

(論 文)

# 열영동력이 수평 웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향

배귀남\* · 박승오\*\* · 이춘식\* · 안이기\*

(1993년 7월 5일 접수)

## Thermophoretic Effect on Particle Deposition toward a Horizontal Wafer

Gwi-Nam Bae, Seung O Park, Chun Sik Lee and Iee Ki Ahn

**Key Words :** Particle Deposition Velocity(입자침착속도), Thermophoresis(열영동), Horizontal Wafer(수평 웨이퍼)

### Abstract

To investigate thermophoretic effect on particle deposition, average deposition velocity toward a horizontal wafer surface in vertical airflow is measured keeping the wafer surface temperature different from the surrounding air temperature. In the present measurement, the temperature difference is maintained in the range from -10 to 4°C. Polystyrene latex (PSL) spheres of diameter between 0.3 and 0.8 μm are used for the experiment. The number of particles deposited on a wafer surface is estimated from the measurements using a wafer surface scanner (PMS SAS-3600). Experimental data are compared with prediction model results.

### 기호설명

$a$	: 열확산계수
$C_c$	: Cunningham 보정계수
$C_\infty$	: 상류측의 입자농도
$D$	: 입자의 확산계수
$D_p$	: 입자의 직경
$D_w$	: 웨이퍼의 직경
$g$	: 중력가속도
$Gr$	: Grashof수( $=gD_w^3(T_w - T_a)/\nu^2 T_a$ )
$J$	: 웨이퍼표면으로의 입자유속
$k_a$	: 공기의 열전달율
$k_p$	: 입자의 열전달율
$K$	: 열영동계수
$Kn$	: Knudsen수( $=2\lambda/D_p$ )
$N_a$	: 단위면적당 웨이퍼상에 침착된 입자수
$Pr$	: Prandtl수( $=\nu/a$ )
$r$	: 웨이퍼중심으로부터의 거리

$Re$	: Reynolds수( $=uD_w/\nu$ )
$Sc$	: Schmidt수( $=\nu/D$ )
$t$	: 노출시간
$T$	: 절대온도
$\Delta T$	: 온도차
$\nabla T$	: 온도구배
$\overline{\nabla T}$	: 웨이퍼상의 평균 온도구배
$T_a$	: 공기의 온도
$T_{sc}$	: 웨이퍼 냉각시 알루미늄판 설정점의 온도
$\Delta T_{sc}$	: 웨이퍼 냉각시 온도차( $=T_{sc} - T_a$ )
$T_{sh}$	: 웨이퍼 가열시 알루미늄판 설정점의 온도
$\Delta T_{sh}$	: 웨이퍼 가열시 온도차( $=T_{sh} - T_a$ )
$T_w$	: 웨이퍼표면의 온도
$\Delta T_w$	: 웨이퍼표면과 주위 공기와의 온도차( $=T_w - T_a$ )
$u$	: 수직방향의 기류속도
$v$	: 입자침착속도
$\bar{v}_d$	: 대류와 확산에 의한 입자의 평균 침착속도
$\bar{v}_{dst}$	: 대류, 확산, 중력침강 및 열영동에 의한 입

\*정회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

\*\*정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

	자의 평균 침착속도
$v_s$	: 입자의 중력침강속도
$n_t$	: 입자의 열영동속도
$\bar{n}_t$	: 웨이퍼상의 평균 열영동속도
$\alpha$	: 입자와 공기의 열전달율의 비( $=k_a/k_p$ )
$\mu$	: 공기의 동점성계수
$\nu$	: 공기의 점성계수
$\rho_p$	: 입자의 밀도
$\lambda$	: 공기분자의 평균 자유거리
$\sigma$	: 표준편차

## 1. 서 론

반도체 웨이퍼 표면상의 입자침착에 의한 패턴결함은 DRAM(dynamic random access memory)으로 대표되는 반도체 제조공정에 있어서 제품의 수율저하의 최대 원인이 되고 있다. 클린룸 환경에서는 정전기력이 가장 지배적인 침착 메카니즘이 되고 있으므로, 입자에 의한 오염을 줄이기 위하여 정전기제어 대책으로 Ionizer 등이 반도체 회사에서 사용되고 있다. 한편, 반도체 제조공정에서는 가열·냉각이 반복되기 때문에 웨이퍼 표면과 주위 공기와의 온도차에 의해 웨이퍼 근방의 입자에 열영동력이 작용하는데, 웨이퍼 표면의 온도가 주위 공기의 온도보다 약간만 높아도 열영동력에 의해 웨이퍼상의 입자침착이 상당히 억제된다. 따라서, 웨이퍼상의 입자침착을 효과적으로 제어하기 위해서는 반도체 제조공정에 있어서 제품의 정전기 제어 대책과 함께 온도관리도 중요하게 고려되어야 한다.

웨이퍼상의 입자침착을 제어하기 위해서는 기본적으로 입경에 따른 입자침착속도를 아는 것이 중요하며, 클린룸 내에 놓인 웨이퍼상의 입자침착에 관여하는 가장 기본적인 침착 메카니즘은 대류, 확산 및 중력침강이다. 이전 연구에서 이를 침착 메카니즘에 대한 실험을 수행하였으므로,<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 추가로 열영동을 고려하여 이들 메카니즘이 웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향을 실험적으로 규명함으로써, 웨이퍼상의 오염제어에 기여하고자 한다.

웨이퍼상의 오염제어의 한 방법으로 사용될 수 있는 열영동현상을 해석하기 위하여 Stratmann 등<sup>(2)</sup>은 1차원 평면정체점 유동(plane stagnation flow)에 대해 온도장을 구한 후 입자에 작용하는 힘의

평형관계를 이용하여 표면 근처에 생기는 무진영역(particle free space)의 두께를 근사적으로 구하였다. Peterson 등<sup>(3)</sup>은 1차원 평면정체점 유동에 대하여 2가지 계산방법을 사용하여 대류, 확산, 중력침강, 열영동 및 정전기에 의해 웨이퍼상으로 침착되는 입자유속을 구하였다. 그리하여 열영동력이 작용하는 경우 표면과 주위 공기와의 온도차에 따라 표면에 입자가 거의 침착되지 않는 입경범위가 존재함을 보여주었다. Opiolka 등<sup>(4)</sup>은 클린룸 내에서 웨이퍼가 위치한 환경을 축대칭 2차원 모델로 가정하여 PSL(polystyrene latex) 입자 및 철(iron) 입자에 대하여 열영동력이 작용할 때 웨이퍼상의 평균 침착속도 뿐만 아니라 반경방향의 침착속도 분포를 수치해석으로 구하였다.

한편, 웨이퍼상의 입자침착에 있어서 열영동효과에 관한 실험적인 연구도 수행되었는데, Donovan 등<sup>(5)</sup>은 교란챔버(stirred chamber) 내에서 입경이  $0.6 \mu\text{m}$ 인 PSL 입자에 대하여 전기장과 온도구배가 동시에 존재할 때 웨이퍼상의 입자의 평균 침착속도를 측정하여 열영동력이 정전기력과 상쇄될 수 있는 범위가 존재함을 발견하였다. Namiki 등<sup>(6,7)</sup>은 Stratmann 등<sup>(2)</sup>의 이론적 결과를 이용하여 웨이퍼상의 열영동속도를 예측하였고, 입경이  $0.5 \mu\text{m}$ 인 PSL 입자에 대하여 웨이퍼 표면과 주위 공기와의 온도차를  $-10\sim20^\circ\text{C}$ 로 변화시키면서 아르곤레이저 가시화법(argon laser visualization method)으로 입자침착속도를 측정하여 웨이퍼 표면상의 입자침착 제어에 있어서 열영동력이 정전기력 다음으로 중요한 인자임을 보여주었다. 계속해서 열영동력과 정전기력이 함께 작용할 때 비구형입자( $\text{SiO}_2$ , Cu 입자)의 침착속도를 예측하였다. Ye 등<sup>(8)</sup>은  $1\sim5 \mu\text{m}$  범위인 PSL 입자에 대하여 웨이퍼 표면과 주위 공기와의 온도차가  $10\sim40^\circ\text{C}$  일 때 wafer surface scanner(tencor surfscan-4000)를 사용하여 입자의 평균 침착속도를 측정하였고, 수치 해석에 의해 예측하였다. 이러한 열영동에 관한 연구결과들을 보면, 현재 반도체 제조공정에서 관심의 대상이 되고 있는  $0.1\sim1.0 \mu\text{m}$  범위의 입자에 대한 실험 데이터가 많지 않다. 특히, 웨이퍼 표면의 온도가 주위 공기의 온도보다 낮은 경우에 대한 측정값은 거의 알려져 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 이전 연구에서 사용한 측정기법을 사용하여 수직기류하에 수평으로 놓여 있는 웨이퍼상의 입자침착에 대한 열영동효과를 분석

하기 위한 실험을 수행하였다.<sup>(1)</sup> 이때, 입경이  $0.3\sim0.8 \mu\text{m}$  범위인 구형의 PSL 입자를 사용하였으며, 웨이퍼 표면과 주위 공기와의 온도차( $\Delta T_w$ )를  $-10\sim4^\circ\text{C}$  범위로 변화시켰다. 입자침착속도에 대한 실험결과를 기존의 예측모델에 의한 예측값과 비교하여 열영동효과를 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

일반적으로 입자침착속도( $v$ )는 아래와 같이 정의된다.

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

여기서,  $J$ 는 웨이퍼 표면으로의 입자유속,  $C_\infty$ 는 상류측의 입자농도,  $N_a$ 는 단위면적당 웨이퍼상에 침착된 입자수, 그리고  $t$ 는 노출시간이다. 그러므로, 입자침착속도를 실험적으로 구하기 위해서는  $N_a$ ,  $C_\infty$ ,  $t$ 를 측정하여야 한다. 본 실험에서는 웨이퍼상에 침착된 입자수는 wafer surface scanner (PMS SAS-3600)를 사용하여 측정하였다. Fig. 1에 나타낸 입자발생장치를 사용하여  $0.3\sim0.8 \mu\text{m}$  범위의 PSL 입자를 발생시켜 등속 분사튜브(isokinetic injection tube)를 통하여 입자침착장치내에 놓인 웨이퍼 상류에 공급하였다. 입자침착장치는 외부의 영향을 배제시키면서 웨이퍼 상부의 기류를 균일하게 만들어 주기 위하여 Fig. 2와 같이 제작하였다. 입자침착장치의 시험부위는 직경이 58 cm인 원형이고, 실험에 사용된 웨이퍼의 직경이 10 cm이므로, 웨이퍼가 시험부위에서 차지하는 면적비는 3% 정도이다. 웨이퍼를 시험부위의 중심에 설치하였으며, 정전기의 영향을 배제하기 위하여

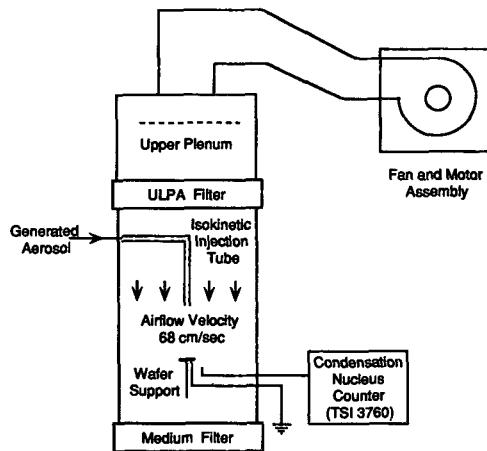


Fig. 2 Schematic diagram of particle deposition system

웨이퍼를 점지시켰다. 3차원 초음파 풍속계(Kaijo Denki Co., Ltd WA-395)를 사용하여 시험부위 내의 유속분포를 측정한 결과로부터 웨이퍼에 주된 영향을 미치리라고 생각되는 중심으로부터 거리가 10 cm 이하인 영역의 유속분포는 3.2% 이하로 매우 균일함을 알 수 있었다.<sup>(1)</sup>

식(1)에서 보는 바와 같이 입자침착속도를 실험적으로 구하기 위해서는 웨이퍼 상부에 균일한 농도를 공급하여야 하는데, 보통 등속 분사튜브가 사용되고 있다.<sup>(1,9~11)</sup> 이전 연구에서  $0.2\sim1.0 \mu\text{m}$  범위인 PSL 입자의 경우 등속 분사튜브의 내경이 14.5 mm 이상이고, 분사튜브와 웨이퍼간의 수직거리가 20 cm 이하이면, 분사튜브로 공급되는 입자의 농도가 웨이퍼 상부의 균일한 농도를 대표하여 동일한 입경에 대하여 거의 비슷한 평균 침착속도를 얻을 수 있음을 알았다.<sup>(1)</sup> 그러므로, 본 연구에서는 등속 분사튜브의 내경이 23 mm이고, 분사튜브와 웨이퍼간의 수직거리가 15 cm인 조건에서 입자의 평균 침착속도를 측정하였다.

### 2.2 온도 제어

웨이퍼 표면의 온도는 웨이퍼를 가열( $\Delta T_w > 0^\circ\text{C}$ ) 또는 냉각( $\Delta T_w < 0^\circ\text{C}$ ) 시켜 제어하였다. 웨이퍼 표면의 온도를 주위 공기의 온도보다 높이기 위하여 thermofoil heater (Minco Products, Inc.)를 Fig. 3(a)와 같이 설치하였다.<sup>(8)</sup> 이때 웨이퍼 표면의 5곳(반경방향으로 동일선상에서  $r=0, 15, 25, 35$ ,

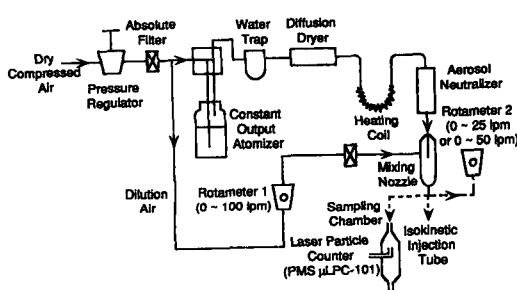


Fig. 1 Schematic diagram of particle generating system

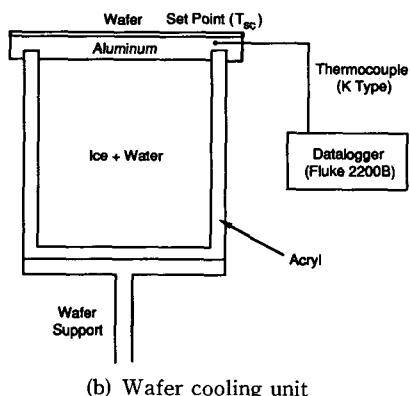
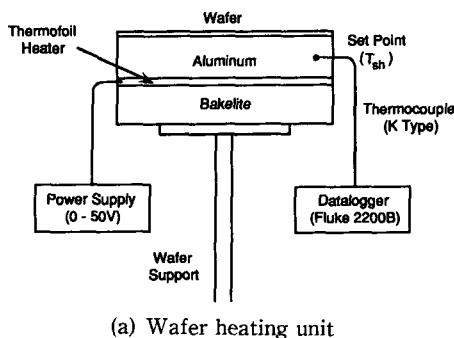


Fig. 3 Schematic diagram of wafer heating and cooling units

45 mm 인 곳)에 열전대를 부착하여 표면온도를 측정하였다. 그리하여 반경 방향으로 온도분포가 상당히 균일함을 알 수 있었다. 예를 들면, 주위 공기의 온도와 웨이퍼 표면의 평균 온도와의 차이가 10°C 일 때 5 곳의 위치에 따른 최대 온도차는 0.4°C 이었다. 웨이퍼상에서 중심으로부터 멀어질수록 입자 침착속도가 증가하는 것으로 알려져 있고,<sup>(4)(2)(3)</sup> 본 실험에서는 웨이퍼 취급시의 오염을 배제하기 위하여 데이터처리시 웨이퍼상의 가장자리 (edge) 제외 폭을 6 mm로 설정하였다. 따라서, 가장자리에서의 입자침착속도가 웨이퍼상의 평균 침착속도에 가장 큰 영향을 미치리라고 생각되므로, 본 실험에서는 웨이퍼의 표면온도 ( $T_w$ )를 대표하는 값으로  $r=45 \text{ mm}$ 인 곳에서 측정한 온도를 사용하였다. 침착실험을 하는 동안 웨이퍼 표면의 온도를 간접적으로 모니터링하기 위하여 Fig. 3(a)에 나타낸 위치에 설정점 (set point)을 설정하였다. Fig. 4(a)는 주위 공기와 알루미늄판의 설정점 및 웨이퍼 표면간의 온도차에 관한 실험적 관계식 (calibration curve)을 나타낸 것이다.<sup>(5)</sup> Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 웨이퍼 표면의 온도와 설정점의 온도간의 관계가 매우 선형적이므로, 실험시에는 온도계측기 (Fluke Datalogger 2200B)로 설정점과 주위 공기와의 온도차 ( $\Delta T_{sh}$ )를 모니터링하면서 가한 열과 기류 등에 의해 손실된 열이 평형을 이루도록 thermofoil heater로 공급되는 power를 적절히 조절하여 입자를 침착시키는 동안 시간경과에 따른  $\Delta T_{sh}$ 의 변화를  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  이하로 제어하였다.

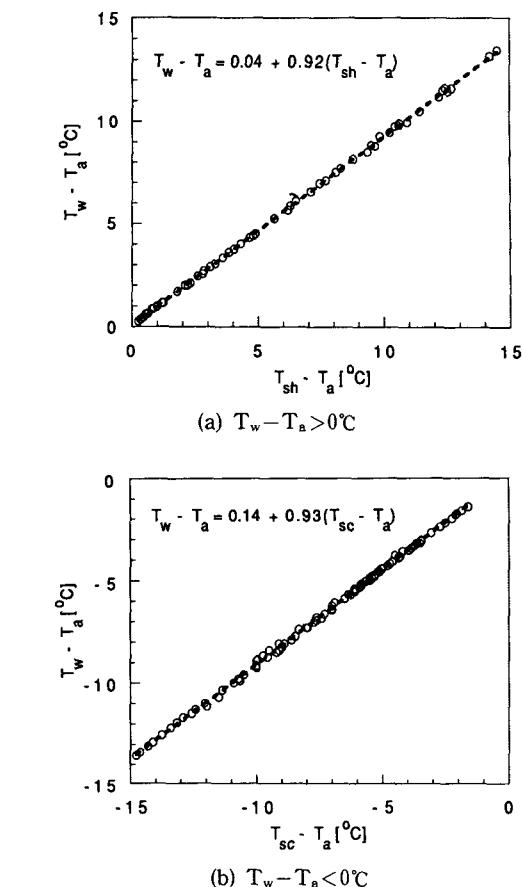


Fig. 4 Temperature calibration curve for the control of wafer surface temperature

tion curve)을 나타낸 것이다.<sup>(5)</sup> Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 웨이퍼 표면의 온도와 설정점의 온도간의 관계가 매우 선형적이므로, 실험시에는 온도계측기 (Fluke Datalogger 2200B)로 설정점과 주위 공기와의 온도차 ( $\Delta T_{sh}$ )를 모니터링하면서 가한 열과 기류 등에 의해 손실된 열이 평형을 이루도록 thermofoil heater로 공급되는 power를 적절히 조절하여 입자를 침착시키는 동안 시간경과에 따른  $\Delta T_{sh}$ 의 변화를  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  이하로 제어하였다. 한편, 웨이퍼 표면의 온도를 주위 공기의 온도보다 낮추기 위하여 Fig. 3(b)와 같은 냉각장치를 제작하였으며, 얼음물을 사용하여 시간 경과에 따른 온도변화를 자연적으로 제어하였다. 웨이퍼 가열시와 마찬가지로 웨이퍼 표면의 5곳의 온도를 측정하였으며, 웨이퍼상의 반경 방향의 온도분포 측정결과로부터 주위 공기의 온도와 웨이퍼 표면의 평균 온

도와의 차이가  $-10^{\circ}\text{C}$ 일 때 5곳의 위치에 따른 최대 온도차는  $0.4^{\circ}\text{C}$ 임을 알 수 있었다. 웨이퍼 가열 시와 마찬가지로 웨이퍼의 표면온도( $T_w$ )를 대표하는 값으로  $r=45\text{ mm}$ 인 곳에서 측정한 온도를 사용하였다. Fig. 4(b)에 나타낸 바와 같이 주위 공기와 알루미늄판의 설정점 및 웨이퍼 표면간의 온도차에 관한 실험적 관계식을 구한 후, 실험시 온도 계측기로 설정점과 주위 공기와의 온도차( $\Delta T_{sc}$ )를 모니터링하면서  $\Delta T_{sc}$ 가  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  이하로 제어되는 동안 입자침착 실험을 수행하였다.

### 2.3 실험방법

온·습도가 각각  $23^{\circ}\text{C}$ , 45% RH로 설정된 클래스 10의 KIST 실험용클린룸 내에 실험장치를 설치하고,<sup>(14)</sup> 입자침착 챔버내의 기류속도를 약  $68\text{ cm/sec}$ 로 일정하게 유지한 상태에서 아래와 같은 순서로 실험을 수행하였다.

실험조건(입자의 직경, 입자의 발생농도, 노출시간, 웨이퍼 표면과 주위 공기와의 온도차)을 설정한 후, 송풍기를 작동시켜 입자침착 챔버내의 기류분포를 균일하게 만들었다. 웨이퍼 가열장치 또는 냉각장치를 사용하여 설정점과 주위 공기와의 온도차( $\Delta T_{sh}$  또는  $\Delta T_{sc}$ )를 설정값에 맞춘 후, 입자발생장치의 최종 출구를 유량계에 연결하여 분사튜브의 분사속도가 기류속도와 등속이 되도록 유량을 조절하였다. 시험 웨이퍼상의 배경입자를 wafer surface scanner (PMS SAS-3600)로 2번 측정한 후, 입자침착 챔버의 중심에 설치된 지지대 위에 웨이퍼를 수평으로 고정시켰다. 입자발생장치의 최종 출구를 샘플링 챔버에 연결하여 발생되는 입자의 농도 및 크기분포를 3분 동안 레이저 입자 계수기(PMS  $\mu$  LPC-101)로 측정하였다. 이렇게 샘플링 챔버내에서 측정한 입자의 농도를 웨이퍼 상류측의 균일한 농도( $C_o$ )로 사용하였다.<sup>(10)</sup> 입자발생장치의 최종 출구를 등속 분사튜브에 연결하여 설정된 웨이퍼의

노출시간 동안 입자를 웨이퍼 상부에 공급하였다. 웨이퍼 표면과 주위 공기와의 온도차( $\Delta T_w$ )에 따라 입자침착속도가 크게 변하므로, 웨이퍼상의 침착 입자수가 100~2000개가 되도록 PSL 입자의 발생농도에 따라 웨이퍼의 노출시간을 결정하였다. 노출시간은  $\Delta T_w > 0^{\circ}\text{C}$ 인 경우 15~180분,  $\Delta T_w < 0^{\circ}\text{C}$ 인 경우 10분이었다.  $\Delta T_w > 0^{\circ}\text{C}$ 인 경우 입자침착속도가 매우 작아 노출시간이 길어지므로, 침착 실험을 하는 동안 CNC(condensation nucleus counter, TSI 3760)를 사용하여 웨이퍼 근처의 농도를 측정함으로써 등속 분사튜브로 공급되는 입자의 농도변화를 간접적으로 점검하였다. (Fig. 2) 노출시간이 경과하면, 입자발생장치의 최종 출구를 다시 샘플링 챔버에 연결하여 입자의 농도 및 크기 분포를 3분 동안 레이저 입자 계수기로 측정하였다. 또한, 웨이퍼를 꺼내어 웨이퍼상에 침착된 입자수를 wafer surface scanner로 2번 반복하여 측정하였다.

실험 데이터는 먼저 wafer surface scanner의 출력중의 하나인 입자지도(particle map)를 보고 웨이퍼상에 입자가 균일하게 침착되었는가를 확인하였으며, 거의 모든 경우 입자가 웨이퍼상에 매우 균일하게 침착되는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 입자발생장치에 EC(electrostatic classifier)를 사용하지 않았으므로 입자가 아주 단분산적으로 발생되지 않을 수 있다. 그러므로, 전체 입자를 모두 고려하여 입자침착속도를 계산하면 오차가 생길 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해서 본 실험에서는 PSL 입자의 입경 부근에 해당되는 두 계측기의 공통 입경분류 채널범위를 설정하여 이 입경범위내의 입자단을 대상으로 하여 데이터를 처리하였다. 즉,  $D_p = 0.497\text{ }\mu\text{m}$ 인 경우 데이터 처리범위를  $0.4\sim0.7\text{ }\mu\text{m}$ 로 설정하면 입경이  $0.497\text{ }\mu\text{m}$  부근인 입자를 전부 포함할 수 있으며 이보다 크거나 작은 입자를 데이터 처리시 배제할 수 있어 침착속도 계

Table 1 Average deposition velocities due to convection, diffusion, and sedimentation<sup>(1)</sup>

PSL sphere diameter [ $\mu\text{m}$ ]	Selected particle size range [ $\mu\text{m}$ ]	Average deposition velocity [cm/sec]	
		Mean	Standard deviation
0.305	0.2~0.4	$7.42 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$
0.497	0.4~0.7	$1.43 \times 10^{-3}$	$2.40 \times 10^{-4}$
0.720	0.5~1.0	$2.68 \times 10^{-4}$	$2.58 \times 10^{-4}$

산시 오차를 줄일 수 있다. 이와 같은 방법으로 각 입경에 대하여 선택한 입경범위를 Table 1에 나타냈다.<sup>(1)</sup>

등속 분사튜브로 공급되는 입자의 농도로는 입자 침착 전후에 측정한 값의 평균을 사용하였고, 단위 면적당 웨이퍼상의 침착입자수로는 입자침착 후에 측정한 값과 입자침착 전에 측정한 값의 차이를 사용하여 식(1)로부터 입자의 평균 침착속도를 계산하였다.

### 3. 결과 및 검토

앞에서도 언급하였듯이 열영동에 관한 실험 데이터가 거의 알려져 있지 않고, 이전 연구에서 클린룸 환경 하에 수평으로 놓인 웨이퍼상의 입자침착속도가 예측모델에 의해 매우 정확하게 예측될 수 있음을 알았다.<sup>(1)</sup> 따라서, 본 연구에서 얻은 실험결과와 비교하기 위하여 먼저 입자침착속도의 예측모델을 검토하였다.

#### 3.1 입자침착속도의 예측모델

공기 중에 온도구배가 있을 때 입자는 온도가 낮은 쪽으로 힘을 받는데, 이 힘으로 인해 생기는 입자의 운동을 열영동이라 부른다. 이와 같이 열영동에 의해 생기는 입자의 이동속도, 즉 열영동속도( $v_t$ )는 일반적으로 온도구배( $\nabla T$ ) 및 열영동계수( $K$ )에 비례하므로 아래 식(2)와 같이 표현된다.

$$v_t = -K \frac{\nu}{T} \nabla T \quad (2)$$

Namiki 등<sup>(7)</sup>은 웨이퍼상의 평균 온도구배를 산정하는데 아래와 같은 식을 제안하였다.

$$\overline{\nabla T} = 0.733 Pr^{1/3} \left( \frac{u}{\nu D_w} \right)^{1/2} (T_w - T_a) \quad (3)$$

여기서,  $Pr$ 은 Prandtl수,  $u$ 는 수직방향의 기류속도,  $D_w$ 는 웨이퍼의 직경이다. 식(3)을 식(2)에 대입하면 온도구배에 의한 웨이퍼상의 입자의 평균 열영동 속도를 아래와 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$\bar{v}_t = -0.733 K Pr^{1/3} \left( \frac{u \nu}{D_w} \right)^{1/2} \left( \frac{T_w - T_a}{T_w} \right) \quad (4)$$

본 연구에서는 평균 열영동속도의 산정에 필요한 열영동계수를 구하기 위하여 Batchelor와 Shen<sup>(15)</sup>이 사용한 아래와 같은 식을 채택하였다.

$$K = 2.294 \frac{(\alpha + 2.2Kn) C_c}{(1 + 3.438Kn)(1 + 2\alpha + 4.4Kn)} \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 입자와 공기의 열전달율의 비,  $Kn$ 은 Knudsen수,  $C_c$ 는 Cunningham 보정계수이다.

한편, Liu와 Ahn은 수직기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓여 있을 때 대류와 확산, 중력침강에 의한 웨이퍼상의 입자의 평균 침착속도를 각각 식(6) 및 (7)과 같은 식을 사용하여 예측하였다.<sup>(1,12,13)</sup>

$$\bar{v}_d = 1.08 Sc^{1/3} Re^{1/2} \frac{D}{D_w} \quad (6)$$

$$v_s = \frac{C_c \rho_p g D_p^2}{18 \mu} \quad (7)$$

따라서, 입자의 침착 메카니즘으로 대류, 확산 및 중력침강에 추가로 열영동을 고려할 경우 입자의 평균 침착속도는 아래와 같은 2가지 방법에 의해 예측할 수 있다. 즉, 입자의 평균 침착속도는 Liu와 Ahn<sup>(13)</sup>의 접근방법을 사용하여 각 성분을 산술적으로 합하면 식(8)과 같이 예측되고, Crump 와 Seinfeld<sup>(16)</sup>가 구한 밀폐용기내에서 경계층내의 확산방정식의 해를 이용한 Emi 등<sup>(17)</sup>의 접근방법을 사용하면 식(9)와 같이 예측된다.

$$\bar{v}_{dst} = \bar{v}_d + v_s + \bar{v}_t \quad (8)$$

$$\bar{v}_{dst} = \frac{-v_s + \bar{v}_t}{\exp\left(\frac{-v_s + \bar{v}_t}{\bar{v}_d}\right) - 1} \quad (9)$$

#### 3.2 열영동효과

반도체 제조공정에서 현재 오염제어 관점에서 중요한 입경범위는  $0.1\sim1.0 \mu\text{m}$ 이다. Ye 등<sup>(8)</sup>은 웨이퍼 표면과 주위 공기와의 온도차( $\Delta T_w$ )를  $10\sim40^\circ\text{C}$ 로 변화시키면서 입경이  $1\sim5 \mu\text{m}$  범위에 있는 PSL입자의 평균 침착속도를 측정하였다. 이들의 실험결과로부터 입경이  $1 \mu\text{m}$  이하인 입자의 평균 침착속도를 측정하기 위해서는  $\Delta T_w$ 를  $10^\circ\text{C}$  이하로 유지하여야 된다는 것을 알 수 있었다. 입자 침착속도가  $10^{-5} \text{ cm/sec}$  이하일 경우 측정상의 어려움이 많으며,  $\Delta T_w < 0^\circ\text{C}$ 인 경우  $|\Delta T_w|$ 의 변화에 대한 입자침착속도의 변화구배가 크지 않고, 예비 실험에서  $\Delta T_w = -23^\circ\text{C}$  일 때 웨이퍼 표면에 물방울이 맺혀 실험을 할 수 없음을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 입경이  $0.3\sim0.8 \mu\text{m}$ 인 PSL 입자의 열영동효과를 살펴보기 위하여  $\Delta T_w$ 를  $-10\sim4^\circ\text{C}$ 로 변화시키면서 입자의 평균 침착속도를 측정하였다. 대부분의 실험에서  $\Delta T_w > 0^\circ\text{C}$ 인 경우

PSL 입자의 발생농도( $C_\infty$ ) 범위는 7~35개/ $\text{cm}^3$ , 단위면적 당 웨이퍼상의 침착 입자수( $N_a$ ) 범위는 2~20개/ $\text{cm}^2$ 이었다.  $\Delta T_w < 0^\circ\text{C}$ 인 경우  $C_\infty$ 와  $N_a$ 의 범위는 각각 1~20개/ $\text{cm}^3$ , 2~30개/ $\text{cm}^2$ 이었다.

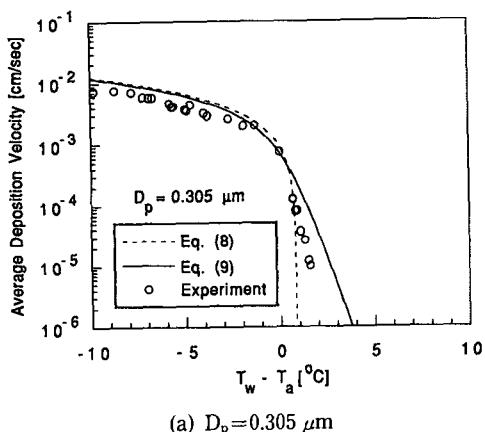
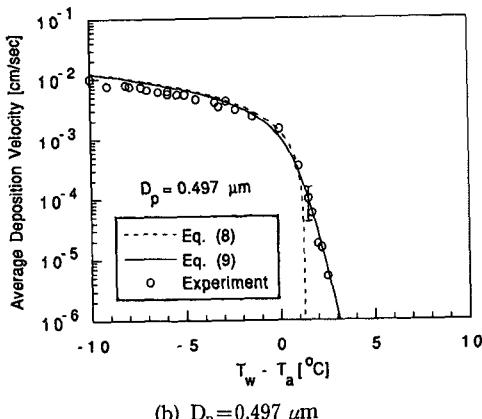
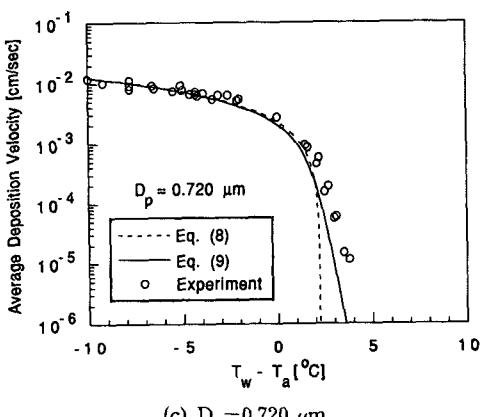
(a)  $D_p = 0.305 \mu\text{m}$ (b)  $D_p = 0.497 \mu\text{m}$ (c)  $D_p = 0.720 \mu\text{m}$ 

Fig. 5 Thermophoretic effect on the average deposition velocity

PSL 입자의 발생농도( $C_\infty$ ) 범위는 7~35개/ $\text{cm}^3$ , 단위면적 당 웨이퍼상의 침착 입자수( $N_a$ ) 범위는 2~20개/ $\text{cm}^2$ 이었다.  $\Delta T_w < 0^\circ\text{C}$ 인 경우  $C_\infty$ 와  $N_a$ 의 범위는 각각 1~20개/ $\text{cm}^3$ , 2~30개/ $\text{cm}^2$ 이었다.

온도차에 따른 평균 침착속도의 변화를 측정하여 Fig. 5에 나타냈다. 이때  $\Delta T_w = 0^\circ\text{C}$ 에 대한 평균 침착속도는 이전 연구에서 구한 값을 사용하였다.<sup>(1)</sup> (Table 1) 평균 열영동속도는 식(4)에서 보는 바와 같이  $|\Delta T_w|$ 에 비례하지만, 실험에서는 열영동뿐만 아니라 대류, 확산 및 중력침강과 같은 입자 침착 메카니즘이 모두 작용하므로 측정된 평균 침착속도는 이러한 영향이 복합하여 나타난 결과이다. Fig. 5를 보면, 측정된 입자의 평균 침착속도는  $\Delta T_w < 0^\circ\text{C}$ 인 경우  $|\Delta T_w|$ 가 증가함에 따라 서서히 증가하는 반면에,  $\Delta T_w > 0^\circ\text{C}$ 인 경우에는  $\Delta T_w$ 가 증가함에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. 각 침착 메카니즘이 평균 침착속도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여  $D_p = 0.497 \mu\text{m}$ 인 경우 각 침착 메카니즘에 의한 침착속도를 3.1항에 소개한 예측 모델로 구하여 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6을 보면,  $|\Delta T_w| > 1^\circ\text{C}$ 인 경우 열영동이 가장 중요한 침착 메카니즘이 되며,  $|\Delta T_w| < 0.2^\circ\text{C}$ 인 경우 열영동의 영향이 가장 미약하다는 것을 알 수 있다.

본 실험결과와 비교할 만한 실험 데이터가 거의 없으므로, 앞에서 소개한 예측모델에 의한 평균 침착속도의 예측값을 Fig. 5에 나타내 측정값과 비교

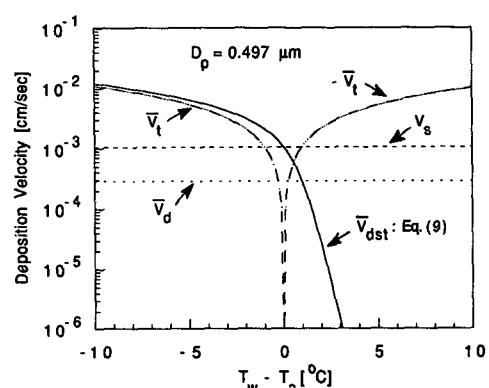


Fig. 6 Combined effect of each deposition mechanism on the average deposition velocity for  $D_p = 0.497 \mu\text{m}$

하여 열영동효과를 고찰하였다. Fig. 5를 보면,  $\Delta T_w < 0^\circ\text{C}$ 인 경우 대체로 예측모델에 의한 예측값이 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다.  $\Delta T_w > 0^\circ\text{C}$ 인 경우에는 식(9)에 의해 예측된 평균 침착속도는 측정값과 비교적 잘 일치하지만, 식(8)은 온도차가 커질수록 평균 침착속도를 측정값보다 매우 낮게 예측함을 알 수 있다. Fig. 5에서 실험값과 식(9)에 의한 예측곡선을 자세히 비교하여 보면,  $D_p = 0.497 \mu\text{m}$ 인 경우 예측곡선이 실험값에 상당히 근접하지만, 입경이 변함에 따라 식(9)는 침착속도를 대체로 높거나 낮게 예측함을 알 수 있다. 따라서, 실험값을 보다 잘 예측하기 위해서는 향후 많은 실험 데이터를 확보하여 예측모델에서 입경과 관련된 부분을 수정할 필요가 있다고 생각된다. 일반적으로  $Gr/Re^2 < 10$ 인 경우 자연대류는 강제대류에 비해 무시할 만큼 그 영향이 적다고 알려져 있다.<sup>(8)</sup> 본 실험조건( $0^\circ\text{C} < \Delta T_w < 4^\circ\text{C}$ )의 경우  $Gr/Re^2 < 0.03$ 이므로, 본 연구에서는 예측모델에 의한 평균 침착속도 계산시 가열된 웨이퍼 주위의 자연대류에 의한 영향을 고려하지 않았다.

실험의 반복성을 점검하기 위하여 입경이  $0.497 \mu\text{m}$ 인 PSL 입자에 대하여  $\Delta T_w = 1.5^\circ\text{C}$ 일 때 10회 반복측정하여 그 결과를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7을 보면, 입자침착속도의 (표준편차/평균)은 4%로 온도차에 따른 침착속도의 변화가 매우 큰 점을 감안하면 반복성이 양호하다고 생각된다. 참고로  $\Delta T_w = 1.5^\circ\text{C}$ 일 때 평균 침착속도의  $2\sigma$  오차범위를 Fig. 5(b)에 나타냈다.

한편, Fig. 5로부터 본 실험에 사용된 입경범위의 경우  $\Delta T_w$ 를  $4^\circ\text{C}$ 만 유지해도 입자의 평균 침착

속도를  $10^{-5} \text{ cm/sec}$  이하로 낮출 수 있어 웨이퍼상의 입자침착을 거의 완전히 억제할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 열영동효과에 관한 실험결과로부터 웨이퍼상의 입자침착을 효과적으로 제어하기 위해서는 반도체 제조공정에 있어서 제품의 정전기 제어 대책과 함께 온도관리도 중요하게 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 열영동현상이 반도체 웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향을 입자의 평균 침착속도를 측정하여 고찰하였다. 실험결과로부터 입자의 평균 침착속도는  $|\Delta T_w|$ 가 증가함에 따라  $\Delta T_w < 0^\circ\text{C}$ 일 때는 서서히 증가하지만,  $\Delta T_w > 0^\circ\text{C}$ 일 때는 급격히 감소함을 알 수 있었다. 평균 침착속도의 측정값은 Emi 등의 예측모델에 의해 근사적으로 예측되지만, 실험값을 보다 잘 예측하기 위해서는 예측모델에서 입경과 관련된 부분의 수정이 필요하다고 생각된다. 본 연구를 통하여 열영동력이 반도체 웨이퍼상의 입자침착에 큰 영향을 미치는 것을 실험적으로 확인하였는데, 이러한 연구결과가 향후 웨이퍼상의 입자침착 제어에 활용되기 위해서는 반도체 제조공정상의 온도제어 문제가 검토되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 논문은 과학기술처에서 시행한 특정연구개발 사업의 일환으로 수행하여 얻은 연구결과임을 밝혀 두며, 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 표한다.

#### 참고문헌

- (1) 배귀남, 박승오, 이춘식, 명현국, 신흥태, 1993, "Wafer Surface Scanner를 이용한 반도체 웨이퍼상의 입자침착속도의 측정," 공기조화냉동 공학논문집, 제5권, 제2호, pp. 130~140.
- (2) Stratmann, F., Fissan, H. and Papperger, A., Friedlander, S., 1988, "Suppression of Particle Deposition to Surfaces by the Thermophoretic Force," Aerosol Science and Technology, Vol. 9, pp. 115~121.
- (3) Peterson, T. W., Stratmann, F. and Fissan, H.,

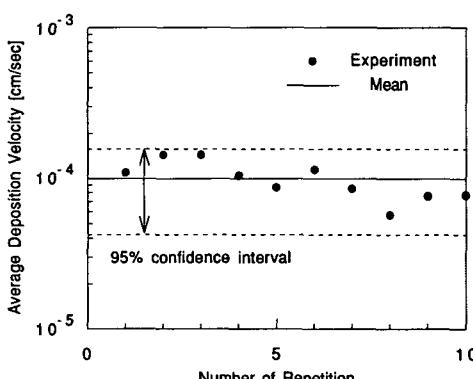


Fig. 7 Repeatability of the average deposition velocity for  $D_p=0.497 \mu\text{m}$  and  $T_w-T_s=1.5^\circ\text{C}$

- 1989, "Particle Deposition on Wafers : A Comparison between Two Modelling Approaches," Journal of Aerosol Science, Vol. 20, No. 6, pp. 683~693.
- (4) Opiolka, S., Fissan, H., Ye, Y. and Pui, D. Y. H., 1990, "Reduction of Particle Deposition on a Free-Standing Semiconductor Wafer by Thermophoretic Effect," In Proceedings of the 10th Meeting, Vol. 1, International Confederation of Contamination Control Societies, September, 10 ~14, Zurich, Swiss, pp. 85~88.
- (5) Donovan, R. P., Yamamoto, T., Clayton, A. C. and Ensor, D. S., 1988, "Experimental Study of Particle Deposition on Silicon Wafers under the Combined Effects of Electric Fields and Thermal Gradients," In Proceedings of the 9th Meeting, International Confederation of Contamination Control Societies, September, 26~30, Los Angeles, CA, U. S. A., pp. 37~42.
- (6) Namiki, N. and Shibuya, Y., 1990, "Deposition of Aerosol Particles on Wafer Surface due to Thermophoretic Force," In Proceedings of the 9th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, Japan Air Cleaning Association, May, 8~9, Tokyo, Japan, pp. 29 ~32.
- (7) Namiki, N., Shibuya, Y. and Sakiya, F., 1991, "Suppression of Particle Deposition on Wafers by Themophoretic Force : Application to a Wafer Carrier Robot," In Proceedings of the 10th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, Japan Air Cleaning Association, April, 9~10, Tokyo, Japan, pp. 155 ~160.
- (8) 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.
- (9) Hayakawa, I., Fujii, S. and Kim, K. Y., 1986, "Studies on Particulate Behavior and Adhesion in Laminar Airflow Clean Room," In Proceedings of the 32nd Annual Technical Meeting, Institute of Environmental Sciences, May, 6~8, Dallas, TX, U.S.A., pp. 483~486.
- (10) 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.
- (11) Pui, D. Y. H., Ye, Y. and Liu, B. Y. H., 1990, "Experimental Study of Particle Deposition on Semiconductor Wafers," Aerosol Science and Technology, Vol. 12, pp. 795~804.
- (12) 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.
- (13) Liu, B. Y. H. and Ahn, K. H., 1987, "Particle Deposition on Semiconductor Wafers," Aerosol Science and Technolgy, Vol. 6, pp. 215~224.
- (14) Lee, C. S., Myong, H. K. and Shin, H. T., 1992, "KIST Cleanroom Laboratory," In Proceedings of the 11th Meeting, International Confederation of Contamination Control Societies, September, 21~52, London, U.K., pp. 549~550.
- (15) Batchelor, G. K. and Shen, C., 1985, "Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold Surfaces," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 107, No. 1, pp. 21~37.
- (16) Crump, J. G. and Seinfeld, J. H., 1981, "Turbulent Deposition and Gravitational Sedimentation of an Aerosol in a Vessel of Arbitrary Shape," Journal of Aerosol Science, Vol. 12, No. 5, pp. 405~415.
- (17) Emi, H., Otani, Y., Kanaoka, C. and Kato, K., 1989, "Deposition of Submicron Particles onto Wafer Surface," In Proceedings of the 8th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, Japan Air Cleaning Association, April, 26~27, Tokyo, Japan, pp. 9 ~14.