

정전기력을 이용한 유리 판넬의 비접촉 지지 및 반송

전종업[#]

Electrostatic Suspension and Transportation Device of Glass Panels

Jong Up Jeon[#]

ABSTRACT

In the manufacture of liquid crystal display devices, there is a strong demand for contactless glass panel handling devices that can manipulate a glass panel without contaminating or damaging it. To fulfill this requirement, an electrostatic transportation device for glass panels is proposed. This device can directly drive a glass panel and simultaneously provide contactless suspension by electrostatic forces. To accomplish these two functions, a feedback control strategy and the operational principle of an electrostatic induction motor are utilized. The stator possesses electrodes which exert electrostatic forces on the glass panel and are divided into a part responsible for suspension and one for transportation. To accomplish dynamic stability and a relatively fast suspension initiation time, the structure of the electrode for suspension possesses many boundaries over which potential differences are formed. In this paper, an electrode pattern suitable for the suspension of glass panels is described, followed by the structure of the transportation device and its operational principle. Experimental results show that the glass panel has been transported with a speed of approximately 25.6 mm/s while being suspended stably at a gap length of 0.3 mm.

Key Words : Electrostatic forces (정전기력), Electrostatic suspension (정전부상), Transportation device (반송기구), Glass panels (유리판넬)

1. 서론

액정 디스플레이(LCD)와 플라즈마 디스플레이(PDP) 등 평면 디스플레이 분야에 사용되는 유리 판넬(glass panel)은, 제조 비용의 저감과 생산량(through-put)의 향상을 목적으로 점점 대형화(대면적화)되어 가고 있으며, 경량화를 목적으로 점점 박판화되어 '가고 있다. 현재, 이러한 유리 판넬의 핸들링(handling)은 주로 기계적인 접촉을 통해 이루어지고 있다. 그러나, 기계적 접촉에 의한 핸들

링은 유리 판넬의 크기가 대형화, 박판화되어 감에 따라 판넬의 뒤틀림이나 파손을 발생시키기 쉽다. 또한, 유리 판넬과 핸들링 장치의 직접적인 접촉에 의해 판넬의 오염 및 입자발생 등이 유발되어 제품의 품질을 저하시킨다. 최근 들어 공압을 이용한 반송시스템이 실용화되어 현장에서 사용되고 있다. 이 시스템에 있어서 유리 판넬은 비접촉 지지되므로 직접적인 기계적 접촉으로 인해 발생하는 여러 가지 문제점은 해결될 수 있으나, 유리 판넬에 국부적인 부상력이 가해지기 때문에 판넬

접수일: 2005년 8월 10일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

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

이 뒤틀리거나 휘어질 수 있으며, 공기가 클린 룸 내의 작은 먼지 입자를 교란시켜 유리 판넬의 청정도가 저하될 염려가 있다. 또한, 공압식 반송시스템은 진공환경에서는 사용이 곤란한 단점을 갖고 있다. 이와 같이, 유리 판넬의 대형화, 박판화, 디스플레이의 고품질화가 진전되어 감에 따라 유리 판넬의 반송 혹은 공정 내에서의 지지 방법 등, 유리 판넬을 손상없이 고품질로 핸들링하기 위한 장치의 개발이 절실히 요구되고 있다.

실리콘 웨이퍼를 고진공, 초청정 환경에서 핸들링하기 위한 장치로서, Ota 등²은 자기 부상형 웨이퍼 반송장치를 개발하였으며, Higuchi 등³은 직선운동과 회전 운동 기능을 갖는 자기부상형 액추에이터를 개발하였다. 그러나, 비자성체인 실리콘 웨이퍼를 자기력을 이용하여 직접 핸들링하는 것은 불가능하므로, 이 장치들의 경우 실리콘 웨이퍼를 자성체인 지지대 위에 올려 놓고 이 지지대를 자기력을 이용하여 비접촉 핸들링하고 있다. 따라서, 이 장치들의 경우 웨이퍼가 지지대에 직접적으로 접촉되어 웨이퍼 표면이 오염되거나 작은 입자가 발생하는 등 여러 가지 문제점을 지니고 있다. 유리도 실리콘과 마찬가지로 비자성체이므로 상기 장치를 이용하여 유리 판넬을 완전 비접촉 핸들링하는 것은 불가능하다.

자기력이 자성체에 한해 부상력을 가할 수 있는 반면, 정전기력은 도체, 반도체, 비자성체, 유전체, 절연체 등 거의 모든 물체에 부상력을 직접 가할 수 있는 장점을 갖고 있다. 정전기력을 이용한 물체의 비접촉 지지기구에 관한 연구로서, Knoebel⁴은 정전부상형 진공자이로를 개발하였으며, Kumar 등⁵은 마이크로 액추에이터에 있어서 정전기력에 의한 회전자의 비접촉 지지기구를 제안하였다. Jin 등⁶은 3.5 인치 알루미늄 디스크를 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하였고, 이 후 Jeon 등은 반도체 제품이나 LCD, PDP 등의 제조공정에 사용하기 위한 비접촉 지지기구의 개발을 목표로 8 인치 실리콘 웨이퍼,⁷ 크기 100×100mm² 인 유리 판넬⁸을 정전기력을 이용하여 부상하는데 성공하였다.

한편, Jin 등은 3.5 인치 알루미늄 디스크와 8 인치 실리콘 웨이퍼를 정전기력을 이용하여 단순히 비접촉 지지하는 데에 그치지 않고 이를 부상시킨 상태에서 원하는 위치까지 반송하는 비접촉 지지·반송시스템을 개발하였다.^{9,10} 이 시스템에 있어서, 부상체의 상면에는 두 세트의 스트립(strip) 형상의

전극이 반송방향을 따라서 연속적으로 나열되어 있다. 부상체는 부상체의 바로 상면에 배치된 전극에의 인가전압을 능동적으로 제어함으로써 항상 안정적인 부상상태를 유지한다. 부상체를 반송하기 위한 구동력은 이송방향을 따라 배치된 스트립형상의 전극에의 인가전압을 원하는 이송방향으로 절환해 감에 따라 부상체의 에지(edge)부분에 발생하는 정전흡인력을 이용하여 얻게 된다. 그러나, 이 시스템은 부상체가 유리와 같은 유전체인 경우 에지부분에 발생하는 구동력이 매우 작기 때문에 유전체의 비접촉 반송장치로 사용하기에는 적합하지 않다. 더욱이, 이 시스템을 유리와 같은 유전체에 사용할 경우, 도체의 경우에 비해 부상개시시간(suspension initiation time; 정전기력(전압)을 인가한 후 비접촉 부상하기까지의 시간)이 상대적으로 매우 길어지고, 또한 부상 시스템의 동적 안정성이 저하되는 문제점이 발생한다.

본 논문에서는 유리와 같은 유전체를 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하고, 반송하는 새로운 형태의 정전부상·반송시스템에 관하여 기술한다. 본 장치의 고정자 전극 패턴은 부상개시시간을 줄이고 동적 안정성을 향상시키기 위한 형태로 설계된다. 구동력은 유리가 고저항체라는 것에 착안하여 통상의 정전형 유도모터의 구동력 발생 원리^{11,12}와 동일하게 유리 판넬의 표면에 이동 전기장(traveling electric field)을 형성시킴으로써 얻어진다.

2. 유리 판넬의 정전부상을 위한 전극 패턴의 설계

유리와 같이 미세한 도전성을 갖는 유전체에 있어서의 정전 부상력의 발생원리는 도체에 있어서의 발생원리와 다소 차이가 있다. 본 절에서는, 이 둘 간의 차이점에 대하여 논하고 유리 판넬의 정전부상에 적합한 전극 패턴에 대하여 기술한다.

2.1 부상력의 발생원리

Fig. 1(a)는 부상체가 도체인 경우에 대하여, 전기장의 분포와 부상체 표면에 있어서의 전하의 거동, 그리고 이 전하에 의해 발생하는 정전부상력에 대한 설명도이고, Fig. 1(b)는 부상체가 유리와 같은 유전체인 경우에 대한 설명도이다. 단, Fig. 1에 있어서 부상체와 전극 간에 작용하는 정전기력은 수직성분만을 도시하고 있다.

부상체가 도체인 경우에는, 부상체 내부에서 전하가 자유롭게 이동할 수 있기 때문에 전극에 전압이 인가된 직후, Fig. 1(a)에 도시한 바와 같이, 전압 $+V'$ 의 전극과 대향(對向)하는 부상체의 표면에는 음의 전하가, 전압 $-V'$ 의 전극과 대향하는 부상체의 표면에는 양의 전하가 부상체 표면의 전면에 걸쳐 순식간에 나타난다. 따라서, 전극과 부상체 간의 간극에는 강한 전기장이 끌고루 형성되고, 부상체는 전극에 전압이 인가됨과 동시에 곧 바로 부상하게 된다.

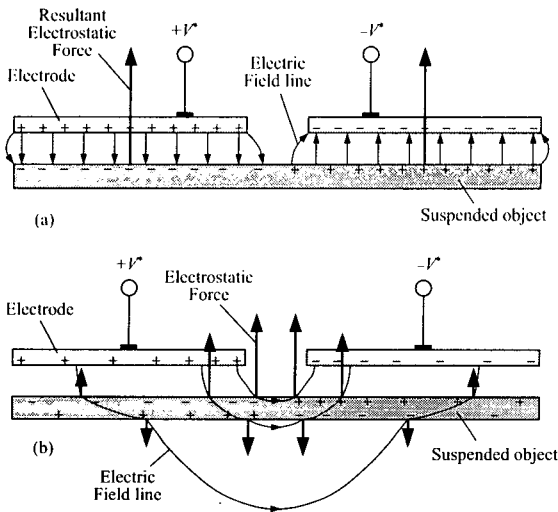


Fig. 1 Distribution of electric charge, electric field lines and electrostatic forces. (a) for conductors and (b) for dielectrics

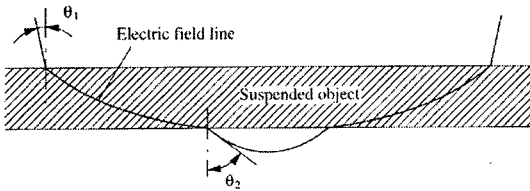


Fig. 2 Electric field line in dielectrics

한편, 부상체가 유리와 같은 것들의 경우에는, 이들은 유전체(이하, 부상체의 미약한 도전성은 고려하지 않고 그 유전특성에만 주목하는 경우 ‘유전

체’라고 칭한다)로서의 특성과 고저항체(이하, 부상체를 높은 저항율을 갖는 저항체로 여기는 경우 ‘고저항체’라고 칭한다)로서의 특성을 동시에 갖기 때문에, 전극에 전압을 인가함으로써 형성되는 전기장의 모양이나 전하의 거동은 꽤 복잡한 양상을 나타낸다.

우선, 부상체를 유전체로 볼 때의 부상력의 발생 메카니즘에 대하여 설명한다. 전극에 전압이 인가된 직후, 부상체 내의 자유전하는 곧 바로 이동할 수 없기 때문에 부상체는 유전체로서의 성질을 나타낸다. 따라서, 부상체는 분극하게 되고, 전압 $+V'$ 의 전극에서 나온 전기력선의 일부는 부상체의 상면으로 들어가서 부상체의 저면을 통해 빠져나오고, 다시 부상체의 저면, 상면을 통과하여 전압 $-V'$ 의 전극에서 끝나게 된다. 전기장 내에 있는 유전체는 유전율이 큰 물체가 유전율이 작은 쪽으로 끌어 당겨지는 힘을 받는다. 유리의 유전율은 대기보다 크다. 따라서, 부상체의 상면과 저면에는 각각 부상체를 끌어올리는 힘과 끌어내리는 힘이 동시에 작용한다. 이러한 힘은 전기장이 강할수록 크고, 전기장의 세기의 2 승에 비례한다. 본 논문을 포함한 판상체(板狀體)의 정전부상의 경우, 부상체 상면에서의 전기장의 세기는 저면에서의 세기보다 크다. 한편, Fig. 2 에 도시한 바와 같이, 부상체 내에서 전기력선은 휘어지기 때문에, 부상체 상면에서의 전기력선의 입사각 θ_1 은 저면에서의 각 θ_2 보다 작다. 따라서, 부상체 상면에서의 힘의 수직성분은 저면에서의 그것보다 크고, 이 상면에 작용하는 힘에서 저면에 작용하는 힘을 뺀 힘 (그라디언트(gradient)힘)이 부상력의 일부로서 작용하게 된다. 일반적으로 그라디언트힘은 쿨롱힘에 비해 매우 작다. 그러나, 서로 다른 크기의 전압(Fig. 1(b)의 경우, $+V'$, $-V'$)이 인가되는 전극 간의 경계부근에서는 꽤 큰 그라디언트힘을 얻을 수 있다. 이하에서는 ‘전극 간의 경계’로 표기할 때, 별도로 표시하지 않는 한, ‘전극’은 ‘서로 다른 크기의 전압이 인가되는 전극들’을 의미한다. 전극에 전압을 인가하였을 때 형성되는 전기장은, Fig. 1(b)에 도시한 바와 같이, 전극 간의 경계부근에서는 강하고, 경계에서 멀어짐에 따라 점점 약해진다. 따라서, 경계부근에서는 많은 분극이 일어나고, 부상체의 상면과 저면에 있어서의 전기장의 강도 차이는 커지게 된다. 또한, 경계부근에서는 부상체 내에서 전기력선이 크게 휘기 때문에 입사각 θ_1 과

θ 의 차이도 커지게 된다. 따라서, 전극 간의 경계부근에서는 강한 부상력이 얻어진다. 반면, 경계에서 먼 곳에서는 전기장의 세기가 작으므로 분극 발생도 적고, 부상체의 상면과 저면에서의 전기장의 강도 차이도 작게 된다. 또한, 입사각 θ 과 θ_c 의 차이도 작아지게 된다. 따라서, 경계에서 먼 곳에서는 부상력이 약하게 된다. 한편, 경계부근에서는 부상체의 상면에서 들어가서 부상체의 내부를 통과한 후 다시 상면으로 나오는 전기력선이 존재하므로, 이 부근에서는 부상체를 끌어올리는 힘이 작용하여 강한 부상력이 얻어진다. 최적의 전극 설계가 이루어진다면 이 힘이 부상력의 대부분을 차지할 것으로 생각된다.

다음으로, 부상체를 유전체로 보는 경우에 있어서 부상체의 동특성에 대하여 기술한다. 유전체의 분극현상은 원자 또는 분자의 거동으로부터 전자분극, 원자분극, 쌍극자분극으로 대별된다. 이 중에, 전자분극과 원자분극은 정전장이 작용하면 거의 순간적으로 분극이 형성되는 것이다. 이에 비해, 쌍극자분극은 유극성분자의 쌍극자 모멘트의 배향에 기초한 분극으로, 비교적 장시간에 걸쳐 분극이 평형상태에 도달한다(이 현상을 유전완화라고 한다). 이 완화시간(분극지연시간)은 전기장의 세기가 클수록 짧아지게 된다. 이 분극지연 때문에, 전극에 전압을 인가하여도 부상력은 도체와 같이 순간적으로 증가하지 않고, 서서히 증가하게 된다. 이러한 분극지연으로 인해 발생하는 전압과 부상력 간의 시간지연은 부상체의 안정성에 악영향을 미친다. 이 분극시간지연을 짧게 하는 측면에 있어서도 전극 간의 경계는 큰 의미를 갖게 된다. 경계부근에서는 전기장이 강하므로 부상체는 빨리 분극하고, 경계에서 먼 곳에서는 전기장이 약하므로 분극지연이 크게 된다. 따라서, 경계부근에서는 부상력이 빨리 증가하지만, 경계에서 먼 곳에서는 장시간에 걸쳐 부상력이 서서히 증가하게 된다.

이상은 부상체를 유전체로 보고 부상력의 발생 원리에 대하여 기술하였지만, 유리와 같이 미약한 도전성을 갖는 부상체의 경우는 전극에 전압을 인가한 후 시간이 경과함에 따라 고저항체로서의 특성이 나타난다. 즉, 전압을 인가하면 부상체의 표면에는 자유전하의 이동에 의한 진(眞)전하가 유도된다. 이 진전하는 일정 시간에 걸쳐 서서히 유도되므로 전극에 전압을 인가하여도 부상력이 바로 발생하지 않고, 서서히 증가하게 된다. 이 유도전

하의 시간지연에 의해 발생하는 전압과 부상력 간의 시간지연은 부상체의 동적안정성에 악영향을 미친다.⁸ 시간지연은 전기장의 세기와 부상체의 저항율과 관계가 있다. 전기장이 강할수록, 또 저항율이 작을수록 시간지연은 작아진다. 일반적으로 부상체는 이미 어떤 저항율을 갖고 있는 물건으로 주어지기 때문에, 시간지연을 작게 하려면 전기장의 강도를 크게 하는 수 밖에 없다. Fig. 1(b)의 전기장의 모양을 살펴 보면, 전극 간의 경계부근에서는 전기장이 강하므로 이 경계부근에 대항하는 부상체의 표면에는 진전하가 빨리 유도되지만, 경계에서 먼 곳에서는 전기장의 강도가 약하기 때문에 진전하가 유도되는 데에 상당한 시간이 소요된다. 이로부터, 경계부근에서는 부상력이 빨리 증가하지만, 경계에서 먼 곳에서는 장시간에 걸쳐 부상력이 서서히 증가하게 된다. 또한, 전극 간의 경계부근에서는 진전하의 출입이 빠르고, 따라서 전압과 부상력 간의 시간지연이 작아지게 된다. 한편, 고저항체에 있어서 전하의 유도작용이 끝난 정상상태에서의 전하의 분포와 전기장의 모습은 Fig. 1(a)에 도시한 도체의 경우와 같아지게 된다.

이상에서 설명하였듯이, 부상체가 유전체이든 고저항체이든, 부상력을 빨리 증가시키고 또한 부상체의 안정성을 높이기 위해서는 전극 간의 경계를 많이 형성시켜야 한다.

2.2 등가집중력(equivalent concentrated force)의 작용점

정전부상계에서 각 전극과 부상체 간에 작용하는 정전기력은 부상체의 전면에 걸쳐 분포되고, 이를 그대로 분포력으로 취급하면 계의 모델링이 매우 복잡해지기 때문에 이 분포력을 등가집중력으로 대체한다. 도체에 있어서, 부상체가 전극과 평행하게 부상하는 경우에 전극과 부상체 간의 간극에는 거의 균일(homogeneous)한 전기장이 형성되고, 따라서 부상체에는 그 전표면에 걸쳐 단위면적당 거의 동일한 크기의 부상력이 작용한다. 이 때, 등가집중력의 작용점은 각 전극의 면적중심점에 위치한다. 부상체가 경사진 경우에도 그 경사가 그다지 크지 않으면(실제, 판상체의 정전부상의 경우 그 경사는 그다지 크지 않음), 등가집중력의 작용점으로서 각 전극의 면적중심점을 택할 수 있다. 즉, 부상체가 도체인 경우, 등가집

중력의 작용점이 각 전극의 면적중심점에 고정(시불변)되어 있다고 보아도 크게 지장이 없다. 그러나, 부상체가 유전체인 경우에는, 전극 간의 경계 부근에서는 부상력이 크고 경계에서 멀어짐에 따라 점점 작아지므로 정전흡인력의 크기는 장소에 따라 다르게 된다. 이 때문에 등가집중력의 작용점은 전극의 면적중심점에 위치하지 않는다. 또한, 부상력은 시간이 경과함에 따라 전하의 거동과 연동하여 변화하고, 따라서 등가집중력 작용점의 위치도 변화하게 된다. 이로부터, 부상계의 모델링이 매우 복잡해진다. 따라서, 유리와 같은 유전체를 정전기력으로 부상시키고자 할 때에는, 등가 집중력의 작용점의 위치가 시불변이고 가능한 한 전극의 면적중심점에 위치하도록 고정자 전극의 패턴을 설계하여야 한다.

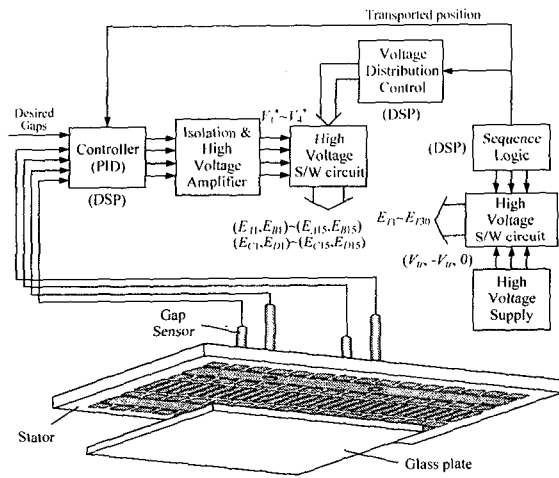


Fig. 3 Structure of the transportation system

3. 반송장치의 구조

Fig. 3 은 반송장치 및 제어부의 구성을 나타낸다. 제어부는 크게 두 부분, 즉 부상체의 안정 부상을 담당하는 부분과 반송을 담당하는 부분으로 나누어 진다. 부상체의 안정부상을 담당하는 부분은 안정화 제어기(stabilizing controller), 절연 및 고전압 증폭기(isolation and high voltage amplifiers), 부상용 전압 분배 제어기(voltage distribution control unit), 부상용 고전압 절환기(high-voltage switching circuit for suspension) 등으로 구성된다. 반송 구동력

을 발생하는 부분은 고전압 전원(high-voltage supplies), 시퀀스 제어기(sequence logic control unit), 반송용 고전압 절환기(high-voltage switching circuit for transportation)등으로 구성된다. 안정화 제어기와 부상용 전압 분배 제어기, 시퀀스 제어기는 DSP 시스템을 사용하여 구현하였다. 반송체로는 크기 $100 \times 100 \text{mm}^2$, 두께 0.7mm, 무게 17.6g 인 소다석회 유리(soda-lime glass)를 사용하였다. 고정자 전극과 유리 판넬 간의 간격은 고정자에 장착된 4 개의 광 파이버식 변위 센서를 이용하여 측정하였다.

3.1 고정자 전극

Fig. 4 는 본 논문에서 사용한 고정자 전극의 패턴을 보여 주고 있다. 부상용 전극(electrodes-for-suspension) $E_{A1} \sim E_{A15}$, $E_{B1} \sim E_{B15}$, $E_{C1} \sim E_{C15}$, $E_{D1} \sim E_{D15}$ 는 Fig. 4 에 점선으로 나타낸 것과 같이 서로 연결되어 있다. 이하, 서로 연결되어 있는 한 쌍의 부상용 전극은 $(E_{A1}, E_{B1}), \dots, (E_{C15}, E_{D15})$ 와 같이 괄호를 이용하여 표현한다. 부상용 전극 E_{G1} 과 E_{G2} 에는 항상 제로 볼트가 인가되며, 전극 $E_{A1} \sim E_{A15}$, $E_{B1} \sim E_{B15}$, $E_{C1} \sim E_{C15}$, $E_{D1} \sim E_{D15}$ 에는 부상체를 안정 부상시키기 위해 능동적으로 제어된 전압 V_j^* ($j=1, 2, 3, 4$)가 인가된다. Fig. 4 의 전극 구조를 보면, 전극 $E_{A1} \sim E_{A15}$ 와 E_{G1} , $E_{B1} \sim E_{B15}$ 와 E_{G1} , $E_{C1} \sim E_{C15}$ 와 E_{G2} , $E_{D1} \sim E_{D15}$ 와 E_{G2} 간에 서로 다른 크기의 전압이 인가되는 전극 간의 경계들이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이와 같이, 전극 간의 경계를 다수 형성 시킴으로써 부상개시시간을 단축시키고 시스템의 동적 안정성을 향상시킬 수 있다. 또한, Fig. 4 의 전극 구조를 보면 전극 간 경계 구역과 전극들이 대칭적으로 배치되어 있으므로 전하가 부상체 표면에 유도되는 과정이 대칭적으로 이루어진다. 따라서 등가집중력의 작용점은 시간과 무관하게 그 위치가 변화하지 않는다. 부상용 전극 $E_{A1} \sim E_{A15}$, $E_{B1} \sim E_{B15}$, $E_{C1} \sim E_{C15}$, $E_{D1} \sim E_{D15}$ 의 피치와 폭, 길이는 각각 10.22mm, 8mm, 8mm 이다. 전극 E_{G1} 과 E_{G2} 의 크기는 $150 \times 15 \text{mm}^2$ 이다.

반송용 전극(electrodes-for-transportation) $E_{T1} \sim E_{T30}$ 은 스트립(strip)형상으로 고정자 내측에 일정한 피치로 배치되어 있으며, Fig. 4 에 점선으로 나타낸 바와 같이 서로 연결되어 3 상 전극을 형성하고 있다. 반송용 전극의 피치, 폭, 길이는 각각 5.11mm, 4mm, 24mm 이다.

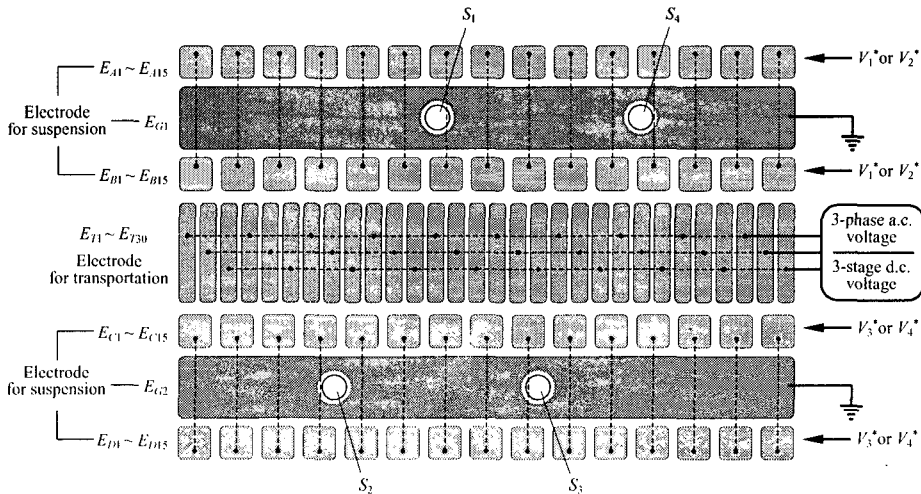


Fig. 4 Stator electrode pattern

3.2 안정부상 제어기

유리 판넬을 주위 환경으로부터 완전 비접촉 지지하기 위해서는 유리 판넬의 6 자유도 운동 전부가 안정적인 거동을 보여야 한다. 6 자유도 운동 중 부상체의 수평면 내(x, y)의 운동과 축방향 회전 운동은 정전장의 프린지 필드(fringe field) 효과에 의해 안정적인 거동을 보이므로, 이 3 자유도 운동에 대해서는 본 논문에서는 능동적인 제어를 수행하지 않고 본래의 수동안정성을 그대로 이용하였다.¹³ 한편, 부상체의 수직(z) 운동과 수평면 내의 2축(x, y 축)에 대한 회전운동, 즉, 핏칭, 롤링 운동은 본래 불안정한 거동을 보이므로, 부상용 전극에의 인가 전압을 능동적으로 제어함으로써⁷ 부상체의 안정화를 도모하였다.

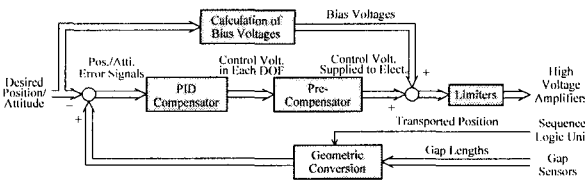


Fig. 5 Stabilizing controller

Fig. 5 는 안정화 제어기의 블록선도이다. 변위 센서를 이용하여 측정된 부상 간격과 목표로 하는 유리 판넬의 위치/자세 신호로부터 유리 판넬의 수직운동 및 핏칭, 롤링 운동에 대한 오차신호

(position and attitude error signal)가 계산된다. 이 때, 측정된 부상 간격을 위치/자세 신호로 변환할 때, 변환 행렬(geometric conversion matrix)의 각 성분은 유리 판넬의 반송 위치(transported position) 정보를 이용하여 계속해서 갱신되어 진다. 오차신호는 PID (Proportional-Integral-Derivative) 보상기와 전치 보상기(pre-compensator)를 거쳐 4 개의 제어전압(control voltages supplied to electrodes)으로 변환된다. 이 전압은 각각 바이어스 전압(bias voltages)에 더해진 후 리미터(limiter) 회로로 보내진다. 여기서, 리미터 회로를 이용하여 전압의 상한치에 제한을 가한 이유는 과도한 전압으로 인해 발생하는 전극과 부상체 간에 전기방전을 방지하기 위해서이다. 리미터 회로로부터 출력된 전압은 증폭비 1000 을 갖는 고전압 증폭기를 통해 증폭되어, 부상용 고전압 절환기에 입력된다. 부상용 고전압 절환기에서는 부상용 전압 분배 제어기로부터의 신호를 이용하여 유리 판넬의 바로 위에 위치한 부상용 전극들에게 부상용 제어 전압을 분배, 인가한다.

3.3 구동력 발생 제어기

고전압 전원에서 발생한 3 단 직류 고전압(three-stage d.c. high voltages) $V_{1r}, -V_{1r}, 0$ 이 반송용 고전압 절환기에 입력된다. 반송용 고전압 절환기에서는 시퀀스 제어기로부터의 스위칭 신호에 근거하여 반송용 전극 $E_{T1} \sim E_{T30}$ 에 3 단 직류 고전압을 인가한다. 한편, 시퀀스 제어기는 유리 판넬의 반

송 위치 정보를 안정화 제어기와 부상용 전압 분배 제어기에 보낸다.

4. 동작 원리

본 절에서는 Fig. 6 을 참고하면서, 본 장치의 정전 부상 및 반송 원리에 관하여 기술한다.

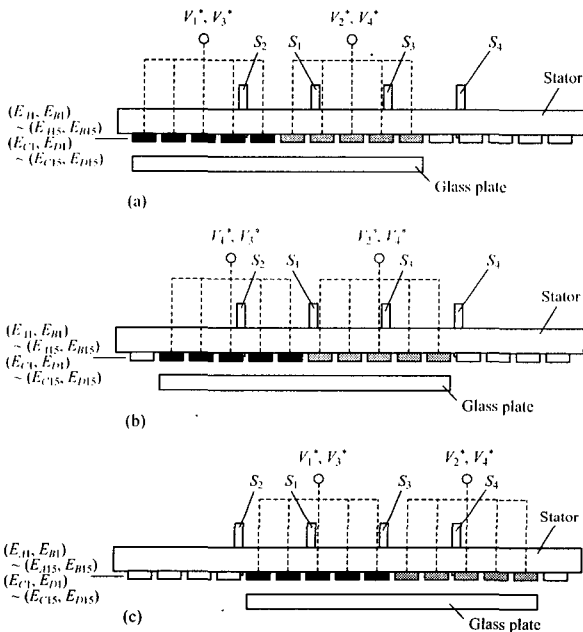


Fig. 6 Transportation process. (a) suspension step, (b) transportation step, (c) sensor change step

4.1 안정부상

변위 센서 S_1, S_2, S_3 를 이용하여 반송체의 부상 위치와 자세를 검출하고, 이 신호에 근거하여 반송체를 안정 부상하기 위한 부상용 전압 $V_1^*, V_2^*, V_3^*, V_4^*$ 를 생성한다. 이 부상용 전압을 반송체의 바로 위에 위치한 부상용 전극에 인가함으로써 반송체를 안정 부상시킨다. 즉, Fig. 6(a)에 나타낸 바와 같이 전압 $V_1^*, V_2^*, V_3^*, V_4^*$ 를 각각 전극 $(E_{A1}, E_{B1}) \sim (E_{A5}, E_{B5}), (E_{A6}, E_{B6}) \sim (E_{A10}, E_{B10}), (E_{C1}, E_{D1}) \sim (E_{C5}, E_{D5}), (E_{C6}, E_{D6}) \sim (E_{C10}, E_{D10})$ 에 인가한다. 전극 E_{G1} 과 E_{G2} 에는 전술한 바와 같이 항상 제로 볼트를 인가한다.

4.2 반송

유리 판넬은 그 위에 이동 전기장(traveling electric field)을 형성시켜 줌으로서 구동력을 얻게 된다. 이 때, 이동 전기장은 반송용 전극 $E_{T1} \sim E_{T30}$ 에 3 단 직류전압 $V_{tr}, -V_{tr}, 0$ 을 순차적으로 공급함으로써 얻어지게 되는데, 이는 Egawa 등¹⁴에 의해 개발된 정전형 필름 액추에이터(electrostatic film actuator)의 구동력 발생 원리와 동일하다. 3 상 교류전압을 이용하여 이동 전기장을 형성시킬 수도 있으나, 이 경우 매우 고가인 3 개의 고전압 증폭기가 별도로 필요하게 된다.

4.3 부상용 전극에의 인가전압의 절환

반송체가 반송되어, 부상용 전극 한 피치분의 거리만큼 이동하면, Fig. 6(b)에 나타낸 바와 같이, 전극 (E_{A11}, E_{B11}) 에는 전압 V_2^* 를, 전극 (E_{C11}, E_{D11}) 에는 전압 V_4^* 를 인가한다. 동시에 진행방향의 반대쪽에 있는 전극 (E_{A1}, E_{B1}) 과 (E_{C1}, E_{D1}) 에 인가된 전압은 차단한다. 또한 전극 (E_{A6}, E_{B6}) 와 (E_{C6}, E_{D6}) 에 인가된 전압은 각각 V_2^* 에서 V_1^* 로, V_4^* 에서 V_3^* 로 절환한다. 이러한 일련의 과정은 유리 판넬이 한 피치 이동할 때마다 반복한다. 이상과 같이 유리 판넬이 이동하여도 그 반송 위치에 관계없이 항상 유리 판넬의 바로 위에 위치한 부상용 전극에 제어전압이 공급되므로 유리 판넬은 안정적인 부상 상태를 유지하게 된다.

본 반송장치의 반송원리는 유도전하형 정전모터의 동작원리와 동일한 것으로, 반송속도는 전기장의 이동속도에 동기(synchronous)되지 않는다. 따라서, 부상용 전극에 인가되는 전압의 절환 시점을 결정하기 위해서는 반송체의 반송위치를 센서 등을 이용하여 검출하여야 한다. 그러나, 본 실험에서는, 유리 판넬의 반송속도가 전기장의 이동속도와 거의 동일하였으므로 별도의 검출장치를 부가하지 않고, 부상용 전극에 인가되는 전압의 절환속도를 반송용 전극에 인가되는 3 단 직류 전압의 절환속도에 동기시켰다.

4.4 변위 센서의 절환

반송체가 진행방향을 따라 이동하여, Fig. 6(c)에 나타낸 위치에 도달하면 변위센서 S_2 는 더 이상 반송체의 위치를 검출할 수 없게 된다. 이 때, 변위 센서 $S_1 \sim S_3$ 대신에 S_1, S_3, S_4 를 이용하여 유리 판넬의 위치와 자세를 검출한다.

5. 부상 및 반송 실험

5.1 실험장치

Fig. 7(a)는 실험장치 기구부의 개략도이다. 고정자 전극과 유리 판넬은 각각 3 개의 마이크로미터 위치결정 스크류(positioning screws)에 의해 지지되어 수평도 조정 및 전극과 유리 판넬 간의 초기 간격 설정이 행하여 진다. 전극은 유리에폭시 기판 상에 두께 $35\mu\text{m}$ 의 동막(copper layer)이 부착된 감광기판을 이용하여 에칭기법으로 제작하였다. Fig. 7(b)는 제작한 고정자 전극 사진이다.

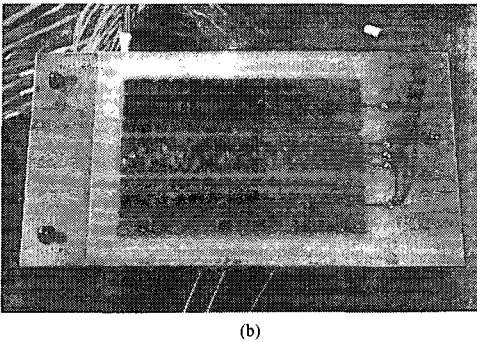
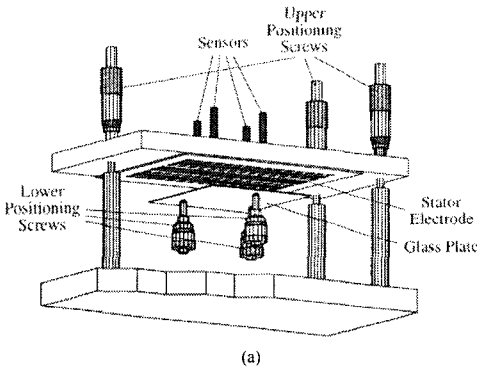


Fig. 7 (a) Experimental apparatus, (b) photograph of stator

5.2 부상실험

반송실험에 앞서, 우선 부상실험을 수행하였다. 본 실험에서는 부상시스템을 보다 용이하게 구현하기 위해 우선 유리 판넬을 도체로 가정하여 제어기의 이득(gains) 및 바이어스 전압 등을 산출한 후,⁷ 이 들 값을 수동으로 튜닝하여 최종 값을 결정하였다. Table 1 은 부상 및 반송 실험조건이다.

실험에서는 부상용 전극에 공급되는 전압으로 양(plus)의 전압만을 사용하였다. 제어 주기는 $100\mu\text{s}$ 이다.

Fig. 8 은 부상실험을 개시한 후, 센서 S_1, S_2, S_3 를 이용하여 측정된 전극과 유리 판넬간 간격의 변동, 그리고 이 때 부상용 전극에 인가되는 전압의 변화를 나타낸다. 초기 간격 0.35mm 로부터 목표 간격 0.3mm 로 유리 판넬이 부상하기 시작하는데 약 14 초가 소요됨을 알 수 있다. 2.1 절에서 설명한 바와 같이, 이 부상개시시간은 부상용 전극에 전극간 경계를 보다 많이 형성시킴으로써 더욱 단축시킬 수 있다.

Table 1 Experimental conditions: *vertical motion, **pitching and rolling motion

Parameters	Value
Proportional gains [kV/m*, kV/rad**]	$1.5E5^*$, 40^{**}
Derivative gains [kVs/m*, kVs/rad**]	125^* , 0.025^{**}
Integral gains [kV/m/s*, kV/rad/s**]	$5E5^*$, 500^{**}
Desired gap length [mm]	0.3
Bias voltages [kV]	1.61
Limit voltages [kV]	2.4
Voltages for transportation [kV]	0.9/-0.9/0

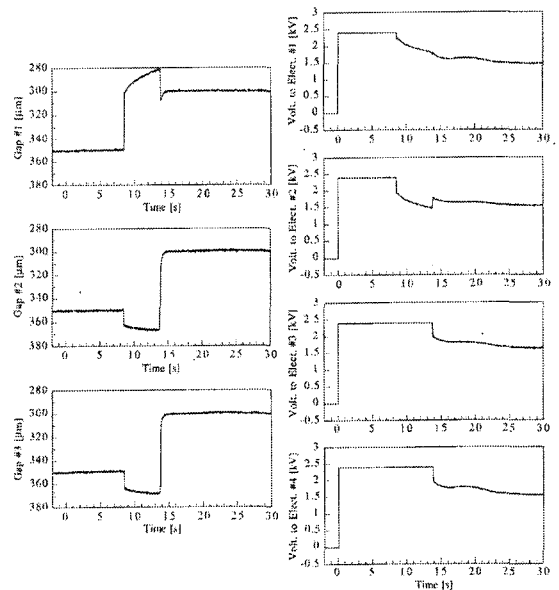


Fig. 8 Gap and voltages during suspension process. At time 0, the PID compensator was switched on

Fig. 8 을 보면, 유리 판넬이 목표 간격 0.3mm 로 안정적으로 부상하고 있음에도 불구하고, 전압이 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 유리 표면에 유도되는 전하의 분포 상태가 아직 정상상태에 도달하지 못하고, 전하의 유도작용이 계속되고 있기 때문인 것으로 생각된다. 제어 개시로부터 30 초 후 각 전극에 인가되고 있는 전압은 각각 1.48kV, 1.55kV, 1.64kV, 1.57 kV 이었다. Fig. 9 는 안정 부상 상태의 유리 판넬을 보여주는 사진이다.

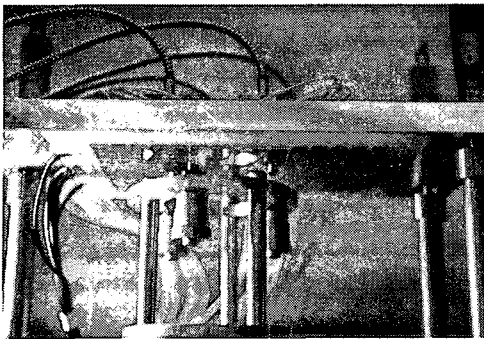


Fig. 9 Glass panel during contactless suspension and transportation

5.3 반송실험

유리 판넬이 안정 부상한 후, 반송용 전극에 3 단 직류전압 0.9kV, -0.9kV, 0 을 인가하여 반송실험을 수행하였다. 본 실험에서는 유리 판넬의 안정적 부상 상태를 유지하기 위해 유리 판넬이 반송용 전극의 5 피치분만큼 이송되었을 때 센서 S₂ 대신에 센서 S₄로부터의 변위 신호를 이용하였다. Fig. 10 은 3 단 직류전압의 절환시간이 4 초인 경우에 대하여 유리 판넬의 스텝 반송 동작을 기록한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 유리 판넬의 한 스텝 이동량은 반송용 전극의 한 피치와 거의 동일하였다. 이는 구동력이 반송을 방해하는 외력, 예를 들어 공기에 의한 마찰 저항력 등보다 충분히 크기 때문이다. 이에, 본 실험에서는 반송체의 반송 위치를 검출하기 위한 근접 스위치와 같은 별도의 센서를 설치하지 않았다. 그러나, 반송거리가 길어지는 경우에는 유리 판넬이 반송됨에 따라 이동거리에 있어서의 오차가 누적되기 때문에 반드시 근접스위치 등 유리 판넬의 반송 위치를 검출하기 위한 별도의 센서를 설치해야 한다.

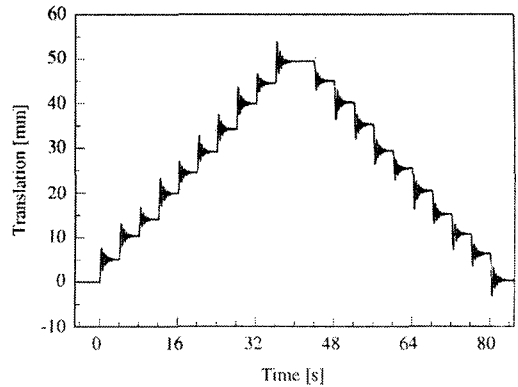


Fig. 10 Successive step movements for a switching time of 4 seconds

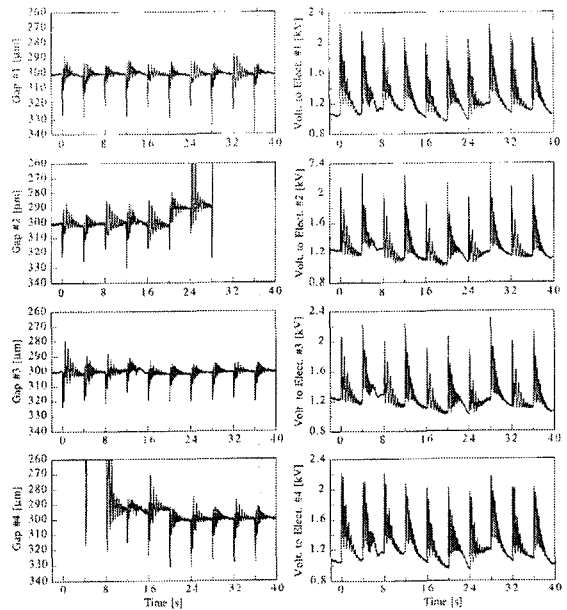


Fig. 11 Gap and voltage fluctuations during transportation process for a switching time of 4 seconds

Fig. 11 은 유리 판넬의 반송 중에 있어서의 부상 간격과 부상용 제어전압의 변동을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 반송용 전압의 절환이 일어나는 순간, 반송체는 상당히 크게 진동하였다. 이 흔들림의 최대 진폭은 30 μ m 이었다. 이와 같이 유리 판넬의 흔들림이 크게 발생하는 이유는 반송용 전극에의 인가전압의 절환이 일어나는 순간,

전단계에서 이미 유리 판넬의 표면에 유도되었던 전하와 반송용 전극에 유도되는 전하 사이에 상당히 큰 반발력(repulsive force)이 발생하여, 유리 판넬을 아래 방향으로 밀어 내기 때문이다.¹⁴ 3 단 직류 전압 대신 3 상 교류전압을 이용함으로써 유리 판넬의 흔들림은 상당히 줄어들 것으로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 정전기력을 이용하여 유리 판넬을 비접촉 지지하고 반송하는 정전부상 및 반송 시스템에 관하여 기술하였다. 본 시스템에 사용된 고정자 전극은 안정 부상을 위한 부상용 전극과 반송 구동력을 발생하기 위한 반송용 전극으로 구성되어 있다. 부상용 전극은 빠른 부상개시시간과 향상된 동적안정성을 확보하기 위해 서로 다른 크기의 전압이 인가되는 전극 간 경계가 다수 형성되어 있는 형상을 하고 있다. 유리 판넬의 안정 부상을 실현하기 위해 부상용 전극에 인가되는 전압은 유리 판넬의 위치/자세 정보에 근거하여 능동적으로 제어된다. 반송을 위한 구동력은 3 단직류전압을 반송용 전극에 인가하여 유리 판넬의 표면에 이동 전기장울 형성시킴으로써 얻어진다. 유리 판넬은 고정자 전극과 0.3mm 의 간격을 두고 성공적으로 부상되었으며, 안정 부상 상태에서 약 25.6mm/s 의 속도로 반송되었다.

후 기

이 논문은 2005 년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Park, S. H., Lee, B. Y. and Earmme, Y. Y., "Analysis on the Fracture of a Panel Glass in a Liquid Crystal Display Module under Mechanical Shock," J. Korean Soc. Precision Eng., Vol. 17, No. 12, pp. 76-81, 2000.
- Ota, M., Andoh, S. and Inoue, H., "Mag-lev Semiconductor Wafer Transporter for Ultra-high-vacuum Environment," Proc. 2nd Int. Symp. on Magnetic Bearings, Tokyo, Japan, pp. 109-114, 1990.
- Higuchi, T., Horikoshi, A. and Komori, T., "Development of an Actuator for Super Clean Rooms and Ultra High Vacua," Proc. 2nd Int. Symp. Magnetic Bearings, Tokyo, Japan, pp. 115-122, 1990.
- 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," J. Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 23-30, 1992.
- 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.
- 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.
- Jin, J. and Higuchi, T., "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion," Proc. 1996 IEEE 22nd Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Taipei, Taiwan, pp. 1306-1311, 1994.
- 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.
- Bollée, B., "Electrostatic Motors," Philips Technical Review, Vol. 30, No. 6/7, pp. 178-194, 1969.
- Choi, S. D. and Dunn, D. A., "A Surface-charge Induction Motor," Proc. IEEE, Vol. 59, No. 5, pp. 737-748, 1971.
- Woo, S. J., Jeon, J. U., Higuchi, T. and Jin, J., "Electrostatic Force Analysis of Electrostatic Levitation System," Proc. 34th SICE Annual Conf., Sapporo, Japan, pp. 1347-1352, 1995.
- Egawa, S. and Higuchi, T., "Multi-layered Electrostatic Film Actuator," Proc. 1990 IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Napa Valley, USA, pp. 166-171, 1990.