

< 논문 >

공기 부상방식 이송시스템의 추진 노즐 배치방법에 따른 웨이퍼 이송 속도 평가

문인호* · 황영규*

(2005년 9월 1일 접수, 2006년 2월 20일 심사완료)

Evaluation of a Wafer Transportation Speed for Propulsion Nozzle Array on Air Levitation System

In Ho Moon and Young Kyu Hwang

Key Words: Clean Room(클린룸), Wafer(웨이퍼), Air Levitation(공기 부상), Single-substrate Transfer(날장이송), Transportation Speed(이송 속도), Propulsion Nozzle(추진노즐)

Abstract

Automated material handling system is being used as a method to reduce manufacturing cost in the semiconductor and flat panel displays (FPDs) manufacturing process. Those are considering switch-over from the traditional cassette system to single-substrate transfer system to reduce raw materials of stocks in the processing line. In the present study, the wafer transportation speed has been evaluated by numerical and experimental method for three propulsion nozzle array (face, front, rear) in an air levitation system. Test facility for 300 mm wafer was equipped with two control tracks and a transfer track of 1,500mm length. The diameter of propulsion nozzle is 0.8mm and air velocity of wafer propulsion is 50~150m/s. We found that the experimental results of the wafer transportation speed were well agreed with the numerical ones. Namely, the predicted values of the maximum wafer transportation speed are higher than those values of experimental data by 16% and the numerical result of the mean wafer transportation speed is higher than the experimental result within 20%.

기호설명

- A : 추진노즐 단면적 (m^2)
- C_D : 항력계수
- C_p : 추진력계수
- d : 추진노즐 지름 (m)
- h : 부상 높이 (m)
- l : 경계층 높이 (m)
- L : 웨이퍼 이송 거리 (m)
- q : 추진노즐 하나당 유량 (m^3/s)
- R : 웨이퍼 반지름 (m)

- S : 웨이퍼 단면 면적 (m^2)
- V : 웨이퍼 추진 속도 (m/s)
- V_a : 추진노즐 평균속도 (m/s)

그리스 문자

- θ : 추진노즐 경사각도 (degree)
- μ : 점성계수 (Pa·s)
- ν : 동점성계수 (m^2/s)
- ρ : 공기 밀도 (kg/m^3)
- τ_0 : 공기의 전단응력 (N/m^2)

† 책임저자, 회원, (주)신성이엔지 기술연구소

E-mail : moonih@shinsung.co.kr

TEL : (031)788-9301 FAX : (031)788-9440

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

1. 서론

최근 디스플레이 시대가 발달하고 개인용 컴퓨터

터의 지속적인 성능향상 및 IT산업의 발달로 인하여 반도체와 평판디스플레이의 수요가 끊임없이 증가되고 있으며, 이 분야에 대한 경쟁력 확보를 위한 원가절감의 중요성이 더욱 더 증가되고 있다. 따라서 클린룸 설비분야에서도 원가절감 방안을 고려하고 있다. 반도체 제조공정에서나 평판디스플레이 제조공정에서의 자동화된 물류는 제조원가를 줄이는 수단으로 활용되고 있다. 특히 공정에 존재하는 원자재인 재공품을 줄이는 방안으로 기존의 카세트 방식에서 날장이송 시스템으로 전환을 검토하고 있다.

고집적화된 기기급 반도체의 최소 선폭이 0.1 μm 라고 하면 제어 대상입자의 크기는 선폭의 10분의 1인 0.01 μm 까지로 제한된다. 특히 초정정 환경에서는 입자상 물질의 오염뿐만 아니라 화학오염에 의한 가스상의 유해 물질도 수율에 미치는 중요한 요소로 고려되어야 하며, 청정생산 조건을 만족시키기 위해서 클린룸의 청정도를 높이고, 미세한 오염제어를 위해 설비품질을 고급화시키고 있다. 이는 클린룸 건설비와 운전비의 상승을 초래하고 나아가 반도체의 제조원가 상승, 경제성의 악화를 가져온다.^(1,2) 일본에서 반도체 제조공정에서 이송공정을 날장이송 방식으로 전환할 경우 소요공정시간(turn around time)이 5배 이상 단축되어 재공품 감소로 경영능력이 향상되고, 제조기간이 길어 제품의 판매기회가 상실되는 것을 방지하여 시장을 선점할 수 있는 기회가 될 수 있다는 연구보고가 발표되었다.⁽³⁾

날장이송 시스템은 압축청정공기로 웨이퍼를 부상시키는 방식, 자기부상으로 대차를 부상시키는 방식 및 선형 모터로 이송하는 방식으로 대별할 수 있다. 공기부상 날장이송 시스템은 웨이퍼를 이송시킬 때 이송 대상물에 손상을 가져올 수 있는 물리적인 접촉이 일어나지 않고 실행이 가능하다는 장점이 있다. 현재까지 상용화된 장치는 없으나 최근 국내에서 우선적으로 LCD 제조공정에서 7세대용 유리 원판이 대형화됨에 따라 날장이송시스템의 도입을 적극 검토하고 있다.

국내 관련연구로서는 공기 부상 방식 웨이퍼 이송시스템에서, 압축공기를 분사하여 웨이퍼를 일정지점까지 이송되도록 추진시키는 기능에 관하여 이론적으로 검토하고 시스템 설계에 필요한

추진력계수의 기초 자료를 제시한 논문이 Moon and Hwang⁽⁴⁾에 의해 2004년 발표된 적이 있다.

국의 연구 결과로서는 미국 IBM사의 Paivanas 등이 부상과 제어 트랙을 일체형으로 제작하여 특성실험을 수행하고 트랙에서의 채널효과와 정밀제어의 필요성에 관하여 발표⁽⁵⁾를 하였으며, 이 논문을 근거로 실험한 다음, 시스템 장점만을 부각시킨 새로운 개념의 공기 부상 이송시스템을 개발하고 6인치(inch) 웨이퍼의 이송 특성을 Toda 등^(6,7)이 발표하였다.

기존 연구들에서 추진노즐과 관련된 웨이퍼 이송 속도는 발표되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 공기 부상 방식 웨이퍼 이송 시스템에서 추진노즐 배치에 따라 300 mm 웨이퍼의 추진 및 이송 속도 변화를 수치적 계산과 실험을 통하여 확인하고 그 유용성을 검토하고자 하였다.

2. 웨이퍼 추진

웨이퍼 이송 트랙은 추진과 정지용 제어 트랙 2개와 웨이퍼가 지나가는 이송 트랙 1개로 구성되어있다. 웨이퍼 추진노즐은 이송 개념도 Fig. 1과 같이 제어 트랙 중심에서 이송방향으로 각도 θ 만큼 경사져 있다. 노즐에서 분사된 공기가 웨이퍼 하부에 충돌하면서 발생하는 힘은 부상시키는 힘(F_y)과 추진시키는 힘(F_x)으로 분리된다.

웨이퍼는 분사 공기의 추진력에 의하여 일정한 속도(V)로 움직이는 웨이퍼 질량이 m 이라면 다음과 같은 운동량 방정식이 성립한다.^(6,7)

$$m \frac{dV}{dt} = F - D_1 - D_2 - D_3 \quad (1)$$

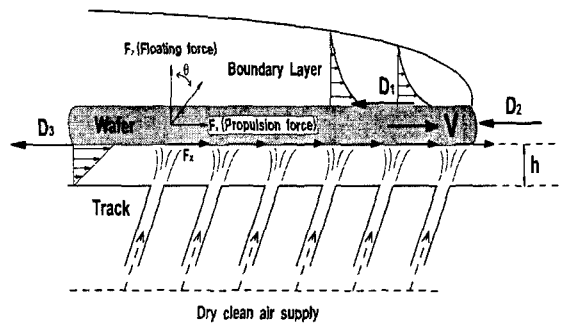


Fig. 1 Mechanism of wafer transportation

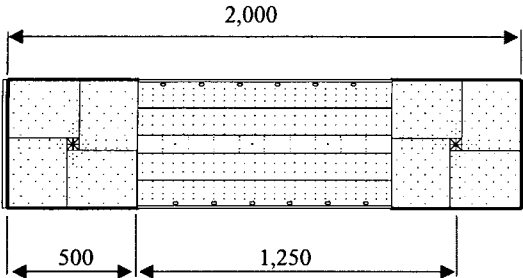


Fig. 2 Analysis model for wafer speed

추진노즐에서 분사되는 공기의 추진력 F 는 각각의 노즐에서 분출되는 힘 F_x 의 합이므로, 웨이퍼에 가해지는 힘 F 는 다음 식으로 표현된다.

$$F = N \times F_x \quad (2)$$

$$F_x = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\rho q^2}{A} \right) \sin \theta \quad (3)$$

웨이퍼가 이동하면서 발생하는 상부 표면에서 발생하는 공기의 마찰저항(D_1)과 웨이퍼가 두께에 의해 발생하는 항력(D_2) 및 하부 공기의 마찰저항(D_3)은 다음 식과 같이 주어진다.

$$D_1 = 2 \int_0^R \left[\int_0^{2\sqrt{\pi(2R-r)}} \tau_0 dl \right] dr \quad (4)$$

$$D_2 = C_D \frac{\rho V^2}{2} S \quad (5)$$

$$D_3 = \frac{\pi D^2}{4} \mu \frac{V}{h} \quad (6)$$

여기에서, $\tau_0 = 0.332 \mu V \sqrt{\frac{V}{\nu l}}$ 이다.

반도체 웨이퍼의 항력계수 C_D 값은 본 연구에서는 웨이퍼 이송 속도가 1m/s 이내로 빠르지 않으므로 일반적인 사각기둥 모양의 항력계수 값인 2.05를 사용하였다.⁽⁸⁾

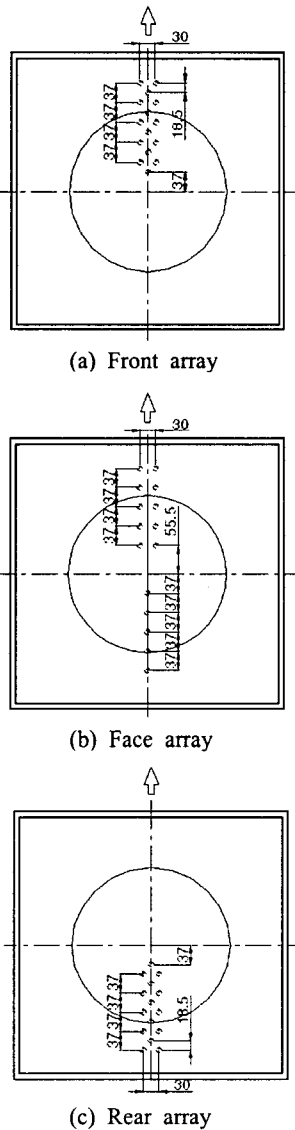


Fig. 3 Control track for propulsion nozzle array

3. 웨이퍼 이송 속도

3.1 수치해석 모델

웨이퍼 이송 속도를 계산하기 위하여 구성된 트랙의 조합은 Fig. 2, 웨이퍼 추진용 노즐의 전면(face), 전단(front), 후단(rear) 배치법은 Fig. 3과 같다. 전단 배치(front array) 방법은 Fig. 3(a)와 같이 추진노즐 위치를 웨이퍼 추진 방향에서 제어 트랙의 앞쪽에 배치시키며, 후단 배치(rear array) 방법은 Fig. 3(b)와 같이 추진노즐을 웨이퍼 추진 방향 뒤쪽에 배치시키고, 전면 배치(face array) 방법은 Fig. 3(c)와 같이 추진노즐을 앞쪽과 뒤쪽에

나누어 배치시킨다. 추진노즐은 제어 트랙 중심에서 추진 방향으로 45°, 피치 37mm로 설치되어 있다. 웨이퍼가 추진되는 초기에 15개의 노즐이 동시에 분사되나 웨이퍼에 추진력을 주는 노즐은 10개로 모두 동일하다.

추진노즐의 배치법에 따른 웨이퍼 이송 속도 계산용 입력조건은 웨이퍼 지름 300mm, 웨이퍼 무게 127g, 웨이퍼 부상 높이 0.4mm, 추진노즐 직경 0.8mm, 추진노즐 각도 45°, 추진노즐 유속 (50m/s, 100m/s, 150m/s)과 추진노즐 속도에 따른 각 추진력계수를 사용하였다. 웨이퍼 이송 속도를 계산하기 위하여 사용한 추진력계수 C_p 는 Table 1과 같은 실험값을 이용하였다.⁽⁴⁾

3.2 수치해석 방법

지배방정식은 수식 (1)에서 (6)을 이용하고 시간에 대한 이산화를 수행하여 편미분 방정식 (1)의 수치해로 주 위치에서의 속도를 구하였다.

$$m \frac{dV}{dt} = F_x - D_1 - D_2 - D_3 = RES \quad (7)$$

식 (7)을 시간에 대하여 Adams-Bashforth method를 적용하여 이산화하면 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$m \frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t} = \frac{3}{2} (RES)^n - \frac{1}{2} (RES)^{n-1} \quad (8)$$

식 (8)을 새로운 시간스텝 n+1에 대한 속도로 정리하면 식 (9)와 같이 표현된다.

$$V^{n+1} = V^n + \frac{\Delta t}{m} \left[\frac{3}{2} (RES)^n - \frac{1}{2} (RES)^{n-1} \right] \quad (9)$$

우변의 n 스텝 값은 기지의 값이므로 새로운 시간 n+1 스텝에서의 값이 계산되어진다.

Table 1 Propulsion force coefficient

Nozzle dia. (mm)	Propulsion air velocity (m/s)	Propulsion force coefficient
0.8	50	1.4473
	100	1.2405
	150	1.1848

FORTRAN 프로그램 상에서 웨이퍼가 추진되는 동안 시간에 따른 노즐의 위치변화를 계산하여 추진력 변화가 반영되도록 구성하였으며, 웨이퍼가 움직이는 속도가 10⁻⁷m/s 이하가 되면 정지한 것으로 판단하여 프로그램을 종료시켰다.

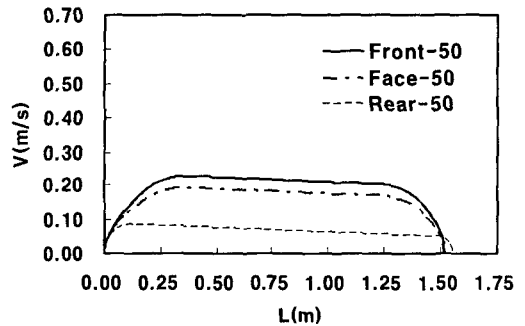


Fig. 4 Wafer speed V vs. moving distance L (Va=50m/s)

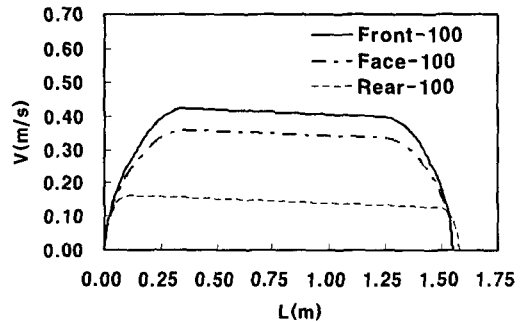


Fig. 5 Wafer speed V vs. moving distance L (Va=100m/s)

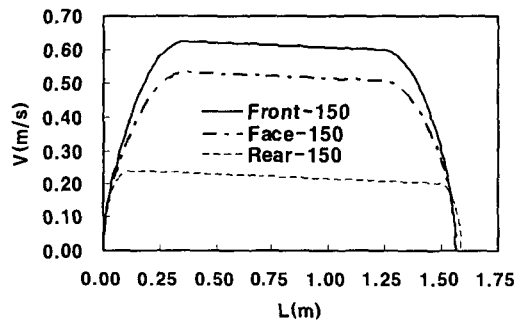


Fig. 6 Wafer speed V vs. moving distance L (Va=150m/s)

3.3 수치해석 결과

추진노즐 유속 50m/s, 100m/s, 150m/s인 경우 추진노즐 배치법에 따른 웨이퍼 이송 속도의 수치해석 결과를 Fig. 4에서 Fig. 6까지 나타내었다.

웨이퍼 최고 속도가 나타나는 지점은 전단과 전면 배치법은 거의 유사하나 후단 배치법은 훨씬 빨리 도달하고 있음을 알 수 있다. 웨이퍼 최고 이송 속도는 추진노즐 유속에 관계없이 전단 배치법이 가장 빠르고 전면 배치법은 전단 배치법의 약 85%, 후단 배치법은 전단 배치법의 약 40% 미만이다. 그래프에서 나타나는 바와 같이 출발에서 정지까지의 속도 경향은 거의 일정하게 나타났다.

등속구간에서의 각종 저항력에 의한 속도감소 비율은, 추진 공기의 유속이 50m/s인 조건에서 1m 단위당 전단 배치 방법에서는 약 12.2%, 전면 배치 방법에서는 약 14.2%, 후단 배치 방법에서는 약 34.9%이고, 추진 공기의 유속이 100m/s인 조건에서 속도감소 비율은 전단 배치는 약 6.6%, 전면 배치는 약 7.9%, 후단 배치는 약 17.7%로 나타났다. 또한, 추진 공기의 유속이 150m/s인 조건에서 전단 배치는 약 4.7%, 전면 배치는 약 5.3%, 후단 배치는 약 11.9%로 나타났다.

결과적으로 등속구간에서의 웨이퍼 이송 속도 감소 비율은 웨이퍼 이송 속도가 빨라질수록 노즐 배치방법에 관계없이 줄어들고, 웨이퍼 이송 속도가 느릴수록 그 감소비율은 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 전단 배치법은 동일 유속으로 전면과 후단 배치법에 비해 매우 빠른 웨이퍼 이송 속도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 7과 같이 제어 트랙 2개와 가운데 1,000mm의 이송트랙을 설치하였으며, 추진은 한쪽방향에서 실시하였다. 유량계는 추진되는 공기의 유량을 측정하기 위하여 제어 밸브와 트랙 사이에 설치하였으며, 추진하기 전의 부상높이는 약 0.4mm로 고정시켰다. 추진노즐의 크기와 경사각도는 수치해석 모델에서 언급한 내용과 동일한 사양이다.

일정구간 평균속도 측정은 웨이퍼가 제어 트랙에서 추진된 다음 1,250mm 지나는 지점에서의 시간을 초시계로 측정하였으며, 가속구간 속도 측정은 고속 촬영용 카메라를 컴퓨터와 연결하여 촬영하도록 구성하였다.

사전에 설정된 압축공기의 유량은 웨이퍼 이송 속도 촬영과 동시에 공급되도록 설치하였다. 각 위치에 따른 압력에 의한 유량 오차를 줄이기 위하여 튜브길이는 동일하게 설치하였다. 스위치를 작동하면 압축공기가 바로 공급되지 않고 일정한 길이의 압축공기 튜브에서 버퍼역할을 하는 오차를 줄이기 위해 공급부 압축공기 튜브 길이를 최소화하였다. 실험에서 측정된 데이터 수집과정은 다음과 같다.

- (1) 측정하고자 하는 부상노즐 트랙을 설치한다.
- (2) 수평을 맞추어 웨이퍼를 측정장치 중심에 위치시킨다.
- (3) 공급되는 압축공기의 압력과 유량이 적정함을 점검한다.
- (4) 압축공기 공급 스위치를 on 시킨다.
- (5) 압축공기 공급과 거의 동시에 고속 카메라의 촬영 스위치를 on 시킨다.
- (6) 공급유량을 변화시키면서 웨이퍼 이송 속도를 촬영한다.
- (7) 측정하고자 하는 부상 노즐의 트랙 종류를 변경시키고 적절한 카메라의 프레임 수를 맞춘 다음 웨이퍼 이송 속도를 반복 측정한다.

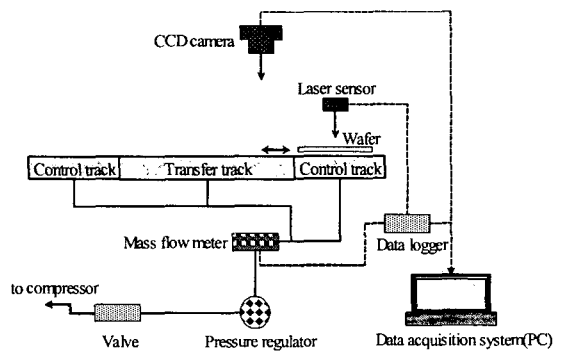


Fig. 7 Test facility of wafer speed

5. 실험결과 및 토의

5.1 가속구간 웨이퍼 이송 속도

추진노즐 유속과 추진노즐 배치에 따른 웨이퍼 추진속도를 비교하기 위하여 고속 카메라로 웨이퍼가 가속하는 구간을 촬영한 다음 촬영된 영상을 속도로 환산하여 그래프로 나타내었다.

추진노즐 유속이 50m/s일 때 가속부분의 웨이퍼 이송 속도 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. 전단 배치법 및 전면 배치법은 일정거리가 이동된 다음 최고속도에 오르나 후단 배치법은 최고속도가 매우 낮은 결과를 보이고 있다. 모든 추진노즐 배치 방법에 관계없이 실험결과와 웨이퍼 최고 속도는 0.18m/s 이하로 매우 느리게 나타남을 알 수 있다.

추진노즐 유속이 100m/s일 때의 측정결과를 Fig. 9에 나타내었다. 전단 배치법과 전면 배치법에서 웨이퍼가 가속하기 시작하여 최고속도에 이르기까지 걸리는 시간은 유사하게 나타났으며, 전단 배치법의 최고속도가 약 0.35m/s, 전면 배치법의 최고속도는 약 0.30m/s로 전단 배치법의 약 86% 정도로 나타났다. 후단 배치법은 최고속도가 0.15m/s로 여전히 매우 낮게 나타났다.

추진노즐의 유속이 150m/s일 때의 측정결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 경우에도 마찬가지로 전단 배치법과 전면 배치법의 최고속도에 이르는 시간은 유사하며, 전면 배치법의 최고속도는 약 0.53m/s, 전면 배치법의 최고속도는 약 0.45m/s로 전단 배치법의 약 85% 정도로 나타났다. 후단 배치법은 최고속도에 이르는 시간이 다른 방법에 비하여 거의 절반 정도로 짧고 최고속도도 0.2m/s로 매우 낮은 경향을 보였다.

추진노즐 배치방법에 따른 웨이퍼 이송 속도의 수치해석 및 실험결과를 비교하기 위하여 전단 배치법은 Fig. 11, 전면 배치법은 Fig. 12, 후단 배치법의 결과는 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 11에서 나타나는 바와 같이 유속이 150m/s인 조건에서, 전단 배치법의 경우 수치해석 결과에서 가속이 끝나는 지점은 약 360mm, 실험 결과에서 가속이 끝나는 지점은 약 300mm로 나타났다. 최대 웨이퍼 이송 속도는 실험값은 0.525m/s, 수치해석 결과 속도는 0.624m/s로 나타났다.

실험으로 측정된 웨이퍼 이송 속도는 수치해석으로 계산된 웨이퍼 이송 속도에 비하여 약 84.1% 정도로 나타나고 있다. 최대 웨이퍼 이송 속도는 유속이 100m/s, 50m/s인 경우에도 이와 비슷한 경향을 보이고 있다.

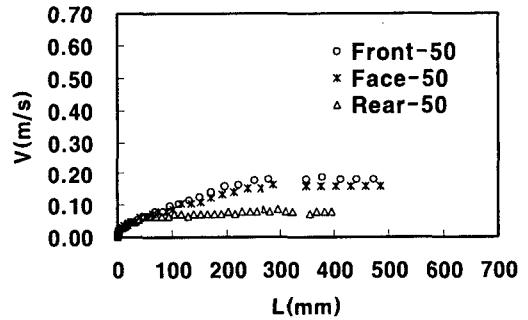


Fig. 8 Wafer speed for nozzle array ($V_a=50m/s$)

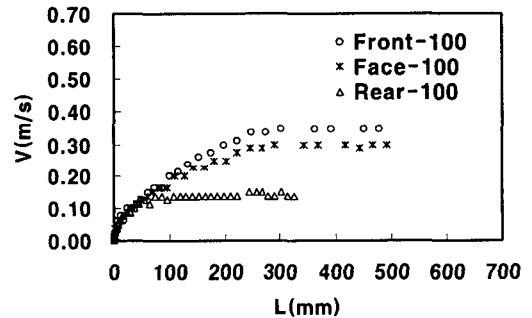


Fig. 9 Wafer speed for nozzle array ($V_a=100m/s$)

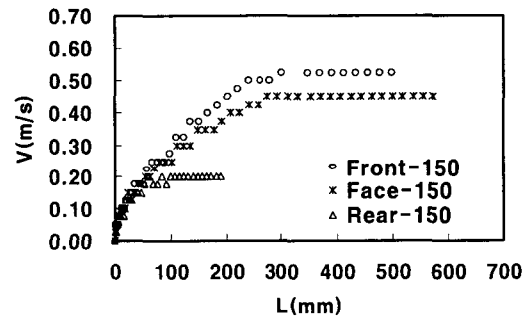


Fig. 10 Wafer speed for nozzle array ($V_a=150m/s$)

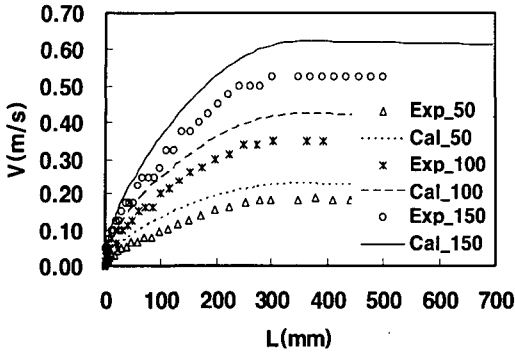


Fig. 11 Wafer speed with nozzle array (front array)

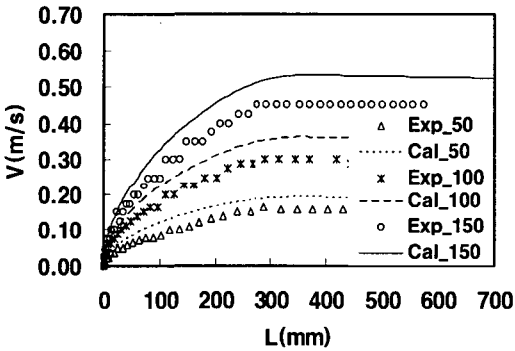


Fig. 12 Wafer speed with nozzle array (face array)

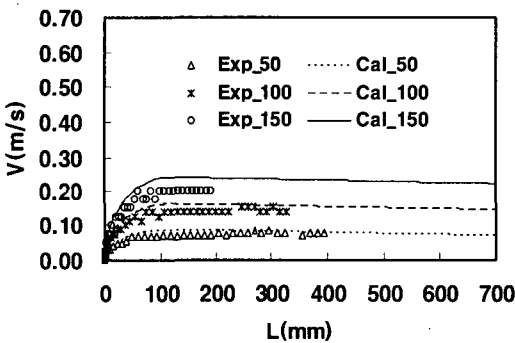


Fig. 13 Wafer speed with nozzle array (rear array)

전면 배치법에서 Fig. 12에서 나타나는 바와 같이 유속이 150m/s인 조건에서, 수치해석과 실험 결과에서 가속이 끝나는 지점은 약 355mm, 최대 웨이퍼 이송 속도의 경우 실험으로 측정된 값은

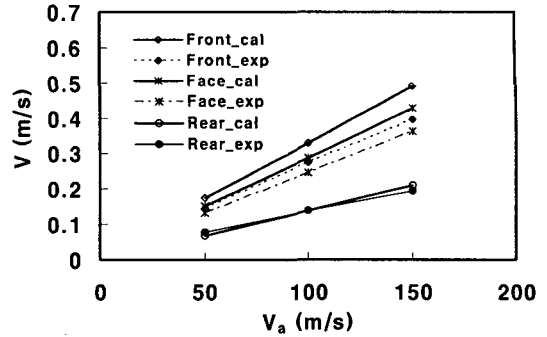


Fig. 14 Wafer mean speed with air velocity

0.450m/s, 수치해석 결과 웨이퍼 이송 속도는 0.534m/s로 수치해석 결과를 기준으로 보면 실험으로 측정된 웨이퍼 이송 속도는 약 84.3% 정도로 나타났다. Fig. 13에서 나타나는 바와 같이 유속이 150m/s인 조건에서, 후단 배치법의 수치해석이나 실험 결과의 가속이 끝나는 지점은 약 114mm, 최대 웨이퍼 이송 속도는 실험값은 0.20m/s, 수치해석은 0.236m/s로 수치해석 결과를 기준으로 보면 측정된 웨이퍼 이송 속도는 약 84.7% 정도로 나타났다. 전단 배치법과 전면 배치법에서 실험값과 수치해석 결과의 오차는 노즐 배치법에 관계없이 약 16% 이내에서 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

수치해석과 실험 결과의 웨이퍼 이송 속도 차이가 발생하는 이유는, 실험에서는 추진노즐의 공기가 분출과 동시에 일부의 힘이 웨이퍼를 지나치게 부상시켜 추진력을 약하게 만드는 힘으로 전환되기 때문이라고 판단된다.

5.2 웨이퍼 평균 이송 속도

추진노즐 배치법에 따른 웨이퍼 평균 이송 속도를 검토하기 위하여 수치해석 및 실험 결과 그래프를 Fig. 14에 나타내었다. 전단 배치법은 해석결과가 실험 속도 값에 비하여 약 20% 이상, 전면 배치법은 해석 값이 실험 속도 값에 비하여 약 15~18% 크게 나타났으나, 후단 배치법은 웨이퍼 이송 속도가 매우 느리고 해석 값과 실험 속도 값의 차이가 거의 나타나지 않았다.

결과적으로, 공기 유속이 빨라질수록 실험결과

와 수치해석 결과의 차이가 커지는 이유는 전술한 바와 같이 이송 초기에 분출되는 공기에 의해 과도하게 웨이퍼를 부상시키는 힘으로 작용하여 추진력이 약해지는 비율이 커지기 때문이라고 판단된다. 또한, 웨이퍼를 추진하려고 분사되는 공기는 웨이퍼가 출발하기 바로 직전에 웨이퍼 하부 후단에 위치한 공기를 유인시켜 음압을 발생시킴으로써 추진력을 감소시키는 결과를 나타내기 때문이다.

기타 수치해석 결과와 실험값에 차이가 발생하는 이유로서는, 추진 공기의 속도가 빨라질수록 추진되는 공기의 유량이 증가하여 공급되는 튜브 내부에서의 압축성이 증가되고, 이 분출되는 순간적인 힘에 의하여 웨이퍼에 전달되는 충격력이 증가되어 추진력이 떨어지는 결과를 나타낸다.

6. 결론

추진노즐 배치법에 따른 웨이퍼 이송 속도를 추진노즐의 유속을 변화시키면서 수치계산 및 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 웨이퍼 가속지점에서 속도변화를 고속 카메라로 촬영한 결과 수치해석과 잘 일치하며 가속도는 전단>전면>후단 순으로 나타났다.

(2) 추진노즐 유속이 150m/s일 경우는 노즐 배치법에 관계없이 수치해석 결과의 웨이퍼 최고 이송 속도는 실험 결과에 비하여 약 16% 정도 크게 나타나는 결과를 보였다.

(3) 평균속도 측면에서 전단 배치법은 이론 속도 값이 실험 속도 값에 비하여 약 20% 이상, 전면 배치법은 이론 속도 값이 실험 속도 값에 비하여 약 15%~18% 크게 나타났으나 후단 배치법은 거의 동일하게 나타났다.

(4) 웨이퍼 추진 공기의 유속이 빨라질수록 수치해석과 실험결과가 차이가 커지는 이유는 웨이

퍼 하부에서 유인되는 공기가 많아 상대적으로 음압이 커지고 출발 초기에 웨이퍼에 주어지는 충격력이 높아지기 때문이다.

참고문헌

- (1) Cho, S. J., 2001, "300mm Wafer Transportation System for Next Generation," *Air Cleaning Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 40~59.
- (2) Oh, M. D., 1991, "Ultra-clean Clean Room Technology for GIGA Level Semiconductor," *Journal of the KSME*, Vol. 41, No. 6, pp. 32~39.
- (3) Hayashi, T. U.(e-CATS), 2002, "The Revolution of Semiconductor Manufacturer Required Next Generation," *Semiconductor Industrial Newspaper Forum*.
- (4) Moon, I.H. and Hwang, Y.K., 2004, "Evaluation of a Propulsion Force Coefficients for Transportation of Wafers in an Air Levitation System," *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 820~827.
- (5) Paivanas, J. A. and Hassan, J.K., 1979, "Air Film System for Handling Semiconductor Wafers," *IBM Journal Research and Development*, Vol. 23, pp. 361~375.
- (6) Toda, M., Shishido, M., Kanno, Y., Umeda, M., Nitta, T. and Ohmi, T., 1992, "Wafer Transportation Through a Tunnel Filled with Nitrogen Gas," *ICCCS Proceedings*, pp. 173~183.
- (7) Toda, M., Ohmi, T., Kanno, Y. and Umeda, M., 1993, "N2 Tunnel Wafer Transport System," *Proceedings Institute of Environmental Sciences*, pp. 493~499.
- (8) Son, B. J., Maeng, J. S. and Lee, S. H., 1992, *Fluid Mechanics*, Heejeongdang, p. 1108.
- (9) Joel, H. Ferziger, 1996, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, pp. 127~134.