

## 공기부상방식 웨이퍼 이송시스템의 추진 노즐 크기에 따른 추진력계수에 관한 연구

문인호\*† · 조상준\* · 황영규\*\*

\*㈜신성이엔지 기술연구소, \*\*성균관대학교 기계공학부

### Propulsion Force Coefficient of Injection Nozzle Size on Air Levitation Type Wafer Transfer System

In Ho Moon\*†, Sang Joon Cho\* and Young Kyu Hwang\*\*

\*Institute of Technology Shinsung ENG Co.LTD.

\*\*Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

#### ABSTRACT

An air levitation type wafer transfer system is composed of control and transfer track. Wafer transfer speed is mainly affected by air velocity of propulsion nozzle. In this study, the propulsion force coefficient was evaluated experimentally for the nozzle with 0.5mm, 0.8mm, and 1.0mm diameter. As a result, the propulsion force was largest in the smallest size of nozzle at same air velocity. The propulsion force coefficient of nozzle increases with reducing diameter of nozzle. This increment of propulsion force coefficient was enlarged remarkably at the 0.5mm diameter of nozzle.

**Key Words :** Wafer Transfer System, Air Levitation, Propulsion Force Coefficient, Injection Nozzle, Control Track

#### 1. 서 론

반도체 웨이퍼 및 LCD 제조공정에서의 원판을 이송하는 공정 자동화 시스템은 최근 눈부시게 발전하고 있다. 반도체 웨이퍼 이송 시스템은 웨이퍼 지름이 300 mm로 커짐에 따라 기계화를 통한 자동화로 급진전되고 있으며, 특히 LCD 분야에서는 7세대 이상으로 기판 대형화가 급진전됨에 따라 글라스 이송에 따른 많은 문제점들이 대두되어 이의 해결을 위한 다양한 기술들이 개발되고 있다. 이러한 이송 시스템들의 발전에 따라 기존의 한꺼번에 여러 장을 동시에 적재하여 이송하는 방식에서 발생하는 대중량화나 글라스의 처짐과 같은 문제점들을 해결하기 위한 대책으로 대두된 것이 날장이송 방식이다. 날장이송 방식은 실시간 이송이 가능하여 제조공정의 효율 및 재공품의 절약으로 원가 절감에 많은 장점이 확인되어 국내의 LCD 제조

공정에서 적용을 검토하고 있는 실정이다[1-3].

날장이송 방식에는 기존의 컨베이어 이송방식과 마그네틱을 이용하여 캐리어를 부상시켜 이송하는 방식 및 압축공기를 이용하여 원판을 공기 중에 부상시켜 이송하는 공기부상 방식이 있다. 컨베이어를 이용한 날장이송 방식은 LCD 글라스 이송 시스템에 이미 적용되고 있는 시스템이며, 마그네틱을 이용하여 캐리어를 부상시켜 이송하는 방식은 국내에서도 연구된 바 있으나 상용화된 시스템으로 완성되지 못하고 있다. 압축공기를 이용하여 웨이퍼를 공중에 부상시키면서 이송하는 공기부상 방식 이송시스템은 1970년대 미국의 IBM사에서 처음 연구가 시작되었다[4].

이 연구에서 사용된 반도체 웨이퍼의 지름은 82 mm 와 57 mm로, 웨이퍼를 공기중에 부상시켜 물리적인 접촉이 전혀 없는 비접촉 방식의 에어 트랙으로 개발된 시작품이었다. 이 시스템은 부상용 공기는 일반 압축공기를 사용하였으며 웨이퍼가 공기에 의해 부상과 동시에 이송되는 노즐의 형상을 설계함으로써 Fig. 1과 같이

†E-mail : moonih@shinsung.co.kr

제어 및 이송 트랙을 일체형으로 제작 가능하게 에어 트랙의 형상을 개발하였다.

이후 1990년대 들어오면서 일본의 Toda등이IBM의 에어 트랙을 상용화가 가능하도록 이송 트랙과 제어 트랙으로 구분하여 개발된 개선 시스템을 연구 발표하였다. 제어 트랙에서는 웨이퍼의 정확한 위치 제어를 위해 부상과 추진 노즐(injection nozzle) 이외에 센터

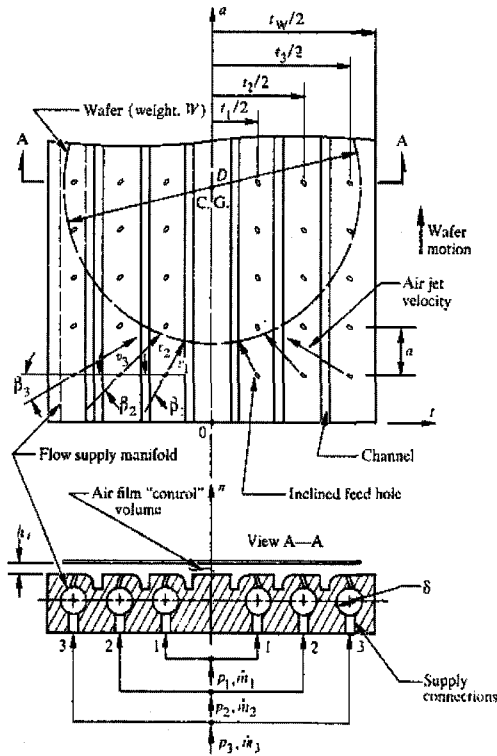


Fig. 1. IBM Air Track.

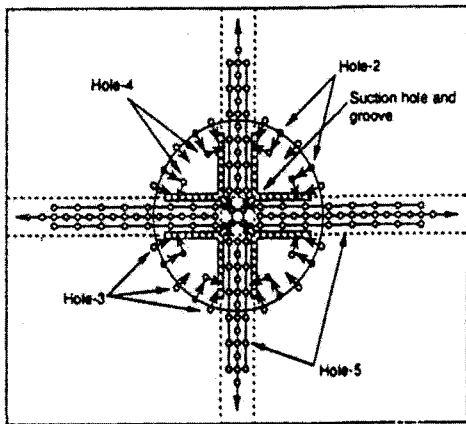


Fig. 2. Control Track(Toda, Japan).

링 및 위치 미세 조절용 노즐을 추가하여 제어성능을 향상시켰다. Fig. 2는 제어 트랙(control track), Fig. 3은 이송 트랙(transfer track) 개략도이며, 이 시스템의 가장 큰 특징은 웨이퍼 위치 제어용 구멍을 제어 트랙에 다수 배치시킨 것이다[5-7].

공기부상 방식 웨이퍼 이송시스템에서는 웨이퍼를 공기 중에 부상시키는 기능과 이송하는 기능은 서로 다른 노즐에서 역할을 담당하고 있다. 웨이퍼 이송 속도는 웨이퍼 제조공정의 공정능력을 결정하는 중요한 요소이며, 추진 노즐에 의해 결정되는 매우 중요한 인자이다. 웨이퍼를 추진시키기 위한 트랙의 모든 동일한 조건에서 웨이퍼 추진력 계산시에 적용되는 계수인 추진력계수(propulsion force coefficient) 크기에 따라 웨이퍼 추진속도에 차이가 많이 발생하는 것을 Fig. 4의 간단한 계산결과 그래프에서 알 수 있다. 즉, 동일한 조건에서 추진력계수를 0.5에서 1.0으로 변화시키게 되면 웨이퍼 이송속도는 약 0.233 m/s에서 0.333 m/s로 약 43% 정도 커지게 되는 결과를 나타내므로 추진력계수에 관한 정확한 데이터를 확보하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

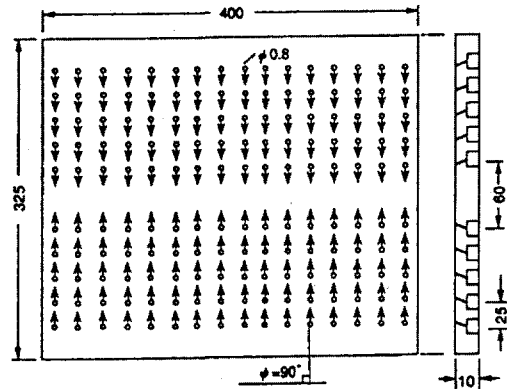


Fig. 3. Transfer Track(Toda, Japan).

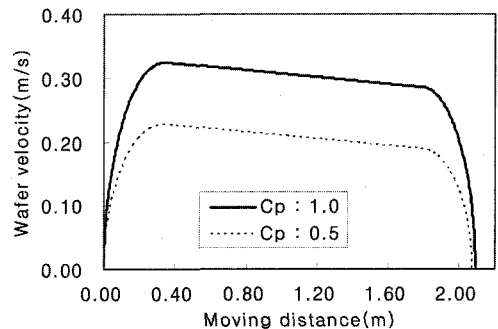


Fig. 4. Wafer velocity due to propulsion force.

따라서, 본 연구에서는 웨이퍼 이송 속도 계산시 중요한 인자이며 공기부상 방식 이송시스템의 기본적인 사항인 추진 노즐의 크기에 따른 추진력을 측정하고 이를 이용하여 추진력계수를 체계적으로 확립시키고자 하였다.

## 2. 웨이퍼 추진

웨이퍼 이송에 필요한 최소한의 시스템 트랙의 조합은 양 끝단 부분의 제어 트랙과 이송 통로인 가운데 부분의 이송 트랙으로 구성되어야 이송과 정지를 수행할 수 있다. 웨이퍼 추진용 노즐의 배치는 제어 트랙의 중심 부분에 웨이퍼 반경 이내에서 이송방향으로 필요에 따라 45° 각도로 경사진 상태에서 적절한 피치로 설치되며, 배치 방법에 따라 웨이퍼 중심부분에 다양하게 설치할 수 있다. 이송 트랙에서는 단지 웨이퍼를 부상시키고 이송 트랙의 중심을 따라 안정되게 이송될 수 있도록 노즐 경사방향을 트랙의 중심 라인에 대해 28°로 경사지게 설치하여 적절한 복원력을 유지하도록 하며, 이송 트랙의 길이는 상황에 따라 적절하게 설계하여 선정할 수 있다.

웨이퍼 추진속도의 이론적 해석을 수행하기 위하여 압축공기가 분사되는 트랙과 웨이퍼 부분에서 발생하는 추진 및 추진시 발생하는 저항의 원리를 상세 모델 개념도로 Fig. 5에 나타내었다. 분사노즐에 의해 부상되어 있는 웨이퍼가 정지상태에서 출발하여 일정한 거리를 이송한 다음 반대방향 분사노즐에 의하여 정지되는 상태를 운동량 변화로 나타내면 다음과 같은 지배방정식을 유도할 수 있다[5].

### 2.1. 운동량 방정식

웨이퍼 질량이  $m$ 이고 분사되는 공기에 의해 추진되

는 웨이퍼 이송속도가  $V$ 라면 웨이퍼 하부에서 추진되는 노즐의 추진력에서 순수하게 웨이퍼 속도로 변화될 수 있는 힘은 상부와 하부의 마찰력과 끝단면의 항력을 제외한 순수한 힘으로 다음과 같은 운동량 방정식이 성립한다.

$$m \frac{dV}{dt} = F - D_1 - D_2 - D_3 \tag{1}$$

웨이퍼에 작용하는 항력은 웨이퍼 상부면에 작용하는 마찰저항( $D_1$ )과 끝단면에 작용하는 항력( $D_2$ ), 웨이퍼의 하부면에 작용하는 마찰저항( $D_3$ )의 전체 힘의 합으로 주어질 수 있다.

### 2.2. 추진력

웨이퍼 하부에 위치하는 추진 노즐에서 분사되는 공기의 추진력( $F$ )은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$F = B \times F_x \tag{2}$$

여기에서  $N$ 은 추진 노즐의 수량,  $F_x$ 는  $x$ 방향 추진력을 나타낸다.

위의 Fig. 5와 같이 공기 중에 부상하고 있는 웨이퍼는 추진 노즐로부터 분사되는 가스 분출에 의해 발생하는 동압력(dynamic pressure)의 접선요소  $F_x$ 성분의 전체 합력에 의하여 이송되며, 여기에서 추진 노즐의 경사각은 제작성을 고려하여 트랙 상부면으로부터 웨이퍼 트랙 쪽으로 45° 경사져 있다. 이 접선방향의 힘  $F_x$ 는 다음 식에 의하여 계산될 수 있다.

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

여기에서  $C_p$ 는 추진 노즐의 추진력계수,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $q$ 는 각각의 추진 노즐당 공급되는 공기의 유량(gas flow rate),  $A$ 는 노즐의 단면적을 나타낸다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1. 실험장치

본 실험은 추진 노즐 경사각도 45° 일 경우 추진 노즐의 크기에 따른 추진력계수 변화를 검토하기 위하여 추진력을 측정하는 장치를 구성하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 알루미늄 프로파일을 이용한 이송 트랙을 사용하였다. 이송 트랙 한쪽 부분에 추진력을 측정할 수 있도록 로드 셀을 설치하고, 이송 트랙에서 웨이퍼를 일정 높이로 부상시킨 다음 가운데 부분에 위치한 프로파일을 교체함으로써 추진 노즐의 크기를 변화시킬 수 있도록 장치를 설계하였다.

웨이퍼가 노즐에서 분출되는 압축공기에 의해 추진

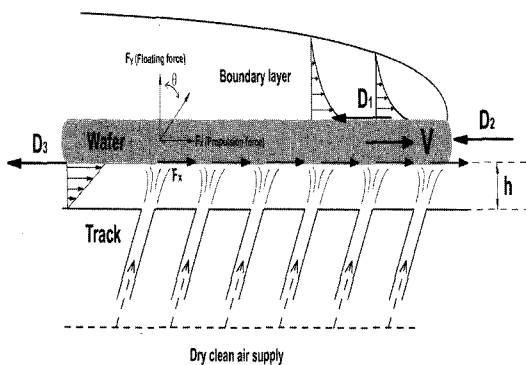


Fig. 5. Concept design of wafer propulsion.

되는 동안 발생하는 힘을 로드 셀로 측정하는 상세 그림을 Fig. 7에 나타내고 있다. 이 그림에서 나타나는 바와 같이 트랙의 상부에 부상되어 있는 웨이퍼가 트

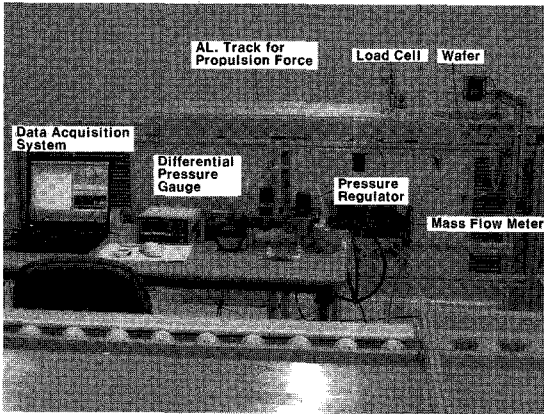


Fig. 6. Test facility.

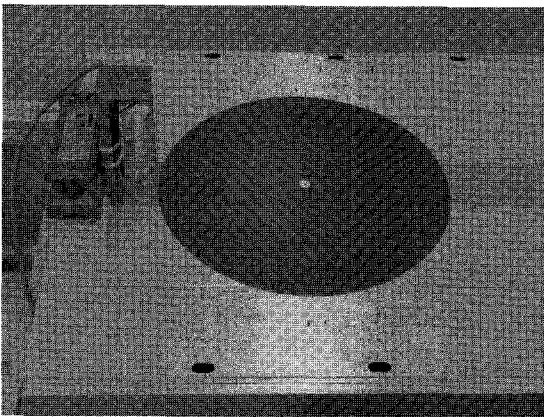


Fig. 7. Propulsion force measurement.

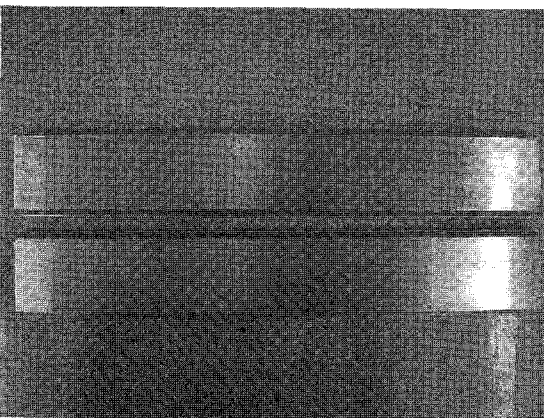


Fig. 8. AL. Profile for injection nozzle.

랙에 설치된 추진 노즐에 의해 로드 셀 방향으로 밀리면서 센서에 접촉됨으로써 추진력을 측정할 수 있도록 구성되어 있다. 이송 트랙의 중앙에 위치하는 교체용 프로파일의 추진력 실험용 시작품을 Fig. 8에 나타내고 있으며 프로파일 중심 부분에 지름이 각각 다른 추진 노즐 3종류를 가공하였다. 이송 트랙에 가공된 추진 노즐은 경사각 45°, 지름 0.5 mm, 0.8 mm, 1.0 mm로 하였으며 추진 노즐의 수량은 노즐 하나당 값을 사용할 때 값의 편차를 줄일 수 있도록 웨이퍼 하부에 10개가 동시에 추진되도록 설계하였다. 노즐 피치는 세 가지 모두 25 mm로 일렬로 배치하였다.

실험장치에 공급되는 압축공기는 공기 압축기에서 압축된 공기를 건조장치(dryer)를 거쳐 공급되도록 구성하였으며, 공급된 압축건조 공기는 레귤레이터를 통과하면서 일정한 압력으로 조정된 다음 디지털 압력계와 질량 유량계를 거쳐 프로파일의 압력 챔버 장치 내부로 공급되도록 하였다. 추진되는 노즐의 유량은 필요에 따라 레귤레이터의 밸브를 조작하여 질량유량계의 눈금이 조절되도록 구성하였다. 본 실험에서 필요한 실험결과 자료들은 모두 컴퓨터에 자동으로 입력되도록 구성하였다.

3.2 실험방법

추진력계수는 추진되는 힘을 측정하여 환산하는 방법으로 수행하였으므로 본 실험에서는 추진력을 측정하기 위하여 로드 셀을 설치하였다. 추진 노즐의 유속은 노즐의 지름이 작아 직접 측정하는 방법을 사용하기 곤란하므로 공급되는 유량을 측정하여 유속으로 환산하였으며, 측정된 힘도 노즐 하나당의 힘으로 10개의 평균값을 사용하였다.

Table 1. Measuring equipments

항목	사 양	비고
Load Cell	* 비직선성 : 0.01% F.S.	CAS (CI) 5010A)
	* A/D 내부 분해도 : 1/200,000	
	* A/D 외부 분해도 : 1/10,000(Max.)	
	* A/D 변환 속도 : 20회/sec	
Mass Flow Meter	* Gas : Air	SIERRA
	* User FS : 0~200 lpm	
	* OP Temp. : 20°C	
	* Max. Press : 150 PSIG	
Dater Logger	* 채널 : 60 ch.	Yokogawa (DA100)
	* AD 분해능 : 16 bit	
	* 정확도 : ±0.05%	
	* 데이터측정주기: 0.55s	
* 열전대 : K, J, E, T, U, L, N, W, R, S, B		

유속의 변화 범위는 노즐에서의 압축공기를 비압축성으로 취급할 수 있는 범위인 마하 0.3 이하의 범위로서 설정하여야 하나 본 연구에서는 약 50 m/s에서 150 m/s까지 확장하여 측정하였다. 장치에 공급되는 압축공기의 압력은 레귤레이터를 거쳐 디지털 압력계를 이용하여 측정하였으며 공급유량 또한 질량 유량계를 이용하여 측정하였다. 공급 유량에 따른 챔버의 압력은 두 군데의 공급부분에 연결하여 디지털 압력계로 평균값을 측정하고 유량은 질량 유량계와 데이터 로거를 컴퓨터로 연결하여 측정 데이터를 수집하였다.

성능실험에 사용된 계측기는 Table 1에 표시하였으며, 데이터 수집과정은 다음과 같다.

- (1) 측정하고자 하는 추진노즐 프로파일을 설치한다.
- (2) 웨이퍼를 측정장치에 위치시킨다.
- (3) 로드 셀의 영(0)점 조정을 실시한다.
- (4) 압축공기를 공급하면서 웨이퍼의 부상상태를 점검한다.
- (5) 압축공기의 압력과 유량을 설정 값에 맞춘다.
- (6) 공급되는 압축공기에 의한 추진력을 먼저 측정한다.
- (7) 공급유량을 변화시키면서 추진력을 측정 한다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

추진 노즐 지름을 0.5 mm, 노즐의 피치를 25 mm로 10개를 이송 트랙의 가운데에 설치하여 측정한 추진력을 Fig. 9에 나타내었다. 그래프에서 네모(□)로 표시된 값이 로드 셀에 의해 측정된 값이며 그래프의 하단부인 X-축 바로 위에 별표(\*) 모양으로 표시된 것이 바람에 의한 추진력이며 동그라미(○)로 표시된 것이 측정된 추진력에 바람에 의한 추진력을 제외한 순수 추진력을 나타내고 있다. 이 결과에서 나타나는 바와 같이 노즐의 지름과 수량이 많지 않으므로 추진력이 매우 약하게 나타나고 있으므로 측정 회수를 3회 측정하여 나타내었으며 바람에 의한 저항력 또한 매우 미세하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

추진 유량이 6 lpm이면 노즐에서의 토출 속도가 약 50 m/s이고 노즐 10개 전체 추진력은 약 0.52 g, 8.9 lpm이면 토출 속도가 약 75 m/s이고 이때의 추진력은 약 0.83 g, 11.8 lpm이면 토출 속도가 약 100 m/s이고 추진력은 약 1.2 g, 14.8 lpm이면 토출 속도가 약 125 m/s이고 추진력은 약 1.7 g, 17.7 lpm이면 노즐에서의 토출 속도가 약 150 m/s이고 추진력은 약 2.28 g으로 측정되었으며 추진 유량이 6 lpm 이하에서는 바람에 의한 추진력의 영향은 거의 나타나지 않았다.

추진 노즐 10개, 지름 0.8 mm, 노즐 피치를 25 mm로 측정한 추진력을 Fig. 10에 나타내었다. 추진 유량이 15.2 lpm이면 노즐에서의 토출 속도가 약 50 m/s이고 노즐 10개 전체 추진력은 약 0.80 g, 추진 유량 22.7 lpm이면 토출 속도가 약 75 m/s이고 노즐 추진력은 약 1.63 g, 추진 유량 30.2 lpm이면 토출 속도가 약 100 m/s이고 노즐 추진력은 약 2.71 g, 추진 유량 37.7 lpm이면 토출 속도가 약 125 m/s이고 노즐 추진력은 약 4.11 g, 추진 유량 45.3 lpm이면 노즐에서의 토출 속도가 약 150 m/s이고 노즐 추진력은 약 5.82 g으로 측정되었다. 바람에 의한 저항력은 최대 0.31 g으로 추진력에 비해 약 5% 정도이고 추진 유량이 증가함에 따라 이차함수 형태로 증가하는 경향을 나타내었다.

추진 노즐 10개, 지름 1.0 mm, 노즐 피치를 25 mm로 측정한 추진력을 Fig. 11에 나타내었다. 추진 유량이 23.6 lpm이면 노즐에서의 토출 속도가 약 50 m/s이고 추진력은 약 0.89 g, 추진 유량 35.4 lpm이면 토출 속도가 약 75 m/s이고 노즐 추진력은 약 1.97 g, 추진 유량 47.2 lpm이면 토출 속도가 약 100 m/s이고 노즐 추진력은 약 3.43 g, 추진 유량 59.0 lpm이면 토출 속도

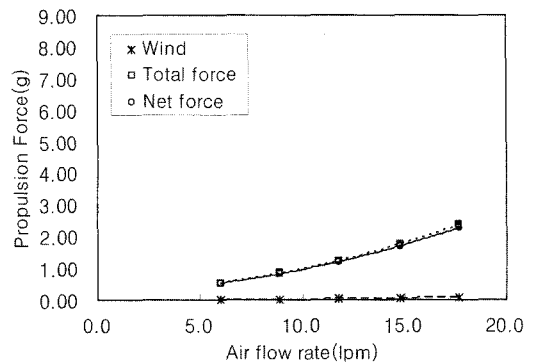


Fig. 9. Propulsion force(Nozzle:0.5 mm).

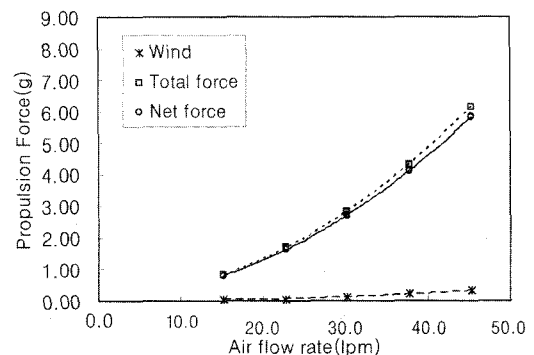


Fig. 10. Propulsion force(Nozzle:0.8 mm).

가 약 125 m/s이고 노즐 추진력은 약 5.22 g, 추진 유량 70.8 lpm이면 노즐에서의 토출 속도가 약 150 m/s이고 노즐 추진력은 약 7.50 g 정도로 측정되었다. 이 때의 바람에 의한 저항력은 최대 0.64 g으로 추진력에 비해 최대 약 8% 정도이고 추진 유량에 따라 이차함수 형태로 증가하는 경향은 동일하게 나타났다.

노즐의 크기에 따른 추진력을 상호 비교하기 위하여 노즐 한 개당 추진 유량에 따른 추진력 그래프를 Fig.

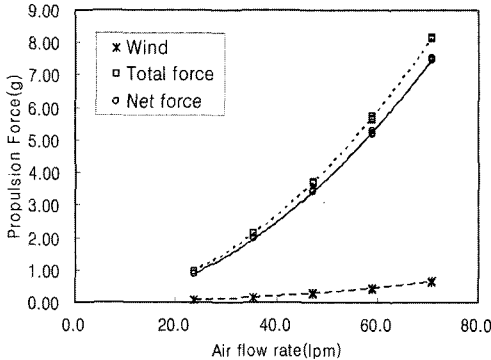


Fig. 11. Propulsion force(Nozzle:1.0 mm).

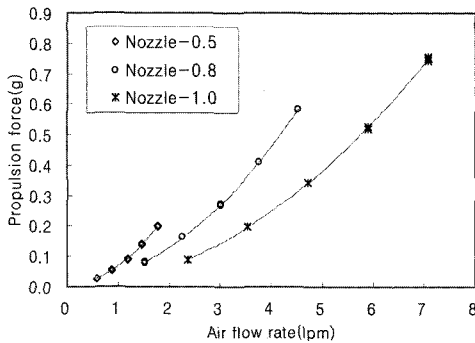


Fig. 12. Propulsion force due to air flow rate(one nozzle).

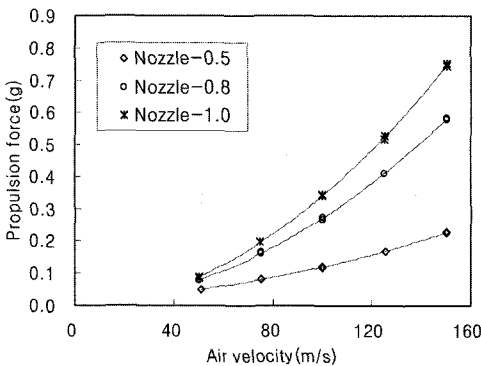


Fig. 13. Propulsion force due to air velocity(one nozzle).

12에, 유속에 따른 노즐 한 개당 추진력을 Fig. 13에 나타내었다. 추진 노즐 지름이 1.0 mm인 경우와 0.8 mm인 경우가 0.5 mm인 경우에 비해 유량 증가에 따른 추진력의 크기 증가경향이 좀 더 완만한 이차함수 형태로 나타났다. 이 결과를 종합하여 보면 동일 유속이면 추진 노즐이 클수록 추진 유량이 많으므로 추진력 또한 비례하여 커지며, 추진 노즐 직경이 작을수록 일정 이상의 추진 속도를 달성하기 곤란함을 알 수 있다. 동일 유량이면 추진력은 노즐이 작을수록 토출 유속이 훨씬 빨라 웨이퍼에 전달되는 추진력은 커지므로 추진속도도 빠르게 구성할 수 있는 특징을 보였다.

실험에서 측정된 추진력을 이용하여 계산된 추진력 계수를 웨이퍼 추진용 노즐 지름의 크기 및 유속 크기 별로 나타난 추진력계수를 정리하여 보면 Table 2와 같다.

추진 노즐이 0.5 mm인 경우, 추진 노즐 유속이 느릴수록 추진력계수가 급격하게 커지는 경향을 뚜렷하게 나타내고 있으며 노즐의 유속이 느린 부분에서는 상대적으로 추진력계수 변화 값이 유속변화에 크게 의존하는 특성을 보이고 있다.

추진 노즐 지름이 0.8 mm인 경우, 추진 노즐 유속에 따른 추진력계수의 변화가 많이 나타나지 않으나 유속이 증가할수록 점차 줄어드는 경향은 나타나고 있다. 이 경우에서도 노즐 지름 0.5 mm에서 나타나는 특징과 비슷하게 추진 노즐의 유속이 느릴수록 추진력계수가 점차 큰 비율로 커지는 경향을 보이고 있다.

Table 2. Propulsion force coefficient

유속 \ Nozzle	0.5 mm	0.8 mm	1.0 mm
50m/s	2.344	1.447	1.040
100m/s	1.417	1.241	1.006
150m/s	1.189	1.185	0.977

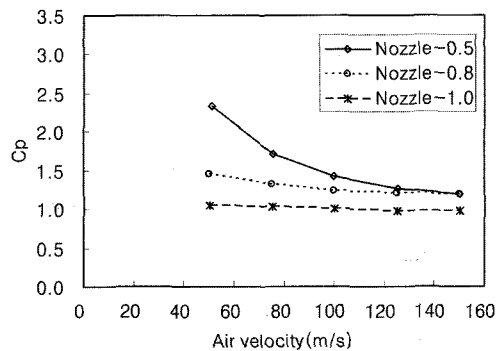


Fig. 14. Propulsion force coefficient due to air velocity.

추진 노즐 지름이 1.0 mm인 경우, 추진 노즐 유속 변화에 따른 추진력계수의 변화는 유속 50m/s 기준으로 보면 약 6% 이내로 상대적으로 노즐 지름 0.5 mm 와 0.8 mm에서 나타나는 특징에 비하여 유속 변화에 따른 추진력계수 변화 값이 거의 나타나지 않는 특징을 보였다.

추진 유속별 추진력계수  $C_p$ 의 변화 경향을 확인하기 위한 그래프가 Fig. 14이다.

이 결과를 종합해 보면 추진력계수는 추진력에 정비례하고 추진 노즐 유량의 공급에 반비례하기 때문에, 추진 노즐의 유속이 느릴수록 추진력계수의 값은 점차 큰 비율로 커지는 경향을 보이고, 추진 노즐의 지름이 작을수록 추진력계수가 크게 나타나며, 추진 노즐의 지름이 커질수록 추진력계수가 작아지고 동일 유량에서 지름이 작은 노즐에 비해 추진력은 작으나 상대적으로 많은 유량을 사용하는 만큼 빠른 웨이퍼 추진속도를 얻을 수 있는 장점이 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

공기부상 방식 웨이퍼 이송시스템에서 노즐 크기 및 추진 공기의 유속에 따른 추진력계수는 웨이퍼 추진 속도를 계산하는데 매우 중요한 인자이다. 따라서, 본 연구에서 추진 노즐 지름을 0.5 mm, 0.8 mm, 1.0 mm, 피치를 25 mm로 10개 설치한 실험장치에서 로드 셀을 이용하여 300 mm 웨이퍼 추진력을 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 추진력계수의 크기에 따른 웨이퍼의 이송속도 차이가 크므로 적절한 추진력계수의 정확한 확립이 매우 중요하다는 것을 확인하였다.

(2) 300 mm 웨이퍼 공기부상 방식 이송시스템에서 로드 셀을 이용하여 추진 노즐 크기에 따른 추진력 측정방법을 확립하였다.

(3) 동일한 유량을 사용할 경우 추진력은 노즐의 지름이 작을수록 크게 나타나고 있으나 최대 웨이퍼 이송속도 측면에서는 불리하게 나타났다.

(4) 추진력계수는 노즐의 지름이 작을수록 더 크게 나타났으며, 추진 노즐의 유속이 작을수록 노즐 크기에 따라 추진력계수 값의 차이는 더 커지고 유속이 빨라질수록 그 값의 차이는 현저하게 줄어드는 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- Hayashi T. U., (e-CATS), J. K., The Revolution of Semiconductor Manufacturer required Next Generation, Semiconductor Industrial Newspaper Forum, 2002.
- Moon, I. H., Hwang, Y. K., Cho, S. J. and Kim, D. K., A Study on the Characteristics of Semiconductor Wafer Transportation for Levitation System, The Society of Air- Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp.1149-1154, 2002.
- 조상준, "차세대 300 mm Wafer 반송 시스템", 공기청정기술, Vol. 12, pp.40-59, 2001.
- Paivanas, J. A. and Hassan, J. K., Air Film System for Handling Semiconductor Wafers, IBM Journal Research and Development, Vol. 23, pp.361-375, 1979.
- Toda, M, Ohmi, T, Kanno, Y. and Umeda, M., N2 Tunnel Wafer Transport System, Proceedings - Institute of Environmental Sciences, pp.493-499, 1993.
- 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.
- Ykanno, M. and Togo, S., Static Performance of Externally Pressurized Porous Gas Bearings, Junkatsu, 20, pp. 53-60, 1975.