

릴레이 제어법을 이용한 유연 판상체의 정전부상에 관한 연구

전종업#, 김선민*

Electrostatic Suspension System of Flexible Objects using Relay Feedback Control

Jong Up Jeon[#] and Sun-Min Kim^{*}

ABSTRACT

A design and control of electrostatic suspension system for flexible objects is presented. A number of electrode pairs of which the number depends on the object flexibility are positioned above the object and the voltages applied to each electrode pair are controlled, independently on the others, on the basis of the gap length. 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. Employing fourteen electrode pairs, a thin aluminum plate with a thickness of 0.1 mm has been suspended at a gap length of 0.75mm.

Key Words : Electrostatic forces (정전기력), Electrostatic suspension (정전부상), Flexible objects (유연한 물체), Relay feedback control (릴레이 제어), Contactless support (비접촉 지지)

1. 서론

자기력과 달리, 정전기력은 물질의 종류에 관계 없이 물체에 가해질 수 있는 장점이 있어, 이 정전기력을 도체나 반도체, 유전체 등의 비접촉 지지 및 구동에 이용하고자 하는 정전부상 및 반송시스템에 관한 연구가 진행되어 오고 있다.¹⁻⁹ 그러나,

이러한 기존의 정전부상시스템은 주로 강체인 부상체를 대상으로 설계되었으므로, 알루미늄 시트와 같이 유연한(flexible) 판상체(板狀體)를 정전기력으로 비접촉 지지하기 위해서는 기존 시스템에 수정이 가해져야 한다. 본 연구에서는 판상체에 정전부상력을 가하기 위한 전극의 수를 판상체의 유연한 정도에 따라 증가시킴으로써 유연한 판상

☞ 접수일: 2006년 1월 31일; 게재승인일: 2006년 4월 26일

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

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

* 광주과학기술원 기전공학과

체의 안정적 부상을 도모하고자 한다. 이 때, 판상체의 유연한 정도가 클수록 안정부상을 위해 요구되는 전극의 수도 증가하게 된다.

정전부상의 원리는 자기부상의 원리와 유사하다. 즉, 부상체의 바로 위에 전극을 배치하고 이 전극에 수백 V~수 kV 의 전압을 인가하여 부상체에 정전부상력을 발생시킨다. 이 때, 이 정전부상력(정전부상력은 전극에의 인가전압의 제곱에 비례하고 전극과 부상체 간의 간격에 반비례함)을 능동적으로 제어하지 않으면 부상체의 운동은 불안정한 거동을 보이므로 부상체의 위치와 자세를 변위센서를 이용하여 측정하고, 이를 피드백(feedback)하여 전극에 인가되는 전압을 능동제어함으로써 부상체 운동의 안정화를 도모한다. 기존의 정전부상시스템에 있어서 피드백 제어기로는 주로 PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어가 이용되고 있다. 그러나, PID 제어법의 주된 단점은 제어기의 구성요소, 특히 고전압 증폭기가 상대적으로 크고 고가인 점이다. 또한, PID 제어기와 같은 안정화 제어기나 아날로그식 변위센서도 그다지 저가는 아니다. 유연한 판상체의 정전부상에 기존의 PID 제어법을 사용하면 전극의 수가 늘어남에 따라, PID 제어기의 채널 수와 고전압 증폭기 및 아날로그식 변위센서의 수가 비례적으로 증가하게 된다. 따라서, 시스템 구축 비용과 크기는 비약적으로 증가하게 되고, 이는 유연 판상체의 정전부상시스템의 실용화에 커다란 걸림돌이 될 것으로 예상된다. 저자들은 부상시스템의 비용과 크기를 줄이기 위해 매우 간단하고 저가로 구현가능한 릴레이 제어법을 이용한 정전부상시스템을 제안하였다.⁹ 릴레이 제어법을 이용함으로써 단지 2 채널의 고전압 전원과 근접스위치, 그리고 간단한 스위칭 회로만으로도 부상체의 안정부상이 가능하다. 유연한 판상체의 정전부상에 이 릴레이 제어법을 이용하면 전극수에 비례하여 저가인 스위칭 회로와 근접 스위치의 수를 늘리는 것만으로도 안정부상이 가능하므로 지극히 저가의 부상시스템을 구현할 수 있다.

본 논문에서는 알루미늄 시트와 같은 유연한 판상체를 릴레이 제어기법을 이용하여 비접촉 지지하기 위한 정전부상시스템의 설계 및 제어에 관하여 기술하고자 한다.

2. 릴레이 제어법을 이용한 정전부상시스템의 안정화 원리

본 절에서는 부상체가 강체인 경우에 대하여, 먼저 릴레이 제어법을 이용한 1 자유도 정전부상시스템의 구성 및 제어방법, 안정화 원리 등에 관하여 기술한 후, 부상체의 다자유도 안정 부상에 관하여 기술한다.⁹ 부상체는 도체이고 사각형상의 판상체(板狀體)로 가정한다.

2.1 자유도 제어용 전극구조

Fig. 1 에 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 외곽 사각형의 각 변의 길이는 부상체의 각 변의 길이와 같게 되어 있으며 전극 E_N 의 중심부에는 부상체와 전극 간 간격(gap)을 실시간으로 측정하기 위한 변위센서가 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.

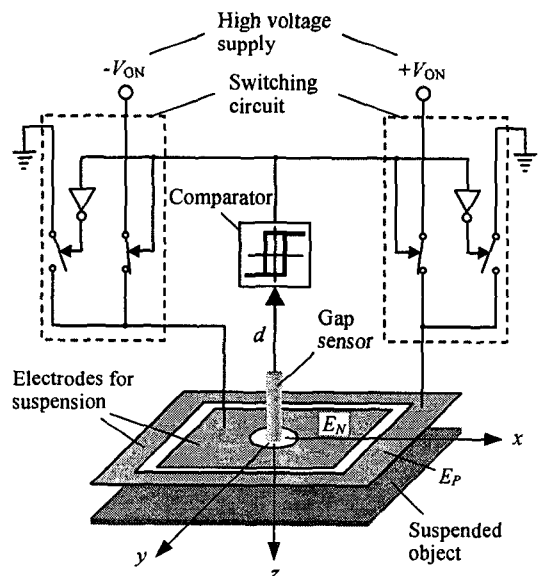


Fig. 1 One degree-of-freedom electrostatic suspension system using relay feedback control

2.2 자유도 제어계의 구성 및 제어방법

Fig. 1 은 릴레이 제어법을 이용한 1 자유도 정

전부상시스템의 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 전원으로 부터 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 틸팅 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.

2.4 다자유도 안정부상

정전부상시스템에 있어서, 판상체의 경우, 그 넓은 면에 있어서는 그 면에 대항하도록 다수의 전극을 배치하고 이들 전극에 인가되는 전압을 능동적으로 제어한다. 부상체가 강체인 경우, 전극은 각각 2 개의 전극(2 개의 전극은 동일면적이고 이들 전극에 전압이 인가될 때 서로 반대극성의 같은 절대치를 갖는 전압이 인가됨)으로 구성되는 3 개의 전극 쌍으로 나뉘어져 각 전극 쌍은 각각 부상체에 정전기력을 인가하기 위한 하나의 액추에이터로서 작용하고, 이로부터 부상체의 축방향 운동(z 축)과 수평면내의 2 축(x, y 축)에 대한 회전 운동, 즉, 핏칭, 롤링 운동의 안정화를 도모한다.

한편, 부상체의 측면에 있어서는, 부상체의 x, y 방향 운동을 능동제어하기 위해 측면에 대항하도록 전극을 배치하여 전압을 인가하여도 부상체 측면의 면적이 대단히 작기 때문에 큰 정전기력을 얻을 수 없고 제어계만 복잡하여질 뿐이다. 따라서 판상체의 정전부상시스템에 있어서는 부상체의 x, y 방향 운동의 안정화에 수동안정성을 이용한다. 즉, 전극들에 의해 형성되는 전극 패턴의 외곽형상과 그 크기가 부상체의 그것과 동일하고 전극들을 부상체의 상부에 배치하면, 부상체의 x, y 방향 운동은 정전기장의 프린지 필드(fringe field) 효과에 의해 수동적으로 구속되어 안정된 거동을 보인다.^{10,11}

3. 유연 판상체의 정전부상시스템의 구성

유연한 판상체의 경우, 강체의 경우보다 많은 수의 전극 쌍을 판상체의 바로 위에 배치함으로써 안정 부상이 가능하다. 이 때, 판상체의 유연한 정도가 클수록 안정부상을 위해 요구되는 전극 쌍의 수도 증가하게 된다.

Fig. 2 는 두께 0.1mm 인 알루미늄 시트를 정전기력을 이용하여 안정부상시키기 위한 전극구조를 나타낸다. 전극은 각각 2 개의 전극으로 구성되는 14 개의 전극 쌍으로 나뉘어져 각 전극 쌍은 각각 부상체에 정전기력을 인가하기 위한 하나의 액추에이터로서 작용한다. 그림에 있어서 전극 E_p 와

E_{iN} 이 하나의 전극 쌍 i 를 형성한다. 단 $i=1, 2, \dots, 14$ 이다. 전극 E_{iP} 와 E_{iN} 은 동일면적이요 또 이들 전극에 전압이 인가될 때 서로 반대극성의 같은 절대치를 갖는 전압이 인가되어 부상체의 전위는 영볼트를 유지하도록 되어 있다. 전극 E_{iP} 와 E_{iN} 의 면적중심점은 일치하고 그 면적중심점에는 변위센서서가 설치되어 있다. 또, 전극 $E_{1P}, E_{2P}, \dots, E_{14P}$ 에 의해 형성되는 사각형의 각 변의 길이는 부상체의 각 변의 길이와 같다.

각 전극 쌍에의 인가전압은 Fig. 3 에 나타난 바와 같이 다른 전극 쌍과 독립해서 제어된다. 즉 전극 E_{iP} 와 E_{iN} 에의 인가전압의 공급 또는 차단은 변위센서 i 로부터 검출한 부상 간격 신호에만 의존하여 제어된다. 제어방법은 1 자유도 모델에 있어서 설명한 바와 같다. 한편 본 연구에서는 전극에 전압이 인가될 때, 전극 E_{iP} 에는 양전압을, 전극 E_{iN} 에는 음전압을 인가하였다.

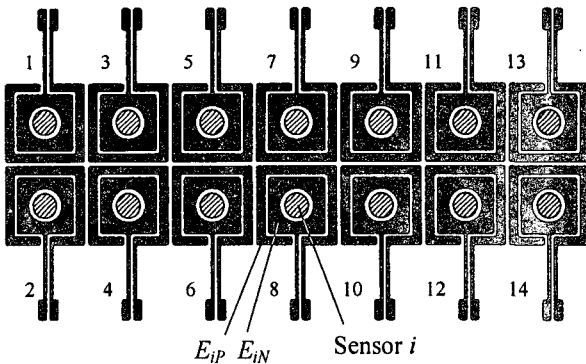


Fig. 2 Stator electrode pattern for the suspension of flexible objects like aluminium sheet

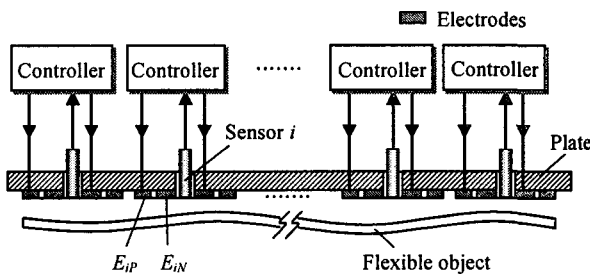


Fig. 3 Schematic drawing of electrostatic suspension system for flexible objects

4. 실험 및 고찰

4.1 실험장치

Fig. 4 는 본 연구에서 제작한 전극의 사진으로, 전극은 유리 에폭시 기관 상에 두께 $35\mu\text{m}$ 의 동막이 부착된 감광기관을 이용하여 에칭기법으로 제작하였다. 변위센서로는 와전류식 변위센서를 이용하였다. 부상체는 유연한 알루미늄 시트로, 그 크기는 $280 \times 80\text{mm}^2$, 두께는 0.1mm , 질량은 5.7g 이다. 전극 판은 3 개의 마이크로미터 위치결정 스크류에 의해 지지되고 위치결정 스크류의 높이를 조절함으로써 전극의 수평도를 조정하였다. 알루미늄 시트는 3 개의 마이크로미터 위치결정 스크류에 의해 지지되는 절연판 위에 셋팅하였으며 스크류의 높이를 조절함으로써 전극과 부상체 간의 초기 간격을 설정하였다. Fig. 5 는 실험장치의 사진이다.

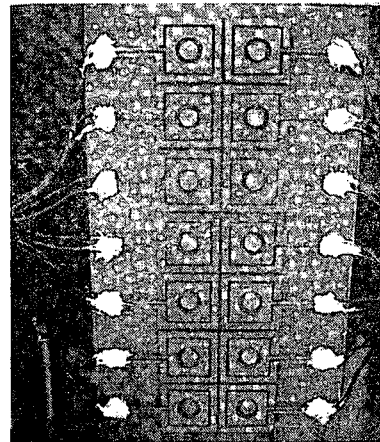


Fig. 4 Photograph of the electrodes

제어기에 있어서 스위칭 소자로는 마쯔시타 전공(電工)의 포토 모스 릴레이 AQV258 을 사용하였다. 이 스위칭 소자의 내압은 1.5kV 이다. 제작한 릴레이 제어기의 시간지연을 테스트 한 결과 비교기에 있어서 불감대의 폭을 0 으로 설정하였음에도 불구하고 약 0.5ms 의 스위칭 시간지연이 존재하였다. 본 실험에서 사용한 반도체 릴레이의 동작시간은 0.35ms 로 상당히 큰 값을 가지며 이것이 스위칭 시간지연의 주 원인인 것으로 판단된다.

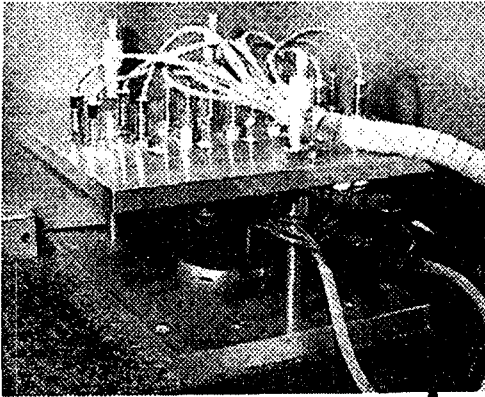


Fig. 5 Photograph of the experimental apparatus

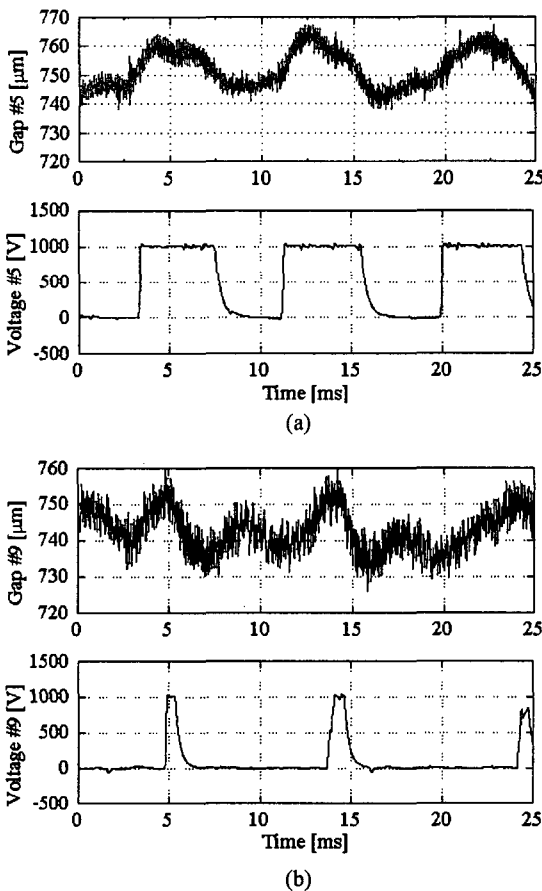


Fig. 6 Gap and voltage variations during suspension: (a) at channel #5, (b) at channel #9

4.2 실험결과 및 고찰

대기환경에서 알루미늄 시트의 부상실험을 수행하였다. 초기 간격과 목표 간격이 각각 1mm, 0.75mm 이고, 전극에의 스위칭 전압이 1kV(-1kV) 일 때, 릴레이 제어가 작동하는 순간 알루미늄 시트는 전극 쪽으로 당겨져 안정적으로 부상하였다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 채널 #5와 #9에 있어서 안정부상 후 센서 장착 위치에서의 부상 간격의 변동과 그 때의 인가전압을 나타낸 것이다.

정상상태에서 안정적인 리미트 사이클의 거동을 보이고 있으나 진폭 20μm 의 진동이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 상당히 큰 진동이 발생하는 것은 주로 스위칭 회로에 존재하는 스위칭 시간지연 때문이다. 스위칭 시간지연이 매우 작은 고전압 스위칭 소자를 개발, 사용함으로써 정상상태에서의 진동의 진폭을 줄일 수 있음은 명백하다. 불가피하게 본 연구에서와 같이 스위칭 시간지연이 존재하는 스위치를 사용하여야 하는 경우, 식 (1)과 같은 단순한 구조의 제어가 아닌 스위칭 조건식에 스위칭 시간지연 및 부상체의 위치, 속도 정보가 포함되는 보다 복잡한 구조의 제어를 설계, 사용함으로써 진동을 억제할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 대해서는 향후 추가적인 연구를 필요로 한다.

Fig. 6을 살펴 보면 채널 #5의 경우 전압의 공급 및 차단시간이 거의 비슷하나 채널 #9의 경우에는 공급시간과 차단시간 간에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 채널 #5에 해당되는 알루미늄 시트 부분은 대략 목표 간격 0.75mm 부근에서 진동하나 채널 #9에 해당하는 부분은 목표 간격보다 작은 간격(약 0.742mm)을 중심으로 진동하고 있음을 알 수 있다. 이는 비록 각각의 전극 채널의 인가전압은 다른 채널과 독립적으로 제어되어 알루미늄 시트에 가해지는 정전 부상력은 채널 별로 각각 독립적으로 가해지지만 각 채널에 해당하는 알루미늄 시트 부분은 서로 기계적으로 커플링되어 있어서(알루미늄 시트는 임의의 강성을 갖는 연속체이므로) 이웃한 시트 부분의 움직임에 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 7은 안정 부상상태의 알루미늄 시트를 보여주고 있다.

본 연구에서는 부상체의 위치를 연속적으로 검출하여 그 움직임을 자세히 관찰하기 위해 상용의 아날로그식 변위센서를 사용하였다. 상용의 아날로그식 변위센서는 비교적 고가이고 부상체가

유연할수록 더 많은 수의 센서를 필요로 하므로, 부상체의 유연한 정도가 증가함에 따라 시스템 구축 비용도 매우 증가하게 된다. 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. 따라서 아날로그식 변위센서 대신 근접스위치를 사용하는 경우, 보다 저가의 정전부상시스템을 구축할 수 있게 된다.

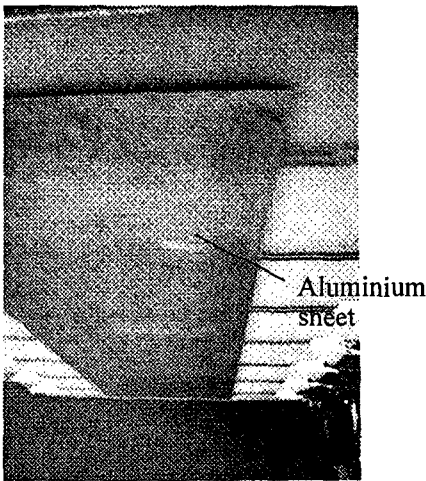


Fig. 7 Photograph showing the aluminium sheet under stable suspension

본 연구에서는 한 쌍의 전극을 이루는 두 개의 전극에 전압을 인가할 때 동일 절대값을 갖는 반대극성의 전압을 각각에 인가하였으나 부상체의 전위를 특별히 영볼트로 유지할 필요가 없는 경우에는 하나의 전극은 항상 접지시키고 다른 하나의 전극의 전압만을 부상 간격에 근거하여 제어하여도 된다. 이 경우 고전압 전원은 양극성 전원이 아닌 단극성 전원으로 충분하고, 따라서 부상계는 더욱 저가로 구성되어 진다.

만약 부상실험이 진공환경에서 수행되면, 부상체의 안정부상에 기여하는 공기에 의한 댐핑력이 발생하지 않으므로 부상체의 움직임은 불안정해진다. 이 경우, 위상평면에서 설계한 절환곡선을 따라 스위칭 동작이 일어나는 뱅뱅제어기¹²를 사용

함으로써 안정적인 부상체의 움직임을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 단, 뱅뱅제어기를 이용한 부상시스템에서는 부상체의 연속적인 위치와 속도에 대한 정보가 제어기에 피드백되어야 하므로 근접스위치는 사용할 수 없고 아날로그식 변위센서를 사용하여야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 알루미늄 시트와 같이 유연한 물체를 정전기력을 이용하여 비접촉 지지하기 위한 정전부상시스템을 개발하였다. 부상체에 정전기력을 인가하기 위한 전극은 부상체의 유연한 정도에 따라 수 많은 전극 쌍으로 구성되며, 각 전극 쌍에 공급되는 전압은 각각 독립적으로 제어된다. 안정화 제어기법으로 기존의 PID 제어기에서 요구되는 고전압 증폭기와 선형 제어기 대신에 고전압 전원과 간단한 스위칭 회로만으로도 안정 부상이 가능한 릴레이 제어기법을 사용함으로써 현저히 적은 비용과 콤팩트한 정전부상시스템을 구성하였다. 14 개의 전극 쌍으로 구성된 부상용 전극을 이용하여 크기 $280 \times 80 \text{mm}^2$ 이고 두께 0.1mm 인 매우 얇은 알루미늄 시트에 대한 부상실험을 수행하여 0.75mm 의 부상 간격으로 시트가 안정적으로 부상함을 확인하였고, 정상상태에 있어서 리미트 사이클 진동의 진폭은 $20 \mu\text{m}$ 이하로 억제됨을 확인하였다.

유연한 판상체의 정전부상에 있어서 요구되는 전극 쌍의 수는 판상체의 유연한 정도에 의존한다. 전극 수가 필요한 최소 개수보다 적을 경우 부상체의 안정 부상이 불가능해지고 그 보다 많을 경우에는 제어시스템에 여분(redundancy)의 자유도를 주게 되어 바람직하지 못하다. 향후 판상체의 강도와 필요 전극 수 간의 관계를 해석적으로 구하여 유연한 판상체의 비접촉 지지를 위한 정전부상시스템의 설계시 필요 최소 전극 수에 대한 가이드라인으로 제시할 예정이다.

참고문헌

1. Knoebel, H. W., "The Electric Vacuum Gyro," Control Engineering, Vol. 11, pp. 70-73, 1964.
2. 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.
3. 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.
 4. 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.
 5. 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.
 6. Jeon, J. U. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of Dielectrics," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, pp. 938-946, 1998.
 7. Jeon, J. U. and Higuchi, T., "Induction Motors with Electrostatic Suspension," J. Electrostatics, Vol. 45, No. 2, pp. 157-173, 1998.
 8. Jeon, J. U., Woo, S. J. and Higuchi, T., "Variable-capacitance Motors with Electrostatic Suspension," Sensors and Actuators A., Vol. 75, pp. 289-297, 1999.
 9. 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.
 10. Woo, S. J., Jeon, J. U., Higuchi, T. and Jin, J., "Electrostatic Force Analysis of Electrostatic Levitation System," Proc. 34th SICE Annual Conf., pp. 1347-1352, 1995.
 11. 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.
 12. Ogata, K., "Modern Control Engineering," Prentice-Hall Inc., pp. 771-778, 1970.