

# Wafer Surface Scanner를 이용한 반도체 웨이퍼상의 입자 침착속도의 측정

## Measurement of Particle Deposition Velocity toward a Horizontal Semiconductor Wafer Using a Wafer Surface Scanner

배 귀 남\* · 박 승 오\*\* · 이 춘 식\* · 명 현 국\*\*\* · 신 흥 태\*  
 G.N. Bae, S.O. Park, C.S. Lee, H.K. Myong, H.T. Shin

**Key words :** Particle Deposition Velocity(입자의 침착속도), Semiconductor Wafer(반도체 웨이퍼), Convection(대류), Diffusion(확산), Sedimentation(중력침강)

### Abstract

Average particle deposition velocity toward a horizontal semiconductor wafer in vertical airflow is measured by a wafer surface scanner(PMS SAS-3600). Use of wafer surface scanner requires very short exposure time normally ranging from 10 to 30 minutes, and hence makes repetition of experiment much easier. Polystyrene latex (PSL) spheres of diameter between 0.2 and 1.0  $\mu\text{m}$  are used. The present range of particle sizes is very important in controlling particle deposition on a wafer surface in industrial applications. For the present experiment, convection, diffusion, and sedimentation comprise important agents for deposition mechanisms. To investigate confidence interval of experimental data, mean and standard deviation of average deposition velocities are obtained from more than ten data set for each PSL sphere size. It is found that the distribution of mean of average deposition velocities from the measurement agrees well with the predictions of Liu and Ahn(1987) and Emi et al.(1989).

### 기 호 설 명

$C$  : 입자의 농도  
 $C_c$  : Cunningham 보정계수  
 $C_\infty$  : 상류측의 입자 농도  
 $d_i$  : 등속 분사튜브의 내경  
 $D$  : 입자의 확산계수  
 $D_p$  : 입자의 직경  
 $D_w$  : 웨이퍼의 직경  
 $g$  : 중력가속도

$h$  : 등속 분사튜브와 웨이퍼간의 거리  
 $H$  : ULPA(Ultra Low Penetration Air) 필터로부터의 하방 거리  
 $J$  : 웨이퍼 표면으로의 입자유속  
 $N$  : 입자수  
 $N_a$  : 단위 면적당 웨이퍼상에 침착된 입자수  
 $NMD$  : 입자의 중간직경(number median diameter)  
 $r$  : 웨이퍼 중심으로부터의 거리  
 $R$  : 입자침착챔버내의 시험단면상에서 중심으로부터의 거리  
 $Re(\equiv \frac{uD_w}{\nu})$  : Reynolds 수

\*정회원, 한국과학기술연구원 열유체공학 연구실

\*\*정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

\*\*\*정회원, 국민대학교 자동차공학과

$Sc (\equiv \frac{v}{D})$  : Schmidt 수

$t$  : 노출시간(침착시간)

$u$  : 수직방향의 기류속도

$v$  : 입자의 침착속도

$\overline{v_d}$  : 대류와 확산에 의한 입자의 평균 침착속도

$\overline{v_{ds}}$  : 대류, 확산 및 중력침강에 의한 입자의 평균 침착속도

$(\overline{v_{ds}})^*$  :  $w_e = 6 \text{ mm}$  일 때의  $\overline{v_{ds}}$

$v_r$  : 대류, 확산 및 중력침강에 의한 입자의 국부 침착속도

$v_s$  : 입자의 중력침강속도

$w_e$  : 웨이퍼상의 엣지 제외 폭

$\mu$  : 공기의 동점성계수

$\nu$  : 공기의 점성계수

$\rho_p$  : 입자의 밀도

$\sigma_g$  : 기하학적 표준편차

## 1. 서 론

반도체 웨이퍼 표면상의 입자침착에 의한 패턴 결함은 DRAM (Dynamic Random Access Memory)으로 대표되는 반도체 제조공정에 있어서 제품의 수율 저하의 최대 원인이 되고 있다. 따라서, 이것을 방지하기 위하여 입자침착제어에 관한 연구가 다각적으로 수행되고 있으며, 이러한 연구들은 크게 웨이퍼상의 입자침착 현상을 개략적으로 예측할 수 있는 정체점 근처의 평면유동이나 축대칭 유동내의 입자침착과 같은 기초 연구와 클린룸내에서 웨이퍼가 처한 환경을 실제와 유사하게 모델링하여 실험 또는 수치해석적으로 웨이퍼상의 입자침착 현상을 규명하는 연구로 분류된다. 그리고 웨이퍼상의 입자침착에 영향을 끼치는 메카니즘으로 중력침강, 충돌, 대류, 브라운 확산, 난류확산, 정전기에 의한 상호작용 및 열영동 등이 알려져 있으므로, 각 메카니즘을 복합적으로 작용시켜 이들 메카니즘이 입자침착에 관여하는 정도를 규명하는 관점에서 연구가 수행되고 있다. 또한, 웨이퍼상의 입자 침착에 관한 문헌들을 보면, 연구에 주로 사용되는 변수로는 기류속도, 입자의 종류 및 입경, 웨이퍼의 방향, 웨이퍼의 크기, 정전기, 웨이퍼와 주위 공기와의 온도차, 주위 온도 및 습도 등이다. Pui 등(1990)은 입자침착에 관한 이론 및 실험적인 연

구들을 분류하여 표로 정리하였다.<sup>(1)</sup>

반도체 웨이퍼상의 입자침착을 제어하기 위해서는 기본적으로 입경에 따른 입자의 침착속도 (deposition velocity)를 아는 것이 중요하며, 클린룸내에 놓인 웨이퍼상의 입자침착에 관여하는 가장 기본적인 침착 메카니즘은 대류, 확산 및 중력침강이다. 이와 같은 침착 메카니즘과 입경과의 관계를 살펴보면, 입경이  $0.1 \mu\text{m}$ 이하인 입자의 경우 대류와 확산이 지배적인 침착 메카니즘이 되고, 입경이  $1.0 \mu\text{m}$  이상인 입자의 경우에는 중력침강이 지배적인 침착 메카니즘이 된다. 그리고 입경이  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 인 입자의 경우에는 이들 침착 메카니즘이 모두 중요하게 작용한다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서는 이들 메카니즘에 관해서만 한정하여 다루었으며, 이와 관련된 실험적인 연구들을 Table 1에 비교하여 나타냈다.

일반적으로 입자의 침착속도는 아래 식(1)과 같이 정의된다.

$$v = \frac{J}{C_{\infty}} = \frac{N_a}{C_{\infty} t} \quad (1)$$

입자의 침착속도를 실험적으로 구하기 위해서는 단위 면적당 웨이퍼상에 침착된 입자수( $N_a$ ), 웨이퍼 상류측의 입자농도( $C_{\infty}$ ) 및 노출시간( $t$ )을 측정하여야 한다. 이 중에서 웨이퍼상에 침착된 입자수를 측정하는 것이 가장 어렵고 중요한 문제이므로, 이것에 관한 기존의 측정방법들을 아래에 비교하여 검토하였다. Table 1에 나타난 기존의 실험적인 연구들을 살펴보면, 웨이퍼상에 침착된 입자수를 측정하기 위하여 image processing system<sup>(3)</sup>, fluorometry 방법,<sup>(1,4)</sup> 또는 wafer surface scanner<sup>(5)</sup>가 사용되었다.

입자의 침착속도를 실험적으로 구하는 최초의 체계적인 연구를 수행한 Hayakawa 등 (1986)은 레이저를 사용하여 원격으로 측정하는 image processing system으로 웨이퍼상에 침착된 입자수를 측정하여 웨이퍼상의 일정 면적( $1 \text{ cm}^2$ )에 대한 입자의 침착속도를 구하였다.<sup>(3)</sup> 이들의 실험 데이터는 매우 적고, 정전기 등의 실험조건이 제어되지 않아 이들이 구한 실험값의 경향에 일관성이 부족하였다.<sup>(1)</sup> 이 방법은 실험장치를 설치하는데 어려움이 많고, 웨이퍼 표면을 작은 부분으로 나누어 주사하므로, 전체 웨이퍼 표면에 침착된 입자수를 측정하기 위해서는 긴 시간이 필요하다.

Table 1. Summary of previous experimental works

Author	Wafer orientation	Particle diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Particle material	Airflow velocity [m/sec]	Wafer diameter [mm]	Detecting method	Exposure time
Hayakawa et al. (1986)	$0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$	0.415 0.605 1.091	Polystyrene latex spheres	0.3 0.5	76(3")	Image processing system	25 min.
Otani et al. (1989)	Horizontal	0.03~0.8	Rhodamine B aerosol	0.1 0.3 0.5	51(2") 76(3")	Fluorometry method	2~580 hours
	Vertical	0.03~0.2		0.02 0.1	51(2")		15~116 hours
Pui et al. (1990)	Horizontal	0.15~8	-Ammonium fluorescein aerosol(0.15~1.0 $\mu\text{m}$ ) -Uranine-tagged oleic acid aerosol (1.0~8 $\mu\text{m}$ )	0.2	38(1.5")	Fluorometry method	2~10 hours
Ye et al. (1991)	Horizontal	0.6~5	Polystyrene latex spheres	0.3	100(4")	Wafer surface scanner (Tencor Surfscan-4000)	
Bae et al. (this work)	Horizontal	0.2~1.0	Polystyrene latex spheres	0.68	100(4")	Wafer surface scanner (PMS SAS-3600)	10~30 min.

Image processing system을 사용하는 경우 측정 대상 입경이 0.3  $\mu\text{m}$  이상으로 제한되므로, Otani 등 (1989)과 Pui 등 (1990)은 fluorometry 방법을 고안하여 넓은 입경범위의 입자에 대한 평균 침착 속도를 구하였다.<sup>(4,5)</sup> 이들이 사용한 fluorometry 방법의 경우 많은 양의 입자를 웨이퍼상에 침착시켜 이것의 질량을 측정하여 입자수로 환산하기 때문에 웨이퍼의 노출시간이 길어진다. 이러한 긴 노출시간으로 인하여 실험하는 동안 입자발생장치로부터 발생하는 입자의 농도가 많이 변하여 실험 데이터의 주된 오차를 야기하고,<sup>(1)</sup> 실험을 반복적으로 수행하기가 어렵다. 그러므로 이들이 얻은 실험 데이터는 많지 않고, 실험 데이터는 대체로 예측모델에 의한 예측값과 유사한 경향을 보이지만, 실험 데이터 중에는 예측값과 상당한 편차를 보이는 데이터가 많이 있다. 따라서 실험적으로 구한 평균 침착속도의 신뢰범위에 대한 의문이 있다.

Ye 등(1991)은 열영동 효과에 관한 실험을 수행하기 위하여 fluorometry 방법에 비해 웨이퍼의 노출시간을 1/10 이하로 짧게 할 수 있는 wafer surface scanner (Tencor Surfscan-4000)를 사용하여 입자의 평균 침착속도를 측정하였다(Table 1).<sup>(5)</sup> 이러한 짧은 노출시간 동안에는 입자발생장치로부터 발생하는 입자의 농도가 거의 일정하게 유지

되므로 실험 데이터의 오차를 줄일 수 있다. 반면에, 레이저를 사용하므로 실험대상 입경의 범위가 wafer surface scanner의 최소 측정입경 이상으로 제한된다. 이들이 사용한 wafer surface scanner의 경우 최소 측정입경이 0.25  $\mu\text{m}$  근처인 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 이들이 측정된 평균 침착속도는 대체로 수치해석적으로 구한 값과 비슷한 경향을 보인다. 그러나, 이들의 관심은 열영동 효과를 조사하는 것이었으므로, 열영동이 작용하지 않는 경우에 대한 실험 데이터는 많지 않고, 역시 신뢰범위에 대해서는 의문이 있다. 또한, 측정대상 입자의 입경이 0.6  $\mu\text{m}$  이상이었다.

지금까지 수행된 실험적인 연구들을 검토한 바에 의하면, 입자의 평균 침착 속도에 대한 실험 데이터의 신뢰범위에 의문이 남아 있고, 반도체 제조공정에서 현재 관심의 대상이 되고 있는 0.1~1.0  $\mu\text{m}$  범위인 입자의 침착속도에 대한 실험 데이터가 많이 알려져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 수직 기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓여 있을때 반도체 웨이퍼상의 입자침착 제어 관점에서 중요한 입경범위인 0.2~1.0  $\mu\text{m}$ 의 PSL(polystyrene latex) 입자에 대하여 wafer surface scanner(PMS SAS-3600)를 사용하여 짧은 시간(10~30분)에 웨이퍼상의 평균 침착속도를 측

정하였다. 실험 데이터의 신뢰범위를 조사하기 위하여 각 입경에 대하여 10개 이상의 실험 데이터로부터 평균 침착속도의 평균과 표준편차를 구하였다. 입경에 따른 평균 침착속도의 측정결과를 널리 알려진 예측모델을 통하여 기존의 실험결과와 비교하였다. 또한, 웨이퍼 상부에 균일한 농도를 공급하기 위하여 보통 사용되고 있는 등속 분사튜브의 영향에 관한 연구가 많이 되어 있지 않으므로, 이것을 정량적으로 살펴보았다. 마지막으로 웨이퍼상의 반경방향의 국부 침착속도 분포와 엣지 제외 폭의 영향을 실험적으로 검토하였다.

## 2. 실험

측정대상 입자의 종류와 입경에 따라 입자의 발생방법에 차이가 있는데, 구형의 표준입자인 PSL 입자를 사용하는 경우 PSL 입자가 비교적 단순산적으로 발생된다고 알려져 있다. 그러므로 본 실험에서는 DMA(Differential Mobility Analyzer) 없이 분무기(atomizer)만을 사용하여 입자를 발생시켰다.<sup>(3,5)</sup> Fig. 1에 나타난 입자발생장치를 사용하여 0.2~1.0  $\mu\text{m}$  범위의 PSL 입자를 발생시켜 등속의 분사튜브(isokinetic injection tube)를 통하여 입자 침착장치내에 놓인 웨이퍼 상부에 공급하였다. 한편, Otani등 (1989)과 Pui등 (1990)은 시험부위가 사각형인 입자침착장치를 사용하였으나,<sup>(1,4)</sup> 본 실험에서는 입자침착장치의 시험부위를 원형으로 제작하였다(Fig. 2). 시험부위의 직경은 58 cm이고 실험에 사용된 웨이퍼의 직경이 10 cm이므로, 웨이퍼가 시험부위에서 차지하는 면적비(blockage ratio)는 3% 정도이다. 웨이퍼는 시험부위의 중심에 설치되었으며, 정전기의 영향을 배제하기 위하여 웨이퍼를 접지시켰다.

입자침착장치는 외부의 영향을 배제시키면서 웨이퍼 상부의 기류를 균일하게 만들어 주기 위하여 제작한 것이므로, 시험부위내의 유속분포가 중요하다. 본 실험에서는 3차원 초음파 풍속계(Kaijo Denki Co., Ltd WA-395)를 사용하여 시험 부위내의 유속분포를 측정하여 Fig. 3에 나타냈다. 이것을 보면, 웨이퍼에 주된 영향을 미치리라고 생각되는 중심에서 10 cm 이하인 영역의 유속분포는 3.2% 이하로 매우 균일함을 알 수 있다.

식(1)에서 보는 바와 같이 입자의 침착속도를 실험적으로 구하기 위해서는 웨이퍼 상부에 균일한

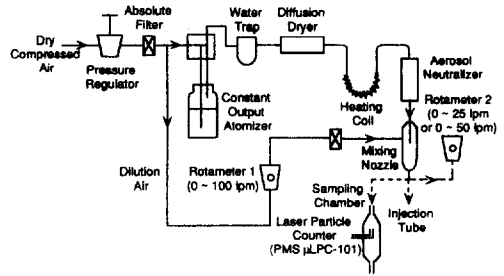


Fig. 1 Schematic diagram of particle generating system

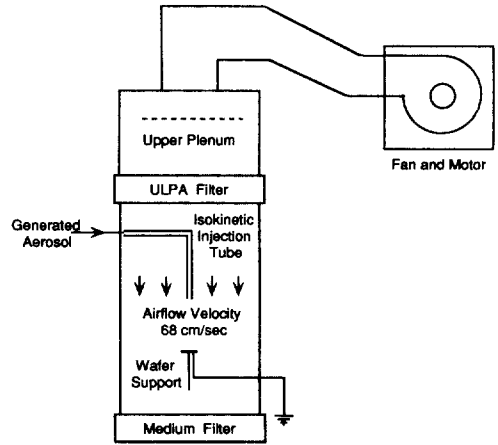


Fig. 2 Schematic diagram of particle deposition system

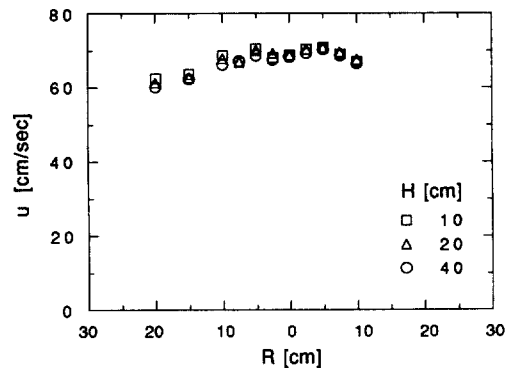


Fig. 3 Vertical airflow velocity distribution in a particle deposition chamber

농도를 공급하여야 하는데, 보통 등속 분사튜브가 사용되고 있다. Pui등(1990)은 웨이퍼 직경 보다 큰 직경( $d_i/D_w=1.158$ )을 갖는 등속 분사튜브를 사용하였다.<sup>(1)</sup> 그러나, Hayakawa 등 (1986)은 웨

이퍼 상방 10 cm에 직경 1 mm인 등속 분사튜브를 설치하여 ( $d_i/D_w=0.013$ ,  $h/D_w=1.316$ ), 이것으로부터 공급된 PSL 입자가 웨이퍼 상부 1 cm 높이에서 균일한 농도분포를 나타낸다는 것을 밝혀냈다.<sup>(3)</sup> 또한, Otani 등(1989)은 웨이퍼 상부 20 cm에 직경 6 mm인 등속 분사튜브를 설치하여 입자를 공급하였는데 ( $D_w=76$  mm인 경우  $d_i/D_w=0.079$ ,  $h/D_w=1.316$ 이고,  $D_w=51$  mm인 경우  $d_i/D_w=0.118$ ,  $h/D_w=1.961$ ), 등속 분사튜브로 공급되는 입자의 농도가 웨이퍼 상부의 균일한 농도로 사용될 수 있음을 smoke를 사용한 웨이퍼 주위의 기류가시화로 보여주었다.<sup>(4)</sup> 따라서 본 연구에서는 웨이퍼 직경에 비해 매우 작은 직경을 갖는 등속 분사튜브( $0.145 \leq d_i/D_w \leq 0.32$ ,  $0.5 \leq h/D_w \leq 3.0$ )를 사용하여 웨이퍼 상부에 PSL 입자를 공급하였다. 이때 등속 분사튜브로는 내경이 14.5 mm, 23 mm, 32 mm(면적비 1 : 2.5 : 4.9)인 등 튜브를 사용하였다.

본 실험에서는 식(1)의 관계식으로부터 입자의 침착속도를 구하기 위하여 분사튜브로 공급되는 입자의 농도와 웨이퍼상의 침착 입자수를 각각 레이저 입자 계수기(PMS  $\mu$ LPC-101)와 wafer surface scanner(PMS SAS-3600)로 측정하였다. 레이저 입자 계수기는 공기중의 입자를 측정하는 계측기로 샘플 유량이 0.1 cfm(2.8 lpm)이고, 0.1  $\mu$ m까지 작은 입자를 측정할 수 있으며, 측정입자를 8채널(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0  $\mu$ m)로 분류한다. Wafer surface scanner는 웨이퍼상의 입자를 측정하는 계측기로 레이저 입자 계수기와 마찬가지로 0.1  $\mu$ m까지 작은 입자를 측정할 수 있으며, 측정입자를 15채널(0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2  $\mu$ m)로 분류한다. 본 실험에 사용된 wafer surface scanner의 성능특성에 관한 연구가 Chae 등(1993)에 의해 수행되었다.<sup>(7)</sup>

온·습도가 23  $^{\circ}$ C, 45% RH로 설정된 class 10의 KIST 실험용 클린룸내에 실험장치를 설치하고,<sup>(8)</sup> 입자침착챔버내의 기류속도를 약 68 cm/sec로 일정하게 유지한 상태에서 아래와 같은 순서로 실험을 수행하였다.

실험조건(입자의 직경, 입자의 발생농도, 노출시간, 등속 분사튜브의 내경, 등속 분사튜브와 웨이퍼간의 거리)을 설정한 후, 송풍기를 작동시켜 입자침착챔버 내의 기류분포를 균일하게 만들었다.

입자발생장치의 최종 출구를 유량계에 연결하여 분사튜브의 분사속도가 기류속도와 등속이 되도록 유량을 조절하였다. 시험 웨이퍼상의 배경입자를 wafer surface scanner로 2번 측정된 후, 입자침착 챔버내에 웨이퍼를 고정시켰다. 입자발생장치의 최종출구를 샘플링 챔버에 연결하여 발생하는 입자의 농도 및 크기분포를 3분 동안 레이저 입자 계수기로 측정된 후, 입자발생장치의 최종 출구를 등속 분사튜브에 연결하여 설정된 웨이퍼의 노출시간(10~30분) 동안 입자를 웨이퍼 상부에 공급하였다. 이때 노출시간은 PSL 입자의 발생농도를 0.5~30개/cm<sup>3</sup>로 유지했을 때, 웨이퍼상의 침착 입자수가 100~1000개가 되도록 결정되었다. 노출시간이 경과하면, 입자발생장치의 최종출구를 다시 샘플링 챔버에 연결하여 3분 동안 레이저 입자 계수기로 측정하였다. 또한, 웨이퍼를 꺼내어 웨이퍼상에 침착된 입자수를 wafer surface scanner로 2번 반복하여 측정하였다. 이런 과정을 2회 반복하여 실험을 수행하였다.

실험 데이터는 먼저 wafer surface scanner의 출력중의 하나인 입자지도(particle map)를 보고 웨이퍼상에 입자가 균일하게 침착되었는가를 확인하였다. Fig. 4는  $D_p=0.497 \mu$ m인 입자를 웨이퍼상에 침착시켰을 때 그 분포형태의 예를 나타낸 것으로, 입자가 웨이퍼상에 편중되지 않고 고루 침착되어 있는 것을 알 수 있다. 이처럼 거의 모든 경우 입자가 웨이퍼상에 매우 균일하게 침착되는 것을

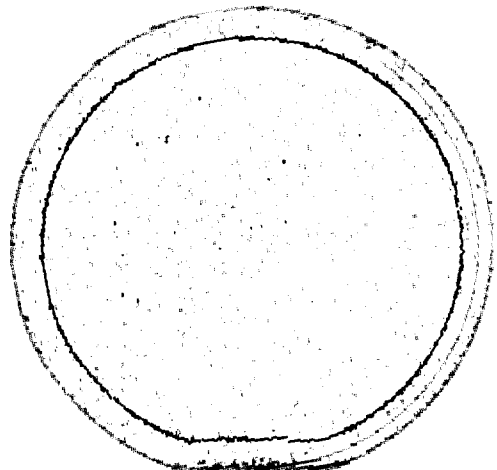
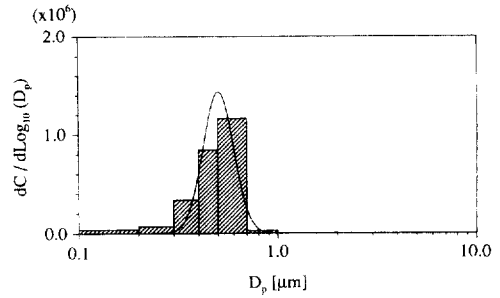


Fig. 4 A typical map of particles deposited on a wafer surface ( $D_p=0.497 \mu$ m)

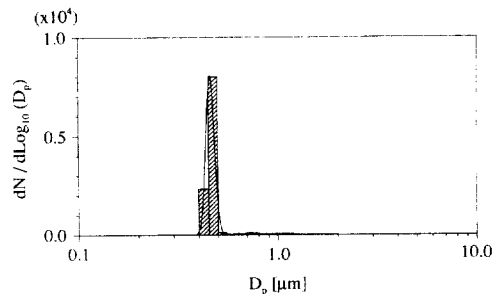
알 수 있었다. 웨이퍼상에 입자가 편중되어 침착된 경우가 간혹 발견되었는데, 이런 데이터는 제외하였다.

웨이퍼상에 부착된 입자의 광산란은 공기중의 입자의 광산란에 비해 매우 복잡하므로, 레이저 입자 계수기의 측정방법과 wafer surface scanner의 측정방법에 차이가 있다. 또한, 본 실험에서는 입자 발생장치에 DMA를 사용하지 않았으므로 입자가 아주 단분산적으로 발생되지는 않는다. 그러므로 등속 분사튜브로 공급된 입자의 입경분포와 웨이퍼상에 침착된 입자의 입경분포를 각각 레이저 입자 계수기와 wafer surface scanner로 측정하여 비교하였다. Fig. 5(a)는  $D_p=0.497 \mu\text{m}$ 인 입자를 발생시켰을 때 분사튜브로 공급된 입자의 입경분포를 나타낸 것으로 중간입경(NMD, number median diameter)이  $0.505 \mu\text{m}$ 로 제조사가 통칭하는 PSL 입경과 거의 같고, 대부분의 입자가  $0.4\sim 0.7 \mu\text{m}$  범위에 있다. Fig. 5(b)는  $D_p=0.497 \mu\text{m}$ 인 입자를 발생시켰을 때 웨이퍼상에 침착된 입자의 입경분포를 나타낸 것으로 중간 입경은  $0.458 \mu\text{m}$ 로 제조사가 통칭하는 PSL 입경과 유사하고, 대부분의 입자가  $0.4\sim 0.5 \mu\text{m}$  범위에 있다. 두 계측기의 입경분류 채널범위가 다른 것을 감안하면, 두 계측기간의 측정방법의 차이에도 불구하고 등속 분사튜브로 공급된 입경분포와 웨이퍼상에 침착된 입경분포가 거의 일치함을 알 수 있다.

또한, Fig. 5(a), (b)를 보면  $0.7 \mu\text{m}$  보다 큰 입자에 비해  $0.1\sim 0.4 \mu\text{m}$  범위의 입자가 많이 발생되지만,  $0.7 \mu\text{m}$  보다 큰 입자가 약간 침착되고  $0.1\sim 0.4 \mu\text{m}$  범위의 입자는 거의 침착되지 않음을 알 수 있다. 이것은 입경에 따라 입자의 침착속도



(a) Size distribution of particles supplied to an isokinetic injection tube (NMD= $0.505 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_g=1.19$ )



(b) Size distribution of particles deposited on a wafer surface (NMD= $0.458 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_g=1.05$ )

Fig. 5 Comparison of particle size distributions for  $D_p=0.497 \mu\text{m}$

가 다르므로  $0.7 \mu\text{m}$  보다 큰 입자의 침착속도가  $0.1\sim 0.4 \mu\text{m}$  범위인 입자의 침착속도 보다 크기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 전체 입자를 모두 고려하여 입자의 침착속도를 계산하면 오차가 생길 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해서 본 실

Table 2. Average particle deposition velocities [cm/s]

PSL sphere diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Prediction		Present measurement		
	Liu and Ahn (1987)	Emi et al. (1989)	Selected particle size range[ $\mu\text{m}$ ]	Mean	Standard deviation
0.222	$8.76 \times 10^{-4}$	$7.48 \times 10^{-4}$	0.1~0.3	$9.20 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-4}$
0.305	$9.00 \times 10^{-4}$	$7.10 \times 10^{-4}$	0.2~0.4	$7.42 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$
0.497	$1.33 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-3}$	0.4~0.7	$1.43 \times 10^{-3}$	$2.40 \times 10^{-4}$
0.720	$2.23 \times 10^{-3}$	$2.02 \times 10^{-3}$	0.5~1.0	$2.68 \times 10^{-3}$	$2.58 \times 10^{-4}$
0.966	$3.63 \times 10^{-3}$	$3.46 \times 10^{-3}$	0.7~	$5.87 \times 10^{-3}$	$6.71 \times 10^{-4}$

험에서는 PSL 입자의 입경 부근에 해당되는 두 계측기의 공통 입경분류 채널범위를 설정하여 이 입경범위내의 입자만을 대상으로 하여 데이터를 처리하였다. 즉,  $D_p=0.497 \mu\text{m}$ 인 경우 데이터 처리범위를  $0.4\sim 0.7 \mu\text{m}$ 로 설정하면 입경이  $0.497 \mu\text{m}$  부근인 입자를 전부 포함할 수 있으며 이보다 크거나 작은 공기중 또는 웨이퍼상에 침착된 입자를 데이터 처리시 배제할 수 있어 침착속도 계산시 오차를 줄일 수 있다. 이와 같은 방법으로 각 입경에 대하여 선택한 입경범위를 Table 2에 나타냈다.

등속 분사튜브로 공급되는 입자의 농도로는 입자 침착 전후에 측정된 값의 평균값을 사용하였고, 단위 면적당 웨이퍼상의 침착 입자수로는 입자침착후에 측정된 값과 입자침착전에 측정된 값의 차이를 사용하여 식(1)로부터 입자의 평균 침착속도를 계산하였다. 단위 면적당 웨이퍼상의 침착 입자수를 구할 때는 웨이퍼 취급시의 오염을 배제하기 위하여 기본적으로 웨이퍼의 엣지(edge)로부터 6 mm의 폭을 데이터 처리시 제외시켰다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 등속 분사튜브의 영향

식(1)에서 보는 바와 같이 입자의 침착속도를 정확히 구하기 위해서는 웨이퍼 상류의 농도가 균일하여야 한다. 웨이퍼 상류의 농도를 균일하게 만들어 주기 위해서는 기본적으로 웨이퍼 직경보다 큰 직경을 갖는 등속 분사튜브를 사용할 필요가 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 웨이퍼 직경보다 작은 직경을 갖는 등속 분사튜브를 사용하여도 웨이퍼에 인접한 상부의 농도가 균일하다는 것이 밝혀졌으므로,<sup>(3,4)</sup> 본 실험에서는 웨이퍼 직경보다 작은 직경을 갖는 등속 분사튜브를 사용하였다. 이러한 등속 분사튜브를 사용하는 경우 실험조건에 따라 등속 분사튜브의 내경과 등속 분사튜브와 웨이퍼간의 거리가 입자의 평균 침착속도에 영향을 끼치리라고 생각된다. 따라서 모든 입경에 대해서 등속 분사튜브의 내경 ( $0.145 \leq d_i/D_w \leq 0.32$ ) 과 등속 분사튜브와 웨이퍼간의 거리 ( $0.5 \leq h/D_w \leq 3.0$ )에 따른 입자의 평균 침착속도의 경향을 실험적으로 구하여 Fig. 6(a), (b), (c)에 나타냈다. 이때, 등속 분사튜브로 공급되는 입자의 농도를 웨이퍼 상류측의 균일한 농도로 가정하여 식(1)로부터 입자의 평균 침착속도를 계산하였다. 대부분의 실험

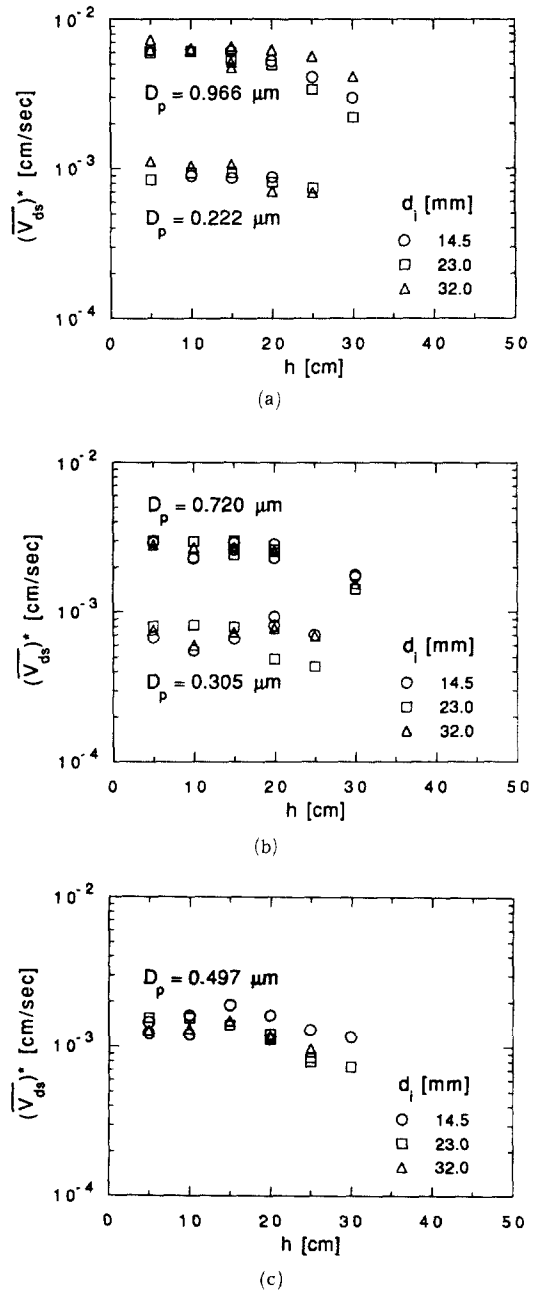


Fig. 6 Effect of isokinetic injection tube on the average deposition velocity

에서 PSL 입자의 발생농도는  $0.5\sim 30$ 개/cm<sup>3</sup>이었고, 농도변화는 4% 이하로 유지되었다. 또한, 단위 면적당 웨이퍼상의 침착 입자수는  $1.5\sim 15$ 개/cm<sup>2</sup>이었다.

Fig. 6(a), (b), (c)를 보면, 등속 분사튜브와 웨이퍼간의 거리가 감소함에 따라 평균 침착속도는 증가하며, 일정 거리(약 20 cm) 이하로 가까워지면 더 이상 평균 침착속도는 증가하지 않는다. 이것으로부터 평균 침착속도가 크게 변하지 않는 조건(5 cm ≤ h ≤ 20 cm)에서는 등속 분사튜브로 공급되는 입자의 농도를 웨이퍼 상류측의 균일한 농도로 가정하여 입자의 평균 침착속도를 계산하여도 된다고 생각된다. 또한, 본 실험에서 사용한 등속 분사튜브의 내경 범위내에서는 평균 침착속도의 등속 분사튜브의 내경 의존성은 특별히 발견되지 않았다.

### 3.2 기존 연구결과와의 비교

본 실험에서는 Fig. 6(a), (b), (c)에서 보는 바와 같이 평균 침착속도가 크게 변하지 않는 조건(5 cm ≤ h ≤ 20 cm)에서 각 입경의 평균 침착속도를 반복적으로 얻을 수 있다고 보았다. Fig. 6(a), (b), (c)에서 각 입경에 대하여 5 cm ≤ h ≤ 20 cm인 조건에서 측정된 데이터만을 선택하여 평균값과 표준편차를 구하여 Table 2에 나타냈다. 이때 모든 입경에 대하여 10개 이상의 데이터가 선택되었다. Table 2를 보면, 본 실험대상 입경의 경우 평균 침착속도의 표준편차가 평균값의 9~17% 정도임을 알 수 있다.

실험조건(기류속도)의 차이로 Table 2에 나타낸 실험결과를 기존의 연구결과와 직접 비교하는데 어려움이 있으므로, 간접적인 방법으로 널리 알려진 예측모델에 의한 예측값과 비교하였다. 왜냐하면, 이들 예측모델은 기존의 유사한 실험적인 연구결과를 바탕으로 만들어졌고, 입자의 침착속도에 관한 실험적인 연구와 수치해석적인 연구에 의해 이들 예측모델의 타당성이 어느 정도 인정되고 있기 때문이다.<sup>(1,4,9)</sup> 지금까지 알려진 반도체 웨이퍼상의 입자의 평균 침착속도에 대한 대표적인 예측모델로는 Liu와 Ahn(1987) 및 Emi 등(1989)의 예측모델이 있다.<sup>(2,10)</sup> 아래에 이들 예측모델에 대해 간단히 소개하였다.

Liu와 Ahn은 수직 기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓여 있을때 대류, 확산 및 중력침강에 의한 입자의 평균 침착속도를 처음으로 아래와 같이 정량적으로 예측하였다. 즉, 대류와 확산에 의한 평균 침착속도는 Sparrow와 Geiger(1985)의 나프탈렌 승화실험에 근거한 물질이동계수의 상관 관계식으로부터 식(2)로 주어지고,<sup>(11)</sup> 중력침강에 의한 침착

속도는 식(3)으로 주어지는 입자의 종단속도를 사용하였다. 이렇게 구한 각각의 침착속도를 식(4)와 같이 산술적으로 합하여 대류, 확산 및 중력침강에 의한 입자의 평균 침착속도를 예측하였다.

$$\overline{v_d} = 1.08 Sc^{1/3} Re^{1/2} \frac{D}{D_w} \quad (2)$$

$$v_s = \frac{C_c \rho_p g D_p^2}{18\mu} \quad (3)$$

$$\overline{v_{ds}} = \overline{v_d} + v_s \quad (4)$$

Liu와 Ahn의 예측모델의 경우 각 침착 메커니즘이 모두 중요하게 작용하는 0.1~1.0 μm 범위인 입자의 침착속도는 약간 높게 예측되는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 이러한 문제를 개선하기 위하여 Emi 등은 Crump와 Seinfeld(1981)가 구한 밀폐용기 내에서 난류확산, 브라운 확산 및 중력을 고려한 경계층내의 확산 방정식의 해를 이용하여 입자의 평균 침착속도를 식(5)와 같이 예측하였다.<sup>(10)</sup> 입경이 0.1~1.0 μm 범위인 입자의 경우 식(5)에 의해 예측된 평균 침착속도는 식(4)에 의한 예측값 보다 약간 작다. 또한, 최소 침착속도를 갖는 입경도 약간 증가한다.

$$\overline{v_{ds}} = \frac{-v_s}{\exp\left(\frac{-v_s}{\overline{v_d}}\right) - 1} \quad (5)$$

Table 2에 나타낸 평균 침착속도의 평균값과 이 값의 95% 신뢰한계를 나타내는 오차범위를 Fig. 7에 나타냈다. 또한, 앞에서 설명한 2가지 예측모델에 의한 예측 곡선도 나타냈다. Fig. 7을 보면, 실험적으로 구한 입경에 따른 입자의 평균 침착속도의 평균은  $D_p = 0.966 \mu m$ 인 경우를 제외하고 Liu

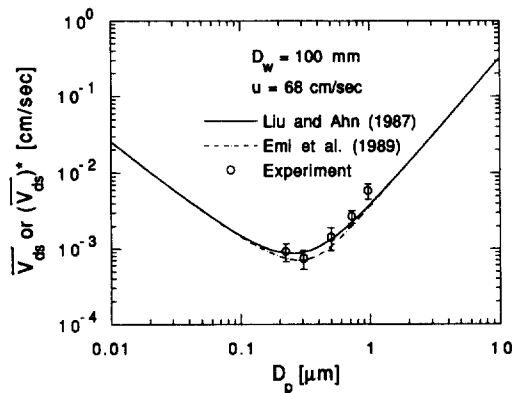


Fig. 7 Average deposition velocity variation with the particle diameter



와 Ahn(1987) 및 Emi 등 (1989)의 예측모델에 의한 예측값과 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 비교와 기존의 연구 결과로부터 이들 예측모델로도 웨이퍼상의 평균 침착속도를 매우 정확하게 예측할 수 있음을 알았다. 이들 예측모델을 기준으로 기존의 실험결과를 살펴보면, 대부분의 실험 데이터가 본 실험에서 구한 오차범위내에 들어간다고 보여지지만, 그 값이 각 입경을 대표하는 값(평균값)이라고 볼 수 없는 데이터가 많이 있음을 알 수 있었다. (1,4,5)

$D_p=0.966 \mu\text{m}$ 인 경우 Table 2에 나타난 선택 입경범위에 계측기의 마지막 입경분류 채널이 포함되므로, 다른 입경에 비해 더 많은 오차가 생겨 측정값과 예측값의 차이가 많이 나는 것으로 생각된다. 그러므로 본 실험에 사용된 계측기(레이저 입자 계수기와 wafer surface scanner)의 처음과 마지막 공통 입경분류 채널을 고려하면, 본 실험방법은 입경범위가  $0.2\sim 0.9 \mu\text{m}$  정도인 입자의 침착속도 측정에 유효하다고 생각된다.

3.3 반경방향의 국부 침착속도의 분포와 엣지 제외 폭의 영향

Fluorometry 방법을 사용하여 입자의 침착속도를 구한 경우 웨이퍼상에서 입자의 국부 침착속도(local deposition velocity)가 균일하지 않다고 알려져 있으므로, (2,4,11) wafer surface scanner를 사용한 본 실험에서도 이러한 경향이 나타나기를 조사하였다. 웨이퍼상에서 국부 침착속도의 반경방향의 경향을 파악하기 위하여 입자의 평균 침착속도를 구하는데 사용한 실험 데이터의 일부를 샘플로 추출하여 엣지 제외 폭(width of edge reject)을  $1\sim 10 \text{ mm}$ 로 변화시키면서 데이터를 처리하여 입자의 국부 침착속도를 구하였다.

본 실험에서 사용한 입경범위의 경우 모두 비슷한 경향을 보이므로 대표적으로  $D_p=0.305 \mu\text{m}$ 인 경우에 대하여 반경에 따른 입자의 국부 침착속도와 평균 침착속도의 비를 Fig. 8에 나타냈다. 이때 입자의 평균 침착속도로는 엣지 제외 폭이  $6 \text{ mm}$ 일 때의 값을 사용하였다. 비록 반경이  $40 \text{ mm}$ 보다 큰 영역에 제한된 데이터이지만, Fig. 8을 보면 웨이퍼상에서 입자의 국부 침착속도는 반경이 커짐에 따라 증가함을 알 수 있다. 이것은 Liu와 Ahn(1987)의 입자 침착속도 예측모델의 근거가 된 Sparrow와 Geiger(1985)의 나프탈렌 승화법에 의

한 실험결과와 일치되는 경향이다. (2,11)

Fig. 8의 실험결과는 웨이퍼상에 침착된 입자수를 구하는데 있어 웨이퍼 취급시의 오염을 배제하기 위하여 불가피하게 설정하게 되는 엣지 제외 폭

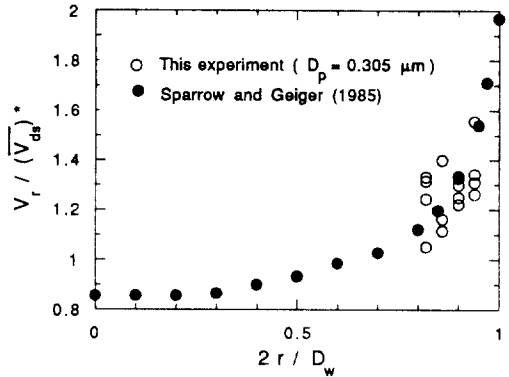


Fig. 8 Ratio of local deposition velocity to the average deposition velocity

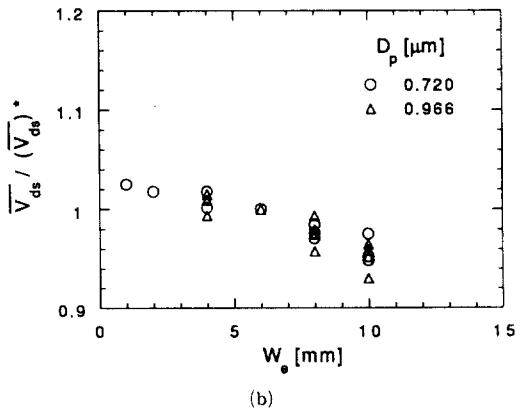
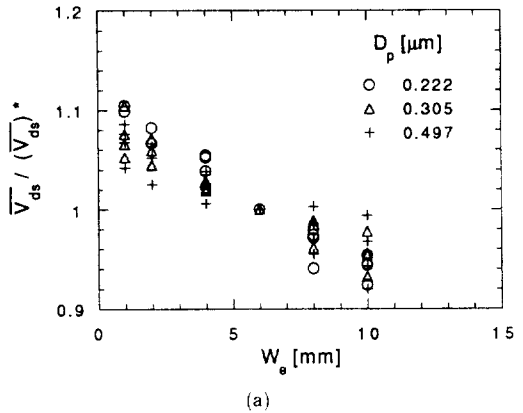


Fig. 9 Effect of edge reject width on the average deposition velocity

의 값에 따라 구하고자 하는 입자의 평균 침착속도가 달라질 수 있음을 의미한다. Table 2 및 Fig. 7에 제시한 입자의 평균 침착속도는 엿지 제외 폭을 6 mm로 설정하여 구한 것이므로, 이것을 기준으로 엿지 제외 폭을 1~10 mm로 변화시켰을 때 입자의 평균 침착속도의 변화를 Fig. 9 (a), (b)에 나타냈다. Fig. 9 (a), (b)를 보면 예상대로 엿지 제외폭이 감소함에 따라 입자의 평균 침착속도가 증가한다. 실험에서 웨이퍼 취급시의 오염이 완전히 배제되어 엿지 제외 폭이 1 mm 이하로 된다면, 입경이 상대적으로 작은 0.222  $\mu\text{m}$ , 0.305  $\mu\text{m}$ , 0.497  $\mu\text{m}$ 의 경우 입자의 평균 침착속도는 Table 2 및 Fig. 7에 나타낸 값 보다 5~10% 증가할 수 있고, 입경이 상대적으로 큰 0.720  $\mu\text{m}$ , 0.966  $\mu\text{m}$ 의 경우에는 5% 이하의 증가가 예상된다.

### 3.4 교정 웨이퍼(Calibration wafer)

반도체 제조라인에서 수율저하를 방지하기 위한 오염제어에 있어서 입자의 종류와 입경을 알고 있는 입자를 웨이퍼상에 부착시켜 교정 웨이퍼(calibration wafer)를 만드는 기술은 매우 중요하다. 이러한 교정 웨이퍼는 각종 프로세스 장치의 발전상황을 정기적으로 측정하는데 사용되는 wafer surface scanner의 성능분석에 유용하게 사용된다. 왜냐하면, 공기중의 입자 측정과는 달리 근본적으로 웨이퍼상의 입자 측정은 매우 어려우며, wafer surface scanner는 제작회사 마다 독특한 방법으로 만들고 있으므로 사용자가 측정기의 특성을 정확히 파악하고 사용하는 것이 중요하기 때문이다. 교정 웨이퍼의 구비조건으로는 웨이퍼상에 부착된 입자의 종류 및 입경을 알 수 있어야 하고, 웨이퍼상에 입자가 균일하게 분포되는 것이 좋으며, 웨이퍼상에 부착된 입자수도 적절히 제어되어야 한다.

앞에서 구한 입경에 따른 입자의 평균 침착속도를 이용하고, 식(1)에서 보는 바와 같이 분사튜브로 공급되는 입자의 농도( $C_{\infty}$ )와 침착시키는 시간( $t$ )을 조절하면 단위 면적당 웨이퍼상의 침착 입자수( $N_d$ )의 제어가 가능하다. 그리고 본 실험에서 사용한 입자침착장치에 의해 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 웨이퍼상에 입자를 균일하게 침착시킬 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 부수적으로 입자가 웨이퍼상에 균일하게 침착되고, 침착 입자수도 제어된 교정 웨이퍼를 만들 수 있는 기본 기술을 확

보하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 수직 기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓여 있고 입자의 침착 메카니즘으로 대류, 확산 및 중력침강만이 작용할 때, 반도체 웨이퍼상의 입자침착제어의 관점에서 중요한 입경범위인 0.2~1.0  $\mu\text{m}$ 의 PSL 입자에 대한 평균 침착속도를 wafer surface scanner(PMS SAS-3600)로 짧은 시간(10~30분)에 측정하였다. 각 PSL 입경에 대하여 10개 이상의 실험 데이터로부터 평균 침착속도의 평균과 표준편차를 구하여 측정 데이터의 신뢰범위를 살펴보았다. 실험적으로 구한 입경에 따른 평균 침착속도의 평균은 Liu와 Ahn(1987) 및 Emi 등(1989)의 예측모델에 의한 예측값과 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, 웨이퍼상에서 입자의 국부 침착속도가 반경이 커짐에 따라 증가함을 실험적으로 확인하였으며, 실제 웨이퍼상의 입자의 평균 침착속도는 엿지 제외 폭의 영향으로 인해 Table 2 및 Fig. 7에 제시한 값 보다 약간 증가할 수 있음을 알았다.

한편, 본 연구를 통하여 부수적으로 입자가 웨이퍼상에 균일하게 침착되고, 침착 입자수도 제어된 교정 웨이퍼를 만들 수 있는 기본 기술을 확보하였다. 이러한 교정 웨이퍼는 반도체 회사에서 많이 사용하는 wafer surface scanner의 성능분석, 웨이퍼 세정장치의 성능평가 및 새로운 세정방법 개발 등에 활용될 수 있을 것이다. 또한, 본 연구결과는 정확한 입자의 침착속도가 요구되는 웨이퍼를 이용한 청정도 평가와 같은 연구에 활용될 수 있으며, 앞으로 웨이퍼가 수직으로 놓인 경우 및 기류 속도가 변하는 경우에 대한 입자의 침착속도를 측정할 계획이다.

## 후 기

본 논문은 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 일부로 수행하여 얻은 연구결과임을 밝혀두며, 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표한다.

## 참고문헌

- (1) David, Y. H., Pui, Y. Y. and Liu, B. Y. H., 1990,

- "Experimental Study of Particle Deposition on Semiconductor Wafers," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 12, pp. 795~804.
- (2) Liu, B. Y. H. and Ahn, K., 1987, "Particle Deposition on Semiconductor Wafers," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 6, pp. 215~224.
- (3) Ichiya H., Shuji, F. and Kim, K. Y. 1986, "Studies on Particulate Behavior and Adhesion in Laminar Airflow Clean Room," 1986 Proceedings of Institute of Environmental Sciences, pp. 483~486.
- (4) Otani, Y., Emi, H., Kanaoka, C. and Kato, K., 1989, "Determination of Deposition Velocity onto a Wafer for Particles in the Size Range between 0.03 and 0.8  $\mu\text{m}$ ," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 20, No. 7, pp. 787~796.
- (5) Ye, Y., Pui, D. Y. H., Liu, B. Y. H., Opiolka, S., Blumhorst, S. and Fissan, H., 1991, "Thermophoretic Effect of Particle Deposition on a Free Standing Semiconductor Wafer in a Clean Room," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 63~72.
- (6) Liu, B. Y. H., Chae, S. and Bae, G., 1993, "Sizing Accuracy, Counting Efficiency, Lower Detection Limit and Repeatability of a Wafer Surface Scanner for Ideal and Real-World Particles," Submitted to *Electrochemical Society Journal*.
- (7) Chae, S., Liu, B. Y. H., Bae, G., Myong, H. and Lee, C., 1993, "Performance Characteristics of the PMS SAS-3600 Wafer Surface Scanner," Submitted to 39th Annual Technical Meeting of Institute of Environmental Sciences.
- (8) Lee, C. S., Myong, H. K., Shin, H. T., 1992, "KIST Cleanroom Laboratory," 11th Proceedings of International Confederation of Contamination Control Societies, pp. 549~550.
- (9) Liu, B. Y. H., Fardi, B. and Ahn, K. H., 1987, "Deposition of Charged and Uncharged Aerosol Particles on Semiconductor Wafers," 1987 Proceedings of Institute of Environmental Sciences, pp. 461~465.
- (10) Emi, H., Otani, Y., Kanaoka, C., Kato, K., 1989, "Deposition of Submicron Particles onto Wafer Surface," 8th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, pp. 9~14.
- (11) Sparrow, E. M. and Geiger, G. T., 1985, "Local and Average Heat Transfer Characteristics for a Disk Situated Perpendicular to a Uniform Flow," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 321~326.