

가이드웨이 진동 특성이 자기부상열차 동특성에 미치는 영향

Effects of Guideway's Vibration Characteristics on Dynamics of a Maglev Vehicle

한형석* · 임봉혁* · 이남진** · 허영철*** · 권정일***

Hyungsuk Han, Bonghyuk Yim, Namjin Lee, Youngchul Hur and Jungil Kwon

(2007년 9월 28일 접수 ; 2008년 1월 29일 심사완료)

Key Words : Guideway(가이드웨이), Vibration(진동), Maglev(자기부상열차), Air Gap(공극)

ABSTRACT

The electromagnet in Maglev vehicles controls the voltage in its winding to maintain the air gap, a clearance between the electromagnet and guideway, within an allowable deviation, with strongly interacting with the flexible guideway. Thus, the vibration characteristics of guideway plays important role in dynamics of Maglev vehicles using electromagnet as an active suspension system. The effects of the guideway's vibrational characteristics on dynamics of the Maglev vehicle UTM-01 are analyzed. The coupled equations of motion of the vehicle/guideway with 3 DOFs are derived. Eigenvalues are calculated and frequency response analysis is also performed for a clear understanding of the dynamic characteristics due to guideway vibration characteristics. To verify the results, tests of the urban Maglev vehicle UTM-02 are carried out. It is recommended that the natural frequency of the guideway be minimized and its damping ratio in the Maglev vehicle with a 5-states feedback control law as a levitation control law.

1. 서 론

상전도 흡인식 자기부상열차의 현가 시스템은 전자석과 가이드웨이 사이의 간극 즉 부상 공극(air gap)을 일정한 범위 내로 유지하기 위하여 전압을 제어하는 능동 현가 시스템이다. 이러한 상전도 흡인식 자기부상열차는 도시형 및 도시간 레도 교통수단으로 상용화되고 있다^(1~3). 일반적으로 이러한 방식의 자기부상열차는 Fig. 1의 예와 같이 교각으로 지지되는 가이드웨이를 주행한다. 가이드웨이가 교각으로 지지되어 있기 때문에 구조상 차량 주행 중

가이드웨이는 탄성 변형을 일으켜 진동하게 된다. 이러한 가이드웨이의 진동 특성은 전자석 현가 시스템과 동적 상호작용을 일으켜 공진이 발생하거나 부상 시스템이 이 진동을 추종하지 못 할 수 있다. 이러한 불안정 현상의 존재를 시연하기 위하여 고의로 부상 제어기의 gain을 비최적 값으로 설정하여 Fig. 2와 같이 부상 공극을 계측하였다. Fig. 2에서와 같이 전자석과 가이드웨이가 동적 상호작용으로 인한 불안정성에 의하여 부상 공극 응답이 발산하는 것을 볼 수 있다. 이러한 불안정성을 최소화하기 위한 고려사항 중의 하나가 바로 가이드웨이의 진동특성이라고 할 수 있다. 그러므로 가이드웨이 높이 변동을 갖는 자기부상열차 시스템에 있어서 가이드웨이의 진동특성에 의한 시스템의 동특성에의 영향을 분석하여 공진이 발생하지 않도록, 그리고 가이드웨이를 전자석이 추종하도록 전기적, 기계적 최적 설계가

† 교신저자 : 정희원, 한국기계연구원 진동충격연구팀

E-mail : hshan@kimm.re.kr

Tel : (042)868-7814, Fax : (042)868-7418

* 충남대학교 대학원

** (주)현대로템

*** 한국기계연구원

이루어져야 부상 안정성이 향상된다. 일반적인 자기 부상열차/가이드웨이의 동특성 해석은 여러 연구자들에 의하여 이루어졌다. 초기 연구자들은 가이드웨이의 유연성을 고려하면서 능동적 제어 시스템인 전자석 현가 시스템을 등가 스프링-댐퍼로 단순화시켰다. 최근에는 전자석 현가 시스템의 부상 제어 알고리즘을 상세히 고려하는 연구가 수행되었다⁽⁴⁻⁷⁾. 그러나 적용한 부상 제어 법칙과 전장품 특성에 따라 가이드웨이 진동 특성에 의한 차량의 동특성에의 영향이 다르기 때문에 부상 제어 시스템마다 동특성 해석이 필요하다고 할 수 있다. 이 논문은 5개의 관측 상태변수 궤환 제어를 사용하는 도시형 상전도 흡인식 자기부상열차 UTM-02의 가이드웨이 진동 특성에 따른 자기부상열차/가이드웨이 동특성 해석에 목적이 있다. 동특성 해석을 위하여 정상상태에서의 자기부상열차/가이드웨이 연성 운동방정식을 정식화하였다. 시스템 운동방정식을 이용하여 고유치 해석이 이루어지며, 차량의 동특성을 명확히 이

해하기 위하여 가이드웨이 높이 변동과 차량 동특성 간의 전달함수를 이용한 주파수 응답 해석을 수행하였다. 해석 결과의 경향을 검증하기 위하여 UTM-02의 실차 실험을 수행하였다. 이 논문의 결과는 현재 국내에서 진행 중인 도시형 자기부상열차 실용화 사업에 적용하여 현가 시스템 및 가이드웨이 진동 특성 설계에 이용 가능할 것으로 기대한다.

2. 모 델

2.1 개요

Fig. 3은 전자석 현가 시스템을 사용하는 자기부상열차 UTM-02와 가이드웨이를 도식적으로 보여주고 있다. 또한 Fig. 4는 대차 구조를 보여주고 있다. 대차는 1차 현가장치인 전자석과 2차 현가장치인 공기 스프링과 감쇠기로 구성된다. 대차는 전자석에 의한 부상력 $F(i,c)$ 에 의하여 가이드웨이에 매달려 주행하게 된다. Fig. 3과 같은 자기부상열차 시스템에서 미관과 가이드웨이 건설비용을 줄이기 위하여 가느다란 가이드웨이 형상이 추천된다. 이러한 구조적 특성은 가이드웨이의 유연성을 무시할 수 없으며, 결과적으로 가이드웨이 진동과 전자석 부상 시스템 사이의 동적 상호작용이 일어난다. 이 동적



Fig. 1 Urban maglev vehicle UTM-02 running over the elevated guideway

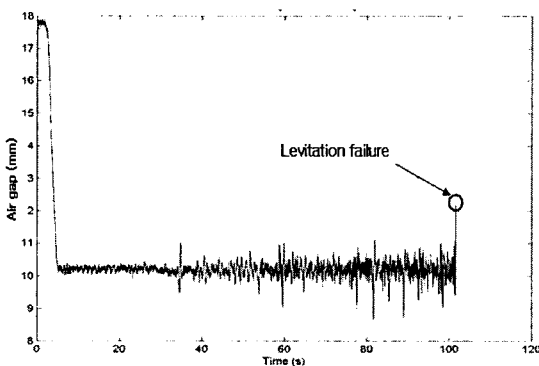


Fig. 2 Levitation failure intended to demonstrate the Maglev vehicle/guideway interaction

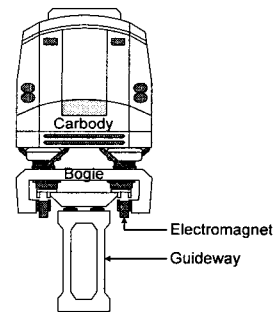


Fig. 3 Cross-sectional view of a Maglev vehicle system with electromagnetic suspension

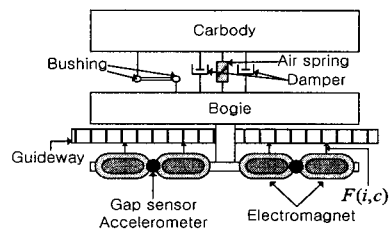


Fig. 4 Bogie

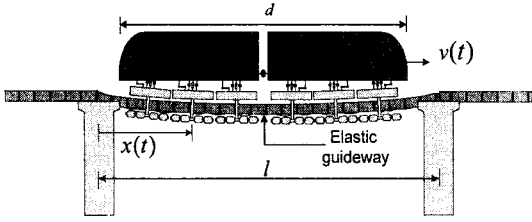


Fig. 5 Coupling between a moving vehicle and the guideway

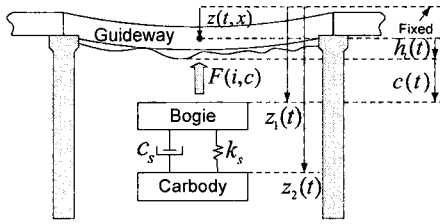


Fig. 6 Single-point suspension on a simply supported beam

상호작용 현상을 모델하기 위하여 Fig. 5, 6과 같은 모델을 이용한다. 전자석에 의한 부상력은 일반적으로 패드길이(pad length) d 에 걸친 분포하중이다. 이러한 자기부상열차/가이드웨이의 정상상태 동적 상호작용 해석을 위하여 Fig. 6과 같은 전자석 1개에 대한 단순모델이 이용된다. 차량의 단순 모델은 전자석 1개가 분담하는 대차와 차체의 질량으로 구성된다. 이러한 현가 시스템의 동적 상호작용 특성을 해석하기 위해서는 유연 가이드웨이, 부상 시스템 및 차량의 연성 모델이 필요하다.

2.2 부상력

전자석에 의한 부상력 $F(i, c)$ 는 일반적으로 비선형 함수이나 평형점 즉 공칭점 (i_0, c_0) 에서의 선형화 모델이 자주 이용된다⁽⁸⁾. 평형 위치에서의 선형화에 따른 부상력과 전류의 변화량은 식 (1), (2)와 같이 정의된다⁽⁸⁾.

$$\Delta F(\Delta i(t), \Delta c(t)) = -k_i \Delta i(t) + k_c \Delta c(t) \quad (1)$$

$$\Delta \dot{i}(t) = \frac{k_c}{k_i} \Delta \dot{c}(t) - \frac{R}{L_0} \Delta i(t) + \frac{1}{L_0} \Delta v(t) \quad (2)$$

여기서,

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A_c}{2c_0}$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A_c i_0}{2c_0^2}$$

$$k_c = \frac{\mu_0 N^2 A_c i_0^2}{2c_0^3}$$

F : Levitation force

A_c : Section area of electromagnet (m^2)

μ_0 : Permeability factor

N : Number of turn of magnet coil (turn)

i_0 : Nominal current (A)

c_0 : Nominal air gap (m)

c : Air gap (m)

v : Voltage (V)

R : Resistance (Ω)

2.3 가이드웨이

유연한 가이드웨이의 동특성을 표현하는 방법의 하나로 모드중첩법이 이용될 수 있다. 모드중첩법에 의한 탄성 빔의 변형은 무한개의 모드형상 $z_n(x)$ 과 모드계수 $a_n(t)$ 의 곱의 합으로 정의된다. 단순 지지보의 경우 식 (3)과 같이 표시된다.

$$z(t, x) = \sum a_n(t) z_n(x) \quad (3)$$

여기서,

$$z_n(x) = \sin \lambda_n x$$

$$\lambda_n = \frac{n\pi}{l}$$

식 (3)에서 n 는 모드 수이다. 가이드웨이는 Euler-Bernoulli simple beam으로 표현할 수 있으며 분포하중에 대한 각 모드의 응답은 식 (4)와 같다.

$$\frac{d^2 a_n(t)}{dt^2} + 2\xi_n \omega_n \frac{da_n(t)}{dt} + \omega_n^2 a_n(t) = \frac{2}{\rho A_b l} \int_0^l F(i, c) \sin \frac{n\pi}{l} x dx \quad (4)$$

여기서,

ω_n : n th guideway modal frequency

ξ_n : n th guideway modal damping ratio

ρ : Beam mass density

A_b : Beam cross-sectional area

차량은 $\frac{l}{2}$ 위치에서 정지 부상 상태이고, $n=1$, $d=l$ 일 때 $F(i,c)$ 가 d 에 걸쳐 같은 크기로 분포한다 면 식 (4)를 이용하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{z}(t) + 2\xi_1\omega_1\dot{z}(t) + \omega_1^2z(t) = \frac{48 \times 4 \times F(i,c)}{\rho A_b l^3 \pi} \quad (5)$$

여기서, $F(i,c)$ 는 전자석 1개의 부상력을 나타내며, 2량 1편성으로 확장될 경우 48개의 전자석이 있기 때문에 식 (5)와 같이 표현된다.

2.4 차량 모델

2개의 질량으로 단순화된 차량에 대한 운동방정식은 식 (6), (7)로 표시할 수 있다.

$$m_1\Delta\ddot{z}_1(t) = F(\Delta i(t), \Delta c(t)) + c_s(\Delta\dot{z}_2(t) - \Delta\dot{z}_1(t)) + k_s(\Delta z_2(t) - \Delta z_1(t)) \quad (6)$$

$$m_2\Delta\ddot{z}_2(t) = -c_s(\Delta\dot{z}_2(t) - \Delta\dot{z}_1(t)) - k_s(\Delta z_2(t) - \Delta z_1(t)) \quad (7)$$

차량 운동방정식을 상태방정식 형태로 표현하기 위하여 식 (1), (2), (6), (7)을 조합하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{c}(t) \\ \Delta\dot{z}_1(t) \\ \Delta\ddot{z}_1(t) \\ \Delta\dot{z}_2(t) \\ \Delta\ddot{z}_2(t) \\ \Delta\dot{i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_c}{m_1} & -\frac{k_s}{m_1} & -\frac{c_s}{m_1} & \frac{k_s}{m_1} & \frac{c_s}{m_1} & -\frac{k_i}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{k_s}{m_2} & \frac{c_s}{m_2} & -\frac{k_s}{m_2} & -\frac{c_s}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_c}{k_i} & 0 & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta c(t) \\ \Delta z_1(t) \\ \Delta z_1(t) \\ \Delta z_2(t) \\ \Delta z_2(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_0} \end{bmatrix} [\Delta v(t)] + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -k_c \\ k_i \end{bmatrix} [\Delta \dot{h}_t(t)] \quad (8)$$

2.5 부상 제어

부상 공극 변화량 $\Delta c(t)$ 를 허용 범위내로 유지하기 위하여 UTM-02는 5개의 관측 상태변수를 이용한

전압 $\Delta v(t)$ 을 제어하는 방법을 이용한다. 즉 식 (9)를 이용하여 식 (8)의 전압 $\Delta v(t)$ 를 결정한다.

$$\Delta v(t) = k_1\ddot{z}_1(t) + k_2\dot{\Delta z}_1(t) + k_3\Delta\dot{z}(t) + k_4\Delta\dot{c}(t) + k_5\Delta\hat{c}(t) \quad (9)$$

여기서,

- $\ddot{\Delta z}_1(t)$: Observed acceleration
- $\dot{\Delta z}_1(t)$: Observed velocity
- $\Delta\dot{z}_1(t)$: Observed position
- $\Delta\dot{c}(t)$: Observed air gap velocity
- $\Delta\hat{c}(t)$: Observed air gap
- k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 : Control gains

상태 제환에 이용되는 5개의 관측 상태 변수 즉, $\Delta\ddot{z}_1(t), \Delta\dot{z}_1(t), \Delta\dot{z}_2(t), \Delta\dot{c}(t), \Delta\hat{c}(t)$ 는 식 (10), (11)과 같이 단지 실측 가속도 $\Delta\ddot{z}(t)$ 와 부상 공극 $\Delta c(t)$ 을 이용하는 관측기에 의하여 추정한다⁽⁸⁾.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{o_1}(t) \\ \dot{x}_{o_2}(t) \\ \dot{x}_{o_3}(t) \\ \dot{x}_{o_4}(t) \\ \dot{x}_{o_5}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ -\frac{1}{T_1} & -\frac{V_1}{T_1} & 0 & \frac{V_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & -\frac{V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{V_3}{T_4} & -\frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o_1}(t) \\ x_{o_2}(t) \\ x_{o_3}(t) \\ x_{o_4}(t) \\ x_{o_5}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{z}_1(t) \\ \Delta c(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\ddot{z}_1(t) \\ \Delta\dot{z}_1(t) \\ \Delta\dot{z}_2(t) \\ \Delta\dot{c}(t) \\ \Delta\hat{c}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -V_1 & 0 & V_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o_1}(t) \\ x_{o_2}(t) \\ x_{o_3}(t) \\ x_{o_4}(t) \\ x_{o_5}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 00 \\ 00 \\ 00 \\ 00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\ddot{z}_1(t) \\ \Delta c(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

5개의 관측 상태변수 케환 제어기에서의 핵심은 식(10)과 같은 상태 관측기 설계와 식(9)에서의 제어 게인들의 최적 설계라고 할 수 있다.

2.6 연성 운동방정식

자기부상열차/가이드웨이 연성 운동방정식은 식(5), (8), (10), (11)을 조합하여 유도하게 된다. 연성 운동방정식을 유도하기 위하여 상태변수 벡터를 식(12)와 같이 정의한다.

$$x = [\Delta c, \Delta z_1, \Delta \dot{z}_1, \Delta z_2, \Delta \dot{z}_2, \Delta i, \Delta z, \Delta \dot{z}, x_{o_1}, x_{o_2}, x_{o_3}, x_{o_4}, x_{o_5}] \quad (12)$$

출력을 $y = [\Delta c]$ 로 정의하면 식(13)과 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B \Delta h_t(t) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,

A, B, C : Matrix

이 상태 방정식이 정식화되면 연성 운동방정식에 대한 동특성 해석이 가능하다.

3. 적 용

2장에서 정식화된 자기부상열차/가이드웨이 연성 운동방정식을 이용하여 동특성 해석을 수행한다. Table 1~Table 3은 동특성 해석에 이용된 물성치를 보여주고 있다. 물성치 중에 가이드웨이의 1차 진동 모드의 감쇠비는 $\xi_1=0.005$ 으로 설정하였다. Fig. 1에서와 같은 시험선을 구성하는 가이드웨이들의 감쇠비는 측정 결과, 일반적으로 약 $\xi_1=0.01\sim 0.04$ 의 범위를 나타냈으나 국부적으로 0.01보다 작은 감쇠비를 나타냈기 때문에 약조건을 고려하기 위하여 $\xi_1=0.005$ 를 선정하였다. 가이드웨이는 1@25(길이 25 m, 경간 1)으로 시험선의 표준 가이드웨이이다. 자기부상열차/가이드웨이 연성 시스템의 기본적 동특성을 분석하기 위하여 식(13)을 이용하여 고유치 해석을 수행하였으며 고유치 중 관심고유치를 Table 4에 나타냈다. Table 4에서 허수부를 이용하여 진동수를 계산하면 식(13)의 고유진동수는 0.8 Hz, 7.5

Hz, 11.1 Hz임을 알 수 있다. 0.8 Hz는 차체의 고유진동수이며, 7.5 Hz는 가이드웨이, 11.1 Hz는 대차측 전자석 고유진동수를 각각 나타낸다고 할 수 있다. 가이드웨이의 고유진동수와 대차의 고유진동수는 분리가 된 것을 알 수 있다. 가이드웨이의 높이 변동은 가이드웨이 처짐과 불규칙도의 중첩에 의하여 일어난다. 여기서 가이드웨이의 높이 변동 입력 주파수는 차량 속도에 따라 변하기 때문에 가이드웨이 높이 변동 외란 주파수에 따른 동특성을 추가로 분석할 필요가 있다. 이를 위하여 연성 운동방정식에 대한 전달함수를 이용하여 가이드웨이 높이 변동 $\Delta h_t(t)$ 입력에 대한 차량과 가이드웨이의 주파수 응답을 해석하였다. 전달함수는 식(13)에 대한 Laplace변환으로 얻을 수 있으며 공극 변동 응답은 식(14)와 같이 계산되었다.

$$\Delta C(s) = G(s) \Delta H_t(s) \quad (14)$$

여기서,

$$G(s) = \frac{N(s)}{D(s)} : \text{Transfer function}$$

$$\begin{aligned} N(s) = & -s^{13} - 1177s^{12} - 4.4563 \times 10^5 s^{11} \\ & - 7.728 \times 10^7 s^{10} - 7.086 \times 10^9 s^9 \\ & - 3.897 \times 10^{11} s^8 - 1.514 \times 10^{13} s^7 \\ & - 4.956 \times 10^{14} s^6 - 3.535 \times 10^{15} s^5 \\ & - 1.633 \times 10^{16} s^4 - 6.395 \times 10^{13} s^3 \\ & - 88064s^2 + 5.65 \times 10^4 s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D(s) = & s^{13} + 1177s^{12} + 4.563 \times 10^5 s^{11} \\ & + 7.727 \times 10^7 s^{10} + 7.659 \times 10^9 s^9 \\ & + 4.913 \times 10^{11} s^8 + 2.144 \times 10^{13} s^7 \\ & + 7.858 \times 10^{14} s^6 + 1.497 \times 10^{16} s^5 \\ & + 1.537 \times 10^{17} s^4 + 9.235 \times 10^{17} s^3 \\ & + 3.116 \times 10^{18} s^2 + 4.418 \times 10^{18} s \\ & + 6.565 \times 10^4 \end{aligned}$$

$\Delta C(s)$: Air gap

$\Delta H_t(s)$: Height variation

이 전달함수 $G(s)$ 를 이용한 공극 변동 주파수 응답을 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 7에서 가이드웨이 높이 변동 주파수가 높아질수록 공극 변동도 증가하는 것을 알 수 있다. 가이드웨이의 고유진동수에 해당하는 주파수에서는 가이드웨이 진동 특성에 의하여 변동 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 감

쇠비의 영향을 분석하기 위하여 $\xi_1 = 0.001$ 라 가정한 결과 Fig. 8과 같은 응답을 보였다. 감쇠비가 감소할수록 부상 공극 변동은 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 7, Fig. 8과 같은 주파수 응답 특성을 갖기 때문에 가이드웨이 고유진동수는 낮을수록 그리고 감쇠비가 클수록 공극 변동이 작아짐을 알 수 있다. 약 60 Hz 이상에서는 1에 수렴하여 가이드웨이 높이 변동 입력이 바로 공극 변동 응답이 되는 것을 알 수 있다. 즉, 60 Hz 이상의 가이드웨이 높이 변동 외란 입력에 대하여는 추종하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 주행속도 향상에 있어서 요구되는 특성이라고 할 수 있다. 약 13.5 Hz에서는 최대값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그런 후 감소하는 경향을 보이거나 Phase 지연이 수반되기 때문에 결과적으로 부상 공극 제어에 문제가 발생할 수 있다고 할 수 있다. 좀더 주파수 응답을 분석하기 위해서 차체 및 가이드웨이의 주파수 응답을 Fig. 9, Fig. 10에서 각각 보여주고 있다. 승차감에 영향을 미치는 차체의 수직 가속도 Fig. 9의 경우, 부상 공극 응답과 유사한 경향을 보이거나 가이드웨이의 고유진동수에 의한 영향은 매우 작은 것을 알 수 있다. 즉, 승차감 측면에서는 가이드웨이의 고유진동 특성 영향은 작은 것을 알 수 있다. 가이드웨이에서의 응답을 Fig. 10에서 보여 주고 있으며 고유진동수 7.5 Hz에서 크게 증가하는 것을 나타내고 있다. 때문에 가이드웨이의 구조적 감쇠비에 대한 고려가 필요하다고 할 수 있다. 결과적으로 가이드웨이의 진동 특성은 주행 안정성 척도인 부상 공극에 영향을 미치며 고유진동수는 작을수록 반면에 감쇠비는 클수록 부상 공극 변동이 작은 것을 알 수 있다. 반면에 승차감 측면에서는 영향이 작은 것을 알 수 있다. 이러한 부상 공극 응답 경향을 검토하기 위하여 Fig. 11과 같이 실차 실험을 수행하였다. 차량은 Fig. 1에서의 차량이며 Table 5에서와 같이 1차 고유진동수가 다른 2종의 가이드웨이를 대상으로 한다. 실차 실험은 2가지의 조건으로 수행되었는데, 첫 번째 조건은 차량이 부상 상태를 유지하면서 정지한 상태이다(Fig. 11). 두 번째 조건은 저속 약 30 km/h로 주행하는 것이다. 이때 24개의 부상 공극 센서에서의 부상 공극을 계측하여 편차 RMS 평균을 계산하였다. Table 5에서와 같이 가이드웨이의 고유진동수에 따라서 부상 공극 편차 응답이 다르게 나타나는 것을 알 수

있다. 즉, 고유진동수가 높을수록 공극 편차가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 이상의 해석 결과에서 예상할 수 있는 것이다. 그러므로 이 논문에서 대상으로 하는 5개의 관측 상태 변수 궤환

Table 1 Properties of the electromagnet

Item	Specification
Carbody mass (kg)	541.67
Bogie mass (kg)	425.25
Air spring stiffness (N/m)	23000
Damping coefficient (Ns/m)	4250

Table 2 Properties of the levitation control system

Item	Specification
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
N (Turn)	660
A (m ²)	0.04
R (Ω)	1.3
c_0 (m)	0.01
i_0 (A)	21
k_1	27
k_2	405
k_3	0
k_4	28500
k_5	40500
T_1	0.22
T_2	0.011
T_3	0.3439
T_4	0.000242
T_5	0.022
V_1	1.43
V_2	1.1
V_3	0.22

Table 3 Properties of the guideway

Item	Specification
E (N/m ²)	30,000,000,000
I (m ⁴)	0.64673
A (m ²)	1.244
Mass density (kg/m ³)	2805
Span length (m)	25
1st modal damping ratio	0.005

Table 4 Eigenvalues

No.	Eigenvalue		
	$R(\lambda)$	$Im(\lambda)$	Frequency (Hz)
1	-56.04	69.93	11.1
2	-0.46	47.12	7.5
3	-3.94	5.20	0.8

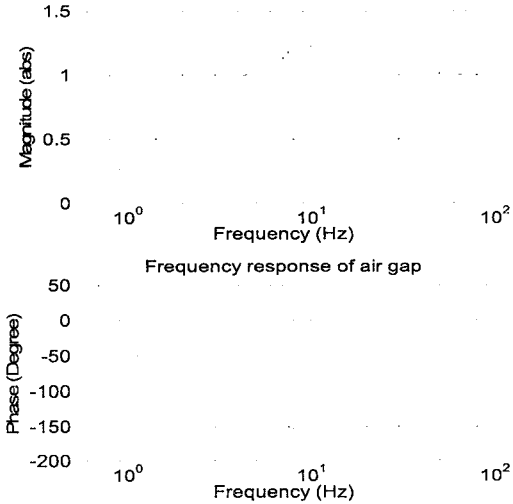


Fig. 7 Frequency responses of air gap to variations of guideway height, $\xi_1 = 0.005$

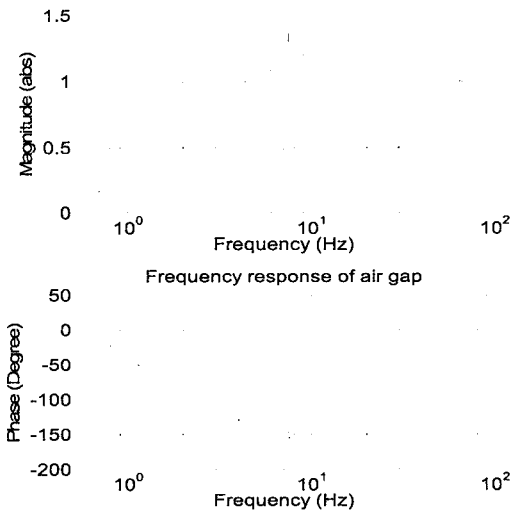


Fig. 8 Frequency responses of air gap to variations of guideway height, $\xi_1 = 0.001$

제어기를 갖는 자기부상열차 UTM-02의 부상 공극 변동을 감소시키기 위해서는 가이드웨이의 고유진동

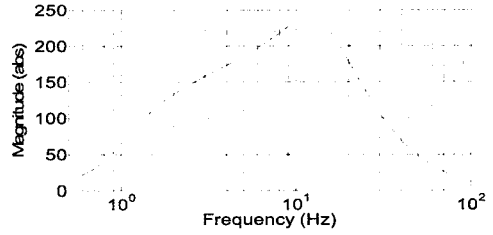


Fig. 9 Frequency responses of car body acceleration to variations of guideway phase

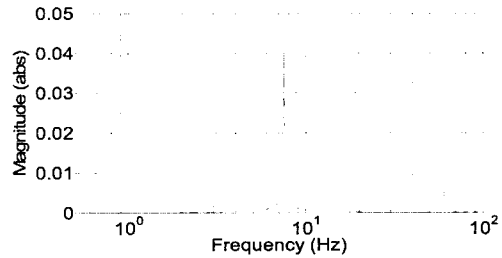


Fig. 10 Frequency responses of guideway deflection to variations of guideway height



Fig. 11 Air gap test

Table 5 Air gap test results on the two different guideways

Type	Natural frequency (Hz)	Air gap RMS (μm)	
		Stand still	Running
2@35	9.2	18.0	420
3@35	13.5	32.9	567

수를 낮추고 감쇠비는 증가시켜야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 5개의 관측 상태 변수 궤환 제어기를

사용하는 상전도 흡인식 도시형 자기부상열차 UTM-02에 있어서 가이드웨이의 진동특성이 차량의 동특성에 미치는 영향을 해석하였다. 자기부상열차/가이드웨이의 연성 운동방정식을 이용하여 고유치를 해석한 결과 고유진동수는 0.8 Hz, 7.5 Hz, 11.1 Hz임을 알 수 있었다. 또한 가이드웨이 높이 변동 주파수에 따른 차량의 동특성을 파악하기 위하여 가이드웨이 높이 변동 주파수에 따른 부상 공극 주파수 응답을 해석하였다. 그 결과 가이드웨이의 고유진동수와 감쇠비가 부상 공극 응답에 미치는 영향을 명확하게 알 수 있었다. 가이드웨이의 고유진동수에서 부상 공극 변동이 증가하며, 반면에 감쇠비는 부상 공극 변동을 감소시킨다. 부상 공극 변동을 크기를 제한하기 위해서는 가이드웨이의 고유진동수를 낮추는 것이 긍정적이다. 이러한 경향은 고유진동수가 다른 3종의 가이드웨이들에서의 실차 실험 결과에서도 유사함을 알 수 있었다. 결과적으로, 5개의 관측 상태 변수 궤환 제어기를 사용하는 UTM-02의 부상 공극 변동을 감소시키기 위해서는 가이드웨이의 고유진동수는 낮출수록 그리고 감쇠비는 높을수록 긍정적인 것을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 건설교통부 도시형 자기부상열차 실용화 사업에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Liu, Y., Sun, G. and Wei, R., 2006, "The

Developmental Status and Future Prospects of Maglev technology", Maglev2006, Proceeding, Vol. 1, pp. 59~64.

(2) Takahashi, M., Kwok, G. and Kubota, K., 2006, "Marketing Strategy of the HSST System", Maglev2006, Proceeding, Vol. 1, pp. 53~57.

(3) Han, H. S., Kim, Y. J., Shin, B. C. and Kim, B. H., 2006, "Simulation of Dynamic Interaction between Maglev and Guideway Using FEM", Maglev2006, Proceeding, Vol. 2, pp. 599~604.

(4) Huajie, H. and Yungang, L., 2004, "The Design of a Magnetic Levitation Controller Based on the Study of Coupling Vibration", Maglev2004, Proceeding, pp. 1012~1018.

(5) Shi, X. H., Liu, H. K., She, L. H. and Chang, W. S., 2004, "Vibration Analysis of Elastic-rigid Coupling EMS Maglev System", Maglev2004, Proceeding, pp. 533~538.

(6) Han, H. S., Sung, H. K., Kim, Y. J. and Kim, B. H., 2007, "Coupling Model of the Maglev Vehicle /Guideway", Journal of KSR, Vol. 10, No. 2, pp. 243~250.

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

(8) Sung, H. K., Jung, B. S., Cho, J. M., Jang, S. M., Lee, J. M. and Cho, H. J., 2004, "Magnetic Levitation Control Using DSP TMS320LF2407", Proceedings of the KIEE Summer Conference, pp. 1340~1342.