

무손실 하이브리드 자기부상 시스템 개발

김종문\*, 강도현\*\*

한국전기연구원 계측제어연구그룹\*, Mechatronics 연구그룹\*\*

Development of Lossless Hybrid-type Magnetic Levitation System

Jong-Moon Kim\* and Do-Hyun Kang\*\*

I & C Group\* and Mechatronics Group\*\*, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - In this paper, a design of lossless hybrid-type magnetic levitation system is presented. The lossless hybrid-type system is implemented by a permanent-magnet and electro-magnetic system. The target plant consists of eight hybrid-type magnets and at steady-state, no current is needed to support the load. The design procedure is described and the results of this work are shown.

1. 서 론

자기부상 기술은 지난 수 십 년 동안 매우 다양하게 산업 현장에 적용되어 왔다. 그 중에서도 자기부상열차, 플라이 휠, 밀링 스펀들, 초고속 컴프레서, 클린 리프터 등은 기존 시스템의 문제점을 보완하는 동시에, 그 자기부상의 장점을 살려 실용적으로 사용되어 오고 있다[1]. 최근에는 그 적용 범위가 더 넓어져서 반도체 및 LCD 장비[2]에도 적용하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 이 반도체 및 LCD 공정 장비가 있는 고정정실은 항상 어느 일정 청정도를 유지시켜야 제품의 질을 극대화할 수 있게 된다. 청정도를 높이기 위한 기술은 여러 가지가 있으나 그 중의 하나가 비접촉식지지 자기부상 반송 시스템이다. 이 시스템은 기존의 반도체 시스템에서의 이송장치가 갖는 문제점을 해결할 수 있다는 장점이 있다. 또한 저전력 반송 시스템을 구현하기 위해서는 전자석뿐 만 아니라 영구자석을 사용한 하이브리드 방식의 부상 시스템을 설계해야 한다. 영구자석을 사용하면 손실이 작을 뿐 만 아니라 전력변환 장치의 최대 용량도 줄일 수 있다는 장점이 있다.

이 논문에서는 기존의 반송 시스템이 갖는 문제를 해결하고, 소비전력을 최소로 하는 영전류 자기부상 시스템을 설계하고, 그 결과를 보이고자 한다.

이 논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 하이브리드 자기부상 시스템에 대한 관계식을 정리하고, 설계 사양을 만족하는 부상 시스템을 설계하는 과정에 대해 설명한다. 그리고 제작된 자기부상 시스템에 대한 부연 설명을 하며 결론을 맺었다.

2. 본 론

2.1 관계식 유도

하이브리드 자기부상 시스템을 설계하기 위하여 먼저 기본적인 동작원리 및 관련식을 구하기로 한다. 자기부상 시스템을 모델링하기 위하여 먼저 비선형 전자기 방정식 및 동역학을 이용하여 선형 방정식을 구한다. 그림 1에서 레일이 강체이고, 누설 자속이 없다고 가정할 때, 공극자속밀도  $B$ 는 다음과 같이 전류  $i$ 와 공극  $z$ 의 함수가 된다.

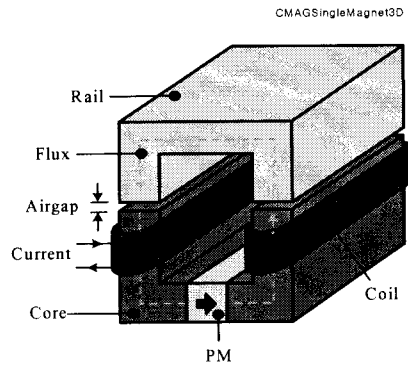


그림 1. 하이브리드 자기부상 시스템

$$B(t) = \frac{\phi(t)}{S} = \frac{c_1 i(t) + B_r}{c_2 z(t) + 1} \quad (1)$$

$B_r$ 는 잔류자속밀도이고, 계수  $c_1$ 와  $c_2$ 는 다음과 같다.

$$c_1 = \frac{\mu_p \mu_0 N}{l_p} = \frac{1.05 \mu_0 N}{l_p}, \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{2\mu_p}{l_p} = 2 \frac{1.05}{l_p} \quad (3)$$

여기서  $l_p$ 는 영구자석의 자로길이인데, 영구자석의 높이와 같다. 그리고 코일과 영구자석에 의한 공극에서의 흡인력  $F_a(t)$ 는 자기 축적에너지  $W(t)$ 를 공극에 대해 편미분 형태로 표현되고, 전류의 자승에 비례하고, 공극의 자승에 반비례한다.

$$F_a(t) = \frac{S}{\mu_0} B(t)^2 = \frac{S}{\mu_0} \left( \frac{c_1 i(t) + B_r}{c_2 z(t) + 1} \right)^2 \quad (4)$$

그림 1에서 흡인력  $F_a(t)$ 와 가속도  $\ddot{z}(t)$  사이의 관계는

$$m\ddot{z}(t) = mg - F_a(t) + F_e(t) \quad (5)$$

가 되고,  $m$ 은 전체 질량이고,  $g$ 는 중력가속도,  $F_e(t)$ 는 외부로부터의 힘 외란이다. 힘 외란의 소스는 하이브리드 시스템에서는 부상 후 추진할 때의 추진 모터에서 발생하는 수직력이 가장 크고, 작업 중에 부하가 수시로 변하는 것도 부상계에서의 외란이라 할 수 있다. 그림 1에서 인덕턴스  $L(t)$ 은

$$L(t) = \frac{c_3}{c_1 + 2z(t)} \quad (6)$$

이 된다. 여기서  $c_3$ 과  $c_1$ 는 각각  $\mu_0 N^2 S$ ,  $l_c/\mu_c + l_g/\mu_g$ 이고,  $\mu_c$ 와  $\mu_g$ 는 각각 철심과 영구자석의 비투자율이고,  $\mu_0$ 는 진공속의 비투자율이다.  $l_c$ 는 철심의 자로길이이고,  $N$ 은 코일의 권선수이다. 따라서 영구자석의 높이에 비례해서 인덕턴스 식의 분모가 커져 결국 인덕턴스는 작아지게 되어 코일의 시정수는 감소하게 된다. 만약 영구자석 없이 순수하게 코일만 있는 경우  $l_g$ 가 0이 되고, 코어의 비투자율  $\mu_c$ 는 2000 보다 큰 값이므로 인덕턴스  $L(t)$ 은 다음과 같이 근사화된다.

$$L(t) \approx \frac{\mu_0 N^2 S}{2z(t)} \quad (7)$$

식 (5)의 기계적 방정식과 별도로 전기적 방정식은 다음과 같이 전압 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} v(t) &= Ri(t) + \frac{d}{dt} [L(z, i)i(t)] \\ &= Ri(t) + L(z, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dz} \left( \frac{dz}{dt} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

## 2.2 마그네트 설계

하이브리드 자기부상 시스템을 구성하고 있는 요소 부품에서 제일 중요한 부상 마그네트 설계는 얼마나 최적화하는 것이 중요하다고 하겠다. 따라서 최적 설계를 위하여 이 논문에서는 유한요소법에 의해 마그네트 설계를 최적화한다. 최적 설계를 위해서는 시스템의 정확한 모델링이 되어야만 하고, 또 파라미터도 얼마나 실제값에 가까운가도 관심의 대상이 된다. 따라서 설계 과정에서 여러 번의 시행착오를 해야만 하고, 그 횟수를 줄이는 것이 매우 중요하다. 이 논문에서 설계하고자 하는 시스템의 사양은 중량이 1톤이다. 따라서 최적 설계를 위해서는 실제 구현했을 경우의 오차를 감안하여 정할 필요가 있다. 그림 2는 유한요소법 소프트웨어의 하나인 맥스웰 2D에 의해 수행된 결과로서, 자속 패턴을 보여 준다. 자속 밀도와 같이 레일 및 가동 코어의 모서리 부분에서 자속선 분포가 많지 않다는 것을 알 수 있고, 누설 자속의 모습도 볼 수 있다. 또한 코어에서 자속에 의한 포화가 있는 가를 알 수 있어서 영구자석의 크기와 세기를 결정할 수 있다. 실제로 영구자석에 의해 코어 부분에서 포화가 일어나면 코일의 전류에 의한 자속은 쉽게 포화가 된다. 따라서 포화 문제가 없으려면 B-H 곡선에서 선형 구간의 중간 부분에서 동작하는 것이 바람직하다.

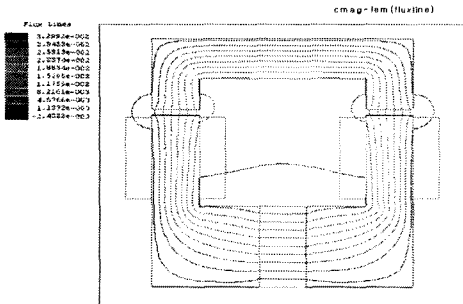


그림 2. 전자장 해석 결과 : 자속 패턴

Model 3 Force vs. Gap (Current : 0A-5A)

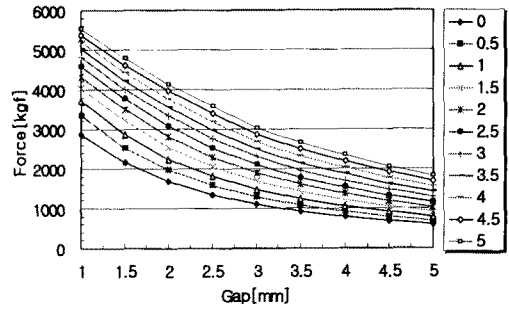


그림 3. 공극, 전류 및 부상력 특성곡선

그림 3은 전류가 변할 때, 설계된 마그네트의 공극과 부상력과의 관계를 보여 준다. 영구자석에 의한 자속만 있을 경우 정상 공극 3mm에서 1100kg 정도의 힘이 발생한다는 것을 알 수 있다. 영구자석이 있는 경우는 정상상태에서 코일의 전류가 0이 되어 자중을 지지할 수 있고, 동작 중에 외력이 발생하면 코일의 전류에 의해 제어된다. 따라서 코일의 전류에 의한 부상력은 전 공극 영역에서도 자중 및 외력의 합 성분을 충분히 지지할 수 있어야 한다. 이 그림에서 알 수 있듯이 공극 대 부상력의 기울기는 마이너스가 되어 시스템 자체가 불안정하다. 따라서 부상 제어기에 의해 정상상태 공극을 유지시켜야 한다.

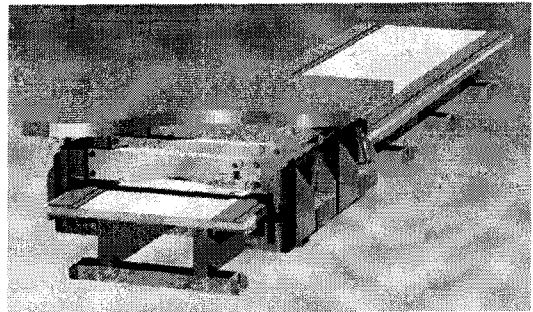


그림 4. 부상 및 추진용 자기부상 반송 시스템

그림 4는 부상 및 추진용 자기부상 반송 시스템을 보여 준다. 부상은 영구자석 하이브리드형 마그네트에 의해 수행되고, 추진은 횡자속형 선형 전동기를 사용한다. 부하를 얻는 상위 부분은 마그네트와 스프링 및 댐퍼에 의해 연결되어 진동을 흡수할 수 있도록 했다. 그리고 좌우 마그네트를 기계적으로 결별시키기 위하여 안티롤 바를 사용하였다. 일단 부상 후 추진 시스템이 운전되어 사실상의 반송 시스템을 만들었다고 할 수 있다. 이 때 추진용 리니어 모터에서 부상 시스템 쪽으로 기계 및 전기적 영향을 크게 주므로 부상 제어기를 설계할 때 이 점을 유념해야 한다. 이것은 부상계에 외력으로 작용하며 이 외력의 주파수 및 크기는 리니어 모터의 속도 패턴에 따라 달라질 수 있다. 이것은 부상계에 가해지는 외력의 주파수 성분 및 크기가 달라질 수 있다는 의미로 이를 고려한 부상 및 추진 통합 제어 시스템이 구축되어야 한다. 이 논문에서 채택한 리니어 모터는 횡자속형 리니어 모터로서, 부상계에 미치는 외력의 크기는 추진력의 4배가량이 되어 부상 제어기에 큰 부담이 되기도 한다. 따라서 이를 고려한 부상 알고리즘의 설계가 절실히 요구된다.

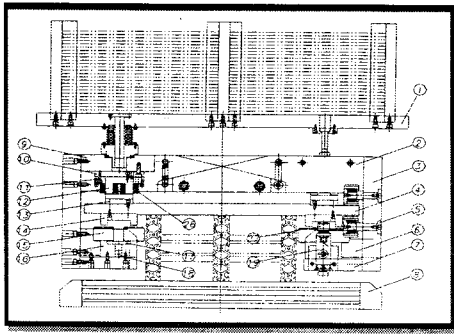


그림 5. 하이브리드 자기부상 시스템 도면

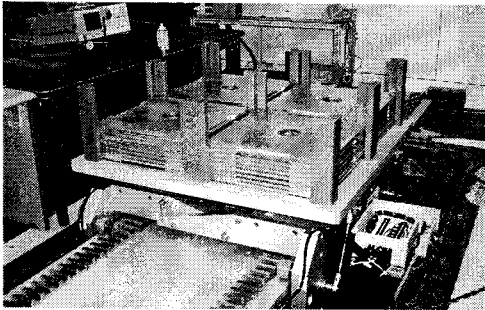


그림 6. 하이브리드 자기부상 반송시스템

부상 및 추진을 동시에 구현할 수 있는 시스템으로서, 그림 5는 설계된 자기부상 시스템의 도면이고, 그림 6은 제작된 하이브리드 자기부상 반송 시스템을 보여 준다. 레일의 길이는 3m이고 마그네트 및 프레임의 무게는 440kg이며, 부하를 없으면 전체 1000kg 정도의 시스템이 된다. 이 시스템은 실제 반도체 제조 공정상의 대차 무게보다는 작으나 이런 시스템에 대한 경험이 앞으로 매우 중요하다고 본다. 레일은 U자형이고, 추진용 리니어 모터의 고정자는 레일과 붙어 있다. 이 시스템에서 중요한 것은 자기부상 시스템은 진동을 유발하는 요소가 매우 많기 때문에 고정자는 특별히 튼튼하게 만들어야 한다. 기계적인 고려가 우선 되어야 한다.

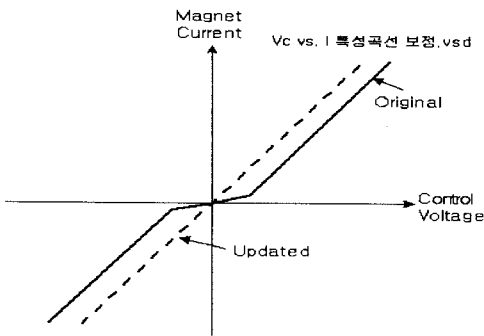


그림 7. 보상 전, 후의 제어 전압 vs. 마그네트 전류

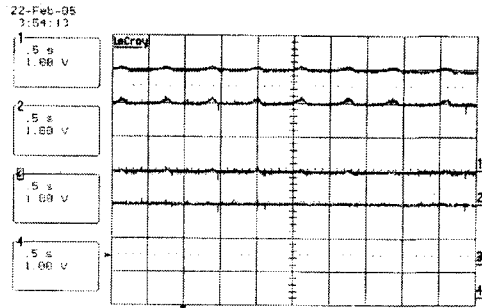


그림 8. 제어전압 수정 전의 부상 갭 파형

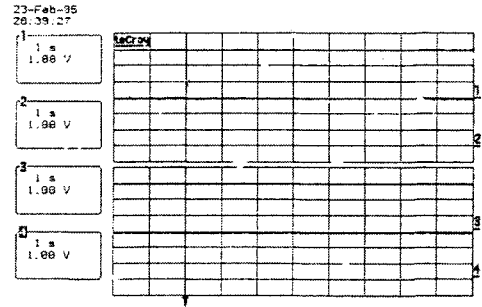


그림 9. 제어전압 수정 후의 부상 갭 파형

그림 7은 영구자석이 있는 하이브리드 자기부상 시스템의 초퍼를 포함한 제어전압과 마그네트 전류의 관계를 보여 준다. 전상한 초퍼에 사구간이 있어 정상상태에서 비선형성이 생기면 부상 특성도 나빠지게 된다. 그림 8과 9는 각각 제어전압 수정 전과 후의 부상 갭 파형을 보여 준다. 제어전압 수정 전에는 비선형성이 존재해서 일정 주기로 갭이 튀는 것을 알 수 있으나, 초퍼의 비선형을 보상한 후의 갭 특성은 크게 개선되었다.

### 3. 결 론

이 논문에서는 하이브리드 자기부상 반송 시스템의 설계 및 제작에 대해 언급하였다. 하이브리드 시스템은 강자성의 영구자석이 있기 때문에 제작하기 어려울 뿐만 아니라 조립도 쉽지 않은 문제를 가지고 있다. 특히 기계적인 일라인 문제도 시스템 성능에 결정적으로 중요하다고 볼 수 있다. 이 시스템은 부상제어 기술도 상전도 방식에 비해 더 어렵다. 이 반송 시스템은 손실이 없고, 분진이 없다는 장점이 있어서 앞으로 반도체, LCD 공정 및 클린 리프터 등의 산업 분야에서 많이 쓰일 것으로 본다.

### [참 고 문 헌]

[1] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.  
 [2] Dick de Roover, *Motion control of a wafer stage*, Delft University Press, 1997.