

저손실 자기부상 시스템 개발

Development of Low Loss Magnetic Levitation System

金 鍾 文[†] · 姜 道 鉉^{*}

(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

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

R_δ, R_r, R_c, R_p : 공극, 레일, 코어, 영구자석의 자기저항(Ω)

1. 서 론

δ, δ_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)

ϕ_δ : 공극에서의 자속(Wb)

m : 마그네트 무게(kg)

g : 중력가속도(m/sec^2)

A_δ : 마그네트 자극의 단면적(m^2)

l_c, l_r : 마그네트 코어 및 레일의 자속선 등가길이(m)

μ_0 : 진공에서의 투자율(H/m)

μ_r, μ_c : 레일 및 마그네트 코어의 상대 투자율

θ_p, θ_c : 영구자석 및 코일의 기자력(AT)

h_p : 영구자석의 높이(m)

N : 코일의 권선수(Turns)

C_{ch} : 초퍼 게인

산업 현장에서 쓰이는 대부분 기존의 접촉식 베어링은 기계적으로 이송체를 지지하기 때문에 마찰, 마모에 따른 소음, 진동 및 분진이 발생하고, 운할 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. 자기부상 열차의 경우, 독일은 작년에, 일본은 올해 상업 운전이 시작되었고, 자기 베어링은 플라이 휠, 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 産業電氣研究團 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 사용하며 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 혼용하며, 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 갭은 3mm이다. 따라서 제작 오차가 없다면, 갭 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 가를 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. 그림 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 갭에서 흡인력이 발생되어 마그네트는 수직 방향으로 움직이게 된다. 이 하이브리드 방식은 개루프 시스템이 불안정하므로 일정한 갭을 유지하기 위해서 안정화 제어가 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 1.17 T이다. Θ_p 는 $B_r h_p / \mu_0 \mu_p$ 과 같다.

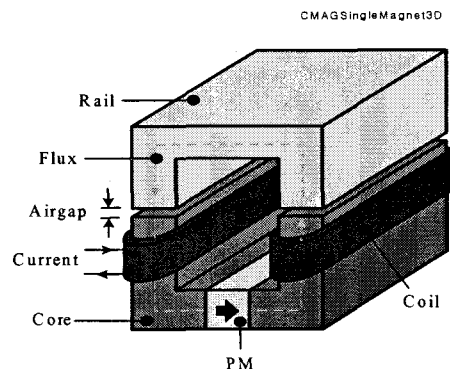


그림 2.1 단일 CMAG 시스템
Fig. 2.1 Single CMAG system

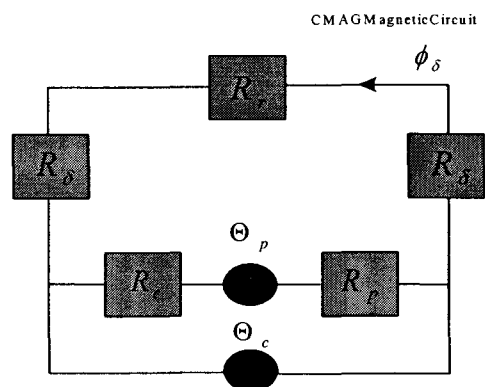


그림 2.2 자기 등가회로
Fig. 2.2 Magnetic equivalent circuit

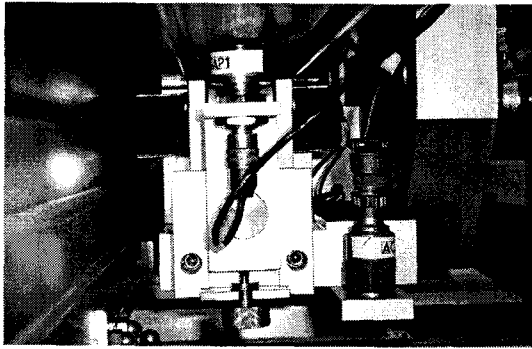


그림 4.2 갭 센서와 가속도 센서
Fig. 4.2 Gap sensor and accelerometer

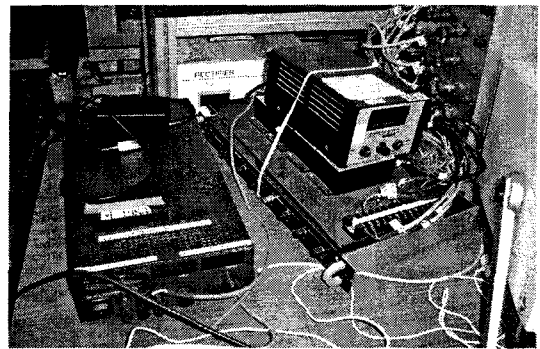


그림 4.6 부상제어기 전원 장치
Fig. 4.6 Power supply

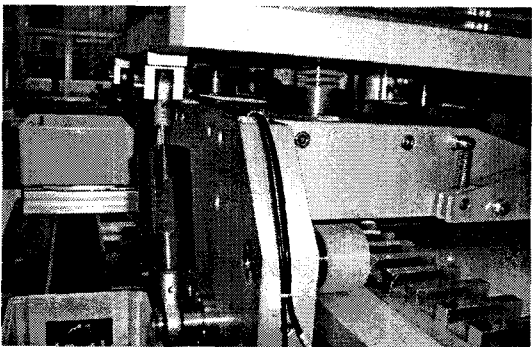


그림 4.3 스프링 및 댐퍼
Fig. 4.3 Spring and damper

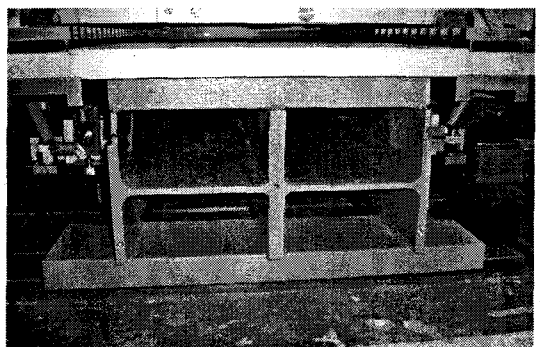


그림 4.7 베이스 및 모듈 프레임
Fig. 4.7 Base and module frame

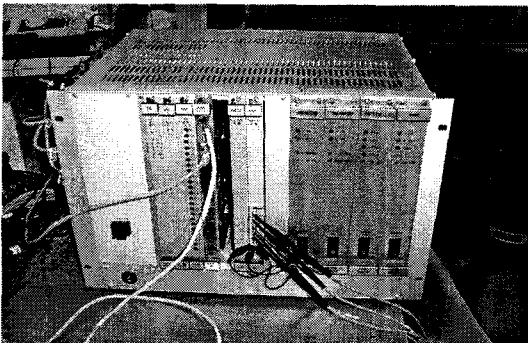


그림 4.4 VME 디지털 제어기
Fig. 4.4 VME digital controller

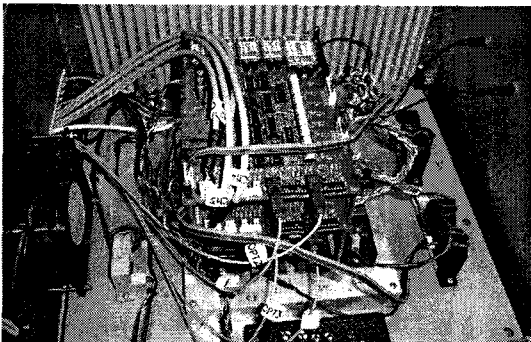


그림 4.5 초퍼 드라이버 보드
Fig. 4.5 Chopper driver board

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 ²
자극 단면적 A_s	5400×10^{-6}	m ²
코일 권선수 N	600	turns
전류 계수 C_i	691	N/A
갭 계수 C_g	2.68×10^6	N/m
정상상태 갭 δ_0	0.003	m
정상상태 전류 i_0	0.0	A
코일 저항 R	7	Ω
인덕턴스 L_0	0.26	H
스프링 상수 k_i	45,980	N/m
댐퍼 상수 c_i	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 착지의 동작을 연속적으로 한다. 따라서 부상 실험은 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 갭은 소프트하게 변해야만 갭의 급격한 변화를 방지할 수 있다. 따라서 여기서는 갭 1.5mm에서 3.0mm까지 약 6초가 걸리게 만들었다. 이 추종 시간은 실제 응용 시스템에 따라 변하게 할 수 있다. 스텝 응답에서는 기준 갭이 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 갭 응답이다. 초기 갭 1.5mm에서 천천히 부상한 후, 정상상태 갭인 3.0mm로 수렴한다. 초기 상태에서는 네 코너의 갭이 각각 약간씩 다르기 때문에 부상할 때 네 개의 갭 응답이 모두 동일하지 않다. 즉 자기부상 모듈이 롤링과 피칭 운동이 발생하게 된다. 이때, 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 갭이 3.0mm에서 3.5mm로 변환 후, 다시 3.0mm로 될 때, 기준 갭, 마그네트 갭, 제어 전압 및 전류 파형이다. 정상상태에서 마그네트 갭은 3.0mm이고, 전류는 0A이다. 스텝 응답의 설계 사양은 오버슈트가 20% 이내, 상승 시간은 20msec 이내인 데, 결과는 기준 갭이 3.0mm에서 3.5mm로 변화면, 오버슈트는 약 15%이고, 상승 시간은 약 10msec이다. 따라서 성능 설계사양은 충분히 만족한다. 그리고 정상상태에서 소비전력이 약 0W가 되며, 갭 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 갭 응답이다. 코너 1의 갭이 최대 0.2mm 변화며, 대각선 쪽에 있는 코너 3의 갭은 0.1mm 변화였다. 이 실험에서 제시된 설계 사양은 갭 변화의 최대값이 정상상태 갭의 10%인 0.3mm 이내이므로 이 설계 사양을 만족한다. 이 갭

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

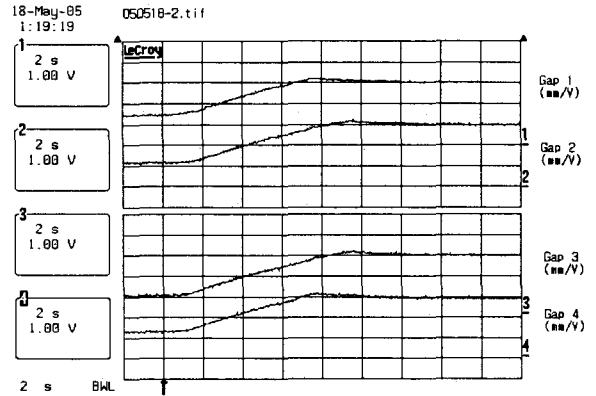


그림 5.1 초기 부상할 때의 갭 응답

Fig. 5.1 Gap responses at start-up

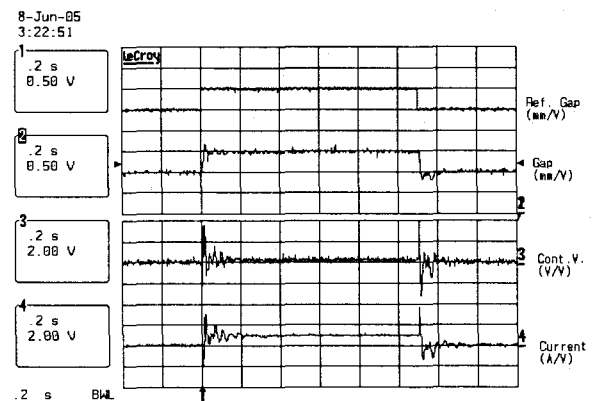


그림 5.2 기준 갭이 3→3.5→3mm일 때 스텝응답

Fig. 5.2 Step responses

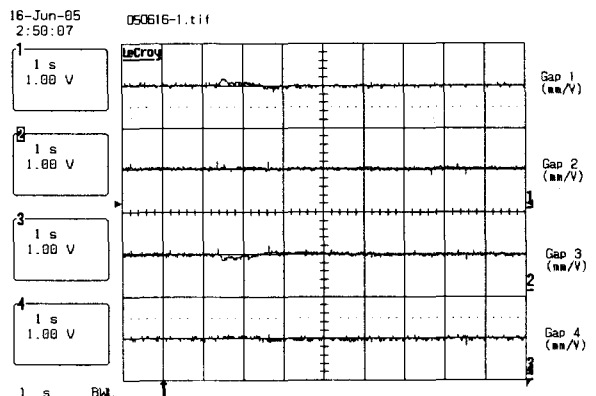


그림 5.3 40kg 부하를 코너 1에 가할 때의 갭 응답

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 진동모드 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 0A가 되었다. 스텝 응답에서는 갭의 오버슈트가 약 15%, 상승 시간이 약 10msec이고, 외란 응답에서는 갭 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 갭 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



김종문 (金鍾文)

1965년 6월 6일생. 1988년 인하대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업. 2005년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구원 선임연구원.

Tel : (055)280-1443,

Fax : (055)280-1476

E-mail : jmkim@keri.re.kr



강도현 (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