한국정밀공학회지 제 21 권 제 3 호 (2004 년 3 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 3, March 2004.

클린 튜브 시스템 이송 유닛의 웨이퍼 운동 역학 모델링

신동헌#, 정규식*, 윤정용*

Wafer Motion Modeling of Transfer Unit in Clean Tube System

Dong Hun Shin#, Kyoo Sik Jeong* and Chung Yong Yun*

ABSTRACT

This paper presents wafer motion modeling of transfer unit in clean tube system, which was developed as a means for transferring the air-floated wafers inside the closed tube filled with the super clean airs. When the wafer is transferred in x direction with an initial velocity the motion along x direction can be modeled as a simple decaying motion due to viscous friction of the fluid. But, the motion in y direction is modeled as a mass-spring-damper system where the recovering force by air jets issued from the perforated is modeled as a linear spring. Experiments with a clean tube system built for 12 wafer show the validity of the presented force and motion models.

Key Words : clean tube system (클린 튜브 시스템), transfer unit (이송 유닛), wafer(웨이퍼), mass-spring-damper

1. 서론

현재 반도체 생산 공정은 클린룸 시스템 방식이다. 클린룸 시스템 방식은 3 층의 구조로 이루어져 있는데, 2 층만이 작업 공간이고, 1 층과 3 층은 2 층의 청정도를 유지하기 위한 시설들이다. 이런 시설들이 차지하는 비용이 전체 공장 설립 비용의 30%정도이다. 또한 클린룸 시스템방식은 2 층 전체의 청정도를 유지해야 하기 때문에 청정도 유지 비용으로 인한 경제적인 문제점도 안고 있다. 현재 반도체 시장에서는 급속도로 칩의 소형화, 고집적화를 요구하고 있다. 이런 요구사항이 만족하기 위해서는 현재보다 높은 청정도를 만족시켜야 한다. 이런 초청정 환경에서는 분진뿐만 아니라 화학오염에 의한 가스상의 유해물질도 수율에 미치는 매우 중요한 요소로 고려해야 한다. 이런한 생산 조건을 만족시키기 위해서는 클린룸의 청정도를 높일 수 밖에 없으며, 클린룸 설비의 품질이 미세한 오염제어 관점에서 고급화 될 수 밖에 없다. 이는 곧바로 클린룸 건설비와 운전비의 상승을 초래하고 나아가 반도체의 원가 상승, 타산성의 악화를 가져온다. 이런한 문제를 해결하기 위해 반도체 생산을 휘한 기본적인 인프라인 클린룸의 대한 변화가 요구되고 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위해서 클린튜브 시스템이 등장하게 되었다.

클린튜브 시스템이란 공기 부양 및 공기 마찰에 의한 추진방식이다. 트랙의 바닥으로부터 분사

접수일:2003 년 9 월 12 일; 게재승인일: 2004 년 1 월 9 일
교신저자: 서울시립대학교 기계정보공학과
Email shin@uos.ac.kr Tel. (02) 2210-2542
* 서울시립대학교 기계정보공학과

되는 기체에 의하여 웨이퍼를 부상된 상태로 트랙 위를 이동하는 것이다. 웨이퍼의 운동과 제어는 트랙의 바닥에서 분사되는 기체에 의하여 웨이퍼가 부상된 상태에서 이루어지므로 트랙과의 직접적인 접촉 없이 이송할 수 있다. 따라서 웨이퍼와 기체를 외부의 환경으로부터 안전하게 보호할 수 있어 웨이퍼의 오염 문제에 쉽게 대처 할 수 있다.

이미 클린튜브 시스템은 1970 년대에 IBM 에서 개발된 바 있다.[1] 그러나 시스템의 높은 운영비와 부상한 웨이퍼의 안정한 이송 및 위치 제어의 어려움으로 어떠한 생산 제조 공정에도 채택되지 못했다. 1990 년대에는 일본의 Toda 등에 의해 웨이퍼의 출발과 정지를 제어하는 제어유닛과 제어유닛 사이의 경로인 이송유닛으로 이루어진 클린튜브 시스템[2~3]을 제시하고 웨이퍼 밑의 압력변화와 유량의 변화에 따른 웨이퍼의 수직적 운동에 대해서 연구가 되었다.

지금까지 웨이퍼의 부상원리와 부상시 웨이퍼 안정성에 관한 연구결과[4~8]는 많이 있으나 웨이퍼의 이송시 웨이퍼의 수평운동에 대한 연구내용은 발표된 바 없다.

본 논문에서는 클린튜브 시스템의 기본구조인 제어유닛과 이송유닛중 이송유닛에 작용하는 힘의 크기와 성질을 밝히고 이를 웨이퍼의 수평운동에 적용하여 동역학적 모델을 제기하고 이를 실험을 통하여 비교하여 본다.

2. 웨이퍼의 y 방향 운동 모델링

2.1 웨이퍼에 작용하는 힘

이송유닛에는 기체분사노즐들이 유닛 바닥의 전 면적에 일정한 간격으로 고르게 분포되어 있다.

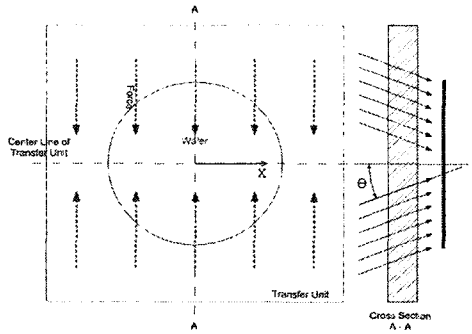

Fig. 1 Wafer Transfer unit

이러한 분사노즐들은 Fig. 1 에서와 같이 웨이퍼가 통과하게 되는 트랙의 중심선을 향하여 일정하게 각(θ)만큼 기울어져 설치되어있다. 이러한 경우 한 노즐에서의 기체분사에 의한 웨이퍼에 작용하는 수평력은 Toda 에 의하면 식 (1)과 같다.

$$F_0 = C_f \frac{1}{2} \frac{\rho q^2}{A} \sin\theta \tag{1}$$

2.2 근사적인 웨이퍼의 힘의 분포

Fig. 1 에서와 같이 트랙의 중심선을 따라 웨이퍼가 이송하는 방향은 x 축으로 하고 x 축에 수직하는 폭 방향을 y 축이라고 정한다. 또한 중심축에서 y 축 윗부분을 상반면이라고 하고 아랫부분은 하반면이라고 한다. 힘을 분포를 살펴보기 전에 다음의 가정을 한다.

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

웨이퍼가 x 축으로부터 y 방향으로 벗어나면 x 축으로부터의 y 방향 상반면과 하반면에서 웨이퍼에 작용하는 노즐의 숫자가 달라져서 힘의 크기가 달라진다. 이것은 x 축을 중심으로 한 웨이퍼의 상반면과 하반면에 위치하는 웨이퍼의 면적에 비례하여 상하방향으로 힘을 가하는 노즐 수가 변한다고 가정하여 근사적으로 힘의 변화를 구할 수가 있다. Fig. 2 에서와 같이 웨이퍼가 x 축에서 y 방향으로 이동하였을 때 넓이의 증가량은 식(2)와 같다. 여기서 r 은 웨이퍼의 반경을 나타낸다.

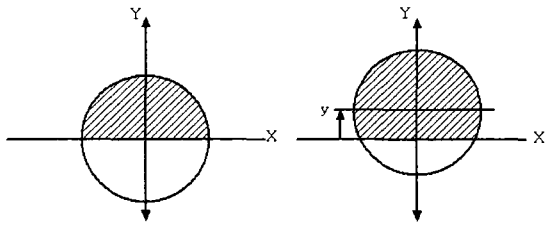

Fig. 2 Wafer that moves to y direction

$$S = \frac{\pi r^2}{2} - (r^2 \cos^{-1}(\frac{y}{r}) - ry\sin(\cos^{-1}(\frac{y}{r})) \quad (2)$$

이 면적은 Fig. 3 에서와 같이 거의 선형적으로 변하므로 웨이퍼에 작용하는 힘도 선형적으로 볼 수 있다.

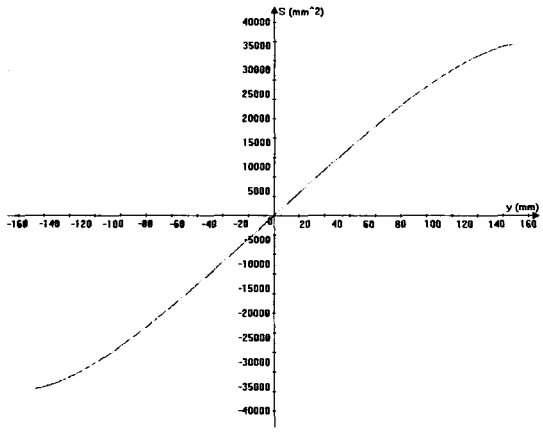

Fig. 3 Area change of wafer

2.3 이산적인 웨이퍼의 힘의 분포

앞 절에서 웨이퍼에 작용하는 y 방향 힘은 웨이퍼의 상하반면에 위치하는 면적으로 근사적으로 계산하였다. 그러나 실험모델에서 노즐의 설치간격은 25mm 이므로 식(2)와같이 수식으로 나타낼 수 없다. 따라서 실제 이산적인 웨이퍼에 작용하는 힘의 변화를 구하여본다.

먼저 Fig. 4 에서와 같이 몇 가지 기호들을 정의한다.

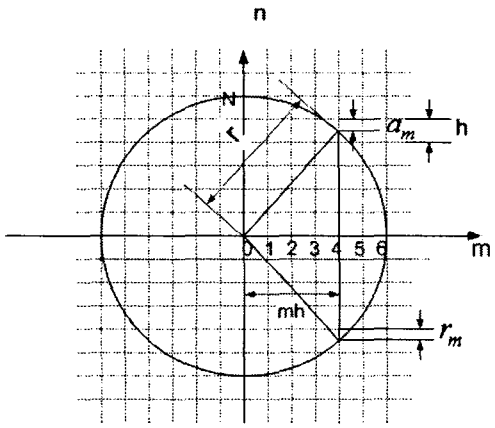

Fig. 4 Position of nozzle and definition of symbols

m 은 정수로 노즐들의 열을 표시한다. q_m 은 m 열에서 웨이퍼에 힘을 가하고 있는 노즐들의 수로 식(3)과 같고, q_m 으로 실제 웨이퍼에 작용하는 노즐 수를 세서 힘을 구할 수 있다.

$$q_m = [\sqrt{r^2 - (mh)^2}\,/h] \quad (3)$$

r_m 은 m 열에서 웨이퍼로부터 하나의 노즐이 벗어나게 될 때까지 웨이퍼가 이동하여야 할 거리로 식(4)와 같다.

$$r_m = \sqrt{r^2 - (mh)^2} - q_m h \quad (4)$$

a_m 은 m 번째 열에서 웨이퍼에 새로 하나의 노즐이 추가 될 때까지 웨이퍼가 이동 할 거리로써 식(5)와 같다.

$$a_m = h - q_m \quad (5)$$

Fig. 4 에서 점선이 교차하는 부분에 노즐들이 위치해 있다.

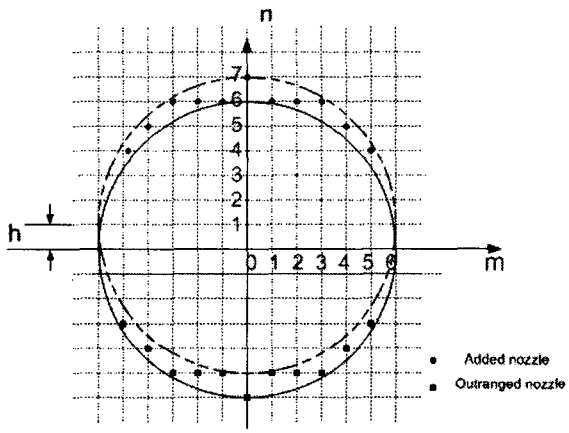

Fig. 5 Change of number of nozzle by transfer as h

Fig. 5 와 같이 웨이퍼가 중심선에서 h 만큼 y 방향으로 이동했을 경우 11 개의 노즐이 웨이퍼에 추가되고 11 개의 노즐이 웨이퍼에서 벗어나게 된다. 웨이퍼에 추가되는 노즐과 벗어나는 노즐은 상반면 힘을 추가하는 역할을 한다.

좀 더 미세하게 알아보기 위하여 실제로 a_m 과 r_m 의 위치를 직접 측정한 결과를 Table 1 에서 나

타내었다.

Table 1 Position of holes in experiment equipment

Row of nozzle	Position of removed nozzle	Position of added nozzle
m = 0	r_0 =0mm	a_0 =25mm
m = 1	r_1 =22.9mm	a_1 =2.1mm
m = 2	r_2 =16.4mm	a_2 =8.6mm
m = 3	r_3 =4.9mm	a_3 =20.1mm
m = 4	r_4 =11.8mm	a_4 =13.2mm
m = 5	r_5 =7.9mm	a_5 =17.1mm
m = 6	r_6 =25mm	a_6 =0mm

웨이퍼가 트랙의 중심점에서 y 방향으로 이동을 시작하여 a_1 (a_1 =2.1mm)의 위치에 이르면 노즐의 제 1 열에서 하나의 새로운 노즐이 웨이퍼에 추가된다. 다시 웨이퍼가 4.9mm 를 이동하면 r_3 의 위치가 되어 웨이퍼에 힘을 가하고 있던 노즐들 중 제 3 열에서 하나의 노즐이 웨이퍼로부터 벗어난다.

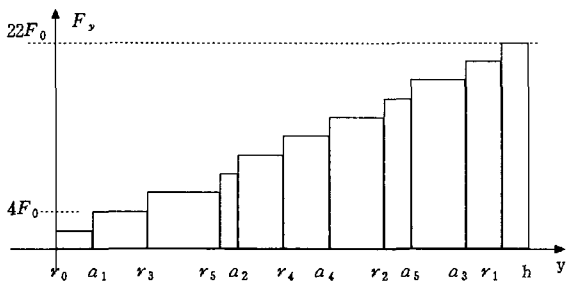

Fig. 6 Force change on the wafer, moving up to h

Fig. 6 은 웨이퍼가 a_m 또는 r_m 의 위치를 지날 때마다 노즐들이 추가 또는 탈락되므로 F_0 의 배수의 힘이 변하고 있다.

그런데 웨이퍼가 1h 로부터 2h 까지 이동할 때는 이 위치들은 h + a_m 과 h + r_m 이 되고, 2h 에서 3h 까지 이동하는 동안은 2h + a_m , 2h + r_m 과 같이 되어 이 위치들은 주기적으로 반복되어 나타나서 3h 까지는 일정하게 22 F_0 씩 증가를 한다.

그러나 웨이퍼가 3h 이상 이동하게 되면 이러한 힘의 변화는 약간 달라진다. 3h 에서 4h 까지 이동을 할 경우엔 Fig. 7 과 같이 5 열에 위치한 점이 노즐이 위치하지 않은 중심선에 있기때문에 이 위치에서 힘의 변화가 발생하지 않는다. 따라서 3h 에서 4h 까지 이동할 경우에는 좌우에 각각 5 열에서 힘의 변화가 생기지 않기 때문에 20 F_0 의 힘의 변화가 생긴다.

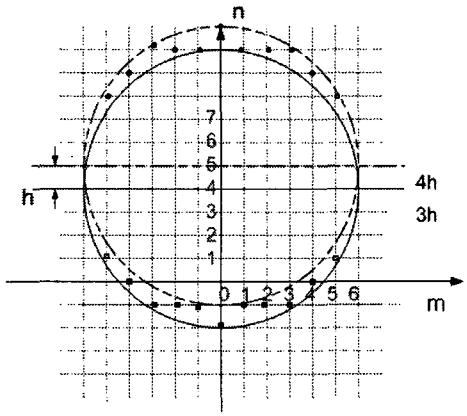

Fig. 7 The wafer that is moves from 3h to 4h

4h 에서 5h 까지 이동할 경우에는 4 열에서 벗어나는 점이 중심선에 위치하고 5 열에서는 벗어나는 점이 웨이퍼의 형상에 의해 상반면에 위치하므로 추가되는 힘이 제거가 되는 현상이 발생하기 때문에 16 F_0 의 힘이 증가한다. 5h 에서 6h 에서도 같은 이유로 힘의 변화가 생긴다. 그러나 이러한 h 구간 안에서의 미세한 변화가 주기함수와 일치하지는 않지만 전체적인 힘에서는 큰 변화가 없다.

Fig. 8 은 웨이퍼가 중심선에서 6h 까지 y 방향으로 이동하는 웨이퍼에 작용하는 힘의 변화를 나타내었다.

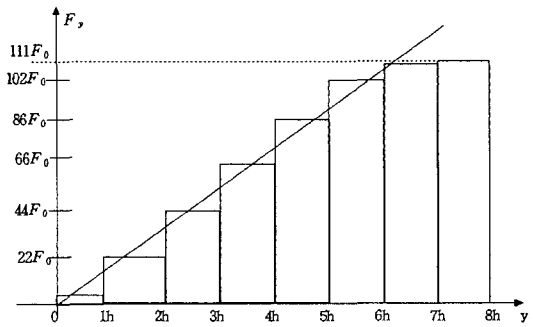

Fig. 8 Distribution of y direction force in transfer unit

실제 노즐수를 이용하여 알아본 이산적인 웨

이퍼의 힘의 분포도 근사적으로 알아 본 것과 같이 선형적으로 볼 수 있다. 따라서 다음절에서 y 방향 운동 모델링을 할 때 y 방향 힘을 y 방향 변위에 따라 일정하게 증가하는 선형 스프링으로 모델링이 가능하다.

2.4 y 방향 모델링

2.2 와 2.3 에서 알아본 바와 같이 웨이퍼에 작용하는 y 방향 힘은 웨이퍼의 y 방향 변위에 따라 일정하게 증가하는 선형 스프링과 유사하게 작용하고 있다. 이 때 웨이퍼의 y 방향 변위에 따라 증가하는 수평력의 증가율을 -K 라고 하고, 웨이퍼에 작용하는 마찰력은 웨이퍼 주위의 점성유체에 의한 것으로 이 때의 마찰을 점성 마찰로 가정하면 이송유닛 위에서 웨이퍼의 운동은 Fig. 9 와 같이 선형 스프링에 매달려 운동하는 질량 m 의 물체와 같이 모델링 할 수 있다. Newton 의 운동법칙으로부터 웨이퍼의 운동방정식은 식(6)과 같다.

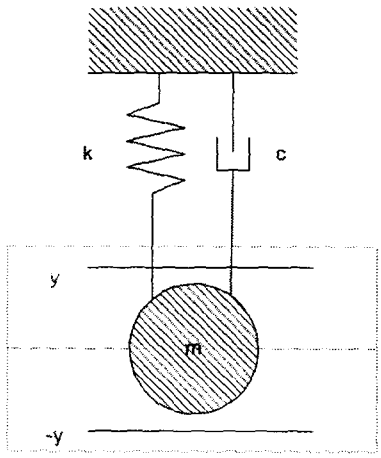

Fig. 9 Y direction exercise modelling of wafer

$$m\frac{d^2y}{dt^2}+c\frac{dy}{dt}+Ky=0 \qquad (6)$$

3. 웨이퍼의 x 방향 운동 모델링

이송유닛에서 노즐로부터 분사되는 공압에 의하여 웨이퍼의 x 방향에 작용하는 힘은 없다. 그러나 웨이퍼가 트랙을 따라 이송되는 동안 Fig. 10 에서 보여주는 것과 같은 마찰력이 작용하게 된다.

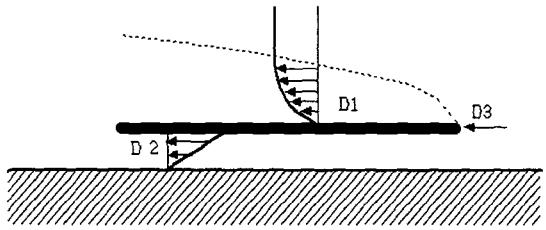

Fig. 10 Frictional force that acts to wafer

마찰력은 웨이퍼 주위의 점성유체에 의한 것이므로, 이 때의 마찰을 점성 마찰로 가정할 수 있으므로 Newton 의 운동법칙으로부터 식(7)과 같은 웨이퍼의 운동방정식을 얻을 수 있다.[8]

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+c_x\frac{dx}{dt}=0 \qquad (7)$$

4.실험

앞장에서 제시한 동역학적 모델링을 입증하기 위하여 클린 튜브시스템을 제작하였다. 아래의 그림과 같이 중심에 한 개의 이송 유닛과 그 좌우에 제어유닛으로 구성되어 있다. 실험 장치의 하단부에는 압축공기가 Air Compressor 를 거쳐 Regulator, Solenoid valve 등을 걸쳐 각 유닛의 노즐에 전달되는 장치들로 구성되어 있다.

Fig. 11 The experimental clean tube system.

각 유닛의 노즐에 전달되는 과정은 Fig. 12 와 같다. 각각의 노즐에 공급되는 압축공기는 2 포트 솔레노이트 밸브에 의해서 on-off 제어가 된다.

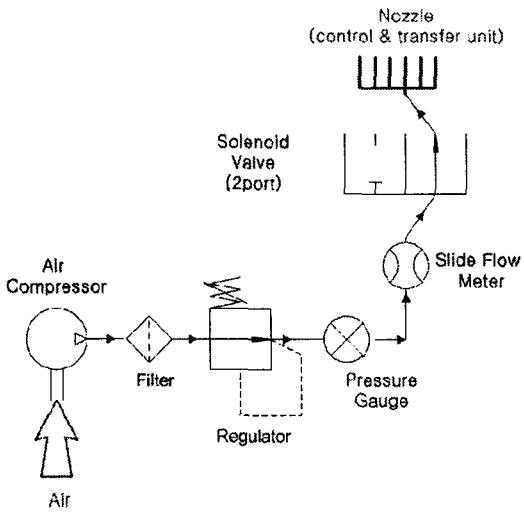

Fig. 12 Air inflow to nozzle

4.1 y 방향 실험

실험시 압축기에서의 공기는 유량이 25 *l* /min 이고 압력은 0.1 Mpa 이다. 실제 노즐로 공급된 공기의 압력은 1.961 Mpa (200mm of water) 로 레귤레이터에 의해서 조정된다.

4.1.1 y 방향 운동의 힘의 측정

y 방향으로 웨이퍼가 이동시 힘의 측정은 Fig.13 의 (a)와 같이 웨이퍼가 중심에 있을 때 웨이퍼의 윗부분에 로드셀을 설치한 후 압축공기를 오픈하고 정상 상태에 도달하였을 때 힘을 측정한다. 그 후, Fig. 13 의 (b)와 같이 웨이퍼를 일정 간격씩 이동하여 힘의 측정을 반복한다.

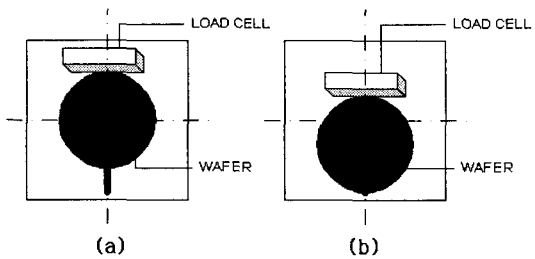

Fig. 13 Measurement of y direction force

Fig. 14 는 측정결과로 y 방향 힘이 y 방향 변위에 따라 일정하게 증가하는 선형 스프링으로 가정할 수 있음을 보여준다.

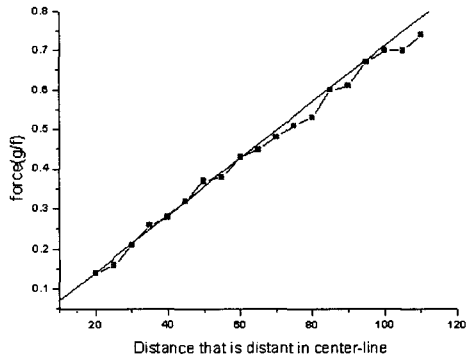

Fig. 14 change of force by y direction displacement

4.1.2 y 방향 운동의 진폭변화와 주기 측정

이송유닛 트랙은 가로, 세로 500mm 로 구성되어 있다. 웨이퍼의 y 방향 운동의 진폭 변화와 주기의 측정은 실험장비에서 허용된 웨이퍼의 최대 변위인 100mm 를 초기 조건으로하여 시작하고, 이후의 자유진동 모습을 캠코더를 촬영한다. 이 때 캠코더에 1/100 초까지 측정가능한 스탑워치가 보이도록 트랙위에 스탑워치를 설치한다.

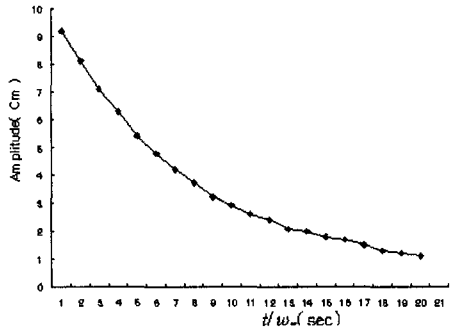

Fig. 15 Amplitude decrease of wafer motion

촬영한후 이것을 영상처리하여 웨이퍼의 진폭과 운동 주기를 관측하여 기록하였다. Fig. 15 는 일정주기에 따른 진폭변화 모습을 보여준다.

Fig. 15 와 같은 실험결과로 주기(T)와 감쇠비(ζ)를 구할 수 있다. y 방향 운동의 마찰계수(c)와 스프링 상수(k)는 식 (8)과 같이 구해진다.

$$T = \frac{2\pi}{w_d} \qquad w_d = \sqrt{1-\zeta^2}\, w_n$$

$$c_{cr} = 2\sqrt{km} = 2mw_n$$
$$k = \frac{c_{cr}^{\ 2}}{4m} \qquad c = c_{cr}\zeta \tag{8}$$

실험에서 웨이퍼의 질량 m=1.3*10^{-1} kg 이고, 감쇠비는 ζ =0.016 이고, 주기 T=8.2s 이므로 식(8)을 이용하면 c =3.2*10^{-3} kg/s 이고 k =7.6*10^{-2} N/m 으로 구해진다.

y 방향 운동을 모델링 한 식 (6)의 해는 식(9)와 같고,

$$y(t) = Y_0 e^{-\zeta w_n t}\sin(w_d t + \phi) \tag{9}$$

각 파라미터들을 식 (9)에 대입한 식(10)의 그래프는 Fig. 16 과 같다.

$$y(t) = 10 \times e^{(-0.016\times 0.07661t)}\sin(0.766t + 89) \tag{10}$$

Fig.16 에서처럼 파라미터들을 이용하여 그린 그래프와 실제 실험을 통하여 진폭을 측정하여 나타낸 것이 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

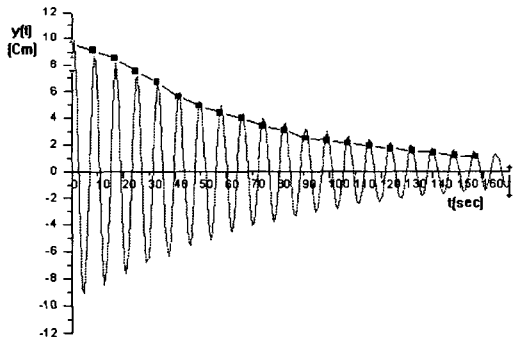

Fig. 16 Motion of y direction wafer

4.2 x 방향 실험

x 방향 운동을 모델링한 식(7)의 해에 초기조건 x(0)=0 과 $\dot{x}(0) = v_0$ 을 대입한 결과와 그 식을 미분한 것은 식(11)과 같다.

$$x(t) = \frac{m}{c_x}\dot{x}_0(1 - e^{-\frac{c_x}{m}t}) \qquad \dot{x}(t) = \dot{x}_0 e^{-\frac{c_x}{m}t} \tag{11}$$

식(7)에서 c_x 를 구하기 위해서는 식(11)에서와 같이 초기속도와 최종속도를 알면 c_x 를 구할 수 가 있다. 초기속도는 웨이퍼가 이송유닛에 완전히 진입하였을때의 속도로 하고 최종속도는 웨이퍼가 이송유닛에서 벗어날때의 속도로 정한다. 진입속도와 벗어날때의 속도측정을 위하여 제어유닛에서 출발한 웨이퍼가 이송유닛에 완전히 진입하는 순간부터 벗어날때까지를 캠코더로 촬영하여 영상처리한 후 매 프레임마다 위치와 시간을 측정하여 각 위치의 속도를 계산하였다. 계산 결과를 식(11)에 대입한 결과 x 방향 운동에서의 마찰계수 c_x =3.12 ×10^{-2} kg/s 가 나왔다. m 값과 c_x 에 의한 웨이퍼의 x(t)와 $\dot{x}$ (t)의 그래프는 Fig. 17 과 같다. x(t)는 실선으로 나타내었고 $\dot{x}$ (t)는 점선으로 나타내었다.

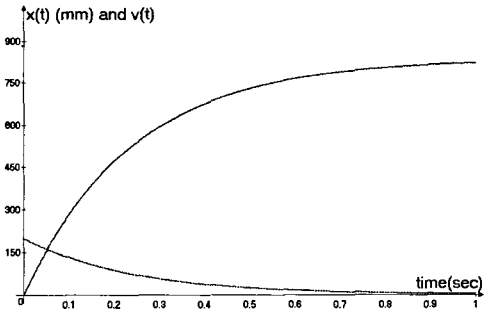

Fig. 17 Motion of x direction wafer.

x 방향에서 시간에 따라 속력이 감속하는 단순감쇠 운동이 나타나는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 클린 튜브 시스템의 이송유닛에서 웨이퍼의 수평방향 운동을 x 방향과 y 방향으로 나누어서 모델링 한 후 실험을 통해서 모델링과 실험 결과를 비교하였다. 웨이퍼에 이송방향에 수직인 y 방향 운동은 y 방향에 작용하는 힘을 선형 스프링으로 가정하고 점성 유체에 의한 마찰력은 점성 마찰로 가정하여 mass-spring-damper 로 모델링되었고, 이송방향에 x 방향 운동은 유체의 점성 마찰에 의해 단순감쇠운동으로 모델링 되었다. 한편, 실험을 통하여 제시된 동역학적 모델의 파라미터들을 구하였으며 결과를 이용해 구한 동역학적 모델에 의한 웨이퍼의 거동과 실험에 의해 관측된 거동과 일치하였다.

본 논문에서 제시된 mass-spring-damper 모델은

제어유닛에서 기본적 부상 운동에 사용될 수 있으며 클린 튜브 시스템의 기본적 거동을 이해하는데 중요한 기초를 제공한다.

참고문헌

1. Paivanas, J. A. and Hanssam. J. K., "Air Film System for Handling Semiconductor Wafers," IBM Journal research and development, Vol. 23, pp. 361-375, 1979.
2. Masayuki Toda, M. Shishido, Y. Kanno, M. Umeda, T.Nitta and T. Ohmi, "Wafer Transportation through a Tunnel filled Whit Nitrogen Gas," ICCCS, pp. 173-183, 1992.
3. Masayuki Toda, Tadahiro Ohmi, Takahisa Nitta, Yoshio Saito, Yoh-ichi Kanno, Masaru Umeda, Michio Yagai and Hajime Kidokoro., "N2 Tunnel Wafer Transport System," Journal of the IES(Institute of Environmental Sciences), pp. 493-498, 1997.
4. Tadahiro Ohmi, 1989, "Future Trands and Application of Ultra Clean Technology," Technical Digest, international Electron Device Meeting, Washington, D. C., pp. 49-52.
5. Okano, M. and Togo. S., "Static Performance of Externally Pressurized Porous Gas Bearings," Junkatsu, Vol. 20, pp. 53-60, 1975
6. Singiresu S. RAO, MECANICAL VIBRATI ONS, Third ed., Addison-Wesley, pp. 105,128-146, 1995
7. Paivanas, J. A. and Hanssam. J. K., U.S. Patent 4,081,201., 1978
8. Masayuki Toda, Tadahiro Ohmi, Takahisa Nitta, Yoshio Saito, Yoh-ichi Kanno, Masaru Umeda, Michio Yagai and Hajime Kidokoro., U.S. Patent 5,921,174., 1999