

정전부상체에 작용하는 횡방향 복원력 측정장치

전종업[#], 박기태^{*}, 박규열^{**}

A Measurement Apparatus of Lateral Restoring Force Exerted on Electrostatically Suspended Object

Jong Up Jeon[#], Ki-Tae Park^{*} and Kyu-Yeol Park^{**}

ABSTRACT

In electrostatic suspension system of thin plates like a silicon wafer or an aluminum disk for hard disk applications, the lateral restoring force exerted on a suspended object plays an important role since the lateral motion of the suspended object, owing to the inherently stable restoring forces, can be passively stabilized without any active control of it. This paper reports about the measurement apparatus of the lateral restoring force originating from a relative translation of the suspended object with respect to the electrodes-for-suspension. An approximate calculation of the lateral force in disk-shaped objects, the structure of the measurement apparatus, a measurement method, stabilization condition and the guideline in designing the measurement apparatus are described. Experimental results obtained by using a 3.5-inch aluminum disk as a suspended object are presented as well in order to assess the magnitude of lateral force and stiffness, and also verify the usefulness of the measurement apparatus.

Key Words : Lateral restoring force (횡방향 복원력), Electrostatic suspension (정전부상), Electrostatic force (정전기력), Precise measurement (정밀측정)

1. 서론

종래의 비접촉 지지기구에 있어서, 부상력으로 는 주로 자기력이나 유체력, 또는 초음파력 등이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 힘을 이용한 부상 기구는 부상가능한 물질의 종류나 부상력에 제한 이 있거나, 또는 초청정환경이나 진공환경 등과 같은 특수환경에서의 사용이 곤란한 등 각각 단점 을 갖고 있다. 자기력의 경우, 그 부상력은 다른

힘에 비해 상당히 크나 부상체가 자성체에 국한되 는 단점을 갖고 있으며, 유체력은 부상하고자 하 는 물질의 종류에 제한이 없으나 초청정환경이나 진공환경에서는 사용이 곤란하고, 초음파력은 부 상력이 극히 작아 실용적 측면에서 사용이 제한되 는 단점을 갖고 있다. 이에 반해 정전기력을 이용 한 부상시스템은 실용적 측면에서 충분한 부상력 을 제공하며, 초청정환경이나 진공환경 등 특수한 환경에서도 사용이 가능하고, 도체, 실리콘 웨이퍼

· · · 접수일: 2003년 9월 17일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부
Email: jujeon@ulsan.ac.kr, Tel. (052) 259-2139

* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

** 울산대학교 기계자동차공학부

와 같은 반도체, 비자성체, 유리나 세라믹과 같은 절연체 등 거의 모든 종류의 물체에 부상력을 가할 수 있는 장점을 갖고 있다.^{1,2}

정전부상에 관한 연구 예로써, 1964 년에 Knoebel³ 은 질량 25 g, 외경 50.8 mm 인 중공형(中空形) 알루미늄 회전자를 갖는 정전부상형 진공자이로를 개발하였으며, Kumar 등⁴ 은 마이크로 모터나 마이크로 액추에이터에서의 마찰문제를 해결하기 위해 정전기력에 의한 회전자(크기: 22×22×0.18 mm³)의 비접촉 지지기구를 제안하였고, Rhim¹ 등은 1993 년에 고온 고진공 환경 하에서의 물질연구를 위해 직경 약 2.5 mm, 온도 2250 K 인 용융상태의 질코니움 샘플을 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하였다. 한편, Jin 등² 은 1995 년에 하드디스크용 알루미늄 디스크를 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하였으며, 이후, Jeon 등은 반도체 제품이나 LCD, PDP 등의 제조공정에 사용하기 위한 비접촉 지지기구의 개발을 목표로 8 인치 실리콘 웨이퍼⁵ 와 크기 100×100mm² 인 유리판넬⁶ 등을 정전력을 이용하여 부상하는데 성공하였다. 여기서 이용한 부상원리는 자기부상과 유사하다. 즉, 변위센서를 이용하여 측정된 부상체의 위치와 자세정보에 근거하여, 부상체의 바로 위에 배치된 다수의 평면전극에의 인가전압을 능동적으로 제어함으로써 부상체의 안정화를 달성하고 있다.

물체를 공간상에 완전 비접촉으로 지지하기 위해서는 그 물체의 5 자유도 운동(회전운동은 공기의 마찰력에 의해 안정적인 거동을 보이므로 여기서는 제외함)에 대한 안정화 대책이 필요하다. 상기한 연구^{1,2,5,6} 에 있어서는 부상체의 바로 위에 설치한 다수의 평면전극에의 인가전압을 이용, 부상력을 능동적으로 제어함으로써 부상체의 3 자유도 운동(수직운동과 피칭, 롤운동)에 대한 안정화를 피하고 있다. 반면에, 부상체의 수평면내에서의 횡방향 2 자유도 운동에 대해서는 별도의 안정화 기구를 설치하지 않고 있다. 이는 부상체의 횡방향 움직임의 경우, 전극과 부상체간에 존재하는 정전장의 프린지 필드(fringe field)에 의한 에지효과(edge effect)로 인해 그 운동을 능동적으로 제어하지 않아도 수동적으로 안정적이기 때문이다. 즉, 부상체가 전극에 대하여 횡방향으로 상대운동을 하였을 때, 정전장의 에지 효과에 의해 부상체에는 안정적인 횡방향 복원력이 발생하게 된다. 이 횡방향 복원력의 존재로 인해 물체의 3 자유도 운

동을 안정화시키기 위한 평면 전극들만으로도 물체의 안정부상이 가능하게 되어지고, 그 결과 정전부상시스템의 구성은 상당히 간단하게 되어진다.

본 논문에서는 정전부상시스템에 있어서 알루미늄 디스크와 같은 판상체(板狀體)의 횡방향 복원력 측정을 위한 기법 및 측정장치, 그리고 측정 결과에 관하여 기술한다. 우선 정전부상의 원리 및 횡방향 복원력의 개략적 계산에 대하여 기술한 후, 측정장치의 구성 및 측정방법, 장치의 안정조건 및 설계 가이드라인 등에 대하여 논한다. 그 후, 알루미늄 디스크에 대한 횡방향 복원력 측정 실험 결과에 대하여 기술한다.

2. 정전부상의 원리 및 횡방향 복원력

2.1 정전부상의 원리

Fig. 1 은 정전부상시스템의 한 가지 구성예² 및 횡방향 복원력을 도시한 것이다. HDD 용 알루미늄 디스크와 같이 얇은 판 형상을 갖는 부상체의 바로 위에, 정전기력을 인가하기 위한 다수의 부상용 전극(그림에 도시된 전극의 형태는 여러 가지 가능한 부상용 전극 중 한 가지 형태임)이 부상체와 일정간격(보통, 0.1~0.5mm)을 두고 배치되어 있다. 부상용 전극의 내부에는 최소 3 개 이상의 아날로그식 변위센서가 설치되어 있다. 이와 같은 정전부상시스템에 있어서 부상체를 수 백 μ m의 간격으로 비접촉 지지하기 위해서는 부상용 전극에 보통 수백 V~수 kV의 전압을 인가하여, 부상체의 제곱에 반비례하고 부상체와 부상용 전극간 전위차의 제곱에 비례하는 정전부상력을 발생시킨다. 이 때, 부상용 전극에 인가되는 전압을 일정하게 유지하게 되면 부상체의 수직운동과 피칭, 롤운동은 불안정한 거동을 보이게 되므로 자기부상과 같이 부상체의 위치와 자세를 변위센서를 이용하여 검출하고, 이를 피드백(feedback)하여, 전극에의 인가전압을 능동적으로 제어함으로써 부상체의 3 자유도 운동의 안정화를 꾀한다. 한편, 부상체의 수평면내에서의 운동은 정전장의 프린지 필드에 의한 에지효과로 인해 그 운동을 능동적으로 제어하지 않아도 안정적인 거동을 보인다. Fig. 1 은 부상체가 부상용 전극에 대하여 횡방향으로 상대운동을 하였을 때, 정전장의 에지 효과에 의해 발생하는 횡방향 복원력을 보여주고 있다. 판상체의 정전부상시스템에 있어서, 이 횡방향의 수동안정

성은 중요한 현상이다. 부상체의 횡방향 운동을 능동적으로 제어하기 위해 부상체의 측면에 대향하도록 전극을 설치하고 그 전극에의 인가전압을 제어하여도, 부상체가 얇기 때문에 그 효과를 거의 기대하기 어렵기 때문이다.

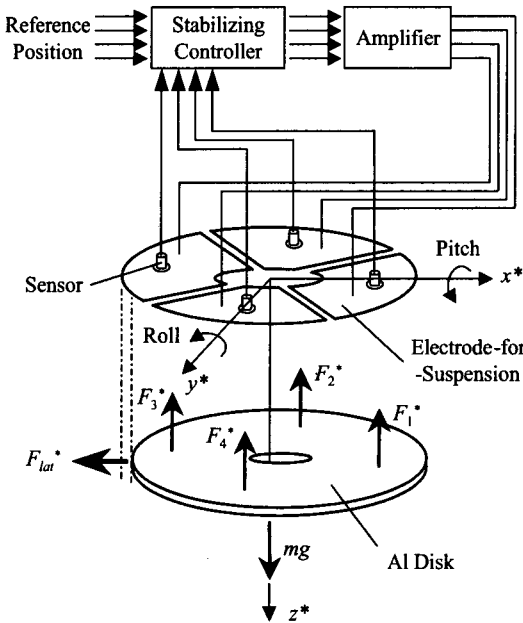


Fig. 1 An electrostatic suspension system² and lateral restoring force, where F_{lat}^* is the lateral restoring force and F_i^* 's($i=1,2,3,4$) are attractive suspension forces

2.2 횡방향 복원력의 계산

본 절에서는, 가상일의 원리를 이용하여 횡방향 복원력을 개략적으로 계산하고자 한다. 복원력 F_{lat}^* 는, 부상용 전극과 부상체간에 형성된 전기장에 축적된 에너지 W 의, 횡방향 엇갈림 x^* 에 대한 변화율로

$$F_{lat}^* = -\frac{\partial W}{\partial x^*} \quad (1)$$

와 같다. 부상용 전극과 부상체간의 전위차를 V^* , 이것들간의 정전용량을 C^* 라 하면 에너지 W 는

$$W = \frac{1}{2} C^* V^{*2} \quad (2)$$

와 같고, 이것을 상기 식(1)에 대입하면 복원력 F_{lat}^* 는

$$F_{lat}^* = -\frac{V^{*2}}{2} \frac{\partial C^*}{\partial x^*} \quad (3)$$

와 같이 구해진다. 이 식으로부터, 복원력 F_{lat}^* 는, '정전용량 C^* 의 엇갈림량 x^* 에 대한 변화율'에 비례하는 것을 알 수 있다.

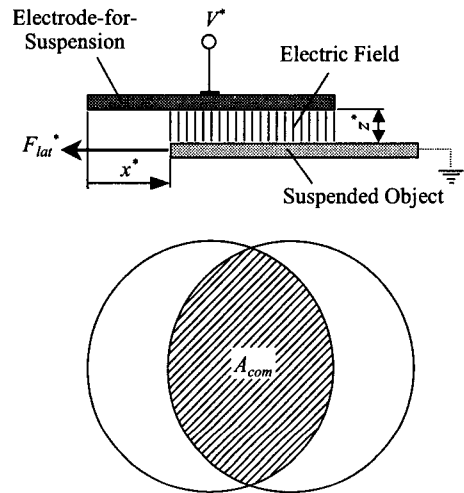


Fig. 2 Model for approximate calculation of the lateral force

Fig. 2 에 도시한 바와 같이, 원판 디스크 형상의 부상체가 부상용 전극에 대하여 횡방향으로 x^* 만큼 엇갈렸을 경우에 발생하는 횡방향 복원력의 개략적인 값을 구해 보자. 부상용 전극과 부상체가 겹치는 부분의 면적이 그들간의 간격에 비해 충분히 큰 경우(대부분의 정전부상시스템에 있어서 이 조건은 만족된다), 거의 대부분의 전하는 부상용 전극과 부상체간의 중첩하는 부분에 존재한다고 가정할 수 있으므로, 본 논문에서 전기장은 Fig. 2 에 도시한 바와 같이, 그 중첩되는 부분에만 존재한다고 가정한다. 또한, 전기장이 균일(homogeneous)하게 분포되어 있다고 가정하면, 부상용 전극과 부상체간의 정전용량 C^* 는

$$C^* = \frac{\epsilon A_{com}}{z^*} \quad (4)$$

과 같고, 이것을 식(3)에 대입하면 복원력 F_{lat}^* 는

$$F_{lat}^* = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon V^{*2}}{z^*} \frac{\partial A_{com}}{\partial x^*} \quad (5)$$

와 같이 구해진다. 단, ε 은 공간매질의 유전율이고, A_{com} 은 부상용 전극과 부상체간의 중첩되는 부분의 면적, z^* 는 이들간의 간격이다. 여기서, A_{com} 을 구하면,

$$A_{com} = 2r_o^2 \cos^{-1}\left(\frac{x^*}{2r_o}\right) - x^* \sqrt{r_o^2 - \frac{x^{*2}}{4}} \quad (6)$$

과 같다. 단, r_o 는 부상체의 외반경이다. 상기 식(6)을 식(5)에 대입하면 복원력 F_{lat}^* 는

$$F_{lat}^* = \frac{\varepsilon V^{*2}}{z^*} \sqrt{r_o^2 - \frac{x^{*2}}{4}} \quad (7)$$

과 같다. HDD 용 알루미늄 디스크와 같은 도우넛 형상을 갖는 부상체의 경우(이 때, 부상용 전극의 형상(도우넛 형상) 및 내/외경의 크기는 부상체와 동일함), 상기의 과정에 따라 복원력을 구하면

$$F_{lat}^* = \frac{\varepsilon V^{*2}}{z^*} \left[\sqrt{r_o^2 - \frac{x^{*2}}{4}} + \sqrt{r_i^2 - \frac{x^{*2}}{4}} \right] \quad (8)$$

과 같다. 단, r_i 는 부상체의 내반경이다. 이상에서 얻어진 결과를 이용하여 본 논문에서 측정 대상으로 삼고 있는 3.5 인치 알루미늄 디스크($r_o=12.5\text{mm}$, $r_o=47.5\text{mm}$, 질량 13.6g)에 대하여 횡방향 복원력을 계산해 보면, $z^*=0.3\text{mm}$, $V^*=0.64\text{kV}$, $x^*=0$ 일 때 최대 복원력은 약 $0.73 \times 10^{-3}\text{N}(0.07\text{gf})$ 이다. 여기서, 전압 V^* 의 값으로, 부상갭 z^* 에서 부상체의 중량과 평형을 이루는 정전흡인력을 발생시키기 위해 전극에 인가해야 하는 전압 값을 취하였다. 상기 계산결과로부터, 부상체의 횡방향 복원력은 매우 작은 것을 알 수 있다. 그러나, 부상체의 횡방향에 그다지 큰 외란이 작용하지 않는 한, 이 복원력은 부상체의 횡방향 운동을 안정화하는 데에 충분한 것으로 판단된다.

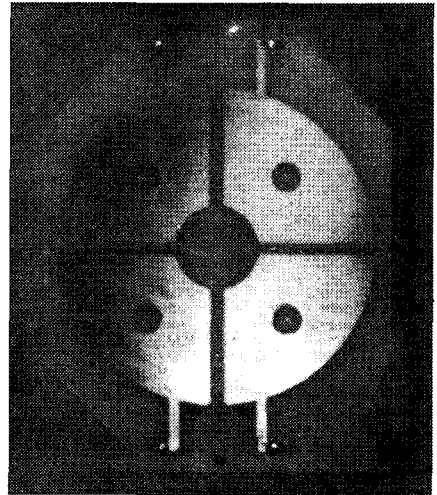
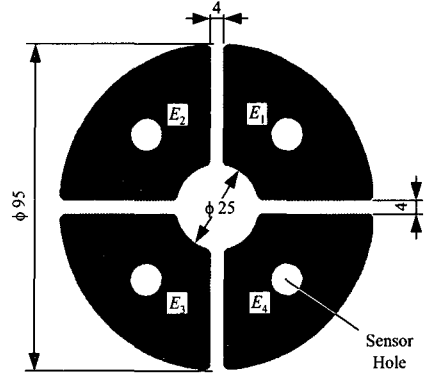


Fig. 3 Pattern and photograph of the electrode-for-suspension (for 3.5 inch Al disk)

상기 식(8)로부터, 복원력 F_{lat}^* 와 인가전압 V^* , 복원력 F_{lat}^* 와 간격 z^* 와의 사이에는

$$F_{lat}^* \propto V^{*2}, \quad F_{lat}^* \propto \frac{1}{z^*} \quad (9)$$

의 관계가 성립함을 알 수 있다. 즉, 복원력 F_{lat}^* 는 인가전압 V^* 의 2 승에 비례하고 간격 z^* 에 반비례한다. 이에 반해, 부상방향의 정전부상력 F_{axi}^* 와 인가전압 V^* , 그리고 정전부상력 F_{axi}^* 와 간격 z^* 와의 사이에는, 2.1 절에서 기술한 바와 같이

$$F_{axi}^* \propto V^{*2}, \quad F_{axi}^* \propto \frac{1}{z^{*2}} \quad (10)$$

와 같은 관계가 성립한다. 여기서, 간격, 다시 말하면 부상값 z^* 를 γ 배 크게 하는 경우에 대해서 생각해 보자. 그 경우, 부상방향에 있어서 같은 정전흡인력을 얻으려면 식(10)으로부터 인가전압 V^* 도 γ 배 크게 하면 된다. 이와 같이 V^* 와 z^* 를 동시에 γ 배 크게 하면 부상방향에 있어서 정전흡인력은 변하지 않으나, 식(9)에서 알 수 있듯이, 부상체의 횡방향에서의 복원력 F_{lat}^* 는 γ 배 커지게 된다. 따라서, 보다 강한 횡방향 복원력을 얻기 위해서는, 간격 z^* 를 크게 하고, 그 만큼, 인가전압 V^* 를 크게 하는 것이 바람직하다.

3. 측정장치

3.1 측정장치의 구성

본 논문에서는, HDD 용 3.5 인치 알루미늄 디스크를 횡방향 복원력의 측정대상으로 삼고 있다. 이 디스크는 알루미늄과 마그네슘의 합금으로, 외경은 95mm, 내경은 25mm, 두께는 0.775mm, 무게는 13.6gf 이다.

Fig. 3 은 부상용 전극의 패턴 및 실제 제작한 부상용 전극의 사진이다. 전극은, 그 형상과 면적이 동일한 4 개의 전극 $E_1 \sim E_4$ 로 구성된다. 이 4 개의 전극은 환상(環狀)으로 배치되어 1 개의 링을 형성하고 있으며, 이 링의 외경은 알루미늄 디스크의 외경과 같고, 그 내경은 알루미늄 디스크의 내경과 동일하게 되어 있다. 전극 E_1 과 E_3 에는 양의 전압 $+V^*$ 가 인가되고, 전극 E_2 와 E_4 에는 음의 전압 $-V^*$ 가 인가된다. 이렇게 함으로써, 전극과 알루미늄 디스크가 평행하게 배치되었을 때, 알루미늄 디스크의 전위는 제로 볼트가 되고, 전극과 디스크간의 전위차는 $|V^*|$ 가 된다.

Fig. 4 는 측정장치의 개략도 및 제작사진이다. 그림에 나타난 바와 같이, 알루미늄 디스크와 센서 타겟(target), 한 쌍의 측정용 전극 중 한 개의 전극(이하, 측정용 전극 1 이라 칭한다)은 각각의 홀더와 같이, 2 개의 평행 판스프링(leaf spring)에 의해 지지되어 있다. 판스프링의 재질은 인철동이고, 두께는 50 μ m, 폭은 60mm, 길이는 145mm 이다. 알루미늄 디스크는 디스크 홀더의 밑면에 부상용 전극과 대향(對向)하여 고정되어 있다. 센서는 알루미늄 디스크의 횡방향 변위를 측정하기 위해 설치된 것으로 와(渦)전류식(eddy current type) 센서(전자응용(사)의 프로브 PU-07 과 변환기 AEC-

5507)를 이용하였다. 판스프링에 의해 매달려 있는 부분은, 그 중량을 가능한 감소시키기 위해, 측정용전극 1 과 센서 타겟, 알루미늄 디스크 이외의 나머지 부분은 전부 아크릴로 제작하였다.

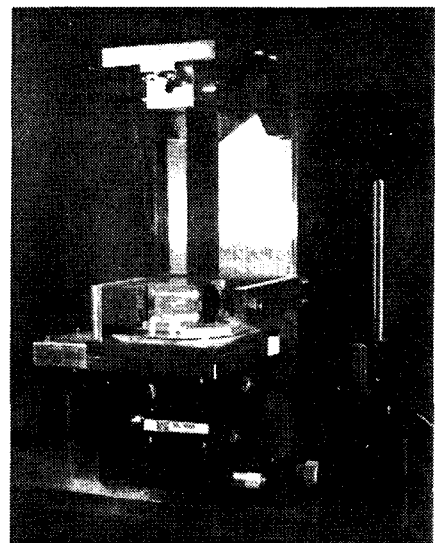
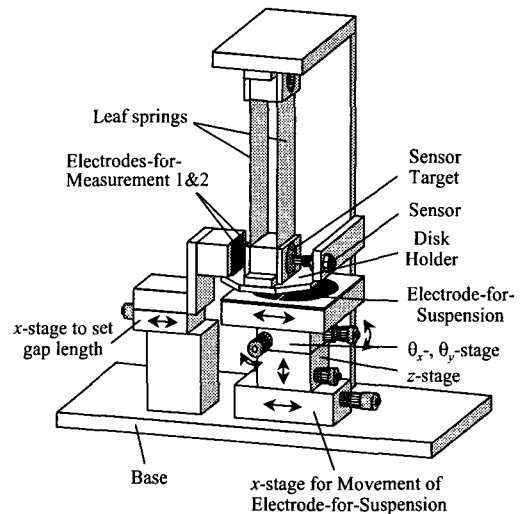


Fig. 4 Schematic diagram and photograph of the measurement apparatus

부상용 전극은, 그 아래 부분에 설치되어 있는 경사 스테이지에 의해 알루미늄 디스크와 평행하게 되도록 조정된다. 또한, x- 및 z-스테이지에 의해 부상용 전극과 알루미늄 디스크간의 횡방향(x 방향) 엇갈림량 및 부상값이 설정 가능하도록 되

어 있다. 한 쌍의 측정용 전극 중, 나머지 한 개의 전극(이하, 측정용 전극 2 라 한다)은 x -스테이지에 의해 지지되어, 두 개의 측정용 전극간의 갭이 설정 가능하도록 하였다. 측정용전극 1 에는 항상 제로 볼트가, 측정용 전극 2 에는 측정용 전압이 인가된다. 측정용 전극의 패턴으로서는, 종x횡이 $30 \times 30 \text{mm}^2$ 인 정사각형 형상의 패턴을 사용하였다.

본 실험장치에 있어서 부상체와 부상용 전극이 설치된 위치를 살펴 보면, 부상체는 상면, 부상용 전극은 하면에 배치되어 있음을 알 수 있다. 이는 부상체가 하면, 부상용 전극이 상면에 배치되는 실제의 정전부상시스템(Fig. 1)과는 다른 구조이다. 이와 같이 실제의 정전부상계와 다른 구조를 택한 이유는 보다 정확한 횡방향 복원력을 측정하기 위해서이다. 즉, 부상용 전극을 상면에 배치할 경우, 부상용 전극에 전압(+ V^* , - V^*)을 인가하기 위해 부상용 전극에 연결된 전기선이 판스프링에 의해 매달려 있는 부분에 불필요한 횡방향 물리력을 발생시킬 수 있기 때문이다. 반면에, 부상체에는 어떤 전압도 인가되지 않으므로 본 장치에서와 같이 이를 상면에 배치함으로써 상기한 불필요한 횡방향 물리력이 발생하지 않고, 따라서 보다 정확한 횡방향 복원력 측정이 가능해진다.

3.2 측정순서 및 방법

이하, Fig. 5 를 참고하면서 복원력 측정순서 및 방법에 대하여 기술한다.

(1) 우선, 알루미늄 디스크가 수평이 되도록 셋팅한 후, 경사 스테이지를 이용하여 부상용 전극의 수평도를 조정한다. 그리고, Fig. 5(a)에 나타낸 바와 같이, x -스테이지와 z -스테이지를 이용하여 부상용 전극이 알루미늄 디스크의 바로 밑에 디스크와 갭 z^* 만큼 떨어져서 위치하도록 셋팅한다. 다음으로, 측정용 전극 2 를 지지하고 있는 x -스테이지를 이용하여 측정용 전극간의 갭을 d_{0m} 으로 셋팅한다. 그 후, 부상용 전극 E_1 과 E_3 에는 전압 + V^* 를, 전극 E_2 와 E_4 에는 전압 - V^* 를 인가한다.

(2) Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이, x -스테이지를 이용하여 부상용 전극을 횡방향으로 거리 x_0 만큼 변위시킨다. 그러면, 부상용 전극과 알루미늄 디스크 사이에는 횡방향의 정전흡인력이 작용하고, 알루미늄 디스크는 부상용 전극 쪽으로 끌어 당겨진다. 이 때, 알루미늄 디스크는 판스프링에 의해 지지되어 있으므로 x_D 만큼만 변위하게 되고, 그 위

처에서 횡방향 정전흡인력과 판스프링에 의한 탄성복원력은 평형을 이루게 된다. 한편, 측정용 전극간의 갭도 x_D 만큼 넓어져 $d_{0m} + x_D$ 가 된다.

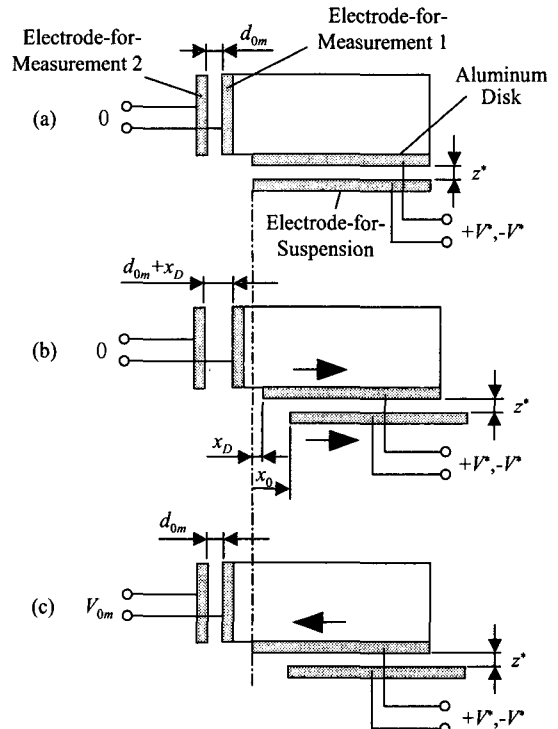


Fig. 5 Experimental procedure for the measurement of lateral force

(3) Fig. 5(c)에 도시한 바와 같이, 측정용 전극 2 에 전압 V_{0m} 을 인가하여(측정용 전극 1 에는 항상 제로볼트가 인가되어 있다), 측정용 전극간의 갭을 d_{0m} 으로 되돌린다. 그러면, 알루미늄 디스크와 부상용 전극간의 횡방향 엇갈림의 크기는 x_0 로 되돌려진다. 인가된 전압 V_{0m} 과 측정용 전극의 면적 A_m , 측정용 전극간의 갭 d_{0m} 을 이용하여 다음 식에 의한 정전기력

$$F_{lat}^* = \frac{1}{2} \epsilon A_m \left(\frac{V_{0m}}{d_{0m}} \right)^2 \quad (11)$$

을 구하면, 이 정전기력 F_{lat}^* 가 엇갈림량 x_0 일 때의 횡방향 복원력의 크기가 된다. 상기 식에 의한 정전흡인력의 계산은 측정용 전극의 면적이 측정

용 전극간의 갭보다 충분히 클 때 충분한 정전흡 인력의 근사해를 제공한다. 상기의 단계(2)와 단계 (3)을 잇갈림량 x_0 를 변화시키면서 반복함으로써 부상용 전극과 알루미늄 디스크간의 횡방향 상대 변위와 복원력간의 관계를 구할 수 있다.

3.3 측정장치의 안정조건

앞서 기술한 측정방법에서는, 측정용 전극간의 갭을 d_{0m} 으로 되돌리기 위해 측정용 전극 2 에 일정전압 V_{0m} 을 인가하여도 판스프링에 의해 지지 되어 있는 부분(이하, 측정모듈이라 한다)의 횡방향(x 방향) 움직임은 안정적인 거동을 보인다는 가정이 포함되어 있다. 그러나, 경우에 따라서는, 측정용 전극에의 인가전압을 일정하게 한 경우, 측정모듈의 동작이 불안정한 거동을 보이게 된다. 그 경우, 측정용 전극에의 인가전압을 능동적으로 제어함으로써 측정모듈의 횡방향 운동을 안정화시키지 않으면 안된다. 이 측정모듈의 안정성은 횡방향 복원강성, 측정용 전극에 의해 발생하는 음(陰)의 강성, 판스프링의 탄성계수 등에 관계한다. 이하, 이 안정성에 대하여 설명한다.

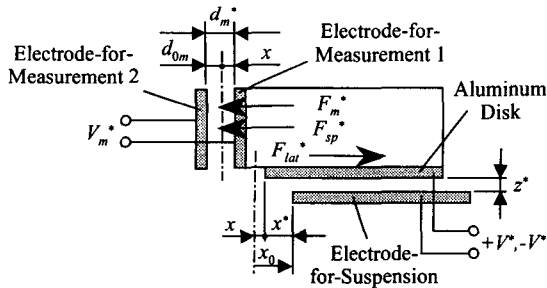


Fig. 6 Stability analysis of the measurement apparatus

먼저, 측정모듈의 횡방향 움직임에 근거하여 측정용 전극에의 인가전압을 능동적으로 제어하는 경우에 대해 측정모듈의 운동방정식 및 안정화 조건 등을 구해 보자. Fig. 6 에 도시한 바와 같이, 측정모듈이 평형상태(Fig. 5(c)의 상태)에서 x 만큼 변위하고, 이 때, 측정용 전극에의 인가전압이 V_{0m} 에서 V_m 만큼 증가하여 V_m^* 가 되었다고 하자. 측정모듈에는, 부상용 전극에 의한 힘 F_{lat}^* 와 판스프링에 의한 힘 F_{sp}^* , 측정용 전극에 의한 힘 F_m^* 가 작용한다. 판스프링에 의한 힘 F_{sp}^* 는, 판스프링이 선형요소라고 가정하면,

$$F_{sp}^* = k_{sp}x \quad (12)$$

와 같다. 단, k_{sp} 는 판스프링의 탄성계수이다. 측정용 전극에 의한 힘 F_m^* 는

$$F_m^* = \frac{1}{2} \varepsilon A_m \left(\frac{V_m^*}{d_m^*} \right)^2 \quad (13)$$

와 같다. 부상용 전극에 의한 힘 F_{lat}^* 는 변위 x^* 의 함수로, $F_{lat}^* = F_{lat}^*(x^*)$ 이다. 이상을 이용하여 측정모듈의 운동방정식을 구하면,

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -F_m^* - F_{sp}^* + F_{lat}^*(x^*) \\ &= -\frac{1}{2} \varepsilon A_m \left(\frac{V_m^*}{d_m^*} \right)^2 - k_{sp}x + F_{lat}^*(x^*) \end{aligned} \quad (14)$$

와 같이 구해진다. 상기 식을 평형점 $x^* = x_0, d_m^* = d_{0m}, V_m^* = V_{0m}$ 부근에서 선형화하면,

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -\frac{1}{2} \varepsilon A_m \left(\frac{V_{0m} + V_m}{d_{0m} + x} \right)^2 - k_{sp}x + F_{lat}^*(x_0 - x) \\ &= -\frac{1}{2} \varepsilon A_m \left(\frac{V_{0m}}{d_{0m}} \right)^2 + k_{ms}x - k_{mV}V_m - k_{sp}x \\ &\quad + F_{lat}^*(x_0) - k_{lat}x \end{aligned} \quad (15)$$

와 같다. 단, k_{ms} 와 k_{mV}, k_{lat} 은 각각

$$\begin{aligned} k_{ms} &= \varepsilon A_m \left(\frac{V_{0m}^2}{d_{0m}^3} \right), \quad k_{mV} = \varepsilon A_m \left(\frac{V_{0m}}{d_{0m}^2} \right) \\ k_{lat} &= \frac{\partial F_{lat}^*(x_0)}{\partial x^*} \end{aligned} \quad (16)$$

이다. 식(15)로부터, 평형상태($x=0, V_m=0$)에서의 부상용 전극에 의한 힘 $F_{lat}^*(x_0)$, 즉 횡방향 복원력은 식(11)과 같음을 알 수 있다. 즉, 측정모듈의 운동이 안정적인가 불안정적인가에 의존하지 않고, 실험에 의해, 갭 d_{0m} 과 평형상태에서의 전압 V_{0m} 을 구하면 식(11)에 의해 복원력을 구할 수 있다. 계속해서, 측정모듈의 안정조건에 대해서 검토해보자. 식(11)과 식(15)로부터 측정모듈의 선형 운동방

정식을 구하면

$$m\ddot{x} = k_{ms}x - k_{mV}V_m - k_{sp}x - k_{lat}x \quad (17)$$

와 같다. 피드백 제어방법으로서 비례제어를 이용한다고 하면(실제는 미분제어도 필요하다), 제어전압 V_m 은

$$V_m = K_{Pm}x \quad (18)$$

와 같고, 식(17)와 식(18)로부터 측정모듈의 움직임이 안정하게 되는 조건은

$$K_{Pm} > \frac{k_{ms} - k_{sp} - k_{lat}}{k_{mV}} \quad (19)$$

와 같다. 여기서, K_{Pm} 은 비례게인이다. 이 게인을 이용하여 측정모듈의 움직임을 능동적으로 제어함으로써, k_{ms} 와 k_{sp} , k_{lat} 의 값에 관계없이 계를 안정화시키는 것이 가능하다.

한편, k_{ms} 와 k_{sp} 의 값을 적절히 설계하면, 측정모듈의 움직임은 상기의 비례 제어기 등을 이용하여 능동적으로 제어하지 않아도 안정적인 거동을 보인다. 이 경우, 측정용 전극에의 인가전압을 수동으로 조절할 수 있으므로 측정장치의 제어장치 부분이 간단하게 되어진다. 식(17)로부터 능동적 제어 없이 안정적인 측정모듈의 움직임을 얻기 위한 조건은

$$k_{ms} < (k_{sp} + k_{lat}) \quad (20)$$

와 같다.

3.4 측정장치의 설계 가이드라인

본 측정장치에 있어서, 측정모듈의 질량 및 판스프링의 탄성계수 값이 작을수록 측정감도는 좋아진다. 측정모듈의 질량을 줄이기 위해서는 비중이 작은 재질을 사용하고 불필요한 부분을 제거하면 된다. 판스프링의 탄성계수를 작게하기 위해서는 판스프링의 두께를 얇게 하거나, 길이를 길게 하거나, 또는 그 폭을 작게 하면 된다. 그러나, 판스프링의 제작이나 조립, 취급상의 문제로 인해 한계는 존재한다. 또한, 판스프링의 탄성계수가 너

무 작아지면 식(20)을 만족하지 못하므로, 능동적인 측정모듈 동작제어가 필요하게 되고, 따라서 측정장치가 복잡해진다. 판스프링을 설계함에 있어서는 이상에서 기술한 내용을 충분히 고려하여야 한다. 한편, 측정모듈의 안정성 관점에서 보면, 식(20)에서 알 수 있듯이, 주어진 판스프링의 탄성계수 k_{sp} 에 대해서 k_{ms} 의 값은 작을수록 좋다. k_{ms} 는 식(16)에 나타난 바와 같이 3개의 변수 V_{0m} , d_{0m} , A_m 의 함수이다. 여기서 변수 V_{0m} , d_{0m} , A_m 은 식(11)을 만족시키지 않으면 안되므로 독립변수는 그 중 2개가 된다. k_{ms} 의 값을 가능한 작게 하려면, 식(11)을 만족시키면서 k_{ms} 의 값을 최소화하는 V_{0m} , d_{0m} , A_m 의 값을 정하면 된다. 좋지 않은 하나의 설계 예는, 주어진 A_m 에 대하여 d_{0m} 을 작게 하고, 그 만큼 식(11)이 만족되도록 V_{0m} 을 작게 하는 경우이다. 이 경우, 식(16)으로부터 $k_{ms} \propto (1/d_{0m}^3)$ 이고, $k_{ms} \propto V_{0m}^2$ 이므로 k_{ms} 의 값은 커지게 되어 바람직하지 못한 결과가 도출된다. 따라서, 주어진 A_m 에 대해서는 d_{0m} 을 크게 하고, 또 V_{0m} 을 크게 하는 것이 좋다. 그러나, d_{0m} 이 너무 큰 경우에는, 전극 에지부근에 있어서의 전기장의 프링지 필드(fringe field)로 인해, 식(11)에 의한 근사해의 오차가 커지게 되므로 주의를 요한다. 마찬가지로, 주어진 V_{0m} 에 대하여 d_{0m} 을 크게 하고, 또 A_m 을 크게 하는 것이 좋다. 그 경우, A_m 을 크게 하는 데에는 한계가 있다. A_m 이 너무 크게 되면, 측정모듈의 질량이 증가하여 판스프링의 감도가 떨어지기 때문이다.

본 측정장치를 설계함에 있어서는, 측정장치의 감도 및 안정성 관점에서 이상에서 기술한 여러 가지 기술적 사항들을 충분히 고려하여야 한다.

3.5 시험 제작한 장치의 안정성 검토

본 논문에서 시험 제작한 측정장치에 대하여 측정모듈의 안정성을 검토해 보자. 측정장치에 있어서 측정모듈의 질량은 130g이었으며, 이 측정모듈을 진폭 20 μ m로 자유 진동시킴으로써 판스프링의 탄성계수 k_{sp} 의 값을 추정한 결과, 그 값은 약 14.8N/m이었다. 측정용 전극으로서는 3.1절에서 기술한 바와 같이 그 크기가 30 \times 30mm²인 정사각형의 전극을 사용하였다. 측정용 전극간의 갭은 0.45mm로 설정하였으며, 실험 결과, 측정용 전극에 인가되는 전압의 최대치는 약 245V이었다. 이상의 값들을 이용하여 k_{ms} 의 값을 구하면

5.25N/m 이다. 이로부터, 본 실험장치에서는 $k_{ms} < k_{sp}$ 라는 것을 알 수 있다. 한편, 알루미늄 디스크와 같은 원형상의 부상체의 경우, k_{lat} 는 양 또는 음의 값을 갖는다. 그 값은, 부상용 전극과 알루미늄 디스크 간의 엇갈림이 작을 때에는 양의 값이고, 엇갈림이 커지면 양의 값에서 음의 값으로 변화한다 (4 장 실험결과 참고). k_{lat} 의 값이 양인 경우는, 본 실험장치의 경우 $k_{ms} < k_{sp}$ 이므로 식(20)은 만족되어진다. k_{lat} 의 값이 음인 경우에도 일반적으로 $|k_{lat}|$ 의 값은 매우 작아 $|k_{lat}| \ll k_{ms}$ 이므로, 식(20)은 만족되어진다. 본 논문의 실험에 의하면, k_{lat} 의 최대치는 약 0.5N/m 이었고, k_{lat} 의 값이 음인 경우의 $|k_{lat}|$ 의 최대치는 이 값보다 현저히 작았다. 이상으로부터, 본 측정장치의 측정모듈은 그 움직임을 능동적으로 제어하지 않아도 안정적인 거동을 보임을 알 수 있다.

4. 측정실험 및 고찰

알루미늄 디스크와 부상용 전극간의 횡방향 엇갈림량을 0~25mm 까지 변화시키면서 이 때 발생하는 횡방향 복원력을 측정하였다. Fig. 7 은 측정결과이다. 비교를 위해, 식(8)을 이용하여 계산한 복원력도 Fig. 7 에 도시하였다. 복원력의 계산시, 센서 홀과 전극간 경계부분(Fig. 3 에 있어서 폭 4mm, 길이 35mm 인 4 개의 띠 형태를 한 부분)에 부상용 전극이 존재하지 않는 것을 고려해 놓으면 보다 정확한 복원력값이 얻어질 수 있으나, 그 경우 복원력값의 정확도는 그다지 향상되지 않는 반면, 상대적으로 복원력식이 매우 복잡해지기 때문에 본 논문에서는 이를 고려하지 않고 식(8)을 그대로 이용하였다. 측정결과, 복원력은 최초 제로에서 시작하고, 부상체가 전극의 바로 밑의 위치에서 횡방향으로 변위함에 따라 점점 커지게 되고, 어느 최대치를 정점으로 하여 단조롭게 감소하였다. 이에 반해 식(8)을 이용하여 계산한 복원력의 크기는 최초 어느 최대치를 갖고 이후 엇갈림이 커짐에 따라 단조롭게 감소하였다. 이로부터, 식(8)은 엇갈림이 클 경우에는 실측치와 꽤 일치하지만, 엇갈림이 작은 경우에는 실측치와 완전히 다른 것을 알 수 있다. 따라서, 식(8)은 최대복원력의 개략적인 추산에는 유용하지만, 엇갈림이 작은 경우에 있어서의 미소변위시의 복원강성에 대해서는 어떠한 정보도 제공하지 못한다. 이는,

식(8)의 계산 모델에 있어서, 전기장이 부상용 전극과 부상체의 중첩되는 부분 이외에는 존재하지 않는다고 가정함으로써, 전기장의 프린지 필드 효과를 무시하였기 때문이다. 복원력은 차분법이나 유한요소법, 표면전하법, 전하중첩법 등과 같은 수치계산법을 이용함으로써 보다 정확하게 구할 수 있으나, 이는 본 논문의 핵심사항이 아니므로 이에 대한 자세한 기술은 생략하도록 한다. 즉, 본 논문은 판상체의 횡방향 복원력을 측정하기 위한 저가의 측정기법 및 측정장치의 개발에 관한 것으로, 본 장치의 유효성을 입증하기 위해서는 실측치와 이론식에 의한 복원력 값을 엇갈림량이 큰 경우에 대해서만 비교하는 것으로도(엇갈림량이 큰 경우 전기장의 프린지 필드 효과는 매우 작아져 식(8)도 정확한 복원력값을 제시함) 충분한 것으로 판단된다. Fig. 7 로부터 엇갈림량이 큰 경우 본 실험장치를 이용한 실측치와 식(8)에 의한 계산치가 꽤 일치함을 알 수 있고, 이로부터 본 논문에서 제시하는 저가의 측정기법 및 측정장치가 판상체의 횡방향 복원력을 측정하는 데에 매우 유효함을 알 수 있다. 따라서, 엇갈림량이 작은 경우(실제의 정전부상시스템에 있어서 엇갈림량은 수 mm 정도이고 그 이상 엇갈리는 경우 부상력의 부족 등으로 인해 부상체는 불안정해짐)에 있어서의 복원력 및 복원강성 등은 본 실험장치를 이용하여 간단히 측정해 낼 수 있다. Table 1 에 측정된 최대복원력과 미소엇갈림시의 복원강성을 나타내었다. 여기서, 복원강성으로는 엇갈림량이 1mm 일 때까지의 복원력 그래프의 기울기값을 취하였다.

Fig. 7 의 측정결과를 보면, 부상갭이 0.4mm 로 동일할 때, 부상용 전극에의 인가전압이 클수록 복원력이 커짐을 알 수 있다. 또한, 부상용 전극에의 인가전압이 0.8kV 로 동일할 때에는 부상갭이 작을 수록 복원력이 커짐을 알 수 있다. 이는 식(8)로부터도 추정할 수 있는 결과이다. 한편, 부상갭 0.4mm, 인가전압 1kV 일 때와 부상갭 0.3mm, 인가전압 0.8kV 일 때의 부상체의 축방향 정전흡인력은 거의 동일하다. 그러나, 부상체의 횡방향 복원력은, 그림으로부터 알 수 있듯이, 부상갭 0.4mm, 인가전압 1kV 일 때가 보다 크게 나타난다. 이는, 2.2 절에서 설명한 바와 같이, 부상갭을 크게 하고, 그 만큼 전극에의 인가전압을 크게함으로써, 보다 큰 복원력이 얻어지기 때문이다.

한편, 식(7)과 식(8)을 보면, 알루미늄 디스크와

같은 도우넛 형상의 디스크에 있어서의 횡방향 복원력은 실리콘 웨이퍼와 같이 속이 꽉 찬 내부 원이 없는 디스크에 있어서의 횡방향 복원력보다 횡방향 엇갈림량에 따라 그 크기는 다르지만 전반적으로 더 크게(외경이 같다는 조건하에) 나타난다는 것을 알 수 있다. 따라서, 내부 원이 없는 디스크에 있어서의 횡방향 복원력 그래프는 Fig. 7의 복원력 그래프와 그 형태는 유사하고 단지 전체적으로 복원력이 작게(외경이 알루미늄 디스크와 같은 경우) 나타날 것임을 쉽게 예상할 수 있다.

Table 1 Maximum restoring forces and stiffness

Gap length [mm]	Voltage [kV]	Max. restoring force [10^{-3} N]	Stiffness [N/m]
0.4	1.0	1.20	0.44
0.4	0.8	0.84	0.33
0.3	0.8	1.05	0.41

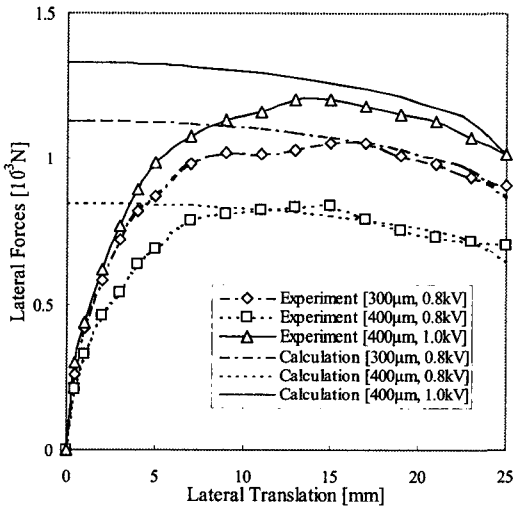


Fig. 7 Measurement result of lateral forces

5. 결론

본 논문에서는, 얇은 판상체의 정전부상시스템에 있어서 부상체의 반경방향 운동의 수동안정화에 기여하는 횡방향 복원력 및 복원강성을 측정하기 위해 저가의 정밀 측정시스템을 개발하고, 이를 이용하여 HDD 용 3.5 인치 알루미늄 디스크에 대한 복원력 및 복원강성 측정실험을 수행하였다.

판상체의 정전부상시스템에 있어서 부상체의 수평면내 2 자유도 운동에는 안정적인 횡방향 복원력이 작용하기 때문에, 이를 안정화하기 위한 별도의 구속기구를 설치할 필요가 없다. 부상체의 바로 위에 다수의 평면전극을 배치하고 이에 인가되는 전압을 능동적으로 제어, 부상체의 3 자유도 운동(수직운동과 피칭, 롤 운동)만을 능동제어함으로써 완전 비접촉 부상이 가능해진다. 정전부상시스템에서는 이와 같이 부상체의 횡방향 운동에 구속력이 존재하므로, 정전부상기구를 로봇 등의 운송기구에 부착하여 부상체를 부상시킨 상태에서 운송할 때, 별도의 횡방향 구속기구를 설치하지 않아도 부상체가 횡방향으로 미끄러져 떨어질 염려가 없다. 따라서, 부상체를 주위로부터 완전 비접촉시킨 상태에서 운송하는 것이 가능하게 된다.

후 기

이 논문은 2002 년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Rhim, W. K., Chung, S. K., Barber, D., Man, K. F., Gutt, G., Rulison, A. and Spjut, R. E., "An Electrostatic Levitator for High-Temperature Containerless Materials Processing in 1-g," Review of Scientific Instruments, Vol. 64, No. 10, pp. 2961-2970, 1993.
- Jin, J., Higuchi, T. and Kanemoto, M., "Electrostatic Levitator for Hard Disk Media," IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. 42, No. 5, pp. 467-473, 1995.
- Knoebel, H. W., "The Electric Vacuum Gyro," Control Engineering, Vol. 11, pp. 70-73, 1964.
- Kumar, S., Cho, D. and Carr, W. N., "Experimental Study of Electric Suspension for Microbearings," IEEE/ASME J. Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 23-30, 1992.
- Jeon, J. U., Jin, J. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of 8-inch Silicon Wafer," Proc. Inst. Electrostat. Jpn., Vol. 21, No. 2, pp. 62-68, 1997.
- Jeon, J. U. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of Dielectrics," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, pp. 938 - 946, 1998.