

클린튜브 시스템의 웨이퍼 정지 제어

신동현*(서울시립대 기계정보공학과), 최철환(서울시립대 기계정보공학과)

Wafer Motion Control of a Clean Tube System

D. H. Shin(Mechanical. Eng. Dept., UOS), C. H. Choi(Mechanical Eng. Dept., UOS)

ABSTRACT

This paper presents a force model of the clean tube system, which was developed as a means for transferring the air-floated wafers inside the closed tube filled with the super clean air. The recovering force from the holes for floating wafers is modeled as a linear spring and thus the wafer 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 the control method to emit and stop a wafer at the center of a control unit. It shows 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 a wafer arrives at the position to activate the propelling force. Experiments with the clean tube system built for 12 inch wafer shows the validity of the proposed model and the algorithm.

Key Words Clean tube system, force modeling, control algorithm.

1. 서론

현재의 반도체공장은 3 층의 구조로 1,3 층은 청정상태유지를 위한 시설이고 2 층이 실질적인 생산공정이 이루어지는 클린룸이다. 이와 같은 클린룸 방식은 전체 공장 설립비용의 1/4~1/3 이 오염방지 시설에 투입되고 있고, 반도체 회로의 고집적화와 이에 따른 회로선 폭의 미세화가 이루어지는 가까운 미래에는 보다 더 높은 청정환경이 요구되므로, 현재의 클린룸방식의 시스템으로는 경제적, 기술적으로 대처하기 힘들다. 그래서 웨이퍼의 이송을 초청화되고 밀폐된 튜브 안에서 이루어지게 하여 웨이퍼의 오염문제와 투자비용을 줄일 수 있는 클린 튜브 시스템이 제안되었다. 이송방식은 클린 튜브 내의 바닥에서 분사되는 공기에 의하여 웨이퍼가 부상되고, 또한 각도를 가지고 분사되는 공기의 마찰력에 의하여 웨이퍼가 추진되는 방식이다.

이미 클린튜브시스템은 1970 년대에 IBM 의 Paivnasa 와 Hanssan 이 처음 공기부양의 기본적인 방식을 제안하고[1], 웨이퍼운동의 안정성을 위해 트랙상에 Channel 을 파서 개발하였으나 높은 운영비와 이송안정성의 어려움으로 실제공정에는 적용되지 않았다[2]. 1990 년대에는 일본의 Toda 등이 제

어유닛과 이송유닛으로 이루어진 클린튜브 시스템의 프로토타입을 제시함으로써 활발한 연구가 진행되었다[3,5]. 이들은 기체의 압력과 부상 높이의 관계와 웨이퍼와 트랙 사이의 압력분포를 계산하여 좀더 안정적인 웨이퍼의 운동을 보여주었다[4]. 지금까지 웨이퍼의 부상원리와 부상시 웨이퍼 안정성에 관한 연구결과는 많이 있으나 웨이퍼의 이송과정에서 일어나는 웨이퍼의 운동과 제어방법 등에 관한 연구내용은 발표된 바가 없다.

본 논문에서는 기존의 유체역학적 연구와는 다르게 웨이퍼의 이송과 관련하여 웨이퍼가 받는 힘과 거동을 동역학적 해석을 통하여 제어유닛이 mass-spring-damper 시스템으로 모델화되고 이를 이용한 부상된 웨이퍼의 안정적인 제어방법을 제시한다.

2. 모델링과 제어

클린튜브 시스템은 이송유닛과 제어유닛의 조합으로 이송유닛이 웨이퍼를 단순히 부상시키고 웨이퍼의 수평적 운동을 안정적으로 유지시키는데 반하여, 제어유닛은 웨이퍼를 출발 또는 정지하게 하고 웨이퍼의 운동 방향을 전환하는 등 여러가지 웨이

퍼의 제어기능을 수행한다. 제어유닛에는 웨이퍼의 부상을 위해 일정한 간격으로 기체분사 노즐들이 Fig. 1 과 같이 4 개 구역에 설치되어 있는데 각 구역의 노즐은 모두 유닛의 중심을 향하여 기울어져 있어서 웨이퍼가 중심을 벗어나지않게 하는 복원력으로 작용한다. 이 복원력은 다음의 가정으로 모델화할 수 있다.

- 유닛의 전체에 걸쳐 부상노즐이 분포한다.
- 노즐은 일정간격으로 매우 촘촘히 분포되어 연속적으로 존재한다.
- 노즐마다 분사되는 기체의 압력과 유량은 일정하다.

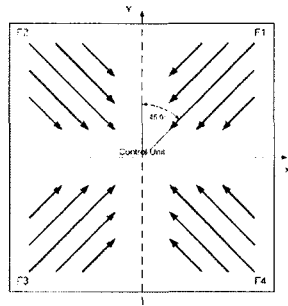


Fig. 1 The recovering force direction in the control unit.

Fig. 1 에서 각 방향의 복원력을 F1, F2, F3, F4 라하고 Fig. 2 와 같이 웨이퍼가 유닛의 왼쪽에서 진입한다고 하면 웨이퍼는 처음에 F2, F3 의 힘을 받고 유닛의 중심을 지나면서 F1, F4 의 힘을 받는다.

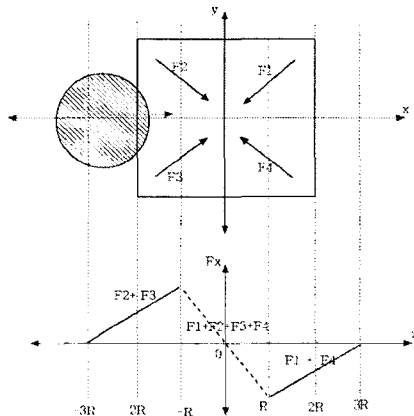


Fig. 2 The recovering force along the wafer motion.

웨이퍼의 중심위치 x 에 대해 Fig. 2 의 복원력 분포를 나타낼 수 있는데, 특히 $-3R < x < -R$ 에서는 웨이퍼가 제어유닛에 진입한 면적에 비례하여 복원력이 선형적으로 증가한다. 이것은 Fig. 3 의 웨이퍼의 면적변화식을 통해 확인이 가능하다.

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

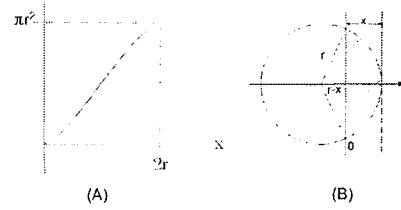


Fig. 3 Area of a wafer that goes in the control unit.

$-R < x < R$ 에서는 웨이퍼가 유닛의 중심을 지나면서 음의 x 방향으로 힘을 받기 때문에 복원력이 이전구간의 2 배의 기울기로 감소하고, $R < x < 3R$ 에서는 $-3R < x < -R$ 의 복원력과 방향만 다를뿐 크기는 같다.

웨이퍼가 이송중에 받는 복원력이 x 에 따라 선형적으로 작용할 뿐 아니라, 운동방향에 반대방향으로 점성마찰이 작용하기때문에 복원력에 의한 웨이퍼의 운동은 mass-spring-damper 시스템으로 식(2) 와 같이 나타낼 수 있다.

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

제어유닛에는 부상노즐이외에도 웨이퍼를 출발, 정지시키는 특별한 노즐을 있는데, Fig. 4 는 그 중에 추진력 F5, F6 를 나타낸다.

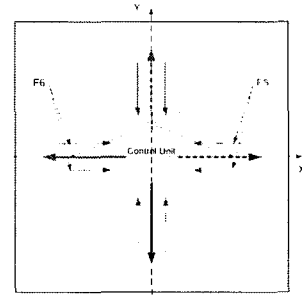


Fig. 4 Propelling forces to emit and stop a wafer.

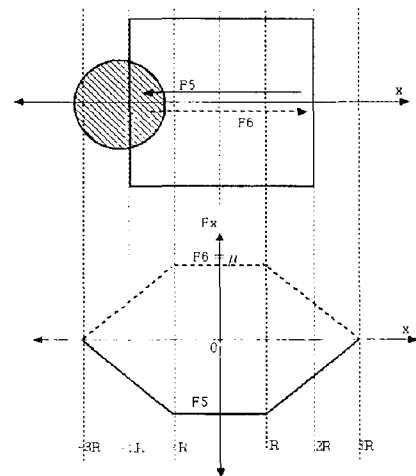


Fig. 5 The propelling forces along the wafer motion.

Fig. 5 와 같이 추진력 F5, F6 는 웨이퍼가 트랙의 중심선을 따라 이동하면서 선형적으로 나타나고 특히 $-R < x < R$ 에서는 웨이퍼 전체가 추진노즐에 포함되어 추진노즐의 증감이 없는 구간으로 최대값 μ 를 가진다.

웨이퍼의 출발 및 정지제어는 추진력의 작용 시점이 중요하다. Fig. 6 은 F6 가 작용하여 웨이퍼가 유닛의 양의 x 방향으로 출발할 때 받는 추진력과 복원력의 합력을 나타낸다.

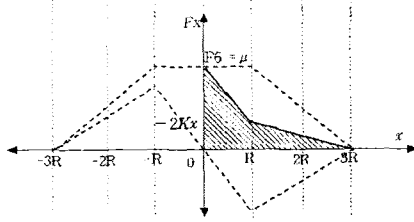


Fig. 6 The resultant force to the emitted wafer.

출발 후 $x = 3R$ 에서 웨이퍼의 운동에너지는 식(3)과 같다. 여기서 k 는 복원력의 변화율이다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int_0^R (\mu - 2Kx)dx + \int_R^{3R} (Kx - \frac{\mu}{2R}x - 3KR + \frac{3\mu}{2})dx \quad (3)$$

$$= -3KR^2 + 2\mu R$$

웨이퍼가 제어유닛을 벗어나기 위한 최소한의 추진력은 식(3)의 오른쪽 항이 0 보다 커야 하기 때문에 식(4)를 만족해야 한다.

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

웨이퍼의 정지도 출발과 같은 개념이며, 추진력을 이용한다. 웨이퍼가 유닛의 음의 x 방향으로 v_0 의 속도로 진입한다고 하면 Fig. 7 과 같은 힘을 받는다.

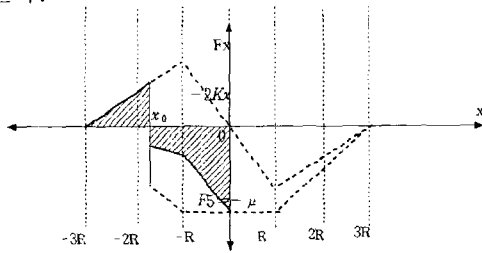


Fig. 7 The resultant force to stop a wafer.

웨이퍼를 정지시키기 위해서는 웨이퍼의 운동에너지를 추진력(F5)로 감소시켜 유닛의 중심에 이를 때 0 으로 만들어야 한다. 만일 x_0 위치에서부터 F5 를 작용시키면 $x = 0$ 에서 식(5)와 같은 에너지와 일의 평형을 가지고 이로부터 x_0 위치가 식(6)과 같이 계산된다.

$$0 = \frac{1}{2}mv_0^2 + \int_{3R}^{x_0} (Kx + 3KR)dx \quad (5)$$

$$+ \int_{x_0}^R (Kx - \frac{\mu}{2R}x + 3KR - \frac{3\mu}{2})dx + \int_R^0 (-\mu - 2Kx)dx$$

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

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 $F_x = Kx + 3KR$ 의 힘을 받는다. 이 구간의 마찰력을 무시하면 운동방정식은 식(7)이 되고 초기조건이 식(8)일 때 웨이퍼의 운동은 식(9)이 된다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} - Kx = 3KR \quad (7)$$

$$x(0) = -3R, \quad \frac{dx(0)}{dt} = v_0 \quad (8)$$

$$x(t) = \frac{v_0}{2w_n} (e^{w_n t} - e^{-w_n t}) - 3R \quad (9)$$

식(9)에서 x_0 에 오게 되는 시간 t_0 가 계산된다.

$$t_0 = \frac{1}{w_n} \log \left\{ \frac{w_n(x_0 + 3R)}{v_0} + \sqrt{\left(\frac{w_n(x_0 + 3R)}{v_0} \right)^2 + 1} \right\} \quad (10)$$

즉 웨이퍼의 정지는 우선 웨이퍼가 유닛에 진입 후 t_0 후에 F5 가 작용해야 하고, 웨이퍼가 정확히 중심에 도달할 때 F5 의 작용을 멈추어야 한다.

3. 실험

Fig. 8 은 2 개의 제어유닛과 1 개의 이송유닛으로 제작된 실험장비이다.

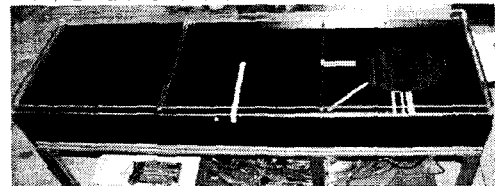


Fig. 8 The experimental clean tube system.

Fig. 9 는 부상된 웨이퍼의 자유진동의 진폭을 매주기마다 측정하는 것으로 일반적인 mass-spring-damper 시스템의 거동을 보인다.

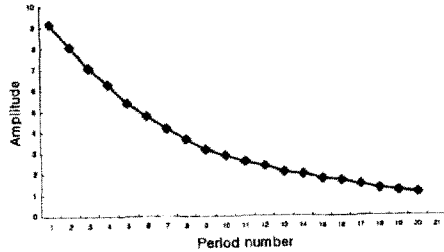


Fig. 9 The exponential decay of the wafer motion.

Fig. 10 은 부상유체에 위한 복원력과 추진력 (F5)을 동시에 작용시켰을 때 합력과 각각의 힘의 분포를 나타낸다. 여기서 복원력을 따로 살펴보면 웨이퍼가 유닛의 중심을 벗어날수록 복원력은 선형적으로 증가하고 Fig. 11 에서 보듯이 Fig. 2 의 복원력 모델이 실험과 일치한다.

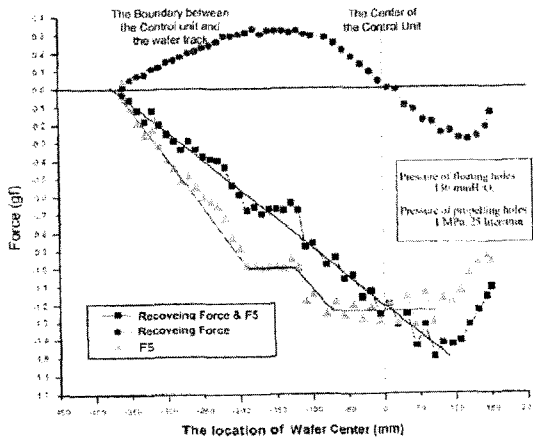


Fig. 10 The distribution of the propelling and the recovering forces.

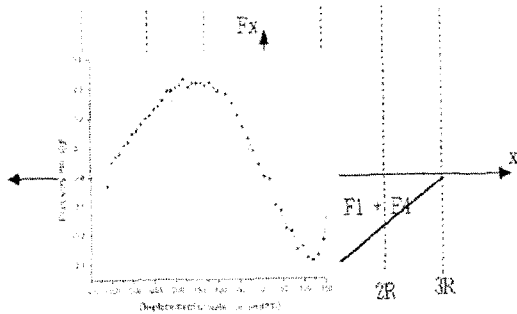


Fig. 11 The theoretic and the experimental recovering forces.

Fig. 10 의 추진력에서도 Fig. 5 의 최대값 μ 가 존재하는데 존재 범위가 실험장비의 추진노즐이 유닛의 외곽에 분포하지 않기 때문에 Fig. 10 의 최대값의 범위가 Fig. 5 의 것보다 작다. 그리고 Fig. 10 에는 추진력이 일정한 또 다른 범위가 존재하는데 이는

유닛의 중앙에 노즐이 분포하지 않기 때문이다.

앞서 제안한 제어알고리즘을 적용하기 위해서는 웨이퍼가 유닛에 진입할 때 속도를 측정해야 한다. 그러나 속도센서는 고가인데다 공정의 적용이 쉽지 않기 때문에 Fig. 12 과같이 이송유닛에 등간격으로 위치센서를 설치하여 두 센서 사이의 시간과 거리로 속도를 측정한다.

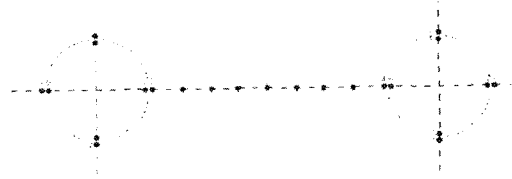


Fig. 16 The photo electric sensor locations.

4. 결론

본 논문에서는 클린튜브 시스템의 동역학 모델을 제안하였다. 복원력이 선형스프링으로 모델화되고 점성마찰이 더해져서 mass-spring-damper 시스템으로 모델화되고 이를 실험을 통하여 확인하였다. 추진력도 웨이퍼의 위치에 따라 선형적임을 확인하였다.

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

참고문헌

1. Paivanas, J. A. and Hanssan. J. K., U.S. Patent 4,081,201, 1978.
2. Paivanas, J. A. and Hanssan. J. K., "Air Film system for Handling Semiconductor wafers," IBM Journal research and development, 23, pp 361-375, 1979.
3. Masayuki Toda, M. Shishido, Y. Kanno, M. Umeda, T.Nitta and T. Ohmi, "Wafer transportation through a tunnel filled with nitrogen gas," ICCCS, pp 173-183, 1992.
4. Masayuki Toda, Tadahihiro Ohmi, Takahisa Nitta, Masaru Umeda, and etc., "N2 Tunnel Wafer Transport System," Journal of the IES(Institute of Environmental Sciences), pp 493-498, 1997.
5. Masayuki Toda, Tadahihiro Ohmi, Takashi Onoda, Masaru Umeda, Yoichi Kanno, U.S. Patent 5,921,174 1999.