

교량 특성이 자기부상차량에 미치는 영향

Effect of Bridge Characteristics on Maglev Vehicle

이준석†·권순덕*·김문영**·여인호***

Lee Jun-Seok, Kwon Soon-Duck, Kim Moon-Young, Yeo In-Ho

1. 서 론

자기부상열차의 근본개념은 1930년대 독일에서 처음 나온 이래 1970년대부터 독일과 일본에서 집중적으로 연구되고 있다. 특히 2003년부터는 독일에서 개발된 초고속 자기부상열차 Transrapid가 중국 상하이에서 상업운영중이며, 일본의 경우도 자기부상열차인 MLX(Magnetic Levitation eXpress) 및 도시형 자기부상열차인 HSST(High Speed Surface Transport)의 개발에 투자하고 있다. 본 연구에서는 자기공극의 피드백을 포함하는 능동제어되는 2자유도 자기부상열차와 가이드웨이 교량간의 상호작용해석을 통하여 총 포텐셜 에너지 관점에서 자기부상열차의 주행시 발생하는 차량의 탄성변형에너지 및 감쇠에너지 그리고 교량의 탄성변위와 감쇠에너지를 분석하였다. 해석차량은 국내에서 개발된 UTM-01(그림 1)의 제원을 사용하였으며, 제어알고리즘은 LQR(Linear Quadratic Regulator)을 이용하였다.



그림 1. 중저속 자기부상열차 UTM-01

2. 본 론

2.1 자기부상열차의 운동방정식

자기부상열차는 부상력과 관련된 수직방향 거동이 중요하므로 본 연구에서는 자기부상열차를 객차와 대차로 구성된 2자유도계로 단순화하였다. 그림 2와 같이 자기부상열차의 객차와 대차 사이에는 2차 현수장치인 에어스프링이 설치되어 있고, 가이드웨이와 대차 사이에는 EMS가 작용한다.

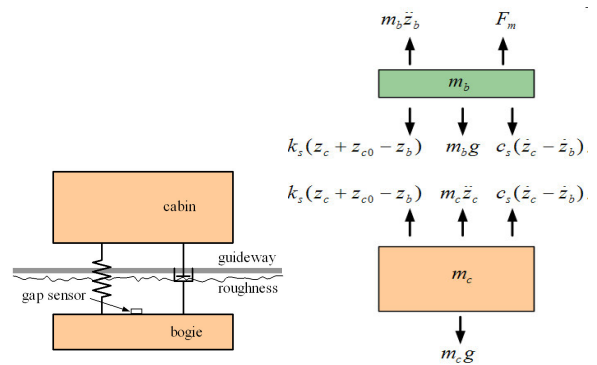


그림 2. 자기부상열차-가이드웨이 해석모델

그림 2의 주행중인 자기부상열차의 운동방정식은 다음 식 (1)과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{Bmatrix} \Delta \dot{z}_{cb}(t) \\ \Delta \dot{z}_{bc}(t) \\ \Delta \dot{z}_{cb}(t) \\ \Delta \dot{z}_{bc}(t) \\ \Delta \dot{i}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\left(\frac{k_z + k_s}{m_c + m_b}\right) & -\frac{k_z}{m_b} & -\left(\frac{c_z + c_s}{m_c + m_b}\right) & 0 & \frac{k_z}{m_b} \\ \frac{k_z}{m_b} & \frac{k_s}{m_b} & \frac{c_z}{m_b} & 0 & -\frac{k_z}{m_b} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_z}{k_s} & -\frac{R_0}{L_0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta z_{cb}(t) \\ \Delta z_{bc}(t) \\ \Delta z_{cb}(t) \\ \Delta z_{bc}(t) \\ \Delta i(t) \end{Bmatrix} + \Delta v + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ L_0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\ddot{v}_g(t) - \ddot{z}_g(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

2.2 능동제어 알고리즘

본 연구에서는 EMS위치에서의 자기부상열차의 부상공극 및 연직가속도를 관측하여 관측된 상태에서부터 전상태를 추정하는 상태추정기법을 적용한다. 이를 위해서 Kalman이 제시한 방법을 적용하여 상태를 추정하고 되먹임시에는

† 교신저자; (주) 청석엔지니어링, 과장
E-mail : junsok73@gmail.com
Tel : (02) 405-0314, Fax : (02) 405-0349

* 전북대학교, 토목공학과, 교수

** 성균관대학교, 사회환경시스템 공학과, 교수

*** 한국철도기술연구원, 선임연구원

추정된 상태벡터로부터 전상태 피드백 기법인 LQR(Linear Quadratic Regulator)을 이용하는 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 제어를 사용하였다. 실제 UTM-01의 상태추정방법 및 피드백기법은 다르나 부상공극 및 연직가속도로부터 상태를 추정하는 것은 동일하다. 상호작용에 포함되는 교량의 영향을 포함하는 전체운동방정식은 다음 식(2)와 같이 표현가능하다.

$$\begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{B}\mathbf{G} \\ \mathbf{L}\mathbf{C} & \mathbf{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \hat{\mathbf{x}}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{w}(t) \\ \mathbf{f}(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 일반화된 자표계에대한 교량의 변위를 포함하는 시스템 변수는 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = [y_1 \cdots y_n, \dot{y}_1 \cdots \dot{y}_n, \Delta z_{cb}, \Delta z_{bg}, \dot{\Delta z}_{cb}, \dot{\Delta z}_{bg}, \Delta i]^T$$

나머지구체적인 변수들의 표현은 지면관계상 생략한다.

3. 해석예제

해석에 사용된 UTM-01의 제원은 다음과 같다.

표 1. UTM-01의 제원

항목	값	항목	값
m_1	20,000kg	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} H/m$
m_2	9,300kg	N_m	660
k_s	451.8kN	A_m	0.04m ²
c_s	56.28kNs/m	e_{20}	0.01m
R_0	38.4Ω	i_0	20A

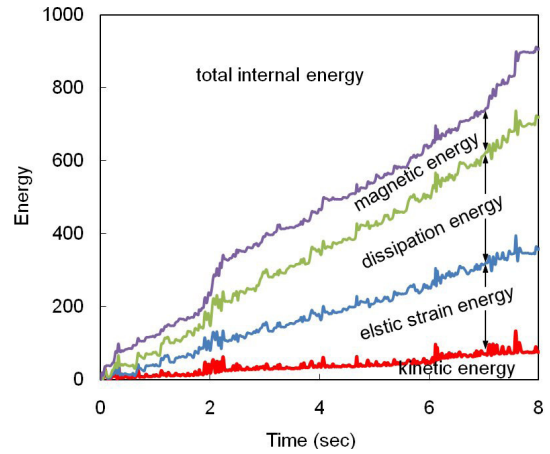
본 연구에서 사용한 레일 조도는 측정치에 바탕을 두고 있다. 한국기계연구원(KIMM) 자기부상열차 시험선로에서 측정된 가이드웨이의 고도 정보로부터 측정된 조도를 사용하였다. 주행중인 자기부상열차의 각 매개변수에 해당하는 에너지를 표현한 식은 다음과 같다. 식 (3)에서 표현한 에너지는 식 (2)의 분력들을 변위에 대해서 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$E_K + E_D + E_S + E_M = E_{Deflect} + E_{Rough} \quad (3)$$

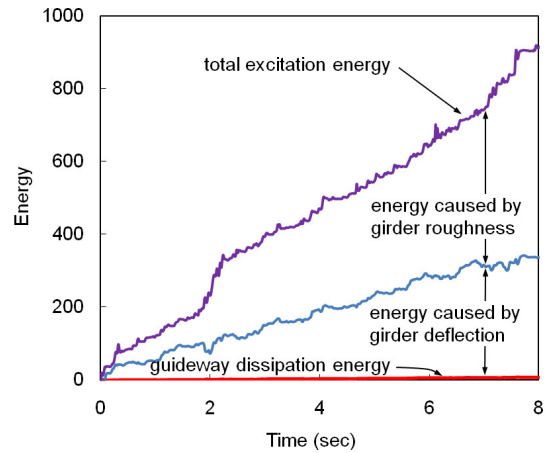
여기서, E_K 는 보기의 운동에너지, E_D 는 차량 현가장치의 감쇠에너지, E_S 는 차량 현가장치의 스프링에 의한 탄성변형 에너지, E_M 은 선형화된 전자기력에 해당하는 에너지, $E_{Deflect}$ 는 교량의 변형에너지, E_{Rough} 는 레일조도에 의해 발생하는 에너지를 각각 나타낸다. 식 (3)의 좌측항들은 보기에서 발생하는 에너지의 합으로서 우측의 교량에 의해 발생하는 에너지의 합과 동일해야 한다. 그림 3(a)

는 해석 차량 및 교량의 누적에너지를 나타내는것으로서 식 (3)의 좌측항들을 나타내며, 그림 3(b)는 식 (3)의 우측항에 대해서 나타낸 것이다.

식 (3)의 각각의 항들에 대한 에너지를 나타낸 것이 그림 3이다. 그림에서 보듯이 총 내적에너지의 변화와 총 외적에너지의 변화가 동일한 것을 확인할 수 있다. 특히 그림 3(b)에서 보듯이 교량의 감쇠에 의한 에너지의 영향이 교량의 처짐과 레일의 조도에 비해 매우 미약한 것을 확인할 수 있다.



(a) Internal energy(차량)



(b) External energy(교량)

그림 3. 주행중 자기부상열차와 교량의 에너지(처짐비 1:1500, 주행속도 = 100km/h)

4. 결 론

주행하는 자기부상열차 운동에너지를 유도하고 이로부터 자기부상열차의 현가장치, 전자기력 에너지, 교량의 에너지의 영향등을 살펴보았다. 해석결과 교량의 변위와 레일 조도의 영향이 자기부상열차의 응답에 크게 영향을 미치나 교량의 감쇠에너지는 그 영향이 미미한 것으로 나타났다.