

배터리로 구동되는 자기부상 시스템의 부상제어 특성 실험

남윤호*, 박승찬
 동양대학교 대학원 시스템제어공학과

Experiment for Levitation Control of a Magnetic Levitation System Supplied with a Battery

Yun-Ho Nam, Seung-Chan Park
 Dept. of System Control Engineering, Graduate School of Dong Yang University.

Abstract - In this paper, hybrid electromagnets using NdFeB permanent magnet are designed by 3-dimensional finite element analysis. Four hybrid magnets levitate the carrier of which total weight including control circuits and battery is 14[kg]. The nominal air gap length of the hybrid magnet is 3[mm]. The control circuit consists of DSP, 4-quadrant chopper, and gap sensor as feedback sensors.

As a result, some experimental results for the magnetic levitation control by PI feedback control theory are shown.

1. 서 론

반도체 제조 공정 중 크린룸에서의 웨이퍼 반송장치는 청정도를 높이기 위해 배터리를 탑재한 비접촉 자기부상 운반 시스템을 사용하며 지전력 반송을 구현하기 위해 하이브리드 전자석을 사용한다.[1]~[7]

본 논문에서 사용한 배터리의 정격용량은 24V 5Ah로써 하이브리드 전자석뿐만 아니라 공극센서, DSP, 레벨-슈프트 회로, 4상한 초퍼로 구성된 부상제어 회로에 전원을 공급한다.[8]

자기부상 제어를 위하여 4개의 공극센서로부터 공극의 변화를 감출하여 기준신호와 비교하고 PI 제어법에 의하여 4상한 초퍼를 제어한다. 공극센서 신호처리 및 디지털 PI 제어는 DSP인 TMS320LF2406A를 이용하여 구현하였다.[9] 부상시스템의 전체하중은 14[kg]이며, 4개의 전자석이 캐리어를 공극길이 3[mm]에서 지지하게 된다.

본 논문에서는 직각분기모가 있는 배터리구동 자기부상 시스템 설계에 관하여 설명하고, 디지털 PI 제어를 이용하여 수행한 시스템의 기본적인 자기부상 제어 특성 실험결과를 설명한다.

2. 본 론

2.1 자기 부상 시스템 설계

그림 1은 강제된 레일과 하이브리드 전자석으로 구성된 자기부상 시스템을 나타내고 있으며 e : 전자석 입력 전압, i : 코일 여자전류, l_p : 영구자석의 길이, z : 공극 길이를 나타낸다.

제작된 자기부상 반송 시스템은 직각분기모를 가지며 종방향 레일과 횡방향 레일로 나누어져 있다.

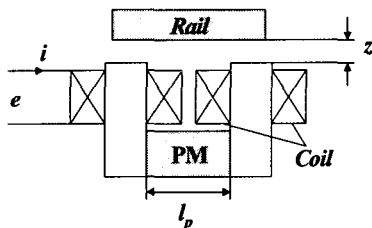


그림 1. 하이브리드 자기부상 시스템
 Fig 1. Hybrid magnet

표 1은 설계된 Hybrid 전자석의 사양을 나타낸다. 공극길이와 전류의 변화에 따른 hybrid 전자석의 부상력을 3차원 유한요소법을 이용하여 계산하였으며 이를 그림 2에 나타내었다. 캐리어의 full load 중량은 14[kg]이므로 공극 3[mm]에서 제어전류가 거의 영인 상태에서 부상제어가 가능함을 예상할 수 있으며, 부상공극을 4[mm]로 유지하기 위해서는 약 0.5[A]의 전류가 각 전자석에 입력되어야 한다.

표 1. Hybrid 전자석 및 시스템 사양
 Table 1. Specifications of the hybrid magnet

영구자석	30mm×21mm×21mm 재료 : NdFeB, 잔류자속밀도 Br = 1.03T 보자력 Hc = 875[kA/m]
공칭공극	3 [mm]
Full load	14 [kg]
턴수	950
Pole 단면적	20mm×21mm
Pole 높이	45 [mm]
Battery	Lithum polymer 전지, 24V 5Ah

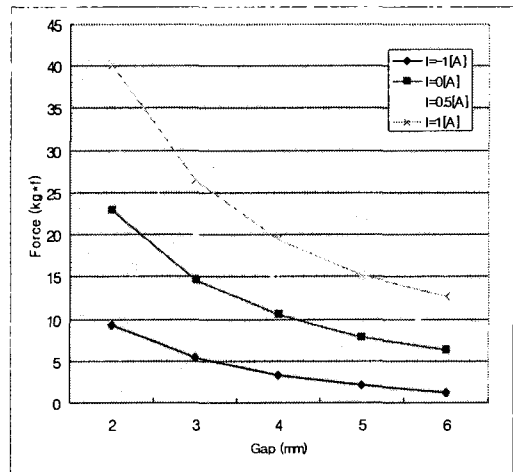


그림 2. 공극 및 전류변화에 따른 부상력
 Fig. 2 Levitation forces according to the air gap length and current variation

그림 3은 hybrid 전자석이 종방향 레일과 횡방향 레일아래에서 공극 3[mm]일 경우의 전류변화에 따른 부상력을 나타낸 것이다. 횡방향 레일 아래에서는 설계된 부상시스템의 구조적 원인으로 인하여 다소 부상력이 감소하고 있으므로 부상제어시에는 이를 고려하여야 한다.

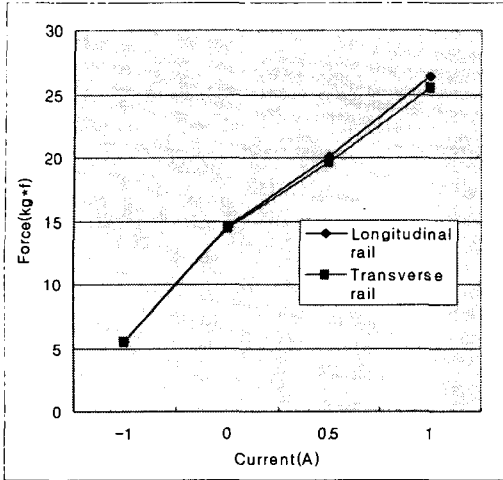
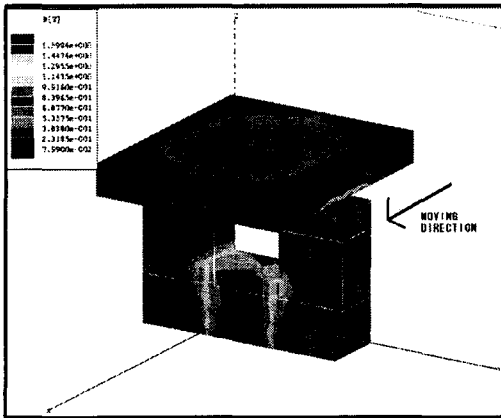
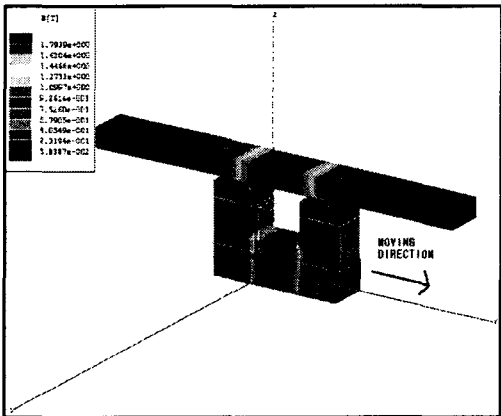


그림 3. 종방향 및 횡방향 레일에서의 부상력 비교
Fig. 3 Levitation force comparison at longitudinal and transverse rails



(a)



(b)

그림 4. hybrid 전자석 표면 자속밀도 분포 (I=0(A))
(a) 종방향 레일, (b) 횡방향 레일
Fig. 4 Flux density distributions of hybrid magnet

그림 4는 종방향 및 횡방향 레일에서의 hybrid 전자석의 자속 밀도 분포를 보여준다. 그림 4(a)에서 주행 레일의 폭은 전자석의 폭보다 2[mm] 작게 설계되어 측면방향으로의 편위 발생시에 복원력이 발생하게 된다.

2.2 PI 제어 및 이득 설정 방법

그림 5는 PI 제어 블록도를 나타내고 있으며, 오차신호 및 PI 제어기 출력은 다음과 같다.

$$e(t) = r - z(t) \quad (1)$$

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt \quad (2)$$

e : 오차, r : 기준공극, z : 센서출력, u : 새로운 지령값,
 D : 듀티비, y : 출력 공극, K_p : 비례이득, K_i : 적분이득,
 E : 전자석 입력 전압

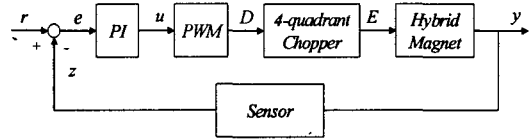


그림 5. PI 제어 블록도
Fig. 5 PI Control diagram

PI 이득을 설정하기 위하여 임계이득과 임계주기를 이용한 주파수응답법을 이용하였다. 비례제어기만으로 궤환제어루프를 형성하고 감쇠하지 않는 일정 크기 진동이 일어날 때까지 비례이득을 점차 증가시킨다. 이때의 이득을 임계이득을 K_u 라 하고 이때의 주기를 임계주기 P_u 라 한다. 임계이득 K_u 와 임계주기 P_u 를 이용하여 표 2와 같이 PI 제어기의 파라미터들을 선택한다. 본 실험에서 $K_u = 2$, $P_u = 0.00385$ 으로 결정되었다. T_i 는 적분 시간상수로 식 (3)과 같다.

표 2. PI 제어기 파라미터 동조 방법

Table. 2 Frequency response method using ultimate gain and ultimate period

	K_p	T_i
P	$0.5 K_u$	
PI	$0.45 K_u$	$0.8 P_u$

$$T_i = K_p / K_i \quad (3)$$

2.3 Hybrid 전자석 시스템 부상 특성 실험

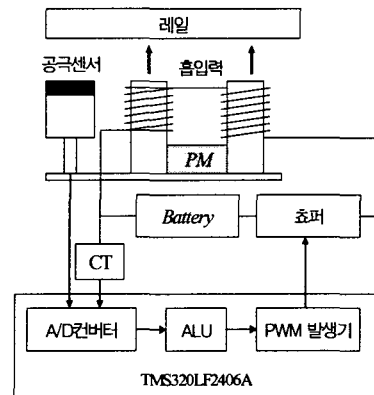


그림 6. 실험장치 개요도
Fig. 6 Overview of experiment equipment

그림 7과 8은 hybrid 전자석 시스템을 나타내고 있다. 캐리어의 상판에 hybrid 전자석과 공극센서가 각각 4대 배치되어 있으며, 상판의 하부에서는 제어회로 및 battery가 탑재되어 있다.

그림 9은 초기공극 6.18[mm]에서 기준공극 3[mm]로 공극이 수렴하는 과정을 나타내고 있다. 각각의 PI 이득은 (a) $K_p = 1.5$, $K_i = 3$ 이며, (b) $K_p = 0.9$, $K_i = 20.89$ 이다. 전자석의 여자전류는 그림 2의 공극 및 전류변화에 따른 부상력에서 보듯이 영에 가까운 값이 나타남을 알 수 있다. 샘플링 주파수는 5kHz이다.

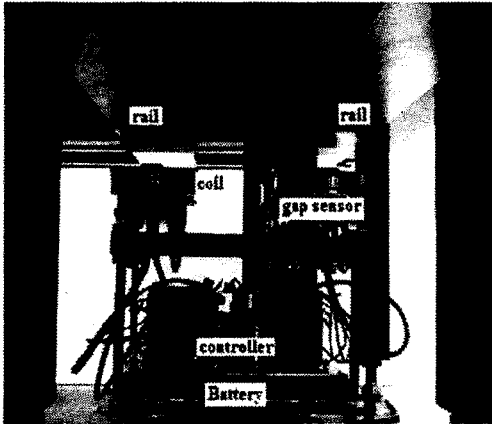


그림 7. Hybrid 전자석 시스템
Fig. 7 Hybrid magnet system

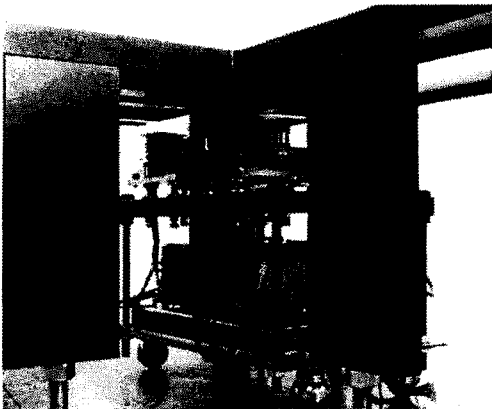
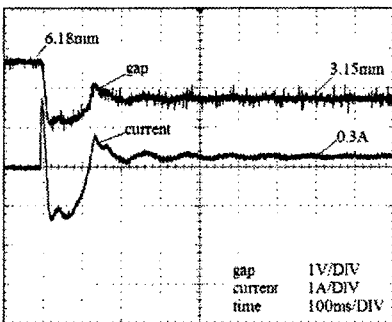
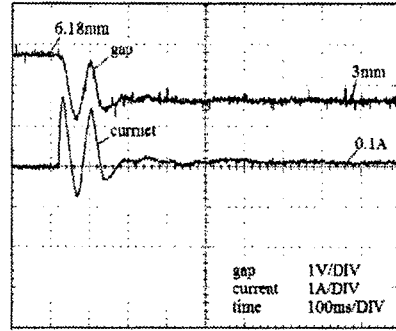


그림 8. 직각분기로에서 본 hybrid 전자석 시스템
Fig. 8 Pilot facility developed for magnetic levitation



(a)



(b)

그림 9. 공극 및 전류파형
(a) $K_p=1.5$, $K_i=3$, (b) $K_p=0.9$, $K_i=20.89$
Fig. 9 air gap and current

3. 결 론

본 논문에서는 배터리로 구동되는 자기부상시스템의 hybrid 전자석에 대한 공극 및 전류 변화에 따른 부상력을 3차원 유한요소법을 통하여 고찰하였다. Hybrid전자석 1대에 대한 부상제어 특성 실험에서 초기공극에서 기준공극으로 수렴하는 것을 알 수 있었으며 이 때의 전자석 여자전류는 영에 가까운 값이 나타났다. 향후, 4개의 hybrid 전자석에 대한 동시 부상 제어에 대한 기초 실험을 수행할 예정이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호 : R-2003-B-092) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1]S.Tkagi, S.Kanda, T.Azukizawa, T.Yokoyama. "Dust Free Wafer Transportation System for Semiconductor Plant - An Application of New Maglev Technology". Int. Conference on Maglev and Linear Drives, May, 1987.
- [2]T.Minakata, T.Iwamoto, T.Shimada, Y.Hosoda, M.Kawashima. "Magnetically Levitated Transportation System for Automated Production Lines in Factories". Int. Conference on Maglev & Linear Drives, July, 1989
- [3]Mimpei Morishita, Teruo Azukizawa, Shuji Kanda, Noburu Tamura, Toyohiko Yokoyama. "Zero Power Control of Electromagnetic Levitation System". IEE Japan, Vol.108, No.3, 1988
- [4]Mimpei Morishita, Teruo Azukizawa, Shuji Kanda, Noburu Tamura, Toyohiko Yokoyama. "A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System", IEEE Trans.Vehic, Vol.38, No.4, 1989
- [5]김종문, 강도현, 박민국, 최영규. "자기부상 시스템의 부상 제어기 설계". 전기학회논문지 제52권 제6호 pp.342-350, 2003
- [6]김광민, 김윤현, 전연도, 이주, 김학연. "부하관측기에 의한 공극 보상기를 포함한 제로파워 부상제어". 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp.669-671, 2000
- [7]Hrotaka Tomono, Hisakatsu Kiwaki. "Controllability Improvement of Zero-Power Magnetically Levitated System by Dither". IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol.1, pp.588-593, 1998
- [8]남윤호, 박승찬. "배터리로 구동되는 자기부상시스템의 부상제어회로 설계". 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.27-29, 2004
- [9]TMS320LF240xA Reference Guide, Texas Instrument.