

영구자석을 포함한 자기부상시스템의 부상제어

김종문, 김춘경, 박민국, 천종민, 변한섭  
한국전기연구원, 계측제어연구그룹

A Suspension Control of A PM-based Magnetic Suspension System

Kim, Jong-moon, Kim, Choon-kyung, Park, Min-kook, Chun, Jong-min, and Pyon, Han-sub  
KERI, Instrumentation and Control Research Group

**Abstract** - In this paper, some suspension results for a magnetic suspension system with permanent magnet are presented. The electromagnetic model using the equivalent magnetic circuit is shown. And some control simulation results using Matlab/Simulink S/W are presented.

1. 서 론

지난 수 십 년간 세계적으로 자기부상기술을 이용한 응용시스템이 다양하게 알려져 왔다. 한 예로, 자기부상 열차는 도시내 및 도시간 교통수단으로서 상업화의 가능성이 확인되었다. 이러한 도시형 자기부상열차 중 상전도방식이 주로 개발되어 왔으나, 이 방식은 부상력을 발생시키기 위해 권선에 큰 전류를 흘리기 때문에 소비전력이 클 뿐 만 아니라, 권선에서 발열문제가 발생된다. 이것은 반도체 웨이퍼 이송장치에 자기부상 기술을 적용할 경우에도 역시 중요한 기술적 문제를 야기시킨다. 즉 초정밀 위치제어가 요구되는 반도체 시스템에서 권선의 발열로 인하여 나노급 위치정밀도를 구현할 수 없게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 상전도 방식과 같은 부상력을 유지하면서 소비전력이 작은 영구자석형 자기부상 시스템의 특성을 살펴보고, 그 제어 성능을 시뮬레이션을 통하여 확인하고자 한다.

논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 영구자석형 자기부상시스템의 등가자기회로를 이용하여 전자기 모델 및 관계식을 구하고, 구해진 모델에 대해 자기부상 제어기를 설계한 후, 제어 시뮬레이션을 수행한다. 마지막으로 그 결과에 대해 분석을 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델링

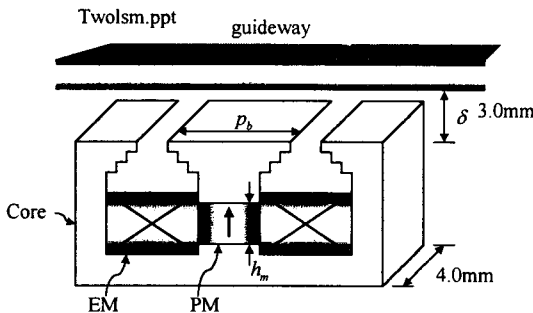


그림 1 영구자석형 자기부상 시스템

그림 1은 영구자석형 자기부상시스템에 대한 그림이고,

모델링에서 누설자석은 없다고 가정을 하였다. E형 코어에 권선을 감고, 코어 가운데에 영구자석을 심었으며, 가이드웨이는 강체이다. 영구자석의 자석 세기는 부상체 전체의 무게와 같게 정하였다. 그림 1에 대한 등가자기회로는 그림 2와 같다.

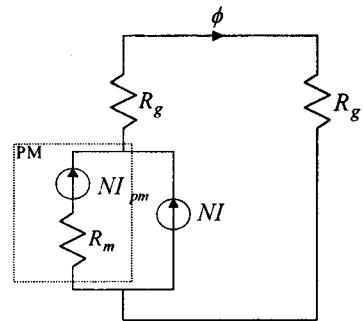


그림 2 등가자기회로

그림 2에서  $R_g$ 는 공극의 자기저항이고,  $R_m$ 은 영구자석의 자기저항이다.  $N$ 과  $I_{pm}$ 은 영구자석의 기자력을 환산한 값이 된다. 그리고  $B_r$ 은 영구자석의 잔류자속밀도(residual flux density)이고,  $h_m$ 은 영구자석의 높이, 그리고  $\mu_0$ 와  $\mu_r$ 은 공극의 비투자율 및 영구자석의 상대 비투자율이다.

그림 2의 등가자기회로의 기자력  $NI_{pm}$ 과 자기저항  $R_m$ ,  $R_g$ 에 대한 식은 다음과 같다.

$$NI_{pm} = \frac{B_r h_m}{\mu_0 \mu_r} \tag{2.1}$$

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_0 \mu_r S} \tag{2.2}$$

$$R_g = \frac{\delta}{\mu_0 S} \tag{2.3}$$

여기서  $S$ 는 자극의 면적이고,  $\delta$ 는 공극의 크기이다. 그리고, 전체 자속의 크기는 영구자석과 코일에 의한 기자력을 전체 자기저항으로 나눈 값으로 결정되며, 그 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{(NI_{pm} + Ni_c)}{2R_g + R_m} \\ &= \frac{\left( \frac{B_r h_m}{\mu_0 \mu_r} + Ni_c \right)}{2R_g + R_m} \end{aligned} \tag{2.4}$$

그리고 공극에서의 자속밀도  $B$ , 흡인력  $F$  및 인덕턴스

L는 다음과 같다.

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (2.5)$$

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} 2S = \frac{B^2}{\mu_0} S \quad (2.6)$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta} \quad (2.7)$$

이제 영구자석형 자기부상시스템의 동적 방정식을 구한다. 상태변수  $x(t)$ 를 공극  $z(t)$ , 속도  $\dot{z}(t)$  및 전류  $i(t)$ 로 하고, 입력  $u(t)$  및 출력  $y(t)$ 를 각각 전압  $v(t)$ 와 공극  $z(t)$ 로 하는 비선형 동적방정식은 식 (2.8)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x, u) \\ y(t) &= g(x) \end{aligned} \quad (2.8)$$

여기서 함수  $f(x, u)$ 는 식 (2.9)-(2.11)과 같고, 함수  $g(x)$ 는 공극  $z(t)$ 가 된다.

$$\dot{z}(t) = \dot{z}(t) \quad (2.9)$$

$$\ddot{z}(t) = -\frac{F}{m} + G. \quad (2.10)$$

$$\dot{i}(t) = -\frac{2z(t)}{\mu_0 N^2 S} v(t) - \frac{2Rz(t)}{\mu_0 N^2 S} i(t) + \frac{i(t)}{z(t)} \dot{z}(t) \quad (2.11)$$

여기서 흡인력  $F$ 는 다음과 같다.

$$F = \frac{(NI_{pm} + Ni_c)^2}{\mu_0 S(2R_g + R_m)^2} \quad (2.12)$$

정상상태에서 흡인력  $F$ 는  $mG$ 와 같게 되고, 권선 전류  $i_c$ 는 0이 된다.

## 2.2 부상제어기 설계

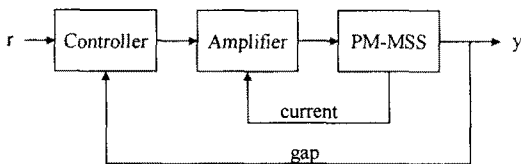


그림 3 비선형 페루프 시스템의 블록 다이어그램

이 절에서는 앞절에서 구해진 비선형 동적방정식을 이용한 부상제어기 설계에 대해 언급하고자 한다. 그림 3은 비선형 페루프 시스템의 블록 다이어그램으로써, 제어기는 기준공극  $r$ 와 출력공극  $z(t)$ 를 입력으로 하며, 계산된 제어신호는 증폭기로 보내게 된다. 증폭기에는 전류제어 루프가 있으며, 이 전류제어 루프의 게인도 피드백 제어에 중요한 파라미터가 된다.

본 논문에서는 부상제어기로서 상태궤환 제어기를 사용한다. 피드백되는 신호로는 공극, 속도 및 전류 신호이며, 적분기도 첨가되는 형태가 된다. 제어기 구조는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v(t) &= K_p(z_r(t) - z(t)) + K_v \dot{z}(t) \\ &+ K_I \int (z_r(t) - z(t)) dt + K_c i(t) \end{aligned} \quad (2.12)$$

여기서  $K_p$ ,  $K_v$ ,  $K_I$  및  $K_c$ 는 각각 공극, 속도, 적분 및 전류이득이며, 각각의 값은 20000, 1000, 50000, 3으로 결정하였다.

앞서 언급이 되었지만, 영구자석형 자기부상시스템은 정상상태에서 마그네트 권선의 전류가 거의 0을 유지하는 것이 매우 중요하므로 공극, 전류, 자중의 값을 확실히 설정하는 것이 관건이 되며, 피드백 게인도 정상상태에서의 응답을 결정하게 된다.

## 2.3 시뮬레이션

제어 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 사용하였고, 사용된 시스템 파라미터는 표 1과 같다. 영구자석을 포함한 자기부상시스템에서는 마그네트의 초기 위치가 가이드웨이에 붙어 있는 경우와 바닥에 있는 경우로 나눌 수 있다. 여기서는 바닥에 있는 경우에 대해서만 언급하기로 한다. 초기 공극은 6mm이고, 정상상태 공극은 3mm이다. 정상상태 공극은 마그네트의 하중과 직접적인 관계가 있으며, 이에 따라 영구자석의 세기도 결정된다. 따라서 공극을 줄이면 같은 하중에 대해 영구자석의 세기를 줄일 수 있어서 경제적인 것만 아니라, 권선의 권선수를 줄일 수 있는 이점이 있다.

사양	값	단위
$B_r$	1.2	T
$h_m$	0.01	m
$l_m$	0.04	m
$\mu_r$	1.05	
$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$	
Initial gap	0.006	m
Nominal gap	0.003	m
No. of winding	2000	Turns
M	27.1	kg
R	5.0	$\Omega$
$I_p$	4.55	A
Pitch	0.04	m

표 1 시스템 파라미터

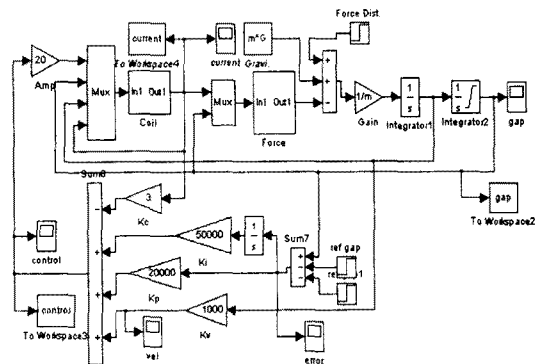


그림 4 제어 시뮬레이션 블록 다이어그램

그림 4는 제어 시뮬레이션을 하기 위한 블록 다이어그램으로써, Matlab/Simulink를 이용하여 구성하였다.

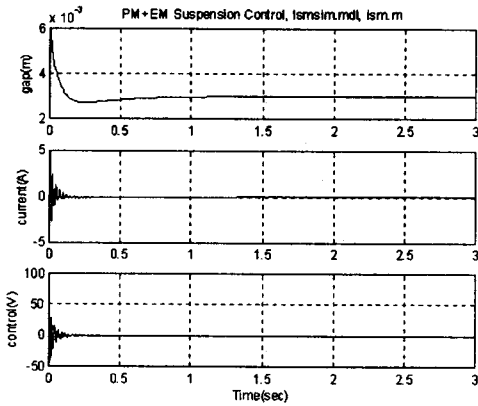


그림 5 초기 부상시의 공극, 전류 및 전압파형

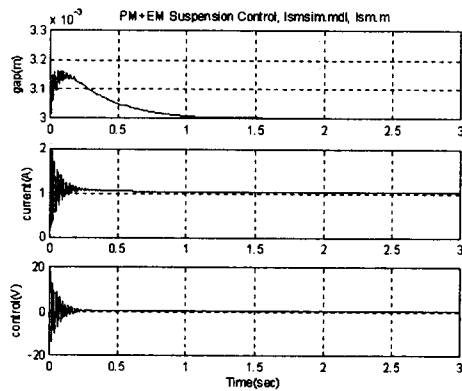


그림 6 전체 무게의 50%의 힘 스텝외란시의 공극, 전류 및 전압파형

시뮬레이션 결과로서, 그림 5는 초기 공극 6mm에서 기준 공극 3mm로 부상할 때의 공극, 전류 및 전압파형이다. 보통 0.5초 이내에 정상상태에 수렴함을 알 수 있고, 정상상태에서의 마그네트 전류도 5mA 이내로 작다는 것을 알 수 있다. 실제로 부상제어의 적분동작에 의해 마그네트가 기준공극을 완벽하게 따라갈 수는 있으나, 내부 제어루프인 전류는 약간의 오차를 가질 수는 있다. 이 오차는 대략 20mA 이내에서 제어가 되면 문제가 없다.

그림 6은 전체 마그네트 무게의 50%에 해당하는 부하를 스텝형태로 가했을 때의 공극, 전류 및 전압파형이며, 1초 이내에서 수렴한다는 것을 알 수 있다. 부하가 150%로 증가했으므로 정상상태 공극을 3mm로 유지하기 위해서 마그네트 전류는 약 1.05A 정도가 흘렀다. 즉 13.55kg의 부하에 대해 1.05A의 마그네트 전류를 추가로 소비한다는 것을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 영구자석을 포함한 자기부상시스템의 부상제어에 대해 언급하였는데, 시뮬레이션을 통하여 동작점에서 저전력소비 부상제어의 결과를 확인하였다. 저전력소비는 발열문제와도 관계가 깊으며, 이 문제는 반도체 장비와 같은 정밀한 시스템에서는 매우 중요한 문제가 될 수 있다.

앞으로는 앞에서 설계된 영구자석 자기부상시스템을

이용하여 반송시스템용 선형전동기에 응용함으로써 정밀 위치제어를 구현할 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [2] B. S. Guru, *Electric machinery and transformers*, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., 1988.
- [3] Matlab ver. 5.2, The Mathworks, 1999.