

차량 속력에 따른 부상제어기 성능 해석

김홍주, 김춘경, 권순만
한국전기연구원

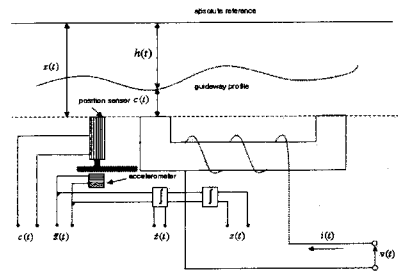
Levitation Controller Performance Analysis according to Vehicle Speed

HongJu Kim, ChoonKyung Kim, SoonMan Kwon
KERI

Abstract - 이 논문은 자기부상열차 속력에 따른 부상제어기 성능을 분석한다. 현재 실용화 사업은 시속 110km/h 속력으로 부상공극 8 mm 기준으로 상하 3 mm 이하 변화를 목표로 개발 중에 있다. 부상제어기의 안정성에 영향을 미치는 외란으로는 가이드웨이 처짐, 크로스아암에 의한 레일 처짐, 레일 불균일, 레일 연결부 단차 등이 있다. 이러한 외란이 복합적으로 작용하지만, 설계 단계에서 각각의 영향을 단순화하여 독립적으로 그 영향을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 차량속력에 따른 가이드웨이 처짐이 부상제어기에 미치는 영향을 분석한다. 하나의 전자석과 유연레일을 모델링하고 상대회환을 갖는 제어기를 제안하여 속력에 따른 부상공극 변화를 관찰한다. 모의시험 결과 12 mm 레일의 휘어짐 상황에서 속력에 따라 부상공극 변화가 커지지만, 실용화 사업의 목표를 달성함을 알 수 있었다.

그림 1에서 마그네트 위치와 레일 위치와의 관계에서 공극은 다음과 같다.

$$c(t) = z(t) - h(t) \tag{4}$$



〈그림 1〉 단순화된 부상시스템

1. 서론

자기부상열차는 레일과 차량의 직접적인 접촉이 없기 때문에 소음, 진동, 승차감 측면에서 차세대 교통수단으로 각광을 받고 있다. 국내에서는 2006년 12월말부터 자기부상열차실용화사업이 진행되고 있다. 자기부상열차실용화사업의 부상제어기 개발의 최종목표는 시속 110km/h 속력으로 부상공극 8 mm 기준으로 상하 3 mm 이하 변화이다. 이 목표는 현재 국내 기술로 검증된 바 없으며 실제 차량이 제작되고 레일이 설치되기 이전에 컴퓨터를 이용한 모의시험으로 실제 상황을 모의하여 다양한 분석을 할 필요가 있다.

자기부상열차의 실용화에 가장 큰 걸림돌은 부상시스템의 신뢰성 및 안정성을 확보하는데 있다. 부상시스템의 안정성에 영향을 미치는 외란으로는 가이드웨이 처짐, 크로스아암에 의한 레일 처짐, 레일 불균일, 레일 연결부 단차 등이 있다. 이러한 외란이 복합적으로 작용하지만, 설계 단계에서 각각의 영향을 단순화하여 독립적으로 그 영향을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 차량속력에 따른 가이드웨이 처짐이 부상제어기에 미치는 영향을 분석한다.

차량이 일정 속력으로 부상하여 진행할 때 차량 동하중 때문에 가이드웨이에 처짐이 발생한다. 처짐의 최대값은 가이드웨이 건설 요건으로 주어지며 처짐이 적을수록 부상제어기가 안정성 측면에서 유리하며 건설경비 측면에서는 불리하다. 경제적 측면과 부상안정성 측면을 적절히 타협하여 처짐의 최대값 요건이 주어지는 것이 바람직하며 이를 위하여 가이드웨이 처짐이 부상안정성에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

우선 부상제어기를 제안하고 가이드웨이 처짐 외란을 입력으로 부상공극 출력함수를 구하고 보드선도를 그려 외란 주파수에서의 공극 진폭 변화를 확인한다. 우선 전자석, 레일로 부상시스템을 모델링하고, 부상제어기를 제안하고, 부상공극 레퍼런스와 가이드웨이 처짐 외란을 입력으로 부상공극의 전달함수를 구한 다음, 보드선도를 그려 주파수 영역 해석을 한 후, 속력에 따른 부상공극의 시간 응답을 구한다.

2. 본론

2.1 부상시스템 모델링

코일에 인가되는 전류 $i(t)$ 는 다음 식으로 제어된다[1].

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

여기서, R은 회로의 총 저항, N은 코일을 감은 횟수, A는 magnet pole의 면적, μ_0 는 공기 중 투자율이며 $c(t)$ 는 그림 1에 나타내었다. 인가된 전류에 의해 발생하는 자기력과 중력에 의해 발생하는 힘의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

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

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

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,

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

2.2 부상제어기 설계

공극 에러를 다음과 같이 정의한다.

$$e = (c - c_d) \tag{8}$$

여기서 c_d 는 공극 레퍼런스로 8mm가 된다.

제어전압 v 를 다음과 같이 제안한다.

$$v = c_0 \dot{e} + c_1 \ddot{e} + c_2 \dddot{e} + c_f \int e dt \tag{9}$$

\dot{e} 는 공극을 미분한 수직방향속도로 실제 구현에서는 유효대역을 갖는 2차미분필터를 사용한다. 여기서 c_f 는 적분기의 이득 값으로 정상상태 오차를 없애기 위한 항이다. \ddot{z} 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,

$$c(s) = \frac{\frac{k_i c_0}{mL_0} s + \frac{k_i c_1}{mL_0}}{s^4 + \left(\frac{mR + k_i c_2}{mL_0}\right) s^3 + \frac{k_i c_1}{mL_0} s^2 - \left(\frac{k_c R - k_i c_0}{mL_0}\right) s + \frac{k_i c_1}{mL_0}} c_d(s)$$

$$h(s) = \frac{s^4 + \left(\frac{mR + k_i c_2}{mL_0}\right) s^3}{s^4 + \left(\frac{mR + k_i c_2}{mL_0}\right) s^3 + \frac{k_i c_1}{mL_0} s^2 - \left(\frac{k_c R - k_i c_0}{mL_0}\right) s + \frac{k_i c_1}{mL_0}}$$

(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 적분기가 없는 제어기 즉 $c_f=0$ 로 가정하고 다음과 같이 구한다.

$$s^3 + \left(\frac{R}{L_0} + \frac{c_2 k_i}{L_0 m}\right) s^2 + \frac{c_1 k_i}{L_0 m} s + \left(\frac{c_0 k_i}{L_0 m} - \frac{R k_z}{L_0 m}\right)$$

$$= (s + p_1)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)$$

$$c_2 = \frac{L_0 m}{k_i} (p_1 + 2\xi\omega_n - \frac{R}{L_0})$$

$$c_1 = \frac{L_0 m}{k_i} (2p_1 \xi \omega_n + \omega_n^2)$$

$$c_0 = \frac{L_0 m}{k_i} (p_1 \omega_n^2 + \frac{R k_z}{L_0 m})$$

여기서 p_1 , ξ , ω_n 은 디자인 변수로 $p_1 = 100$, $\xi = 0.7071$, $\omega_n = 2\pi \cdot 15$ 로 선택하였다.

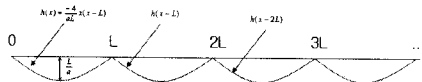
2.3 가이드웨이 처짐 모델링

차량이 일정 속력으로 부상하여 진행할 때 차량 동하중으로 가이드웨이 처짐이 발생하는데 그 처짐을 2차함수로 모델링한다.

$$h(x) = \frac{-4}{aL} x(x-L), 0 \leq x \leq L$$

$$h(x-L), L \leq x \leq 2L$$

(13)식을 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 실용화 사업의 건설 요건은 $L=25[m]$, $a=2000$ 이다. 즉 처짐의 최대값은, $L/a = 12.5[mm]$ 이다.



〈그림 2〉 guideway 처짐 형상

여기서 주기는 다음과 같이 구한다.

$$t = L/v = \frac{25}{\frac{110 \cdot 1000}{3600}} = 0.82[sec]$$

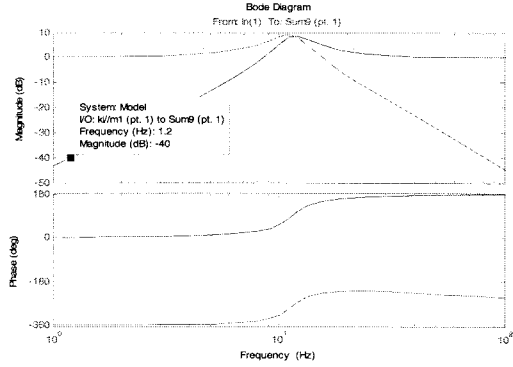
$$f = 1/t = 1.22Hz$$

2.4 모의시험 결과

〈표 1〉 시뮬레이션에 사용한 파라미터

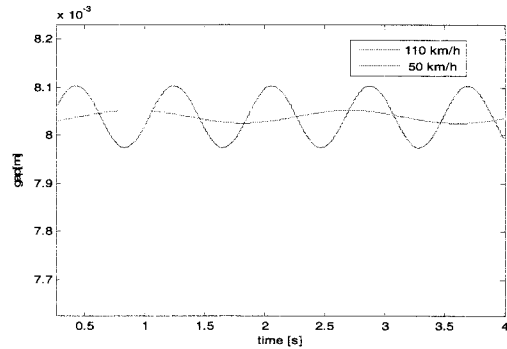
Parameter				
m [kg]	z_0	i_0 [A]	A [m^2]	R [Ω]
1250	0.008	26.8	$0.59 \cdot 0.032$	$0.396 \cdot 2$
N	L [m]	a	V [km/h]	
$198 \cdot 2$	25	2000	50 or 110	

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



〈그림 3〉 가이드웨이 처짐 외란에 대한 보드선도

그림 3의 보드선도로부터 주파수 1.22Hz에 대해 $12.5 \cdot 10^{-4} \cdot (-20/40)[mm]$ 즉 0.125[mm]진폭의 외란이 8[mm]에 가감된다. 그림 4는 이 사실을 보여준다.



〈그림 4〉 차량 속력에 따른 공극 시간응답

3. 결 론

가이드웨이 처짐은 부상제어기에 외란 요소로 작용하며 고대역필터를 통해 공극출력값에 더해진다. 제어 대역이 7 ~ 15 Hz인 부상제어기에서 외란 주파수 1.22 Hz에 대해 고대역필터의 출력값은 외란 진폭을 1/100배 정도 감쇠시켜서 공극출력에 더하기 때문에 그 영향이 미미함을 알 수 있다. 하지만 본 논문은 single magnet을 이용하여 도출한 결과로 대차단위 차량 단위의 해석을 통해 레일, 전자석, 차량의 상호작용이 부상안정성에 미치는 영향을 계속 연구해야 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.