

릴레이 제어법을 이용한 유리패널의 정전부상에 관한 연구

전종업[#]

Electrostatic Suspension System of Glass Panels using Relay Feedback Control

Jong Up Jeon[#]

ABSTRACT

In the manufacture of flat panel 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 suspension device for glass panels where the glass panel is supported by electrostatic forces without any mechanical contact is proposed. To implement the system with low cost and compactness, switched-voltage control scheme that is based on the relay feedback control is utilized. Relay feedback control method deploys only a single high-voltage power supply that can deliver a DC voltage of positive and/or negative polarity and thus high voltage amplifiers that are costly and bulky are not needed any more. It is shown that despite the inherent limit cycle property of the relay feedback based control, an excellent performance in vibration suppression is attained due to the presence of a relatively large squeeze film damping originating from the electrodes and levitated object. Using this scheme, a 100×100mm² glass panel was levitated stably with airgap variation decreasing down to 1 μm at an airgap of 100 μm.

Key Words : Electrostatic suspension (정전부상), Electrostatic force (정전기력), Glass panel (유리패널), Relay control (릴레이제어), Contactless support (비접촉 지지), Liquid crystal display (액정 디스플레이), Plasma panel display (플라즈마 디스플레이)

1. 서론

액정 디스플레이(LCD)와 플라즈마 디스플레이(PDP) 등 평면 디스플레이 분야에 사용되는 유리패널(glass panel)은, 제조 비용의 저감 및 생산량 향상을 목적으로 점점 그 크기가 대형화(대면적화)되어 가고 있다. 최근의 제 8 세대 LCD 라인에 있어서 유리패널의 크기는 2.5×2.2m²에 달한다. 현재,

이러한 유리패널의 핸들링(handling)은 주로 기계적인 접촉을 통해 이루어지고 있다. 그러나, 기계적 접촉에 의한 핸들링은 유리패널의 크기가 대형화, 박판화되어 감에 따라 패널의 뒤틀림이나 파손을 발생시키기 쉽다. 또한, 유리패널과 핸들링 장치의 직접적인 접촉에 의해 패널의 오염 및 입자발생 등이 유발되어 제품의 품질을 저하시킨다. 최근 들어 공압을 이용한 반송시스템이 실용

☞ 접수일: 2007년 9월 10일; 게재승인일: 2008년 3월 12일

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

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

화되어 현장에서 사용되고 있다. 이 시스템에 있어서 유리 패널은 비접촉 지지되므로 직접적인 기계적 접촉으로 인해 발생하는 여러 가지 문제점은 해결될 수 있으나, 유리 패널에 국부적인 부상력이 가해지기 때문에 패널이 뒤틀리거나 휘어질 수 있으며, 공기가 클린 룸 내의 작은 먼지 입자를 교란시켜 유리 패널의 청정도가 저하될 염려가 있다. 이와 같이, 유리 패널의 대형화, 박판화, 디스플레이의 고품질화가 진전되어 감에 따라 유리 패널의 공정 내에서의 지지 및 반송 방법 등 유리 패널을 손상없이 고품질로 핸들링하기 위한 장치의 개발이 절실히 요구되고 있다.

지금까지 물체를 비접촉으로 지지하기 위한 힘으로는 주로 자기력이 많이 이용되어 왔다. 그러나, 자기력은 자성체에 한하여 부상력이 작용하는 태생적인 한계를 가지고 있다. 이에 반해, 정전기력은 도체, 반도체, 비자성체, 유전체, 절연체 등 거의 모든 물체에 부상력을 직접 가할 수 있는 장점을 가지고 있다. 저자 등은 일찍이 LCD, PDP 등의 제조공정에 적용하기 위한 비접촉 핸들링 장치의 개발을 목표로, 이러한 정전기력을 이용하여 물체를 비접촉 핸들링하는 정전부상시스템에 관한 연구를 수행하여 유리 패널을 비접촉 지지하고 그 상태에서 반송하는 비접촉 지지¹ 및 반송 장치²를 개발하였다. 이 때 이용한 부상원리는 자기부상의 원리와 유사하다. 즉, 부상체의 바로 위에 배치한 전극에 수백 V~수 kV의 전압을 인가하여 부상체에 정전부상력을 발생시킨다. 이 때 이 정전기력을 능동적으로 제어하지 않으면 부상체의 운동은 불안정한 거동을 보이므로 자기부상과 같이 부상체의 위치와 자세를 변위센서를 이용하여 측정하고, 이를 피드백(feedback)하여 전극에 인가되는 전압을 능동 제어함으로써 부상체 운동의 안정화를 도모한다.¹ 피드백 제어기로는 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어기를 사용하였으며 충분한 부상력을 얻기 위한 고전압을 발생시키기 위해 증폭률 1000 인 고전압 증폭기를 사용하였다.

PID 제어를 이용한 기존의 정전부상 시스템의 주된 단점은 제어기의 구성요소, 특히 고전압 증폭기가 상대적으로 크고 고가인 점이다. 또한, PID 제어기와 같은 안정화 제어기나 아날로그식 변위센서도 그다지 저가는 아니다. 이에, 저자 등은 부상 시스템의 비용과 크기를 줄이기 위해 매우 간단하고 저가로 구현 가능한 릴레이 제어법을 이용한

정전부상시스템을 제안하고, 4 인치 실리콘 웨이퍼³와 두께 0.1mm 인 알루미늄 시트⁴를 비접촉 지지하는 데에 성공하였다. 릴레이 제어법을 이용함으로써 고전압 증폭기는 더 이상 필요하지 않으며 제어될 전극 수에 무관하게 단지 양/음 또는 양의 일정한 전압을 출력하는 고전압 전원과 간단한 스위치 회로만으로도 부상체의 안정부상이 가능하다.

본 논문에서는 LCD, PDP 등의 제조공정에의 적용을 목표로, 유리 패널을 낮은 비용으로 비접촉 지지할 수 있는 릴레이 제어기법을 이용한 저가의 유리 패널 정전부상시스템에 관하여 기술하고자 한다.

2. 릴레이 제어에 의한 계의 안정화

본 절에서는 릴레이 제어법을 이용한 1 자유도 정전부상시스템의 구성 및 제어방법, 안정화 원리 등에 관하여 기술한다.^{3,4} 부상체는 사각형상의 판상체(板狀體)로 가정한다.

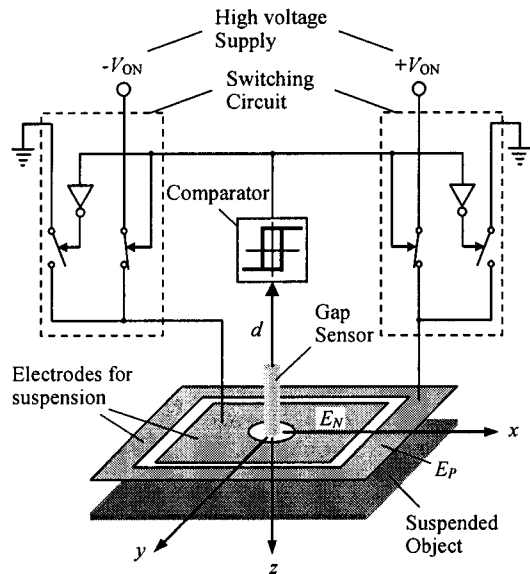


Fig. 1 One degree-of-freedom electrostatic suspension system using relay feedback control⁴

2.1 1 자유도 제어용 전극구조

Fig. 1에 나타난 바와 같이 전극은 사각 링 형상의 전극 E_p , 그리고 이와 동일한 면적을 갖는 사각형상의 전극 E_N 으로 구성된다. 전극 E_p 의 외

곽 사각형의 각 변의 길이는 부상체의 각 변의 길이와 같게 되어 있으며 전극 E_N 의 중심부에는 부상체와 전극 간 간격(gap)을 측정하기 위한 변위 센서가 장착되어 있다. 두 전극 E_p 와 E_N 에 전압이 인가될 때 동일 절대값을 갖는 반대극성의 전압이 각각에 인가되어 부상체의 전위는 항상 영볼트를 유지하게 된다. 이로부터 전극과 부상체 간에 전위차가 발생하고 따라서 부상체에 정전부상력이 가해진다.

2.2.1 자유도 제어계의 구성 및 제어방법

Fig. 1은 릴레이 제어법을 이용한 1 자유도 정전부상시스템의 구성도이다. 아날로그식 변위 센서를 이용하여 검출된 부상체의 부상 간격 d 는 비교기(comparator)에 입력되고 비교기에서는 이 입력된 부상 간격 d 와 목표 간격 d_0 를 비교하여 스위칭 회로에 스위칭 신호를 내보낸다. 스위칭 회로에서는 이 스위칭 신호에 근거하여 직류 고전압 전원에서부터 발생한 고전압 $+V_{ON}$ 과 $-V_{ON}$ 을 각각 전극 E_p 와 E_N 에 공급하거나 차단하여 부상체를 안정부상시킨다. 즉, 전극에의 인가 전압 V 는 다음과 같이 제어된다.

$$\begin{aligned} V &= V_{ON}(-V_{ON}) & \text{for } d \geq d_0 + \Delta \\ V &= 0 & \text{for } d < d_0 - \Delta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, Δ 는 불감대의 폭으로 이는 비교기의 설계시 의도적으로 설정되거나 스위칭 소자 등에 존재하는 스위칭 시간지연에 의해서 발생한다. 이 불감대의 폭 Δ 는 정상상태에 있어서의 부상체의 진동과 스위칭 소자의 수명에 밀접하게 관계한다. 불감대의 폭 Δ 가 클수록 스위칭 주파수는 작아져 스위칭 소자의 수명은 연장되나 그 대신 부상체의 진동의 진폭이 커지게 된다. 본 연구에서는 비교기에 있어서 불감대를 설정하지 않았으나 고전압 스위칭 소자에 내재하는 스위칭 시간지연 등으로 인해 불감대가 발생하였다.

2.3 안정화의 원리

제어대상에 댐핑력이 존재하지 않는 본래 불안정한 시스템에 전술한 바와 같은 간단한 형태의 릴레이 제어법칙을 적용하면, 스위칭 소자 등 제어 요소에 반드시 존재하는 불감대 등의 여러 가지 요인으로 인해 계는 불안정한 리미트 사이클(limit

cycle)의 거동을 보인다. 즉, 식 (1)의 전압에 의한 정전기력과 부상체의 중량만이 부상체에 작용하면 부상체의 운동은 불안정하게 된다. 그러나 정전부상이 대기환경에서 행하여 질 경우에는 상대적으로 큰 공기 댐핑력(air film damping force)으로 인해 부상체의 운동은 안정된 리미트 사이클을 형성하게 된다. 즉, 부상체가 전극에 대하여 상대적인 축방향 또는 톨팅 운동을 하면 전극과 부상체 사이에 공기의 출입이 발생하고 이로 인해 부상체에 공기 댐핑력이 가해진다. 통상, 정전부상시스템에 있어서는 부상 간격이 부상체의 면적에 비해 현저히 작기 때문에 이 공기의 스퀴즈 필름 효과(squeeze film effect)에 의한 댐핑력은 상당히 크다. 이 댐핑력이 부상체의 운동에 안정성을 부여하며, 따라서 정전부상시스템에 식 (1)과 같은 저가의 릴레이 제어법칙을 적용하는 것이 가능하게 된다.

한편, 전술한 예에서는 두 개의 전극에 전압을 인가할 때 동일 절대값을 갖는 반대극성의 전압을 각각에 인가하였으나 특히 부상체의 전위를 영볼트로 유지할 필요가 없는 경우에는 하나의 전극은 항상 접지시키고 다른 하나의 전극의 전압만을 부상 간격에 근거하여 제어하여도 된다(본 연구에서는 이 방법을 사용하였음). 그 경우 고전압 전원은 한 개로 충분하고, 따라서 부상장치는 더욱 저가로 구성된다.

3. 유리 패널의 정전부상을 위한 전극 구조

유리와 같이 미세한 도전성을 갖는 유전체에 있어서의 정전 부상력의 발생원리는 도체에 있어서의 발생원리와 다소 차이가 있다. 본 장에서는, 이 둘 간의 차이점에 대하여 논하고 유리 패널의 정전부상에 적합한 전극 패턴에 대하여 기술한다.¹

부상체가 도체인 경우에는, 부상체 내부에서 전하가 자유롭게 이동할 수 있기 때문에 전극에 전압이 인가된 직후, Fig. 2(a)에 도시한 바와 같이, 전압 $+V/-V$ 의 전극과 대향(對向)하는 부상체의 표면에는 음/양의 전하가 부상체 표면의 전면에 걸쳐 순식간에 나타난다. 따라서, 전극과 부상체 간의 간극에는 강한 전기장이 골고루 형성되고, 부상체는 전극에 전압이 인가됨과 동시에 곧 바로 부상하게 된다.

한편, 부상체가 유리와 같은 것들의 경우에는,

이들은 유전체로서의 특성과 고저항체로서의 특성을 동시에 갖기 때문에 전극에 전압을 인가함으로써 형성되는 전기장의 모양이나 전하의 거동은 꽤 복잡한 양상을 나타낸다.

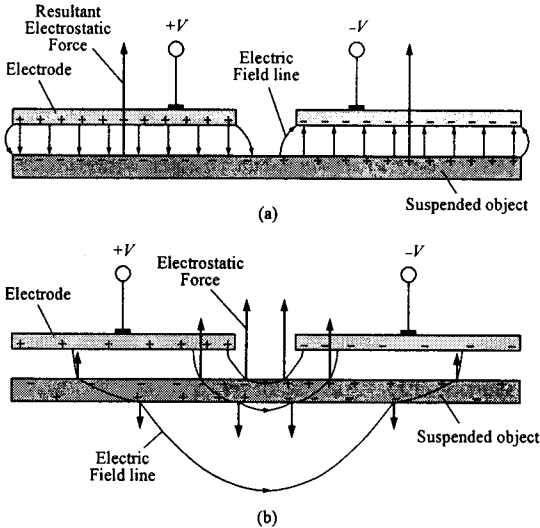


Fig. 2 Distribution of electric charge, electric field lines and electrostatic forces. (a) for conductors and (b) for dielectrics¹

우선, 부상체를 유전체로 볼 때의 부상력 발생 메커니즘에 대하여 설명하면 다음과 같다. 전극에 전압이 인가된 직후, 부상체 내의 자유전하는 곧바로 이동할 수 없기 때문에 부상체는 유전체로서의 성질을 나타낸다. 즉, 부상체는 분극하게 되고, Fig. 2(b)에 나타난 바와 같은 전기장(전기력선)이 형성된다. 전기장 내에 있는 유전체는 유전율이 큰 물체가 유전율이 작은 쪽으로 끌어 당겨지는 힘을 받는다. 유리의 유전율은 대기보다 크다. 따라서, 부상체의 상면과 저면에는 각각 부상체를 끌어올리고 끌어내리는 힘이 동시에 작용한다. 이러한 힘은 전기장의 세기의 2 승에 비례한다. 본 논문을 포함한 판상체의 정전부상의 경우, 부상체 상면에서의 전기장의 세기는 저면에서의 세기보다 크다. 따라서, 부상체 상면에 작용하는 힘은 저면보다 크고, 이 상면에 작용하는 힘에서 저면에 작용하는 힘을 뺀 힘, 즉 그래디언트힘(gradient force)이 부상력의 일부로서 작용하게 된다. 일반적으로 그래디언트힘은 쿨롱힘에 비해 매우 작다. 그러나, 서로 다른 크기의 전압(Fig. 2(b)의 경우, +V, -V)이 인가되

는 전극 간의 경계부근에서는 꽤 큰 그래디언트힘을 얻을 수 있다. 전극에 전압을 인가하였을 때 형성되는 전기장은, Fig. 2(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. 이로 부터, 전극 간의 경계부근에서는 강한 부상력이 얻어진다. 반면, 경계에서 먼 곳에서는 전기장의 세기가 작으므로 분극 발생도 적고 부상체의 상면과 저면에서의 전기장의 강도 차이도 작게 된다. 따라서, 경계에서 먼 곳에서는 부상력이 약하게 된다. 한편, 경계부근에서는 부상체의 상면에서 들어가서 부상체의 내부를 통과한 후 다시 상면으로 나오는 전기력선이 존재하므로, 이 부분에서는 부상체를 끌어올리는 힘이 작용하여 강한 부상력이 얻어진다. 최적의 전극 설계가 이루어진다면 이 힘이 부상력의 대부분을 차지할 것으로 생각된다.

이상은 부상체를 유전체로 보고 부상력의 발생원리에 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 유도전하의 시간지연에 의해 발생하는 전압과 부상력 간의 시간지연은 부상시스템의 동적안정성에 악영향을 미친다. 시간지연은 전기장의 세기와 부상체의 저항률과 관계가 있다. 전기장이 강할수록, 또 저항률이 작을수록 시간지연은 작아진다. 일반적으로 부상체는 이미 어떤 저항률을 갖고 있는 물건으로 주어지기 때문에 시간지연을 작게 하려면 전기장의 강도를 크게 하는 수 밖에 없다. Fig. 2(b)의 전기장의 모양을 살펴 보면, 전극 간의 경계부근에서는 전기장이 강하므로 이 경계부근에 대향하는 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. 2(a)에 도시한 도체의 경우와 같아지게 된다.

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

4. 다자유도 운동제어 및 전극구조

4.1 다자유도의 안정화

정전부상 시스템에 있어서, 판상체의 경우, 그 넓은 면에 있어서는 그 면에 대향하도록 다수의 전극을 배치하고 이들 전극에 인가되는 전압을 능동적으로 제어한다. 이로부터 부상체의 축방향 운동(z 축)과 수평면내의 2축(x, y 축)에 대한 회전운동, 즉, 피칭, 롤링운동의 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 정전력을 얻을 수 없고 제어계만 복잡하여질 뿐이다. 따라서 판상체의 정전부상 시스템에 있어서는 부상체의 x, y 운동의 안정화에 수동안정성을 이용한다. 즉, 전극들에 의해 형성되는 전극 패턴의 외곽형상과 그 크기가 부상체의 그 것과 동일하고 전극들을 부상체의 상부에 배치하면, 부상체의 x, y 운동은 정전장의 프린지필드(fringe field) 효과에 의해 수동적으로 구속되어 안정된 거동을 보인다.⁵

4.2 다자유도 안정부상을 위한 전극구조

Fig. 3은 도체인 사각형상 판상체의 정전부상에 적합한 전극 구조를 나타낸다. 전극은 각각 2개의 전극으로 구성되는 4개의 전극그룹으로 나뉘어져 각 전극그룹은 각각 부상체에 정전력을 인가하기 위한 하나의 액추에이터로서 작용한다. 그림에 있어서 전극 E_{jP} 와 E_{jN} 이 하나의 전극그룹 j 를 형성한다. 단 $j=1,2,3,4$ 이다. 전극 E_{jP} 와 E_{jN} 은 동일면적이고 또 이들 전극에 전압이 인가될 때 서로 반대극성의 같은 절대치를 갖는 전압이 인가되어 부상체의 전위는 영볼트를 유지하도록 되어 있다. 전극

E_{jP} 와 E_{jN} 의 면적중심점은 일치하고 그 면적중심점에는 변위센서가 설치되어 있다. 또, 전극 E_{1P} , E_{2P} , E_{3P} , E_{4P} 에 의해 형성되는 외곽 사각형의 각 변의 길이는 부상체의 각 변의 길이와 같다. 각 전극그룹에의 인가전압은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 다른 전극그룹과 독립해서 제어된다. 즉 전극 E_{jP} 와 E_{jN} 에의 인가전압의 공급 또는 차단은 변위센서 j 로부터 검출한 부상 간격 신호에만 의존하여 제어된다. 제어방법은 1 자유도 모델에 있어서 설명한 바와 같다.

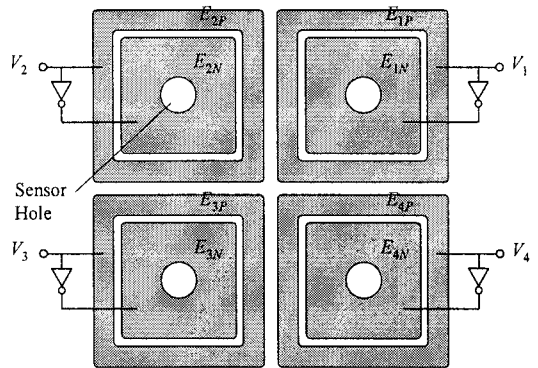


Fig. 3 Electrode pattern adequate for the suspension of rectangular-shaped conductive plates

한편, 본 논문에서는 사각형의 판상체로써 유리 패널의 정전부상을 수행하고 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 유리는 고저항의 유전체이므로 전극에 전압을 인가한 후 필요한 부상력에 상응하는 충분한 전하가 부상체의 표면에 유도되는 데에는 상당한 시간을 요한다. 따라서, 이 시간을 줄이기 위해서는 전극을 좀 더 잘게 분할하여 다른 크기의 전압이 인가되는 전극간의 경계를 다수 형성하여야 한다. 본 논문에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 각각의 전극그룹을 형성하는 전극의 수를 4개로 증가시켰다.¹ 각 그룹내의 전극 E_{j2} 와 E_{j4} 는 항상 접지시키고 전극 E_{j1} 과 E_{j3} 에의 인가전압만을 변위센서 j 로부터의 부상 간격 신호에 근거하여 공급 또는 차단하였다. 단, $j=1,2,3,4$ 이다. Fig. 4의 전극 구조를 보면, 전극 E_{j1} 과 E_{j2} , E_{j2} 과 E_{j3} , E_{j3} 와 E_{j4} 간에 서로 다른 크기의 전압이 인가되는 전극 간의 경계들이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이와 같이, 전극 간의 경계를 다수 형성시킴으로써 부상개시시간(정전기력, 즉 전압을 인가한 후

비접촉 부상하기까지의 시간)을 단축시키고 시스템의 동적 안정성을 향상시킬 수 있다. 한편, 전극 E_{j1} 과 E_{j3} 에 전압 $+V_{ON}$ 이 인가될 때, 전극 E_{j2} 와 E_{j4} 에는 그와 반대극성의 전압 $-V_{ON}$ 을 인가하는 것도 가능하다.

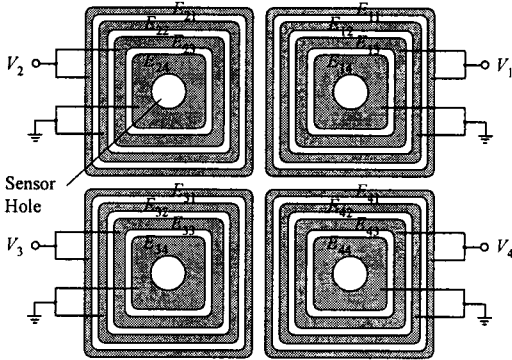


Fig. 4 Electrode pattern adequate for the suspension of glass panels¹

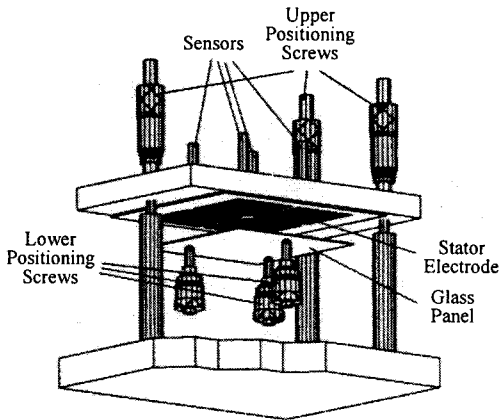


Fig. 5 Schematic drawing of experimental apparatus¹

5. 실험결과 및 고찰

5.1 실험장치

Fig. 5 는 실험장치 기구부의 개략도이다. 실험장치는 유리 패널에 정전기력에 의한 부상력을 가하기 위한 고정자 전극(stator electrode)과 그 경사조절부, 전극과 유리 패널간의 초기간격조정부, 전극과 유리 패널간의 간격을 측정하기 위한 변위센서로 구성된다.

정전기력을 이용하여 유리 패널과 같은 판상(板狀)의 물체를 부상시킬 경우, 부상체의 횡방향 구속력은 그다지 크지 않다. 따라서 부상시 부상체를 수평으로 유지하는 것은 부상체의 횡방향 미끄러짐을 방지한다는 측면에 있어서 매우 중요하다. 본 실험장치에서는 Fig. 5 에서 알 수 있듯이 전극측을 3 개의 마이크로미터 위치결정 스크류로 지지함으로써 수평도가 조절 가능하도록 하였다. 또한 유리 패널도 3 개의 마이크로미터 위치결정 스크류로 지지하여 수평도의 조정 및 전극과 유리 패널간의 초기 간격이 설정 가능하도록 하였다.

부상실험에 사용한 고정자 전극의 구조로 앞에서 설명한 Fig. 4 의 패턴을 사용하였다. 4 개의 전극그룹에 의해 형성되는 정사각형외곽형상의 변의 길이는 부상체인 유리 패널의 변의 길이와 같다. 각 전극그룹은 4mm 씩 간격을 두고, 각 전극그룹내의 전극들은 각각 2mm 씩 서로 간격을 두고 배치되어 있다. 한편, 필요한 경우 부상체의 전위를 0V 로 유지할 수 있도록 하기 위해 모든 전극의 면적을 동일하게 하였다. 한 예로, 인가전압 V_1 와 V_3 의 극성으로 양(+)을, V_2 와 V_4 의 극성으로 음(-)을 택함으로써 정상상태에 있어서 부상체의 전위는 0V 가 된다. Fig. 6 은 제작한 고정자 전극의 사진이다. 전극 패턴은 유리에폭시 기판상에 $35\mu\text{m}$ 의 동막이 부착된 감광기판을 이용하여 에칭기법으로 제작하였다. 각 전극의 면적은 3.6cm^2 이다.

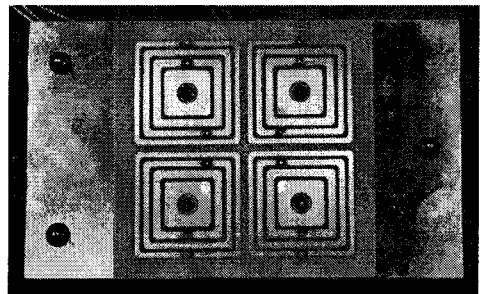


Fig. 6 Photograph of the fabricated stator electrode¹

본 실험에서 사용한 유리 패널은 소다석회유리(soda-lime glass)로, 그 크기는 $100\times 100\text{mm}^2$, 두께는 0.7mm, 질량은 17.6g 이다. 한편, 변위센서로는 광파이버식 센서(Photonics 사, 모델 PM-15C)를 사용하였다.

제어기에 있어서 고전압 스위칭 소자로써 반도체 릴레이(마쯔시타 전공(電工)의 Photo-MOS Relay AQP258)를 사용하였다. 이 스위칭 소자의 내압은 1.5kV 이므로 2 소자를 직렬로 연결하여 3kV 까지의 전압의 절환이 가능하도록 하였다. Fig. 7 은 제작한 릴레이 제어기를 테스트한 결과이다. 비교기에 있어서 불감대의 폭은 0 으로 설정하였으며 테스트용 입력신호로는 진폭 50mV, 주파수 250Hz 의 정현파를 사용하였다. 출력전압에는 비교기에 있어서의 불감대의 폭이 0 임에도 불구하고 약 0.5ms 의 스위칭 시간지연이 존재한다. 본 실험에서 이용한 반도체 릴레이의 동작시간은 0.35ms 로 상당히 큰 값을 가지며 이것이 스위칭 시간지연의 주 원인으로 생각된다.

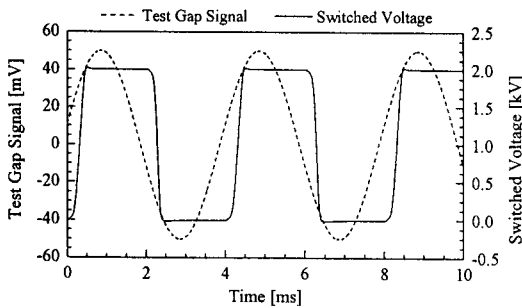


Fig. 7 Test result of switching time delay for the relay controller

5.2 실험결과 및 고찰

대기환경에서 소다석회 유리 패널의 부상실험을 수행하였다. 목표 간격 0.3mm, 스위칭 온 전압 2kV 일 때 유리 패널은 안정적으로 부상하였으나 정상상태에서 진폭 6.5 μ m 의 리미트 사이클을 보였다. 이와 같이 상당히 큰 진폭이 발생하는 주된 이유는 스위칭 회로에 존재하는 스위칭 시간지연 때문이다. 공기의 댐핑력을 증가시킴으로써 부상체의 진동을 억제하기 위해 부상 간격을 0.1mm 로 하여 부상실험을 수행하였다. 스위칭 온 전압은 0.8kV 이었다. Fig. 8 은 안정부상 후 센서 장착위치에 있어서의 간격의 변동을, Fig. 9 는 그 때의 전극 인가 전압을 나타낸다. 진동의 진폭이 거의 미크론 이하로 억제되고 있음을 알 수 있다. Fig. 10 은 유리 패널이 초기 간격 0.11mm 로부터 목표 간격 0.1mm 로 부상할 때의 과도특성(간격의 변화)을 측정한

결과이다. 스위칭 온 전압은 0.8kV 이었다. 제어시작으로부터 부상되기까지 약 17 초가 걸리는 것을 알 수 있다. 이는 3 장에서 설명한 바와 같이 유리는 고저항체이기 때문에 유리 패널을 부상시키기 위한 충분한 전하가 유리 표면에 모이는데 시간이 요하기 때문이다. 전극을 좀 더 잘게 분할하여 전하 완화시간을 줄임으로써 부상개시시간은 단축될 것으로 예상된다. 또한 스위칭 온 전압의 크기를 보다 크게 설정함으로써 부상개시시간은 단축될 것으로 판단된다. 그러나, 그 경우 정상상태에 있어서 유리 패널의 진동은 보다 커질 것으로 예상된다. Fig. 11 은 안정부상상태의 유리 패널을 보여주고 있다.

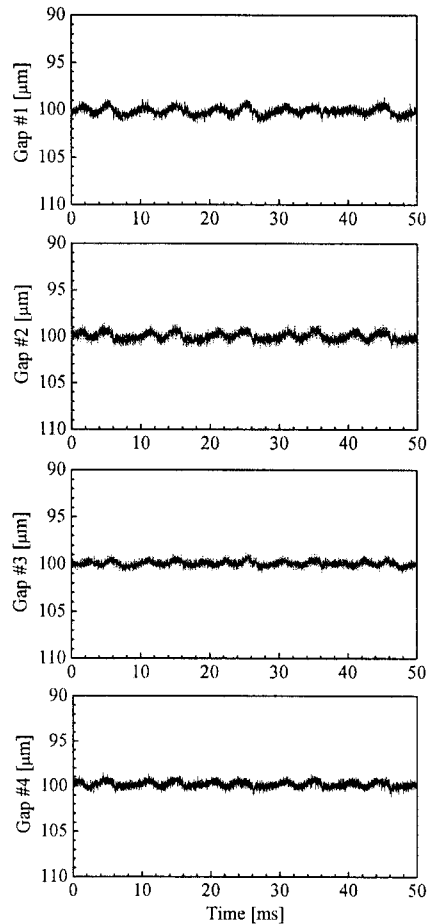


Fig. 8 Gap fluctuations in state of suspension where the suspension gap is 0.1mm

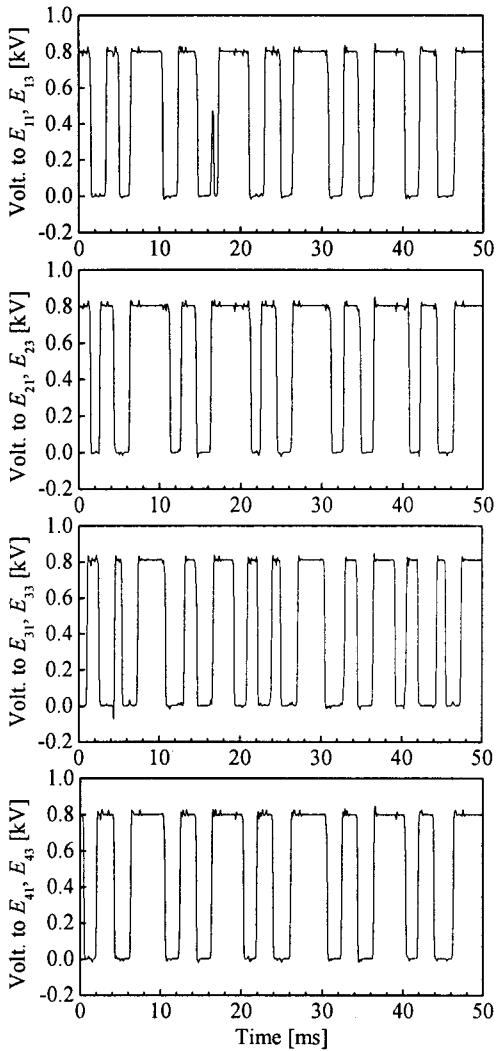


Fig. 9 Voltages supplied to electrodes in state of suspension where the suspension gap is 0.1mm

본 연구에서는 부상체의 위치를 연속적으로 검출하여 그 움직임을 자세히 관찰하기 위해 상용의 아날로그식 변위센서를 사용하였다. 그러나, 부상체의 움직임을 특별히 관찰할 필요가 없을 때에는 아날로그식 변위센서 대신 부상체가 기준 거리(목표 간격)보다 멀고 가까움에 따라 단지 ON, OFF 신호만을 출력하는 비교적 저가인 근접스위치를 사용하여도 부상체를 안정적으로 부상시킬 수 있다. 그 경우 보다 저가의 정전부상시스템을 구축할 수 있게 된다.

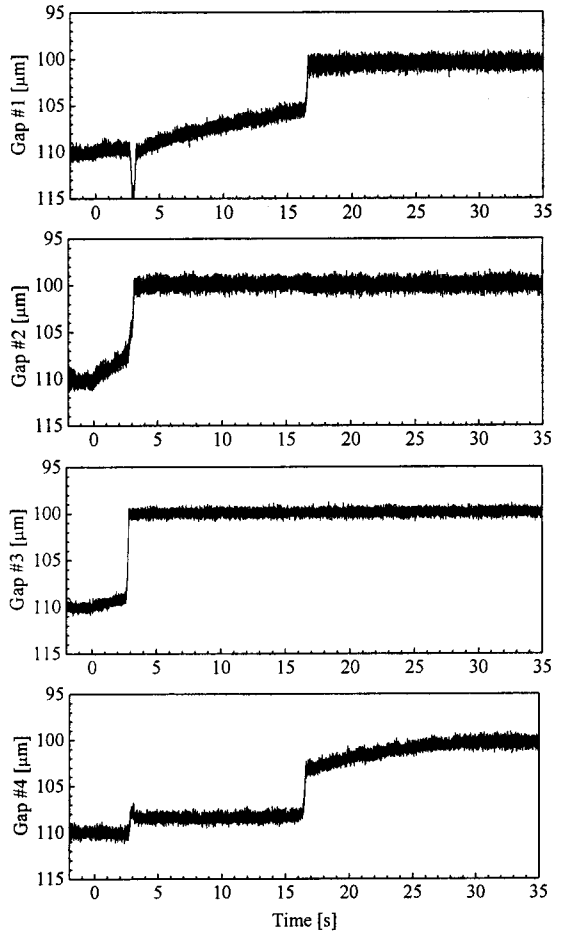


Fig. 10 Transient response where the suspension gap is 0.1mm

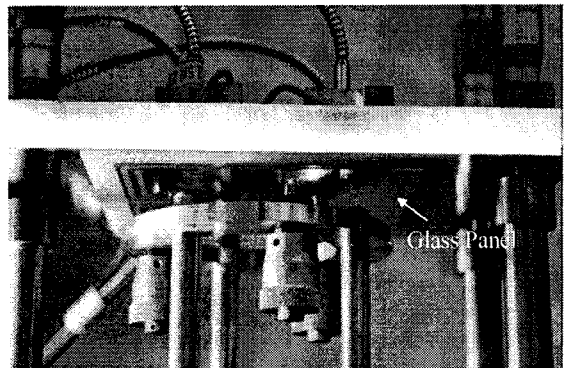


Fig. 11 Photograph showing the glass panel under stable suspension

6. 결론

본 연구에서는 1 자유도 모델을 이용하여 릴레이 제어에 의한 계의 안정화 원리에 대하여 기술하고, 유리 패널과 같이 미세한 도전성을 갖는 유전체의 정전부상에 적합한 전극의 구조, 안정부상을 위한 다자유도 운동제어 및 이를 위한 전극 구조 등에 관하여 논하였다. 또한, 4 개의 전극그룹으로 구성된 부상용 전극을 이용하여 크기 $100 \times 100 \text{mm}^2$, 두께 0.7mm 인 유리 패널에 대한 부상실험을 수행하여 유리 패널이 안정적으로 부상함을 확인하였고, 부상 간격 0.1 mm 에서 리미트 사이클(limit cycle)의 진폭이 마이크론 이하로 억제됨을 확인하였다. 이는 전극과 부상체 간에 존재하는 공기의 댐핑력이 부상체의 안정화에 기여하기 때문이다.

릴레이 제어에 의한 정전부상시스템은 고전압 전원과 간단한 스위칭 회로, 근접스위치(본 연구에서는 부상시의 부상체의 움직임을 고분해능으로 자세히 관찰하기 위해서 근접스위치 대신에 야날로그식 변위센서를 사용하였음) 등으로 구성될 수 있기 때문에 저비용의 콤팩트한 시스템 구성이 가능하다. 또한 제어장치의 구조가 간단하기 때문에 시스템의 신뢰성을 높일 수 있고 고장시의 보수가 용이하다.

본 논문을 통해 개발된 저가격의 유리 패널 정전부상장치는 향후 LCD, PDP 등과 같은 평면 디스플레이 장치의 제조공정에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Jeon, J. U. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of Dielectrics," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, pp. 938-946, 1998.
2. 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.
3. Jeon, J. U. and Lee, S., "Electrostatic Suspension System of Silicon Wafer using Relay Feedback Control," J. Korean Soc. Precision Eng., Vol. 22, No. 10, pp. 56-64, 2005.
4. Jeon, J. U. and Kim, S. M., "Electrostatic Suspension

System of Flexible Objects using Relay Feedback Control," J. Korean Soc. Precision Eng., Vol. 23, No. 6, pp. 104-110, 2006.

5. Jeon, J. U., Park, K. T. and Park, K. Y., "A Measurement Apparatus of Lateral Restoring Force Exerted on Electrostatically Suspended Object," J. Korean Soc. Precision Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 60-69, 2005.