

## 감압상태에서 In-Situ Particle Monitor의 성능특성

배 귀 남\*  
(1998년 3월 18일 접수)

### Performance Characteristics of In-Situ Particle Monitors at Sub-Atmospheric Pressures

Gwi-Nam Bae

**Key Words:** In-Situ Particle Monitor(실시간 입자측정기), Subatmospheric Pressure(감압), Detection Efficiency(측정효율), Lower Detection Limit(최소 측정입경), Particle Size Response(입자크기 반응)

#### 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 subatmospheric pressures has been studied. We created uniform upstream conditions of particle concentration and measured the detection efficiency, the lower detection limit, and the size response of the ISPM using uniform sized methylene blue aerosol particles. The effect of particle size, particle velocity, particle concentration, and system pressure on the detection efficiency was examined. Results show that the detection efficiency of the ISPM decreases with decreasing chamber pressure, and with increasing mass flow rate. The lower detection limit of the ISPM, determined at 50 % of the measured maximum detection efficiency, was found to be about 0.15~0.2  $\mu\text{m}$ , which is similar to the minimum detectable size of 0.17  $\mu\text{m}$  given by the manufacturer. The particle size response of the detector was varied with the mass flow rate at a given system pressure, which may affect the detection efficiency of the ISPM.

#### 1. 서론

반도체 칩의 생산수율을 향상시키기 위하여 생산환경의 오염제어에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있는데, 수 년 전부터 반도체 제조장비 내 입자오염이 중요한 문제로 인식되고 있다. 반도체 제조공정은 대부분 진공상태에서 이루어지므로, 초기에는 진공챔버 내의 입자측정 및 입자 발생 원인에 대한 연구가 수행되었다. 그 후 제조장비의 대표적 구성요소인 로드록(loadlock),

배기라인(exhaust line), 공정챔버(process chamber) 내에서 입자를 측정하여 제조장비 내 입자오염 문제를 다루고 있다.

반도체 제조장비 내 입자오염 수준을 파악하기 위하여 제조공정 중에 모니터 웨이퍼(monitor wafer)를 삽입하여 제조장비 내에서 웨이퍼 표면에 부착된 입자 수를 표면부착 입자계수기(wafer surface scanner)로 측정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 오염입자와 웨이퍼상의 입자 부착간의 관계를 직접적으로 파악할 수 있지만, 장비 내 입자오염을 실시간으로 파악할 수 없는 단점이 있다.

모니터 웨이퍼를 사용한 오염평가 방법의 단점을 보완하기 위하여 입자의 광 산란 현상을 이용하여 실시간으로 진공중 입자를 측정할 수 있는

\* 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

계측기(in-situ particle monitor, ISPM)가 개발되어 진공상태에서 공정이 이루어지는 제조장비의 오염제어에 널리 사용되고 있다. ISPM은 공기중 입자계수기와 달리 펌프로 공기를 흡입하지 않고, 입자가 중력이나 저압 기류를 따라 이동하여 레이저 빔을 통과할 때 검출한다. 이처럼 레이저 빔이 지나가는 좁은 측정공간(sensing volume)에 입자를 모으지 않으므로, ISPM의 입자 측정효율이 매우 낮다. 일반적으로 ISPM의 특성은 진공중 입자이동의 제한, 감도(sensitivity), 그리고 현재 센서설계의 잡음면역(noise immunity)과 관련된다.<sup>(1)</sup> 진공장비 내에서 입자운동은 공기역학적 항력, 중력, 열영동력, 정전기력, 플라즈마에서 이온 항력 등에 의해 영향을 받는다. 이러한 힘들의 균형이 제조장비 내 존재하는 입자 중에서 어느 정도가 웨이퍼에 침착하고, 얼마만큼의 입자가 ISPM에 의해 측정되는 영역으로 이동하는가를 좌우한다. ISPM의 감도는 샘플체적, 입자속도, 입자크기에 좌우된다. 측정원리상 ISPM의 입자 측정효율이 낮고, 특별한 경우를 제외하면 측정된 웨이퍼 오염도와 ISPM 데이터간의 상관성이 별로 없는 문제점이 지적되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 문제점의 원인을 밝혀내고, ISPM의 응용성을 높이기 위해서는 진공상태에서 입자거동과 ISPM의 성능특성이 규명되어야 한다고 생각된다.

ISPM의 성능특성에 대한 연구가 일부 수행되었는데, Caldow 등<sup>(2)</sup>은 처음으로 대기압 상태에서 ISPM(HYT model PM-100)의 다양한 성능특성에 대한 실험을 수행하였다. 즉, 입자크기, 입자농도, 기류속도 등이 측정효율에 미치는 영향을 밝혀냈다. Jin과 Liu<sup>(3,4)</sup>는 감압(5~300 torr), 대유량(2.0~26.7 slpm, standard liters/min) 조건에서 입자크기, 기류속도, 압력이 ISPM(TSI model 7340)의 측정효율에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다. 또한, 배기 라인에서 샘플링 라인을 평행하게 설치하여 입자를 측정함으로써 측정효율을 향상시킬 수 있음을 보여주었다. Liu 등<sup>(5,6)</sup>은 저압(0.2~10 torr), 소유량(108, 685 sccm, standard cm<sup>3</sup>/min) 조건에서 공기역학적 렌즈(aerodynamic focusing lens)를 사용하여 ISPM(TSI model 7340)의 측정효율을 크게 향상시킬 수 있음을 보여주었다. ISPM이 반도체 제조장비의 오염제어에 널리 사용되고 있는 중요한 측정장비이지만, 진공상태에서 ISPM의 성능특성

은 잘 알려져 있지 않은 실정이다.

일반적으로 진공상태에서 ISPM의 성능을 평가하기 위해서는 진공챔버 내에서 공간적으로 균일한 입자분포를 만들어 주어야 한다. Bae 등<sup>(7)</sup>의 실험결과에 의하면, 약 10 torr 이상의 감압상태에서는 균일한 입자분포를 만들 수 있다. 그러나, 이보다 낮은 압력에서는 공간적으로 균일한 입자분포를 얻기가 매우 어렵다.<sup>(7,8)</sup> 진공상태의 넓은 압력범위에서 ISPM의 성능특성을 파악하기 위하여 압력범위에 따라 2가지 시험방법을 개발하였다. 첫 번째 방법은 감압상태에서 공간적으로 균일한 입자분포를 만들어 ISPM의 성능을 평가하는 것으로, 본 논문에서 자세하게 다루었다. 두 번째 방법은 저압범위에서 Liu 등<sup>(5,6)</sup>이 개발한 공기역학적 렌즈를 ISPM의 상류에 설치하여 매우 작은 입자빔을 만들어 ISPM의 성능을 평가하는 것으로, 다음에 논문으로 보고할 계획이다.

본 연구에서는 진공상태에서 공간적으로 균일한 입자분포를 만들어 줄 수 있는 압력범위에서 ISPM(PMS model Vaculaz-2)의 성능특성을 밝혀내는 실험을 수행하였다. 즉, 단분산 메틸렌 블루(methylene blue) 입자를 사용하여 감압(25~200 torr), 소유량(100, 654 sccm) 조건에서 ISPM의 측정효율(detection efficiency), 최소 측정입경(lower detection limit), 입자크기 반응(particle size response)을 실험적으로 조사하였다. 또한, 입자농도가 측정효율에 미치는 영향도 살펴보았다.

## 2. 실험

보통 입자계수기의 성능평가에서는 시험용 입자로 구형의 PSL(polystyrene latex) 입자(밀도 = 1.05 g/cm<sup>3</sup>, 굴절계수 = 1.59-0i)를 사용하나, 본 연구에서는 이전 연구결과<sup>(7)</sup>를 활용하기 위하여 단분산 메틸렌 블루 입자(밀도 = 1.26 g/cm<sup>3</sup>, 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 광학계 특성에 따라 이들 두 입자의 크기에 따른 반응특성(산란 광)이 다를 수 있다. 공기중 입자계수기의 성능특성에 관한 연구<sup>(9)</sup>에 의하면, 입경이 약 0.3 μm보다 큰 경우 빛을 흡수하는 성질이 입자의 반응특성에 큰 영향을 미치지만, 입경이 이보다 작은 경우에는 비슷

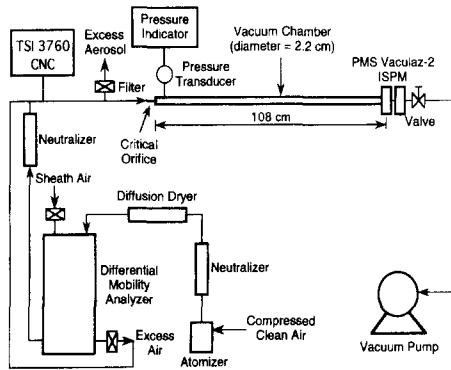


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system.

한 반응특성을 나타낸다. 따라서, 본 연구에서 얻은 메틸렌 블루 입자에 대한 실험결과 중에서 측정효율에 대한 것은 PSL 입자의 경우와 유사할 것으로 추정되고, 입자크기분포는 입경에 따라 PSL 입자의 경우와 다를 수 있다고 생각된다.

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. 시험용 입자의 발생과정은 다음과 같다. 먼저 분무기(atomizer)<sup>10</sup>를 사용하여 다분산 메틸렌 블루 입자를 발생시킨 후 습기와 정전기를 제거하기 위하여 건조기(diffusion dryer)와 중화기(neutralizer)를 통과시켰다. 이렇게 만든 다분산 입자를 전기적 이동도에 따라 입자크기를 분류하는 DMA(differential mobility analyzer)<sup>11</sup>를 통과시켜 단분산 입자만을 뽑아낸 후 중화기를 거쳐 시험용 입자로 사용하였다. 이렇게 대기압 상태에서 만든 단분산 메틸렌 블루 입자를 크리티컬 오리피스(critical orifice)를 통하여 내경 2.2 cm인 스테인레스 스틸관으로 만든 진공챔버로 공급하였다. 일정한 질량유량(mass flow rate)을 진공챔버로 공급하기 위하여 크리티컬 오리피스를 사용하였으며, 동일한 질량유량에서 챔버내 유동특성을 나타내는 레이놀즈수(Re)는 같지만, 챔버 내 압력에 따라 체적유량(volumetric flow rate)은 달라지므로 기류속도도 달라진다.<sup>13</sup> 챔버는 진공펌프를 사용하여 감압상태로 만들었으며, 챔버 내 압력을 압력센서(MKS Instruments Inc.)로 측정하면서 진공밸브를 사용하여 원하는 압력으로 맞추어 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 동일 모델인 2대의 ISPM을 사용하였는데, 첫 번째 ISPM은 크리티컬 오리피스

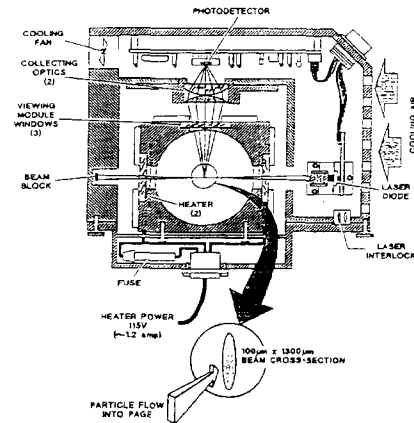


Fig. 2 Optics diagram of the PMS Vaculaz-2 ISPM.

로부터 108 cm 하류에 위치시켰으며, 두 번째 ISPM은 이 보다 10 cm 하류에 인접하게 설치하였다. 이곳에서 ISPM으로 입자 수를 측정하였다. 실험에 사용된 ISPM 광학계의 개략도를 Fig. 2에 나타냈다.<sup>12</sup> ISPM의 측정효율을 구하기 위한 기준 입자농도는 응축핵 계수기(condensation nucleus counter, CNC, TSI model 3760)로 대기압 상태인 크리티컬 오리피스 상류에서 측정하였다.

실험은 Table 1에 나타낸 바와 같이 질량유량이 100, 654 sccm(Re = 6.4, 42)이고, 진공챔버 내에서 공간적으로 균일한 입자분포를 나타낼 수 있는 압력(25~200 torr) 조건에서 수행하였다.<sup>7</sup> 단분산 메틸렌 블루 입자의 크기는 반도체 제조 공정에서 중요하게 다루어지고 있는 미소 입경 범위(0.1~0.55  $\mu\text{m}$ )에서 변화시켰다. 입자농도가 측정효율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 진공챔버로 공급되는 에어로졸의 입자농도를 100~1000 개/ $\text{cm}^3$  범위로 변화시켰다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입자농도의 영향

ISPM은 입자의 광 산란 현상을 이용하여 개개의 입자를 측정하는데, 측정공간에 2개 이상의 입자가 동시에 존재하면 입자 수와 크기를 잘못 측정하게 된다. 일반적으로 입자농도가 높아지면 이러한 현상이 나타나게 되는데, 이것을 동소공존의 영향(coincidence effect)이라 부른다.

**Table 1** Experimental conditions.

Mass flow rate (sccm)	Chamber pressure (torr)	Gas flow velocity (cm/s)	Reynolds number
100	30	11.1	6.4
	50	6.7	
	100	3.3	
654	25	87.2	42
	30	72.6	
	40	54.5	
	50	43.6	
	70	31.1	
	100	21.8	
	150	14.5	
200	10.9		

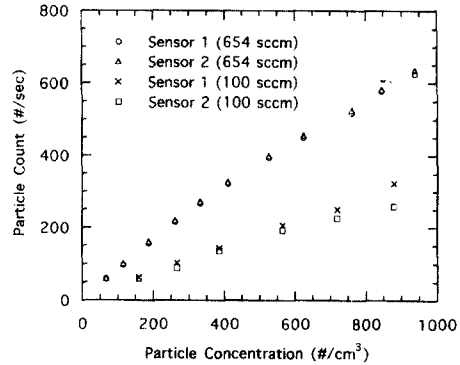
압력이 50 torr일 때 입경이 0.35 μm인 입자를 사용하여 입자농도가 ISPM의 입자측정에 미치는 영향을 살펴보았다. CNC로 측정된 입자농도에 따른 두 ISPM의 반응을 Fig. 3에 나타냈다.

ISPM의 측정효율(η)은 식 (1)에 나타낸 바와 같이 진공챔버의 단면을 지나가는 총 입자 수(N<sub>t</sub>)와 ISPM으로 측정된 입자 수(N<sub>i</sub>)의 비로 구할 수 있다.

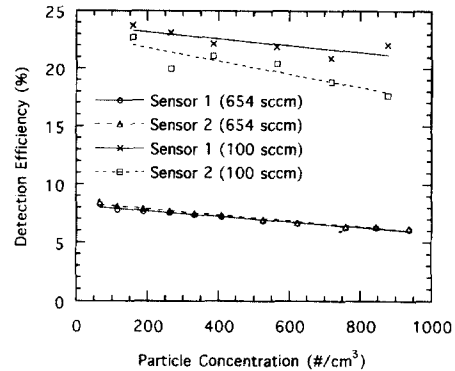
$$\eta = \frac{N_i}{N_t} = \frac{60 N}{Q \cdot C} \quad (1)$$

여기서, N은 ISPM으로 측정된 시간당 입자 수(개/sec), Q는 진공챔버로 유입되는 질량유량(cm<sup>3</sup>/min), C는 CNC로 측정된 입자농도(개/cm<sup>3</sup>)이다.

Fig. 4는 Fig. 3의 측정 데이터를 측정효율로 변환하여 입자농도에 따른 측정효율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 ISPM의 반응이 입자농도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것처럼 보이지만, Fig. 4에서는 측정효율이 완만하지만 서서히 감소함을 분명히 알 수 있다. 유량이 654 sccm일 때 ISPM의 측정효율은 6~9 %이고, 유량이 100 sccm일 때는 17~24 %이다. 입자농도의 변화에 따른 측정효율 곡선의 기울기와 ISPM 센서간의 차이는 질량유량에 따라 달라짐을 알 수 있다. Caldow 등<sup>(2)</sup>은 대기압 상태에서 ISPM(HYT



**Fig. 3** Effect of particle concentration on the response of two ISPMs.



**Fig. 4** Effect of particle concentration on the detection efficiency.

model PM-100)의 측정효율이 입자농도의 영향을 받지 않는다고 보고하였으나, 본 실험에서는 동소공존의 영향이 분명히 나타남을 확인하였다.

3.2 측정효율과 최소 측정입경

3가지 압력조건(30, 50, 100 torr)에서 입경에 따른 측정효율의 변화를 Fig. 5와 6에 나타냈다. 그림을 보면, 주어진 압력에서 약 0.25 μm까지는 입경이 증가함에 따라 ISPM의 측정효율이 증가하지만, 그 후에는 거의 비슷함을 알 수 있다. 측정효율의 챔버압력에 대한 의존도는 질량유량이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

ISPM의 측정효율은 진공챔버 내 기류속도에

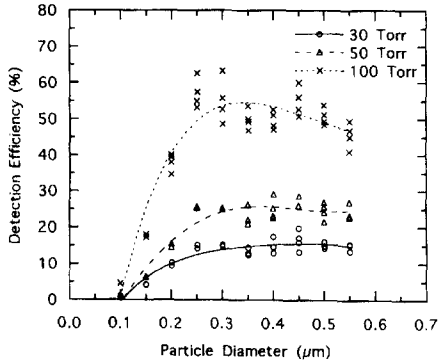


Fig. 5 Dependence of detection efficiencies on particle diameter at 100 sccm.

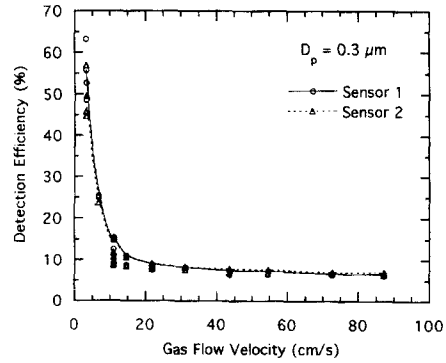


Fig. 7 Dependence of detection efficiencies on gas flow velocity for  $D_p = 0.3 \mu\text{m}$ .

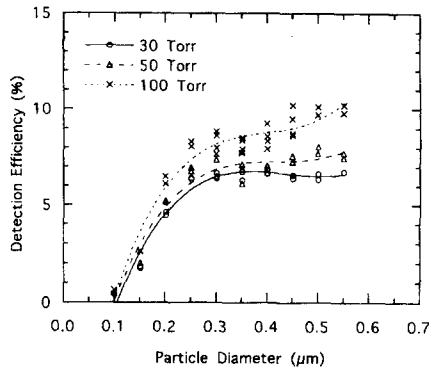


Fig. 6 Dependence of detection efficiencies on particle diameter at 654 sccm.

따라 달라진다고 알려져 있다.<sup>(1, 3)</sup> 질량유량이 일정할 때 챔버압력을 변화시키면 체적유량이 달라져 기류속도도 변한다. 입경( $D_p$ )이  $0.3 \mu\text{m}$ 인 입자에 대하여 기류속도에 따른 측정효율의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 질량유량이 100 sccm일 때 측정 데이터의 기류속도는 12 cm/s 이하이고, 질량유량이 654 sccm일 때의 기류속도는 10 cm/s 이상이다.(Table 1 참조) Fig. 7을 보면, 기류속도가 20 cm/s 이하에서는 측정효율이 급격히 감소하지만, 그 후에는 서서히 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향은 대기압 상태에서 수행된 실험결과<sup>(2)</sup>와 비슷하다. 이것으로부터 ISPM의 측정효율은 질량유량과 챔버압력을 결합한 기류속

도로 잘 표현된다는 것을 알 수 있다. Fig. 5와 6에서 챔버압력이 감소하거나 질량유량이 증가함에 따라 측정효율이 감소하는데, 이것은 진공챔버 내 기류속도가 증가하기 때문이다.

ISPM의 이론적 측정효율의 상한값은 일반적으로 20% 이하이다.<sup>(2,6)</sup> 본 연구에서는 25 mm 배기 라인에 사용되는 ISPM을 사용하였으며, 이것의 샘플링 면적은 입경이  $0.35 \mu\text{m}$  이상일 때  $26 \sim 32 \text{ mm}^2$ 이므로 이론적 측정효율의 상한값은 6.8~8.4%이다.<sup>(12)</sup> 그런데, Fig. 7에서 기류속도가 30 cm/s 이하인 경우 실험적으로 구한 측정효율이 이론적 상한값보다 큰 것은 예상하지 못한 특이한 결과이다. 기류속도가 매우 낮아 입자가 재순환되면서 한 번 이상 측정된 것으로 여겨진다. 제작회사에서는 0.1~10 m/s 범위의 기류속도에서 ISPM을 사용하도록 하고 있는데, 최저 기류속도를 상향조정할 필요가 있다고 생각된다. Fig. 7로부터 기류속도가 30~90 cm/s 범위에서 실험에 사용된 ISPM의 측정효율은 6~8% 범위임을 알 수 있다.

일반적으로 입자계수기는 공기를 흡인하여 측정공간에서 개개의 입자를 하나씩 측정하도록 설계되어 있으므로, 일정 크기 이상의 입자를 100% 측정할 수 있다. 그러므로 보통 측정효율이 50% 되는 입경을 최소 측정입경이라 부른다. 그런데, ISPM은 이론적으로 최대 측정효율이 100%가 될 수 없으므로, 여기서는 일반적인 입자계수기의 경우와 유사하게 최소 측정입경을 실험적으로 구한 최대 측정효율의 50% 되는 입경으로

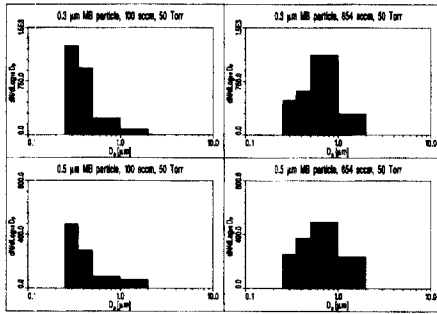


Fig. 8 Comparison of particle size responses of the ISPM.

정의하였다. 이러한 정의에 의하면, Fig. 5와 6으로부터 ISPM의 최소 측정입경은 질량유량과 챔버압력에 무관하게 0.15~0.2 μm임을 알 수 있다. 이것은 제작회사에서 말하는 최소 측정입경(minimum detectable size)인 0.17 μm와 매우 유사하다.

### 3.3 입자크기 반응

실험에 사용된 ISPM은 입자의 크기를 4채널로 분류하여 측정하므로, 본 연구에서는 ISPM의 입자크기 반응특성을 살펴보았다. Fig. 8은 압력이 50 torr로 일정할 때 2가지 입경(0.3, 0.5 μm)에 대하여 질량유량에 따른 ISPM의 입자크기 반응을 비교하여 나타낸 것이다. 동일 유량에서는 입경에 무관하게 ISPM은 거의 비슷한 크기반응을 나타내고 있다. 반면에, 동일한 입경에서 유량이 달라짐에 따라 입자크기분포가 크게 달라짐을 알 수 있다. 즉, 유량이 100 sccm인 경우 대부분의 입자는 아래쪽 두 채널에서 측정되고 있으나, 유량이 654 sccm인 경우 세 번째 채널에서 입자가 가장 많이 측정되는 분포를 보인다.

챔버압력이 동일할 때 질량유량에 따라 측정효율이 크게 다르고, (Fig. 5와 6 참조) 입자크기 반응도 매우 다르다. (Fig. 8 참조) 질량유량이 변함에 따라 진공챔버 내 기류속도가 달라지므로, ISPM의 측정공간을 지나는 입자속도도 변하게 되어 측정효율과 입자크기 반응이 다르게 나타나는 것으로 생각된다. 이것으로부터 측정효율은 입자크기 반응과 밀접한 관련이 있을 것으로 여겨진다.

## 4. 결론

본 연구에서는 반도체 제조장비의 입자오염을 측정하는데 많이 사용되고 있는 ISPM(PMS model Vaculaz-2)의 성능특성을 감압상태에서 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 입자농도가 증가함에 따라 ISPM에서도 동소공존의 영향이 나타남을 실험적으로 확인하였다.

둘째, ISPM의 측정효율은 기류속도(입자속도)의 함수로 잘 나타내어지고, 기류속도가 30~90 cm/s 범위에서 본 실험에 사용된 ISPM의 측정효율은 6~8 %이었다.

셋째, 실험적으로 구한 최대 측정효율의 50 % 되는 입경으로 정의한 ISPM의 최소 측정입경은 질량유량과 챔버압력에 무관하게 0.15~0.2 μm이었으며, 이것은 제작회사에서 말하는 최소 측정입경(minimum detectable size)인 0.17 μm와 매우 유사하다.

넷째, 기류속도에 따라 ISPM의 입자크기 반응이 크게 달라지며, 이러한 크기반응의 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) Caldow, 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., 1994, *Theoretical and Experimental Evaluation of Aerodynamic Lenses for Producing Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence*, Ph.D thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, MN, U.S.A.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 안강호, 배귀남, 1994, "새로 개발한 분무 입자 발생기의 성능평가," 대한기계학회 '94년도 춘계학술대회논문집(II), pp.381-384.
- (11) 안강호, 김남효, 이종호, 배귀남, 1996, "Differential Mobility Analyzer(DMA) 내의 입자운동 및 특성 분석," 대한기계학회논문집(B), 제20권, 제6호, pp.2005-2013.
- (12) Particle Measuring Systems, *Vaculaz-2, -3, -4(Monitor) Operator's Manual*, Boulder, Colorado, U.S.A.