

# 저손실 자기부상 시스템 개발

論 文

54B-12-4

## Development of Low Loss Magnetic Levitation System

金鍾文<sup>\*</sup> · 姜道鉉<sup>\*</sup>  
(Jong-Moon Kim · Do-Hyun Kang)

**Abstract** - In this paper, a low loss magnetic levitation(Maglev) system is suggested and tested. The suggested Maglev system includes four hybrid magnets which consist of permanent magnet and coil. In the steady state, the levitated module system can be supported by attraction force generated by permanent magnet. The coil current controls only dynamic loads due to external disturbances. The module systems are designed by using finite element method(FEM) software tools, such as MAXWELL and ANSYS. Also, digital control systems are designed to keep the magnet airgap at a constant value. The control systems include a VME(versa module europa)-based CPU(central processing unit) board, AD(analog to digital) board, PWM(pulse width modulation) board, 4-quadrant chopper, and sensors. In order to estimate the vertical velocity of the magnet, we use second order state observer with acceleration and gap signals as input and output signals, respectively. The characteristics of the suggested low loss Maglev system are demonstrated by experimental results showing coil current of 0A in the steady state of 3mm airgap and performance specifications are satisfied for reference gap and force disturbance.

**Key Words** : Low Loss Magnetic Levitation System, Finite Element Method, Levitation Control, State Observer

### 기호설명

$R_\delta, R_r, R_c, R_p$ : 공극, 레일, 코어, 영구자석의 자기저항( $\Omega$ )  
 $\delta, \delta_r$ : 마그네트와 레일 사이의 공극 및 기준 공극( $m$ )  
 $\ddot{\delta}$ : 마그네트의 가속도( $m/sec^2$ )  
 $i$ : 코일 전류( $A$ )  
 $v$ : 코일 양단의 전압( $V$ )  
 $f$ : 공극에서의 흡인력( $N$ )  
 $\phi_\delta$ : 공극에서의 자속( $Wb$ )  
 $m$ : 마그네트 무게( $kg$ )  
 $g$ : 중력가속도( $m/sec^2$ )  
 $A_\delta$ : 마그네트 자극의 단면적( $m^2$ )  
 $l_c, l_r$ : 마그네트 코어 및 레일의 자속선 등가길이( $m$ )  
 $\mu_0$ : 진공에서의 투자율( $H/m$ )  
 $\mu_r, \mu_c$ : 레일 및 마그네트 코어의 상대 투자율  
 $\Theta_p, \Theta_c$ : 영구자석 및 코일의 기자력(AT)  
 $h_p$ : 영구자석의 높이( $m$ )  
 $N$ : 코일의 권선수(Turns)  
 $C_{ch}$ : 초퍼 게인

$K_p, K_i, K_v, K_c$  : 위치, 적분, 속도 및 전류 이득

### 1. 서 론

산업 현장에서 쓰이는 대부분 기존의 접촉식 베어링은 기계적으로 이송체를 지지하기 때문에 마찰, 마모에 따른 소음, 진동 및 분진이 발생하고, 윤활 장치 때문에 환경오염 등 여러 문제가 있다. 이것을 해결하기 위해 세계 여러 나라에서 비접촉 베어링 기술인 자기부상 시스템을 지난 수십 년 동안 연구하여 왔는데, 그 중에서도 자기부상 열차[1], 자기 베어링[2] 등의 분야에서 많이 발전되어 왔다. 자기부상열차의 경우, 독일은 작년에, 일본은 올해 상업 운전이 시작되었고, 자기 베어링은 플라이 훨, 터보 분자 펌프 등의 형태로 널리 적용되고 있다. 최근에는 그 적용 범위가 더 넓어져서 반도체 및 LCD(liquid crystal display) 공정 장비 [3]에도 적용하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 이러한 반도체 및 LCD 장비가 설치되어 있는 청정실은 항상 어느 일정 청정도를 유지시켜야 제품의 질을 극대화할 수 있게 된다. 하지만 이 공정 장비 중 기존의 무게 6톤 정도의 수평방향 이송 시스템 또는 수직방향 리프터를 지지하기 위하여 기계 베어링이 쓰이고 있으며, 이것으로 인해 분진이 발생하게 된다. 이에 대한 대책이 바로 비접촉식 자기부상 이송 시스템이다. 이 시스템은 자력에 의한 힘으로 부상체를 비접촉으로 지지하기 때문에 마찰 및 마모가 없어 분진 발생이 전혀 없는 친환경 시스템이다. 따라서 고청정도를 요구하는 시스템에서는 가장 적합한 이송 시스템이라 할 수 있다.

또한, 반도체 및 LCD 공정 장비에 적용되는 자기부상

\* 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹 先任研究員 · 工博

E-mail : jmkim@keri.re.kr

\* 正會員 : 韓國電氣研究院 產業電氣研究團 團長 · 工博  
接受日字 : 2005年 8月 23日

最終完了 : 2005年 10月 27日

시스템은 설계 때 낮은 소비전력을 요구한다. 이 논문에서는 이러한 점을 고려하여 정상상태 소비전력을 가급적 작게 하기 위하여 영구자석과 코일을 겸용하는 하이브리드 방식을 채택한다. 이 방식은 정상상태에서 부상체의 무게를 지지하기 위해서 코일 전류가 거의 0A이고, 외란이 발생할 때만 이것을 제어하기 위하여 코일 전류가 변한다. 이러한 시스템의 장점은 소비전력이 매우 작고, 비접촉으로 이송하기 때문에 청정실과 같은 특수한 환경에서 적합하다.

논문 [4]에서는 영구자석과 코일을 혼용하는 자기부상 방식을 사용하여 3.9kg의 단일 마그네트를 대상으로 하였다. 따라서 산업 현장에 사용하기에는 중량이 작고, 단일 마그네트이므로 모듈 형태의 시스템으로 제작이 필요하다. 또한 논문 [5]에서는 4극 3자유도 하이브리드 자기부상 시스템에 대한 부상제어 결과를 보였다. 이것 역시 마그네트 자중이 6.7kg으로 중량급의 부하를 요구하는 시스템에는 적용이 힘들다. 하지만 이 논문에서는 중량급의 자기부상 시스템을 대상으로 하면서 저손실 시스템을 개발한다는 점에서 의미가 있다고 할 수 있다. 또한 논문 [6]-[10]은 영구자석과 코일을 혼용하여, 모듈 형태의 자기부상 시스템에 대한 설계 및 해석 결과를 보였지만, 시스템 설계 및 실험 결과에서 완전한 결과를 보였다고 볼 수 없다.

이 논문에서는 비접촉 지지 및 저손실의 요구 사항을 만족하는 1톤급의 영구자석 및 코일 혼용 형태의 하이브리드 자기부상 시스템을 제안하며, 그 시스템의 설계, 해석 및 실험 결과를 보인다. 자기부상 시스템은 마그네트, 부상제어기, 초퍼, 모듈, 센서 등으로 이루어져 있기 때문에 각 요소에 대한 설계 규격이 필요하다. 설계 사양으로서, 전체 부상체의 무게는 1000kg이고, 마그네트와 레일 사이의 간격은 3mm이다. 따라서 제작 오차가 없다면, 간격 3mm에서 부상력은 부상체의 무게와 같고, 이 때 코일 전류는 0A가 되어, 영구자석의 기자력에 의해서 부상체 자중이 지지된다. 부상체 모듈은 네 개의 코너에 의해 지지되며, 각 코너에는 마그네트가 한 개씩 있어 총 네 개의 마그네트가 있게 된다. 그리고 모듈의 좌, 우 그룹은 서로 기계적으로 분리되어 영향을 주지 않는다. 마그네트 설계는 FEM 전자장 해석 소프트웨어 툴인 Maxwell[11]을 사용하였고, 모듈 프레임 및 트랙의 진동 모드 해석은 기계 해석용 소프트웨어 툴인 ANSYS[12]로 하였다. 제어 대상인 자기부상 시스템의 설계 및 제작 후, 초기 부상, 스텝 응답 및 외란 응답 등의 부상 실험을 통하여 제어 성능에 대한 설계 사양을 만족하는 가능을 확인하여 시스템의 성능을 검증하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 영구자석과 코일을 포함한 자기부상 시스템에 대한 모델링을 하여 그 동적 운동을 수식적으로 파악한 후, 3장에서는 각 요소에 대한 설계와 해석을 한다. 그리고 4장과 5장에서는 각각 시스템 제작 결과 및 부상실험 결과를 보이고, 마지막 5장에서 결론을 맺었다.

## 2. 시스템 모델링

이 장에서는 저손실 하이브리드 자기부상 시스템을 설계하기 전에 여기서 다루는 영구자석 제어형 자기부상(contr-

olled-permanent magnet, CMAG) 시스템의 수학적인 모델링[1]을 통해 마그네트와 부상제어기, 초퍼 등 각각의 요소에 대한 설명을 한다. 마그네트는 자기부상 시스템에서 가장 기본적인 요소로서, 부상체를 지지하기 위한 부상력을 발생한다. 이 CMAG 시스템은 상전도 방식과 달리 영구자석과 코일을 모두 가지고 있으므로 기자력의 소스가 두 가지가 된다. 이 경우 모듈의 전체 무게가 수 백 kg 이상이 되면 영구자석의 힘이 매우 커서 취급이 쉽지 않다. 그럼 2.1과 2.2는 각각 단일 CMAG 시스템과 그 자기 등가회로이며, 누설 자속이 없다고 가정한다. 코일에 전류가 흐르면 자속이 발생하고, 이 자속과 영구자석의 자속이 합쳐져서 전체 자속이 된다. 이 자속에 의해 마그네트와 레일 사이의 간격에서 흡인력이 발생되어 마그네트는 수직 방향으로 움직이게 된다. 이 하이브리드 방식은 개루프 시스템이 불안정하므로 일정한 간격을 유지하기 위해서 안정화 제어기가 필요하다. 또한 시스템에 외란이 들어오면 제어성능이 나빠지므로 외란 제거 성능이 부상 제어시스템에서는 가장 중요한 기준이 된다. 레일과 마그네트 코어의 재료는 S20C이고, 영구자석의 재료는 NdFeB이며 잔류 자속밀도  $B_r$ 은 1.17T이다.  $\Theta_p$ 는  $B_r h_p / \mu_0 \mu_p$ 과 같다.

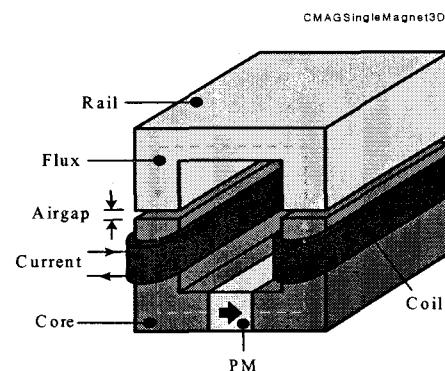


그림 2.1 단일 CMAG 시스템

Fig. 2.1 Single CMAG system

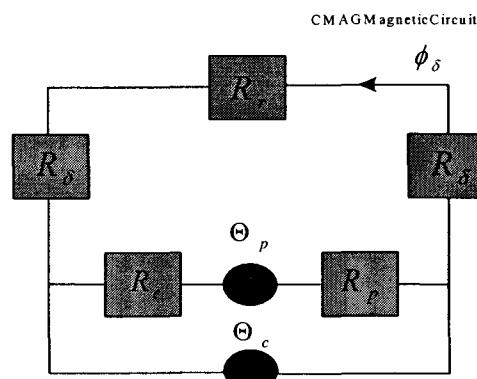


그림 2.2 자기 등가회로

Fig. 2.2 Magnetic equivalent circuit

그림 2.2에서 전체 자기저항  $R_t$ 는 다음과 같다.

$$R_t = 2R_\delta + R_r + R_c + R_p \approx 2R_\delta + R_p \quad (2.1)$$

여기서  $R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 A_\delta}$ ,  $R_r = \frac{l_r}{\mu_0 \mu_r A_\delta}$ ,  $R_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_c A_\delta}$ ,  $R_p = \frac{l_p}{\mu_0 \mu_p A_p}$ 이다.

부상력을 증가시키기 위해서는 영구자석의 높이보다는 폭이 커야 하며, 캡에서의 자속밀도가 증가하게 된다.  $\phi_\delta$ 는 다음과 같다.

$$\phi_\delta = \frac{\Theta_p + \Theta_c}{2R_\delta + R_p} = \frac{\Theta_p + Ni}{2\delta/\mu_0 A_\delta + R_p} \quad (2.2)$$

흡인력  $f$ 는

$$f = \frac{B^2}{\mu_0} A_\delta = \frac{\phi_\delta^2}{\mu_0 A_\delta} = \frac{1}{\mu_0 A_\delta} \left( \frac{\Theta_p + Ni}{2\delta/\mu_0 A_\delta + R_p} \right)^2 \quad (2.3)$$

이고, 영구자석과 코일의 기자력에 결정된다. 여기서 코일 전류가 감소하면 부상력은 감소하지만, 최소 한계치보다 작으면 오히려 부상력이 다시 증가하게 된다. 따라서 부상제어 할 때, 전류가 최소 한계치보다 작게 되지 않도록 보호장치를 설치해야 한다. 부상력은 전류의 제곱에 비례하며, 캡의 제곱에 반비례한다. 따라서 캡이 커질수록 부상력이 떨어져 시스템이 불안정하다.

코일에서의 전압 방정식은

$$v = Ri + N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial t} = Ri + N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial i} \frac{di}{dt} + N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dt} \quad (2.4)$$

과 같고, 식 (2.4)를  $i$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$i = (v - Ri - N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dt}) \frac{1}{N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial i}} \quad (2.5)$$

$$\text{여기서 } N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial i} = \frac{N^2}{\frac{2\delta}{\mu_0 A_\delta} + R_p}, \quad N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial \delta} = \frac{-2(N\Theta_p + N^2i)}{\mu_0 A_\delta \left( \frac{2\delta}{\mu_0 A_\delta} + R_p \right)^2}$$

이고,  $N \frac{\partial \phi_\delta}{\partial i}$ 는 코일의 인덕턴스이다.

그림 2.1에서  $i(t)$ 에 의해 발생하는 힘은 다음 식처럼 시스템의 수직 동특성을 제어한다.

$$m\ddot{\delta} = -f(i, \delta) + f_d + mg \quad (2.6)$$

여기서  $mg = f_0(i_0, \delta_0)$ 이고,  $(i_0, \delta_0)$ 과  $f_d$ 는 각각  $i$ 와  $\delta$ 의 평형 값과 외란 힘이다.

부상 동특성의 정확한 해석을 위해 식 (2.1)~(2.6)의 해가 필요하지만, 정확한 선형 모델은 평형점  $(i_0, \delta_0)$  주변에서 변위 운동을 유발하는 흡인력의 선형 근사화를 통해 구할 수 있다. 시스템의 선형화된 기계 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\delta} = \frac{C_\delta}{m} \Delta\delta - \frac{C_i}{m} \Delta i + \frac{f_d}{m} \quad (2.7)$$

$$\text{여기서 } C_i = \frac{2N\Theta_p(\mu_0 A_\delta)^{-1}}{\left( \frac{2\delta}{\mu_0 A_\delta} + R_p \right)^2}, \quad C_\delta = \frac{4\Theta_p^2(\mu_0 A_\delta)^{-2}}{\left( \frac{2\delta}{\mu_0 A_\delta} + R_p \right)^3}$$

이다. 그리고  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ ,  $i = i_0 + \Delta i$ ,  $v = v_0 + \Delta v$ 이고,  $\Delta\delta$ ,

$\Delta i$ 과  $\Delta v$ 는 각각 캡, 전류, 전압의 미소 변화,  $v_0$ 는 전압의 평형상태 값이다.

또한 선형화된 전압 방정식은 아래와 같다.

$$\Delta i = \frac{C_i}{L_0} \Delta\delta - \frac{R}{L_0} \Delta i + \frac{1}{L_0} \Delta v \quad (2.8)$$

여기서  $L_0 = N^2 \left( \frac{2\delta_0}{\mu_0 A_\delta} + R_p \right)^{-1}$ 이다. 인덕턴스는 전류의 응답 속도를 결정하므로 가급적 작아야 한다. 따라서 코일의 권선수를 작게 해야만 한다.

### 3. 시스템 해석

#### 3.1 기본 설계

앞 절에서 언급한 하이브리드 방식의 기본 동역학 방정식을 통하여 이 시스템의 전기 및 기계 운동을 확인하였고, 이 절에서는 저순실 자기부상 시스템에 대한 기본 설계를 한다. 자기부상 시스템은 그 구성 요소로서, 마그네트, 모듈 프레임, 레일, 부상제어기, 초퍼 및 센서로 이루어져 있다. 여기서 센서는 별도의 설계를 요구하지 않으므로 대상에서 생략한다. 마그네트는 부상력을 발생시켜 모듈 전체를 지지하는 액츄에이터의 역할을 한다. 따라서 마그네트 설계는 시스템의 성능을 직접적으로 좌우하며, 영구자석 각 봉을 마그네트 코어 사이에 끼워 넣어 제작한다. 마그네트의 부상력은 캡과 전류의 비선형 함수로 결정되는데, 정상상태 캡과 전류에 의해 평형점이 형성된다. 이 논문에서의 평형점은 캡 3mm, 전류 0A로 하였으며, 이때의 전체 부상력은 자기부상 모듈 전체의 무게인 1000kgf와 같게 된다. 여기서 마그네트의 개수는 네 개이고, 모듈 프레임은 각 마그네트를 감싸며, 구조적으로 튼튼하게 제작되어야만 한다. 모듈은 좌, 우변의 마그네트가 기계적으로 분리되어 서로 영향을 주지 않아야 한다. 트랙의 형상은 U자형이며, 길이는 3m, 재료는 S20C이다. 부상제어기는 디지털 프로세서로 구현되고, 샘플링 주파수는 4kHz이다. 제어 알고리즘은 상태궤환 방식이며, C 언어로 프로그램하였다. 제어기로부터의 제어 신호는 PWM 형태로 초퍼로 전송되며, 초퍼는 4상한 방식으로 구동된다.

#### 3.2 마그네트 해석

자기부상 시스템은 기존의 접촉식 베어링을 대체하기 위한 것이지만 그것을 구현하기 위하여 부상 제어기가 별도로 추가되고, 마그네트에 전류를 흘려야 하므로 소비전력도 증가되는 문제가 발생하게 된다. 마그네트에 큰 전류가 흐르면 발열 문제가 발생하므로 정상상태에서는 가능한 한 전류를 최소한으로 유지시켜야만 한다. 이러한 소비전력 증가와 발열 문제를 해결하기 위해 이 논문에서는 마그네트에 코일 외에 영구자석을 추가한다.

하이브리드 마그네트를 설계하기 위하여 MAXWELL 소프트웨어를 사용하였고, 중요 설계 결과는 전류 및 캡에 따른 흡인력과 코어에서의 자속 포화 여부이다.

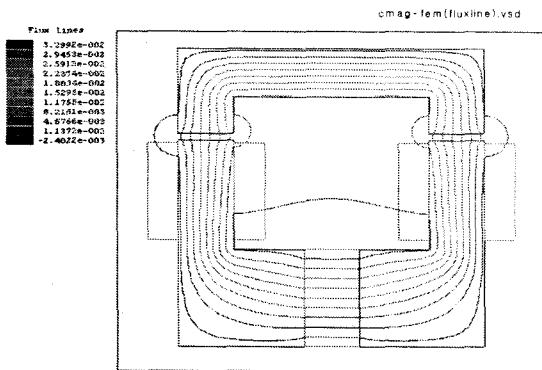


그림 3.1 마그네트의 자속 패턴

Fig. 3.1 Flux pattern of the magnet

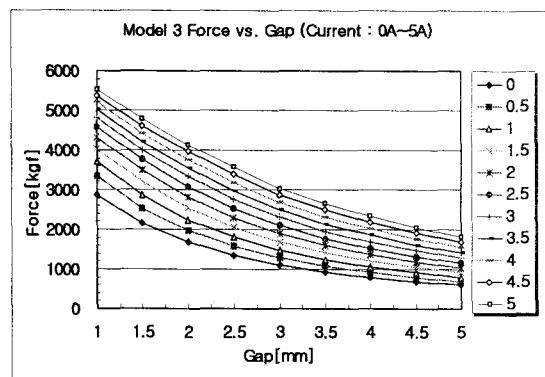


그림 3.2 부상력, 갭 및 전류 특성 곡선

Fig. 3.2 Force vs. airgap and current

그림 3.1은 FEM 결과 중, 부상 마그네트의 자속 패턴이다. FEM 결과를 통해 마그네트 코어와 레일의 각 지점에서 자속은 포화되지 않았다는 것을 알 수 있다. 또한 갭 주위에서는 약간의 누설 자속을 볼 수 있으며, 이 누설로 인하여 실제로 힘이 줄어들게 된다. 부상제어기와 초퍼 게인 설계 때 이러한 누설을 고려하여 충분한 전류가 흐를 수 있도록 용량을 설정하는 것이 중요하다. 자기부상열차가 초고속으로 추진하거나 자기베어링의 회전자가 초고속으로 회전하면 와전류 손실 및 역기전력으로 인한 손실이 많이 발생하게 되므로 이것도 설계 시 고려해야 한다.

그림 3.2는 마그네트의 부상력, 갭 및 전류 특성곡선이다. 전류는 0~5A이고, 갭은 1~5mm까지 변할 때의 부상력을 FEM으로 계산한 결과이다. 부상력은 전류가 증가하면서 전류의 자승에 비례하고, 갭에 대해서는 자승에 반비례한다. 이 특성 때문에 코일 및 영구자석이 있는 하이브리드 마그네트의 제어 특성은 개루프 불안정하다고 할 수 있다. 따라서 안정화시키는 피드백 제어기가 필요하다.

마그네트 전류가 마이너스가 되면 전체 자속의 크기는 감소되어 부상력이 감소된다. 영구자석이 있는 시스템의 초기 위치는 바닥 쪽과 레일 쪽 두 가지 모두 가능한데, 만약 초기 위치가 레일 쪽이면 초기 부상하기 위해서는 마그네트 전류는 마이너스가 되어야만 한다. 이 때 영구자석에 역자

속이 흐르게 되어 감자의 가능성이 있다. 이와 반대로 초기 위치가 바닥 쪽이면 초기 부상 위해 플러스 전류가 흘러야 한다. 이 논문에서는 초기 위치는 레일 쪽으로 하였으며, 마그네트와 레일 사이에 1.5mm의 갭을 유지시키기 위해 가이드 롤러를 설치했다. 따라서 갭의 최소값은 1.5mm이고, 최대값은 5.0mm가 된다.

### 3.3 모듈의 모드 해석

자기부상 모듈은 마그네트를 감싸며 기계적으로 진동이 일어나지 않도록 해야 하고, 구조적으로 부상 메카니즘에 문제가 없도록 설계가 되어야 한다. 모듈 프레임의 재료는 알루미늄이고, 부상체 모듈과 상판 사이에 스프링과 댐퍼를 설치했다. 전체 모듈 무게인 1000kg 중 상판 위에 얹은 부하는 560kg이고, 모듈의 자체 무게는 440kg이다. 모듈은 좌, 우변이 안티풀러 범으로 연결되어 있어 한 쪽 변의 마그네트가 다른 변에 기계적으로 영향을 주지 않게 된다. 설계된 모듈의 진동 특성을 파악하기 위하여 기계 정특성 해석용 소프트웨어 툴인 ANSYS를 이용하여 진동 모드해석을 하였다. 자기부상 시스템에서 트랙을 포함한 모듈 시스템의 1차 고유주파수는 자기부상 및 추진시스템의 동작 주파수보다 높아야만 공진 현상이 일어나지 않게 된다. 즉, 디커플링이 되어야만 서로 간섭을 일으키지 않게 되어 진동이 발생하지 않게 된다. 모드 해석은 부상체인 모듈과 고정체인 트랙 부분으로 나누어 별도로 하였다.

표 3.1은 모듈의 고유주파수를 보여 주며, 1차부터 5차 모드는 각각 66.4, 90.4, 137.9, 162.8, 173.7Hz이다. 실제로 실험할 때에 모듈에 미세한 진동이 일어나게 되는데 이 진동의 크기가 커지면 고유주파수를 올리거나 부상 시스템의 가진 주파수를 내려야만 한다. 하지만 부상 시스템의 가진 주파수를 내리는 것은 부상 시스템 안정도에 나쁜 영향을 주게 되므로 모듈의 주파수를 올리는 것이 바람직하다. 표 3.2는 트랙의 고유주파수를 보여 주며, 1차부터 5차 모드는 각각 128.8, 180.4, 410.6, 654.4, 661.6Hz이다. 트랙은 전체 모듈 시스템을 지지하므로 트랙의 고유주파수와 강성은 매우 중요하다. 따라서 바닥에 단단히 고정시켜야 하며, 레일 높이의 오차도 10 $\mu$ m 이내로 정밀도를 유지해야 부상 특성에 문제가 없게 된다. 이러한 점을 고려하여 이 연구에서는 트랙의 고유주파수를 모듈보다 충분히 크게 설계가 되었다. 그 결과, 부상 후 모듈 및 트랙의 진동이 사라지게 되었다. 그림 3.3과 3.4는 각각 모듈과 트랙의 1차 진동모드를 보여 준다. 마그네트 모듈은 좌, 우로 힘을 받아 롤링 운동이 지배적이고, 상판은 대각선 방향으로, 트랙은 횡방향으로 진동한다는 것을 보여 준다. 따라서 트랙은 수직 방향의 강성을 높이는 동시에 횡방향의 진동에 대한 대책도 강구해야 한다. 자기부상 모듈은 네 코너에 있는 마그네트가 각각 부상하여 수평면에 도달하게 된다. 그러나 각 코너의 부상 시스템의 특성이 이상적으로 동일하지 않으면 수직 방향 뿐 아니라 수평 방향으로 힘의 불균형성이 발생하게 된다. 이것이 진동 원인 중의 하나가 되므로 자기부상 모듈 뿐 아니라 트랙도 수직 및 수평 방향으로 충분한 강성이 있어야 한다.

표 3.1 모듈의 고유주파수

Table 3.1 Natural frequencies of the module.

차수	고유주파수(Hz)
1	66.4
2	90.4
3	137.9
4	162.8
5	173.7

표 3.2 트랙의 고유주파수

Table 3.2 Natural frequencies of the track.

차수	고유주파수(Hz)
1	128.8
2	180.4
3	410.6
4	654.4
5	661.6

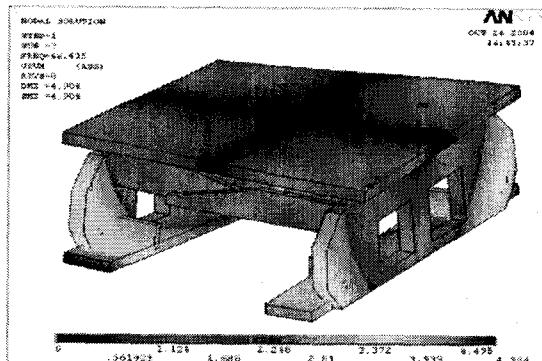


그림 3.3 모듈의 1차 진동모드 모습

Fig. 3.3 First vibration mode of the module

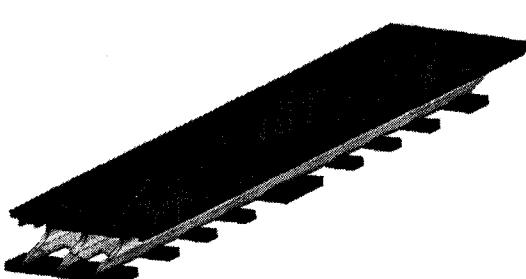


그림 3.4 트랙의 1차 진동모드 모습

Fig. 3.4 First vibration mode of the track

#### 3.4 부상제어기 해석

부상제어기는 불안정한 하이브리드 자기부상 시스템을 안정화시키는 동시에 외란으로부터 시스템의 제어 성능을 일정 기준 내에서 유지시키는 역할을 한다. 이 논문에서는 부상제어기로서, 실시간 운영체제인 VxWorks[13]와 VME 버스 기반의 PowerPC[14]를 사용하였고, 클럭 주파수는

300MHz이다. 제어 알고리즘은 C 언어로 작성되며, VxWorks 개발 환경인 Tornado[15]를 사용하여 PC에서 개발 및 컴파일 후, 디지털 제어 보드로 다운로드 된다. 디지털 제어기는 CPU 보드, AD 보드, PWM 출력 보드, DIO 보드로 구성된다. 센서는 캡 센서, 가속도 센서 및 전류 센서를 사용한다. 센서로부터 입력된 아날로그 센서 신호는 아날로그 인터페이스 보드에 있는 절연 앰프와 2차 저역통과 필터를 거쳐, 12bit AD 보드로 입력되어 4kHz의 주파수로 샘플링 된다. 계산된 제어신호는 PWM 형태로 초퍼로 광케이블에 의해 전송된다.

제어 알고리즘 설계 과정에서 마그네트 수직 방향의 속도를 직접 측정할 수가 없기 때문에 속도는 캡 신호와 가속도 신호를 이용한 상태 관측자를 통해 추정한다. 캡 신호와 가속도 신호로부터 추정된 속도 신호를 구하기 위한 전달함수는 아래와 같다.

$$\hat{\delta} = \frac{s}{s^2 + H_1 s + H_2} \ddot{\delta} + \frac{H_2 s}{s^2 + H_1 s + H_2} \delta \quad (3.1)$$

여기서  $\hat{\delta}$ 는 추정된 속도,  $\ddot{\delta}$ 는 가속도,  $\delta$ 는 캡이고,  $H_1$ 와  $H_2$ 는 관측자 이득이다.

그림 3.5는 CMAG 페루프 시스템으로서, 부상제어기의 제어 전압  $v_c$ 는 OSFC (observer-based state feedback controller)[16]에 의해 구현된다.

$$v_c = K_p(\delta - \delta_r) + K_i \int (\delta - \delta_r) dt + K_v \dot{\delta} - K_i i \quad (3.2)$$

여기서  $K_p$ 는 비례 이득,  $K_i$ 는 적분 이득,  $K_v$ 는 속도 이득,  $K_i$ 는 전류 이득이고,  $\delta_r$ 는 기준 캡이다.

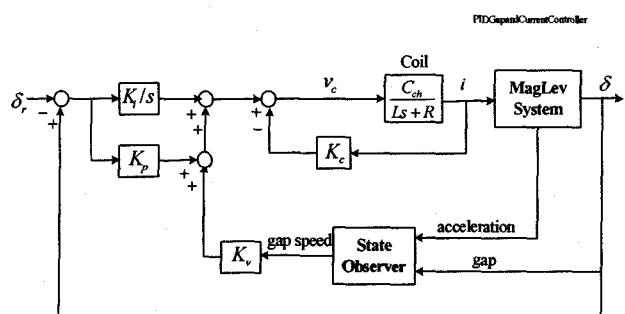


그림 3.5 CMAG 페루프 시스템

Fig. 3.5 CMAG closed-loop system

#### 3.5 초퍼 해석

초퍼는 부상제어기로부터 광케이블에 의해 제어 신호를 PWM 형태로 받아 전압을 증폭하여 전력을 마그네트에 인가하는 역할을 한다. 하이브리드 방식에서는 전압 뿐만 아니라 전류도 마이너스 값을 가질 수 있기 때문에 전상한 초퍼를 사용해야 한다. 따라서 H-브리지 형태의 스위칭 시스템으로 구현해야만 한다. 초퍼의 직류 입력 전압은 120V, 초퍼 게인은 24이다. 스위칭 소자는 600V, 100A급의 IGBT(insulated gate bipolar transistor)를 사용하였고, 스위칭 주파수는 12kHz이다.

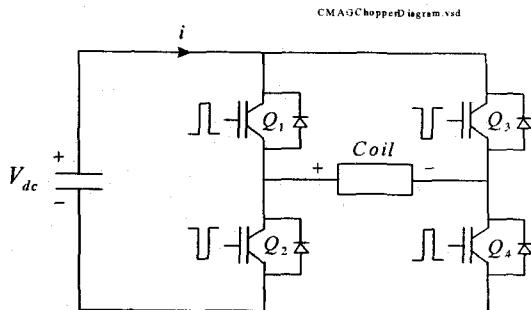


그림 3.6 4상한 초퍼 다이아그램

Fig. 3.6 4-Quadrant chopper diagram

그림 3.6은 자기부상 시스템의 전상한 초퍼의 다이아그램을 보여 주며, 정상상태에서 드티비가 50%가 되어, 전류는 0A가 된다. 마그네트의 초기 갭이 약 1.5mm이고, 정상상태 갭이 3.0mm이므로 초기 부상을 위해서는 마이너스 전류가 흘러야 한다. 즉 드티비는 50% 이하로 떨어지게 된다. 반대로 갭이 3.0mm보다 커지게 되면 전류를 플러스 값으로 하기 위해 드티비는 50% 보다 커지게 된다.

### 3.6 2차 서스펜션 해석

2차 서스펜션은 스프링 및 댐퍼로 이루어져 있으며, 이것의 역할은 자기부상열차가 추진시에 레일이 불규칙적으로 변할 때 고주파 성분이 객실로 전달되는 것을 방지한다. 철도 차량에서 스프링 및 댐퍼의 대역폭은 2Hz 내외로 정하는 것이 일반적이다. 여기서 스프링 상수  $k_l$ 는  $45,980 N/m$ 이고, 댐퍼 상수  $c_l$ 는  $1,833 Nsec/m$ 이다.

그 결과, 2차 서스펜션의 고유주파수  $w_{nl}$ 은

$$w_{nl} = \sqrt{\frac{k_l}{m_l}} = 15.9 rad/sec = 2.5 Hz \quad (3.3)$$

이고, 감쇠비  $\zeta_l$ 는

$$\zeta_l = \frac{c_l}{m_l} \frac{1}{2w_{nl}} = 0.32 \quad (3.4)$$

이다.

### 4. 시스템 제작

이 장에서는 제안된 하이브리드 자기부상의 제작 결과에 대해 언급한다. 그림 4.1은 제작된 CMAG 모듈 시스템을 보여 주고, 전체 모듈의 무게는 1000kg이다. 또한, 모듈의 한 쪽 변 마그네트의 움직임으로 인해 다른 쪽 변 마그네트가 기계적으로 영향을 받지 않도록 하기 위해 안티-레일을 설치하였다. 전체 시스템은 마그네트와 레일, 선형 모터, 센서, 부상제어기 및 초퍼로 구성된다. 추진 시스템은 이 논문의 범위를 벗어나므로 여기서는 다루지 않기로 한다. 부하가 균일하게 분포한다고 가정하면 들어올리는 힘은 각 코너에서 250kg이 필요하다. 사용된 메인 CPU 보드는 모토롤라 MVME2305 프로세서 모듈이다. 마그네트 코일은 120V

의 출력을 내는 전상한 초퍼에 의해 구동된다. 그럼 4.2는 모듈에 취부된 갭 센서와 가속도 센서를 보여 준다. 갭 센서는 KAMAM사의 모델 2300-8C 및 와전류형이고, 가속도 센서는 Dytran사의 모델 3192A 및 압전형이며, 각각 위치와 가속도 신호 측정에 사용된다. 갭 센서는 와전류를 이용하여 갭을 측정하기 때문에 마그네트와의 거리는 충분히 떨어져야 한다. 하지만 너무 멀리 떨어져 있으면 갭 센서가 마그네트와 레일 사이의 갭을 정확하게 측정할 수 없는 문제가 발생하게 된다. 따라서 마그네트에 최대 전류를 흘려 갭 신호에 간섭이 없는 거리값을 측정하여 갭 센서의 위치를 결정하는 바람직하다. 가속도 센서는 마그네트의 진동을 측정하며 측정범위는 5g이다. 마그네트가 레일에 부딪히면 가속도 센서는 매우 큰 가속도 신호를 출력하게 되어 제어기에 큰 외란을 발생하게 된다. 이 신호로 인하여 관측자의 속도 신호도 큰 오차를 포함하게 되어 결국 부상계가 불안정해질 수 있다. 따라서 제어기에서  $\pm 5m/sec^2$ 의 리미트를 걸어 가속도 신호를 피드백하였다.

부상 마그네트는 각 코너에 한 개씩 총 네 개가 있다. 제작 후, 실제로 실험할 때에는 마그네트의 코일과 영구자석의 극성을 철저히 검사하는 것이 매우 중요하다. 영구자석이 없는 상전도 자기부상 시스템의 경우, 항상 마그네트가 착지한 상태이지만 영구자석이 있으면 레일에 붙어 있을 수 있고, 영구자석의 힘이 매우 커서 항상 안전에 유념해야만 한다. 그리고 영구자석의 기계적인 연결 부분이 떨어질 가능성이 있으므로 연결 부위도 잘 봐야만 한다.

그림 4.3은 제작된 스프링과 댐퍼를 보여 준다. 스프링 및 댐퍼의 고유주파수는 2.5Hz 정도로 낮게 구현되었다. 이 모듈 시스템에는 스프링과 댐퍼가 각각 총 4개씩 있다.

그림 4.4는 자기부상 디지털 제어기 시스템을 보여 준다. 디지털 제어기는 VME 버스 기반이며, Motorola 사의 PowerPC 프로세서 보드, AD 보드, PWM 보드 및 아날로그 보드로 이루어져 있다. 그리고 그림 4.5~4.7은 각각 초퍼 드라이버 보드, 부상제어기 전원 장치, 베이스 및 모듈 프레임을 보여준다. 초퍼 보드는 한 모듈당 한 개를 써서 총 두 개를 사용하였다. 전원장치는 디지털 제어기용, 갭 센서용 및 가속도 센서용으로 나뉘어져 있다. 베이스 및 모듈 프레임은 진동이 일어나지 않도록 강성을 크게 하여 제작하였다.

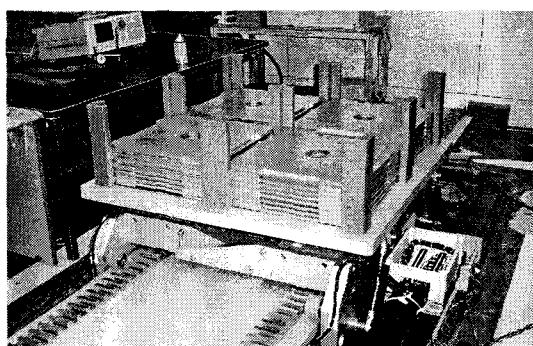


그림 4.1 CMAG 모듈 시스템

Fig. 4.1 CMAG module system

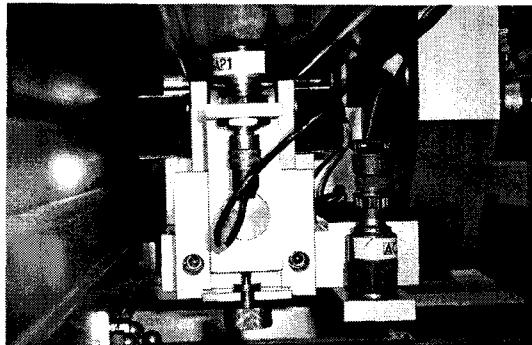


그림 4.2 갭 센서와 가속도 센서

Fig. 4.2 Gap sensor and accelerometer

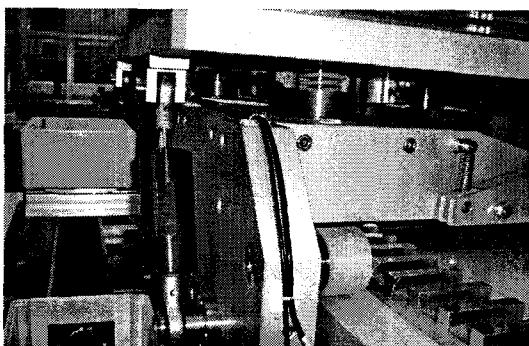


그림 4.3 스프링 및 댐퍼

Fig. 4.3 Spring and damper

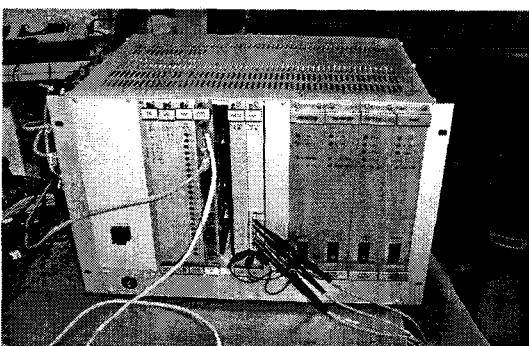


그림 4.4 VME 디지털 제어기

Fig. 4.4 VME digital controller

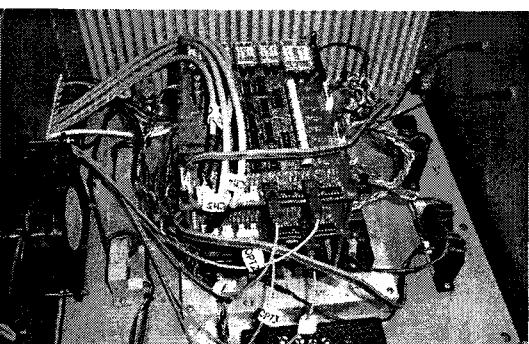


그림 4.5 초퍼 드라이버 보드

Fig. 4.5 Chopper driver board



그림 4.6 부상제어기 전원 장치

Fig. 4.6 Power supply

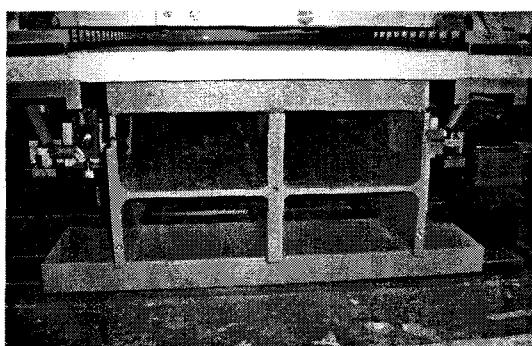


그림 4.7 베이스 및 모듈 프레임

Fig. 4.7 Base and module frame

표 4.1 시스템 파라미터

Table 4.1 System parameters

파라미터	값	단위
전체 무게 $M$	1000	kg
피칭 관성 모멘트 $I_{yy}$	11.4	kg m <sup>2</sup>
자극 단면적 $A_\delta$	$5400 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup>
코일 권선수 $N$	600	turns
전류 계수 $C_i$	691	N/A
갭 계수 $C_\delta$	$2.68 \times 10^6$	N/m
정상상태 갭 $\delta_0$	0.003	m
정상상태 전류 $i_0$	0.0	A
코일 저항 $R$	7	$\Omega$
인덕턴스 $L_0$	0.26	H
스프링 상수 $k_l$	45,980	N/m
댐퍼 상수 $c_l$	1833	Nsec/m

표 4.1은 제작된 하이브리드 자기부상 시스템의 파라미터를 나타낸다. 전체 무게  $M$ 은 1000kg인 데, 서론에서도 언급을 했지만 실제 반도체 및 LCD 공정에서 쓰이는 컨베이어 시스템은 약 6톤 가량 된다. 앞으로 이러한 응용 시스템에 맞게 하이브리드 자기부상 시스템의 설계가 필요하다. 피칭 관성 모멘트  $I_{yy}$ 는 마그네트 모듈의 한 쪽 변의 것으로 추진 방향에 대한 피칭 모멘트 값을 계산한 값이다.

## 5. 실험 결과

제작된 하이브리드 자기부상 시스템의 부상특성을 검증하기 위하여 부상실험을 한다. 자기부상열차는 운행 중에 부상, 추진 및 차지의 동작을 연속적으로 한다. 따라서 부상실험은 초기 부상, 스텝 응답, 외란 응답을 중심으로 한다. 초기 부상실험은 실차형 자기부상 시스템의 부상특성을 확인하기 위한 첫 단계가 된다. 실제 부상 및 추진이 가능한 모듈형 자기부상 시스템은 초기 부상 때, 안정도가 충분히 확보가 되어야만 항상 안정적으로 부상할 수 있다. 영구자석을 포함하는 자기부상 마그네트는 초기에는 레일에 붙어 있게 된다. 따라서 초기 상태에서 부상하려면 코일 전류가 마이너스로 되어야 자기회로의 전체 자속의 크기를 감소시켜야만 마그네트가 하강하게 된다. 그리고 초기 부상할 때, 기준 캡은 소프트하게 변해야만 캡의 급격한 변화를 방지할 수 있다. 따라서 여기서는 캡 1.5mm에서 3.0mm까지 약 6초가 걸리게 만들었다. 이 추종 시간은 실제 응용 시스템에 따라 변하게 할 수 있다. 스텝 응답에서는 기준 캡이 스텝 형태로 변할 때, 오버슈트와 상승 시간을 확인한다. 이 두 가지 사양을 통하여 시스템의 대역폭과 시정수를 알 수 있다. 자기부상 모듈은 추진할 때, 외부로부터 각종 외란이 들어오게 된다. 그 외란의 원인은 리니어 모터로부터의 수직력, 부하의 변화 등을 들 수 있다. 여기서는 부하를 한 쪽 코너에 가함으로써 힘 외란의 효과를 살펴보았다.

그림 5.1은 초기 부상할 때의 캡 응답이다. 초기 캡 1.5mm에서 천천히 부상한 후, 정상상태 캡인 3.0mm로 수렴한다. 초기 상태에서는 네 코너의 캡이 각각 약간씩 다르기 때문에 부상할 때 네 개의 캡 응답이 모두 동일하지 않다. 즉 자기부상 모듈이 롤링과 피칭 운동이 발생하게 된다. 이 때, 부상 시스템의 안정도가 중요하며, 안정도 여유가 작으면 부상하는 과정에서 각 코너 간의 상호 작용에 의해 안정도가 깨질 수 있다. 이런 현상은 마그네트가 하나만 있을 경우에는 나타날 수 없는 것으로 실차형 자기부상 시스템에서 중요한 실험이다. 안정도 여유가 크면 초기 상태에 상관없이 부상할 수 있으며, 추진할 때에도 신뢰성 높은 시스템이 된다.

그림 5.2는 스텝 응답으로서, 기준 캡이 3.0mm에서 3.5mm로 변한 후, 다시 3.0mm로 될 때, 기준 캡, 마그네트 캡, 제어 전압 및 전류 파형이다. 정상상태에서 마그네트 캡은 3.0mm이고, 전류는 0.4이다. 스텝 응답의 설계 사양은 오버슈트가 20% 이내, 상승 시간은 20msec 이내인 데, 결과는 기준 캡이 3.0mm에서 3.5mm로 변하면, 오버슈트는 약 15%이고, 상승 시간은 약 10msec이다. 따라서 성능 설계사양은 충분히 만족한다. 그리고 정상상태에서 소비전력이 약 0W가 되며, 캡 3.5mm에서는 1A가 흘러 마그네트 하나당 소비전력은 7W가 된다. 결국, 모듈 전체에 마그네트가 4개이므로 소비전력은 28W가 된다.

그림 5.3은 40kg의 부하를 코너 1에 얹었을 때 네 코너에서의 캡 응답이다. 코너 1의 캡이 최대 0.2mm 변하며, 대각선 쪽에 있는 코너 3의 캡은 0.1mm 변하였다. 이 실험에서 제시된 설계 사양은 캡 변화의 최대값이 정상상태 캡의 10%인 0.3mm 이내이므로 이 설계 사양을 만족한다. 이 캡

피크값을 더 줄이는 방법 중 하나는 초퍼 입력전압을 현재의 120V에서 300V 정도로 증압시키는 것이다. 그러면 1차 부상 시스템의 강성이 증가하지만 안정도 여유는 감소하게 된다. 따라서 이것은 강성과 안정도 여유간의 균형 문제가 되므로 적용 시스템에 따라 선택해야만 한다.

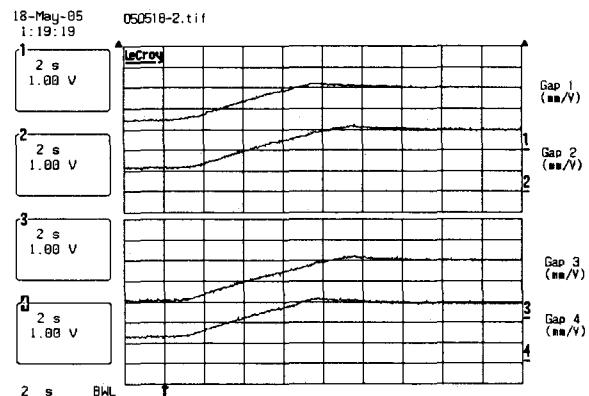


그림 5.1 초기 부상할 때의 캡 응답  
Fig. 5.1 Gap responses at start-up

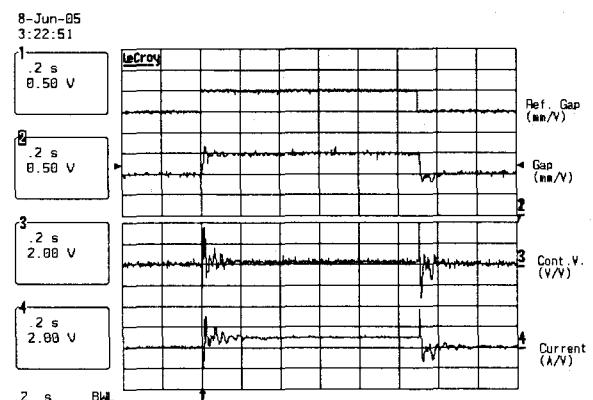


그림 5.2 기준 캡이 3→3.5→3mm 일 때 스텝응답  
Fig. 5.2 Step responses

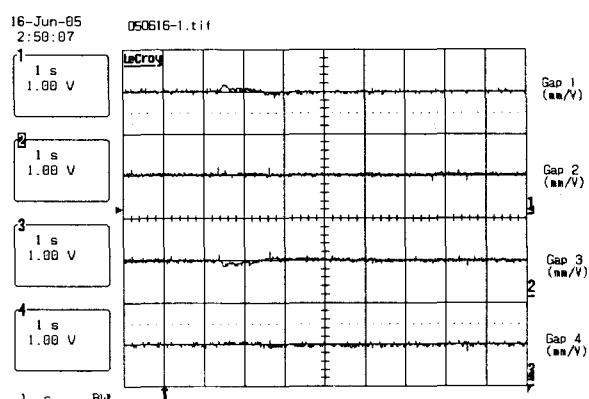


그림 5.3 40kg 부하를 코너 1에 가할 때의 캡 응답  
Fig. 5.3 Gap responses for load of 40kg

## 5. 결 론

이 논문에서는 기존의 접촉식 베어링의 마찰, 마모로 인한 분진 발생 문제와 기존의 실차형 자기부상 시스템의 손실 및 발열 문제를 동시에 해결하기 위하여 저손실 자기부상 시스템을 제안하였다. 제안된 하이브리드 자기부상 시스템은 모듈 형태로 제작되어 부상 및 추진이 가능하며, 영구자석을 사용하여 정상상태에서 소비전력이 거의 0이 된다.

연구 결과로서, 먼저 이 시스템에 대한 설계와 해석 및 제작 결과를 보였다. 마그네트 설계를 위하여 FEM 툴을 사용하였고, 모듈 전동모드 해석을 위하여 ANSYS를 이용하였다. 부상실험은 초기 부상, 스텝 응답 및 외란 응답 실험을 주로 하였다. 초기 부상실험에서는 모듈의 네 코너가 모두 안정적으로 부상을 하였고, 정상상태에서 마그네트 전류는 약 0.4A가 되었다. 스텝 응답에서는 캡의 오버슈트가 약 15%, 상승 시간이 약 10msec이고, 외란 응답에서는 캡 피크값이 0.2mm가 되어 각각의 실험에서 설계 사양을 모두 만족하여 실차형 저손실 자기부상 시스템 개발의 가능성을 확인하였다.

앞으로 할 일은 리니어 모터를 이용한 추진 실험을 하여 완전한 자기부상 모듈을 개발하는 것이다. 그리고 이 연구에서는 캡 센서와 가속도 센서의 전체 가격이 1000만원 정도로 고가이어서 실용화에 걸림돌이 된다. 따라서 저가형 센서를 개발할 예정이다. 또한, 여기서는 자기부상 모듈과 레일의 정특성만 해석하였으나 정확한 설계 및 해석을 위해서 차량, 2차 서스펜션, 레일, 마그네트 및 부상제어기를 포함하는 다이나믹 시뮬레이션을 해야만 하며, 다이나믹 시뮬레이션 패키지의 일종인 ADAMS/Control과 Matlab/Simulink를 이용하여 구축할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [2] G. Schweitzer, *Active magnetic bearing*, ETH Zurich, 1994.
- [3] D. de Roover, *Motion control of a wafer stage*, Delft University Press, 1997.
- [4] 김윤현 외 2인, “최소차원 확장형 상태관측기에 의한 제어형 영구자석 자기부상 시스템의 제로전력 부상제어”, 전기학회 논문지, 51B권 9호, pp.515-521, 2002. 9.
- [5] J. Liu, T. Koseki, “4 poles 3 degrees of freedom magnetic levitation control and its coordination with two-dimensional linear motor”, Proc. of Maglev Conference 2002, pp.162-170, 2002.
- [6] 김종문 외 3인, “CPM형 자기부상 반송시스템의 설계”, 전기학회 추계대회 논문집, pp.155-157, 2003.
- [7] 김종문 외 2인, “1톤급 영구자석형 자기부상 시스템 제어”, 전기학회 하계대회 논문집, pp.998-1000, 2004.
- [8] 김종문 외 1인, “1톤급 영구자석형 자기부상 시스템 설계”, 전기학회 하계대회 논문집, pp.995-997, 2004.
- [9] 김종문, “CPM형 자기부상의 진동제어”, 전기학회 하계대회 논문집, pp.1001-1003, 2004.
- [10] 김종문 외 1인, “손실없는 하이브리드 자기부상열차 설계”,

전기학회 하계대회 논문집, pp.1553-1555, 2005.

- [11] *Maxwell EM user's guide*, Ansoft, 2000.
- [12] *ANSYS user's guide*, ANSYS Inc., 1999.
- [13] *VxWorks user's guide*, The WindRiver, 1996.
- [14] *PowerPC MVME 2305 user's guide*, Motorola Inc., 2000.
- [15] *Tornado 2 user's guide*, The WindRiver, 2000.
- [16] J. D'Azzo, *Linear control system analysis and design*, McGraw-Hill Company.

## 저 자 소 개



### 김 종 문 (金鍾文)

1965년 6월 6일생. 1988년 인하대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업. 2005년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공박). 현재 한국전기연구원 선임연구원.  
Tel : (055)280-1443,  
Fax : (055)280-1476  
E-mail : jmkim@keri.re.kr



### 강 도 현 (姜道鉉)

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 독일 Braunschweig대학 졸업(박사), 1986년 ~ 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 단장  
Tel : 055-280-1480  
Fax : 055-280-1547  
E-mail : dhkang@keri.re.kr