

정전부상시스템의 설계

전종업[#]

Design of Electrostatic Suspension System

Jong Up Jeon[#]

ABSTRACT

Electrostatic forces have an advantage of directly levitating not only non-ferromagnetic metals but also semi-conductors, such as silicon wafers, and dielectric materials like glass. This paper describes the characteristics of electrostatic forces and electrostatic suspension system, followed by the basic principle of 1-DOF(degree of freedom) electrostatic suspension system, and the structures of electrodes-for-suspension and voltage supplying methods to the electrodes in 1-DOF model. This paper also discuss about the minimum number of electrodes needed to control n -DOF motion of the suspended object and represents some desirable electrode patterns to stabilize the 6-DOF motion of the object. In the near future, electrostatic suspension system is expected to be applied to industrial manufacturing processes, for example, to the manufacture of semiconductor devices and/or flat panel display devices.

Key Words : Electrostatic suspension (정전부상), Electrostatic force (정전기력), Contactless support (비접촉 지지), Silicon wafer (실리콘 웨이퍼), Flat panel display (평면 디스플레이)

1. 서론

물체에 기계적 접촉력을 가하지 않고 공중에 비접촉 부상시키는 기술은 에너지의 절약, 제품의 고품질화, 기기성능의 고도화 등 여러 가지 측면에서 매우 중요한 기술이다. 주위환경으로부터 물체를 완전히 비접촉 지지함으로써 많은 경우에 있어서 문제가 되는 마찰, 마모문제가 완전히 해결되며 또한 부상체와 주위환경간의 바람직하지 못한 상호작용(interaction)을 방지할 수 있어 여러 가지 측면에서 시스템의 효율을 높일 수가 있다. 더불어 기계적 접촉 시에 제품, 환경 오염의 원인이 되는 먼지발생을 억제할 수 있다.

종래의 비접촉 지지기구에 있어서 ¹ 부상력으로는 주로 자기력, 유체력, 또는 초음파력 등이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 힘들은 환경, 부상물체의 특성에 따라 그 용도가 제한된다. 자기력의 경우 그 부상력은 다른 힘에 비해 상당히 크지만 부상체가 자성체에 국한되는 단점을 가지고 있고, 유체력은 부상하고자 하는 물질의 종류에 제한이 없지만 초청정 환경, 진공 환경에서는 사용이 곤란하며, 초음파력은 부상력이 극히 작아 실용적 측면에서 사용이 제한되는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 정전기력은 초청정 환경, 진공 환경 등 특수한 환경에서도 사용이 가능하고 하드 디스크, 실리콘 웨이퍼, 유리 판넬 등과 같은 판상체(板狀

접수일: 2007년 9월 5일; 게재승인일: 2008년 3월 13일

[#] 교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail: jujeon@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2139

體)의 경우 실용적으로 사용 가능한 충분한 크기의 부상력을 낼 수 있으며 도체, 반도체, 비자성체, 절연체 등 거의 모든 종류의 물체에 부상력을 가할 수 있는 장점을 가지고 있다.

정전기력을 이용하여 물체를 비접촉 지지하기 위한 연구로써, Knoebel²은 플라리스 잠수함용 항법 안내장치로서 정전부상형 진공자이로를 개발하였고, Kumar 등^{3,4}은 마이크로 액추에이터의 마찰문제를 해결하기 위해 정전기력에 의한 회전자의 비접촉 지지기구를 제안하였다. Rhim 등⁵은 고온 고진공 환경 하에서의 물질연구에 정전부상을 이용하였으며 Toda 등⁶과 Houlihan 등⁷은 고정도의 마이크로 가속도 센서를 개발하기 위해 각각 구형상과 디스크 형상의 표준질량(proof mass)을 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하였다. Jin 등⁸은 4 인치 실리콘 웨이퍼를 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하였고, 이후 Jeon 등은 반도체 제품 또는 LCD(Liquid Crystal Display), PDP(Plasma Display Panel) 등과 같은 평면디스플레이의 제조공정에 사용하기 위한 비접촉 지지기구의 개발을 목표로 8 인치 실리콘 웨이퍼,⁹ 크기 100×100 mm² 인 유리판넬¹⁰을 정전기력을 이용하여 부상하는데 성공하였다. 한편 Jeon 등은 실리콘 웨이퍼 또는 유리판넬을 정전기력을 이용하여 단순히 비접촉 지지하는데 그치지 않고 이 들을 부상시킨 상태에서 원하는 위치까지 비접촉 반송하는 비접촉 지지/반송시스템을¹¹⁻¹³ 개발하였다. 또한 릴레이 제어법을 이용한 매우 저가의 정전부상시스템을 개발하여 4 인치 실리콘 웨이퍼¹⁴와 두께 0.1mm의 매우 얇은 알루미늄 시트¹⁵를 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하는 데에 성공하였다. 정전부상시스템에 관한 연구개발은 이상에서 기술한 바와 같이, 현재 저자 등을 중심으로 활발히 진행 중에 있으며 머지않은 장래에 산업현장에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문은 정전부상시스템에 관한 연구를 시작하고자 하는 연구자들이 정전부상시스템의 특징, 기본 원리, 구성, 필요 전극수 및 전극 구조 등을 쉽게 이해할 수 있도록 하기 위해 작성된 것이다. 본 논문에서는 우선 정전기력 및 이를 이용한 정전부상시스템을 자기력 및 자기부상시스템과 비교해 가면서 정전기력 및 정전부상시스템이 가지는 특성 및 장단점에 대하여 기술한다. 그리고 1 자유도 정전부상 모델을 이용하여 정전부상의 기본원

리에 대해 상세히 기술하고 1 자유도 부상용 전극의 구조 및 전압인가방법에 대하여 기술한다. 또한 정전부상시스템에 있어서 부상체의 n 자유도 운동을 제어하기 위해 필요로 하는 최소 전극수에 관해 논하고 부상체의 6 자유도 운동을 전부 안정화시키기 위한 전극의 구조에 대하여 기술한다. 단, 본 논문의 정전부상시스템에 있어서 부상체는 실리콘 웨이퍼, 하드 디스크, 유리 판넬 등과 같은 얇은 판상체로 국한한다. 본 논문의 2 장의 내용은 기존 문헌에 나와 있는 내용과 정전부상에 관한 그 동안의 저자의 연구 경험을 토대로 작성한 것이고, 3 장 및 4.3 절, 4.4 절은 기존에 발표된 연구 결과를 정리한 것이며, 4.1 절과 4.2 절은 본 논문을 통해 연구한 결과이다.

2. 정전부상과 자기부상의 비교¹⁶

전기장과 자기장의 유사성으로부터 정전기력은 자기력과 상당히 유사한 특성을 나타낸다. 본 장에서는 부상대상물, 정전기력의 크기, 액추에이터의 구조, 제어계, 효율 등의 관점에서 정전기력 및 이를 이용한 비접촉 지지기구에 대하여 자기력과 대비하면서 그 특성에 대해 기술하고자 한다. 현재 자기력을 이용한 비접촉 지지기구가 다양한 형태의 자기부상시스템이 개발되어 있는데, 그 중 정전부상과 가장 유사한 형태를 취하고 있는 것은 상전도전자석을 이용한 흡인제어방식이다. 따라서 본 논문에서는 정전부상과의 비교 대상으로 많은 형태의 자기부상방식 중 주로 상전도전자석을 이용한 흡인제어방식을 택하였으며, 본 장에서는 특별히 언급하지 않는 한 자기부상방식은 상전도전자석을 이용한 흡인제어방식을 의미한다.

2.1 부상대상물¹⁶

자기장에는 항상 쌍극자만이 존재하며 정 또는 부의 고립된 단극자하(單極磁荷)를 만들어 낼 수 없기 때문에 전류와의 상호작용인 전자기력을 제외하면 물체에는 구배력(gradient force)만이 작용하게 된다. 따라서 일반적으로 자기장안에서는 강자성체만을 핸들링할 수 있다. 이에 반해 전기장에서는 단극전하(單極電荷)가 존재하고 이를 자유자재로 대상물체에 부여할 수 있기 때문에 물체의 종류에 제한되지 않고 구배력보다 훨씬 강력한 쿨롱력(coulomb force)을 이용하여 물체를 핸들링할

수 있다. 또한 전하를 대상물체에 부여하지 않아도 물체의 미약한 도전성 또는 분극현상 등을 이용하여 물체에 정전기력을 작용시킬 수 있다. 따라서 정전기력의 경우에는 도체뿐만 아니라 실리콘 웨이퍼와 같은 반도체(저항체), 유리 기판과 세라믹 기판 등과 같은 절연체에 대해서도 그 힘을 작용시키는 것이 가능하다.

2.2 정전기력의 크기¹⁶

본 절에서는 정전기력이 자기력에 비해 상대적으로 어느 정도 크기인가에 대하여 기술하고 정전기력이 부상기에 실용적으로 사용 가능한 충분한 부상력을 제공할 수 있는지에 대해 알아보고자 한다.

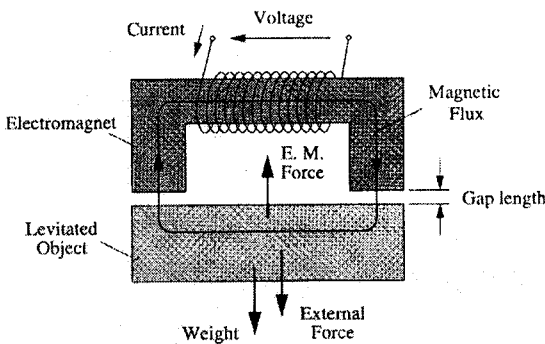


Fig. 1 Electromagnetic levitation: E.M. means 'electromagnetic'

Fig. 1에 도시한 자기부상시스템에 있어서 단위면적당 발생하는 자기력 f_m 은

$$f_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \quad (1)$$

와 같다. 여기서, B 와 μ 는 각각 자속밀도(magnetic flux density)와 간극 매질의 투자율(대기 중에서 약 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$)을 나타낸다. Fig. 1과 같은 철심을 이용한 상전도(常電導)전자석의 경우 B 의 크기는 철심의 자기포화에서 의해 그 최대값이 정해지며 그 값은 대략 $B_{max}=1\text{T}$ 정도이다. 따라서 대기 중에서 f_m 의 최대값은 $(f_m)_{max}=3.98 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 와 같다. 한편 본 논문에서 다루는 정전부상시스템에 있어서 단위면적당 발생하는 정전기력 f_e 는

$$f_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad (2)$$

와 같다. 여기서 E 와 ϵ 은 각각 전기장의 세기 및 간극 매질의 유전율(대기 중에서 약 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$)을 나타낸다. E 의 크기는 매질의 절연파괴(방전)에 의해 그 최대값이 정해지며 대기 환경하의 매크로 크기의 디바이스에 있어서 그 값은 대략 $E_{max}=3 \times 10^6 \text{V/m}$ 정도이다. 따라서 대기 중에서 f_e 의 최대값은 $(f_e)_{max}=3.98 \times 10^1 \text{N/m}^2$ 와 같다. 이상의 계산결과로부터 $(f_m)_{max}=10,000 \times (f_e)_{max}$ 임을 알 수 있다. 즉, 매크로 세계에 있어서 정전기력은 자기력보다 약 10,000 배 정도 작다. 이것이 전기-전기 또는 전기-기계 에너지 변환, 강력한 힘으로 흡인하는 장치 등에 있어서 현재까지 주로 자기장에 의한 힘이 사용되고 있는 근본적인 이유이다.

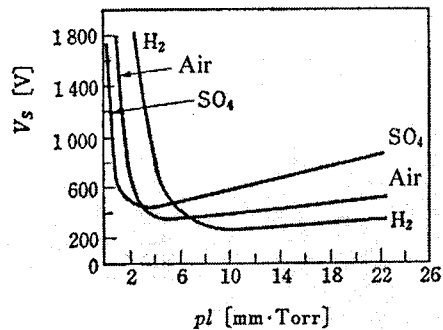


Fig. 2 Breakdown voltage(V_s) versus gap length(l) multiplied by gas pressure(p)¹⁶

그러나 전극간 간격이 매우 작은 마이크로 분야 또는 진공환경에서 디바이스가 작동할 때에는 상기의 비교가 달라지게 된다.¹⁷ 파셴의 법칙(Paschen' law)에 따르면 서로 마주보는 두 개의 평행판의 평등전계에 있어서 절연파괴가 일어나는 전기장의 세기(또는 방전전압)은 기압 p 와 전극간 간격 l 의 곱이 작아짐에 따라 급격히 증가한다. Fig. 2는 방전전압 V_s 와 pl 간의 관계를 나타낸 것이다. 기압이 일정할 때, 방전이 일어나는 전압(또는 전기장의 세기)은 간격이 작아질수록 현저하게 높아진다. 즉, 간격이 작아짐에 따라 상기한 $E_{max}=3 \times 10^6 \text{V/m}$ 보다 훨씬 큰 세기의 전기장을 가할 수 있는 것이다. 한 예로, 정전 액추에이터에 있어서 두 개의 전극간에 방전현상이 발생하지 않

고 $1.7 \times 10^8 \text{V/m}$ 크기의 전기장을 가한 예가 있다.¹⁷ 그 경우, $f_e = 1.8 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 로 자기력과 거의 동등한 최대 흡인력이 얻어진다. 이것이 최근 마이크로 및 나노 액추에이터 분야에 있어서 정전기력이 많이 사용되고 있는 이유 중의 하나이다. 한편 Fig. 2 에 나타난 바와 같이, 저기압 범위에서 방전전압은 기압이 낮아질수록 높아진다. 따라서 최대흡인력을 증가시키기 위해서는 진공환경이 바람직하며 정전부상은 대기환경보다 진공환경에서 사용함으로써 그 효과가 더 크게 발휘된다.

정전기력은 물체의 표면에 작용하는 표면력으로 대기 중의 매크로 세계에서 그 크기는 약 40N/m^2 정도에 불과하여 그다지 큰 힘이라고는 할 수 없다. 따라서 부상대상물로는 일반적으로 중량 대비 표면적 비율이 큰 물체, 즉, 미립자, 섬유, 판상체, 중공(中空)의 물체 등이 바람직하다. 한편 실리콘 웨이퍼, 유리 판넬과 같은 판상체의 윗면에 이와 마주보도록 전극을 배치하고 이에 전압을 인가함으로써 정전기력에 의해 끌어올릴 수 있는 판상체의 최대 두께가 어느 정도인지 알아보자. 이 두께는 판상체의 밀도에 의존한다. Table 1 은 여러 가지 재질에 대해 부상 가능한 두께를 계산한 것이다. 실리콘의 경우는 두께 1.8mm 까지, 유리의 경우는 두께 1.6~1.8mm 까지 부상 가능함을 알 수 있다. 실제 반도체, LCD, PDP 등의 평면 디스플레이 산업현장에서 주로 사용되고 있는 실리콘 웨이퍼, 유리 판넬의 두께가 대략 1mm 이하인 것을 감안하면 정전기력이 대기 중에서 판상체를 비접촉 지지하는 데에 실용적으로 충분히 큰 부상력을 제공함을 알 수 있다. 기술한 파센의 법칙으로부터 알 수 있듯이 부상 간격을 아주 작게 하거나 또는 기압을 낮게 함으로써 이보다 훨씬 두꺼운 판상체를 부상할 수 있음에는 이론의 여지가 없다.

Table 1 Maximum thicknesses of materials to be suspended by electrostatic forces in air environment

Materials	Mass density(g/cm^3)	Maximum thickness(mm)
Silicon	2.25	1.78
Soda-lime glass	2.5	1.6
Quartz glass	2.2	1.82
Aluminium	2.69	1.49
Steel	7.86	0.51

2.3 액추에이터의 구조

흡인제어방식 자기부상에 있어서, 상전도전자석은 철심과 코일로 구성된 복잡한 3 차원 구조를 하고 있어서 제작이 용이하지 않고 초전도방식 자기부상에 있어서는 초전도체를 항상 냉각해야만 하므로 그 구조는 더욱 복잡하다. 또한 자기부상장치를 진공환경하에서 사용할 때 자성체는 가스를 방출하므로 그대로는 사용할 수 없다. 따라서 자성체부분을 진공 챔버의 외측에 배치하거나 또는 완전히 실링(sealing)할 필요가 있고, 이 경우 액추에이터의 구조는 한층 복잡하여 진다. 이에 반해 정전부상의 경우 전극은 평면구조를 가지므로 그 구조가 매우 간단하고 에칭기술 등을 이용하여 손쉽게 제작할 수 있다. 이와 같이 액추에이터의 구조 측면에서 생각해 보면 정전 액추에이터는 자기 액추에이터에 비해 훨씬 간단한 구조를 가지며 경량이고 또한 제작이 매우 용이함을 알 수 있다.

2.4 제어계

정전부상과 자기부상에 이용되는 액추에이터는 그 특성이 매우 유사하다. 정전부상에 있어서의 전극은 자기부상의 상전도전자석에 대응되며 이들 각각에 의해 부상체에 작용하는 정전 및 자기흡인력의 모델링은 매우 비슷한 형태를 가지고 있다. 따라서 정전부상의 제어계는 자기부상과 매우 유사하게 구성된다. 정전부상은 상전도흡인식 자기부상과 몇 가지 점에서 다른 특성을 가지는데, 이를 간단히 언급하면 다음과 같다. 상전도흡인식 자기부상의 경우 센서리스(sensorless)부상¹⁸ 과 같은 특수한 경우를 제외하면 코일에 흐르는 전류를 능동적으로 제어하는 것이 일반적이지만, 정전부상의 경우는 전극 인가전압을 능동적으로 제어함으로써 계의 안정화를 꾀한다. 따라서 자기부상에서는 전류증폭기가, 정전부상에서는 고전압증폭기가 필요하다. 이 고전압증폭기는 비교적 고가이므로 정전부상장치의 가격을 상승시키는 원인이 되고 있다. 또한 정전부상에서는 충분한 부상력을 얻기 위해 고전압(약 1kV)을 이용하기 때문에 이에 대한 안전대책을 세워야 하는 단점이 있다. 그러나 정전부상에서는 자기부상에 존재하는 히스테리시스(hysteresis) 또는 맴돌이 전류(eddy current) 등과 같은 것의 영향이 없기 때문에 제어계를 보다 간단히 구성할 수 있고 보다 정밀한 제어를 수

행할 수 있다.

2.5 효율

상전도흡인식 자기부상의 경우 영구자석을 도입함으로써 제로파워(zero power) 제어를 실현한 예가 있긴 하지만 일반적으로 코일에는 항상 암페어 크기의 정상 전류(바이어스 전류)가 흐르기 때문에 지속적인 파워 손실이 발생한다. 또한 이 때 발생하는 열은 자기부상계를 진공환경에서 사용할 때 문제를 일으킨다. 게다가 자기부상의 경우 부상체의 내부에서는 맴돌이 전류에 의한 전류손실이, 자성체에서는 히스테리시스 손실이 발생한다. 반면 정전부상의 경우 정상상태에 있어서 전극에는 항상 정상전압(바이어스 전압)이 인가되고 있지만 전극과 부상체는 일정한 간격을 사이에 두고 있기 때문에 이 둘 사이에 흐르는 전류는 수 μA ~수백 μA 크기이고, 따라서 발생하는 파워손실은 극히 미미하다. 이로부터 효율이라는 측면에서 볼 때 정전부상이 자기부상보다 유리함을 알 수 있다.

Table 2 는 정전부상과 자기부상을 비교 정리한 것이다.

Table 2 Comparison of electrostatic suspension with electromagnetic levitation

Contents	Electrostatic suspension	Electromagnetic levitation
Objects	All materials (conductors, semiconductors, dielectrics, etc.)	Ferromagnetic materials
Attractive force (in air)	Small (40 N/m^2)	Large ($4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)
Control variable	Voltage	Current
Structure	Simple	Complex
Heat generation	Small	Large
Size effect	Small size is better	Large size is better
Applications	Expected to be used in semiconductor and flat panel display manufacturing process	Turbo-molecular pump, machine tool spindle and transportation system

3. 정전부상의 원리

3.1 정전흡인력⁹

Fig. 3 과 같이 평행하게 배치된 두 장의 도체판에 전위차 V^* 를 인가하는 경우, 이 두 장의 도체판 사이에 작용하는 정전흡인력을 구해 보자. 전기장이 도체판간의 중첩되는 부분에만 존재하고 또한 균일(homogeneous)하게 분포되어 있다고 가정하면(대부분의 정전부상시스템에 있어서 중첩되는 부분의 면적은 도체판간의 간격에 비해 충분히 크기 때문에 이 가정은 만족된다), 가상일(virtual work)의 원리로부터 정전기력 F^* 는 다음과 같이 구해진다.

$$F^* = \frac{1}{2} \epsilon A \left(\frac{V^*}{z^*} \right)^2 \tag{3}$$

단, A , V^* , z^* 는 각각 도체판간의 중첩되는 부분의 면적, 도체판간 전위차 및 거리이다. 상기 식으로부터 F^* 는 z^* 의 2 승에 반비례함을 알 수 있다. 이 F^* 의 z^* 에 대한 변화율을 구해보면

$$\frac{\partial F^*}{\partial z^*} < 0 \tag{4}$$

와 같다. 이로부터 일정한 크기의 전압을 이용하는 경우에 부상시스템은 불안정한 거동을 보임을 알 수 있다. 따라서 물체의 안정적 부상을 위해서는 도체판간의 전위차, 즉 정전흡인력을 능동적으로 제어해야 한다.

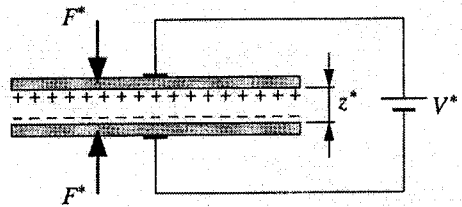


Fig. 3 Electrostatic attractive force

3.2.1 자유도 정전부상시스템의 운동방정식⁹

정전부상의 원리에 대하여 Fig. 4 의 1 자유도 정전부상시스템을 이용하여 설명한다. 부상체에는 중력 mg 이외에 외력 F_e^* 와 정전기력 F^* 가 작용한다. 이 중력 및 외력과 균형을 이루도록 정전기력을 제어함으로써 부상체는 공중에 부상하게 된다.

이 부상체에 정전기력을 부여하기 위해 부상체의 바로 위에 설치된 전극에는 전압 V^* 가 인가된다. 이하의 해석에 있어서 부상체의 전위는 0V 로 가정하며 또한 부상체는 도체 또는 반도체이고 그 저항 값은 제로로 가정한다.

Fig. 4로부터, 부상체의 운동방정식은

$$m\ddot{z}^* = -F^* + mg + F_e^* \quad (5)$$

와 같다. 상기 식과 식 (3)으로부터 부상체는 비선형 운동특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 선형 제어이론을 적용하기 위해 평형점 근처에서의 미소변화를 고려하여 상기 식의 선형화를 수행한다. 선형화를 위해

$$z^* = z_0 + z, \quad V^* = V_0 + V, \quad F_e^* = F_{e0} + F_e \quad (6)$$

라 하자. 여기서, z_0, V_0, F_{e0} 는 각각 변위, 전압, 외력의 평형상태에서의 정상치(定常值)이고, z, V, F_e 는 각각에 대한 미소 변화분이다. 식 (3)의 정전기력 F^* 를 테일러(Taylor) 전개한 후, 제 1 항까지만을 취하면

$$F^* \approx F_0 - k_s z + k_v V \quad (7)$$

와 같다. 여기서, F_0 는 정상흡인력을, k_s 와 k_v 는 선형화 계수를 나타내고 각각

$$\begin{aligned} F_0 &= F^*(z_0, V_0) = \frac{1}{2} \epsilon A \left(\frac{V_0}{z_0} \right)^2 \\ k_s &= \frac{\partial F^*(z_0, V_0)}{\partial z^*} = \epsilon A \left(\frac{V_0^2}{z_0^3} \right) \\ k_v &= \frac{\partial F^*(z_0, V_0)}{\partial V^*} = \epsilon A \left(\frac{V_0}{z_0^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

와 같다. 식 (5), (6), (7)로부터 부상체의 운동방정식은

$$m\ddot{z} = -F_0 + k_s z - k_v V + mg + F_e \quad (9)$$

와 같다. 단, 본 논문에 있어서는 부상체를 시불변

(時不變)의 목표 간격 z_0 에 레귤레이션(regulation) 하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 $\dot{z}_0 = 0$ 로 가정하였다. 또한 $F_{e0} = 0$ 로 가정하였다.

정상상태에서 $z=V=F_e=0$ 로 두면 평형점에서의 각 정상치 사이에는

$$F_0 = mg \quad (10)$$

가 성립한다. 상기 식으로부터 목표 간격 z_0 가 주어졌을 때 전극에 인가되는 바이어스전압 V_0 가 구해진다. 식 (8)과 식 (10)으로부터 이 바이어스 전압 V_0 를 구하면

$$V_0 = z_0 \sqrt{\frac{2mg}{\epsilon A}} \quad (11)$$

가 얻어진다. 식 (9)와 식 (10)으로부터 부상체의 선형운동방정식을 구하면

$$m\ddot{z} = k_s z - k_v V + F_e \quad (12)$$

와 같다. 이 식으로부터 전극에의 인가전압 V 의 능동적인 제어 없이는 이 정전부상시스템은 불안정한 시스템임을 알 수 있다.

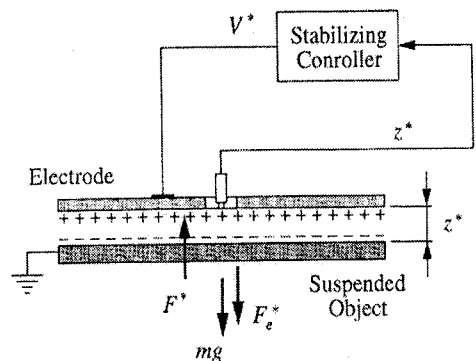


Fig. 4 Electrostatic suspension system with one degree of freedom

3.3 피드백제어에 의한 계의 안정화

정전기력을 이용한 부상시스템은 본래 불안정한 시스템이기 때문에 적절한 방법으로 안정화를 꾀하여야 한다. 여기서는 일반적으로 많이 사용되

고 있는 PID(Proportional-Integral-Derivative) 피드백 제어법에 의한 계의 안정화에 대하여 기술한다. PID 제어시 전극에 인가되는 제어전압 V 는

$$V = K_p z + K_D \dot{z} + K_I \int z dt \quad (13)$$

와 같다. 단, k_p, k_D, k_I 는 각각 비례, 미분, 적분 계인 (gain)이다. 이 PID 제어 수행시의 폐루프시스템 (closed-loop system)의 블록선도(block diagram)는 Fig. 5 와 같다. 이 그림에 있어서 r 은 변위의 목표치를 나타내는 것으로 부상체를 특정의 위치에 레글레이션시키는 경우에는 0으로 한다.

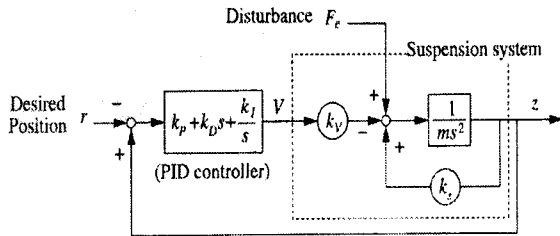


Fig. 5 Block diagram of closed loop control system with one degree of freedom

부상계를 안정화시키기 위해서는 상기의 피드백 계인을 계가 안정하게 되도록 정해 주면 된다. 안정적인 부상을 얻기 위한 피드백 계인의 범위를 라우스·프루빗의 안정판별법을 적용하여 구하면

$$k_D > 0, \quad k_I > 0$$

$$k_p > \frac{k_s}{k_v} + \left(\frac{k_I}{k_D} \right) / \left(\frac{k_v}{m} \right) \quad (14)$$

와 같다. 상기 식으로부터 적분제어를 사용하는 경우 비례계인의 범위는 미분계인과 적분계인의 값에 관계하지만 적분제어를 사용하지 않는 경우 비례계인의 범위는

$$k_p > \frac{k_s}{k_v} \quad (15)$$

와 같고 미분계인의 값과는 무관하게 됨을 알 수 있다. 식 (14) 또는 (15)을 만족하는 계인값을 설정

함으로써 안정적인 부상시스템이 얻어진다.

4. 부상용전극의 설계

4.1 1 자유도 부상용전극의 구조 및 전압인가 방법

이상에서는 정전부상의 기본원리를 이해하기 쉽게 하기 위해 부상체의 전위가 0V 라고 가정하였다. 그러나 실제의 정전부상시스템에 있어서 부상체는 외부와 직접적인 접촉을 할 수 없으므로 전선 등을 이용하여 인위적으로 부상체가 0V의 전위를 가지도록 하는 것은 곤란하다. 즉, 실제에 있어서 부상체는 주위에 설치된 전극들의 기하학적 형상, 부상체와 주위 전극간 거리, 주위 전극의 전위 등에 의해 정해지는 어떤 전위값을 가지게 된다.

Fig. 4 와 같이 1 개의 부상용 전극만을 부상체의 바로 위에 설치하고 이 전극에 전압을 인가하는 경우(단, 부상체는 접지되어 있지 않음), 부상체에 어느 정도의 정전흡인력이 작용하는지 생각해 보자. Fig. 6 에 도시한 바와 같이, 전극과 부상체간의 정전용량을 C^* , 부상체와 무한원점(遠点)에 있는 그라운드(ground)간의 정전용량을 C_∞^* 라고 하면 부상체의 전위 V_f^* 는

$$V_f^* = \frac{C^*}{C^* + C_\infty^*} V^* \quad (16)$$

와 같다. 단, V^* 는 전극에 인가되는 전압이다. 상기 식의 전위 V_f^* 와 V^* 의 차 ($V_f^* - V^*$)를 식 (3)의 V^* 에 대입함으로써 1 개의 부상용 전극만을 사용한 경우에 있어서 부상체에 작용하는 정전흡인력을 구할 수 있다. 실제 시스템에 있어서 그라운드는 부상체로부터 먼 거리에 위치해 있으므로 $C_\infty^* \approx 0$ 이다. 따라서 부상체의 전위 V_f^* 는 $V_f^* \approx V^*$ 이고, 이로부터 부상체에 작용하는 정전흡인력은 무시할 수 있을 정도로 작음을 알 수 있다. 즉, 전극 1 개만으로는 충분한 정전흡인력을 얻을 수 없고 부상체에 충분한 정전흡인력을 가하기 위해서는 부상체의 주위에 2 개 이상의 전극을 배치하여 부상체와 전극간에 충분한 크기의 전위차가 발생하도록 하여야 한다. 한편 관점을 바꾸어서 생각해 보면 Fig. 6 에 있어서 그라운드는 0V 가 인가되는 1 개

의 전극으로 간주될 수 있다. 그 경우 Fig. 6 은 사실상 2 개의 전극을 사용하고 있는 것으로 볼 수 있다. 앞의 예에 있어서 충분한 정전흡인력을 얻을 수 없었던 이유는 전극의 수가 아니고 그라운드 전극의 위치에 있다.

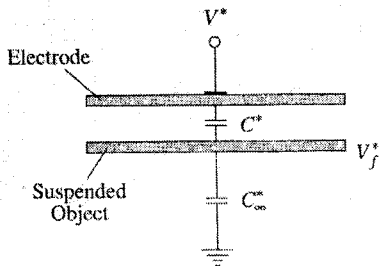


Fig. 6 Capacitance model in case of one stator electrode

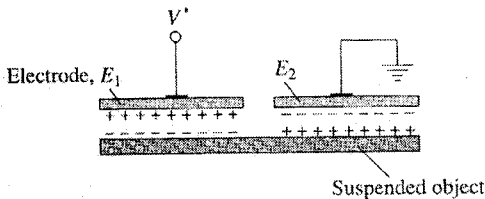


Fig. 7 Electrostatic suspension system with two stator electrodes having same areas where one electrode is grounded

Fig. 7 은 그라운드 전극을 전압 V^* 가 인가되는 전극과 동일 평면상에 배치한 경우이다. 이러한 구성을 취함으로써 그라운드 전극과 전압 V^* 가 인가되는 전극의 면적이 동일하다고 가정하면 부상체의 전위는 $(V^*/2)$ 가 되고, 따라서 충분한 크기의 부상력이 얻어질 수 있다. 그러나 부상체가 0V 가 아닌 $(V^*/2)$ 의 전위를 가지기 때문에 특히 부상체의 전위를 0V 로 유지해야 할 필요가 있는 경우에는 Fig. 7 과 같은 구성은 사용할 수 없다. Fig. 8 은 부상체의 전위를 0V 로 유지하면서 부상체의 수직방향 운동을 능동적으로 안정제어하기 위한 1 자유도 정전부상시스템의 바람직한 하나의 구성 예를 나타낸다. 이 부상계에 있어서 두 개의 전극 E_1 과 E_2 의 면적은 동일하며 부상체 바로 위의 동일 평면상에 배치된다. 각각의 전극에는 서로 반사극성의 전압, 예를 들어 전극 E_1 에는 양의 전압 V^* 가, 전극 E_2 에는 음의 전압 $-V^*$ 가 인가된다. 이와 같이

함으로써 부상체의 전위는 가상적으로(virtually) 0V 가 되고 부상체에는 식 (3)과 동일한 정전흡인력이 가해진다. 이 정전흡인력(즉, 전압 V^*)을 앞서 설명한 방법으로 부상 간격 z^* 에 근거하여 피드백 능동 제어함으로써 부상체의 안정적인 움직임을 얻을 수 있다. Fig. 7 에 비해 Fig. 8 은 절반 크기의 전압으로 같은 크기의 정전기력을 얻을 수 있는 장점을 가진다. 그러나 양극성의 전압을 사용하기 때문에 2 대의 고전압 증폭기 또는 고전압 전원을 필요로 하는 단점이 있다.

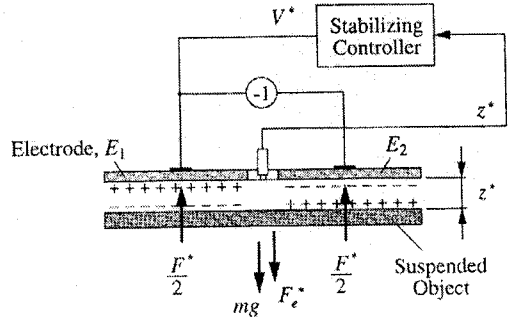


Fig. 8 One degree of freedom electrostatic suspension system with two stator electrodes

4.2 최소전극수

앞 절에서 기술한 바와 같이, 중력장에 있어서 부상체의 1 자유도 운동을 제어하기 위해서는 최소 2 개의 전극이 필요하다. 본 절에서는 n 자유도 운동을 제어하기 위해 필요로 하는 최소 전극수에 관하여 기술하고자 한다. Tsuda 에 의하면 흡인력 밖에 작용하지 않는(반발력은 작용하지 않는) 액추에이터 유닛을 이용하여 물체의 n 자유도 운동을 제어하려면 최소 $n+1$ 개의 독립된 액추에이터 유닛이 필요하다.¹⁹ 중력장에 있어서는 물체에 작용하는 중력도 1 개의 액추에이터 유닛이라고 할 수 있으므로, 이 경우 n 개의 액추에이터 유닛이 필요한 최소 갯수가 된다. 흡인제어방식 자기부상 시스템에 있어서 부상체를 통과하여 하나의 폐자기회로를 형성하는 1 개의 상전도전자석은 다른 전자석에 의해 형성되어 있는 다른 자기회로와 독립되어 있기 때문에 1 개의 독립된 액추에이터 유닛으로 작용한다. 즉, 자기부상에 있어서는 액추에이터 유닛간에 힘의 간섭이 없고, 따라서 n 개의 독립된 액추에이터 유닛을 얻기 위해서는 최소 n

개의 전자석을 사용하면 된다. 그러면 정전부상에 있어서도 n 개의 전극을 이용함으로써 n 개의 독립된 액추에이터 유닛이 얻어질 수 있을까? 정전부상의 경우 다수의 전극에 인가되는 전압을 각각 서로 독립되게 제어하여도 그들 전극에 의해 발생하는 정전기력간에는 경우에 따라서 간섭이 발생한다. 정전기력은 전극과 부상체간의 전위차에 관계하는데 이 때 부상체의 전위는 전극들의 전압에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 각 정전기력간의 간섭을 없애기 위해서는 부상체의 전위가 각 전극에의 인가전압의 변화에 관계없이 항상 일정한 값(0V 이면 편리하다)을 유지하도록 하면 된다. 전극을 n 개 만 사용할 경우 임의의 전극 하나의 전압이 변화되었을 때 부상체의 전위가 변화하게 되는 것은 자명하다. 부상체의 전위를 일정하게 유지하기 위한 한가지 방법은 자기부상과의 아날로지(analog)를 이용하여 도출할 수 있다. 자기부상에 있어서 한 개의 상전도전자석(Fig. 1)은 정전부상에 있어서 두 개의 전극(Fig. 8)에 상응한다. 이 두 개의 전극(전극 유닛이라 하자)은 부상체를 통해 하나의 전기회로를 형성한다. 이 전기회로를 다른 전극 유닛에 의해 형성된 전기회로로부터 독립되게 하려면 두 개의 전극에의 인가전압을 적절히 선택, 부상체의 전위가 전극에의 인가전압과 무관하게 일정한 값을 유지하도록 하면 된다. 예를 들면, 두 개의 전극의 면적이 같고 또한 그들 전극과 부상체간의 간격이 같은 경우, 두 개의 전극에 동일한 절대치를 가지는 반대극성의 전압을 각각 인가함으로써 부상체의 전위를 항상 제로 볼트로 유지할 수 있다. 이와 같이 함으로써 이 두 개의 전극은 한 개의 독립된 액추에이터로서 작용하게 된다. 그러나 이 경우 n 자유도를 제어하기 위해서는 $2n$ 개의 전극이 필요하게 된다. 부상체의 전위를 일정하게 유지하기 위한 또 하나의 방법으로는, 각 전극 유닛을 형성하는 두 개의 전극 중 한 개의 전극을 전부 취하여 한 개의 공통전극으로 하는 방법이 있다. 이 공통전극은 부상체의 전위를 일정치로 유지하는 데에 사용될 수 있고, 따라서 이 경우 n 자유도를 제어하기 위해 필요한 전극의 수는 $n+1$ 개로 줄어들게 된다. 이와 같이 $n+1$ 개의 전극을 이용하는 경우 부상체에는 $n+1$ 개의 장소에서 흡인력이 작용하지만, 공통전극에 의해 발생하는 힘은 다른 전극에 의해 발생하는 힘에 의존하기 때문에 결국 독립된 힘의 갯수는 n 개가 된다.

이상에서 논의한 바와 같이, 부상체의 n 자유도 운동을 제어하는 데에는 최소 n 개가 아닌 $n+1$ 개의 전극이 필요하다. 이를 검증하기 위해 Fig. 9 와 같이 부상체의 바로 위에 배치된 2 개의 전극의 인가전압이 서로 독립적으로 제어될 때, 각 전극과 부상체간에 작용하는 정전기력을 구하고 그들간에 발생하는 간섭을 조사해 보자. 전극 E_1, E_2 와 부상체간에 작용하는 정전흡인력 F_1^*, F_2^* 는 식 (3)으로부터

$$F_i^* = \frac{1}{2} \epsilon A_i \left(\frac{V_i^* - V_f^*}{z_i^*} \right)^2, \quad i=1, 2 \quad (17)$$

와 같다. 전기등가회로를 고려하면 부상체의 전위 V_f^* 는

$$V_f^* = \frac{C_1^* V_1^* + C_2^* V_2^*}{C_1^* + C_2^*} \quad (18)$$

와 같이 구해진다. 단, $C_i^* (i=1,2)$ 는 전극 E_i 와 부상체간의 정전용량으로

$$C_i^* = \frac{\epsilon A_i}{z_i^*}, \quad i=1, 2 \quad (19)$$

와 같다. $A_2 = a A_1$ 이라고 하고 식 (18)과 (19)를 식 (17)에 대입하여 정전흡인력을 구하면 이 들 F_1^*, F_2^* 사이에는

$$F_2^* = a F_1^* \quad (20)$$

와 같은 관계가 성립한다. 즉 F_1^* 과 F_2^* 는 서로 의존적(dependent)이기 때문에 이 들을 독립적으로 제어하는 것은 불가능하다. 이는 두 전극의 전압을 독립적으로 제어하여도 부상체의 2 자유도 운동을 제어하는 것이 불가능하다는 것을 의미한다. 이상으로부터 정전부상시스템에 있어서 최소 전극 수에 관한 다음의 정리가 성립한다.

「중력장에 있어서, 부상체의 n 자유도 운동을 제어하는 데에는 최소 $n+1$ 개의 전극이 필요하다」.

단, 상기의 정리는 전극의 위치와 전극에 의해 발생하는 힘의 방향을 설계자가 원하는 대로 설정할

수 있다는 가정(이 가정에는 부상체의 형태와 크기를 임의로 정할 수 있다는 가정도 포함됨)하에 성립되는 것이다. 이에 관한 자세한 사항은 문헌 19 번을 참고하기 바란다.

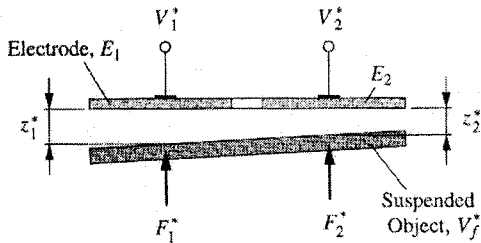


Fig. 9 Interference between the electrostatic forces

4.3.6 자유도 안정부상을 위한 전극수

물체가 공간상에 안정적으로 부상되기 위해서는 물체의 6 자유도 운동 전부가 안정적인 거동을 보여야 한다. 앞 절의 논의에 따르면 이 6 자유도 운동 전부를 능동적으로 제어하려면 최소 7 개의 전극이 필요하다. 그러나 부상체의 형상에 따라서는(예를 들어, 판상체의 경우) 7 개의 전극 전부를 사용하지 않아도 6 자유도 운동을 안정화할 수 있다. 이하, 이에 대해 설명한다.

2.2 절에서 기술한 바와 같이, 대기환경하의 매크로 세계에 있어서 정전기력은 그 힘이 상당히 약하기 때문에 정전부상시스템의 부상체로서는 중량 대비 표면적의 비가 큰 물체 즉 판상체 등이 적합하다. 물론 부상체의 밀도에 따라서는(예를 들면, 종이와 같은 가벼운 물체의 경우) 두꺼운 물체도 부상이 가능하다. 그러나 여기서는 실리콘 웨이퍼, 알루미늄 디스크, 또는 유리 기판 등과 같이 그 밀도가 대략 $2g/cm^3$ 이상인 것에 한하여 6 자유도 안정부상을 위한 전극수를 알아보고자 하므로 부상체의 형상은 판상체에 국한한다.

식 (3)으로부터 정전기력은 전극과 부상체간의 중첩되는 면적에 비례하므로 부상체의 넓은 면에 있어서는 그 면에 대향(對向)하도록 다수의 전극을 배치하고 이 들 전극에 전압을 인가함으로써 큰 정전흡인력을 얻을 수 있다. 물론 이 들 전극에 인가되는 전압을 능동적으로 제어함으로써 부상체의 축방향 운동(z 축)과 수평면내의 2축(x, y 축)에 대한 회전운동, 즉 핏칭(pitching), 롤링(rolling) 운동의 안정화를 도모한다. 반면 부상체의 측면에 있어서는

부상체의 x, y 운동을 능동 제어하기 위해 측면에 대향하도록 전극을 배치하여 전압을 인가하여도 부상체 측면의 면적이 대단히 작기 때문에 큰 정전흡인력을 얻을 수 없고 단지 제어시스템만 복잡하여질 뿐이다. 따라서 부상체의 x, y 운동의 안정화에는 수동안정성을 이용한다. 즉 전극들에 의해 형성되는 전극 패턴의 외곽형상 및 치수를 부상체의 그것과 동일하게 하고 동시에 전극을 부상체의 바로 위에 배치하면 부상체의 수평면 내에 있어서의 x, y 운동은 정전기장의 프린지 필드(fringe field) 효과에 의해 수동적으로 구속되어 그 운동을 능동적으로 제어하지 않아도 안정적인 거동을 보인다.²⁰ Fig. 10 은 디스크 형상의 부상체가 전극에 대하여 횡방향으로 상대운동을 하였을 때 부상체에 작용하는 횡방향 복원력 F_{lat}^* 을 보여주고 있다.

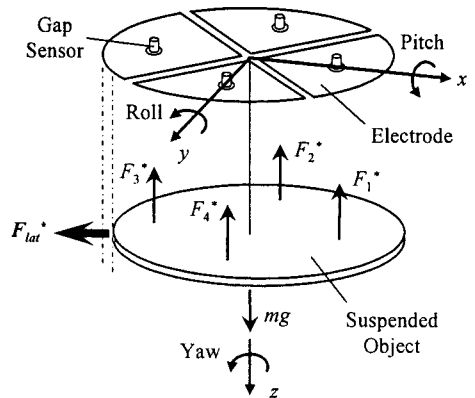


Fig. 10 An lateral restoring force F_{lat}^* , where F_i^* , $s(i=1,2,3,4)$ are attractive suspension forces²⁰

한편 부상체의 회전운동, 즉 요(yaw)운동의 안정성은 부상체의 형상에 의존한다. 예를 들어 사각형상의 부상체의 경우는 정전장의 프린지 필드 효과가 존재하기 때문에 그 움직임은 안정적이다. 반면 원형상의 부상체의 경우는 부상체가 회전하여도 전극과 부상체간의 상대위치는 변화하지 않고, 따라서 정전장의 프린지 필드 효과는 기대하기 어렵다. 즉 부상체의 회전운동을 안정화시키는 힘이 발생되지 않는다. 그러나 부상체의 회전방향으로 지속적인 불안정성 외란이 작용하지 않는 한 부상체를 공간상에 안정적으로 부상하는 것은 가

능하므로 이 회전운동의 안정성 여부를 특별히 고려할 필요는 없다(실제 대기환경에서는 부상체의 회전시 발생하는 공기의 댐핑력에 의해 부상체의 회전운동은 수동적으로 안정화됨). 이상으로부터 판상체의 정전부상에 있어서 부상체의 수직운동과 핏칭, 롤링 운동만을 능동적 제어에 의해 안정화시키면 부상체의 6 자유도 안정부상이 가능함을 알 수 있다. 이 때 필요한 전극의 갯수는 능동적인 제어를 요하는 자유도의 수가 3 이므로 최소 4 개가 된다.

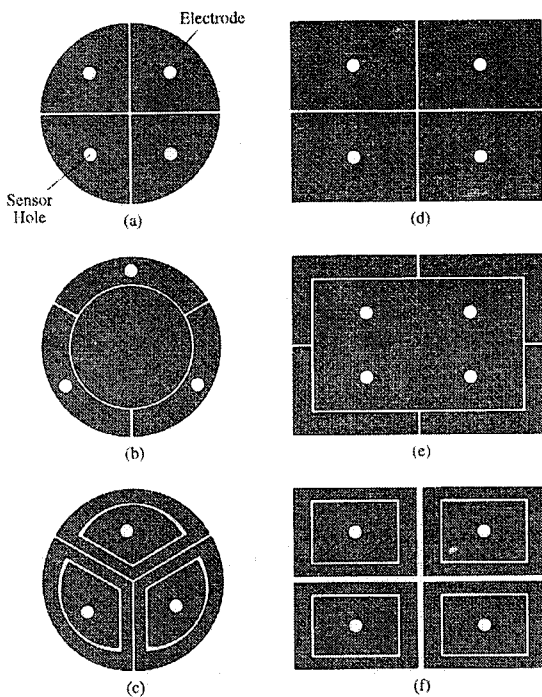


Fig. 11 Examples of electrode pattern to suspend circular or rectangular shaped objects^{8,10,14,21}

4.4.6 자유도 안정부상을 위한 전극의 형상

부상체의 수직운동과 핏칭, 롤링 운동을 안정화하기 위한 전극의 구조로서는 여러 가지 다양한 형태의 패턴이 사용될 수 있다. Fig. 11 에 원형과 사각형 형상의 부상체에 적합한 여러 가지 전극 패턴 중 몇 가지 대표적인 것을 도시하였다. 그림에 있어서 패턴 (a)와 (b)는 Jin 등에 의해 개발된 것이다.^{8,21} 전극의 수는 최소 4 개 이상으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그림에 있어서 전극 내에

설치되어 있는 원형상의 구멍에는 전극과 부상체 사이의 간격을 측정하기 위한 변위센서가 설치된다. 이 변위센서는 3 개이면 충분하지만 전극 패턴의 대칭성을 고려하여 4 개를 사용할 수도 있다.

5. 결론

본 논문에서는 정전기력 및 이를 이용한 정전 부상시스템의 특징 및 장단점, 1 자유도 정전부상 모델을 이용한 정전부상의 기본원리, 1 자유도 부상용 전극의 구조 및 전압인가방법 등에 관하여 상세히 기술하였다. 또한 부상체의 n 자유도 운동을 제어하기 위해서는 최소 $n+1$ 개의 부상용 전극이 필요함을 밝혀 내었으며 부상체의 6 자유도 운동을 전부 안정화(3 자유도는 피드백제어에 의한 안정화, 3 자유도는 수동안정성을 이용)시키기 위한 대표적인 몇 가지 전극 패턴의 예를 나타내었다.

정전부상시스템은 가까운 장래에 반도체, 평판 디스플레이 제조공정 등 산업현장에 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있으며, 본 논문은 향후 정전 부상시스템에 관한 연구를 수행하고자 하는 연구자들이 정전부상시스템의 기본원리 및 설계방법 등을 이해하는 데에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Brandt, E. H., "Levitation in Physics," Science, Vol. 243, No. 4889, pp. 349-354, 1989.
2. Knoebel, H. W., "The Electric Vacuum Gyro," Control Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 70-73, 1964.
3. Kumar, S., Cho, D. and Carr, W. N., "A Proposal for Electrically Levitating Micromotors," Sensors and Actuators A, Vol. 24, Issue 2, pp. 141-149, 1990.
4. 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.
5. 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.
6. Toda, R., Takeda, N., Murakoshi, T., Nakamura, S. and Esashi, M., "Electrostatically Levitated Spherical 3-Axis Accelerometer," Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems, pp. 710-713, 2002.
 7. Houlihan, R., Koukharenko, E., Sehr, H. and Kraft, M., "Optimisation, Design and Fabrication of a Novel Accelerometer," Proc. 12th Int. Conf. Transducers, Vol. 2, pp. 1403-1406, 2003.
 8. Jin, J., Higuchi, T. and Kanemoto, M., "Electrostatic Silicon Wafer Suspension," Proc. 4th Int. Symp. Magnetic Bearings, pp. 343-348, 1994.
 9. 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.
 10. Jeon, J. U. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of Dielectrics," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, pp. 938-946, 1998.
 11. Jin, J., Yih, T. C., Higuchi, T. and Jeon, J. U., "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion of Silicon Wafer," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, No. 5, pp. 975-984, 1998.
 12. Chung, I. J. and Jeon, J. U., "A Study on the Contactless Transportation of Electro-statically-suspended Plates," J. Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 34-41, 2005.
 13. Jeon, J. U., Park, K. Y. and Higuchi, T., "Contactless Suspension and Transportation of Glass Panels by Electrostatic Forces," Sensors and Actuators A, Vol. 134, Issue 2, pp. 565-574, 2007.
 14. Jeon, J. U. and Lee, S., "Electrostatic Suspension System of Silicon Wafer using Relay Feedback Control," J. Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 10, pp. 56-64, 2005.
 15. Jeon, J. U. and Kim, S. M., "Electrostatic Suspension System of Flexible Objects using Relay Feedback Control," J. Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 104-110, 2006.
 16. Institute of Electrostatics Japan, "Electrostatics Handbook," Ohmsha Ltd., pp. 155-160, 214-216, 252-259, 664-674, 1981.
 17. Bart, S. F., Lober, T. A., Howe, R. T., Lang, J. H. and Schlecht, M. F., "Design Considerations for Micromachined Electric Actuators," Sensors and Actuators A, Vol. 14, No. 3, pp. 269-292, 1988.
 18. Vischer, D. and Bleuler, H., "A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMBs Based on Network Theory Concepts," Proc. 2nd Int. Symp. Magnetic Bearings, pp. 301-306, 1990.
 19. Tsuda, M., "Electromagnetic Levitation and Its Applications," Doctor Thesis, Dep. of Precision Machinery Engineering, the University of Tokyo, Chapter 6, 1990.
 20. Jeon, J. U., Park, K. T. and Park, K. Y., "A Measurement Apparatus of Lateral Restoring Force Exerted on Electrostatically Suspended Object," J. Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 60-69, 2005.
 21. Jin, J., Higuchi, T. and Kanemoto, M., "Electrostatic Levitator for Hard Disk Media," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 42, No. 5, pp. 467-473, 1995.