

시간최적제어기법을 이용한 정전부상시스템에 관한 연구

백봉우(울산대 대학원 기계자동차공학과), 전종업*, 박규열(울산대 기계자동차공학부)

Electrostatic Suspension System Using Time Optimal Control

B. W. Baik(Graduate School, UOU), J. U. Jeon*, K. Y. Park(School of Mecha. and Automotive Eng., UOU)

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 employed 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

정전기력으로 유리 판넬, 실리콘 웨이퍼, 알루미늄 디스크 등과 같은 판 형상의 물체를 비접촉 지지하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾. 이 정전부상의 원리는 자기부상과 유사하다. 즉, 측정된 부상체의 위치를 피드백하여 부상체의 바로 위에 배치된 전극에 인가되는 전압을 능동적으로 제어함으로써 부상체 운동의 안정화를 도모한다. 피드백 제어기로는 주로 PID 제어기가 사용되고 있으며 충분한 부상력을 얻기 위해 고전압 증폭기가 사용되고 있다. 이러한 종래 시스템의 주된 단점은 제어기의 구성요소, 특히 고전압 증폭기가 상대적으로 크고 매우 고가인 점이다. 이를 해결하기 위해 저자 등은 고전압 전원과 간단한 스위칭회로 등으로만 구성되는 저가의 콤팩트한 단순 온오프 제어법을 이용한 정전부상시스템을 제안하였다⁽²⁾. 그러나, 이 시스템은 공기의 댐핑력이 계의 안정화에 기여하므로 진공환경에서는 사용이 불가능한 단점을 갖고 있다. 본 논문에서는 시간최적제어기의 하나인 뱅뱅제어기를 이용함으로써 진공환경에서도 안정적인 부상이 가능한 저가의 정전부상시스템에 대해 기술하고자 한다.

2. 정전부상계의 구성

그림 1은 시간최적제어기를 이용한 1 자유도 정전부상계의 구성을 나타낸다. 동일면적을 갖는 두 전극 E_P 와 E_N 에는 동일 절댓값의 반대극성을 갖는 전압이 각각에 인가되어 부상체의 전위는 항상 0 볼트를 유지하게 된다. 이로부터 전극과 부상체 간

에 전위차가 발생하고 따라서 부상체에 정전 부상력이 가해진다. 전극 E_P 의 외경과 E_N 의 내경은 각각 부상체의 외경 및 내경과 같도록 되어 있다. 변위센서를 이용하여 검출된 부상간격 z^* 는 제어기에 입력되고 제어기에서는 다음 절에 기술된 식 (1)의 계산값에 기초하여 온(ON)/오프(OFF) 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.

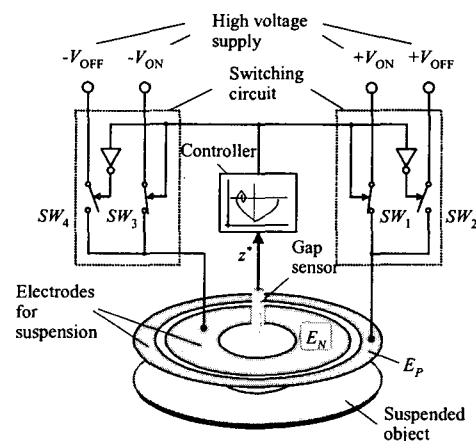


Fig. 1 Electrostatic suspension system with 1-DOF

3. 제어기의 설계

1 자유도 정전부상계에 대하여 설계된 절환곡선 AOB(그림 2)의 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma(z, v) = \text{sign}(v) \left[\left(\frac{v}{\omega_{n0}} \right)^2 - \left(z - \text{sign}(v) \frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 + \left(\frac{V_g}{V_0} z_0 \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, $z, z_0, v, \omega_{n0}, V_0, V_g$ 는 각각 부상체의 변위, 바이어스 간격, 부상체의 속도, 고유진동수, 바이어스 전압, 제어전압을 나타낸다. 이 절환곡선에 기초한 전극 E_p 에의 스위칭 전압 V^* 는

$$V^* = V_0 + V_g (=V_{ON}) \quad \text{for } \sigma(z, v) \geq 0$$

$$V^* = V_0 - V_g (=V_{OFF}) \quad \text{for } \sigma(z, v) < 0 \quad (2)$$

와 같다. 그림 2에 있어서 부상체가 점 P의 초기상태에 놓여 있다고 하면, 이 때 $\sigma(z, v) \geq 0$ 이므로 전극에는 전압 $V=V_g (V^*=V_0+V_g)$ 가 인가된다. 따라서, 부상체는 궤적 PS를 따라 점 S쪽으로 이동하고, 부상체가 점 S에 도달하면 전압은 $V=-V_g (V^*=V_0-V_g)$ 로 절환되어 부상체는 궤적 SO를 따라 원점 O쪽으로 이동한다. 이와 같이 시간최적제어에 있어서는 점 S에서 전압을 1 회 절환하는 것 만으로 부상체는 원점(진동이 없는 안정부상상태)에 도달하게 된다. 그러나, 실제 시스템의 경우 스위칭 소자의 시간지연 등 여러 가지 요인에 의해 1 회 이상의 절환이 필요하며 정상상태에 있어서도 리미트 사이클 진동이 발생하게 된다.

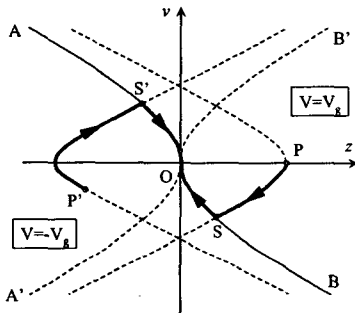


Fig. 2 Phase-plane diagram showing switching curve and time-optimal trajectory

4. 실험장치

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 이 들 운동을 능동적으로 제어하여야 한다⁽²⁾. 그림 3(a)는 외경, 내경, 질량이 각각 95mm, 25mm, 14.7g인 3.5 인치 HDD 용 알루미늄 디스크를 완전 비접촉 부상하는 데에 적합한 전극구조를 나타낸다. 전극은 각각 2 개의 전극(E_{ip} 와 E_{in} , $i=1, 2, 3$)으로 구성되는 3 개의 전극그룹으로 나뉘어져 있으며 각 전극그룹은 독립적으로 제어되어 각각 부상체에 정전력을 인가하기 위한 하나의 액추에이터로서 작용한다. 그림 3(b)는

실험장치의 개략도이고, 부상간격을 측정하기 위한 센서로는 맴돌이전류식 센서를 이용하였다.

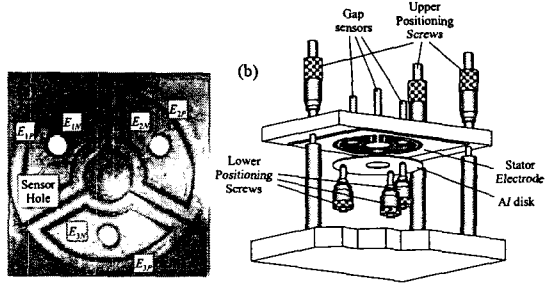


Fig. 3 (a) Stator electrode and (b) experimental apparatus

5. 실험결과

대기환경에서 3.5 인치 HDD 용 알루미늄 디스크의 부상실험을 수행하였다. 초기 간격과 목표 간격은 각각 0.4mm, 0.3mm로 설정하였으며 바이어스 전압과 제어 전압은 666V로 동일하게 설정하였다. 그림 4 는 실험결과 얻어진 부상 간격(센서 1)의 변동 및 스위칭 신호(전극 E_{1p} 와 E_{1n} 용)를 나타낸 것이다. 제어 시작 후 부상체가 안정적으로 부상되고 정상상태에서는 리미트 사이클의 거동을 보임을 알 수 있다. 이와 같이 정상상태에서 비교적 큰 진동이 발생하는 주된 이유는 스위칭 소자(Photo-MOS Relay AQV258)에 존재하는 스위칭 시간지연(스위치 ON시 0.35ms, OFF시 0.04ms) 때문이다.

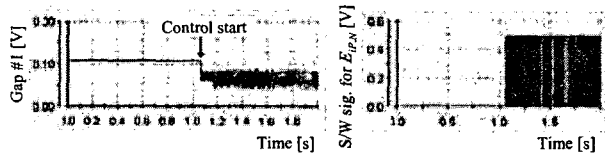


Fig. 4 Experimental results

6. 결론

본 연구에서는 시간최적제어기법을 적용함으로써 진공환경에서도 사용할 수 있고 매우 저가로 구성 가능한 정전부상시스템을 개발하였다. 3.5 인치 HDD 용 알루미늄 디스크에 대한 부상실험을 수행하여 부상 간격 0.3mm 로 디스크가 안정적으로 부상함을 확인하였다.

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. 전종업, 이상욱, "릴레이 제어법을 이용한 실리 콘 웨이퍼의 정전부상에 관한 연구," 한국정밀 공학회지, 제 22 권, 제 10 호, pp. 56-64, 2005.