

클린튜브 시스템의 웨이퍼 운동 제어

신 동 현[†], 최 철 환, 정 규 식

서울시립대학교 기계정보공학과

Wafer Motion Control of Clean Tube System

Dong Hun Shin[†], Chul Hwan Choi, Kyoo Sik Jeong

Department of Mechanical Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

(Received October 31, 2003; revision received April 10, 2004)

ABSTRACT: This paper presents a force model of the clean tube system, which was developed as a means of transferring air-floated wafers inside a closed tube filled with super clean air. The recovering force from the holes for floating wafers is modeled as a linear spring and thus the wafers motion is modeled as a mass-spring-damper system. The propelling forces are modeled as linear along with the wafer location. The paper also proposes a control method to emit and stop a wafer at the center of a control unit. It reveals the minimum value of the propelling force to leave from the control unit. In order to stop the wafer, it utilizes the exact time when the wafer arrives at the position to activate the propelling force. Experiments with the clean tube system built for the 12 inch wafer shows the validity of the proposed model and the algorithm.

Key words: Clean tube system(클린튜브 시스템), Wafer(웨이퍼), Motion control(운동 제어)

1. 서 론

현재의 반도체공장은 3층의 구조로서 1,3층의 청정상태 유지를 위한 시설이 가동되어 만들어지는 클린룸인 2층에서만 실질적인 생산공정이 이루어진다. 이와 같은 클린룸(Clean Room System) 방식은 전체 공장설립비용의 1/4~1/3이 오염방지시설에 투입되고 있다. 그리고 반도체회로의 고집적화와 이에 따른 회로선 폭의 미세화가 이루어지는 가까운 미래에는 보다 더 높은 고청정환경이 요구되므로,⁽¹⁾ 현재의 클린룸 방식의 시스템으로는 기술적, 경제적으로 대처하기 어렵다. 그래서 웨이퍼의 이송을 초청정화되고 밀폐된 튜

브 안에서 이루어지게 하여 웨이퍼의 오염문제와 투자비용을 줄일 수 있는 클린튜브 시스템이 제안되었다. 이송방식은 클린튜브 내의 바닥에서 분사되는 공기에 의하여 웨이퍼가 부상되고, 또한 각도를 가지고 분사되는 공기의 마찰력에 의하여 웨이퍼가 추진되는 방식이다.

이러한 공기부양방식의 클린튜브 시스템은 1970 년대에 IBM의 Paivanas와 Hanssan이 처음 공기부양의 기본적인 방식을 제안하고,⁽²⁾ 웨이퍼 운동의 안정성을 위해 트랙상에 Channel을 개발하였으나 높은 운영비와 웨이퍼의 이송안정성의 어려움으로 실제공정에는 적용되지 않았다.⁽³⁻⁶⁾ 1990 년대에는 일본의 Toda 등이 제어유닛과 이송유닛으로 이루어진 클린튜브 시스템의 프로토타입을 제시함으로써 활발한 연구가 진행되었다.^(7,8) 이들은 기체의 압력과 부상높이의 관계와 웨이퍼와 트랙 사이의 압력분포를 계산하여 좀더 안정

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2542; fax: +82-2-2248-5110

E-mail address: shin@uos.ac.kr

적인 웨이퍼의 운동을 보여주었다.^(9,10)

지금까지 웨이퍼의 부상원리와 부상시 웨이퍼의 안정성에 관한 연구결과는 많이 있으나 웨이퍼의 이송과정에서 일어나는 웨이퍼의 운동과 제어방법 등에 관한 연구내용은 발표된 바가 없다.

본 논문은 기존의 유체역학적 연구와는 다르게 웨이퍼의 이송과 관련하여 웨이퍼가 받는 힘과 거동을 동역학적 해석을 통하여 모델화하고 이를 이용한 부상된 웨이퍼의 안정적인 제어방법을 제시한다.

2. 모델링 및 제어

클린룸 시스템은 제어유닛과 이송유닛의 조합으로 되어 있다. 이송유닛이 웨이퍼의 단순 부상기능만을 가지고서, 제어유닛에서 만들어진 웨이퍼의 수평적 운동을 관성적으로 유지시키는 데 반하여, 제어유닛은 웨이퍼를 출발시키거나 또는 정지하게 하고 웨이퍼의 운동방향을 전환하는 등 여러 가지 웨이퍼의 제어기능을 수행하기 때문에 이송유닛에 비하여 복잡한 구조로 되어 있다.

제어유닛에도 이송유닛과 같이 웨이퍼의 부상을 위해 일정한 간격의 기체분사노즐들이 고르게 설치되어 있는데, 이 노즐들은 Fig.1에서와 같이 4개의 구역으로 나누어 이 구역 안에서 분사노즐들은 제어유닛의 중심점을 향하여 모두 같은 각도로 되어 있어서 웨이퍼가 유닛의 중심을 벗어나지 않게 하는 복원력으로 작용한다. 이 힘은 다음과 같은 가정으로 모델화할 수 있다.

- (1) 유닛의 전체에 걸쳐 부상노즐이 분포한다.
- (2) 부상노즐은 웨이퍼의 크기에 비해 작은 간격으로 일정하게 분포한다.
- (3) 각 부상노즐에서 분사되는 공기의 압력과

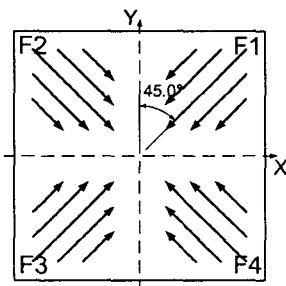


Fig. 1 The recovering force direction in the control unit.

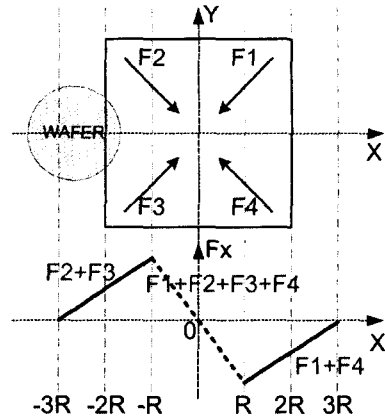


Fig. 2 The recovering force along the wafer motion.

유량은 일정하다.

Fig.1과 같이 각 방향의 복원력을 F1, F2, F3, F4라고 하고 웨이퍼가 Fig.2와 같이 제어유닛의 왼쪽에서 진입한다고 하자. 웨이퍼는 처음에는 F2, F3의 힘을 받다가 웨이퍼가 유닛의 중심을 지나면서 F1, F4의 힘을 받는다.

웨이퍼의 중심의 위치를 x 라고 하면, 복원력은 Fig.2와 같은 분포로 나타낼 수 있다. 특히 $-3R < x < -R$ 에서는 복원력이 제어유닛에 포함된 웨이퍼의 면적에 비례하여 증가한다. Fig.3에서와 같이 빗금 친 웨이퍼의 면적은 식(1)과 같이 계산되고 선형적으로 증가한다. 그래서 복원력이 Fig.2와 같이 모델링된다.

$$A = r^2 \cos^{-1}\left(\frac{r-x}{r}\right) - r(r-x) \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{r-x}{r}\right)\right) \tag{1}$$

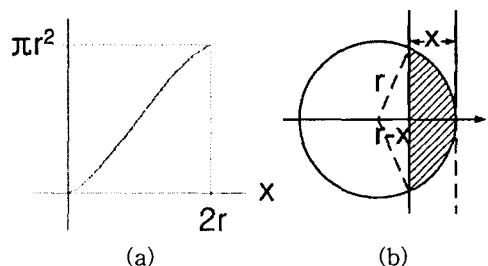


Fig. 3 The area of a wafer that goes in the control unit.

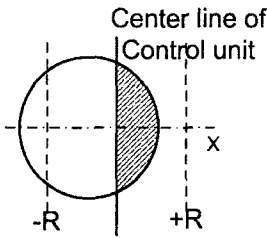


Fig. 4 The area of a wafer that passes over the center line.

$-R < x < R$ 의 구간에서 복원력은 이전 구간의 기울기의 2배로 감소한다. 이는 Fig. 4에서 보는 것처럼 웨이퍼가 유닛의 중심을 지나면서 x 축의 음의 방향으로 복원력이 작용하기 때문이다.

$R < x < 3R$ 에서 복원력은 $-3R < x < -R$ 에서 복원력이 힘의 방향만 다를 뿐 크기는 같다.

x 에 따라 복원력이 선형적으로 증가하는 사실 외에 웨이퍼는 운동방향에 반대방향으로 점성마찰이 작용한다. 그래서 복원력에 의한 웨이퍼의 운동은 식(2)와 Fig. 5와 같이 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 모델링할 수 있다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + Kx = 0 \quad (2)$$

제어유닛에는 부상노즐 이외에도 Fig. 6과 같이 웨이퍼를 출발시키고 정지시키기 위한 특별한 노즐들이 있다. 실험모델의 추진력(F5)의 노즐분포를 예로 알아보면 제어유닛을 중심으로 한쪽 면에는 12.5 mm 간격으로 제어유닛의 중심선을 따라서 분포되어 있고 또 다른 면에는 25 mm 간격으로 두 줄로 평행하게 분포되어 있다. 그리고 왼쪽으로 노즐이 일정각도로 기울어져 있다. F5와 같이 F6, F7, F8 모두 노즐의 분포형태가 동일하고 제어유닛의 중심에 대칭이며 이송방향을 따라 노즐이 기울어져 있다.

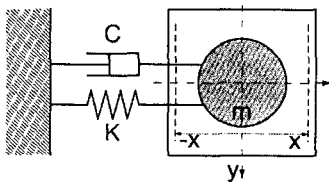


Fig. 5 Mass-spring-damper system.

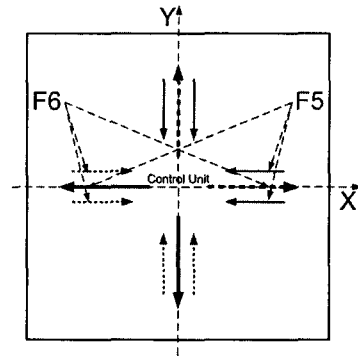


Fig. 6 Propelling forces to emit and stop a wafer.

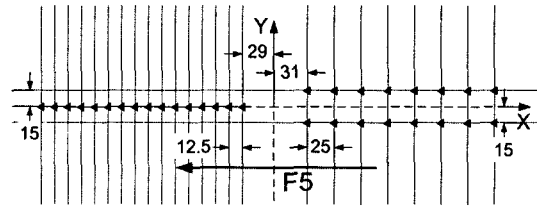


Fig. 7 The layout of holes for F5.

트랙의 중심선을 따라 웨이퍼가 이동하면 웨이퍼가 받는 힘은 웨이퍼의 위치에 따라 Fig. 8과 같이 선형적으로 분포한다. F5와 F6는 웨이퍼의 이송제어를 위하여 사용되는 추진력으로 서로 반대방향으로 작용하며 힘의 크기는 같다. 그리고 추진력이 최대(μ)가 되는 일정한 구간($-R < x < R$)

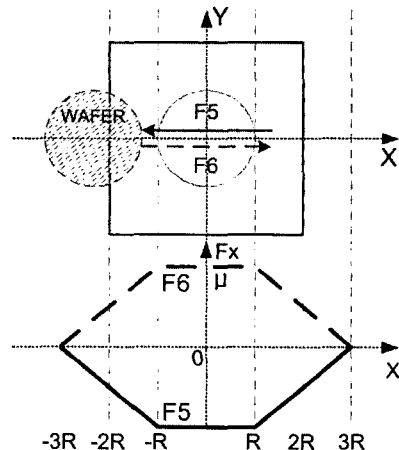


Fig. 8 The propelling forces along the wafer motion.

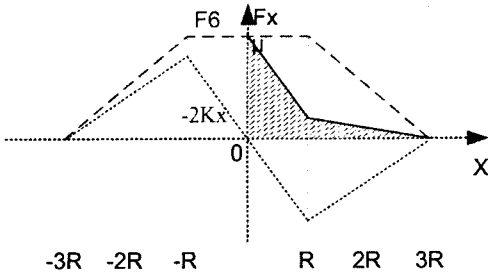


Fig. 9 The resultant force to the emitted wafer.

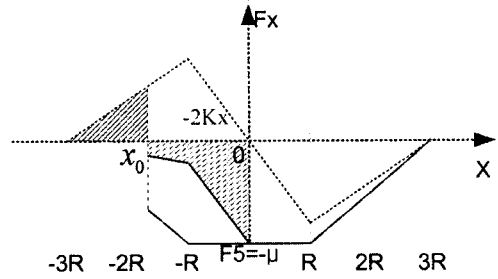


Fig. 10 The resultant force to stop a wafer.

이 존재하는데 이는 웨이퍼 전체가 추진노즐에 포함되어 추진노즐의 증감이 없는 구간이다. 그러나 이 구간을 벗어나는 순간부터 선형적으로 감소한다.

웨이퍼를 출발 또는 정지시키기 위해서는 F6와 F5의 노즐의 공기를 제어함으로써 추진력을 조절해야 한다. 웨이퍼가 제어유닛의 중심에서 양의 x 방향으로 이동하면, Fig.9와 같이 F6가 작용되고 동시에 웨이퍼는 복원력과 추진력의 합력을 받게 된다.

여기서, $x=3R$ 일 때 웨이퍼의 운동에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m v^2 &= \int_0^R (\mu - 2Kx) dx \\ &+ \int_R^{3R} \left(Kx - \frac{\mu}{2R} x - 3KR + \frac{3\mu}{2} \right) dx \quad (3) \\ &= -3KR^2 + 2\mu R \end{aligned}$$

여기서, K 는 복원력의 변화율이다. 웨이퍼가 제어유닛을 벗어나게 하는 최소한의 추진력 μ 값은 식(3)의 우항이 항상 양의 값을 가져야 하기 때문에 식(4)를 만족해야 한다.

$$\mu \geq 1.5KR \quad (4)$$

웨이퍼의 출발과 마찬가지로 추진력을 이용하여 웨이퍼를 제어유닛의 중앙에 정지시킨다. 웨이퍼가 제어유닛의 왼쪽에서 v_0 의 속도로 진입한다고 하자. 웨이퍼를 정지시키기 위해서는 웨이퍼의 운동에너지를 F5 추진력으로 감쇠시켜 유닛의 중앙에 이를 때 0으로 만들어야 한다.

Fig.10과 같이 웨이퍼가 x_0 의 위치에 왔을 때 F5를 작용시킨 후 $x=0$ 일 때 운동에너지를 계산하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{1}{2} m v_0^2 + \int_{-3R}^{x_0} (Kx + 3KR) dx \\ &+ \int_{x_0}^{-R} \left(Kx - \frac{\mu}{2R} x + 3KR - \frac{3\mu}{2} \right) dx \quad (5) \\ &+ \int_{-R}^0 (-\mu - 2Kx) dx \end{aligned}$$

여기서, x_0 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_0 = -3R \pm \sqrt{8R^2 - \frac{12KR^3 - 2mv_0^2 R}{\mu}} \quad (6)$$

그러나 웨이퍼의 속도가 이동경로에 따라 변하면서 x_0 도 변한다. 그리고 변하는 x_0 위치를 모두 검색하는 것은 비현실적이고 비경제적이다. 그래서 웨이퍼가 x_0 에 도달하는 시간 t_0 를 구한다. 우선 웨이퍼는 x_0 에 오기까지 식(7)의 힘을 받는다.

$$F_x = Kx + 3KR \quad (7)$$

여기서 이 구간의 마찰력을 무시하면 운동방정식은 식(8)이 되고, 초기조건이 식(9)일 때 웨이퍼의 운동식은 식(10)이 된다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} - Kx = 3KR \quad (8)$$

$$x(0) = -3R, \quad \frac{dx(0)}{dt} = v_0 \quad (9)$$

$$x(t) = \frac{v_0}{2w_n}(e^{w_n t} - e^{-w_n t}) - 3R \quad (10)$$

식(9)에서 x_0 에 도달하는 시간 t_0 을 식(11)로 나타낼 수 있다.

$$t_0 = \frac{1}{w_n} \log \left\{ \frac{w_n(x_0 + 3R)}{v_0} + \sqrt{\left(\frac{w_n(x_0 + 3R)}{v_0} \right)^2 + 1} \right\} \quad (11)$$

즉, 웨이퍼의 정지는 우선 웨이퍼가 유닛에 진입 후 t_0 후에 F5가 작용해야 하고, 웨이퍼가 정확히 중심에 도달했을 때 F5의 작용을 멈추어야 한다.

3. 실험

Fig. 11은 2개의 제어유닛과 1개의 이송유닛으로 제작된 실험장비이다.

유닛의 트랙에 설치된 기체분사장치는 Fig. 12와 같이 여러 단계를 거쳐 웨이퍼에 기체를 분사



Fig. 11 The experimental clean tube system.

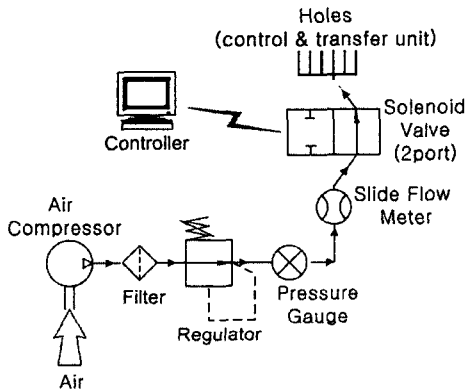


Fig. 12 The schematic diagram of air flow.

하게 된다. 웨이퍼의 안정적인 운동과 제어를 위해서는 일정한 기체압력과 유량을 필요로 하게 되고 더불어 클린튜브 특성상 고청정의 기체를 요구하게 된다. 실험과 제어는 최적의 압력과 유량을 설정한 상태에서 실제제어는 2포트 솔레노이드 밸브를 통해 이루어진다.

우선 부상유체에 의한 복원력을 제어유닛 위의 웨이퍼의 위치에 따라 압축력을 측정하였다. 웨이퍼의 위치뿐만 아니라 제어유닛의 부상유체의 챔버압력도 변화시켜 실험하였다.

전체적으로 Fig. 13에서 알 수 있듯이 챔버압이 커질수록 복원력이 커지고 웨이퍼가 중심에서 벗어날수록 복원력은 선형적으로 증가한다. 웨이퍼가 유닛의 중심을 이탈할수록 좌우힘의 균형이 깨지고 중심을 벗어날수록 반대방향의 힘이 줄어들기 때문에 복원력의 증가는 쉽게 알 수 있다. Fig. 2와 비교하여 보면 왼쪽 반면을 나타낸다. 즉, 웨이퍼를 제어유닛의 중심에서 왼쪽으로 이

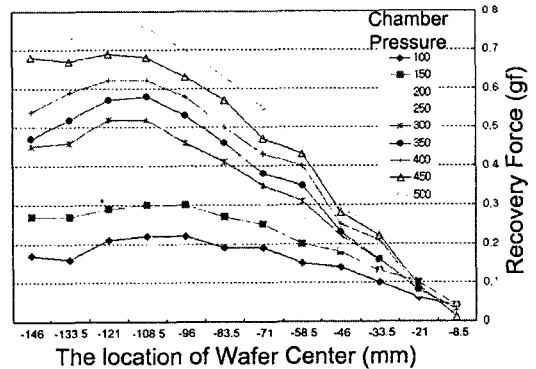


Fig. 13 The recovering forces along the wafer's motion.

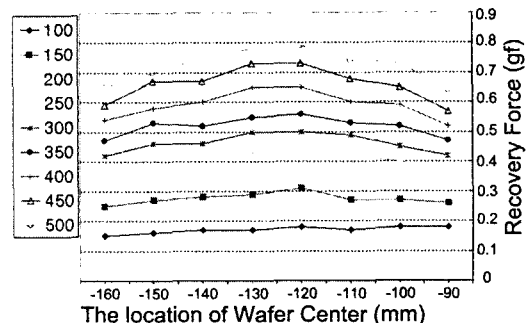


Fig. 14 The peak values of recovering force in detail.

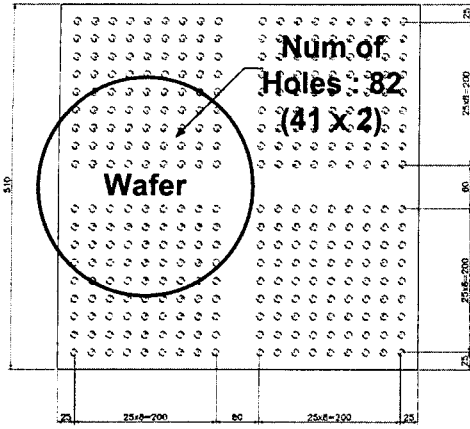


Fig. 15 The wafer location of maximum recovering force.

동시켰을 때 복원력의 분포이다. 복원력이 최대가 되는 부분을 따로 나타내면 Fig. 14와 같다.

그러나 Fig. 13의 웨이퍼 위치는 Fig. 2의 위치와 차이를 보이는데, 이는 Fig. 15와 같이 부상노즐들이 유닛의 가운데 십자방향에 존재하지 않기 때문이다. Fig. 16은 부상된 웨이퍼의 자유 진동폭을 매 주기마다 측정한 것으로 일반적인 질량-스프링-댐퍼 시스템의 거동을 나타낸다.

웨이퍼가 한번 주기운동하는 동안 감소하는 진폭은 대략 9%이고, 이때의 운동주기는 대략 10 초였다. 실험으로 확인결과 100~500(mm of water)의 부상압력에서 식(2)에서의 감쇠상수(Damping ratio ζ)가 0.0463~0.0236으로 확인되었다. 감쇠상수(ζ) < 1인 경우로 Underdamped Free vibration 운동을 하고 이러한 운동은 트래커와 웨이퍼 사이의 마찰계수가 작기 때문에 지속적으로 감소하는 폭은 작으나 웨이퍼의 불안정한 운동이 증폭되지 않고 감소하는 것으로 큰 의미를 가진다.

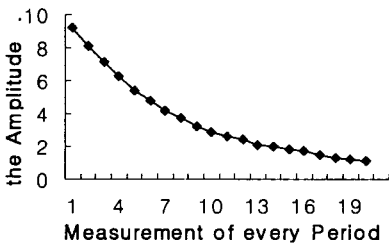


Fig. 16 The exponential decay in amplitude of wafer motion.

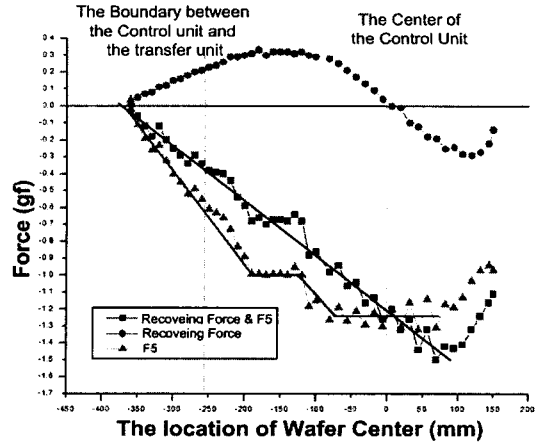


Fig. 17 The distribution of the propelling and the recovering forces.

Fig. 17은 부상유체에 의한 복원력과 추진력(F5)을 동시에 작용시켰을 때 합력과 각각의 힘의 분포를 나타낸다. 여기서 복원력을 따로 살펴보면 Fig. 18에서 보듯이 Fig. 2의 복원력 모델과 일치한다. 이론적인 복원력의 분포와 실험결과가 매우 근접한 양상을 보인다.

Fig. 17의 추진력에서도 Fig. 8의 최대값 μ 가 존재하는데 실험장비의 추진노즐이 유닛의 외곽에 존재하지 않기 때문에 Fig. 17의 최대값 범위가 Fig. 8의 범위보다 작다. 그리고 Fig. 17에는 추진력이 일정한 또 다른 범위가 존재하는데 이는 유닛의 중앙에 노즐이 분포하지 않기 때문이다.

앞서 제안한 제어 알고리즘을 적용하기 위해서는 웨이퍼가 유닛에 진입할 때의 속도를 측정해야 한다. 그러나 속도센서는 고가인데다 공정의 적용이 쉽지 않기 때문에 Fig. 19와 같이 이송유닛에 등간격으로 위치센서를 설치하고 두 센서간의 시간과 거리로 속도를 측정한다.

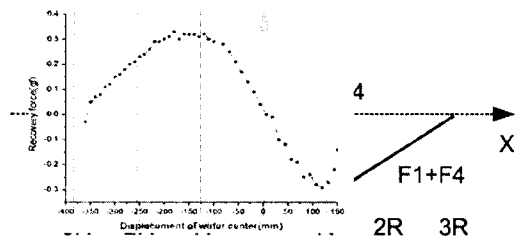


Fig. 18 The theoretic and the experimental recovering forces.

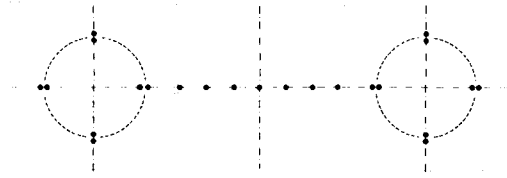


Fig. 19 The sensor layout.

4. 결 론

본 논문에서는 클린튜브 시스템의 동역학 모델을 제안하였다. 복원력이 선형 스프링으로 작용되고 점성마찰이 더해져서 질량-스프링-댐퍼 시스템으로 모델링할 수 있었고 실험을 통해 확인하였다. 추진력 역시 웨이퍼의 위치에 따라 선형적임을 확인하였다.

또 웨이퍼를 출발 또는 정지시키는 제어방법을 제안하였다. 우선 웨이퍼를 출발시키기 위한 최소한의 추진력이 $1.5KR$ 이상이 됨을 확인하고, 웨이퍼의 정지를 위해 추진력이 작용해야 하는 위치를 계산하였다. 제어의 효율을 위해 추진력의 작용위치를 작용시점으로 계산하는 방법을 제안하였다.

후 기

이 논문은 2003년도 서울시립대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Tadashiro Ohmi, 1989, Future trends and application of ultra clean technology, Inter-

national Electron Devices Meeting, Washing, D.C., pp. 49-52.

2. Paivanas, J. A. and Hanssan, J. K., 1978, U.S. Patent 4,081,201.
3. Paivanas, J. A. and Hanssan, J. K., 1979, Air film system for handling semiconductor wafers, IBM Journal Research and Development, 23, pp. 361-375.
4. Babinski, J. P., Bertelsen, B. I., Raacke, K. H., Sirgo, V. H. and Townsend, C. J., 1976, U.S. Patent 3,976,330.
5. Gross, W. A., 1962, Gas Film Lubrication, John Wiley & Sons, Inc., NewYork.
6. Jackson, J. D. and Symmons, G. R., 1965, Appl. Sci. Res., A 15, pp. 59-75.
7. Toda, M., Shishido, M., Kanno, Y., Umeda, M., Nitta, T. and Ohmi, T., 1992, Wafer transportation through a tunnel filled with nitrogen gas, ICCCS, pp. 173-183.
8. Toda, M., Ohmi, T., Onoda, T., Umeda, M. and Kanno, Y., 1999, U.S. Patent 5,921,1744, 1999.
9. Toda, M., Ohmi, T., Nitta, T., Saito, Y., Kanno, Y., Umeda, M., Yagai, M. and Kikokoro, H., 1997, N2 tunnel wafer transport system, Journal of the IES, pp. 493-498.
10. Okano, M. and Togo, S., 1975, Static Performance of Externally Pressurized Porous Gas Bearings, Junkatsu, vol.20, pp. 53-60.
11. Singiresu, S. RAO, 1995, MECHANICAL VIBRATIONS, Third ed., Addison-Wesley, pp. 128-146.