiencies on particle diameter

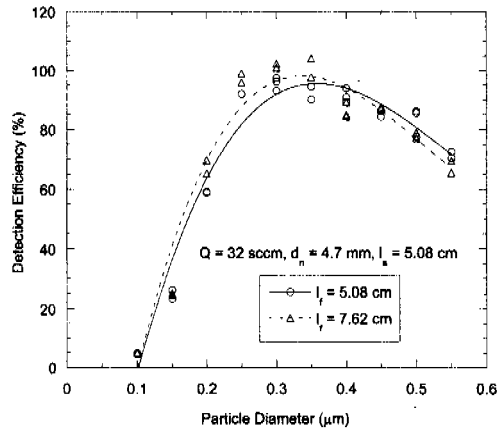


Fig. 5 Effect of the distance between lenses on the detection efficiency

sccm인 경우 입경이 0.45  $\mu\text{m}$ 보다 커지면 측정효율이 감소하는 반면에 유량이 100 sccm인 경우 입경이 0.5  $\mu\text{m}$ 보다 커지면 측정효율이 증가하는 경향을 나타낸다. 입자 빔의 가시화 실험결과<sup>(16)</sup>에 의하면, 입경이 0.5  $\mu\text{m}$ 일 때의 입자 빔의 크기가 0.3  $\mu\text{m}$ 인 경우에 비해 작다. 이것으로부터 입경에 따라 측정효율이 최대가 되는 최적 입자 빔의 크기가 존재하리라고 추정된다.

ISPM의 이론적 측정효율의 상한값은 일반적으로 20% 이하이다.<sup>(2,7)</sup> 본 연구에서는 25 mm 배기 라인에 사용되는 ISPM을 사용하였으며, 이것의 샘플링 면적은 입경이 0.35  $\mu\text{m}$  이상일 때 26~32  $\text{mm}^2$ 이므로 이론적 측정효율의 상한값은 6.8~8.4%이다.<sup>(6,19)</sup> Liu 등<sup>(5)</sup>의 연구에서 밝혀진 바와 같이 본 연구에서도 공기역학적 렌즈를 사용하여 입자 빔을 만들어 줌으로써 저압상태에서 ISPM의 측정효율이 이론적 측정효율보다 크게 향상됨을 알 수 있다.

공기역학적 렌즈 간격과 ISPM과 마지막 렌즈 사이의 거리에 따라 입자 빔의 크기가 달라지므로,<sup>(16)</sup> 이것이 측정효율에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 5는 유량이 32 sccm이고 렌즈 내경이 4.7 mm일 때 렌즈 간격을 5.08 cm에서 7.62 cm로 증가시킨 경우 입자 크기에 따른 측정효율의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면, 입경이 0.25~0.35  $\mu\text{m}$  범위에서는 렌즈 간격이 7.62 cm일 때의 측정효율이 약간 높으나 대체로 측정효율은 비슷하므로, 렌즈 간격이 측정효율에 미치

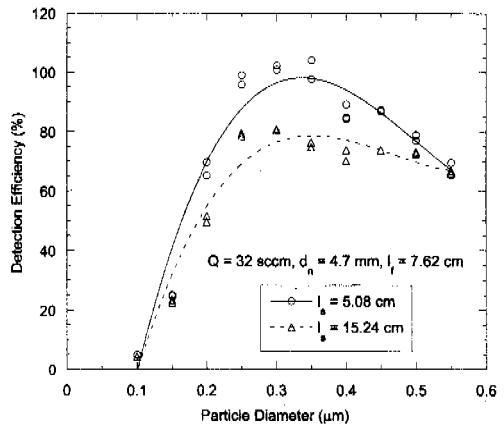


Fig. 6 Effect of distance between lens and ISPM on the detection efficiency

는 영향은 매우 적다고 생각된다. 입자 빔의 가시화 실험결과<sup>(16)</sup>에 의하면, 렌즈 간격이 증가하면 입자 빔이 작아지므로, 입자 빔이 어느 이하로 작아지더라도 측정효율이 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다.

유량이 32 sccm, 렌즈 내경이 4.7 mm, 렌즈 간격이 7.62 cm일 때 마지막 렌즈와 ISPM의 측정공간 사이의 거리를 5.08 cm에서 15.24 cm로 증가시킨 경우 입자 크기에 따른 측정효율의 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 대체로  $l_s$ 가 큰 경우의 측정효율이 낮은데, 이것은 브라운 운동에 의해 렌

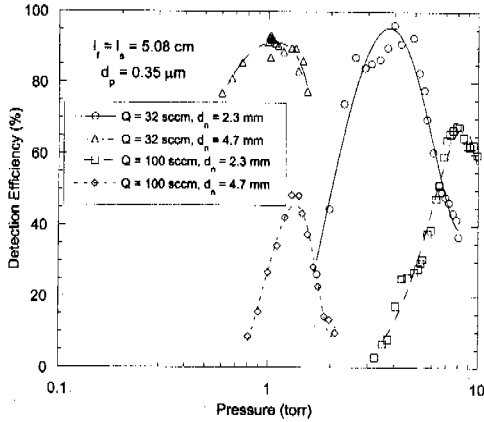


Fig. 7 Dependence of detection efficiencies on chamber pressure

즈의 하류로 갈수록 입자 빔이 커져 ISPM의 측정공간을 지나가는 입자 수가 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.3 최적 스톡스 수

입자 빔의 크기는 스톡스 수에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 Liu 등<sup>(5)</sup>의 연구결과를 근거로 최적 스톡스 수를 1.0으로 가정하여 설계된 공기역학적 렌즈를 사용하여 실험을 수행하였다.<sup>(16)</sup> 저압에서 스톡스 수는 챔버 압력, 입경 등의 함수이므로,<sup>(5,16)</sup> 챔버 압력을 고정시키고 입경을 바꾸거나 입경을 고정시키고 챔버 압력을 바꾸면 스톡스 수는 변한다. 그러므로, 본 실험조건에 맞는 최적 스톡스 수를 구하기 위하여 입경을 고정시키고 챔버 압력을 변화시키면서 ISPM의 측정효율을 구하였다.

입경이 0.35  $\mu\text{m}$ 인 입자에 대하여 4가지 실험조건에서 챔버 압력에 따른 측정효율의 변화를 구하여 Fig. 7에 나타냈다. 그림을 보면, 측정효율은 챔버 압력에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다. 이것은 챔버 압력에 따라 생성되는 입자 빔의 크기가 달라지기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 식 (1)에 나타난 바와 같이 특정 압력보다 낮거나 높으면 스톡스 수가 달라지므로, 생성되는 입자 빔의 크기가 ISPM의 측정공간의 단면보다 커져 측정효율이 낮아지는 것으로 추정된다.

그림에서 최대 측정효율을 나타내는 챔버 압력으로부터 최적 스톡스 수를 구하면 실험조건마다

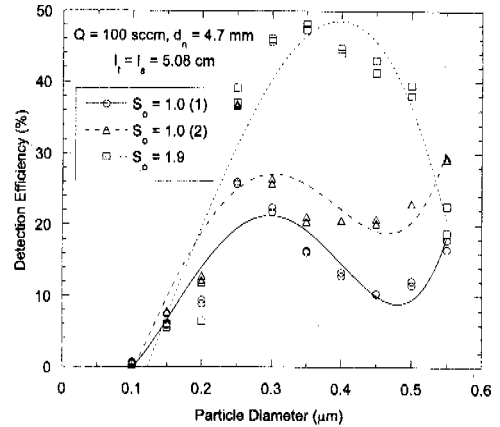


Fig. 8 Effect of the optimum Stokes number on the detection efficiency

최적 스톡스 수가 달라짐을 알 수 있다. 즉,  $Q = 32 \text{ sccm}$ ,  $d_n = 2.3 \text{ mm}$ 일 때  $S_o$ 는 약 0.7,  $Q = 32 \text{ sccm}$ ,  $d_n = 4.7 \text{ mm}$ 일 때  $S_o$ 는 약 1.0,  $Q = 100 \text{ sccm}$ ,  $d_n = 2.3 \text{ mm}$ 일 때  $S_o$ 는 약 0.4,  $Q = 100 \text{ sccm}$ ,  $d_n = 4.7 \text{ mm}$ 일 때  $S_o$ 는 약 1.9이다. 실험적으로 구한 최적 스톡스 수는 유량이 32 sccm인 경우 실험시 가정된 최적 스톡스 수( $S_o = 1.0$ )와 유사하지만, 유량이 100 sccm인 경우 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

유량이 100 sccm, 렌즈 내경이 4.7 mm일 때 최적 스톡스 수를 본 실험을 통하여 구한 1.9로 설정한 후 최적 압력을 변경하여 실험한 결과를 앞에서 최적 스톡스 수를 1.0으로 가정하여 얻은 실험결과와 비교하여 Fig. 8에 나타냈다. 그림을 보면, 0.25  $\mu\text{m}$  이하인 작은 입자의 측정효율은 비슷하지만, 실험적으로 구한 최적 스톡스 수에서 입자 빔을 만들어 줌으로써 0.3~0.5  $\mu\text{m}$  범위인 입자의 측정효율이 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8에서  $S_o = 1.0$ 인 경우 렌즈를 2회 반복 설치하여 측정된 결과를 나타냈는데, 입경이 작은 경우(0.2  $\mu\text{m}$  이하)보다는 입경이 큰 경우(0.25  $\mu\text{m}$  이상) 측정효율의 차이가 커짐을 알 수 있다. 이것은 입자 빔과 ISPM 측정공간의 불일치에 기인된 오차로 추정된다.

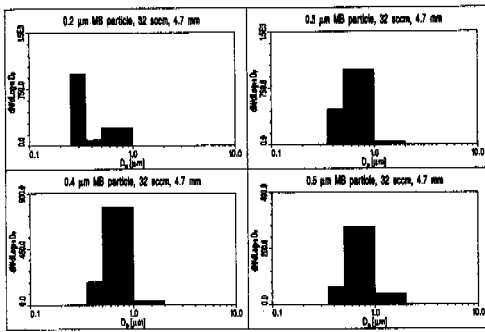


Fig. 9 Particle size responses of the ISPM for  $Q = 32$  sccm

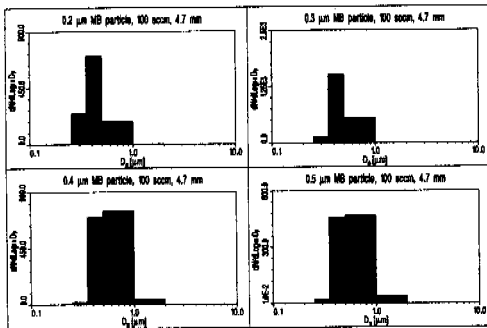


Fig. 10 Particle size responses of the ISPM for  $Q = 100$  sccm

3.4 입자 크기 반응

실험에 사용된 ISPM은 입자 크기를 4채널로 분류하여 측정하므로, 본 연구에서는 ISPM의 입자 크기 반응특성을 살펴보았다. Fig. 9는 유량이 32 sccm이고, 렌즈 내경이 4.7 mm일 때 4가지 입경에 대한 ISPM의 입자 크기 반응의 대표적인 예를 나타낸 것이다. Fig. 10은 유량이 100 sccm이고, 렌즈 내경이 4.7 mm일 때 4가지 입경에 대한 ISPM의 입자 크기 반응의 대표적인 예를 나타낸 것이다. Fig. 9를 보면, 0.3~0.5 μm의 입자 크기 반응은 서로 비슷함을 알 수 있다. Fig. 10을 보면, 0.2 μm와 0.3 μm의 입자 크기 반응이 서로 유사하고, 0.4 μm와 0.5 μm의 입자 크기 반응이 서로 매우 비슷함을 알 수 있다. Fig. 9와 10을 비교하면, 동일한 입경에서 유량이 달라짐에 따라 입자 크기 분포가 크게 달라짐을 알 수 있다. 즉, 유량이 32 sccm인 경우 대부분의 입자는 세 번째 채널에서 측정되고 있으나(0.2 μm인

경우 제외), 유량이 100 sccm인 경우 두 번째 채널에서 많이 측정되거나 두 번째 채널과 세 번째 채널에서 비슷한 정도로 입자가 측정되는 분포를 보인다.

질량 유량에 따라 측정효율이 크게 다르고,(Fig. 4 참조) 입자 크기 반응도 매우 다르다.(Fig. 9와 10 참조) 질량 유량이 변함에 따라 진공챔버내 기류 속도가 달라지므로, ISPM의 측정공간을 지나가는 입자 속도도 변하게 되어 측정효율과 입자 크기 반응이 다르게 나타나는 것으로 생각된다. 이것으로부터 측정효율은 입자 크기 반응과 밀접한 관련이 있을 것으로 여겨진다. 이러한 추론은 감압상태에서 ISPM의 성능특성에 대한 실험결과로부터 유추되는 추론과 일치한다.<sup>(6)</sup>

4. 결 론

본 연구에서는 저압상태에서 동일한 3개의 공기역학적 렌즈를 사용하여 입자 빔을 만들어 반도체 제조장비의 입자오염을 측정하는데 많이 사용되고 있는 ISPM(PMS model Vaculaz-2)의 성능특성을 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 공기역학적 렌즈를 사용함으로써 ISPM의 측정효율을 이론적 측정효율의 상한값보다 높일 수 있으며, 측정효율은 질량 유량에 따라 크게 달라진다.

둘째, 측정효율은 렌즈와 ISPM 사이의 거리에 따라 약간 달라지지만, 렌즈 간격에는 거의 영향을 받지 않는다.

셋째, 측정효율은 챔버 압력(스톡스 수)에 따라 크게 달라진다. 측정효율이 최대가 되는 최적 스톡스 수는 실험조건에 따라 다르며, 본 실험조건에서 최적 스톡스 수는 0.4~1.9 범위이었다.

넷째, 질량 유량(기류 속도)에 따라 ISPM의 입자 크기 반응이 크게 달라지며, 이러한 크기 반응의 차이는 측정효율의 차이와 밀접한 관련이 있을 것으로 여겨진다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 해외연수 지원에 의해 미국의 University of Minnesota에서 수행한 연구결과의 일부이며, Benjamin Y. H. Liu 교수를

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) Caldwell, R., Pui, D. Y. H., Szymanski, W. W., and Liu, B. Y. H., 1990, "Performance of the High Yield Technology Inc. PM-100 In Situ Particle Flux Monitor," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 12, pp. 981~991.
- (3) 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.
- (4) Liu, B. Y. H., and Jin, X., 1997, "Real-Time Particle Monitoring in a Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition System," In Proceedings of the IES 43rd Annual Technical Meetings, Institute of Environmental Sciences, Los Angeles, California, May 4~8, pp. 34~42.
- (5) 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.
- (6) 배귀남, 1998, "감압상태에서 In-Situ Particle Monitor의 성능특성," 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제11호, pp. 1564~1570.
- (7) 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 the Environmental Sciences*, Nov./Dec., pp. 40~45.
- (8) 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.
- (9) 안진홍, 안강호, 1999, "임계 오리피스를 통과한 입자의 운동특성과 입자 빔에 관한 수치적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제10호, pp. 1240~1247.
- (10) Sato, S., Chen, D. R., and Pui, D. Y. H., 1999, "Particle Behavior at Low Pressure: Particle Deposition in a Tube with an Orifice," In Proceeding of the First Asia Aerosol Conference, Nagoya, Japan, July 27~29, pp. 352~353.
- (11) 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.
- (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) Rao, N. P., Navascues, J., and Fernandez de la Mora, J., 1993, "Aerodynamic Focusing of Particles in Viscous Jets," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 24, No. 7, pp. 879~892.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 배귀남, 1999, "저압상태에서 공기역학적 렌즈를 이용한 입자 빔의 생성 및 크기 제어," 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제10호, pp. 1320~1326.
- (17) Szymanski, W. W., and Liu, B. Y. H., 1986, "On the Sizing Accuracy of Laser Optical



- Particle Counters," *Particle Characterization*, Vol. 3, pp. 1~7.
- (18) 안강호, 김남효, 이종호, 배귀남, 1996, "Differential Mobility Analyzer(DMA) 내의 입자 운동 및 특성 분석," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제6호, pp. 2005~2013.
- (19) Particle Measuring Systems, Vaculaz-2, -3, -4(Monitor) Operator's Manual, Boulder, Colorado, U.S.A.