

크로스아암이 부상제어기에 미치는 영향

김홍주, 김춘경, 권순만
한국전기연구원

Effect of the cross arm on levitation control

HongJu Kim, ChoonKyung Kim, SoonMan Kwon
KERI

Abstract - 이 논문은 크로스아암이 부상제어기에 미치는 영향을 분석한다. 레일에 일정한 간격으로 설치된 크로스아암은 부상제어기에 외란으로 작용한다. 부상제어기 제어대역 근처에 있는 외란으로 부상공극제어에 악영향을 미친다. 그 영향을 분석하여 제어기를 재설계하거나 크로스아암 간격을 조절하는 조치를 취해야 한다. 우선 부상제어기를 제안하고 크로스아암 외란을 입력으로 부상공극 출력 전달함수를 구해서 보드선도를 그려 그 영향을 분석한다.

투입전류의 제곱에 비례하고 공극의 제곱에 반비례하는 부상력은 다음과 같다[2].

$$F(i, c) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (3)$$

그림 2에서 마그네트 위치와 레일 위치와의 관계에서 공극은 다음과 같다.

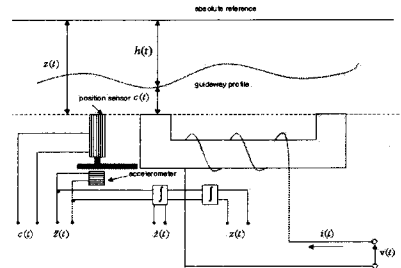
$$c(t) = z(t) - h(t) \quad (4)$$

1. 서론

1990년경부터 시작된 국내의 자기부상열차 개발사업은 차량개발을 중심으로 몇 개의 기관이 독립적으로 연구를 진행해 왔고 그 연구성과를 바탕으로 2006년 12월말 자기부상열차실용화사업이 진행되고 있다. 자기부상열차실용화사업의 최종목표는 자기부상열차의 국내 수요 증진을 물론 해외 시장 진출까지도 고려하고 있기 때문에 국제적인 경쟁력을 갖춘 세계 최고 또는 동등의 기술 수준을 요구하고 있다.

자기부상열차의 실용화에 가장 큰 걸림돌은 부상시스템의 신뢰성 및 안정성을 확보하는데 있다. 부상시스템의 안정성은 부상제어기, 전자석, 레일, 내차, 차량 동특성의 복합적 요인에 의해 결정되지만, 부상제어기 설계 단계에서 복합적 요인들을 단순화하여 분석하여 그 영향을 파악할 필요가 있다.

본 논문에서는 크로스아암이 부상안정성에 미치는 영향을 분석한다. 그림 1에서처럼 가이드레일은 침목에 의하여 지지되는데 차량 주행 중 침목과 침목 사이에서 가이드레일에 처짐이 발생한다. 이 처짐은 부상제어기에 외란으로 작용한다. 부상제어기 제어대역 근처에 있는 외란으로 부상공극제어에 악영향을 미친다. 그 영향을 분석하여 제어기를 재설계하거나 크로스아암 간격을 조절하는 조치를 취해야 한다. 우선 부상제어기를 제안하고 크로스아암 외란을 입력으로 부상공극 함수를 s-domain으로 구하고 보드선도를 그려 외란 주파수에서의 공극 진폭 변화를 확인한다. 우선 전자석, 레일로 부상시스템을 모델링하고, 부상제어기를 제안하고, 부상공극 레퍼런스 와 크로스아암 외란을 입력으로 부상공극의 전달함수를 구한 다음, 보드선도를 그려 주파수 영역 해석을 한 후, 부상공극의 시간 응답을 구한다.



<그림 2> 단순화된 부상시스템

Equilibrium point에서 (1), (2)를 선형화 하면[3],

$$m\ddot{z}(t) = -k_i(i(t) - i_0) + k_c(c(t) - c_0) \quad (5)$$

$$i(t) = \frac{k_c}{k_i} c(t) - \frac{R}{L_0} i(t) + \frac{1}{L_0} v(t) \quad (6)$$

여기서, $k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_0^2}$, $k_c = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2c_0^3}$, $L_0 k_c = k_i^2$ 이다.

(4)를 이용하여 (5)식을 $c(t)$, $h(t)$ 식으로 나타내면,

$$m\ddot{c}(t) = -k_i(i(t) - i_0) + k_c(c(t) - c_0) - m\ddot{h}(t) \quad (7)$$

2.2 부상제어기 설계

공극 에러를 다음과 같이 정의한다.

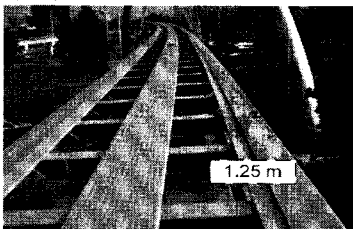
$$e = (c - c_d) \quad (8)$$

여기서 c_d 는 공극 레퍼런스로 8mm가 된다.

제어전압 v 를 다음과 같이 제안한다.

$$v = c_0 \dot{e} + c_1 \ddot{e} + c_2 \ddot{\ddot{e}} \quad (9)$$

\dot{c} 은 공극을 미분한 수직방향속도로 실제 구현에서는 유효대역을 갖는 2차미분필터를 사용한다. $\ddot{\ddot{e}}$ 는 가속도 신호이다. (9)의 제어기는 low pass filter를 거친 공극신호, high pass filter를 거친 가속도신호, 공극센서값을 입력으로 하는 2차미분필터로 구현된다. (6),(7),(8),(9)를 사용하여 $c(s)$ 를 $cd(s)$ 와 $h(s)$ 에 대하여 나타내면,



<그림 1> cross arm 형상

2. 본론

2.1 부상시스템 모델링

코일에 인가되는 전류 $i(t)$ 는 다음 식으로 제어된다[1].

$$v(t) = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2c(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 A i(t)}{2[c(t)]^2} \frac{dc(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서, R 은 회로의 총 저항, N 은 코일을 감은 횟수, A 는 magnet pole의 면적, μ_0 는 공기 중 투자율이며 $c(t)$ 는 그림 2에 나타내었다. 인가된 전류에 의해 발생하는 자기력과 중력에 의해 발생하는 힘의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{z}(t) = -F(i, c) + mg \quad (2)$$

$$c(s) = \frac{\frac{k_i c_0}{mL_0}}{s^3 + \frac{(mR + k_i c_2)}{mL_0} s^2 + \frac{c_1 k_i}{mL_0} s + \frac{c_0 k_i - k_c R}{mL_0}} c_d(s) - \frac{\frac{mL_0}{s^3 + \frac{(mR + c_2 k_i)}{mL_0} s^2 + \frac{c_1 k_i}{mL_0} s + \frac{c_0 k_i - k_c R}{mL_0}}}{h(s)} \quad (10)$$

(10)에서 c(s)는 cd(s)에 대하여 low pass filter, h(s)에 대하여 high pass filter의 합으로 나타남을 알 수 있다. 제어기 이득 값은 다음과 같이 구한다.

$$s^3 + \left(\frac{R}{L_0} + \frac{c_2 k_i}{L_0 m}\right) s^2 + \frac{c_1 k_i}{L_0 m} s + \left(\frac{c_0 k_i}{L_0 m} - \frac{R k_x}{L_0 m}\right) = (s + p_1)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} c_2 &= \frac{L_0 m}{k_i} (p_1 + 2\xi\omega_n - \frac{R}{L_0}) \\ c_1 &= \frac{L_0 m}{k_i} (2p_1\xi\omega_n + \omega_n^2) \\ c_0 &= \frac{L_0 m}{k_i} (p_1\omega_n^2 + \frac{R k_x}{L_0 m}) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 p_1 , ξ , ω_n 은 디자인 변수로

$p_1 = 100$, $\xi = 0.7071$, $\omega_n = 2\pi \cdot 15$ 로 선택하였다.

2.3 Cross arm 모델링

실용화 차량의 속력은 110km/h로 이 속력에서 cross arm은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$gap_d = A_{ca} \sin(2\pi f_{ca} t) \quad (13)$$

여기서 주파수는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} t_{ca} &= \frac{L_{ca}}{v} = \frac{1.25}{110 \cdot 1000} = 0.0409 \\ f_{ca} &= 1/t_{ca} = 24.44 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (14)$$

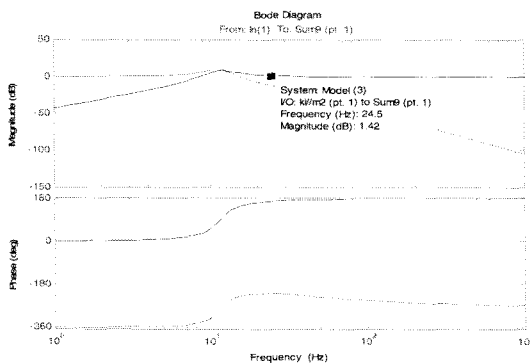
외란의 진폭은 1mm로 가정하였다.

2.4 모의시험 결과

<표 1> 시뮬레이션에 사용한 파라미터

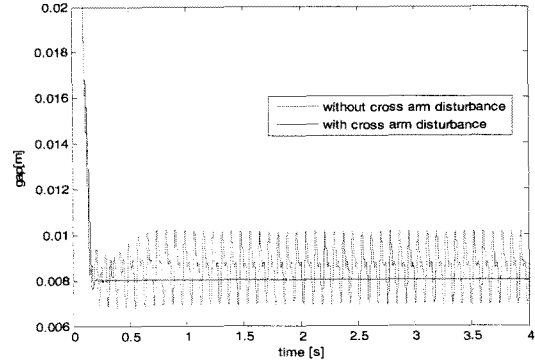
Parameter				
m [kg]	z_0	i_0 [A]	A [m ²]	R [Ω]
1250	0.008	26.8	0.59*0.012	0.396*2
N	L [m]	a	V [km/h]	
198*2	25	2000	50 or 110	

표 1에 시뮬레이션에 사용한 파라미터들을 표시하였다. (10)을 이용하여 c(s)/cd(s), c(s)/h(s)의 보드선도를 그리면 다음과 같다.



<그림 3> cross arm 외란에 대한 보드선도

그림 3의 보드선도로부터 $f_{ca} = 24.44 \text{ Hz}$ 외란에 대해 $1\text{mm} \cdot 10^{1.42/20} = 1.2\text{mm}$ 가 $cd=8\text{mm}$ 에 더해져 나오게 된다.



<그림 4> cross arm 외란에 대한 시간응답

3. 결 론

크로스아암은 부상제어기에 외란 요소로 작용하며 고대역필터를 통해 공극출력값에 더해진다. 공극신호, 수직방향속도, 가속도를 사용하는 대부분의 부상제어기는 외란주파수에서 이득 감쇠를 하지 못하기 때문에 크로스아암 외란 진폭이 그대로 공극에 영향을 미친다. 따라서 외란 영향을 줄이기 위해서는 크로스아암 간격을 더 줄여서 진폭을 작게 하여야 한다. 향후 이런 바람직하지 못한 영향을 제거할 수 있는 제어방법을 고안하는 연구가 계속되어야 할 것으로 본다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.K. Sinha, Electromagnetic Suspension Dynamics & Control. Peter Peregrinus Ltd
- [2] W. Barie and J. Chiasson, "Linear and nonlinear state-space controllers for magnetic levitation," *International Journal of Systems Science*, no.11, pp.1153-1163, 1996.
- [3] A.El Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems," *IEEE Control Systems Magazine*, 13(1), pp.42-48, 1993.