

# 시간최적제어기법을 이용한 정전부상시스템에 관한 연구

전종업#, 백봉우\*, Hung Manh Ngo\*, 박규열\*\*

## Electrostatic Suspension System Using Time Optimal Control

Jong Up Jeon#, Bong Woo Baik\*, Hung Manh Ngo\* and Kyu Yeol Park\*\*

### ABSTRACT

A new method for the electrostatic suspension of disk-shaped objects is proposed which is based on a time-optimal control scheme and deploys only high-voltage power supplies that can deliver dc voltages of positive and/or negative polarity. This method possesses the unique feature that no high-voltage amplifiers are needed which leads to a remarkable system simplification and objects can be suspended stably even in vacuum environment. Using this scheme, an aluminium disk used in a 3.5-inch HDD was suspended stably at an airgap of 0.3mm.

**Key Words** : Electrostatic suspension (정전부상), Electrostatic force (정전기력), Contactless support (비접촉지지), Time optimal control (시간최적제어)

### 1. 서론

종래의 비접촉 지지기구에 있어서,<sup>1</sup> 부상력으로 는 주로 자기력이나 유체력, 초음파력 등이 사용되 어 왔다. 그러나 이러한 힘을 이용한 부상기구는 각각 부상 가능한 물질의 종류나 부상력에 제한이 있거나, 초청정 환경이나 진공 환경 등과 같은 특수 환경에서의 사용이 곤란한 단점을 가지고 있다. 자기력의 경우, 그 부상력은 다른 힘에 비해 상당히 크지만 부상체가 자성체에 국한되는 단점을 가 지고 있으며, 유체력은 부상하고자 하는 물질의 종 류에 제한이 없으나 초청정 환경이나 진공 환경에 서는 사용이 곤란하고, 초음파력은 부상력이 극히 작아 실용적 측면에서 사용이 제한되는 단점을 가

지고 있다. 이에 반해 본 논문에서 수행하고자 하 는 정전기력을 이용한 부상시스템은 실용적 측면 에서 충분한 부상력을 제공하며, 초청정 환경이나 진공 환경 등 특수한 환경에서도 사용이 가능하고, HDD 용 디스크와 같은 도체, 실리콘 웨이퍼와 같 은 반도체, 비자성체, 유리나 세라믹과 같은 절연 체 등 거의 모든 종류의 물체에 부상력을 가할 수 있는 장점을 가지고 있다.

1964 년에 Knoebel<sup>2</sup> 은 폴라리스 잠수함용 항법 안내장치로서 정전부상형 진공자이로를 개발하였 다. 회전자는 질량이 25g 이고, 외경이 50.8mm, 재 질이 알루미늄인 구형상의 중공체이었다. 한편, Kumar 등<sup>3</sup> 은 마이크로 모터나 마이크로 액추에이 터의 마찰문제를 해결하기 위해 정진력에 의한 회

접수일: 2007 년 4 월 27 일; 게재승인일: 2007 년 12 월 7 일

# 교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

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

\* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

\*\* 울산대학교 기계자동차공학부

전자의 비접촉 지지기구를 제안하였다. 이때 사용된 회전자는 그 표면에 동박이 증착된 크기  $22 \times 22 \times 0.18 \text{mm}^3$  인 현미경 커버 슬릿이었다. Rhim 등<sup>4</sup>은 1993년에 전기장이 샘플온도에 영향을 받지 않는 것에 착안하여 고온 고진공 환경 하에서의 물질연구에 정전부상을 이용하였다. 그들은 직경 약 2.5mm, 온도 2250K 인 용융상태의 질코니움 샘플을 정전력을 이용하여 비접촉 지지하였다. 최근 들어 저자 등은 반도체 제품이나 LCD, PDP 등의 제조공정에 사용하기 위한 비접촉 지지기구의 개발을 목표로 4 인치와 8 인치 실리콘 웨이퍼,<sup>5-7</sup> 크기  $100 \times 100 \text{mm}^2$  와 직경 100mm 인 유리판<sup>8-10</sup>을 정전력을 이용하여 부상하는데 성공하였다. 이때 이용한 부상원리는 자기부상의 원리와 유사하다. 즉, 부상체의 바로 위에 전극을 배치하고 이 전극에 수백 V~수 kV 의 전압을 인가하여 부상체에 정전부상력을 발생시킨다. 이 때 이 정전력을 능동적으로 제어하지 않으면 부상체의 운동은 불안정한 거동을 보이므로 자기부상과 같이 부상체의 위치와 자세를 아날로그식 변위센서를 이용하여 측정하고, 이를 피드백(feedback)하여 전극에 인가되는 전압을 능동제어함으로써 부상체 운동의 안정화를 도모하였다. 피드백 제어기로는 PID(Proportional-Integral-Derivative) 제어를 사용하였으며 충분한 부상력을 얻기 위한 고전압을 발생하기 위해 증폭률 1000 인 고전압 증폭기를 사용하였다.

이러한 종래의 정전부상 시스템의 주된 단점은 제어기의 구성요소, 특히 고전압 증폭기가 상대적으로 크고 매우 고가인 점이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 저자 등은 기존 부상시스템에서 필요로 하는 고전압 증폭기와 선형제어기 대신에 고전압 전원과 간단한 스위칭 회로 등으로 구성되는 저가의 콤팩트한 단순 온오프(on-off) 제어법을 이용한 정전부상시스템을 구성하였다.<sup>11</sup> 이 시스템에 있어서 전극에의 인가전압의 스위칭은 부상체와 전극간의 부상 간격(gap)이 목표 간격보다 크거나 작을가에만 근거하여 수행되고 있다. 즉, 부상 간격이 목표 간격보다 큰 경우에는 전극에 일정 크기의 온(ON) 전압을 인가하고, 부상 간격이 목표 간격보다 작은 경우에는 전극에 일정 크기의 오프(OFF) 전압을 인가하고 있다. 이 시스템은 원리적으로 부상시스템의 비선형성, 스위칭 소자 등 제어 요소에 반드시 존재하는 불감대 등의 여러가지 요

인으로 인해 부상체의 안정적인 부상이 불가능한 시스템이나, 대기 환경에서 사용되는 경우에 한해서는 전극과 부상체 간에 존재하는 공기의 댐핑력이 부상체의 안정화에 기여하게 되어 부상체의 안정적인 부상이 가능하게 된다. 즉, 이 시스템은 매우 저가로 콤팩트하게 구성되는 장점을 가지고 있으나 원리적으로 공기의 댐핑력을 필요로 하기 때문에 대기 환경에서만 사용이 가능하고 공기의 댐핑력을 기대할 수 없는 진공환경에서는 사용이 불가능한 단점을 가지고 있다. 또한 제어기의 작동 원리상 정상상태에서 부상체에는 반드시 리미트 사이클(limit cycle) 진동이 발생하는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 기존 부상시스템의 문제점을 해결하기 위해 기존의 온오프 제어법을 이용한 정전부상시스템에서 채용하고 있는 고전압 전원과 스위칭 회로는 그대로 차용하고 온오프 제어기 대신에 시간최적제어기<sup>12</sup>를 사용함으로써 진공환경에서도 안정적인 부상이 가능하고 정상상태에서 부상체의 진동을 억제할 수 있는 저비용의 정전부상시스템을 구성하고자 한다.

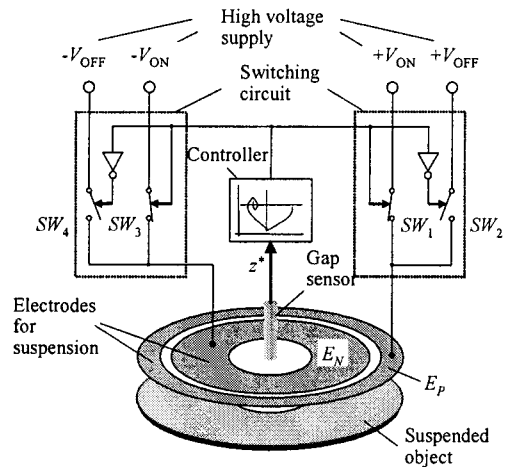


Fig. 1 Electrostatic suspension system with 1-DOF

## 2. 정전부상계의 구성 및 제어방법

이 장에서는 정전부상계의 구성 및 제어방법에 관하여 1 자유도 모델을 이용하여 설명한다. 부상체는 도체이고 도우넛 형상의 판상체(板狀體)로 가정한다. Fig. 1 은 시간최적제어기를 이용한 1 자유도 정전부상계의 구성을 나타낸다.

### 2.1 자유도 제어용 전극구조

Fig. 1 에 나타난 바와 같이 전극은 링 형상의 바깥쪽 전극  $E_P$ , 그리고 이와 동일 면적을 가지는 링형상의 안쪽 전극  $E_N$  으로 구성된다. 두 전극  $E_P$  와  $E_N$  에 전압이 인가될 때 동일 절대값을 가지는 반대극성의 전압이 각각에 인가되어 부상체의 전위는 항상 영볼트를 유지하게 된다. 이로부터 전극과 부상체간에 전위차가 발생하고 따라서 부상체에 정전부상력이 가해진다. 전극  $E_P$  의 외경과 전극  $E_N$  의 내경은 각각 부상체의 외경 및 내경과 같도록 되어 있고 부상체와 전극간 간격을 실시간으로 측정하기 위해 변위센서가 장착되어 있다.

### 2.2 제어방법

변위 센서를 이용하여 검출된 부상 간격  $z^*$  는 시간최적제어기에 입력되고 제어기에서는 3.2 절에 기술되어 있는 절환곡선방정식(식 (17))의 계산값에 기초하여 온 또는 오프 스위칭 신호를 스위칭 회로에 내보낸다. 스위칭 회로에서는 이 스위칭 신호에 근거하여 직류 고전압 전원으로부터 발생한 고전압  $V_{ON}(V_{OFF})$  과  $-V_{ON}(-V_{OFF})$  를 전극  $E_P$  와 전극  $E_N$  에 공급하여 부상체를 안정 부상시킨다. 즉, 온 스위칭 신호가 입력되면 스위치  $SW_2$  와  $SW_4$  가 열림과 동시에 스위치  $SW_1$  와  $SW_3$  가 닫혀 전극  $E_P$  에는 전압  $+V_{ON}$  이, 전극  $E_N$  에는 전압  $-V_{ON}$  이 인가된다. 역으로, 오프 스위칭 신호가 입력되면 상기의 역동작이 발생하여 전극  $E_P$  에는 전압  $+V_{OFF}$  가, 전극  $E_N$  에는 전압  $-V_{OFF}$  가 인가된다.

## 3. 자유도 부상계의 모델링 및 절환곡선의 설계

### 3.1 정전 부상력 및 선형 운동방정식

부상체의 전기적 저항을 무시하고 전기장이 부상체와 전극 사이에만 존재하며 균일(homogeneous) 하게 분포되어 있다고 가정하면 부상체에 작용하는 정전 흡인력  $F^*$  는 다음과 같다.

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

여기서,  $V^*$ ,  $z^*$ ,  $\epsilon$ ,  $A$  는 각각 전극과 부상체 간의 전위차(본 연구에서 부상체의 전위는 항상 영볼트를 유지하도록 하고 있으므로  $V^*$  는 전극에 인가되는

전압을 나타냄), 부상간격, 전극과 부상체간 매질의 유전율(대기 중에서  $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ), 전극과 부상체 간의 중첩되는 부분의 면적이다. 상기 식으로부터 정전흡인력  $F^*$  는 부상 간격  $z^*$  의 제곱에 반비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 전극에 일정 전압을 가하는 경우 정전력을 이용한 시스템은 불안정한 거동을 나타내고 이를 안정화하기 위해서는 피드백 제어를 이용하여 전압  $V^*$  (즉, 정전흡인력  $F^*$ ) 를 능동적으로 제어하여야 한다.

부상체에 작용하는 정전 흡인력  $F^*$  와 부상체의 중량만을 고려하여 부상체의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$m\ddot{z}^* = -F^* + mg \quad (2)$$

상기 식과 식 (1)로부터, 부상체는 비선형 운동특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서, 다음 절의 절환곡선 설계작업을 수행하기 위해, 평형점 근처에서의 미소변화를 고려하여 상기 식의 선형화를 수행한다. 선형화를 위해,

$$z^* = z_0 + z, \quad V^* = V_0 + V \quad (3)$$

라 하자. 여기서,  $z_0$ ,  $V_0$  는 각각 변위(부상 간격), 전압의 평형상태에서의 정상치(定常值)이고,  $z$ ,  $V$  는 각각에 대한 미소 변화분이다. 식 (1)의  $F^*$  를 테일러(Taylor) 전개한 후, 제 1 항까지 취하면,

$$F^* = F_0 - k_s z + k_v V \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} F_0 &= F^*(z_0, V_0) = \frac{1}{2} \epsilon A \left( \frac{V_0}{z_0} \right)^2 \\ k_s &= \frac{\partial F^*(z_0, V_0)}{\partial z^*} = \epsilon A \left( \frac{V_0^2}{z_0^3} \right) \\ k_v &= \frac{\partial F^*(z_0, V_0)}{\partial V^*} = \epsilon A \left( \frac{V_0}{z_0^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

와 같다. 식 (2), (3), (4)로부터, 부상체의 운동방정식은

$$m\ddot{z} = -F_0 + k_s z - k_v V + mg \quad (6)$$

와 같다. 단, 본 정전부상시스템에 있어서는 부상체를 시불변(時不變)의 목표 간격  $z_0$  에 레귤레이션

(regulation)하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에,  $\ddot{z}_0 = 0$  으로 가정하였다.

정상상태에서,  $\dot{z} = V = 0$  으로 두면, 평형점에서의 각 정상치 간에는

$$F_0 = mg \quad (7)$$

이 성립한다. 상기 식으로부터, 목표 부상 간격  $z_0$  가 주어졌을 때, 전극에 인가되는 바이어스전압  $V_0$  가 구해진다. 식 (5)와 식 (7)로부터 이 바이어스전압  $V_0$  를 구하면

$$V_0 = z_0 \sqrt{\frac{2mg}{\epsilon A}} \quad (8)$$

이 얻어진다. 식 (6)과 식 (7)로부터 부상체의 선형 운동방정식을 구하면

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

이 얻어진다.

### 3.2 절환곡선의 설계

시간최적제어기에 있어서 전극 인가전압의 절환은 위상평면에서의 절환곡선에 기초하여 이루어진다. 이하, 절환곡선의 설계에 관하여 기술한다.

위상평면내에 있어서의 운동궤적곡선군을 구하기 위해  $\dot{z} = v$  로 두면

$$\dot{z} = v \frac{dv}{dz} \quad (10)$$

이고, 이를 식 (9)에 대입하고 적분하면 다음과 같은 운동궤적 곡선군

$$\frac{k_s}{m} \left( z - \frac{k_v V}{k_s} \right)^2 - v^2 = Q_1 \quad (11)$$

이 얻어진다. 단,  $Q_1$  은 임의의 상수이다. 여기서 식 (5)로부터  $k_v/k_s = z_0/V_0$  이고  $k_s/m = \omega_{n0}^2$  이라고 하면 상기 식은

$$\left( z - \frac{V}{V_0} z_0 \right)^2 - \left( \frac{v}{\omega_{n0}} \right)^2 = Q \quad (12)$$

와 같이 된다. 단,  $Q$  는 임의의 상수이다. 전압  $V$  는 부상체의 상태에 따라서 온 제어전압  $+V_g$  또는 오프 제어전압  $-V_g$  를 취하므로  $V = \pm V_g$  를 상기 식에 대입하면 다음과 같은 두 개의 곡선군

$$\left( z \mp \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 - \left( \frac{v}{\omega_{n0}} \right)^2 = Q \quad (13)$$

이 얻어진다. 이 두 개의 곡선군 중 어느 특정한 곡선은  $Q$  값에 의해 결정되며,  $Q$  값은 초기조건에 의해 결정된다. 상기 식 (13)을 기초로 하여, 통상의 위상평면에 있어서의 최적제어기가 얻어진다. 곡선군 중, 원점  $z=0, v=0$  을 통과하는 곡선은 Fig. 2 에 도시한 곡선 AOA'와 BOB'이다. 이 곡선에 있어서의  $Q$  값은 상기 식 (13)으로부터

$$Q = \left( \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 \quad (14)$$

와 같다. 따라서, 식 (13), (14)로부터 곡선 AOA'의 방정식은

$$\left( z - \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 - \left( \frac{v}{\omega_{n0}} \right)^2 - \left( \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 = 0 \quad (15)$$

이고 곡선 BOB'의 방정식은

$$\left( z + \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 - \left( \frac{v}{\omega_{n0}} \right)^2 - \left( \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 = 0 \quad (16)$$

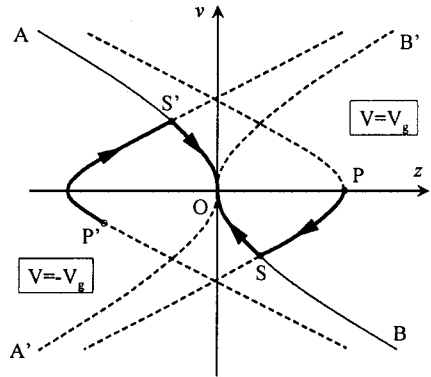


Fig. 2 Phase-plane diagram showing switching curve and time-optimal trajectory

와 같다. 곡선 AOA'의 곡선 AO 부분과 곡선 BOB'의 곡선 BO 부분을 합친 곡선 AOB 가 절환곡선이다. 이 절환곡선 AOB 에 근거하여 전극 인가전압의 절환이 이루어진다. Fig. 2 에 있어서 부상체가 점 P 의 초기상태에 놓여 있다고 하자. 이

때, 전극에는 전압  $V=V_g$  가 인가되고, 따라서 부상체는 궤적 PS 를 따라 점 S 쪽으로 이동하고 부상체가 점 S 에 도달하면 전극에의 인가전압은  $V=-V_g$  로 전환되어 부상체는 궤적 SO 를 따라 원점 O 쪽으로 이동한다. 이와 같이, 시간최적제어에 있어서는 점 S 에서 전압을 단 한번 전환하는 것만으로 부상체는 원점에 도달하게 된다(여기서, 부상체가 원점에 위치한다는 것은 부상체가 원하는 부상 간격으로 안정부상하고 있음을 의미한다). 부상체가 초기 상태 P'에 놓여 있는 경우에도 같은 방법으로 생각할 수 있다.

상기한 두 개의 방정식 (15)와 (16)으로부터 절환곡선 AOB 의 방정식은

$$\sigma(z, v) = \text{sign}(v) \left[ \left( \frac{v}{\omega_{n0}} \right)^2 - \left( z - \text{sign}(v) \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 + \left( \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 \right] \quad (17)$$

와 같다. 이 절환곡선에 기초한 전극  $E_p$  에의 스위칭 전압(이 때, 전극  $E_N$  에는 전극  $E_p$  에 인가되는 전압과 그 크기는 같고 극성은 반대인 전압이 인가됨)은

$$\begin{aligned} V^* &= V_0 + V_g (=V_{ON}) \quad \text{for } \sigma(z, v) \geq 0 \\ V^* &= V_0 - V_g (=V_{OFF}) \quad \text{for } \sigma(z, v) < 0 \end{aligned} \quad (18)$$

와 같다.  $V_g$  의 값으로써 바이어스 전압  $V_0$  를 취하면 뱅뱅제어에 필요한 직류 고전압 전원의 수는 반으로 줄어 들게 된다.

실제 시스템의 경우, 다음 장의 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 스위칭 소자의 시간지연 등 여러 가지 요인에 의해 1 회 이상의 절환이 필요하며 정상상태에 있어서도 리미트 사이클 진동이 발생하게 된다.

### 3.3 스퀴즈 필름 효과에 의한 공기 댐핑력

본 논문의 시간최적제어기를 이용한 정전부상시스템은 진공환경에서의 적용을 목표로 개발하였으나 이는 대기환경에서도 사용될 수 있다. 본 절에서는 본 시스템이 대기환경에 적용될 경우 부상체가 받게 되는 스퀴즈 필름 효과에 의한 공기 댐핑력의 크기를 계산하고자 한다. 본 논문에서 다루고 있는 HDD 용 알루미늄 디스크와 같은 판상체

의 정전부상시스템에 있어서는 부상 간격이 부상체의 면적에 비하여 매우 작다. 따라서, 정전부상이 대기환경에서 행하여지는 경우에는, 부상체가 전극과 수직방향 상대운동을 할 때, 전극과 부상체 사이의 공기의 출입이 스퀴즈 필름(squeeze film) 효과로 인해 부상체에 큰 댐핑력을 가해 준다. 이 댐핑력은 레이놀드 방정식으로부터 구해진다.

도넛 형상의 판상체에 있어서 대기 중에서 부상체에 작용하는 공기 댐핑력  $F_d^*$  를 구하면 다음과 같다 (부록 A 참조).

$$F_d^* = -\frac{3\pi\eta(r_o^2 - r_i^2)}{2z^{*3}} \left[ (r_o^2 + r_i^2) - \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{\ln(r_o/r_i)} \right] \frac{\partial z^*}{\partial t} \quad (19)$$

여기서,  $\eta, r_i, r_o$  는 각각 공기의 점도( $=18 \times 10^{-6}$  Ns/m<sup>2</sup>), 부상체의 내반경 및 외반경이다.

## 4. 시뮬레이션 및 결과

본 장에서는 1 자유도 정전부상시스템에 대하여 MATLAB 의 SIMULINK 를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시스템이 대기환경에 적용될 경우도 포함하여 시뮬레이션을 수행하기 위하여 식 (19)의 공기 댐핑력을 포함하여 부상체의 운동방정식을 기술하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{z}^* &= mg - \frac{1}{2} \varepsilon A \left( \frac{V^*}{z^*} \right)^2 \\ &\quad - \frac{3\pi\eta(r_o^2 - r_i^2)}{2z^{*3}} \left[ (r_o^2 + r_i^2) - \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{\ln(r_o/r_i)} \right] \frac{\partial z^*}{\partial t} \end{aligned} \quad (20)$$

시간최적제어기는 식 (17), (18)과 같다. 일반적으로, 시간최적제어를 수행할 때 스위칭 회로에 있어서의 스위칭 시간지연이 문제를 발생시킨다. 즉, 이 시간지연 때문에 시간최적제어에 있어서는 반드시 채터링 현상(리미트 사이클)이 발생한다. 본 논문에서 제작한 스위칭 회로는 그 높은 스위칭 전압으로 인해 상당히 큰 스위칭 시간지연을 가지고 있다. 본 시뮬레이션에서는 시간최적제어기를 이용한 계의 안정화 뿐만 아니라 이 스위칭 시간지연과 3.3 절에서 기술한 공기의 댐핑력이 시스템의 안정성에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다.

우선, 공기의 댐핑력이 작용하지 않고(진공 환경) 스위칭 시간지연이 존재하지 않는 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 초기 간격  $z_i^*=0.33\text{mm}$ , 목표 간격  $z_0=0.3\text{mm}$ , 바이어스 전압  $V_0=0.666\text{kV}$ , 제어전압  $V_g=0.167\text{kV}$ , 부상체 (3.5 인치 HDD 용 알루미늄 디스크)의 외경 95mm, 내경 25mm, 질량 14.7g 이다. 제어전압을 설정할 때 그 값을 낮게 설정하면 정상상태에 있어서의 리미트 사이클의 진폭은 작아지게 되지만, 초기 간격을 크게 설정할 수 없고 외란에 대한 강건성이 떨어지게 된다. 이에 반해 제어전압을 높게 설정하면 리미트 사이클(리미트 사이클은 전술한 바와 같이 제어시스템에 시간지연이 존재하는 경우에 발생함)의 진폭은 커지게 된다. 따라서, 제어전압을 설정할 때에는 이상에서 기술한 사항을 고려하여 적절한 크기의 값을 가지도록 설정하여야 한다. 본 시뮬레이션에서는 바이어스 전압의 (1/4)배 크기를 가지는 값을 제어전압으로 선정하였다. Fig. 3 은 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 2 회의 스위칭으로 목표 간격에 안정하게 부상하는 것을 알 수 있다. 1 회의 절환만으로 정상상태에 도달하지 못하는 이유는 절환곡선의 설계 시 부상시스템의 선형화 모델을 이용하였지만, 실제의 부상체의 운동방정식은 비선형 특성을 가지고 있기 때문이다.

다음으로, 스위칭 시간지연이 존재하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 스위칭 시간지연은 스위칭 요소에 히스테리시스를 부여하기 때문에 절환곡선 상에서의 전압의 절환을 불가능하게 한다. 이 때문에 부상체는 정상상태에서 리미트 사이클의 거동을 나타내게 된다. Fig. 4 는 스위칭 시간지연이 0.28ms 인 (본 논문에서 제작한 스위칭 회로의 경우 평균 0.28ms 의 시간지연을 보이고 있음) 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 정상상태에서 진폭 약 4.6 $\mu\text{m}$  인 진동이 발생하고 있다. 이 리미트 사이클의 진폭은 스위칭 시간지연에 매우 밀접하게 관련된다. Fig. 5 는 스위칭 시간지연을 0.1ms 로 작게 하였을 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 정상상태에서의 리미트 사이클의 진폭은 약 0.5 $\mu\text{m}$  로 매우 작아졌음을 알 수 있다. 이로부터 리미트 사이클의 진폭을 줄이기 위해서는 스위칭 시간지연을 줄이는 것이 매우 중요한 것임을 알 수 있다.

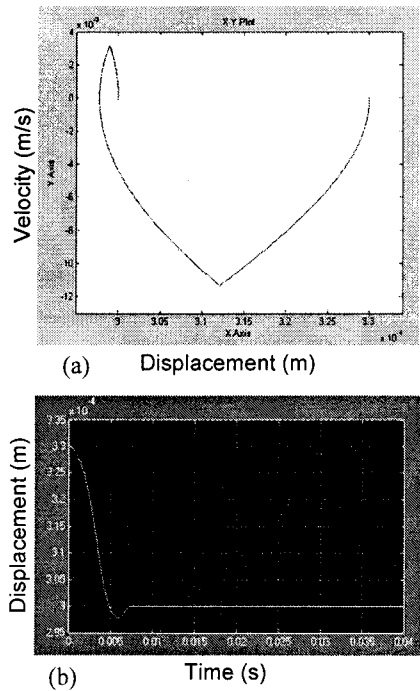


Fig. 3 Simulation results: no damping force and no time delay. (a) Trajectory in phase plane and (b) displacement of the suspended object

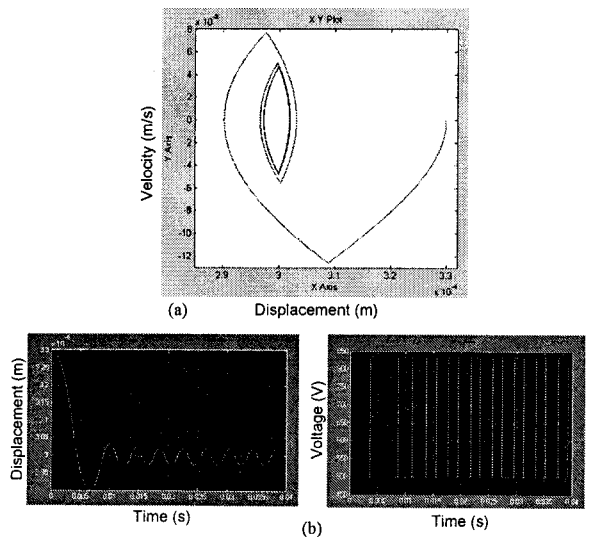


Fig. 4 Simulation results: no damping force and time delay=0.28ms. (a) Trajectory in phase plane and (b) displacement and supplied voltage

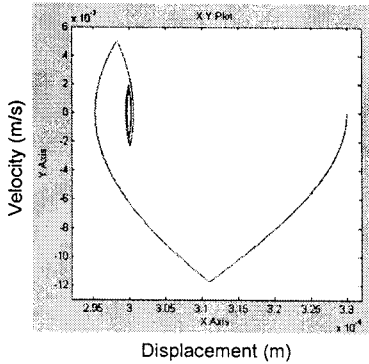


Fig. 5 Simulation results on trajectory in phase plane: no damping force and time delay=0.1ms

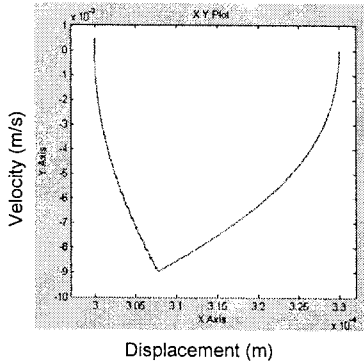


Fig. 6 Simulation results on trajectory in phase plane: with damping force and no time delay

다음으로, 시간최적제어를 대기 환경에서 수행할 경우를 상정하여 공기의 댐핑력이 존재하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 시간지연이 존재하지 않는 경우와 0.28 ms 의 시간지연이 존재하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 시간지연이 존재하지 않는 경우, 그림에서 알 수 있듯이 1 회의 스위칭으로 목표 간격에 안정하게 부상하는 것을 알 수 있다. 진공환경에서의 시뮬레이션 결과(Fig. 3)와는 달리 단 1 회의 스위칭만으로 부상체가 목표 간격에 안정하게 부상하는 것은 공기의 댐핑력에 의해 부상체의 부상 속도가 느려져 부상체 운동시 부상체가 가지는 운동에너지가 진공환경에서보다 작아지기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 시간지연이 존재하는 경우 리미트 사이클의 진폭은 약 2.6 $\mu$ m 이었다. 부상 간격을 작게 함으로써 이 진동의 진

폭을 서브 마이크론 이하로 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

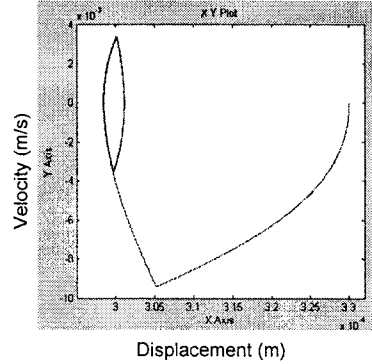


Fig. 7 Simulation results on trajectory in phase plane: with damping force and time delay=0.28ms

## 5. 실험장치

### 5.1 다자유도 운동제어 및 전극구조

판상체의 부상체를 공간상에 안정 부상시키기 위해서는 부상체의 불안정한 3 자유도 운동, 즉 축방향 운동과 수평면내의 2 축에 대한 회전운동(삐칭, 롤링)이 안정적 거동을 보이도록 이들 운동을 능동적으로 제어하여야 한다(부상체의 수평면내의 운동, 즉  $x, y$  운동은 그 운동을 능동적으로 제어하지 않아도 정전장의 프린지 필드(fringe field) 효과에 의해 수동적으로 구속되어 안정된 거동을 보인다).<sup>13</sup> Fig. 8 은 HDD 용 알루미늄 디스크의 3 자유도 운동을 능동제어하는 데에 적합한 전극구조를 보여주는 것으로 본 논문을 통해 제작한 전극의 사진을 나타낸다. 전극은 각각 2 개의 전극으로 구성되는 3 개의 전극그룹으로 나뉘어져 각 전극그룹은 각각 부상체에 정전력을 인가하기 위한 하나의 액추에이터로서 작용한다. 그림에 있어서 전극  $E_{iP}$  와  $E_{iN}$  이 하나의 전극그룹  $i$  를 형성한다. 단  $i=1,2,3$  이다. 전극  $E_{iP}$  와  $E_{iN}$  은 동일면적이고 또 이들 전극에 전압이 인가될 때 서로 반대극성의 같은 절대치를 가지는 전압이 인가되어 부상체의 전위는 영볼트를 유지하도록 되어 있다. 전극  $E_{iP}$  와  $E_{iN}$  의 면적중심점은 일치하고 그 면적중심점에는 변위센서가 설치되어 있다. 또, 전극  $E_{1P}$  와  $E_{2P}, E_{3P}$  에 의해 형성되는 원의 외경 및 내경은 각각 부상체의 외경 및 내경과 같다.

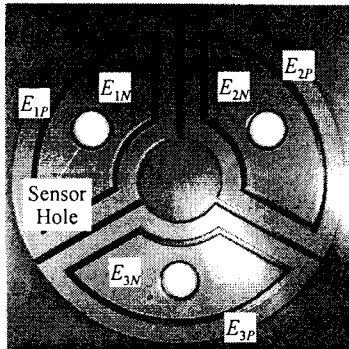


Fig. 8 Fabricated stator electrode

각 전극그룹에의 인가전압은 다른 전극그룹과 독립해서 제어된다. 즉 전극  $E_{1P}$  와  $E_{1N}$  에의 인가전압의 공급 또는 차단은 변위센서  $i$  로부터 검출한 부상 간격 신호만에 의해 제어된다. 제어방법은 1 자유도 모델에 있어서 설명한 바와 같다. 한편 본 논문에서는 전극에 전압이 인가될 때, 전극  $E_{1P}$  에는 양전압을, 전극  $E_{1N}$  에는 음전압을 인가하였다.

### 5.2 실험장치

Fig. 9 는 실험장치 기구부의 개략도 및 실험장치의 사진이다. 전극판과 부상체는 각각 3 개의 마이크로미터 위치결정 스크류에 의해 지지되어 수평도 조정 및 초기 간격 설정이 행하여 진다. 전극은 유리에폭시 기관상에  $35\mu\text{m}$  의 동막이 부착된 감광기판을 이용하여 에칭기법으로 제작하였다. 부상간격을 측정하기 위한 변위센서로는 MEMS이전류식 센서(Keyence 사의 모델 EX-502/008)를 이용하였다.

스위칭 회로에 있어서 스위칭 소자로는 반도체 릴레이(Matsushita Electric Works 사의 Photo-MOS Relay AQV258)를 사용하였다. 이 스위칭 소자의 내압은 1.5kV 이다. 제작한 스위칭 회로에 진폭 5V, 주파수 100Hz 인 사각파의 테스트용 스위칭 신호를 입력하고(전압  $V_{ON}$  및  $V_{OFF}$  로는 각각 400V, 200V 를 사용하였음) 이 때 전극에 인가되는 전압 파형을 스위칭 신호에 동기하여 측정함으로써 스위칭 회로의 시간지연을 측정하였다. 측정결과, 시간지연의 크기는 릴레이 온 시 약 0.465ms, 오프 시 약 0.09ms(평균 0.28ms)이었다. 본 논문에서 사용한 반도체 릴레이의 동작시간은 스위치 온 시 0.35ms, 스위치 오프 시 0.04ms 로 특히 스위치 온

시 상당히 큰 값을 가지며 이것이 시간지연을 발생시키는 주 원인인 것으로 판단된다.

절환조건식의 계산 및 이를 근거로 한 스위칭 신호의 발생 등을 수행하는 제어 프로그램은 MATLAB 의 SIMULINK 를 이용하여 프로그래밍하였으며, 이를 dSPACE 사의 DSP 시스템에 다운로드하여 제어기를 구성하였다. 제어주기는  $50\mu\text{s}$  이다.

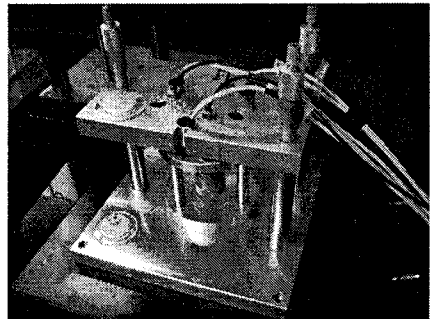
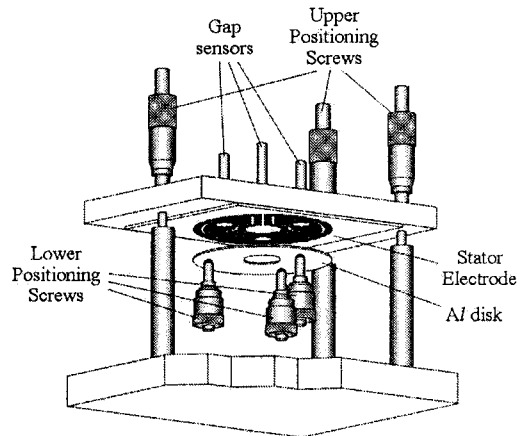


Fig. 9 Schematic drawing and photograph of experimental apparatus

### 6. 실험결과 및 고찰

대기환경에서 3.5 인치 HDD 용 알루미늄 디스크의 부상실험을 수행하였다. 초기 간격과 목표 간격은 각각 0.4mm, 0.3mm 로 설정하였으며 바이어스 전압과 제어 전압은 666V 로 동일하게 설정하였다. 바이어스 전압과 제어 전압의 값이 다를 경우 본 부상장치를 구현하기 위해서는 양극성 고



전압 전원이 두 대가 필요하지만 본 실험과 같이 동일하게 설정하는 경우에는 한 대로 충분하기 때문에 더욱 저비용의 부상장치를 구현할 수 있다. Fig. 10 은 실험결과 얻어진 센서 장착 위치에서의 부상 간격의 변동을 나타낸 것이다. 제어 시작 후 부상체가 안정적으로 부상되고 정상상태에서 부상체는 진폭 약 50 $\mu\text{m}$  의 리미트 사이클 거동을 보임을 알 수 있다. 이와 같이 정상상태에서 비교적 큰 진동이 발생하는 주된 이유는 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이 스위칭 회로에 존재하는 스위칭 시간지연 때문인 것으로 생각된다. 또한 절환조건식의 여러 가지 파라미터 값의 동정(同定) 오차, 부상시스템의 비선형성 등도 진동을 발생시키는 요인인 것으로 판단된다. Fig. 11 은 부상 상태의 알루미늄 디스크를 보여주고 있다.

발하였다. 안정화 제어기로는 위상평면에서의 절환곡선에 기초하여 전극에의 인가전압이 절환되는 시간최적제어 기법을 사용하였다.

대기환경에서 3.5 인치 HDD 용 알루미늄 디스크에 대한 부상실험을 수행하여 부상 간격 0.3mm 로 디스크가 안정적으로 부상함을 확인하였으나 정상상태에서 진폭 약 50 $\mu\text{m}$  의 리미트 사이클 진동이 발생하였다. 보다 작은 스위칭 시간지연을 가지는 스위칭 회로를 제작하고, 절환조건식의 파라미터 값들을 보다 정확히 동정(同定)하며, 부상 간격을 보다 작게 하여 공기 댐핑력의 영향을 크게함으로써 이 진동의 진폭은 보다 줄어 들 수 있을 것으로 판단된다. 향후 과제로는 이상에서 기술한 내용을 포함하여 진공환경에서 부상 실험을 수행할 예정이다.

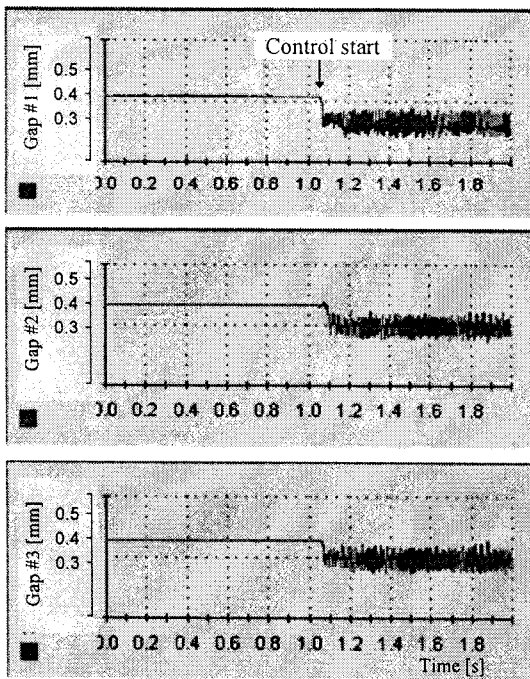


Fig. 10 Experimental results on gap variations

## 7. 결론

본 논문에서는 높은 가격으로 인하여 정전부상 시스템의 실용화에 걸림돌이 되고 있는 고전압 증폭기를 사용하지 않고, 또한 진공환경에서도 안정적인 부상이 가능한 저가의 정전부상시스템을 개

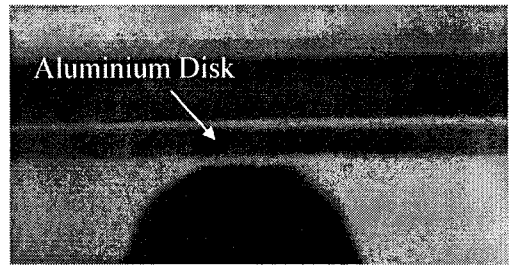


Fig. 11 Photograph showing the aluminium disk under stable suspension

## 후 기

이 논문은 2006 년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

## 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, pp. 70-73, 1964.
3. 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.
4. 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.

5. Jin, J., Higuchi, T. and Kanemoto, M., “Electrostatic Silicon Wafer Suspension,” Proc. 4th Int. Symp. Magnetic Bearings, pp. 343-348, 1994.
6. 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.
7. 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.
8. Jeon, J. U. and Higuchi, T., “Electrostatic Suspension of Dielectrics,” IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 45, No. 6, pp. 938-946, 1998.
9. Jeon, J. U., Jin, J. and Higuchi, T., “Rotary Actuators with Electrostatic Suspension,” Proc. 5th Int. Symp. Magnetic Bearings, pp. 411-418, 1996.
10. 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.
11. Jeon, J. U. and Lee, S., “Electrostatic Suspension System of Silicon Wafer using Relay Feedback Control,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 10, pp. 56-64, 2005.
12. Ogata, M., “Modern Control Engineering,” Prentice-Hall Inc., pp. 771-778, 1970.
13. Jeon, J. U., Park, K. T. and Park, K. Y., “A Measurement Apparatus of Lateral Restoring Force Exerted on Electrostatically Suspended Object,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 60-69, 2005.

## 부 록

### A1. 도우넛 형상의 판상체에 작용하는 댐핑력

유체가 뉴턴 유체이고 비압축성의 층류라고 가정하면 레이놀드 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{z^{*3}}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{z^{*3}}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6(u_1 + u_2) \frac{\partial z^*}{\partial x} + 6(v_1 + v_2) \frac{\partial z^*}{\partial y} + 6z^* \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u_1 + u_2) + \frac{\partial}{\partial y} (v_1 + v_2) \right] + 12 \frac{\partial z^*}{\partial t} \quad (A1)$$

단,  $p, u_1, v_1, u_2, v_2$  는 각각 압력, 부상체의  $x, y$  방향 이동속도, 전극의  $x, y$  방향 이동속도이다. 여기서, 부상체의 수직방향 운동만을 고려하면

$$z^*(x, y, t) = z^*(t), \quad u_1 = v_1 = u_2 = v_2 = 0 \quad (A2)$$

이고, 식 (A1)은 다음과 같이 간략화된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{12\eta}{z^{*3}} \frac{\partial z^*}{\partial t} \quad (A3)$$

이 식을 풀면 압력분포  $p(x, y, t)$ 가 구해지고 이를 부상체 전면에 걸쳐 적분함으로써 부상체에 작용하는 공기 댐핑력을 구할 수 있다. 본 연구에서와 같이 부상체의 형상이 회전대칭인 경우에는 상기 식 (A3)의 해는 다음과 같이 해석적으로 간단히 구해질 수 있다. 식 (A3)을 원통 좌표계로 변환하면, 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{12\eta}{z^{*3}} \frac{\partial z^*}{\partial t} \quad (A4)$$

여기서, 압력  $p$  는  $p(r, t)$ 이다. 이 식을 부상체의 외주부(반경  $r_o$ )와 내주부(반경  $r_i$ )에서의 경계조건

$$\begin{aligned} p &= 0 & \text{for } r &= r_i \\ p &= 0 & \text{for } r &= r_o \end{aligned} \quad (A5)$$

을 이용하여 풀면 다음과 같은 압력 분포식

$$p(r, t) = \frac{3\eta}{z^{*3}} \frac{\partial z^*}{\partial t} \left[ r^2 - \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{\ln(r_o/r_i)} \ln r + \frac{(r_o^2 \ln r_i - r_i^2 \ln r_o)}{\ln(r_o/r_i)} \right] \quad (A6)$$

이 구해진다. 이 식 (A6)을 부상체의 전면에 걸쳐 적분하면 부상체에 작용하는 댐핑력  $F_d^*$ 는 다음과 같다.

$$F_d(z^*, \dot{z}^*, t) = -\frac{3\pi\eta(r_o^2 - r_i^2)}{2z^{*3}} \left[ (r_o^2 + r_i^2) - \frac{(r_o^2 - r_i^2)}{\ln(r_o/r_i)} \right] \frac{\partial z^*}{\partial t} \quad (A7)$$