

자기부상용 하이브리드 전자석의 초기 공극 변화에 따른 특성 고찰

오향재\*, 김경민\*, 박승찬\*\*

\*동양대학교 대학원 시스템제어공학과 \*\*동양대학교 철도운전제어학과

Magnetic levitation characteristics of hybrid magnets according to the initial air gap length

Hyang-Jae Oh, Kyung-Min Kim, Seung-Chan Park

Dept. of System Control Engineering, Graduate School of Dongyang University.

**Abstract** - In this paper, magnetic levitation characteristics of hybrid magnets are experimentally shown under the newly proposed airgap condition. The digital PID controller is utilized to control the airgap of the magnetic levitation system.

1. 서 론

반도체 제조공정 반송시스템은 기계적 접촉으로 인한 클린룸의 청정도를 떨어뜨리는 문제를 해결하고자 자기부상 반송시스템이 사용되고 있다. 또한 저 전력 반송 시스템을 구현하기 위해 전자석과 영구자석을 결합한 하이브리드 전자석이 사용되고 있다[1-4]. 자기부상 시스템의 기계적 구조는 초기 부상할 때 지면의 일정 위치 조건 하에서 레일로 캐리어가 부상하는 방식으로 되어 있는데, 이때 부상 전 지면의 위치 조건에 따라 초기 공극이 변화되어 부상할 때 불안정한 특성이 나타날 수 있다.

그러나, 하이브리드 전자석의 특성상 전류가 0[A]일 때도 영구자석의 흡인력만으로 레일에 캐리어가 부착된 상태를 유지할 수 있으므로 레일에 부착된 상태에서 부상하는 방식을 채택하면, 별도의 지지대 없이 초기공극을 일정하게 유지할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 자기부상용 하이브리드 전자석을 지면에서 부상시키는 방식과 레일에 부착된 상태에서 부상시키는 방식에 대한 부상특성을 살펴본다.

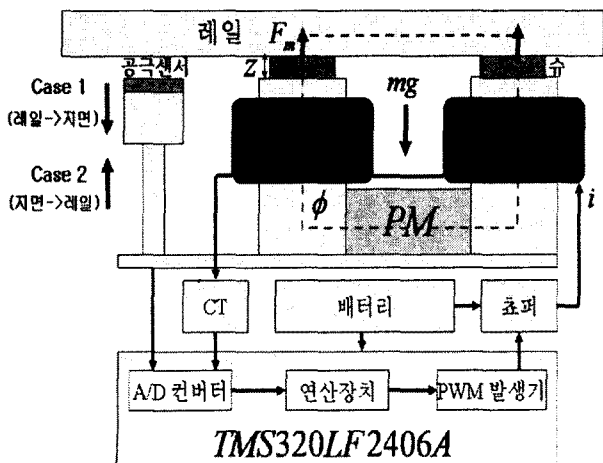
2. 시스템 부상 특성

2.1 초기 공극 선정

그림 1과 표1은 각각 하이브리드 자기부상 시스템의 구성도와 초기 공극 조건을 나타낸 것으로 무게 14[kg]의 캐리어가 공극 3[mm]일 때 코일 전류가 0[A]로 흐르게 제작되었기 때문에 3[mm]를 기준공극으로 선정하였다.

Case 1의 부상조건은 초기공극 2[mm]의 캐리어가 레일에서 지면으로 하강하여 기준공극 3[mm]로 부상되는 것이다. 여기서 캐리어 무게 14[kg]에 70% 더한 24[kg\*f]에 해당하는 공극인 2[mm]로 초기공극을 선정하였고 2[mm]의 공극을 만들기 위해 두께 2[mm]인 비금속 물질 슈를 전자석 위에 붙였다.

Case 2의 부상조건은 Case 1과 부상되는 공극을 같게 하기위해 초기공극을 4[mm]로 선정하였으며 캐리어가 지면에서 레일로 부상하여 기준공극 3[mm]로 부상되는 것이다. Case 1과 Case 2는 기준공극 3[mm]로 1[mm]씩 부상하게 되며  $i$ : 코일 여자전류,  $\phi$ : 자속,  $z$ : 공극,  $m$ : 전체 질량,  $g$ : 중력가속도,  $F_m$ : 흡인력을 나타낸다.



<그림 1> 하이브리드 전자석 시스템과 부상조건

<표 1> 초기 공극 조건

부상조건	초기위치	초기공극	기준공극
Case 1 레일 → 지면	레일	2[mm]	3[mm]
Case 2 지면 → 레일	지면	4[mm]	3[mm]

2.2 초기 공극변화에 따른 특성

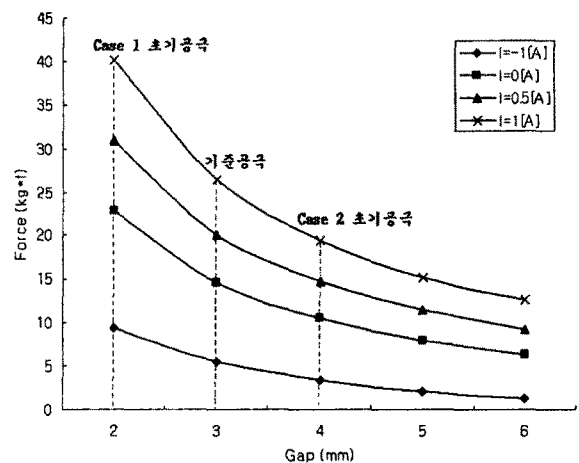
하이브리드 전자석과 강자성체 레일 사이의 흡인력 관계를 알아보기 위해 표 2에 주어진 사양을 3차원 유한요소법을 이용하여 공극 및 전류의 변화에 따른 흡인력을 그림 2에 나타내었다[5].

본 논문에서는 무게 14[kg]의 캐리어가 기준공극 3[mm]로 부상할 때 전류가 0[A]인 제로파워상태로 부상제어가 가능함을 그림 2에서 보여주고 있다. 하이브리드 전자석의 초기공극 변화에 대한 부상특성을 보면 Case 1인 경우, 초기공극 2[mm]일 때 캐리어를 기준공극 3[mm]로 하강하여 부상하기 위해서는 영구자석에서 발생하는 흡인력을 줄이고자 코일에 그에 해당하는 역방향 전류를 흘려주어 부상하게 되고 Case 2인 경우, 초기공극 4[mm]일 때 기준공극 3[mm]로 부상시키기 위해 코일에 양의 전류를 흘려 부상력을 더해 줌으로써 기준 공극 3[mm]로 부상을 하게 된다.

초기 공극변화에 따른 특성을 보면 Case 1인 경우 부상 시 코일에 음의 전류를 흘려 영구자석의 흡인력을 감소시켜 부상하고 Case 2의 경우 코일에 양의 전류를 흘려 흡인력을 증가시켜 부상한다.

<표 2> Hybrid 전자석 및 시스템 사양

영구자석	30[mm]×21[mm]×21[mm] 재료: NdFeB 잔류자속밀도 $B_r = 1.03 T$ 보자력 $H_c = 875 [kA/m]$
공칭 공극	3[mm]
캐리어 무게	14[kg]
턴 수	950
폴 단면적	20[mm]×21[mm]
폴 높이	45[mm]
배터리	리튬 폴리머 전지, 24V, 4Ah



<그림 2> 공극 및 전류 변화에 따른 부상력

### 3. PID 제어 시 초기 응답 특성실험

본 논문의 하이브리드 전자석시스템은 그림3과 같이 상판과 하판으로 이루어졌으며 상판에는 각 모서리에 1개씩, 총 4개의 하이브리드 전자석이 레일방향인 위로 향해있고 전자석의 좌, 우측으로 공극센서가 장착되어 있다. 하판은 DSP2406, A/D 레벨시프트회로, 4상한 초퍼, 배터리, 전류센서로 구성되어 있다.

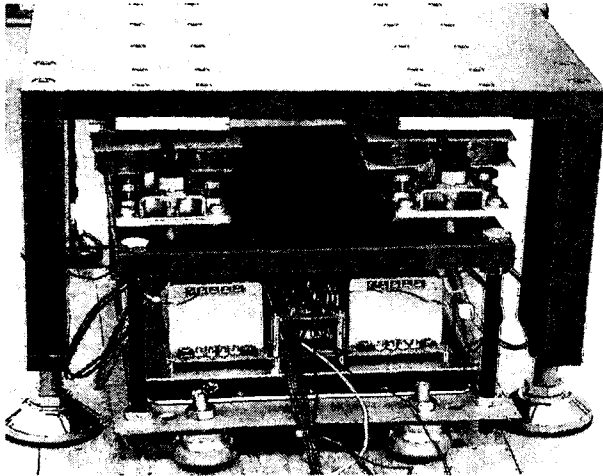
실험은 아직 4개의 전자석으로 부상제어가 안되어 4개의 전자석 중 2개는 고정시켜 놓고 나머지 2개의 전자석만 사용하여 부상실험을 수행하였다. 기준공극 선정은 2개의 전자석만 사용할 때 기준공극을 정확히 알 수 없어 전자석 4개로 부상할 때의 기준공극인 3[mm]와 동일하게 선정하였다.

그리고 2개의 전자석을 Case 1과 Case 2의 방법으로 초기공극의 변화에 따른 부상특성을 실험으로 고찰했다. 실험결과로 공극과 전류를 측정하였으며 부상제어는 샘플링 주파수 7[kHz]의 디지털 PID제어기로 구현하였다. 차분 방정식은 식 (1)과 같이 표현되며  $u(kT)$ : 제어입력,  $e(kT)$ : 오차신호,  $T$ : 샘플링 주기,  $k_p$ : 비례게인,  $k_i$ : 적분게인,  $k_d$ : 미분게인이다.

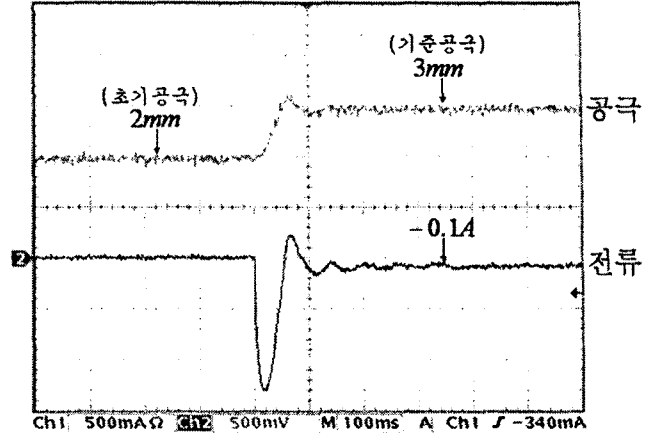
$$u(kT) = u((k-1)T) + k_p [e(kT) - e((k-1)T)] + \frac{k_i T}{2} [e(kT) + e((k-1)T)] + \frac{k_d}{T} [e(kT) - 2e((k-1)T) + e((k-2)T)] \quad (1)$$

그림 4는 Case 1인 경우의 스텝응답으로 공극과 전류를 측정된 것이며 초기공극 2[mm]에서 기준공극 3[mm]로 하강하여 부상할 때 약간의 오버슈트가 생기고 0.1초에 기준공극 3[mm]로 제어되며 전류는 -1.3[A] 흘렀다가 정상상태에서 -0.1[A]로 줄어들게 된다.

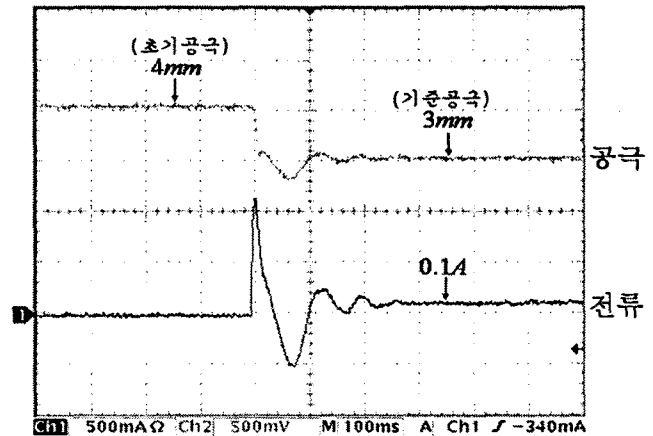
그림 5는 Case 2인 경우의 스텝응답으로 공극과 전류를 측정된 것이며 초기공극 4[mm]에서 기준공극 3[mm]로 부상하였을 때 오버슈트가 Case 1보다 크고 오실레이션이 발생하였다. 0.2초에 기준공극 3[mm]로 제어되며 전류는 1.1[A]에서 -0.5[A]로 흘렀다가 정상상태에서 0.1[A]로 줄어든다.



〈그림 3〉 자기부상용 하이브리드 전자석 시스템



〈그림 4〉 Case 1(레일->지면부상) 공극 및 전류 파형



〈그림 5〉 Case 2(지면->레일부상)의 공극 및 전류 파형

### 4. 결 론

본 논문에서는 자기부상용 하이브리드 전자석 2개를 사용하여 레일에 부착된 상태에서 부상하는 방식과 지면에서 부상하는 방식의 초기공극 변화에 대한 특성을 실험적으로 고찰하였다. 레일에 부착된 상태에서 부상하는 방식의 경우 별도의 지지대 없이 초기 공극을 일정하게 유지할 수 있고 부상 시 안정한 특성을 보인다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Kouji Miyamoto, Toshiaki Murai, Syunsaku Koga, Takashi Onuki, "Digital Control of Attractive Magnetic Levitation With Permanent Mag-net", Int. Conference Maglev '89, pp. 447-452, 1989.
- [2] Mimpei Morishita, Teruo Azukizaea, Shuji Kanda, Noburu Tamura, Toyohiko Yokoyama, "A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System", IEEE Trans, Vehic, Vol38, No4, 1989.
- [3] 김종문, 강도현, 박민국, 최영규, "자기부상 시스템의 부상제어기 설계", 전기학회논문지, 52권 6호, pp. 342-350, 2003.
- [4] 김윤현, 이 주, "부하 상태관측기에 의한 하이브리드 부상 시스템의 제로 파워 부상제어", 전기학회논문지, 50권 6호, pp. 282-289, 2001.
- [5] 남윤호, 박승찬, "배터리로 구동되는 자기부상 시스템의 부상제어 특성 실험", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 992-994, 2004.