

수직 웨이퍼상의 입자 침착속도의 측정

Measurement of Particle Deposition Velocity Toward a Vertical Wafer Surface

배 귀 남,* 이 춘 식,* 박 승 오,** 안 강 호***

G. N. Bae, C. S. Lee, S. O. Park, K. H. Ahn

Key words : Particle Deposition Velocity(입자 침착속도), Vertical Wafer(수직 웨이퍼), Convective Diffusion(대류확산)

Abstract

The average particle deposition velocity toward a vertical wafer surface in a vertical air-flow chamber was measured by a wafer surface scanner(PMS Model SAS-3600). Polystyrene latex(PSL) spheres with diameters between 0.3 and 0.8 μ m were used. To examine the effect of the airflow velocity on the deposition velocity, experiments were conducted for three vertical airflow velocities : 20, 30, 50cm/s. Experimental data of particle deposition velocity were compared with those given by prediction model suggested by Liu and Ahn (1987).

1. 서 론

1980년대 이후 반도체 산업의 급성장으로 인해 반도체 제조공정에서의 오염제어가 중요한 문제로 취급되기 시작하면서 미립자에 관한 연구가 활발히 수행되었다. 반도체 칩의 집적도가 증가함에 따라 제어해야 할 입경도 더욱 작아지고 오염원으로 인식되는 대상도 더욱 확대되었다. 즉, 제조환경인 청정 공간, 작업자 뿐만 아니라 공정용 가스, 약품, 초순수 및 감압 상태의 제조장비내 등이 오염원으로 지적되고 있다. 이러한 오염원으로부터 발생된 입자가 제조공정 중에 웨이퍼상에 부착되면 칩의 불량률 초래하여 생산 수율을 떨어뜨리게 된다. 그

러므로, 오염원을 일정 수준 이하로 제어하기 위해서는 오염원의 특성이 웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 필요가 있다.

Fig.1에 나타낸 바와 같이 클린룸 내에서 웨이퍼가 위치한 환경은 크게 3가지로 구분할 수 있다.¹⁾ 지금까지 수행된 연구들을 살펴보면, 수직 기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓인 경우(Fig.1(a))에 대하여 기류속도, 입경, 정전기, 웨이퍼와 주위 공기와의 온도차 등이 웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있다.^{2,3,4)} 수직 기류하에 웨이퍼가 수직으로 놓인 경우(Fig.1(b))에 대한 실험적인 연구는 Hayakawa 등(1986)과 Otani 등(1989)에 의해 수행되었고,^{5,6)} 이론적인 연구는 Liu와 Ahn(1987)에 의해 수행되었다.⁷⁾ Hayakawa 등은 레이저를 사용하여 원격으로 측정하는 화상처리장치(image processing system)를 사용하여 웨이퍼상의 일정 면적(1cm²)

* 정회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

** 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

*** 정회원, 한양대학교 기계공학과

에 대한 입자의 평균 침착속도를 측정하였다. 이들의 실험 데이터는 매우 적고, 정전기 등의 실험조건이 제어되지 않아 이들이 구한 실험값의 경향에 일관성이 부족하였다.²⁾ Otani 등은 fluorometry 방법을 사용하여 입경이 0.03~0.2 μ m 범위인 입자의 평균 침착속도를 측정하였다. Fluorometry 방법을 사용함에 따라 실험 시간이 길어 이들이 얻은 실험 데이터는 많지 않고, 실험 데이터는 대체로 예측 모델에 의한 예측값과 유사한 경향을 보이지만, 실험 데이터 중에는 예측값과 상당한 편차를 보이는 데이터가 있다. 이와 같이 실험적인 연구가 많이 되어 있지 않고, 실험 데이터의 신뢰 범위에도 의문이 남아 있다.

따라서, 본 연구에서는 수직 기류하에 웨이퍼가 수직으로 놓여 있을 때 0.3~0.8 μ m 범위인 PSL (polystyrene latex) 입자의 평균 침착속도를 wafer surface scanner(PMS Model SAS-3600)를 사용하여 측정하였다. 이때 기류속도를 20, 30, 50cm/s로 변화시켜 입자침착챔버 내의 기류 특성을 살펴보고, 기류속도가 입자 침착속도에 미치는 영향도 고찰하였다. 또한, 입자 침착속도의 측정값을 Liu와 Ahn(1987)의 예측모델에 의해 구한 값과 비교하였다.

2. 실험

웨이퍼 상부의 유속분포를 균일하게 만들어 주기 위하여 Fig.2와 같은 입자침착챔버를 제작하였다. 침착챔버 내의 유속 특성을 살펴보기 위하여 3차원 초음파 풍속계(Kaijo Denki Co., Ltd Model WA-395)를 사용하여 유속을 측정하였다. 클린룸 내 유속은 매우 저속으로 Pui 등(1991)의 주파수 분석 실험결과에 의하면 주된 주파수는 1~3Hz이므로,⁹⁾ 본 실험에서는 평균 유속과 난류강도의 반복성을 고려하여 6Hz의 샘플링 간격으로 1분 동안 측정하여 평균 유속과 난류강도를 구하였다. 여기서, 난류강도는 RMS(root mean square) 유속을 평균 유속으로 나누어 백분율로 나타낸 것이다.

입자침착챔버내 설정 유속(u)이 20, 30, 50cm/s인 경우에 대한 평균 유속분포를 Fig.3에 나타냈다. 그림에서 H는 ULPA(ultra low penetration air) 필터로부터의 차방거리이다. Fig.3으로부터

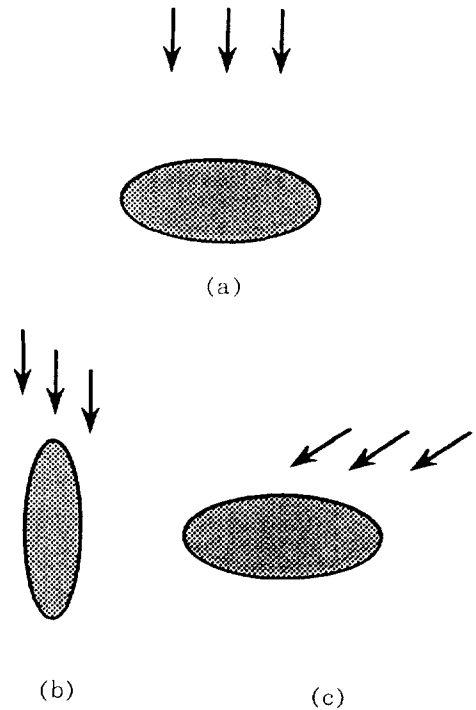


Fig.1 Schematic diagram showing (a) horizontal wafer in vertical airflow, (b) vertical wafer in vertical airflow and (c) horizontal wafer in horizontal airflow

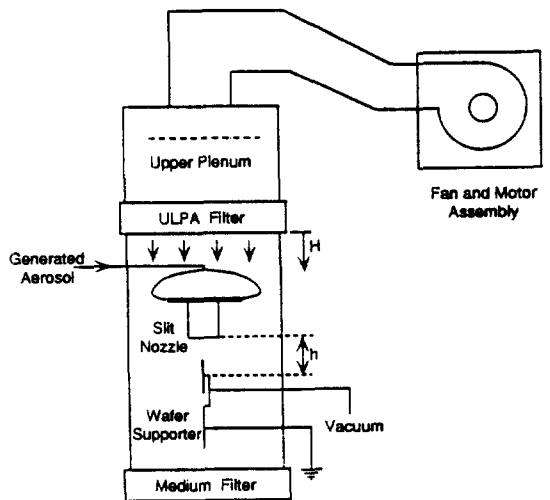


Fig.2 Schematic diagram of particle deposition chamber

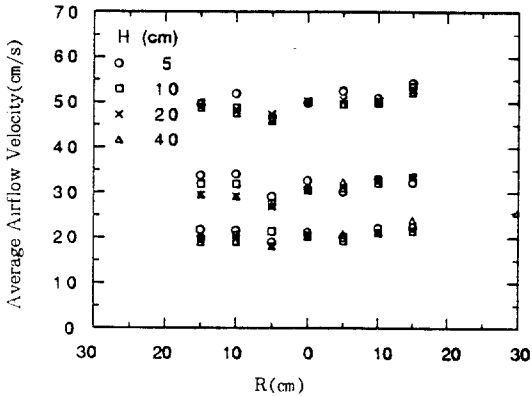


Fig.3 Average vertical airflow velocity distribution in the particle deposition chamber

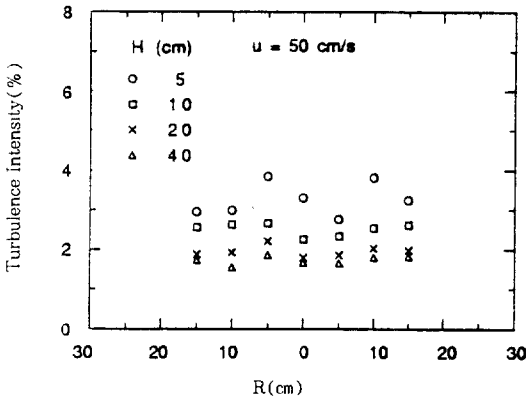


Fig.4 Turbulence intensity distribution for $u = 50 \text{ cm/s}$

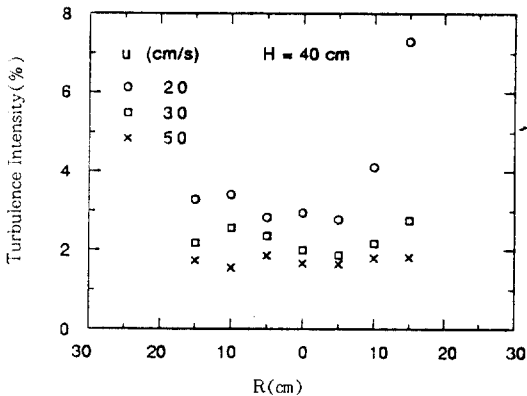


Fig.5 Turbulence intensity variation with the vertical airflow velocity at $H = 40 \text{ cm}$

침착챔버 내의 시험단면상에서 중심으로부터 거리 (R)가 15cm 이내인 영역에서 유속은 $\pm 12\%$ 이내로 균일함을 알 수 있다. Fig.4는 $u = 50 \text{ cm/s}$ 인 경우에 대한 난류강도를 나타낸 것으로, 난류강도는 4% 이내이고, H가 증가함에 따라 작아짐을 알 수 있다. Fig.5는 $H = 40 \text{ cm}$ 인 위치에서 설정 유속에 따른 난류강도의 변화를 나타낸 것인데, 유속이 감소함에 따라 난류강도가 증가함을 알 수 있다.

한편, Fig.6과 같은 입자발생장치를 사용하여 발생시킨 PSL 입자를 입자침착챔버 내에 수직으로 설치된 웨이퍼 상부에 균일하게 공급하기 위하여 Fig.7과 같은 슬릿형 노즐을 제작하였다. 노즐 출구 하방 1cm 높이에서 노즐 하류의 유속분포를 열선 풍속계(TSI VelociCalc Mode 8350)로 측정한 결과를 Fig.8에 나타냈다. 그림에서 r은 노즐 중심으로부터의 거리이다. 또한, 노즐 출구 하방 1cm 높이에서 노즐 하류의 농도분포를 레이저 입자 계수기(PMS Model $\mu\text{LPC-101}$)로 측정한 결과를 Fig.9에 나타냈다. Fig.8과 9를 보면, 노즐 하류의 유속분포와 농도분포는 각각 $\pm 20\%$, $\pm 10\%$ 이내로 비교적 균일함을 알 수 있다.

온도와 상대습도가 각각 23°C , 45%로 설정된 클래스 10의 KIST(Korea Institute of Science and Technology) 실험용 클린룸 내에 실험장치를 설치하고, 다음과 같은 순서로 실험을 수행하였다. 먼저 실험조건(기류속도, 입경, 입자농도, 노출시간, 노즐과 웨이퍼간의 거리)을 설정한 후, 송풍기를 작동시켜 침착챔버 내의 기류분포를 균일하게 만들었다. 입자발생장치의 최종 출구를 유량계에 연결하여 노즐의 분사속도가 기류속도와 등속이 되도록 유량을 조절하였다. 시험 웨이퍼상의 배경입자를 wafer surface scanner로 2번 측정된 후, 침착챔버 내에서 웨이퍼의 중심과 노즐 출구간의 수직거리가 10cm인 위치에 웨이퍼를 수직으로 고정시켰다. 입자발생장치의 최종 출구를 샘플링 챔버에 연결하여 발생하는 입자의 농도 및 크기분포를 3분 동안 레이저 입자 계수기로 측정한 후, 입자발생장치의 최종 출구를 슬릿형 노즐에 연결하여 설정된 웨이퍼의 노출시간 동안 입자를 웨이퍼 상부에 공급하였다. 이때 노출시간은 PSL 입자의 발생 농도를 $15 \sim 76 \text{ 개/cm}^3$ 로 유지했을 때 웨이퍼상의 침착 입자수가 200~1,300개가 되도록 결정되었

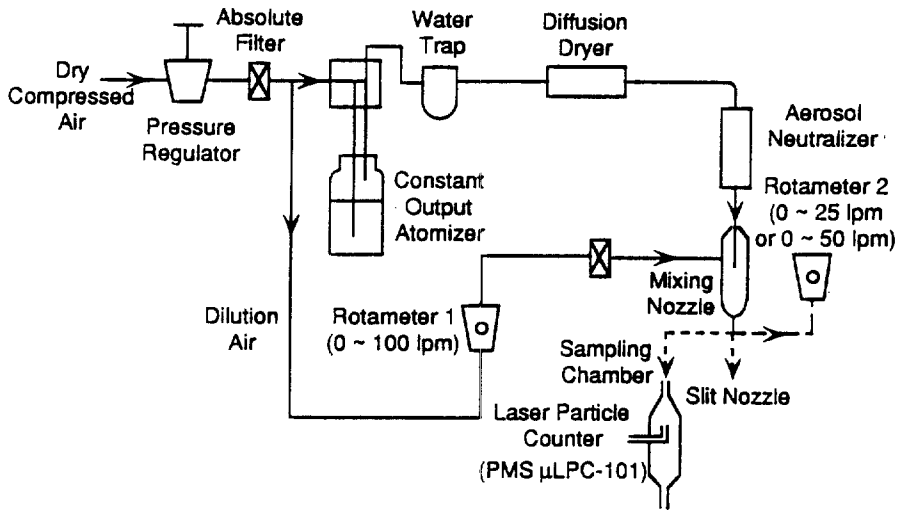


Fig.6 Schematic diagram of particle-generating system

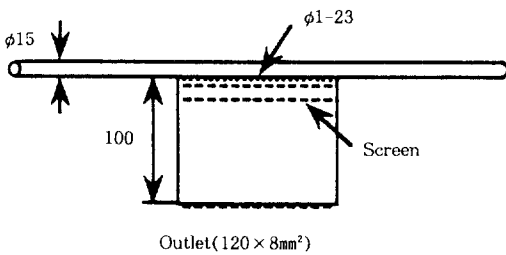


Fig.7 Schematic diagram of slit nozzle

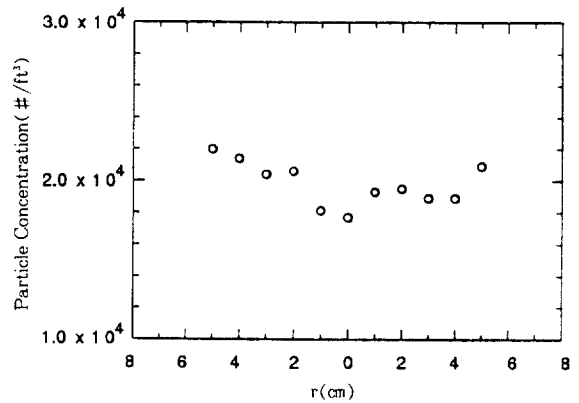


Fig.9 Particle concentration distribution in the downstream of slit nozzle

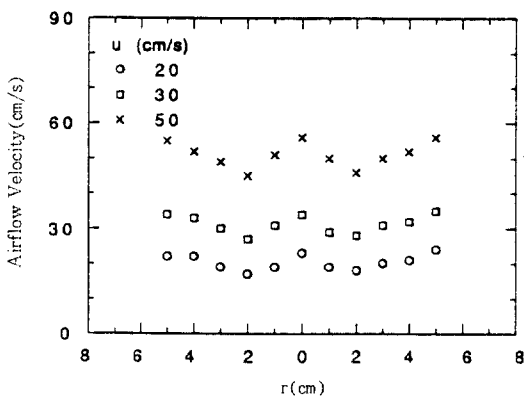


Fig.8 Airflow velocity distribution in the downstream of slit nozzle

다. 노출시간(10~25분)이 경과하면, 입자발생 장치의 최종 출구를 다시 샘플링 챔버에 연결하여 3분 동안 레이저 입자 계수기로 측정하였다. 또한, 웨이퍼를 꺼내어 웨이퍼상에 침착된 입자수를 wafer surface scanner로 2번 반복하여 측정하였다.

실험하는 동안 웨이퍼가 노즐과 평행하게 수직으로 설치되었는지를 점검하기 위하여 먼저 wafer surface scanner의 출력인 입자지도 (particle

map)를 보고 웨이퍼상에 입자가 균일하게 침착되었는가를 확인하였으며, 대부분의 경우 입자가 웨이퍼상에 매우 균일하게 침착되는 것을 알 수 있었다. PSL 입자의 입경 부근에 해당되는 두 계측기의 공통 입경분류 채널범위를 설정하여 이 입경범위 내의 입자만을 대상으로 데이터를 처리하였다^{3),4)} 또한, 웨이퍼 취급시 오염의 영향을 배제하기 위하여 웨이퍼 가장자리로부터 6mm의 폭을 데이터 처리시 제외시켰다.

일반적으로 입자 침착속도(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_{∞} 는 상류측의 입자농도, N_a 는 단위 면적당 웨이퍼상에 침착된 입자수, 그리고 t 는 노출시간이다.

본 실험에서는 샘플링 챔버 내에서 입자침착 전후에 측정된 값의 평균을 C_{∞} 로 사용하였고, wafer surface scanner로 입자침착 후에 측정된 값과 입자침착 전에 측정된 값의 차이를 N_a 로 사용하여 식 (1)로부터 평균 침착속도를 구하였다.

3. 결과 및 검토

수직 기류하에 웨이퍼가 수직으로 놓여 있는 경우에 대한 실험 데이터가 거의 알려져 있지 않으므로, 본 연구에서 얻은 실험결과와 비교하기 위하여 먼저 입자 침착속도의 예측모델을 검토하였다.

Liu와 Ahn(1987)은 수평 기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓여 있는 경우 웨이퍼상의 유동을 층류 경계층 유동으로 가정하여 국부 Sherwood 수를 구한 후, 이것을 웨이퍼 표면 전체에 대하여 적분하여 대류확산에 의한 웨이퍼상의 평균 침착속도(\bar{v}_d)를 식(2)와 같이 구하였다.^{7),9)}

$$\bar{v}_d = 0.739 Sc^{1/3} Re^{1/2} \frac{D}{D_w} \quad (2)$$

여기서, Sc 는 Schmidt 수, Re 는 Reynolds 수, D 는 입자의 확산계수, D_w 는 웨이퍼의 직경이다.

수직 기류하에 웨이퍼가 수직으로 놓여 있는 경우 웨이퍼상의 입자침착은 중력침착의 영향을 받지 않고, 웨이퍼상의 유동은 수평 기류하에 웨이퍼가 수평으로 놓여 있는 경우와 동일하므로, 웨이퍼상의 평균 침착속도는 식 (2)에 의해 예측될 수 있다. 이러한 예측모델을 사용하여 본 실험조건에서의 기류속도에 따른 수직 웨이퍼상의 입자 침착속도의 변화를 Fig.10에 나타냈다. 그림을 보면, 기류속도가 증가함에 따라 침착속도는 약간씩 증가함을 알 수 있다.

수직 기류하에 웨이퍼가 수직으로 놓여 있는 경우에 대하여 입경이 0.305, 0.497, 0.720 μ m인 PSL 입자의 평균 침착속도를 실험적으로 구하여 Fig.11에 나타냈다. 그림에서 실선은 식(2)에 의해 예측된 평균 침착속도를 나타낸 것이다. 실험적으로 구한 침착속도는 예측값보다 크며, 기류속도가 감소함에 따라 침착속도간의 차이가 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 난류확산은 웨이퍼상의 입자침착을 촉진시킨다고 알려져 있는데, 본 실험에서 측정된 침착챔버 내의 난류강도도 기류속도가 감소함에 따라 증가하므로, (Fig.5) 난류확산에 의한 입자침착이 측정값과 예측값간의 차이가 나는 원인 중의 하나일 것으로 추정된다. 따라서, 향후 기류의 난류강도를 조절하여 난류확산이 웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향을 체계적으로 연구할 필요가 있다고 생각된다.

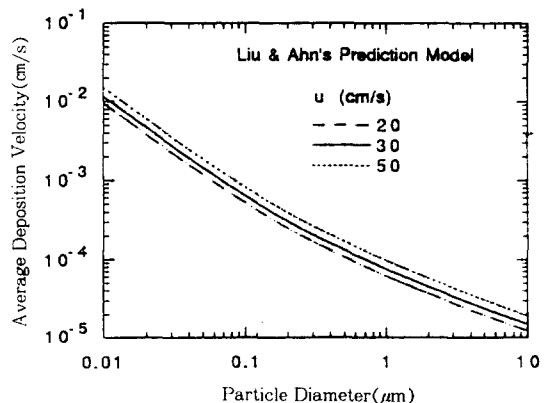


Fig.10 Airflow velocity effect on the average deposition velocity

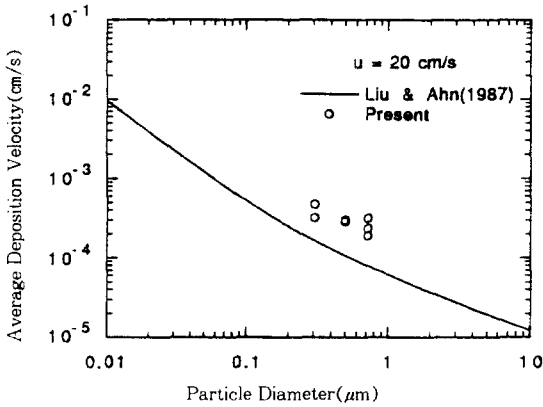
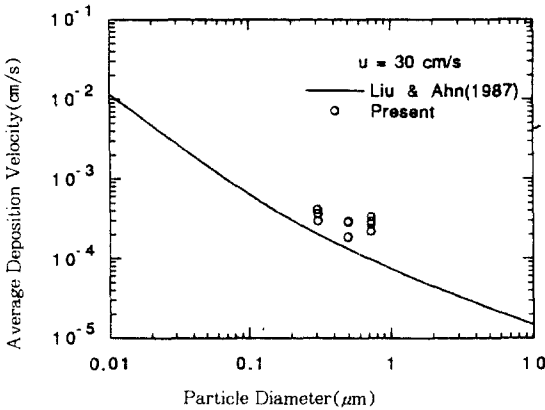
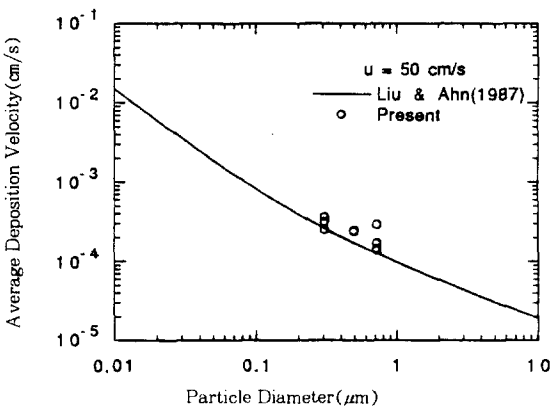
(a) $u = 20 \text{ cm/s}$ (b) $u = 30 \text{ cm/s}$ (c) $u = 50 \text{ cm/s}$

Fig.11 Average deposition velocity variation with the particle diameter for a vertical wafer in vertical airflow

4. 결 론

본 연구에서는 수직 기류하에 수직으로 놓여 있는 웨이퍼상의 입자 침착속도를 wafer surface scanner(PMS Model SAS-3600)를 사용하여 측정하였다. 3가지 기류속도(20, 30, 50cm/s)에서 입자 침착속도의 측정값은 Liu와 Ahn(1987)의 예측값보다 약간 높으며, 이러한 차이는 기류속도가 감소함에 따라 커짐을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Sakata, S., Inoue, M. and Chirifu, S., 1988, "Aerosol Deposition on Wafer Surface", In Proceedings of the 9th Meeting, International Confederation of Contamination Control Societies, September 26~30, Los Angeles, CA, U. S. A., pp. 65~72.
2. 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.
3. Bae, G. N., Lee, C. S. and Park, S. O., 1994, "Measurement of Particle Deposition Velocity Toward a Horizontal Semiconductor Wafer by Using a Wafer Surface Scanner", Aerosol Science and Technology, Vol. 21, No. 1, pp. 72~82.
4. 배귀남, 박승오, 이춘식, 안이기, 1994, "열영동력이 수평 웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제1호, pp. 175~183.
5. 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.
6. 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.
7. Liu, B. Y. H. and Ahn, K. H., 1987, "Particle Deposition on Semiconductor Wafers", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 6, pp. 215~224.
 8. Pui, D. Y. H., Gratzek, J. P. and Kuehn, T. H., 1991, "Experimental Measurements of Cleanroom Airflow and Particle Transport for Flow Modelling Exercise", In *Proceedings of the 37th Annual Technical Meeting, Institute of Environmental Sciences*, May 6~10, San Diego, CA, U. S. A., pp. 90~97.
 9. Eckert, E. R. G. and Drake, R. M., 1959, *Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York.