

자가 검출 방식을 이용한 정전 부상 시스템

Self-Sensing Electrostatic Suspension System

정 학 근, 최 창 환, 박 기 환

(Hak-Geun Jeong, Chang-Hwan Choi, and Kyi-Hwan Park)

Abstract : Electrostatic suspension offers an advantage of directly suspending various materials such as conductive materials, semiconductors and dielectric materials without any mechanical contacts. This is a specific feature compared with electromagnetic suspension which can suspend only ferro-magnetic material. In general, the electrostatic suspension systems require position sensors for stabilizing the suspended object. Therefore, a lot of displacement sensors and a switching circuit are required for moving the object through a long distance. In order to circumvent this problem, this paper proposes a self-sensing method which can provide the gap displacement between electrodes and suspended object without external sensors. Moreover a simple on-off controller is presented for stabilization. Experimental validation of the proposed scheme has been performed through the successful levitation of a 4-inch silicon wafer.

Keywords : industrial automation, electrostatic, levitation, self-sensing

I. 서론

물체를 비접촉으로 지지하고 이송하는 것은 기계적 접촉이 있는 경우에 문제가 되는 마찰이나 마모 문제를 해결하여 시스템의 효율을 높일 수 있고, 제품의 품질 향상을 위한 목적 등에 중요하게 요구되고 있다. 지금까지는 주로 자기력과 유체력 그리고 초음파력 등이 사용되어 왔다 [1][2]. 자기력은 그 힘은 크지만 자성체 외에는 힘을 작용할 수 없고, 유체력은 물질의 종류의 제한 없이 힘의 작용이 가능하지만, 청정 환경이나 진공 환경에서는 이용하기 어려운 문제점을, 초음파력은 힘이 극히 적은 결점을 가지고 있다. 반면에 정전기력은 물체의 전하를 대전시켜 그 대전된 전하들 사이에서 작용하는 힘을 이용하므로 도체나 실리콘 웨이퍼와 같은 반도체뿐만 아니라 유리 평판과 같은 유전체나 절연체 등 물체의 종류의 제한 없이 모든 물질에 힘을 줄 수 있고, 이러한 판상형의 저밀도 물체인 중량에 비해 그 표면적의 비율이 큰 물체에 대해서는 실용치수 크기의 대상체에도 충분한 부상력을 줄 수 있다.

정전 부상시스템은 다른 부상시스템과 마찬가지로 와전류형 센서, 광센서 등과 같은 변위 센서를 이용하여 측정된 부상체의 위치 정보를 이용하여 각 축의 작동기를 적절하게 제어함으로써 부상체를 안정하게 부상시킨다. 그러나 고가의 센서를 이용하는 기존의 비접촉식 장치의 경우 가격 면에서 경쟁력이 높지 못하기 때문에 실용화에 어려움이 있었다. Higuchi 등은 [3][4] 정전 부상 시스템이 여러 가지 재질에 적용 될 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 그러나 광변위 센서를 이용한 시스템이기 때문에 운송용 시스템에는 적합하지 않다. Kumar 등은 [5][6] 마이크로 모터나 액츄에이터의 회전자의 마찰을 줄이기 위해 정전 부상 시스템을 적용하였다.

본 논문에서는 가격의 결정에 결정적인 역할을 하는 센

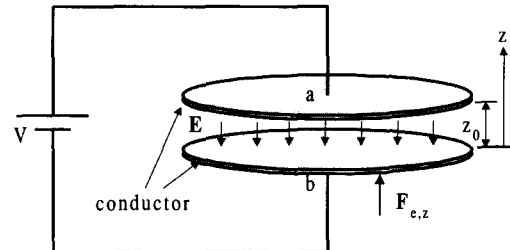


그림 1. 원형 평판 전극 사이의 흡인력.

Fig. 1. The electrostatic attractive force.

서 시스템이 간소화된 정전 부상시스템을 구현하고자 한다. 정전 부상계의 변위 검출은 정전 시스템의 상호 에너지 변환 원리와 간접 측정 방법을 이용하여 기존의 변위 센서를 대체할 수 있다. 정전 시스템을 전기 기계가 연성되어 있는 시스템으로 볼 경우 정전 시스템의 캐패시턴스는 변위에 따라 변하는 가변 캐패시턴스로 볼 수 있으므로 변위에 따라 회로에 흐르는 전류의 크기가 변하게 되므로 간접적으로 변위를 측정할 수 있게 된다. 그러나 지금까지 정전 시스템의 경우 자가 검출(self-sensing) 방법에 대한 연구가 거의 진행되지 않았고, MEMS 분야에서 Kumar 등이 [5][6] 제안한 LCR 공진 회로를 이용한 개루프 제어 방식 정도가 연구되었다. 이 정전 시스템은 가변 캐패시턴스와 외부 인덕턴스로 구성되는 시스템의 공진 주파수는 변위에 따라 변하게 되는데 회로의 가진 주파수가 이 공진 주파수 보다 클 경우 정전력은 복원력이 되어 정전 시스템을 페루프 제어 없이 안정하게 만든다. 그러나 이와 같은 개루프 시스템의 경우 댐핑이 아주 적은 시스템에서는 적용하기 어렵고, 반도체 웨이퍼와 같은 실용치수에 적용되기 위해서는 고가의 고주파수용 고전압 증폭기를 필요로 하는 단점을 갖는다. 그러므로 반도체 웨이퍼와 같은 실용치수 크기의 대상체를 비접촉 지지 운송할 수 있는 자가 검출 방식 정전 부상계의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 정전 부상 운송 시스템의 설계를 위해 먼

접수일자 : 1999. 9. 14., 수정완료 : 2000. 2. 24.

정학근 : 한국에너지기술연구소

최창환, 박기환 : 광주과학기술원

※ 본 논문은 교육부에서 지원하여 연구하였습니다.

저 정전력에 대한 기본적인 해석과 전극의 구조 및 전압의 인가 방법과 정전 부상시스템의 설계 지침을 마련하고, 3 자유도 시스템의 모델링에 대해서 언급한다. 그리고 전극과 부상체의 캐패시턴스는 거리에 관한 함수로 표현되는 사실에 착안하여 캐패시턴스의 변화를 측정하여 전극에 대한 부상체의 위치를 알아내는 자가 검출 방법에 대해 설명한다. 그리고 실제 반도체 제조 공정에 사용되고 있는 4 인치 웨이퍼의 실험을 통해 그 유용성을 증명한다.

II. 정전력 해석

그림 1에서 평행으로 배치된 두 원형 평판 도체에 전압을 인가할 경우에 도체판 사이에 작용하는 정전 흡인력이 생성된다. 위쪽의 전극은 $z=z_0$ 의 위치에 고정되어 있고, 아래쪽의 전극은 초기 위치, $z=0$ 에서 상하 방향으로 자유롭게 움직일 수 있게 되어 있다고 가정한다. 두 평판 a와 b사이의 전위차는

$$V = - \int_a^b E \cdot dl \tag{1}$$

이다. 여기서 E는 평판 전극 사이에 형성되는 전기장의 세기이다. 전극의 단면적이 전극간의 거리에 비해 훨씬 크다고 가정하면 전극의 양끝에서 누설 전계는 무시될 수 있고, 평판 사이의 전계, E는 수직한 방향의 성분만이 존재한다. 따라서 두 평판 전극에서의 전속 밀도, D는

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \tag{2}$$

와 같다. 여기서 ϵ_0 는 공기 중에서의 유전율이고 ϵ_r 는 비유전율이다. 전극에서는 전자의 증가나 감소가 없으므로 (1)에서 공기중의 전기장의 세기는 다음의 식과 같이 구해진다.

$$E = \frac{V}{z_0 - z} \tag{3}$$

여기서 z의 범위는 $-\infty < z < z_0$ 이다.

(2), (3)과 단위체적에서 발산되는 전기력선의 수는 전하밀도가 ρ_f 인 체적의 전표면(S)을 통하여 유출하는 양과 같다는 발산정리 (4)로부터 두 평판 전극 부상체 사이에 축적되는 전하량을 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\oint_S E \cdot nda = \oint_V \rho_f dV = q \tag{4}$$

$$q = \epsilon AE = \frac{\epsilon AV}{z_0 - z} = CV \tag{5}$$

여기서 E와 n은 전기장의 세기와 표면 S의 미소면적 da의 수직벡터 성분을 나타내고 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 이다. A는 원형 전극의 면적이고, 인가된 전압과 축적되는 전하량의 비를 캐패시턴스(capacitance), C라 정의된다. 캐패시턴스는 (5)에서 보는 바와 같이 두 전극 사이의 거리에 관한 함수이다. 그리고 전극에 전압, V가 인가될 때 평판 캐패시턴스에 저장되는 정전 에너지, U는

$$U = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{z_0 - z} V^2 \tag{6}$$

와 같다. 여기서 가상 변위의 원리를 적용하면 정전 흡인력을 구할 수 있다.

$$F_e = - \nabla U \tag{7}$$

(6)을 (7)에 대입하면 정전 흡인력은

$$F_{ez} = - \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{(z_0 - z)^2} V^2 \tag{8}$$

와 같다. 이 식으로부터 정전 흡인력은 도체판간의 거리의 제곱으로 반비례하고, 도체판 사이의 전위차의 제곱으로 비례하는 것을 알 수 있다. 정전 흡인력의 도체간의 거리 z에 대한 변화율을 구하면 (9)와 같다.

$$\frac{\partial F_{ez}}{\partial z} = \frac{\epsilon A}{(z_0 - z)^3} V^2 > 0 \tag{9}$$

위 식은 전극에 인가되는 전압이 일정할 때 아래쪽의 부상 전극이 양의 방향으로 접근하게 되면 부상력은 증가하고, 부상 전극이 음의 방향으로 멀어지게 되면 부상력은 감소하게 되는 관계를 나타내므로 정전 부상 시스템은 개루프적으로는 불안정한 움직임을 나타내는 것을 알 수 있다.

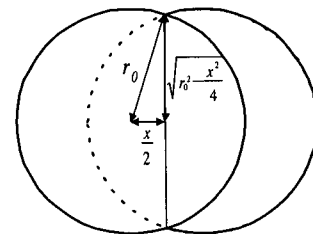
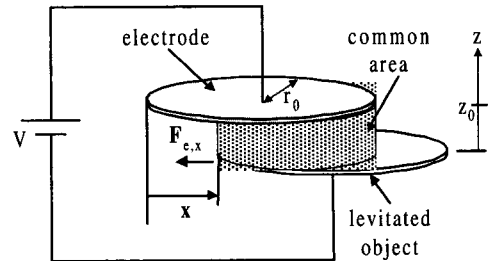


그림 2. 원형 평판 전극 사이의 정전 복원력. Fig. 2. The electrostatic restoring force.

그림 2에서 위 전극은 그림 1에서와 같이 고정되어 있지만 아래쪽은 평면 방향으로 자유롭게 움직일 수 있다고 가정한다. 복원력은 (8)의 정전 흡인력을 구하는 것과 같이 (7)을 사용하여 구할 수 있다.

$$F_{ex} = - \frac{\partial U}{\partial x} \tag{10}$$

고정된 전극과 부상체와 겹치는 부분의 면적이 전극 사이의 간격에 비해 충분히 큰 경우, 대부분의 전하는 고정된 전극과 부상체가 겹치는 부분에 존재한다. 그래서 전계는 그림 2에 나타내는 바와 같이, 공통된 면적 내에서만 존재하고 또한 그 크기는 일정하다고 가정할 수 있다. 그러면 고정된 전극과 부상체간의 캐패시턴스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C(x) = \frac{\epsilon A_{com}}{z_0} \quad (11)$$

여기서 z_0 는 전극과 부상체 사이의 간격이며, A_{com} 은 전극과 부상체와의 공통된 면적을 나타내며, 그 크기는 (12)와 같다.

$$A_{com} = 2r_0^2 \cos^{-1}\left(\frac{x}{2r_0}\right) - x\sqrt{r_0^2 - \frac{x^2}{4}} \quad (12)$$

여기서 r_0 는 부상체의 반경이다. 위 식들로부터 복원력 F_{ex} 는 (13)가 된다.

$$F_{ex} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon V^2}{z_0} \frac{\partial A_{com}}{\partial x} = -\frac{\epsilon V^2}{z_0} \sqrt{r_0^2 - \frac{x^2}{4}} \quad (13)$$

(13)에서부터 정전 복원력은 인가 전압, V 의 제곱으로 비례하고, 전극간 거리, z_0 에 반비례한다. 그것에 비해 (8)을 보면 부상 방향에서의 정전 흡인력은 인가 전압, V 의 제곱에 비례하고, 전극간 거리, z_0 의 제곱에 반비례한다. 즉 부상 간격 z_0 를 k 배 크게 한 경우에 대해서 생각해 보자. 그 경우, 부상 방향에 있어서 같은 정전 흡인력을 얻기 위해서는 인가 전압 또한 k 배가 필요하다. 그러므로 인가 전압과 부상 간격을 동시에 k 배 크게 하면 부상 방향에서의 정전 흡인력은 변하지 않지만, (13)으로부터 부상체의 횡방향에서의 복원력은 k 배 커진다. 이러한 이유로 정전 부상계에서는 부상 간격을 줄이는 것보다 인가 전압을 크게 설계하는 것이 유리하지만 너무 큰 전압이 인가되면 부상체와 전극사이에서의 절연과 파괴가 발생하므로 이러한 점을 고려하여 적절한 인가전압과 부상간격을 결정한다.

III. 정전 부상계의 설계

정전 부상시스템의 정전력은 고정자 전극과 부상체 사이의 전압과 그것들 사이의 거리의 함수이고, 따라서 정전 부상계에서는 고정자 전극과 부상체 간의 간극에 기초해 고정자 전극에의 인가 전압을 능동적으로 제어하여 부상체의 운동을 안정화한다. 각각의 전극들에 의해 부상체에 작용하는 정전력은 부상체의 전위에 관계하기 때문에, 부상체의 전위에 의해 각 자유도 운동의 사이에 간섭이 생기므로 부상계의 모델링이나 안정화 제어 방법이 복잡하게 된다. 이것을 막기 위해서는 부상체의 전위를 영전위 ($0V$)를 유지하는 것이 좋고, 그것은 정전 부상 시스템을 설계할 때의 하나의 중요한 설계 방침이 된다. 그리고 부상체에의 먼지 흡착 방지 등의 관점에서 부상체의 전위를 영

전위에 유지하는 것은 중요하다. 이 설계 방침에 따라서 고정자 전극의 구조와 제어를 설계한다.

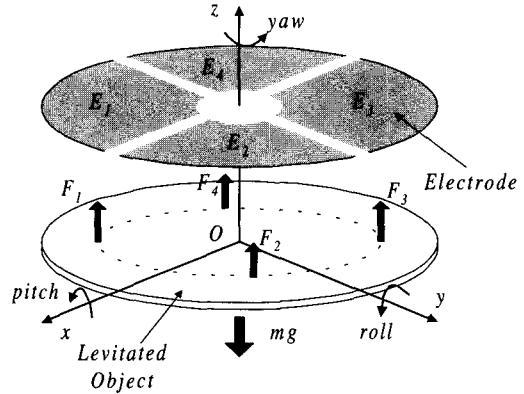


그림 3. 정전 부상계의 좌표계.

Fig. 3. Definition of the coordinate of the levitation system.

1. 정전 부상계의 모델링

4전극 독립 제어형 전극을 사용해 도체 혹은 반도체로 이루어지는 물체의 정전 부상을 할 때의 부상계의 설계에 대해서 설명한다. 전극은 그림 3에 나타내는 바와 같이, 원을 4 등분한 형태이다. 4개의 전극 E_j 에서 E_j 는 그 형태나 면적이 같다. 각각의 전극은 사실은 전 절에서 설명한 1 자유도 전극의 최적 형태인 2개로 나뉘어져 있지만 편의를 위해 단일 전극으로 해석한다. 그림 3은 정전 부상시스템의 좌표계와 기호의 정의, 부상체에 작용하는 정전력 등을 나타내는 부상시스템의 모델이다. 기준 좌표계로서, 평형 상태에서의 부상체의 중심 위치를 원점으로 하여 부상체의 중심축이 z 축과 일치하는 바와 같이 공간에 고정된 좌표계 $O-xyz$ 를 정한다. 각 전극과 부상체 간에 작용하는 정전력은 분포력이나 각 전극의 면적 중심에서 작용하는 집중력으로 가정한다. 또 각 전극은 같은 평면상에 위치하며,

표 1. 좌표계와 운동 방정식의 기호.

Table 1. List of symbols in coordinate system.

Symbol	Description
m	부상체 질량
J_x, J_y	x 축 and y 축으로의 관성 모우먼트 $J_x = J_y = mr_0^2/4$
x, y, z	부상체 중심의 위치 좌표
θ_x, θ_y	부상체의 x 축과 y 축의 회전 위치 좌표
r_0	부상체의 반경
r_a	부상체의 중심에서 정전력 작용점까지의 거리
F_j	전극 j 에서 생성된 정전력 ($j=1,2,3,4$)
F_x, F_y	x 축과 y 축 방향의 복원력
$F_{d\alpha}$	댐핑력 ($\alpha=z, \theta_x, \theta_y$)
$F_{e\theta}$	중력을 포함한 외력 ($x, y, z, \theta_x, \theta_y$)

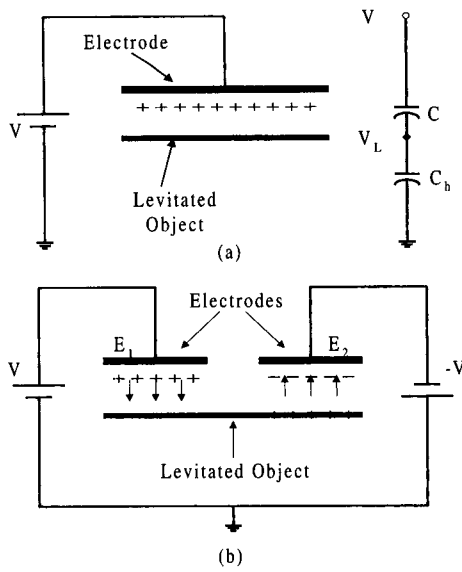


그림 4. 정전 부상계의 전극 구조.
Fig. 4. Model of the electrode.

부상체는 강체로 취급하고, 그 변위와 각속도의 곱은 무시할 수 있을 정도로 적다고 가정한다. 이상으로부터 오일러의 운동 방정식을 이용하여 부상체의 운동 방정식을 구한다.

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} &= F_x + F_{ex} \\
 m\ddot{y} &= F_y + F_{ey} \\
 m\ddot{z} &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_{dz} + F_{ez} \\
 J_x\ddot{\theta}_x &= \frac{r_a}{\sqrt{2}}(F_1 + F_2 - F_3 - F_4) + F_{dx} + F_{ex} \\
 J_y\ddot{\theta}_y &= \frac{r_a}{\sqrt{2}}(-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) + F_{dy} + F_{ey}
 \end{aligned} \tag{14}$$

그림 3과 (14)에서 사용된 기호들은 표 1에 정리하였다. (14)의 부상시스템의 운동 방정식은 비선형 특성을 나타낸다. 여기서 (14)을 간략화하기 위해 정전 부상시스템에 작용하는 댐핑력은 고려하지 않는다. 그리고 부상체의 수평면 내에서의 운동은 2장에서 설명한 정전 복원력에 의해 수동적으로 안정화되므로 x축과 y축 방향의 운동을 고려하지 않기로 한다. 그러면 (14)로부터 부상체의 z축, θ_x , θ_y 방향에 대해서만 고려하면 운동 방정식은

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{T}_a \mathbf{F} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{F}_e \tag{15}$$

와 같이 표현된다. 여기에서 부상체의 위치 벡터를 \mathbf{r} , 정전력 벡터를 \mathbf{F} , 부상시스템에 작용하는 외력은 중력만으로 하는 외력 벡터를 \mathbf{F}_e 로 각각 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{r}} &= [\dot{z} \ \dot{\theta}_x \ \dot{\theta}_y]^T \\
 \mathbf{F} &= [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T \\
 \mathbf{F}_e &= [mg \ 0 \ 0]^T
 \end{aligned} \tag{16}$$

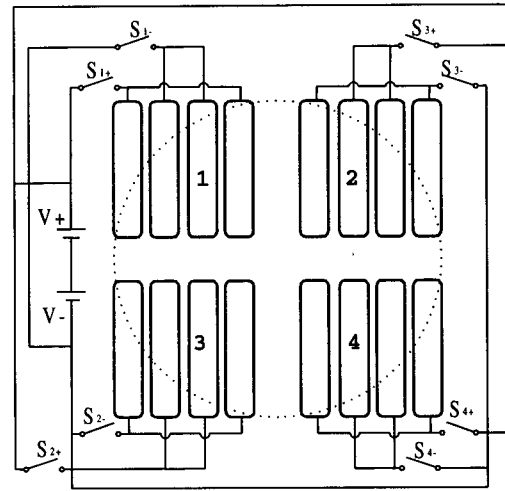


그림 5. 전극의 전압 인가 방법.
Fig. 5. Applying voltage to each electrode.

\mathbf{M} 와 \mathbf{T}_a 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & J_x & 0 \\ 0 & 0 & J_y \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{T}_a &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ r_a & r_a & -r_a & -r_a \\ -r_a & r_a & r_a & -r_a \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{17}$$

만약 \mathbf{r} , \mathbf{F} , \mathbf{F}_e 를 평형 상태에서의 미소 변위로 표현하면

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \delta\mathbf{r}, \mathbf{F} = \mathbf{F}_0 + \delta\mathbf{F}, \mathbf{F}_e = \mathbf{F}_{e0} + \delta\mathbf{F}_e \tag{18}$$

여기서 \mathbf{r}_0 와 $\delta\mathbf{r}$ 은 평형 상태에서의 각각의 전극과 부상체의 위치와 그 변화량을 나타내는 벡터이다. 또 \mathbf{F}_0 와 \mathbf{F}_{e0} 는 평형 상태에서의 정전력과 외력의 값의 벡터이고, $\delta\mathbf{F}$ 와 $\delta\mathbf{F}_e$ 는 기준값에서의 변화량의 벡터이다. 그리고 전극판과 부상체 사이의 거리가 그 면적에 비해 아주 작기 때문에 각 전극의 중심에서 부상체 간의 거리는 아래식과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_a & -r_a \\ 1 & r_a & r_a \\ 1 & -r_a & r_a \\ 1 & -r_a & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} \tag{19}$$

각각의 전극에서의 근사화된 정전력은 다음과 같다.

$$F_j = F_{0j} + k_{sj}\delta z_j + k_{vj}\delta V \tag{20}$$

여기에서 $j=1,2,3,4$ 이다. 4전극과 부상체 간의 관계는 동일하다고 할 수 있으므로 k_{sj} , k_{vj} 는 다음과 같다.

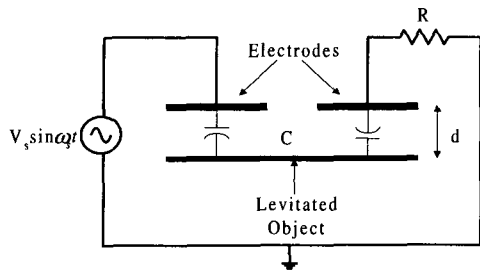


그림 6. 자가 검출 회로.
Fig. 6. The self-sensing circuit.

$$k_{sj} = \epsilon A \frac{V_{0j}^2}{z_{0j}^2} = k_s \tag{21}$$

$$k_{vj} = \epsilon A \frac{V_{0j}^2}{z_{0j}^2} = k_v$$

그리고 F_{0j} 가 (22)를 만족하면,

$$F_{0j} = \frac{1}{2} \epsilon A \frac{V_{0j}^2}{z_{0j}^2} = \frac{1}{4} mg \tag{22}$$

(21)과 (22)를 (20)에 대입하여 정전 부상시스템의 운동 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$m \delta \ddot{z} = k_s \delta z + k_v \sum_{j=1}^4 \delta V_j$$

$$J_x \delta \ddot{\theta}_x = \frac{1}{\sqrt{2}} k_s r_a^2 \delta \theta_x + k_v \left(\sum_{j=1,2} \delta V_j - \sum_{j=3,4} \delta V_j \right) \tag{23}$$

$$J_y \delta \ddot{\theta}_y = \frac{1}{\sqrt{2}} k_s r_a^2 \delta \theta_y + k_v \left(\sum_{j=2,3} \delta V_j - \sum_{j=1,4} \delta V_j \right)$$

위 식은 정전 부상시스템을 안정화하기 위해서는 수직 방향과 수평면 각각의 회전축에 대해서는 궤환 제어가 필요함을 보여준다.

2. 전극의 설계 및 전압 인가 방법

전 장과 전 절에서는 정전력 해석과 모델링의 편의를 위해, 부상체의 전위를 영전위라 가정했다. 실제의 부상체에 있어서 부상체의 전위를 영전위로 하기 위해서는 부상체를 접지하여야 하지만 부상체는 자유롭게 움직일 수 있어야 하므로 직접 접지하는 것은 불가능하다. 그림 4(a)와 같이 단일 전극을 부상체의 바로 위에 만들어 전압을 인가하면 부상체의 전위는 전극과 부상체 사이의 캐패시턴스를 C 로 하고, 부상체와 접지간의 캐패시턴스를 C_∞ 라하면 (24)와 같다.

$$V_L = \frac{C}{C + C_\infty} V \tag{24}$$

(8)의 V 를 대신하여 부상체의 전위 V_L 과 전극에 인가되는 전압 V 의 전위차 $V_L - V$ 를 치환하면 부상체에 작용하는 흡인력이 얻어진다. 그러나 부상체와 접지간의 캐패시턴스 C_∞ 는 0으로 할 수 있으므로, 부상체의 전위 $V_L = V$ 가 되어 부상체에 작용하는 정전력은 극히 작다. 그러므로 전극 1

개로는 부상체에 충분한 정전력을 줄 수 없게 된다. 부상체에 충분한 정전력을 주기 위해서는, 최소 2개의 전극이 필요하다.

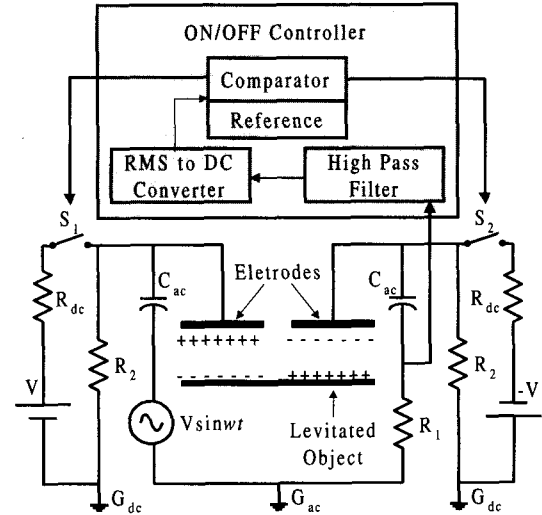


그림 7. 자가 검출 이용한 정전 부상계의 제어기.
Fig. 7. On-off control with self-sensing system.

그림 4(b)는 부상체의 전위를 영전위에 유지하면서 부상체에 정전력을 주는 전압 인가 방법을 나타낸다. 전극 E_1 과 E_2 는 같은 면적을 가지고, 그것들에는 서로 반대 극성의 전압, 예를 들면 전극 E_1 에는 양의 전압이, 전극 E_2 에는 부의 전압이 인가 된다. 그러므로 부상체의 전위는 가상적으로 영전위가 되고, 부상체에 작용하는 정전력은 (25)과 같이 된다. 단, 이 경우 (9)의 A 는 전극 E_1, E_2 면적의 합과 같다.

$$F_{ex} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{(z_0 - z)^2} V^2 \tag{25}$$

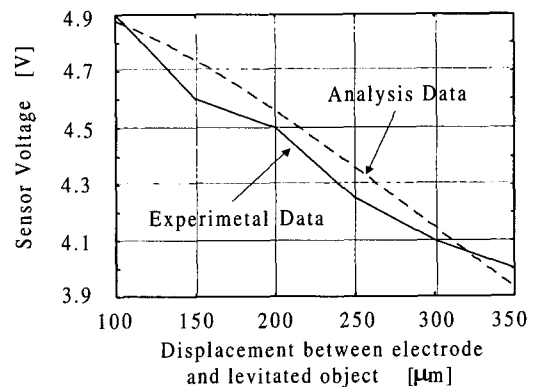


그림 8. 자가 검출 회로의 실험 비교.
Fig. 8. Comparison of the self-sensing circuit.

정전 부상시스템은 3장에서의 모델링의 결과와 같이 부상체를 안정하게 부상시키기 위해서는 일반적인 비례-적

분-미분 제어와 같은 선형 제어를 이용하면 최소 3대의 고전압 앰프가 필요하고, 그림 3과 같은 전극의 구조로는 4대가 필요하므로 시스템을 구성하는데 많은 비용이 들게 된다. 이런 문제점을 해결하기 위해, 본 논문에서는 양의 전압과 음의 전압을 모두 공급하는 1대의 고전압원과 몇 개의 스위치를 이용하여 그림 5와 같은 구조로 전극에 전압을 인가하는 온 오프 제어기로 정전 부상계를 구성한다. 부상체의 운동을 제어하기 위한 독립적인 정전력을 주고 전극의 전기 포텐셜이 영이 되게 하기 위해 각각의 전극에 두 개의 스위치(S_{1+} , S_{1-} , ..., S_{4+} , S_{4-})를 부착하였다. 정전 부상시스템에 있어서는 부상 간격이 부상체의 면적에 비해 대단히 작기 때문에, 정전 부상이 대기 환경하에서 행해질 때, 전극과 부상체 간의 공기의 출입이 부상체에 큰 댐핑력을 주므로[7][8] 정전 부상시스템은 온-오프 제어를 적용하여서도 충분히 안정화할 수 있다.

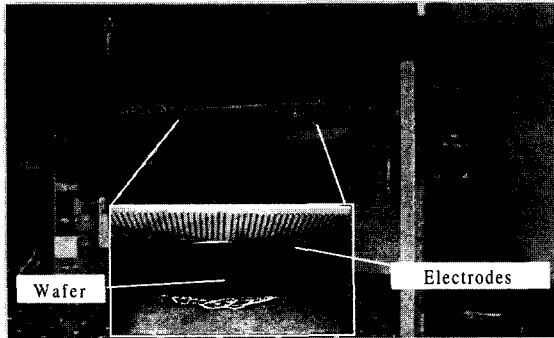


그림 9. 정전 부상 실험 장치.
Fig. 9. Experimental setup of the ELS.

3. 자가 검출계의 설계

정전 부상계는 인가 전압을 능동적으로 제어하기 위해서는 부상체의 위치를 검출하여야 한다. 일반적으로 와전류형 센서, 광 센서 등을 이용하여 부상체의 위치를 측정하여 제어기로 궤환시키는 구조로 정전 부상계를 안정화한다. 이 절에서는 전극과 부상체 사이의 캐패시턴스는 그 사이의 거리에 관한 함수로 표현된다는 점에 착안하여 1대의 교류전압원을 이용하여 부상체의 위치를 검출할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

그림 6과 같이 정현파 교류 전압 $V_s \sin \omega_s t$ 이 인가되는 저항-캐패시턴스(R-C) 회로를 고려해 보자. 그림 6의 회로의 회로 방정식은 다음과 같다.

$$Ri + \frac{1}{C} \int idt = V_s \sin \omega_s t \quad (26)$$

일반적으로 기계적 시스템은 전기적 시스템에 비해 응답특성이 아주 느리므로 회로의 과도 상태의 전류를 고려할 필요가 없으므로, 정상 상태의 전류만을 고려하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i = \frac{V_s}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega_s^2 C^2}}} \sin(\omega_s t + \phi) \quad (27)$$

여기서 $\phi = \tan^{-1}(1/\omega_s RC)$ 이며, $i = I_s \sin(\omega_s t + \phi)$ 라 정의하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

표 2. 정전 부상 실험의 조건.

Table 2. The experimental condition in the electrostatic levitation.

Description	Value
부상체	실리콘 웨이퍼 (반도체)
질량	9.1 g
두께	0.5 mm
지름	100 mm
전극의 면적	0.001 m ²
인가 전압	±800 V
부상 간격	250 μm
스위칭 장치	Photo-Mos Relay
RMS to DC 변환기	AD637
고역 통과 필터	RC circuit (2nd Order)

$$\left| \frac{I_s}{V_s} \right| = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega_s^2 C^2}}} \quad (28)$$

여기서, 만일 $R^2 \ll (1/\omega C)^2$ 을 만족하는 저항, 캐패시턴스와 주파수 조건하에서 (28)은

$$\left| \frac{I_s}{V_s} \right| = \omega_s C \quad (29)$$

로 할 수 있고 회로의 캐패시턴스는 (5)로부터 (31)과 같이 회로에 흐르는 전류와 입력 전압과의 비가 부상체와 전극 간의 거리에 관한 함수로 나타내어진다.

$$\left| \frac{I_s}{V_s} \right| = \omega_s \frac{\epsilon A}{2d} \quad (30)$$

즉, 회로의 전류와 인가되는 전압과의 비를 구하면 전극에 대한 부상체의 위치를 알아낼 수 있게 된다.

IV. 실험

4인치 반도체 웨이퍼의 부상을 위해 전극에 고전압을 인가하는 부분과 회로의 임피던스 변화를 측정하는 센싱부를 분리한 정전 부상계를 그림 7과 같이 구성한다. 그림 7의 회로에서 캐패시턴스(C_{ac})는 부상체를 부상시키기 위해서 가해지는 직류 성분이 변위 검출을 위해 사용되는 교류 전원으로 인가되는 것을 방지하기 위해 삽입되었다. 그 값은 15pF로 하였고, 자가 검출 회로의 교류 전원의 크기와 주파수는 각각 10 V, 100 kHz이다. 그리고 고역 통과 필터는 부상체의 위치에 따라 직류 전원이 온 오프에 의해서 발생하는 저주파 성분을 제거한다. 마지막으로 실효값 검출기를 이용하여 부상체의 위치에 따른 교류전압을 직

류 전압으로 전환하고 이 신호를 비교기에서 기준 위치일 때의 크기와 비교하여 부상체가 전극으로의 접근 상황인지 혹은 후퇴 상황인지를 파악하여 스위치의 작동을 결정한다. 즉 부상 기준 위치의 전압보다 측정된 전압의 신호가 크면 웨이퍼가 접근하는 상황이므로 직류 전원의 스위치를 오프시키고, 측정된 신호의 전압이 부상 기준 위치의 전압보다 작으면 웨이퍼가 전극에서 멀어지고 있는 상태이므로 직류 전원의 스위치를 동작하게 된다. 이와 같이 온-오프 제어만으로 부상체가 안정하게 부상할 수 있는 이유는 부상체와 전극의 부상 간극이 그 표면적에 비해 아주 작아서 큰 공기 댐핑력이 부상체에 작용하기 때문이다. 그림 8은 부상체의 위치에 따른 자가 검출 회로에서 측정된 전압 곡선이다.

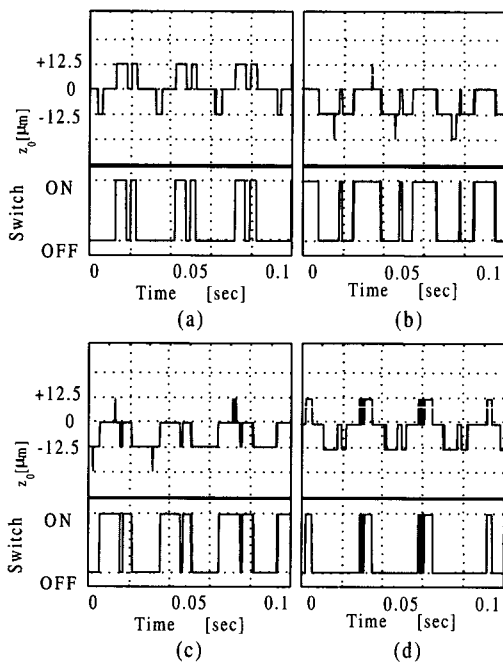


그림 10. 각 전극의 인가 전압과 검출된 변위 신호.
Fig. 10. Signals of the applied voltage & displacement.

부상 실험을 위하여 전극 패턴은 에폭시 기판상에 35 μm 의 동판이 부착된 기판을 사용해 제작했다. 전극의 표면에는 방전을 막기 위하여 25 μm 의 필름으로 절연하였다. 실리콘 웨이퍼의 사양은 직경 100 mm, 두께 0.5 mm, 질량 9.1 g이다. 온-오프 제어기를 이용하여 부상 실험을 행한다. 앞에서 설명된 바와 같이 이 제어기는 대역 통과 회로, 실효치 검출기, 비교기 그리고 스위치로 구성된다. 스위칭 소자로서는 반도체 릴레이(Photo-MOS Relay AQV258)을 사용했다. 이 스위칭 소자는 내압이 1.5kV이다. 목표 간격은 250 μm , 온 전압은 0.8 kV와 -0.8 kV의 조건에서 4인치 실리콘 웨이퍼의 부상 실험을 행했다. 구체적인 실험 조건은 표 2에 정리하였다. 그림 9는 부상시의 웨이퍼를 나타내고 있다. 이때 각 전극들의 인가되는 전압과 자가 검출된 변위 신호는 그림 10(a), (b), (c), (d)와 같이 관측

되었고 이 신호들로부터 얻은 웨이퍼 중심에서의 변위는 그림 11(a)와 같다. 그림 11(b)는 자가 검출 회로의 성능을 검증하기 위해 광센서를 이용하여 측정된 웨이퍼 중심에서의 변위 신호이다. 두 곡선은 최대 12.5 μm 의 오차를 나타내고 있는데 이것은 AD컨버터의 분해능과 고주파 가진 주파수로 인한 센서의 노이즈로 인한 자가 검출기의 정밀도의 한계 때문이다.

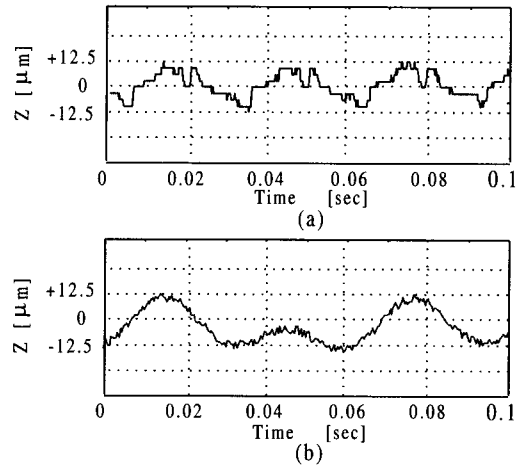


그림 11. 웨이퍼 중심에서의 변위.
Fig. 11. The displacement at the wafer center.

V. 결론

정전 부상시스템은 그 힘이 약하기 때문에 지금까지 연구가 활발히 진행되지 않았다. 그러나 정전력은 물체의 종류에 관계없이 적용할 수 있는 장점을 가지고 있고, 판상형의 물체에는 충분한 부상력을 줄 수 있으므로 반도체 제조, 검사공정의 자동화를 위해 적용될 수 있다. 본 연구에서는 정전 부상 운송 시스템을 설계하기 위하여 먼저 부상체에 충분한 힘을 주기 위한 전극의 설계 방법과 정전력은 부상체의 전위에 관한 함수이므로 각 축을 서로 독립시키기 위한 설계 지침 등에 대하여 언급하였다. 그리고 선형 제어기와 고전압 앰프 등과 같은 고가의 장비를 필요로 하므로 통상의 선형 제어계를 구성하는 대신 부상체의 단면적은 크고 부상 간극이 좁은 정전 부상계에서는 상대적으로 저렴한 스위치와 고전압원으로 구성할 수 있는 온 오프 제어기를 적용하였다. 또한 이송거리가 길어질 경우에 기존의 정전 부상시스템은 많은 센서를 필요로 하게 되고 부상체가 이송됨에 따라 센서의 전환 등의 문제를 발생시키게 된다. 이러한 문제점의 극복을 위한 자가 검출 방식을 제안하였다. 마지막으로 반도체 웨이퍼의 부상과 운송에 가장 적합한 자가 검출 방식과 제어기를 구성하여 4인치의 실리콘 웨이퍼를 부상 간격 250 μm 에서 정상 상태 진폭은 12.5 μm 로 안정화 시켰다.

참고문헌

[1] M. Tsuda, T. Higuchi, and S. Fujiwara, "Magnetic levitation servo for flexibel assembly automation,"

The Internal Journal of Robotics Research, vol.11, no. 4, pp. 329-345. 1992.

[2] K. H. Park, S. K. Lee, J. H. Kim, and Y. K. Kwak, "Contactless magnetically silicon wafer transport system", *The Internal Journal of Mechtronics*. vol. 6, no. 5, pp. 497-612.

[3] Higuchi and M. Kanemoto, "Electrostatic silicon wafer suspension," *Proceedings of the Fourth International Symposium on Magnetic Bearings*, pp. 343-348. 1994.

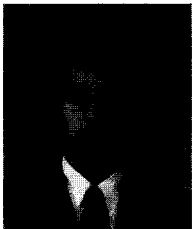
[4] J. Jin, T. Higuchi and M. Kanemoto, "Electrostatic levitator for hard disk media," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, no. 5, pp. 467-473. 1995.

[5] S. Kumar and D. Cho, "A proposal for electrically levitating micromotors", *Sensors and Actuators A*, vol. 24, pp. 141-149. 1990.

[6] S. Kumar, D. Cho, and W. N. Carr, "Experimental study of electric suspension for microbearings," *Journal of Microelectromechanical System*, vol. 1, no. 1, pp. 23-30, 1992.

[7] W. A. Gross, "Gas film lubrication," *Wiley*, New York, pp. 451-456. 1962.

[8] W. S. Griffin, H. H. Richardson, and S. Yamanami, "A study of fluid squeeze film damping," *ASME J. Basic Eng.*, pp. 451-456. 1996.



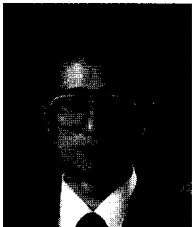
정 학 근

1973년 10월 9일생. 1996년 전남대 전기공학과 졸업. 1998년 광주과학기술원 기전공학과 석사. 1998년-현재 한국에너지 기술연구소 연구원 관심 분야는 시스템 모델링 및 제어, 등기구 설계 및 계측, 전력저장 기술.



최 창 환

1973년 2월 10일생. 1995년 한양대 정밀기계공학과 졸업. 1997년 광주과학기술원 기전공학과 석사. 1997년-현재 동대학원 박사과정. 관심 분야는 전기기계 시스템 제어, Switched Reluctance 모터의 설계 및 제어, 정밀 액츄에이터.



박 기 환

1961년 1월 14일생. 1985년 서울대 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1987). 1993년 University of Texas at Austin (Ph.D.-Mechanical Engineering). 1995년-현재 광주과학기술원 기전공학과 교수. 관심 분야는 자기력을 이용한 운동 및 진동 제어, 전력 전자, Random access 장치, 차량 제어용 센서 및 액츄에이터, 정밀 의료용 액츄에이터.