

공기부상 웨이퍼 날장이송 시스템의 부상 및 이송특성

문인호*, 조상준*, 김동권*, 김종진*, 황영규**

*㈜신성이엔지 기술연구소, **성균관대학교 기계공학부

초록

반도체 집적도가 높아지고 웨이퍼가 대구경화 됨에 따라 새로운 이송 장비의 개발이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 이송장비의 새로운 개념인 공기부상 방식의 날장이송 시스템을 설계하고 부상 노즐의 크기에 따른 부상 높이를 평가하였으며 그 결과 동일한 부상용 유량을 사용할 경우 0.5 mm 보다 0.8 mm 노즐이 부상 높이가 더 높고 에너지 절약적인 측면에서 유리함을 밝혔다. 또한 웨이퍼 이송용 추진 노즐의 배치에 따른 웨이퍼 이송 속도의 변화를 측정하여 동일 유량에서 추진속도가 훨씬 증가된 형상인 Type B(노즐 집중형)를 결정할 수 있었으며, 제조장비와 이송장비를 연결시켜주는 인터페이스에서의 웨이퍼 안정성을 평가한 결과 평균 16초 이내에 매우 안정된 공기부상 방식의 웨이퍼 날장이송 시스템을 구현할 수 있었다.

1. 서론

반도체의 집적도가 높아져 서브 마이크론 단위의 선폭을 가진 ULSI 제조를 위해서는 웨이퍼 표면과 공정환경을 초청정으로 유지하는 것이 필수적인 요소이다. 최근에 들어 오면서 지금까지의 단순한 클린룸 레벨의 입자제어 개념에서 벗어나 국소 초청정 개념으로 룸(room) 기류와 완전 격리시키는 새로운 개념의 웨이퍼 이송 시스템인 날장이송 시스템이 등장하게 되었다⁽¹⁾.

날장이송 시스템은 크게 날장의 웨이퍼 반송대 하부에 자기부상 시스템을 적용하는 방식⁽²⁾과 초청정 공기를 이용하여 웨이퍼를 부상시켜 이송시키는 클린터널 방식이 있다. 클린터널 시스템은 자동화되고 밀폐된 초청정 공정설비로서 전체 제조공정에서 오염원으로부터 웨이퍼를 완벽하게 격리시킨다. 이러한 공정설비를 만들기 위해서 필요한 핵심기술중의 하나는 마찰이 없는 가스 필름위로 웨이퍼를 이송하는 것이다. 이러한 설비는 많은 웨이퍼 공정장비들이 초순수 질소가스로 채워지거나 압축 청정 건조공기를 사용한 터널과 같은 이송트랙으로 연결된다. 웨이퍼는 터널 형식의 밀폐된 공간에서 가스필름 위에 부상한 상태로 추진 노즐의 충돌에 의하여 공정장비와 공정장비로 이송된다. 가스 필름상에서 웨이퍼 조작의 큰 장점은 심각한 입자 오염이 유발될 수 있는 웨이퍼와 다른 고체의 물리적 접촉을 피할 수 있다는 것이다⁽³⁾.

본 연구에서는 공기부상 방식을 채용하는 웨이퍼 날장이송 시스템을 구성하고 웨이퍼 부상용 분사 노즐의 크기에 따른 부상 높이와 압력관계 및 웨이퍼 추진 노즐 배치에 따른 이송 속도 및 위치 안정성에 따른 특성을 평가하고자 하였다.

2. 웨이퍼 부상

구멍이 뚫린 판(트랙, track) 위에 가스 제트의 분사에 의해서 웨이퍼(wafer)가 부상했다고 가정하면 동압과 정압에 의해서 웨이퍼에 작용하는 힘들은 각각 다음과 같다⁽⁴⁾.

$$F_{DP} = N \times A \frac{\rho u^2}{2} \quad (1)$$

$$F_{SP} = \frac{\pi D^2}{4} (p - p_a) \quad (2)$$

여기에서, F_{DP} , F_{SP} 는 정압, 동압에 의한 힘[N], N 은 웨이퍼에 의해 덮이는 분사 노즐의 수, A 는 분사 노즐의 단면적[m²], u 는 분사공기 평균 속도[m/s], D 는 웨이퍼 직경[m], p 는 트랙과 웨이퍼 사이의 평균 정압[Pa], p_a 는 대기압[Pa], ρ 는 공기의 밀도[kg/m³]이다.

300 mm 웨이퍼의 중량은 약 127g이므로 중력에 의해 웨이퍼에 작용하는 힘 W 는 1.2446N이다. 단순 계산으로, 단위 면적당 웨이퍼의 자중에 의한 힘은 17.61Pa로 표준 대기압인 10⁵Pa의 약 0.017%가 된다. 즉, 약간의 게이지 압력만으로도 웨이퍼는 부상된다는 것을 나타내고 있다.

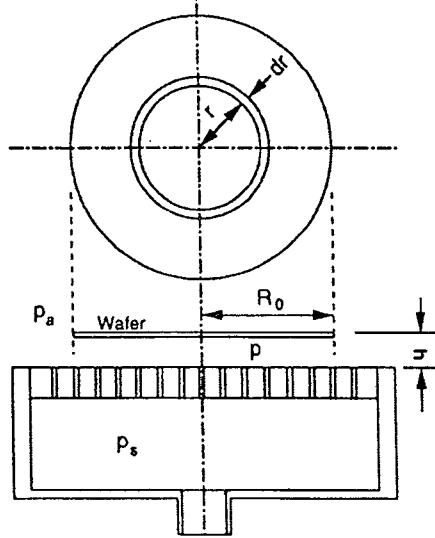


Fig. 1 Analysis model.

Fig. 1 은 부상한 웨이퍼와 트랙 사이 틈새(부상 높이)에서 정압분포를 예측하기 위해서 적용된 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다. 이 모델은 원래 다공성 가스 베어링을 해석하기 위해서 Okano 와 Togo 에 의해서 제안되었다. 반지름 R_0 인 웨이퍼는 트랙 위에 높이 h 만큼 떠서 고정되어 있다. 챔버의 압력은 p_s 이고 공기 분사는 노즐을 통해서 트랙과 웨이퍼 사이의 공간으로 분사된다. 분사 노즐들은 트랙 위에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다. 이러한 조건에서, 정압분포는 다음과 같은 미분방정식으로 서술된다⁽⁵⁻⁶⁾.

$$\frac{d^2 P_r^{(n+1/n)}}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dP_r^{(n+1/n)}}{dR} + \Lambda \sqrt{\left(\frac{P_r}{P_s}\right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_r}{P_s}\right)^{(\kappa+1)/\kappa}} = 0 \quad (3)$$

여기에서, $R=r/R_0$, $P_r = p/p_a$, $P_s = p_s/p_a$ 이다.

$$\Lambda = \left(\frac{n+1}{n} \right) \frac{12\mu CS v R_0^2 P_s}{h^3 \rho \sqrt{R_G T_s}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \quad (4)$$

Λ 는 스러스트 베어링의 특성수이다.

경계조건은

$$R = 0; dP_r / dR = 0, \quad R = 1; P_r = 1 \quad (5)$$

이다.

3. 부상높이 수치해석

웨이퍼 하부의 정압분포를 확인하기 위하여 식(3)을 수치해석 기법 중 유한차분법을 이용하여 계산하였으며, 등은 이상기체 유동으로 가정하였다. 해석에 사용된 변수는 단열지수 $\kappa=1.4$, 폴리트로픽 지수 $n=1$, 노즐의 유동상수 $C=0.6$, 웨이퍼 단위 면적당 노즐 개수 $v=16/(\pi(0.3)^2/4) \text{ m}^{-2}$, 노즐 단면적 $A=\pi(0.0005)^2/4 \text{ m}^2$, 가스상수 $R_G=286.7 \text{ J/kgK}$, 작동가스는 건공기이다.

Fig. 2 는 웨이퍼 부상높이 h 를 0.4 mm로 일정하게 둔 상태에서 챔버압력의 범위를 $P_s=1000\sim 3000\text{Pa}$ 로 변화시켰을 때의 웨이퍼 밑면에서 대기압과의 차압분포를 나타낸 것이다. 이 결과에서 나타난 바와 같이 챔버압력 P_s 가 1000Pa 일 때 웨이퍼 중심부의 차압이 약 62.5Pa, 챔버압력 P_s 가 2000Pa 일 때는 약 89.9Pa, 챔버압력 P_s 가 3000Pa 일 때 약 110.9Pa 이고, 웨이퍼 가장자리의 차압은 0Pa 인 포물선형태로 나타났다. 그래프에서 나타난 것과 같은 게이지 정압을 웨이퍼 표면에 대해서 적분하면 웨이퍼 하부에 작용하는 수직력 F_n 을 구할 수 있다.

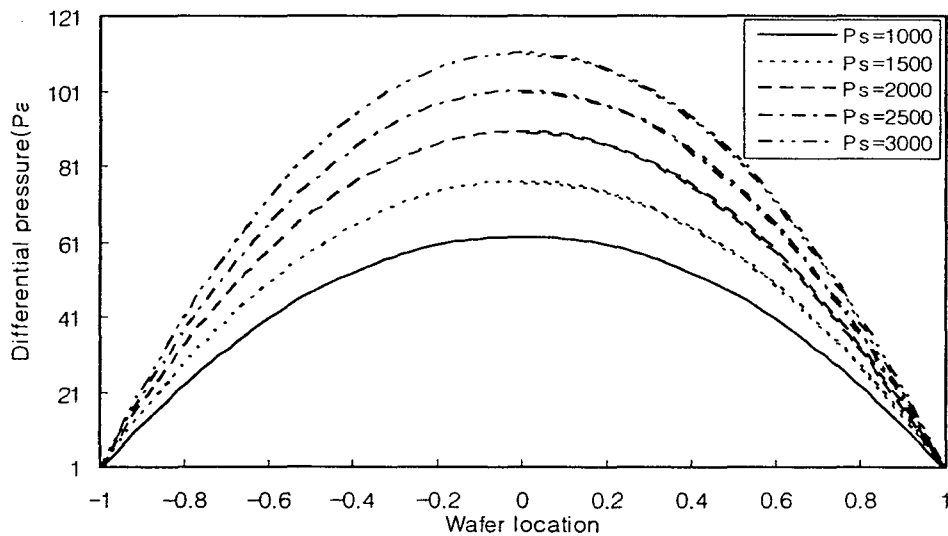


Fig. 2 Pressure distribution under wafer.

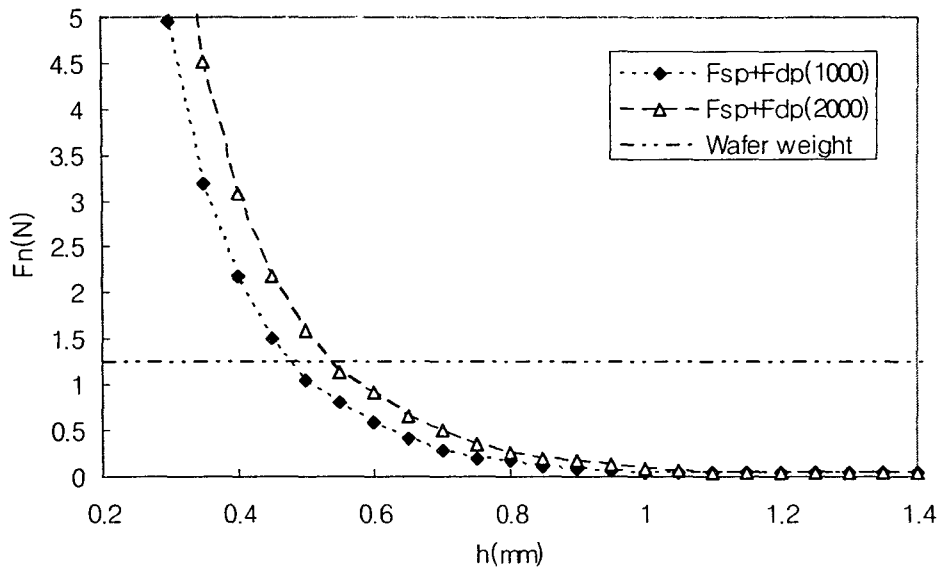


Fig. 3 Relation between F_n and floating height.

Fig. 3 은 챔버압력 P_s 가 1000Pa 과 2000Pa 조건에서, 웨이퍼 아랫면에 작용하는 정압과 동압력의 합력을 이용하여 웨이퍼의 부상 높이(h) 변화를 계산한 결과이다. 정압 F_{SP} 와 동압 F_{DP} 의 합은 웨이퍼에 작용하는 수직력 F_n 이 된다. 이 그림에서 챔버압력 P_s 가 1000Pa 일 때 합력 F_n 이 웨이퍼에 작용하는 중력(W)과 트랙표면에서 약 0.48 mm 위에서 평형을 이루고, 챔버압력 P_s 가 2000Pa 일 때 약 0.53 mm 위에서 평형을 이루고 있음을 알 수 있다.

4. 실험 장치 및 방법

4.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 Fig. 4 에서 개략적으로 나타내었다. 장치의 구성은 도시된 바와 같이 웨이퍼를 정지시키거나 추진시키는 역할을 하는 제어 트랙(control track) 4 개와 장비에서 작업이 완료된 웨이퍼를 반출하거나 작업하기 위하여 장비로 넣어주는 역할을 하는 인터페이스 트랙(interface track) 1 개, 그리고 웨이퍼 이동 통로이면서 트랙간에 연결을 시켜주는 부분은 이송 트랙(transfer track) 7 개를 사용하여 십자(+)로 구성하였다. 각각의 트랙 하부에는 압축공기를 분배할 수 있는 압력 챔버(pressure chamber)를 설치하였으며, 공급되는 압력을 일정하게 유지하기 위하여 압력 조절기(regulator)를 사용하였다.

제어 트랙은 Fig. 5 에 도시된 바와 같이 부상용 노즐과 추진 및 제어용 노즐로 구성되어 있다. 추진용 노즐(propulsion nozzle)의 배치는 제어 트랙 중심부에 사방향 45°각도로 경사진 상태에서 피치 38 mm 로 설치되어 있으며, Type A 는 웨이퍼 중심을 기준으로 추진되는 전면에는 2 열로, 후면에서는 1 열, Type B 는 동일한 지역에 3 줄로 같은 방향을 향하도록 설계되어 있다. Type A 는 웨이퍼 지름 300 mm 1 장당 추진을 받기 시작하는 초기에는 16 개의 추진 노즐이 분사되고, Type B 는 웨이퍼 1 장당 추진을 받는 노즐의 수량이 9 개가 분사되도록 설계되어 있다.

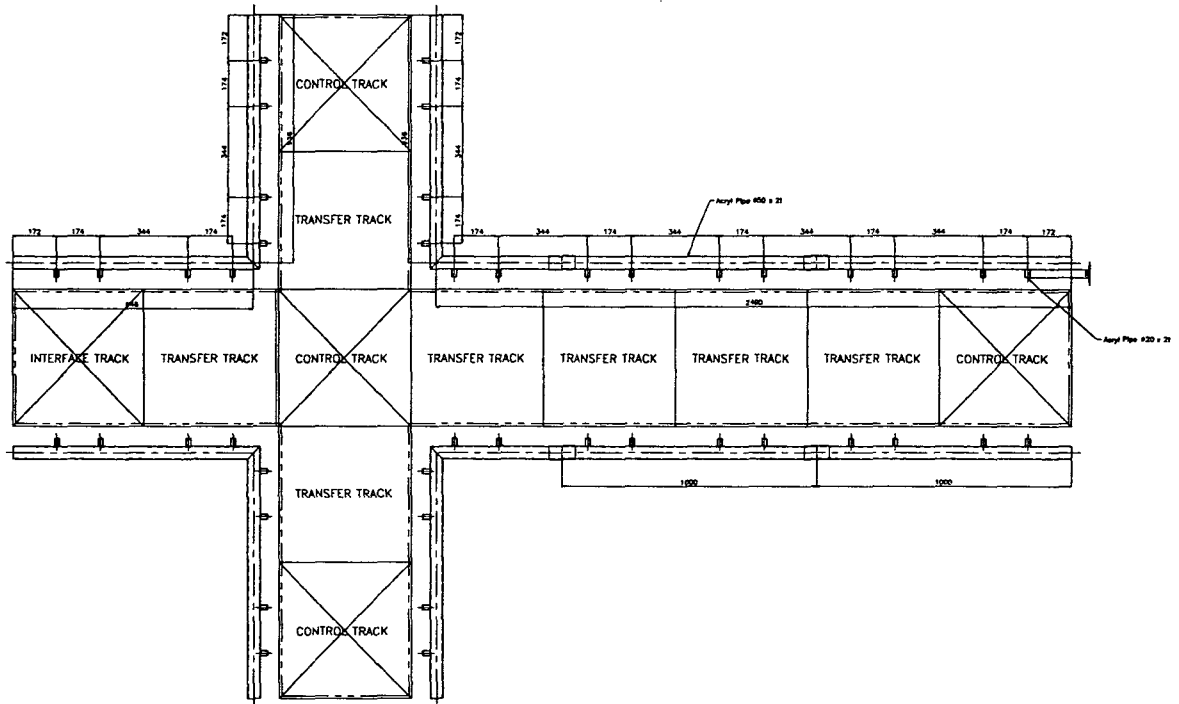
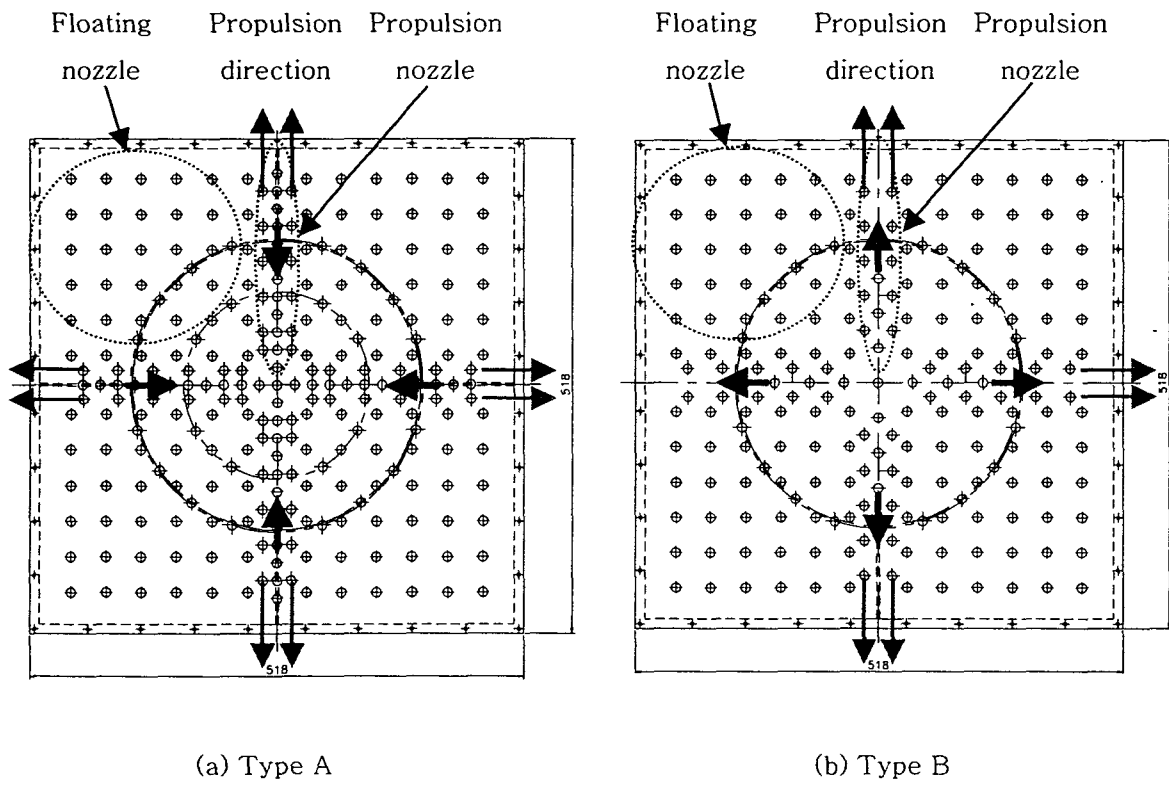


Fig. 4 Test facility arrangement.



(a) Type A

(b) Type B

Fig. 5 Control track.

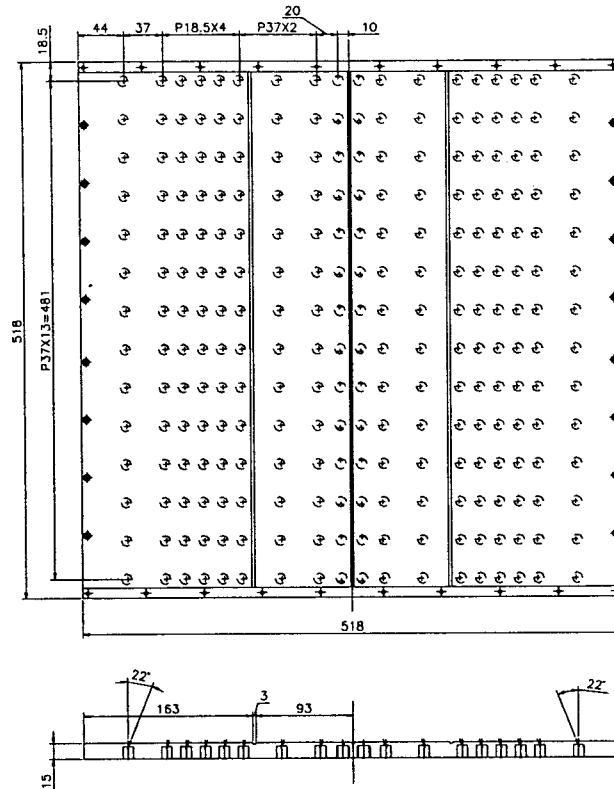


Fig. 6 Transfer track.

이송 트랙은 단지 웨이퍼를 부상시키는 기능만을 주었으며, 웨이퍼의 안정된 이송을 위하여 부상 노즐의 피치 38 mm, 경사방향은 중심을 향해 22°로 마주보며 경사지게 배치하였고, 제어 트랙과 이송 트랙의 길이는 518 mm로 동일하게 설치하였다.

4.2 실험방법

부상높이의 측정은 먼저 웨이퍼 상부에 레이저 센서가 반사되지 않도록 측정용 원형지를 웨이퍼의 중심에 붙인 다음 부상시키지 않은 상태에서 높이를 측정하여 기준점으로 잡는다. 그런 다음 부상 노즐의 유량을 변화시키면서 각각의 상태에서 부상 높이의 변화를 측정하여 기록한다. 측정변수는 동일한 트랙 형상에서 부상 노즐의 지름을 0.5 mm 와 0.8 mm, 유량은 0 에서 150 lpm 까지 변화시켰다.

웨이퍼의 추진속도는 동일한 트랙에서 추진 유량이 변화할 때 추진 노즐의 위치만 변경하여 Tape A(노즐 분산형)와 Tape B(노즐 집중형)의 이송속도 변화를 측정하고, 동일한 추진 압력에서 노즐의 추진 시간을 1.5 초까지 변화시키면서 이송속도를 측정하였다.

위치 안정성 평가는 Fig. 8 에 나타난 바와 같이 트랙에 측정눈금을 설치하고 연속 촬영용 카메라를 상부에 설치한 다음 웨이퍼가 도착하여 정지하기 시작하는 순간부터 어느 정도 안정화 되었다고 판단되기까지 측정하였다. 이 때의 변수는 웨이퍼를 중심에 정렬시키기 위하여 센터링 노즐을 켜 경우와 켜지 않은 경우의 정렬시간을 측정하였으며, 트랙의 중심에 정렬된 다음

웨이퍼의 지속적 위치 안정화를 위하여 가운데 설치된 흡입구를 통하여 공기를 흡입하는 경우를 서로 비교하였다.

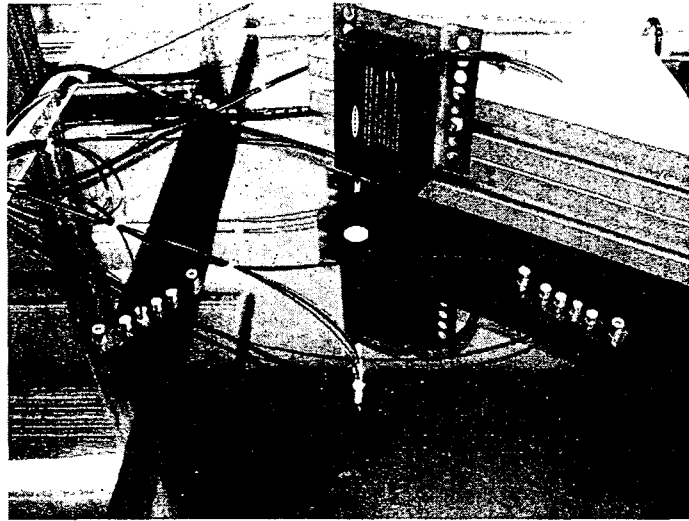


Fig. 7 Laser displacement sensor.

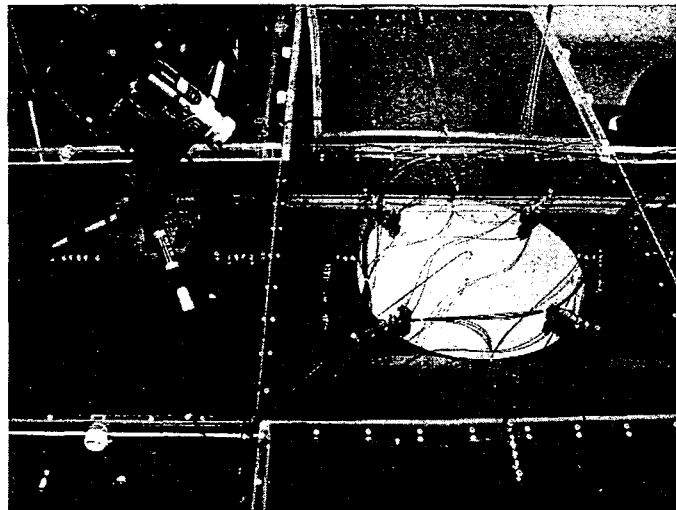


Fig. 8 Stability of wafer motion(movie camera).

5. 결과 및 고찰

5.1 부상 노즐의 크기에 따른 웨이퍼 부상높이

동일한 형상의 제어 트랙에서 부상 노즐의 지름을 0.5, 0.8 mm 로 변화시키고 챔버 압력 변화에 따른 웨이퍼 부상 높이 측정 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 이 결과에서 나타나는 바와 같이 챔버의 압력이 증가할수록 0.5 mm 노즐의 경우는 부상 높이가 크게 증가하지 않는 결과를 보이고 있으나 0.8 mm 노즐의 경우는 챔버 압력 증가에 거의 비례적으로 증가하는 결과를 나타내었다. 웨이퍼 부상 높이 0.4 mm 를 기준으로 보면 0.8 mm 분사 노즐의 경우 챔버 압력이 약 35mmAq 정도이면 가능하나, 0.5 mm 분사 노즐의 경우 챔버 압력이 약 75mmAq 가 필요하며, 웨이퍼 부상 높이 0.5 mm 인 경우는 0.8 mm 분사 노즐의 경우 챔버 압력이 약

50mmAq, 0.5 mm 분사 노즐의 경우 챔버 압력이 약 131mmAq 로 나타나 분사 노즐이 적을 경우 부상에 필요한 챔버 압력이 상대적으로 매우 높아야 하고, 웨이퍼 부상 높이가 높아질수록 점점 더 압력차이가 커짐을 알 수 있다.

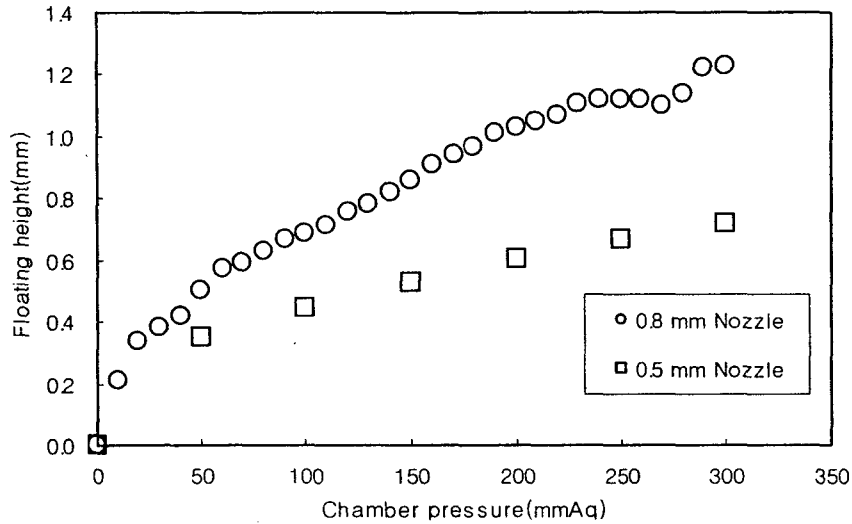


Fig. 9 Floating height with chamber pressure.

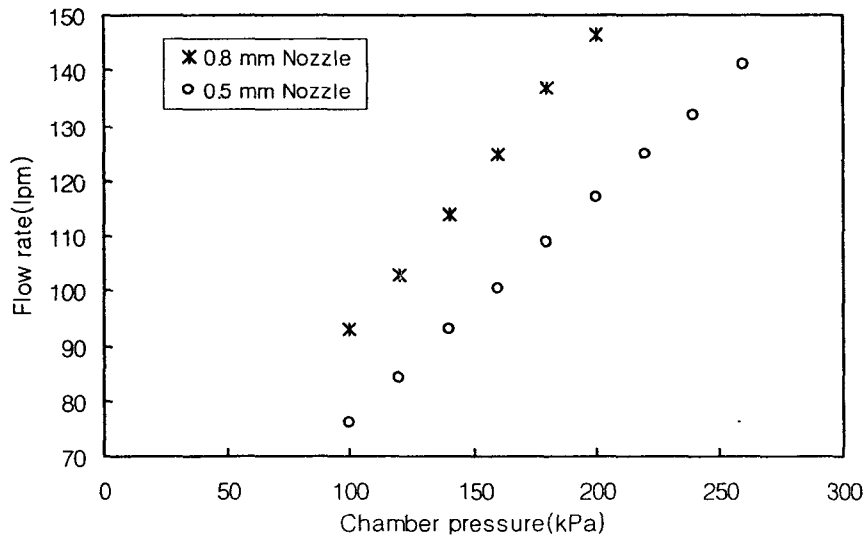


Fig. 10 Flow rate with chamber pressure.

챔버의 압력에 따른 부상 노즐의 유량 변화를 Fig. 10 에 나타내었다. 노즐 직경 0.8 mm 의 경우 노즐 직경 0.5 mm 에 비하여 동일한 압력에서 유량이 약 23% 정도 크게 나타난다. 즉, 챔버 압력이 200 kPa 일 때 노즐 직경 0.8 mm 의 유량은 약 147 lpm 인 것에 반하여 노즐 직경 0.5 mm 의 경우는 117 lpm 임을 알 수 있다.

이 실험의 결과를 분석하여 보면 동일한 유량을 사용하는 조건에서 웨이퍼를 부상시킬 경우 부상 노즐의 직경이 0.5 mm 에 비하여 0.8 mm 가 훨씬 더 높은 부상력을 얻을 수 있으므로 동일한 부상 높이를 사용할 경우 에너지 절약적인 측면에서 매우 유리함을 알 수 있다.

5.2 추진 노즐 배치에 따른 웨이퍼 이송속도

추진 노즐 유량을 30~90 lpm 까지 변화시키면서 측정한 웨이퍼 이송속도 변화를 Fig. 11 에 나타내었다. 이 실험은 추진 노즐의 분사 시간을 조절하지 않고 연속적으로 실시한 경우이다. 그래프의 상부에 위치한 곡선이 Type A(노즐 집중형)이고 하부에 위치한 곡선이 Type B(노즐 분산형)의 결과이다. 실험결과에서 나타나는 바와 같이 동일한 유량을 사용하더라도 추진 노즐의 배치에 따라 Type A 가 약 60% 정도 속도증가를 보이고 있음을 알 수 있다. 이송 시스템이 동일한 압축공기를 사용하면서 웨이퍼 이송속도의 증가는 향후 공정에 적용시 제조공정의 효율증가와 에너지 절감에 관련된 중요한 인자이다.

두 종류의 제어 트랙의 이송속도 변화를 확인하기 위하여 속도측정 실험을 수행하였다. 웨이퍼 이송 속도는 양쪽에 Type A 형과 Type B 형 제어 트랙을 각각 설치하고 가운데 이송 트랙 4 개를 설치한 트랙 상부에 커버를 설치한 다음 이송트랙에서의 일정 구간(약 1.36 m)을 지나는 평균속도를 측정하였다. 추진속도 측정 실험에서 부상압력은 두 트랙 동일하게 600 N/m^2 으로, 추진 노즐의 압력은 200 kN/m^2 으로 고정시킨 상태에서 추진시간을 변수로 주었다.

Type A 와 Type B 형 제어 트랙에서 추진 노즐의 분사 시간에 따른 웨이퍼 이송속도 변화를 측정한 결과가 Fig. 12 에 나타나 있다. Type A 의 경우는 추진시간을 최대로 할 경우 웨이퍼 이송속도가 약 0.7 m/s 까지 나올 수 있는 것으로 나타났으며, Type B 의 경우는 웨이퍼 이송속도가 약 1.05 m/s 로 나타나 전술한 바와 같이 동일한 조건에서도 웨이퍼 이송속도의 향상이 현저함을 알 수 있었다. Type A 인 경우 실제로 웨이퍼에 힘을 가하는 노즐의 수량이 웨이퍼 이동에 따라 선형적으로 감소하나, Type B 의 경우 웨이퍼가 일정위치까지 이동하기 전까지 노즐의 이탈이 없기 때문에 이송속도가 증가하게 되는 결과를 보였다.

추진 노즐의 배치에 관계없이 Fig. 12 에 나타나는 결과를 분석하여 보면 추진 시간이 0 이 되어도 웨이퍼의 이송 속도는 0 이 되고 있지 않는 결과를 보이고 있다. 이는 제어 트랙에서의 부상용 노즐이 웨이퍼가 정지하였을 경우 중심정렬 안정화를 위하여 일정한 각도로 중심을 향하여 분사되고 있기 때문에 추진 초기에는 이송을 방해하는 힘으로 작용하기 때문이다. 즉, 웨이퍼 제어 트랙에서 웨이퍼를 이송시키기 위하여 추진 노즐이 분사되기 시작하여도 웨이퍼가 바로 추진될 수 없고 반대방향으로 작용하는 부상용 노즐의 복원력을 극복할 수 있도록 어느 정도의 힘을 받아야만 추진될 수 있다는 것을 나타내고 있다.

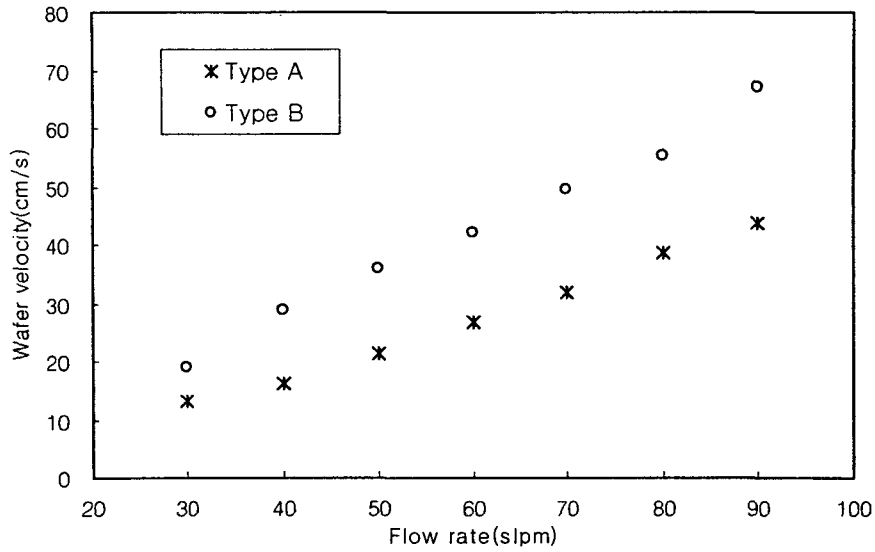


Fig. 11 Wafer velocity with flow rate of nozzle.

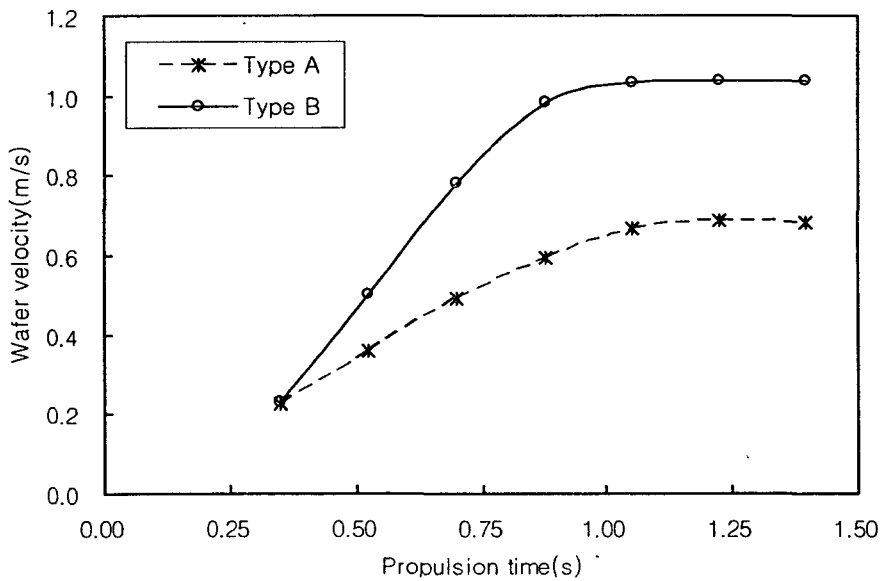


Fig. 12 Wafer velocity with propulsion time of nozzle.

5.3 위치 안정성 평가

제어 트랙에서 웨이퍼를 이송시키기 위하여 추진 노즐이 분사될 때 웨이퍼가 중심에 위치하지 않을 경우 추력이 발생하여 웨이퍼 속도를 증가시키는 힘의 일부가 회전시키는데 사용하여 속도가 변하는 문제점이 나타날 수 있으며, 인터페이스 시스템에서 인터페이스 유닛에 있는 웨이퍼를 장비로 이송하기 위해서는 로봇이 잡아야 하므로 일정 높이를 들어주어야 한다. 이때 리프트(lift) 장치를 이용하므로 부상 시에 웨이퍼가 벗어나지 않게 일정범위 안에 항상 존재하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 제어범위를 ± 5.0 mm로 설정하고 리프트 장치를 설계하였다. 위치 안정화에 필요한 시간을 평가하기 위하여 초시계를 이용하여 측정하는 방법과 카메라를 이용하여 촬영하는 방법을 병행하여 실시하였다.

센터링 노즐을 off 시킨 상태에서 부상 노즐의 압력을 변화시키면서 센터링되는 시간을 측정하여 Fig. 13 에 나타내었다. 이 경우는 부상용 노즐이 중심을 향하여 일정 각도로 분사되기 때문에 웨이퍼의 이탈 거리에 따라 노즐의 추진력이 다르게 작동하여 자동으로 센터링이 되는 효과를 활용하였다. 이 결과에서 나타나는 바와 같이 부상 노즐의 압력이 500 N/m^2 이하에서 240 초 이상 걸리며 부상 노즐의 압력이 약 700 N/m^2 이상에서는 부상 노즐의 압력에 관계없이 약 160 초 정도면 안정화되는 것으로 나타났다.

센터링 노즐을 on 시킨 경우와 센터링 노즐을 켜진 상태에서 컨트롤 유닛 중심부에서 흡입을 하는 경우 센터링 시간을 측정한 결과를 Fig. 14 에 나타내었다. 웨이퍼가 중심에서 일정한 거리(센서 설치거리 : 5, 15 mm)를 이탈하게 되면 광 화이버 센서에 의해서 감지되고 동시에 센터링 노즐이 켜지게 된다. 이 때 이탈거리에 따라서 5, 15 mm 위치에 센서가 설치되어 이탈된 웨이퍼를 감지하도록 되어 있다. 이 때 웨이퍼가 어느 정도($\pm 5 \text{ mm}$ 이내) 센터링이 되면 아주 작은 힘으로도 쉽게 이탈이 되므로 이 범위 안에서는 광 센서와 센터링 노즐이 거의 주기적으로 작동하게 된다. 이 결과에서 부상 압력에 따른 센터링 시간을 보면 부상압력이 750 N/m^2 을 기준으로 압력 낮은 부분에서는 센터링 시간이 급격히 증가하고 750 N/m^2 이상에서는 약 16 초 정도로 안정적인 결과를 나타내었다. 중심부에 설치된 흡입구를 통하여 공기를 흡입하게 되면 센터링 시간의 단축 효과는 크게 나타나지는 않았지만 제어영역 $\pm 5 \text{ mm}$ 이내에서 웨이퍼의 움직임을 안정화하는 효과를 나타내는 결과를 얻었다.

안정성 실험결과 웨이퍼가 인터페이스 유닛에 도착하게 되면 약 16 초 후에 리프트를 이용하여 웨이퍼를 들어 올릴 경우 안정된 기능을 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 시간은 결국 공정장비에서의 대기 시간을 의미하는 것으로 안정화 시간이 길어질수록 공정효율을 저하시키는 역할을 하므로 이 시간을 좀 더 단축시킬 필요가 있다고 판단된다.

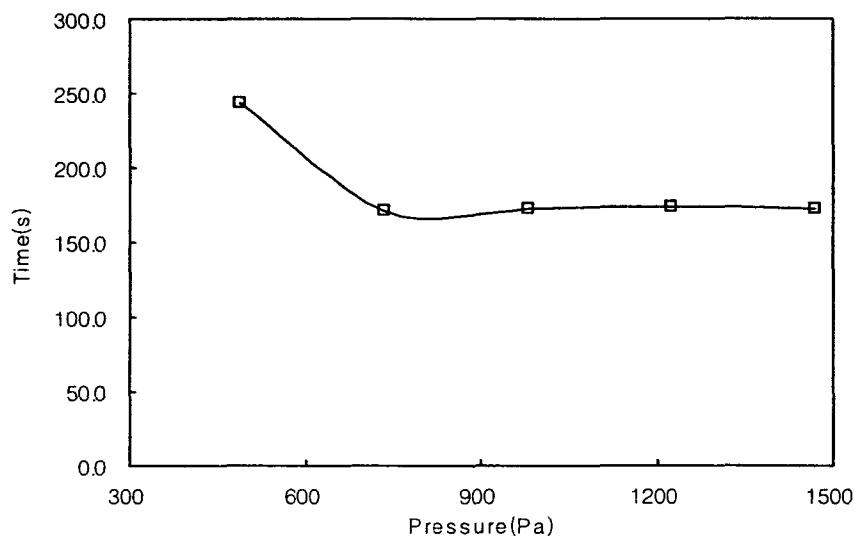


Fig. 13 Centering time with pressure of chamber.

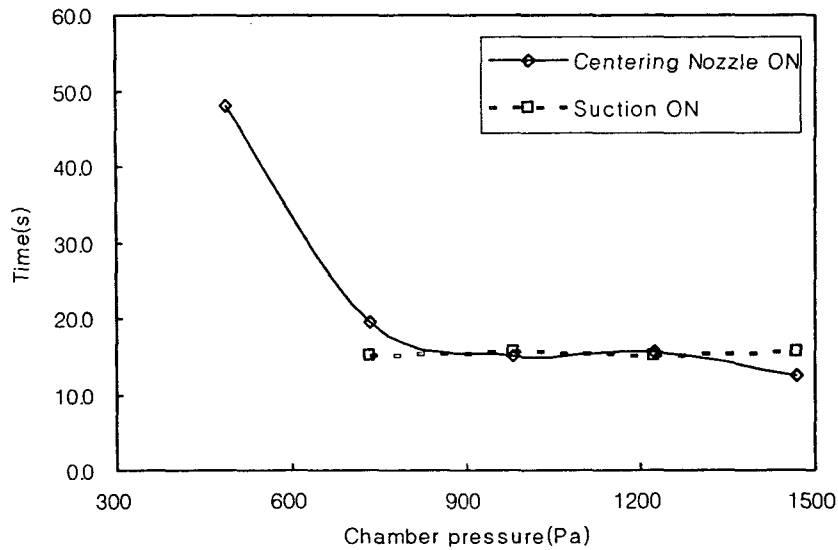


Fig. 14 Centering time with chamber pressure.

6. 결론

본 연구에서 공기부상 방식의 날장이송 시스템을 설계하여 실험장치를 구성하고 부상용 노즐의 크기, 추진 노즐의 배치 및 센터링 노즐의 on-off 를 변수로 사용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공기부상 방식 날장이송 시스템을 구성하고 웨이퍼 부상원리와 유량에 따른 부상 높이 변화를 고찰한 결과 웨이퍼의 부상은 정압력에 의해 주로 발생하고 있음을 확인하였다.
2. 동일한 트랙 조건에서 부상 노즐 직경 0.5 mm 에 비하여 0.8 mm 의 경우가 동일한 유량으로 보다 높은 웨이퍼 부상력을 얻을 수 있음을 밝혔다.
3. 웨이퍼 추진용 노즐의 배치에 따라 이송속도 차이가 매우 커짐을 밝히고 그 타당성을 검토한 결과 웨이퍼 이송속도 증가에는 Type B(노즐 집중형)가 Type A(노즐 분산형)에 비하여 유리함을 밝혔다.
4. 제어 트랙에서 웨이퍼가 정지하였을 경우 짧은 시간에 안정화되어야 하므로 센터링 노즐을 사용하여 약 16초 이내에 안정화 시키는 결과를 얻었다.

후기

본 연구는 산업자원부의 공통핵심기술개발사업(과제명 : 차세대 반도체 웨이퍼 반송용 클린튜브 시스템 개발)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- [1] 조상준, “차세대 300mm Wafer 반송 시스템”, 공기청정기술, vol 12, pp. 40-59, 2001.
- [2] 안길영, “자기 부상을 이용한 웨이퍼 반송 시스템에 관한 연구”, Master Thesis, KAIST, 1995.
- [3] Paivanas, J.A. and Hassan, J.K. “Air Film System for Handling Semiconductor Wafers”, IBM Journal Research and Development, 23, pp. 361-375, 1972.
- [4] Y kanno, M. and Togo, S., “Static Performance of Externally Pressurized Porous Gas Bearings”, Junkatsu, 20, pp. 53-60, 1975.
- [5] Toda, Masayuki, Shishido, M., Kanno, Y., Umeda, M., Nitta, T., and Ohmi, T., “Wafer Transportation Through a Tunnel Filled with Nitrogen gas”, ICCCS Proceedings, pp. 173-183, 1992.
- [6] M Toda, T Ohmi, Y Kanno, M Umeda, “N₂ Tunnel Wafer Transport System”, Proceedings - Institute of Environmental Sciences, pp. 493-499, 1993.