

자기부상열차-가이드웨이 시스템의 동적 응답 제어

Dynamic response control of coupled Maglev train and guideway system

공은호* · 강부병** · 나성수*†

Eunho Kong, Bu-Byoung Kang and Sungsoo Na

1. 서론

자기부상열차는 전기력으로 차량을 부상, 추진하는 시스템으로써 1970년대 이후 연구되어 왔다. 자기부상열차의 자기부상(Magnetic levitation) 방식은 상전도 흡인식과 초전도 반발식이 있다. 자기부상열차는 기존의 기차와 비교하여 소음과 유지 관리 비용이 적고, 탈선의 위험이 적다는 장점을 가지고 있다. 이 같은 장점 때문에 독일, 일본, 한국 및 중국에서 주로 자기부상열차에 대한 연구를 수행하고 있다. 독일과 일본에서는 500km/h 가 넘는 초고속 자기부상열차를 개발하였으며, 특히 2003년에는 독일에서 개발한 Transrapid가 중국의 상하이에서 상용화 운영을 시작하였다. 한국에서는 110km/h의 운행 속도를 가지는 도시형 중·저속 자기부상열차를 목적으로 개발을 진행하고 있으며 상용화를 목전에 두고 있다. 그리고 최근에는 자기부상열차-가이드웨이 통합 모델에 제어를 포함하여 향상된 모델을 개발하여 연구를 수행하고 있다.

본 연구에서는 제어를 포함한 자기부상열차-가이드웨이 통합 모델의 여러 매개변수에 따른 동적 응답 특성에 대해서 연구를 제안한다. 본 연구에서는 통합모델 시스템의 동적 응답을 얻기 위해서 교량은 단순한 단경간 교량 모델로 가정하고 Runge-Kutta 방법을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 자기부상열차 통합 모델의 안정적인 응답을 위해서 본 연구에서 제안한 칼만 필터를 기반으로 한 슬라이딩 모드 제어 기법의 성능을 검토하였다.

2. 자기부상열차 운동방정식

2.1 차량 모델

본 연구에서는 차량의 횡방향 운동은 무시하며 차체(Cabin)의 바운싱(연직방향운동), 피칭(진행방향

회전운동) 및 대차(bogie)의 바운싱(연직방향운동)을 고려하였다.

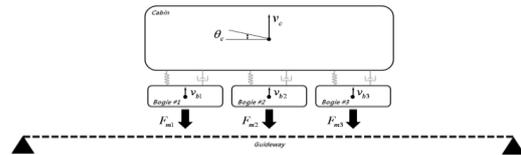


Fig.1. UTM-01 5-DOF model

위에서 고려한 특성을 가진 5자유도 차량의 모델은 Fig.1과 같으며, 차체(cabin) 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{v}_c = \frac{k_s}{m_c}(v_{b1} + v_{b2} + v_{b3} - 3v_c) + \frac{c_s}{m_c}(\dot{v}_{b1} + \dot{v}_{b2} + \dot{v}_{b3} - 3\dot{v}_c) \quad (1)$$

$$\ddot{\theta}_c = -\left\{ \frac{k_s}{I_{mc}}(a_1 L_c v_{b1} + a_3 L_c v_{b3}) + \frac{c_s}{I_{mc}}(a_1 L_c \dot{v}_{b1} + a_3 L_c \dot{v}_{b3}) \right\} \quad (2)$$

$$\ddot{v}_{bj} = \frac{k_s}{m_b}(v_c - v_{bj} + a_j L_c \theta_c) + \frac{c_s}{m_b}(\dot{v}_c - \dot{v}_{bj} + a_j L_c \dot{\theta}_c) + \frac{\Delta F_{mj}}{m_b} \quad (3)$$

2.2 자기 부상 모델

EMS는 차량에 부착된 전자석과 교량 레일의 강자성체 사이에서 끌어당기는 힘을 생성한다. 여기서 생성되는 힘이 자기부상력이며, 자기부상력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_m = \frac{\mu_0 A_m}{4h^2(t)} (N_c i(t))^2 \quad (4)$$

식(4)의 자기부상력과 입력 전류의 관계는 비선형이지만, 정지부상 공극(\$h_0\$)이 확보된 다음에는 식(5)-(7)과 같이 선형화가 가능하다.

$$F_m = F_{m0} + \Delta F_m \quad (5)$$

$$F_{m0} = \frac{\mu_0 A_m N_c^2 i_0^2}{4h_0^2} \quad (6)$$

$$\Delta F_m = \frac{\mu_0 A_m N_c^2 i_0^2}{2h_0^2} \Delta i(t) - \frac{\mu_0 A_m N_c^2 i_0^2}{2h_0^3} \Delta h(t) \quad (7)$$

또한 입력전류의 변화량과 부상공극 및 제어전압은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta i = \frac{K_b}{K_a} \Delta \dot{h} - \frac{R_0}{L_0} \Delta i + \frac{1}{L_0} \Delta v \quad (8)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 A_m N_c^2}{2h_0} \quad (9)$$

2.3 교량 모델

가이드웨이는 Fig.1과 같이 교각으로 지지되며

† 교신저자; 고려대학교 기계공학과 교수

E-mail : nass@korea.ac.kr

Tel : (02) 3290-3854

* 고려대학교 기계공학과

** 한국철도기술연구원

거더는 콘크리트 강으로 제작된다. 본 논문에서는 이러한 가이드웨이를 단순화하여 단경간 모델을 사용하였으며, Euler-Bernoulli 빔 모델을 사용하여 가이드웨이의 동적 움직임을 분석한다.

결과적으로, 자기부상열차-가이드웨이 사이의 연동된 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} + 2\zeta_n \omega_n \frac{dy_n(t)}{dt} + \omega_n^2 y_n(t) = \frac{1}{m_g L_g} \sum_{k=1}^5 f_k(t) \phi_n(x_k) \quad (10)$$

2.4 표면 조도

본 논문에서의 레일조도는 실제 측정치에 바탕을 두고 있다.

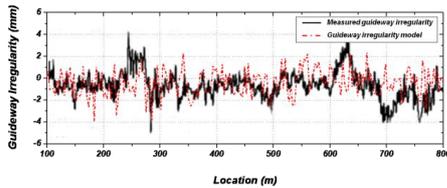


Fig.2. Guideway Irregularity model

3. 슬라이딩 모드 컨트롤 기법

본 연구의 컨트롤 설계 과정은 두 부분으로 구성 되어 있다. 먼저, 저감-차수(reduced-order) 슬라이딩 모션을 나타내도록 하는 초평면(hyper-plane) S의 설계이다. 여기서 상태 값들은 설계자에 의해 선택된 초평면(hyper-plane)에 의해서 제한된다. 두 번째는 한정된 시간 t_s 에서 초평면(hyper-plane)에 남은 불안정한 상태 값들을 제어하기 위한 제어법칙을 설계하는 것이다. 그리고 단위-벡터 접근법(unit-vector approach)을 채택하고 그것의 제어 구조는 선형제어 부분과 비선형 제어 부분으로 구성한다. 다음의 제어 구조를 기반으로 폐루프(closed-loop) 시스템을 정의하는 모든 방정식을 수집하면, 식(11)과 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{H}_r, \quad \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \quad (11-a,b)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{L} \cdot [\mathbf{y} - \mathbf{C} \cdot \hat{\mathbf{x}}], \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_r \cdot \hat{\mathbf{x}} + \eta \cdot \frac{\mathbf{W} \cdot \hat{\mathbf{x}}}{\|\mathbf{Y} \cdot \hat{\mathbf{x}}\|} \quad (12-a,b)$$

여기서 시스템의 안정성을 확인하기 위해서는 추정되는 에러, $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ 를 고려하는 것이 더 장점이 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_r & \mathbf{L} \cdot \mathbf{C} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} - \mathbf{L} \cdot \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \cdot \eta \cdot \frac{\mathbf{W}}{\|\mathbf{Y}\|} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_r \end{bmatrix} \quad (13)$$

4. 결과 및 토의

4.1 관측기 동작

Fig.3은 관측기의 불확실성이 고려되어도 추정되는 값이 실제 값을 추적하는 것으로 보아 관측기의 성능에는 문제가 없는 것을 확인할 수 있습니다.

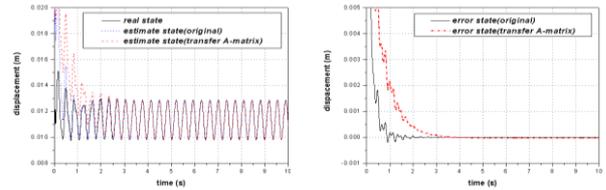


Fig.3. Observer performance; (a) real state and estimate state; (b) error state

4.2 시스템의 동적 응답 특성

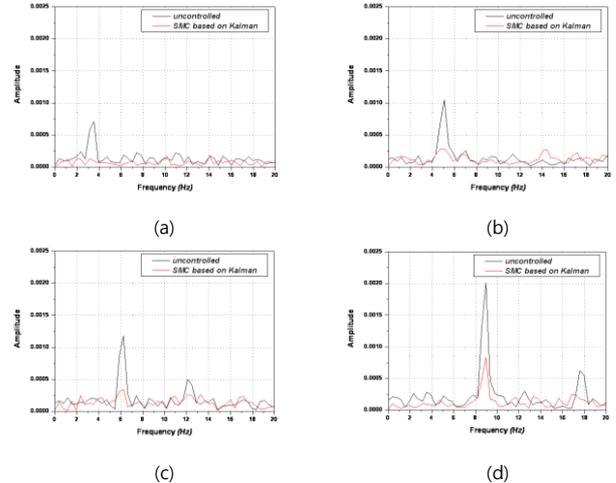


Fig.4. FFT analysis of air gap; (a) 60km/h; (b) 90km/h; (c) 110km/h; (d) 160km/h

자기부상열차-가이드웨이 시스템에 제어가 사용되지 않은 경우와 칼만 관측기가 적용된 제어기(SMC)를 사용한 경우 외력이 작용 하더라도 효과적으로 자기부상열차-가이드웨이 시스템의 안정된 동적 특성을 유지하여 자기부상열차의 주행성능 향상에 기여할 수 있음을 증명한다.

결론

본 논문에서는 자기부상열차 시스템에 슬라이딩 모드 제어방법을 사용하여 동적 응답 특성을 제어할 수 있음을 시뮬레이션 하였고, 결과적으로 칼만 필터 관측기 기반의 슬라이딩 모드 컨트롤은 빠른 속도에서의 주행성능 향상 및 시스템의 안정화에 기여함을 확인할 수 있었다.

후기

This work was carried out within a prospective strategic research project of Korea Railroad Research Institute funded by Korea Research Council for Industrial Science and Technology and Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Education, Science and Technology (2010-0001642)