<학술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.11.1447** ISSN 1226-4873

U 자형 전자석을 사용하는 자기부상열차의 횡진동 저감 연구§

한종부* · 김기정* · 한형석**† · 김성수*
* 충남대학교 메카트로닉스공학과, ** 한국기계연구원

Lateral Vibration Reduction of a Maglev Train Using U-shaped Electromagnets

Jong-Boo Han*, Ki-Jung Kim*, Hyung-Suk Han**† and Sung-Soo Kim*
* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam Nat'l Univ.
** KIMM

(Received May 2, 2012 ; Revised July 27, 2012 ; Accepted August 2, 2012)

Key Words: Urban Maglev train (도시형 자기부상열차), U-shaped electromagnet (U 자형 전자석), Lateral vibration (횡진동)

초록: 도시형 자기부상열차는 U 자형 전자석만을 사용하여 부상공극을 일정하게 유지하며 주행한다. U 자형 전자석은 그 형상 특성으로 인하여 전자석 위치에 따라 안내력을 동시에 갖기 때문에 능동적 횡공극 제어가 없이도 차량을 레일에 따라 안내할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 횡공극을 제어하기 않기 때문에 횡진동이 증가하여 승차감 및 주행안정성에 악영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 능동제어가 없이도 횡진동을 저감시키기 위한 방법으로 횡댐퍼 적용 효과에 대한 분석이 이루어진다. 이를 위하여 자기부상열차의 횡방향 고유진동특성을 우선 해석하고, 횡방향 댐퍼를 설치했을 때의 진동저감 효과 분석이 이루어진다. 정확한 횡진동 예측을 위하여 자기부상열차의 3 차원 다물체 동역학 모델을 사용하였다. 본 논문의 결과를 통해서 자기부상열차의 횡진동 저감을 위한 횡댐퍼 채택 제안에 활용하고자 한다.

Abstract: For an electromagnetic suspension (EMS)-type urban Maglev train using U-shaped electromagnets, both the vertical and the lateral air gaps for levitation are maintained only by the electromagnet. The train can run over curved rails without active lateral air gap control because the U-shaped electromagnet simultaneously produces both a levitation force and a guidance force, which is dependent on the levitation force. Owing to the passive control of the lateral air gap, the lateral vibration could exceed the limits of the lateral air gap and acceleration. In this study, dynamic analysis of a Maglev train is carried out, and the effectiveness of a lateral damper for vibration reduction is investigated. To more accurately predict the lateral vibration, a Maglev vehicle multibody model including air-sparing, guideway irregularities, electromagnets, and their controls is developed.

1. 서 론

자기부상열차는 전자석과 선형전동기를 이용하여 레일로부터 부상하여 주행하는 무접촉 교통 수단이다.(1)

현재 국내에서 개발중인 도시형 자기부상열차는 상전도흡인식 (Electromagnetic suspension) 부상방식과 선형유도전동기(Linear induction motor)를 이용한 추진방식을 사용하고 있다. 상전도흡인식 부상방식은 차량의 대차에 설치된 U 자 형태의 전자석과 강자성체인 가이드레일 사이의 흡인력을 사용하여 차량을 부상시킨다.(1~3) U 자형 전자석은 Fig. 1 과 같이 흡인력이 부상력과 안내력으로 구성된다. 그 결과 부상력만을 능동적으로 제어해도 안내력이 부상력에 따라서 발생하여 안내 제어가 필요하지 않은 장점이 있다.(3)

그러나 안내력을 능동적으로 제어하지 않기 때문에 가이드레일의 형상 외란에 의한 횡방향 진동이 제어되지 않아 승차감이나 부상안정성에 문제

§ 이 논문은 2012 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주 KAL 호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, hshan@kimm.re.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

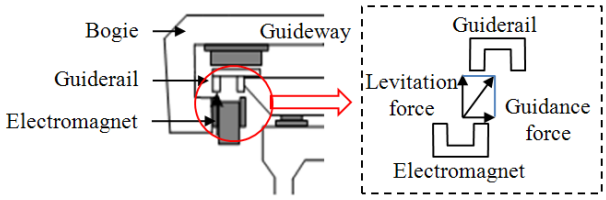

Fig. 1 Principle of U-type electromagnet

Fig. 2 Maglev train multibody dynamics model

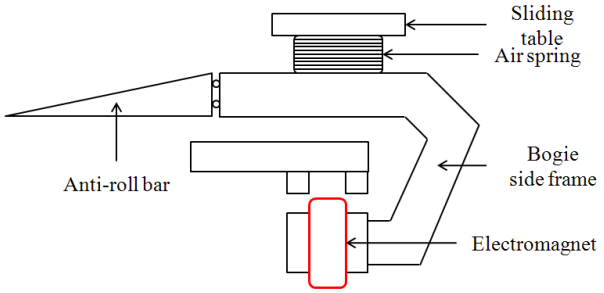

Fig. 3 Configuration of bogie side frame module

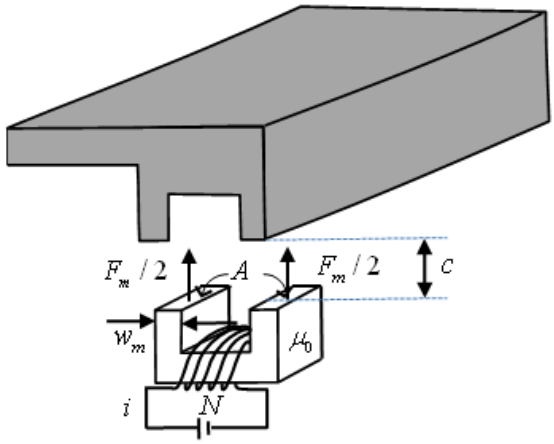

Fig. 4 EMS(Electromagnetic suspension)

를 일으킬 수 있다. 따라서 횡방향 진동을 저감하기 위하여 자기부상열차의 횡방향 고유진동 특성을 규명하고 진동 저감의 방안으로 댐퍼의 채택에 대한 연구가 필요하다.

바퀴식 열차에서는 횡방향 공진으로 임계속도를 결정하는 사행동(hunting motion)에 관한 연구가 수행된 반면 자기부상열차에서는 수직 진동해석을 통한 승차감 및 부상안정성 연구가 주로 수행되었고 횡방향 진동에 대한 연구가 이루어지지 않았다.[4~8]

본 논문에서는 U 자형 전자석을 사용하는 자기부상열차의 횡방향 진동특성을 해석하고, 진동 저감을 위한 횡댐퍼 사용효과를 수치 시뮬레이션으로 분석하였다. 실제적인 해석을 위하여 전자석, 부상제어기, 레일불규칙도를 포함하는 3 차원 다물체 동역학 모델을 사용하였고, 대차와 차량의 진동에 대한 주파수 분석을 통하여 댐퍼에 의한 진동저감 효과를 분석하였다. 본 논문의 연구결과는 횡진동 저감을 위한 댐퍼의 채택여부 판단 및 설계에 활용이 가능하다.

2. 모델링

2.1 자기부상열차 다물체 동역학 모델

실제적이고 정확한 동특성 해석을 위해 자기부상열차에 대한 다물체 동역학 모델을 개발하였다.

현재 국내에서 개발한 자기부상열차는 Fig. 2 와 같이 2 량 1 편성으로 2 개의 차량과 8 개의 대차로 구성되어 있다. 하나의 대차 사이드프레임 모듈은 Fig. 3 과 같이 전자석, 안티롤바로 구성되어 있고, 차량과 연결된 슬라이딩 테이블, 공기 스프링으로 구성되어 있다.

2.2 전자석

전자석은 Fig. 4 과 같은 구조로 'U' 자형 코어에 코일이 감겨져 있다. 이때 이상적인 전자석의 흡인력은 식 (1)과 같이 정의된다.[9]

$$F_m = \mu_0 A\left(\frac{Ni}{2c}\right)^2 = \frac{\mu_0 N^2 A}{4}\left(\frac{i}{c}\right)^2 \qquad (1)$$

여기서 A 는 코어의 단면적(m^2), i 는 전자석의 전류(A), μ_0 는 공기 투자율(H/m), N 은 코일 턴수, c 는 가이드레일과 전자석 사이의 공극(m)를 의미한다. 전자석의 흡인력은 Fig. 5 와 같이 전류의 세기가 일정 크기 이상에서 포화되는 비선형 특성을 갖고 있다. 본 논문에서는 전자석 흡인력(F_m)을 자기부상열차의 정지 부상을 위한

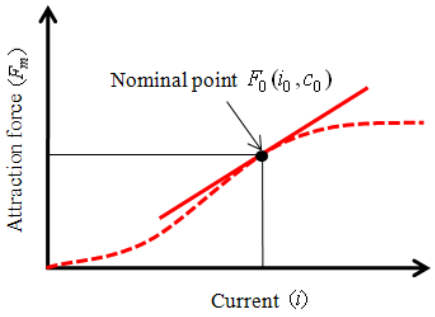

Fig. 5 Linearization of attraction force

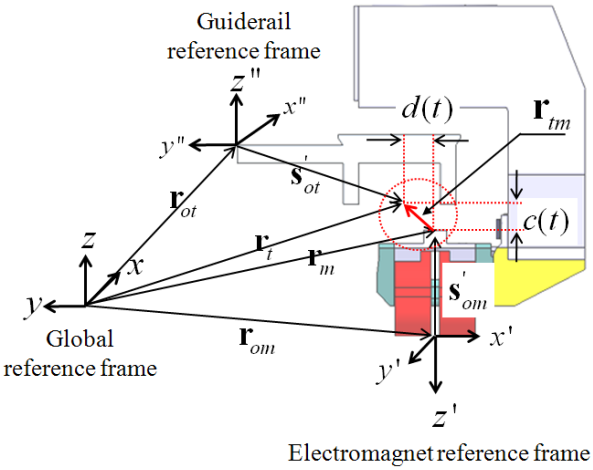

Fig. 6 Coordinate definition

공칭 전류(i_0) 와 공칭 공극(c_0)을 기준으로 선형화된 함수를 사용하였다.

부상공극을 제어하기 위한 전자석 흡인력 $F_m(t)$ 은 식 (2)와 같이 열차의 중량과 동일한 크기의 $F_0(i_0, c_0)$ 와 변화된 공극을 제어하기 위한 힘 $\Delta F_m(\Delta i(t), \Delta c(t))$ 의 합으로 표현할 수 있다. 또한 Kirchhoff law 에 의해 제어입력 전압의 변화량 Δv 의 식을 $\Delta \dot{i}(t)$ 으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.[9]

$$\begin{aligned} F_m(t) &= F_0 + \Delta F_m \\ &= \frac{\mu_0 A N^2}{4}\left(\frac{i_0}{c_0}\right)^2 + k_z \Delta c(t) - k_i \Delta i(t) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\Delta \dot{i}(t) = \frac{k_c}{k_i}\Delta \dot{c}(t) - \frac{R}{L_0}\Delta i(t) + \frac{1}{L_0}\Delta v(t) \tag{3}$$

여기서,

$L_0 = \dfrac{\mu_0 N^2 A}{2c_0}$, $k_i = \dfrac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_0^{\,2}}$, $k_c = \dfrac{\mu_0 N^2 A i_0^{\,2}}{2c_0^{\,3}}$

F_0 : *Ideal levitation force (N)*

ΔF_m : *Controlled electromagnet force (N)*

i_0 : *Nominal current (A)*

c_0 : *Nominal air gap (m)*

식 (2)에서 계산한 전자석 흡인력은 가이드레일과 전자석의 위치에 따라 부상력과 안내력을 식 (4), (5)와 같이 유도할 수 있다.[9]

$$F_y = F_m \times \left[-\frac{2c(t)}{\pi \omega_m}\tan^{-1}\left(\frac{d(t)}{c(t)}\right)\right] \tag{4}$$

$$F_z = F_m \times \left[1 + \frac{2c(t)}{\pi \omega_m} + \frac{2d(t)}{\pi \omega_m}\tan^{-1}\left(\frac{c(t)}{d(t)}\right)\right] \tag{5}$$

여기서 F_y 는 안내력(N), F_z 는 부상력(N), c 는 부상공극(m), d 는 횡공극(m), ω_m 은 전자석 폭(m)을 각각 의미 한다.

2.3 공극

식 (4), (5)에서의 $c(t)$, $d(t)$ 을 계산하기 위하여 Fig. 6 와 같이 가이드레일과 전자석 좌표를 설정하였다. 정의된 벡터에 의해 식 (6)과 같은 가이드레일과 전자석의 기구학식을 정의할 수 있고, 식 (7)을 이용하여 제어에 이용할 수 있는 상대변위 값으로 변환하였다.[10]

$$\mathbf{r}_{tm} = \mathbf{r}_t - \mathbf{r}_m = \mathbf{r}_{ot} + \mathbf{A}_t \mathbf{s}'_{ot} - \mathbf{r}_{om} - \mathbf{A}_m \mathbf{s}'_{om} \tag{6}$$

$$\mathbf{r}'_{tm} = \begin{bmatrix} x'_{tm}(t) \\ d(t) \\ c(t) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_t^T \mathbf{r}_{tm} \tag{7}$$

또한 전자석의 전류의 미분값 $\dot{i}(t)$ 는 식 (3)과 같이 부상공극 속도 $\dot{c}(t)$ 의 함수로 되어 있기 때문에 식 (8), (9)을 이용하여 계산하였다.[10]

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_{tm} &= \dot{\mathbf{r}}_t - \dot{\mathbf{r}}_m = \dot{\mathbf{r}}_{ot} + \dot{\mathbf{A}}_t \mathbf{s}'_{ot} - \dot{\mathbf{r}}_{om} - \dot{\mathbf{A}}_m \mathbf{s}'_{om} \\ &= \dot{\mathbf{r}}_{ot} + \mathbf{A}_t \tilde{\boldsymbol{\omega}}'_t \mathbf{s}'_{ot} - \dot{\mathbf{r}}_{om} - \mathbf{A}_m \tilde{\boldsymbol{\omega}}'_m \mathbf{s}'_{om} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\dot{\mathbf{r}}'_{tm} = \begin{bmatrix} \dot{x}'_{tm}(t) \\ \dot{d}(t) \\ \dot{c}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_t^T \dot{\mathbf{r}}_{tm} \tag{9}$$

2.4 부상제어기

부상제어를 위해 식 (10)과 같은 제어 전압 변

화량 $\Delta v(t)$의 계산을 5 개의 상태관측변수를 이용한다. 여기서 $\Delta\hat{z}$ 는 대차의 관측변수이고 $\Delta\hat{c}$ 는 관측 부상공극이다.[1,2]

$$\Delta v(t) = k_1\Delta\hat{\ddot{z}}(t) + k_2\Delta\hat{\dot{z}}(t) + k_3\Delta\hat{z}(t) + k_4\Delta\hat{\dot{c}}(t) + k_5\Delta\hat{c}(t) \tag{10}$$

여기서,

$\Delta\hat{\ddot{z}}(t)$: *Observed acceleration*

$\Delta\hat{\dot{z}}(t)$: *Observed velocity*

$\Delta\hat{z}(t)$: *Observed position*

$\Delta\hat{\dot{c}}(t)$: *Observed air gap velocity*

$\Delta\hat{c}(t)$: *Observed air gap*

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 : *Control gains*

상태 궤환에 이용되는 5 개의 관측 상태 변수 즉, $\Delta\hat{z}(t), \Delta\hat{\dot{z}}(t), \Delta\hat{z}(t), \Delta\hat{\dot{c}}(t), \Delta\hat{c}(t)$ 는 다음 식 (11), (12)와 같이 실측 가속도 $\Delta\ddot{z}$ 와 부상 공극 Δc 을 이용하는 필터에 의하여 추정한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{o_1}(t) \\ \dot{x}_{o_2}(t) \\ \dot{x}_{o_3}(t) \\ \dot{x}_{o_4}(t) \\ \dot{x}_{o_5}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ -\frac{1}{T_1} & -\frac{V_1}{T_1} & 0 & \frac{V_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & -\frac{V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{V_3}{T_4} & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o_1}(t) \\ x_{o_2}(t) \\ x_{o_3}(t) \\ x_{o_4}(t) \\ x_{o_5}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{z}_1 \\ \Delta c \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{\ddot{z}}_1(t) \\ \Delta\hat{\dot{z}}_1(t) \\ \Delta\hat{z}_1(t) \\ \Delta\hat{\dot{c}}(t) \\ \Delta\hat{c}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -V_1 & 0 & V_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o_1}(t) \\ x_{o_2}(t) \\ x_{o_3}(t) \\ x_{o_4}(t) \\ x_{o_5}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{z} \\ \Delta c \end{bmatrix} \tag{12}$$

여기서 $V_1 \sim V_3$ 와 $T_1 \sim T_5$ 는 5 개의 관측 상태변수와 댐핑을 관측하는데 있어서 차단주파수(cut-off frequency)를 결정하는 파라미터로 부상제어 시스템에서 중요한 변수이다.[10]

2.5 자기부상열차 동특성 해석

전 절에서 설명한 자기부상열차의 다물체동역학 모델과 전자석 모델, 제어모델을 Fig. 7 과 같은 과정으로 해석이 이루어진다. 여기서, 다물체 동역학 해석 프로그램은 Virtual Lab. Motion 프로그램을 이용하였으며,[11] 개발된 전자석 모델, 제어기 모델을 서브루틴(user define subroutine)과 연성으로 해석하였다. 다물체 동역학 모델에서 해석된 위치, 속도, 가속도 값을 서브루틴에서 감지하여 각 전자석과 가이드 레일간의 공극 및 공극 속도를 식 (6)~(9)를 이용하여 계산하고, 식 (10)~(12)의 부상제어를 위한 상태방정식 및 전압방정식을 이용하여 제어전압 (Δv)을 추정한다. 또한 추정된 제어 전압으로 얻은 전류값과 측정 공극값을 식 (2)~(5) 과정을 통해 자기부상열차 부상제어를 위한 전자석의 부상력과 안내력을 각각 계산한다. 계산된 전자석 힘은 자기부상열차 다물체 동역학 모델의 외력으로 인가하여 전체 시스템 운동 방정식 유도 및 계산한다.[11]

3. 진동 해석

자기부상열차의 횡방향 진동특성을 분석하기 위하여 가이드레일 불규칙도를 계단함수(step function (진폭: 1mm))으로 입력하고, 대차와 차량의

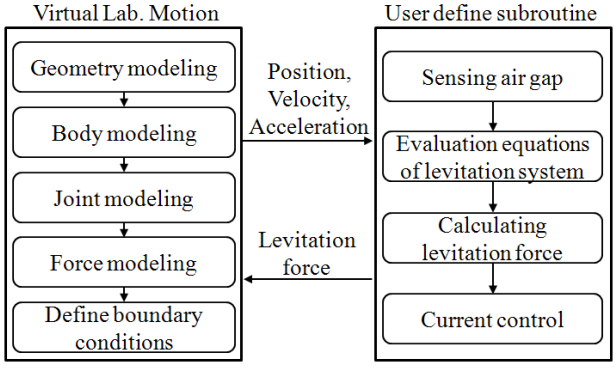

Fig. 7 Dynamic analysis process for Maglev vehicle

횡방향 가속도 응답을 분석하였다. FFT 분석은 횡공극 가속도와 차량 횡가속도에 대해 수행하였고, 10Hz 이내의 응답만 분석하였다.

해석 결과 Fig. 8 의 실선으로 표기된 것과 같이 대차의 경우 1, 2 차 진동모드가 3.6Hz, 5Hz 에서 각각 확인되었다. 대차의 1 차 진동모드는 Yaw 모드를 나타냈다. 2 차 진동모드는 횡방향 진동형이다.

차체의 횡방향 가속도의 주파수 응답은 Fig. 8 에서 점선으로 표기하였다. 진동 분석결과 0.5Hz 와 5Hz 에서 각각 1, 2 차 진동모드를 갖는 것으로 해석되었다.

여기서 2 차 모드(5Hz)가 대차와 상호작용으로 발생되는 횡진동 모드이다. 따라서 차량과 대차 사이의 댐퍼 설치를 통해 2 차 진동모드의 진폭을 줄일 수 있고, 이를 통해 차량의 승차감 및 주행 안정성을 높일 수 있다.

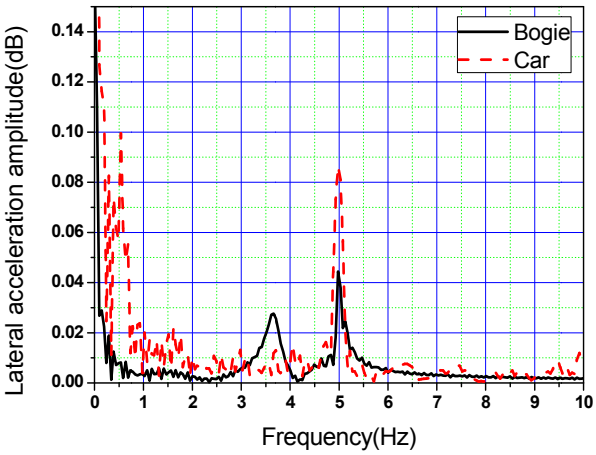

Fig. 8 Lateral acceleration responses

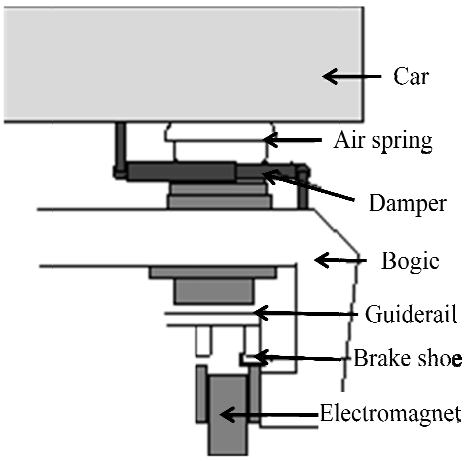

Fig. 9 Installation of lateral damper

4. 횡댐퍼 설계

4.1 차량-대차 횡댐퍼 설계

차량과 대차 사이의 횡댐퍼를 Fig. 9 와 같이 각 공기스프링의 앞쪽에 설치한다고 가정하였다.

감쇠계수는 식 (13)을 이용하여 계산하였다.

$$c = (2m_b\omega_n)\zeta \tag{13}$$

여기서 m_b 는 대차의 질량, ω_n 는 전 절에서 분석한 2 차 진동모드의 고유진동수, ζ 는 감쇠비로 0.2 와 0.3 을 적용하여 감쇠계수(c)를 각각 2000N/m/s, 3000N/m/s 값을 사용하였다. [12]

4.2 효과 분석

해석 결과 Fig. 10 과 같이 대차의 2 차 횡방향 진동모드(5Hz)의 진폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

결과적으로 횡댐퍼를 설치 시 차량과 대차의 2 차 진동 모드의 진폭을 감소시킬 수 있는 것을 볼 수 있다. 또한 횡댐퍼가 대차의 1 차 진동모드의 크기에도 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서 대차의 1 차 진동 모드(Yaw 모드)가 주행시 대차와 차량에 어떠한 영향을 미치는지 분석이 필요하다. 다음 장에서는 가이드레일의 외란 조건에 대한 자기부상열차의 주행해석을 통해 1 차 진동모드 (3.6Hz)가 부상 안정성에 미치는 영향을 분석 하였다.

5. 주행 해석

5.1 가이드레일 외란 조건

가이드레일은 설치공차, 하중에 대한 처짐 및 표면조도 등으로 수직방향과 횡방향의 불규칙한

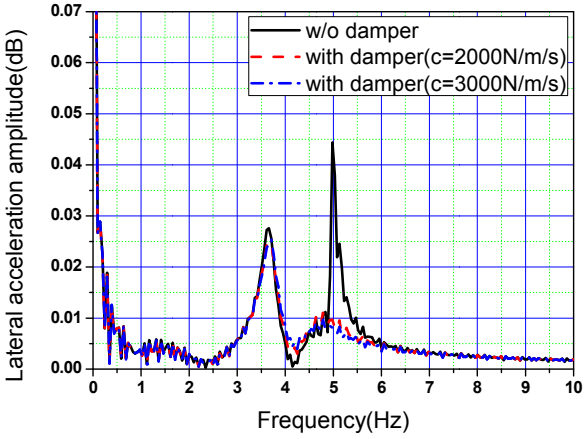

Fig. 10 Acceleration responses of the bogie with lateral damper

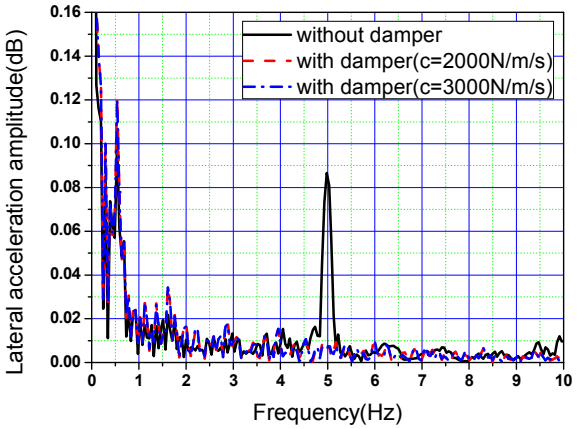

Fig. 11 Acceleration responses of the car-body with lateral damper

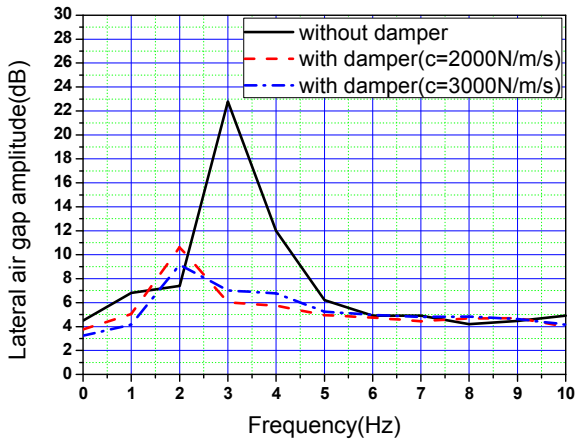

Fig. 12 Maximum lateral air gap of the front bogie

형상을 갖고 있다. 본 논문에서는 횡방향 댐퍼 채택을 목적으로 가이드레일의 횡방향 특성만 고려하였다. 이때 차량과 가이드웨이의 횡방향 탄성에 의한 진동은 매우 미비하기 때문에 고려하지 않았다. 즉, 가이드레일의 횡방향 불규칙도를 외란으로 입력하여 자기부상열차의 주행 안정성 에 대한 해석을 수행하였다. 대한 여기서 차량의 주행 속도에 따라 달라지는 불규칙특성을 1~10Hz 까지 다르게 설정하여 주행시 동특성을 비교해 보았다. 해석에 사용된 가이드레일 불규칙도 프로파일은 Versine 으로 생성되었고, 진폭은 ±3mm 의 값으로 설정하였다.[11]

5.2 주행해석 비교

Fig. 12 는 가이드레일 입력 외란 주파수에 대한 최대 횡방향 공극을 측정한 결과이다. 횡댐퍼가 없을 경우 약 3Hz 의 외란에서 22mm 의 공극이 발생하는 것을 알 수 있다. 4 장에서 설계된 횡 댐퍼를 설치할 경우 3Hz 부근에서 약 70% 감소된

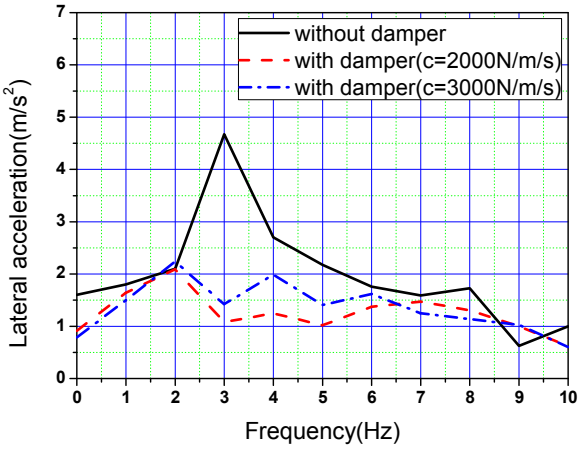

Fig. 13 Maximum lateral acceleration of the front bogie

6mm 이내의 값으로 줄어들며, 2Hz 에서 10mm 의 공극값을 측정되었다.

Fig. 13 은 입력 외란 주파수에 대한 대차의 최대 횡방향 가속도 값을 나타낸다. 공극측정 결과와 마찬가지로 댐퍼가 없을 경우 3Hz 부근에서 가장 큰 가속도 값이 나타나며, 댐퍼를 설치할 경우 약 40% 정도 감소하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 가이드레일 외란 조건이 3Hz 부근에서 발생할 경우 자기부상열차의 횡공극이 과도한 크기를 갖는다. 이를 방지하기 위한 횡댐퍼가 필요하다는 결과를 알 수 있다.

6. 결 론

U 자형 전자석을 사용하는 자기부상 열차는 횡방향 힘이 수동적으로 발생하기 때문에 제어가 필요하지 않지만, 가이드레일의 불규칙 특성에 따라 횡방향 진동이 크게 나타날 수 있는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다. 대차와 차량의 1, 2 차 고유진동수를 각각 확인하였고, 대차와 차량간의 관계로 발생하는 5Hz 부근의 진동을 횡댐퍼 설치를 통해 줄일 수 있고, 승차감을 높이는 효과를 얻을 수 있다. 또한 주행 시뮬레이션을 통해서 가이드웨이 외란 조건이 3Hz 일 경우 횡공극 값이 약 22mm 가 발생하여 설계조건(±12mm)을 만족하지 못하였고, 이를 횡댐퍼를 통하여 약 70% 이상 줄이는 효과를 얻을 수 있었다. 3Hz 의 외란은 고속주행시 발생 할 수 있으며, 특히 가이드웨이 시공이 어려운 곡선 부분에서 발생할 가능성이 높다.[10] 따라서 횡댐퍼의 설치는 주행 안정성 측면에서도 좋은 효과를 기대할 수 있다.[13,14]

결과적으로 본 논문의 결과를 통하여 U 자형 전자석을 사용하는 자기부상열차의 횡방향 진동을 횡댐퍼를 이용하여 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

참고문헌

(1) Han, H. S., Yim, B. H., Lee, J. K., Hur, Y. C. and Kim S. S., 2009, "Effects of Guideway's Vibration Characteristics on the Dynamics of a Maglev Vehicle," *Vehicle System Dynamics*, Vol.47, No.3, pp. 309~234.

(2) Yim, B. H. and Han, H. S., 2008, "Curve Negotiation Analysis of a Maglev Vehicle Utilizing Electromagnetic Suspension System," Asian Conference on Multibody Dynamics.

(3) Lee, J. S., 2007, "Dynamic Interaction Analysis Between Actively Controlled Maglev and Guideway," Ph.D. Thesis, Sungkyunkwan University.

(4) Yabuno, H., Okamoto, T. and Aoshima, N., 2002, "Effect of Lateral Stiffness on Nonlinear Characteristics of Hunting Motion of a Railway Wheelset," *Physics and Astronomy*, Vol. 37, No. 6, pp. 555~568.

(5) CHI, M., Zhang. W., Zeng. J., Jin, X. and Zhu, M., 2008, "Influence of Hunting Motion on Ride Quality of Railway Vehicle," *Journal of Vibration Engineering*.

(6) Han, H. S., 2003, "A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle," *JSME International*, Vol. 46, No. 4, pp. 1497~1501.

(7) Lee, J. S., Lim, D. J. and Kim, M.Y., 2009, "Moving Urban Maglev-Vehicle Analysis Considering Non-linear Magnetic Levitational Force Effect," COSEIK.

(8) Yim, B. H., Han, H. S., Lee, J. K. and Kim, S. S., 2009, "Curving Performance Simulation of an EMS-Type Maglev Vehicle," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 47, No. 10, pp. 1287~1304.

(9) Sinha, P. K., 1987, *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom.

(10) Han, H. S., Yim, B. H., Lee, N. J., Kim, Y. J. and Kim, B. H., 2008, "Prediction of Ride Quality of a Maglev Vehicle Using a Full Vehicle Multi-Body Dynamic Model," *Vehicle System Dynamics, Submitted for Publication.*

(11) LMS Virtual.lab Motion Users Manual, LMS International.

(12) Moon, W. K., Kim, H. W., Yoo, W. S. and Huh, N., 2007, "ADAMS Simulation to Determine Spring and Damper for an Omni-Directional Robot," KSAE, pp. 57~61.

(13) Hur, H. M., Park, J. H. and You, W. H., 2011, "Analysis on the Behavior of the Lateral Damper of the Roll-Stock Running Railway," KSPE, pp.1007~1008.

(14) Jeon, J. Y., Hur, H. M., Shin, Y. J., You, W. H. and Koo, J. S., 2011, "A Study on Lateral Damper for Improving Running Performance of Subway Vehicle," pp. 1856~1861.

(15) Coenraad, E., 2001, *Modern Railway Track Second Edition*, C. Esveld, Netherlands.

(16) Shabana, A. A., 2007, *Railroad Vehicle Dynamics: A Computational Approach*, Taylor & Francis Group, USA.