

자기부상열차와 가이드웨이 상호작용을 고려한 가이드웨이 구조물의 진동사용성 치짐 한계

Deflection Limits based on the Vibration Serviceability of Guideway Structures Considering Maglev Train-Guideway Interaction

이진호* · 김성일

Jin Ho Lee · Sung Il Kim

Abstract In this study, deflection limits based on the vibration serviceability of guideway structures are proposed considering maglev train-guideway interaction. Equations of motion are derived for a simplified maglev railway. Feedback constants for the control of the electromagnetic force for levitation are optimized in order to minimize the airgap fluctuations. Deflection limits for a guideway are calculated for various operating speeds of a maglev train, span lengths of a guideway, and natural frequencies and damping ratios of the second suspension in order to satisfy the serviceability criteria for airgaps and for the vertical acceleration of a cabin. From the analysis results, proposed are requirements for the second suspension of maglev trains and deflection limits for guideway structures.

Keywords : Maglev railway, Guideway, Deflection limit, Vibration serviceability, Vehicle-structure interaction

초 록 이 연구에서는 자기부상열차-가이드웨이 상호작용을 고려하여 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 진동사용성을 고려한 치짐한계를 제안한다. 간략화된 자기부상철도 시스템의 운동방정식을 유도하고, 자기부상력 제어를 위한 피드백 상수가 부상공극의 변동량이 최소가 되도록 최적화한다. 이 시스템에 대하여 자기부상열차의 운행속도, 가이드웨이 경간장, 2차 현가장치의 고유진동수와 감쇠비를 변화시켜 가며, 부상공극의 크기와 차체의 연직가속도에 대한 사용성 기준을 만족하는 가이드웨이의 치짐한계를 조사한다. 해석 결과로부터 자기부상열차의 2차 현가장치에 대한 요구 조건과 가이드웨이 구조물이 만족시켜야 하는 치짐한계를 제안한다.

주요어 : 자기부상철도, 가이드웨이, 치짐한계, 진동사용성, 차량-구조물 상호작용

1. 서 론

산업혁명 이후로 철도는 인적, 물적 자원 수송을 위한 주요한 교통 수단으로 자리매김하여 왔다. 철도는 교통 체증의 영향을 받지 않기 때문에 언제 어디서나 신속한 인적, 물적 자원의 운송이 가능하고, 탄소 배출량의 최소화가 가능한 친환경적이고 미래 지향적인 교통 수단이라고 할 수 있다. 이와 같은 장점으로 인해 전세계적으로 다양한 고속철도, 도시철도, 광역철도 시스템이 개발되어 운행되고 있다.

철도 시스템은 궤도 방식에 따라 크게 바퀴식 철도와 자기부상식 철도로 구분할 수 있다. 대부분의 육상 교통수단은 바퀴를 이용하여 운행되어 왔지만, 과학기술이 발달함에 따라 전자기력을 이용한 자기부상철도는 미래 지향적인 신교통 수단의 상징적인 개념으로 부각되었다. 자기부상철도는 여러가지 장점을 가지고 있기 때문에 꾸준히 연구되어 왔고[1], 우리나라의 ‘인천공항 자기부상철도’ 등을 비롯하여, 중국, 일본 등에서 실용화된 노선이 운행 중에 있다.

자기부상열차는 대차에 설치된 전자석의 전자기력에 의해 부상을 하게 된다. 이 전자기력은 부상공극의 크기에 따라 제어되고, 이를 통하여 차량의 부상을 유지하고 운동 상태가 결정되게 된다. 한편, 부상력은 가이드웨이에도 작용하여 가이드웨이의 변형을 발생시킨다. 부상공극은 가이드웨이와 차량의 상대적인 위치에 의해 결정되므로, 가이드웨이의 변형은 결국 부상력을 변화시키게 된다. 즉, 자기부상열차와 가이드웨이의 거동은 서로 영향을 주고 받게 되고, 이 시스템의 동적거동을 정확히 예측하기 위해서는 이러한 상호작용을 엄밀히 고려하여야 하는 것이다. 그러므로, 자기부상열차-가이드웨이 상호작용을 고려한 자기부

*Corresponding author. E-mail: jholee0218@pknu.ac.kr .

© 2017 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.1.111>

상철도시스템의 동적 거동 해석에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다. Han 등[2]은 차량과 궤도 구조물의 단순화를 최소화한 상세 유한요소 모델을 이용하여 자기부상열차의 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 다물체동역학을 이용하여 자기부상철도 시스템의 동역학에 대한 연구가 수행되기도 하였는데, 가이드웨이의 동적거동은 진동모드의 중첩을 통하여 표현하거나[3,4] 단순 Euler-Bernoulli beam 모델을 이용하여 표현하였다[5]. Han 등[6]은 관측 상태변수 궤환제어기를 사용한 자기부상열차의 주행 안정성을 평가하고, Han 등[7]은 가이드웨이 진동특성이 자기부상열차의 동적거동에 미치는 영향을 조사하였다. Lee 등[8]은 Linear Quadratic Gaussian 능동 제어를 이용하는 자기부상열차와 가이드웨이 교량의 동적상호작용 해석을 수행하여 그 거동 특성을 분석하였다. Yau는 지진하중과 풍하중이 작용하는 자기부상열차-가이드웨이 상호작용 시스템의 동해석을 수행하였다[9, 10]. Lee와 Kim은 최적화된 가속도 되먹임 기반 부상공극제어기법을 이용하여 자기부상철도 시스템의 동해석을 수행하였고 그 동적 거동 특성을 조사하였다[11]. 이외의 자기부상철도 시스템의 동적 거동에 대한 연구는 Zhou 등[12]에 자세히 소개되어 있다. 이상과 같이 자기부상열차-가이드웨이 상호작용 시스템의 동적 거동 분석 및 특성 규명을 위해 다양한 연구가 이루어져 왔지만, 이 시스템의 동적 거동 특성에 기반한 가이드웨이 구조물의 설계에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

자기부상철도 가이드웨이 구조물의 설계 시 고려하여야 할 중요한 요소 중의 하나가 진동사용성을 고려한 처짐 한계이다. 즉, 자기부상열차가 운행할 때 가이드웨이 구조물의 처짐이 발생하게 되는데, 이 처짐은 시스템의 사용성을 확보할 수 있는 다양한 기준을 만족시키도록 제한되어야 한다. 사용성을 확보하기 위해 만족시켜야 하는 기준으로 주요한 것은 부상공극의 크기와 차체의 연직가속도에 관한 기준을 들 수 있을 것이다. 자기부상열차의 부상을 안정적으로 유지할 수 있도록 부상공극의 크기가 허용 최소치 이상이 되어야 할 것이고, 승객에게 편안한 승차감을 제공하기 위하여 차체의 연직가속도가 허용 최대치 이하가 되어야 할 것이다. 그런데, 앞에서 언급한 바와 같이, 자기부상열차의 부상공극의 크기와 차체 연직가속도는 자기부상열차와 가이드웨이 간의 상호작용에 의해서 크게 영향을 받게 된다. 즉, 진동사용성을 고려한 가이드웨이 구조물의 처짐 한계를 설정하기 위해서는 자기부상열차-가이드웨이 구조물의 상호작용을 고려하여야 할 것이다. 하지만, 국내에서는 아직 이에 대한 연구가 체계적으로 이루어지지 않았고, 이로 인해 국내 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 처짐 한계에 대한 기준은 필요 이상으로 과도하게 제안된 면이 있다.

이 연구에서는 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 진동사용성을 고려한 처짐 한계를 자기부상열차-가이드웨이 상호작용을 고려하여 제안하고자 한다. 2차 현가장치로 연결된 2개의 질량으로 근사한 자기부상열차가 단순보로 모사한 가이드웨이 구조물을 운행할 때, 자기부상열차의 운행속도, 가이드웨이 경간장, 2차 현가장치의 고유진동수와 감쇠비를 변화시켜 가며, 부상공극의 크기와 차체의 연직가속도가 사용성 기준을 만족하도록 하는 가이드웨이의 처짐한계를 조사하고자 한다. 이를 위한 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 간략화된 자기부상열차-가이드웨이 상호작용계와 이 시스템의 운동방정식에 대하여 서술하고, 3장에서는 가이드웨이 구조물의 처짐한계 산정 방법에 대하여 상술한다. 4장에서는 자기부상열차의 운행속도, 가이드웨이 경간장, 2차 현가장치의 고유진동수와 감쇠비를 변화시켜 가며 가이드웨이의 처짐한계를 조사하여 그 결과를 제시하고, 마지막으로 이 연구의 결론을 5장에서 서술한다.

2. 자기부상열차-가이드웨이 상호작용계의 운동방정식

이 연구에서는 Fig. 1과 같이 간략화된 자기부상열차-가이드웨이 상호작용계를 고려하고자 한다. 차량은 속도 V 로 이동하고, 시간 t 에서 $x_c(t)$ 의 위치에 존재한다. 자기부상열차의 차체와 대차는 각각 강체 질량으로 근사하고 이 2개의 질량은 스프링과 감쇠기로 구성된 2차 현가장치에 의해 연결되어 있다. 차체와 대차 질량의 크기는 각각 M_c 와 M_b 이고, 2차 현가장치의 강성과 감쇠 계수는 각각 k_2 와 c_2 이다. 시간 t 에서 차체와 대차의 연직 방향 위치는 각각 $z_c(t)$ 와 $z_b(t)$ 이다. 대차에 설치된 전자석에 의해 자기부상력 $F^{ems}(t)$ 가 발생하여 차량을 부상하게 되는데, 이때 전자석의 전류와 전압은 각각 $i(t)$ 와 $v(t)$, 전자석의 부상 공극은 $u(t)$ 이다. 단순보로 근사한 가이드웨이 구조물의 휨강성은 EI , 단위 길이당 질량은 m , 경간장은 L 이다. 가이드웨이의 동적 거동은 모드 중첩법을 사용하여 모사하는데, 이때 구조물의 n 번째 고유 모드는 $\phi_n(x)$, 모드 좌표는 $q_n(t)$ 이고, 모드 질량, 감쇠, 강성은 각각 M_n , C_n , K_n 이다.

전자석에 의해 발생하는 자기부상력 $F^{ems}(t)$ 제어하기 위해, 대차의 가속도, 속도, 위치와 부상공극의 크기, 변화율을 되먹임하여 전자석의 인가 전압 $v(t)$ 를 능동제어한다.

$$\Delta v = k_1 \Delta \ddot{z}_b + k_2 \Delta \dot{z}_b + k_3 \Delta z_b + k_4 \Delta \dot{u} + k_5 \Delta u \quad (1)$$

여기서 k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 는 되먹임 상수이다.

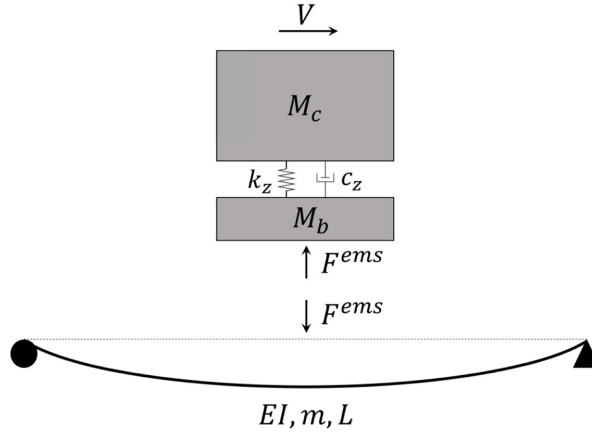


Fig. 1. Simplified maglev train-guideway interaction system.

Fig. 1의 간략화된 자기부상열차-가이드웨이 상호작용계의 동적 지배방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다[2-7,11].

차체:

$$M_c \Delta \ddot{z}_c + c_z \Delta \dot{z}_c - c_z \Delta \dot{z}_b + k_z \Delta z_c - k_z \Delta z_b = 0 \quad (2)$$

대차:

$$M_b \Delta \ddot{z}_b - c_z \Delta \dot{z}_c + c_z \Delta \dot{z}_b - k_z \Delta z_c + (k_z - k_u) \Delta z_b + k_i \Delta i + k_u \sum_{n=1}^N \phi_n \Delta q_n = -k_u \sum_{n=1}^N (\phi_n - \phi_n^0) q_n^0 \quad (3a)$$

$$k_i = \frac{\mu_0 n_e^2 A_e i^0}{2(u^0)^2} \quad (3b)$$

$$k_u = \frac{\mu_0 n_e^2 A_e (i^0)^2}{2(u^0)^3} \quad (3c)$$

부상전자석:

$$\frac{\partial(\Delta i)}{\partial t} + \frac{R_e}{L_e} \Delta i - \frac{k_1}{L_e} \Delta \ddot{z}_b - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{k_2 + k_4}{L_e} \right) \Delta \dot{z}_b - \frac{k_3 + k_5}{L_e} \Delta z_b + \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{k_4}{L_e} \right) \sum_{n=1}^N \phi_n \Delta \dot{q}_n + \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{k_4}{L_e} \right) \sum_{n=1}^N V \frac{d\phi_n}{dx} \Delta q_n + \frac{k_5}{L_e} \sum_{n=1}^N \phi_n \Delta q_n \quad (4a)$$

$$= - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{k_4}{L_e} \right) \sum_{n=1}^N (\phi_n - \phi_n^0) \dot{q}_n^0 - \left(\frac{k_u}{k_i} + \frac{k_4}{L_e} \right) \sum_{n=1}^N V \left(\frac{d\phi_n}{dx} - \frac{d\phi_n^0}{dx} \right) q_n^0 - \frac{k_5}{L_e} \sum_{n=1}^N (\phi_n - \phi_n^0) q_n^0$$

$$L_e = \frac{\mu_0 n_e^2 A_e}{2u^0} \quad (4b)$$

가이드웨이:

$$M_n \Delta \ddot{q}_n + C_n \Delta \dot{q}_n + K_n \Delta q_n - k_u \phi_n \sum_{m=1}^N \phi_m \Delta q_m + k_u \phi_n \Delta z_b - k_i \phi_n \Delta i = (\phi_n - \phi_n^0) F^{ems0} + k_u \phi_n \sum_{m=1}^N (\phi_m - \phi_m^0) q_m^0 \quad (5)$$

이상의 운동방정식에서 변수 앞에 Δ 는 정지 부상상태에 대한 변동량을 의미하고, 위첨자 0는 정지 부상상태에서의 값을 의미한다. 예를 들면 차체 위치의 변동량 $\Delta z_c(t) = z_c(t) - z_c^0$ 이다. 또한, 식 (2) ~ (5)에서 μ_0 는 진공의 투자율, n_e , A_e , R_e 는 각각 전자석 코일의 회전수, 유효면적, 자기저항, N 은 가이드웨이 구조물의 모드 중첩 시 고려하는 모드의 수, $\phi_n = \phi_n(x_c)$, $\phi_n^0 = \phi_n(x_c^0)$ 이다. 이상의 운동방정식을 연계하여 풀면 자기부상 열차와 가이드웨이 상호작용계의 동적해석을 수행할 수 있다.

3. 가이드웨이 구조물의 처짐한계 산정 방법

2장에서 서술한 자기부상열차-가이드웨이 상호작용을 고려한 해석기법을 사용하여 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 진동사용성을 고려한 처짐한계를 산정하는 방법에 대해 서술하고자 한다.

이 연구에서는 진동사용성을 확보하기 위해 만족시켜야 하는 기준으로 부상공극의 크기와 차체의 연직가속도에 관한 기준을 고려한다. 즉, 자기부상열차의 부상을 안정적으로 유지할 수 있도록 식 (2) ~ (5)의 지배방정식으로부터 얻은 부상공극 크기의 변동량이 $\pm 3\text{mm}$ 이내가 되도록 한다.

$$|\Delta u|_{\max} \leq \Delta u_{\text{allow}} = 3\text{mm} \quad (6)$$

또한, 승객에게 편안한 승차감을 제공하기 위하여 식 (2) ~ (5)의 지배방정식으로부터 얻은 차체의 연직가속도가 허용치 이하가 되도록 한다.

$$|\ddot{z}|_{\max} \leq \ddot{z}_{\text{allow}} \quad (7)$$

식 (7)의 허용치 \ddot{z}_{allow} 는 차량이 하나의 경간을 통과하는데 걸리는 시간인 진동지속시간을 고려하여 결정하여야 한다. 이 연구에서는 ISO 2631[13]에서 제시하고 있는 연직 가속도 평가 기준 중 ‘불편함(uncomfortable)’에 해당하는 0.8m/s^2 를 기준으로 하여 Fig. 2와 같이 허용기준을 설정한다. Eurocode에서는 철도교량 진동사용성 연직가속도 허용기준으로 ‘아주 좋음(very good)’에 해당하는 연직 가속도 수준으로 1.0m/s^2 를 제안하고 있다[14,15]. 또한, 우리나라 호남고속철도 설계지침은 Eurocode의 ‘아주 좋음(very good)’ 수준에 근거하여 진동사용성 허용처짐기준을 제시하고 있다[15,16]. 이러한 사실에 근거하여, 이 연구에서는 ISO 2631의 ‘불편함(uncomfortable)’을 기준으로 연직가속도에 대한 허용기준을 제시하였다.

이 연구에서는 다양한 자기부상철도 시스템에 대하여 가이드웨이의 휨강성 EI 을 변화시켜가며 식 (6)과 식 (7)의 기준을 만족하는지를 조사한다. 단, 이 과정에서 다음의 목적함수가 최소값을 가지도록 식 (1)의 부상공극 제어기법의 피득임 상수 k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 을 최적화하여 지배방정식 (2) ~ (5)의 해를 얻는다.

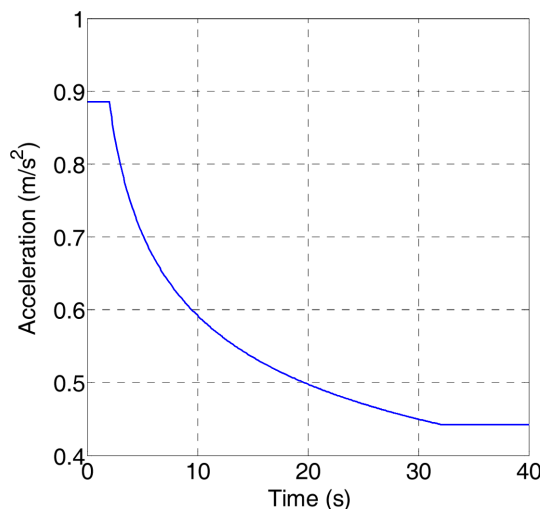


Fig. 2. Allowable vertical acceleration of a cabin.

$$f_{obj} = \frac{|\Delta u|_{max}}{\Delta u_{allow}} + \frac{|\ddot{z}_c|_{max}}{\ddot{z}_{allow}} \quad (8)$$

되먹임 상수는 부상공극의 크기와 직접적으로 연관이 있으므로, 식 (8)의 목적함수를 이용하여 되먹임 상수를 최적화하게 되면 부상공극의 변동량이 최소가 되게 된다. 실제 적용예제에서는 되먹임 상수의 최적화를 통해 식 (6)의 기준이 만족되는 것을 확인하였다.

즉, 이 연구에서는 최적화된 부상공극 제어기법의 되먹임 상수를 이용하여 식 (7)의 진동사용성 기준을 만족하는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 산정하고자 한다.

4. 가이드웨이 구조물의 처짐한계 산정

3장에서 서술한 방법을 이용하여 자기부상열차의 운행속도와 가이드웨이의 경간장에 따른 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 산정한다.

Fig. 1의 간략화된 자기부상철도 시스템의 물성치는 다음의 값들을 사용한다. 차체와 대차의 질량은 각각 $M_c=1272\text{kg}$, $M_b=500\text{kg}$ 로 설정한다. 이 질량은 인천공항 자기부상열차의 만차 질량으로부터 결정한 값이다[17]. Fig. 3에 보인 바와 같이 인천공항 자기부상열차는 2량 1편성으로 구성되어 있는데, 1량의 만차 질량은 28,352kg이고 질량 2000kg의 대차 4개와 차체로 구성되어 있다. 또한, 1개의 대차에는 4쌍의 부상전자석이 설치되어 있다. 이상의 질량을 기준으로 1쌍의 부상전자석이 부담해야 하는 차체와 대차의 질량을 계산하고, 이를 Fig. 1에 보인 모형의 M_c 와 M_b 로 결정한다. 또한, 다양한 자기부상차량의 영향을 고려하기 위해 2차 현가장치의 고유진동수 $\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{k_z/M_c}$ 와 감쇠비 $\xi = c_z/2M_c\omega_n$ 를 변화시킨다. 독일 Transrapid TR-06 차량의 2차 현가장치 고유진동수와 감쇠비는 각각 0.8Hz와 0.3의 값을 가진다[18]. 이 연구에서는 이 값을 기준으로 다음과 같이 2차 현가장치의 고유진동수와 감쇠비를 변화시켜 가며 처짐한계를 조사한다.

고유진동수 f_n : 0.333Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz
 감쇠비 ξ : 0.1, 0.3, 0.6

가이드웨이 구조물의 단위 길이 당 질량 $m = 177.2\text{kg/m}$ 로 설정한다. 이는 경간장이 25m일 때 차량과 가이드웨이의 질량비가 0.4가 되도록 결정한 값이다. 일반적으로 경간장이 증가하면 구조물의 단면이 커지므로 단위 길이 당 질량도 함께 증가하게 된다. 하지만 자기부상열차의 부상공극과 차체 가속도에 대한 차량과 가이드웨이의 질량비의 영향은 그리 크지 않다[11]. 즉, 가이드웨이 단위 길이 당 질량의 변동이 식 (6)과 (7)의 판정 기준에 미치는 영향은 미미할 것이고, 이에 기반하여 이 연구에서는 가이드웨이 구조물의 단위 길이 당 질량 $m = 177.2\text{kg/m}$ 로 설정하여 매개변수 해석을 수행한다. 가이드웨이 구조물의 감쇠비의 값은 0.01로 적용한다[19]. Fig. 1의 자기부상차량에 의하여 발생하는 정적 처짐은 $\delta = (M_c + M_b)gL^3/48EI$ 이고 정적 처짐 δ 에 대한 경간장 L 의 비는 $R_\delta = L/\delta = 48EI/(M_c + M_b)gL^2$ 로 주어진다. 즉, 경간장/처짐비 R_δ 는 가이드웨이의 휨강성 EI 와 연관되어 있다. 이 연구에서는 가이드웨이 구조물의 경간장 L 과 경간장/처짐비 R_δ 를 다음과 같이 변화시켜 가며 처짐한계를 조사한다.

경간장 L : 10m, 20m, 30m, ..., 120m
 경간장/처짐비 R_δ : 1000, 1100, 1200, ...

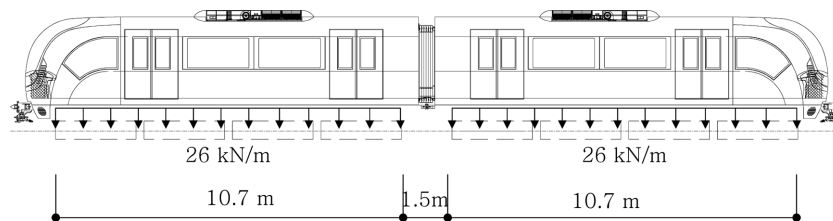


Fig. 3. Incheon airport maglev train.

Table 1. Continued.

(b) $V = 150\text{km/h}$															
L (m)	$f_n = 0.333\text{Hz}$			$f_n = 0.5\text{Hz}$			$f_n = 1\text{Hz}$			$f_n = 2\text{Hz}$			$f_n = 3\text{Hz}$		
	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$
10	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1100	1800	2500	2700	2600	2400	2500	1900
20	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1300	1400	1900	4300	4500	3600	5200	4100	3800
30	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2100	2000	2000	3500	2600	2400	4000	3200	2800
40	1000	1000	1000	1000	1000	1000	4400	2300	1800	3000	2600	2300	3900	2900	2300
50	1000	1000	1000	1000	1000	1000	2900	1900	1600	3000	2400	2000	3500	2400	2000
60	1000	1000	1000	1300	1100	1000	2300	1800	1600	3000	2100	1700	2600	2000	1700
70	1000	1000	1000	1700	1200	1100	2000	1700	1500	2800	1800	1500	2200	1600	1500
80	1000	1000	1000	2400	1200	1100	2200	1700	1400	2500	1600	1300	1800	1500	1400
90	1000	1000	1000	2200	1300	1100	2000	1600	1300	2000	1300	1200	1500	1200	1400
100	1200	1000	1000	1800	1300	1100	2100	1500	1200	1600	1100	1100	1600	1200	1300
110	1400	1000	1000	1500	1200	1100	2100	1400	1200	1500	1100	1000	1500	1200	1300
120	1800	1000	1000	1400	1200	1100	1800	1300	1100	1300	1000	1000	1100	1100	1300

(c) $V = 200\text{km/h}$															
L (m)	$f_n = 0.333\text{Hz}$			$f_n = 0.5\text{Hz}$			$f_n = 1\text{Hz}$			$f_n = 2\text{Hz}$			$f_n = 3\text{Hz}$		
	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$	$\xi = 0.1$	$\xi = 0.3$	$\xi = 0.6$
10	1000	1000	1100	1000	1000	1500	1000	1600	2400	2300	3100	4500	3100	3300	3300
20	1000	1000	1100	1000	1000	1500	1400	1700	2500	5300	5100	5000	5600	4500	6400
30	1000	1000	1100	1000	1000	1500	1900	2200	2600	7700	5700	4400	5800	4900	4400
40	1000	1000	1100	1000	1100	1500	3000	2700	2600	5200	4000	3600	5800	4700	4100
50	1000	1000	1100	1000	1200	1500	5000	3000	2400	4600	3900	3400	5800	4400	3500
60	1000	1000	1100	1200	1300	1500	5600	2800	2400	4500	3700	3100	5400	3700	3000
70	1000	1000	1100	1500	1400	1500	3800	2700	2400	4500	3400	2700	4800	3200	2600
80	1000	1000	1200	1900	1500	1500	3100	2600	2300	4100	2900	2400	3900	2600	2300
90	1000	1000	1200	2200	1600	1600	3000	2400	2200	4000	2600	2200	3100	2000	2000
100	1000	1000	1200	2700	1700	1600	3100	2400	2000	3800	2200	1900	2700	1900	1800
110	1200	1000	1200	3300	1800	1600	3300	2300	1900	3400	1800	1700	2200	1800	1700
120	1400	1100	1200	2900	1900	1600	3000	2200	1800	2500	1600	1600	2200	1700	1600

Table 1의 결과로부터 자기부상철도 시스템의 전형적인 거동 특성을 파악할 수 있다. 차량의 운행에 의해 차체의 공진이 발생하는 경간장 $L_r = V/f_n$ 으로 주어지는데, 이러한 사실을 Table 1의 결과에서 관찰할 수 있다. 예를 들면, $f_n = 1\text{Hz}$ 이고 $V = 100\text{km/h}$, 150km/h , 200km/h 일 때 차체의 공진이 발생하는 경간장 $L_r = 27.78\text{m}$, 41.67m , 55.56m 인데, Table 1에서도 경간장 $L = 30\text{m}$, 40m , 60m 일 때 공진에 의해 응답이 증가하므로 식 (7)을 만족시키는 경간장/처짐비 R_{δ} 가 최대값을 가지는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 차량 2차 현가장치의 감쇠비가 증가하면 차량의 응답이 감소하기 때문에 식 (7)을 만족시키는 경간장/처짐비 R_{δ} 의 값도 감소하는 것을 Table 1에서 관찰할 수 있다.

한편, 차량의 고유진동수 f_n 이 2Hz 또는 3Hz 이거나 감쇠비 ξ 가 0.1일 때 경간장/처짐비 R_{δ} 의 값이 과도하게 커지는 것을 Table 1에서 관찰할 수 있다. 이에 이 연구에서는 자기부상열차 2차 현가장치의 고유진동수 ω_n 을 1Hz 이하로, 감쇠비 ξ 는 0.3 이상으로 설정하는 것을 제안하고자 한다.

자기부상열차 2차 현가장치의 고유진동수 ω_n 이 1Hz 이하이고 감쇠비 ξ 가 0.3 이상일 때, Table 1로부터 각각의 차량 운행속도 V 와 가이드웨이 경간장 L 에 따른 경간장/처짐비 R_{δ} 의 최대값을 Fig. 5와 같이 얻을 수 있다. 이를 이용하여 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 Table 2와 같이 산정할 수 있다. 인천공항 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 처짐한계는 $L/2000$ 로 규정하고 있다[17]. 이 연구에서 산정한 Table 2의 처짐한계는 이 기준보다는 완화된 값이지만, 앞에서 설명한 바와 같

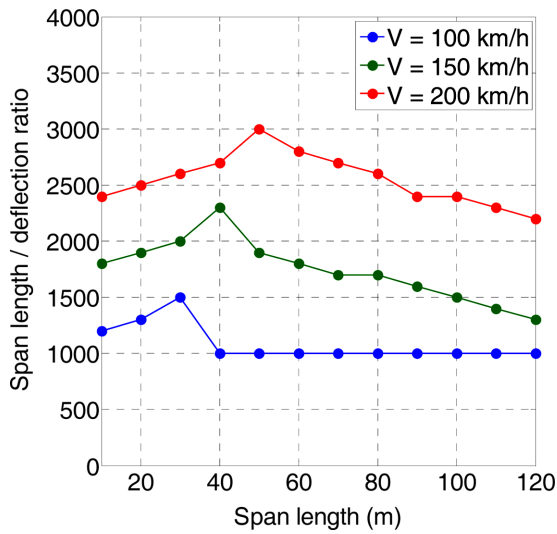


Fig. 5. Maxima of the span length / deflection ratio R_{δ} .

Table 2. Deflection limits for guideways.

L (m)	V (km/h)		
	100	150	200
10	L/1200	L/1800	L/2400
20	L/1300	L/1900	L/2500
30	L/1500	L/2000	L/2600
40	L/1000	L/2300	L/2700
50	L/1000	L/1900	L/3000
60	L/1000	L/1800	L/2800
70	L/1000	L/1700	L/2700
80	L/1000	L/1700	L/2600
90	L/1000	L/1600	L/2400
100	L/1000	L/1500	L/2400
110	L/1000	L/1400	L/2300
120	L/1000	L/1300	L/2200

이 자기부상철도 시스템의 동적 거동을 엄밀히 고려하여 산정한 좀 더 정밀한 기준이라고 할 수 있다. 완화된 Table 2의 처짐 한계를 적용하면 기존의 구조물보다는 좀 더 경제적인 가이드웨이 구조물의 설계가 가능해 질 것이다.

5. 결 론

이 연구에서는 자기부상열차-가이드웨이 상호작용을 고려하여 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 진동사용성을 고려한 처짐 한계를 제안하였다. 간략화된 자기부상철도 시스템의 운동방정식을 유도하고, 자기부상력 제어를 위한 되먹임 상수가 부상공극의 변동량이 최소가 되도록 최적화하여 결정하였다. 이 시스템에 대하여 자기부상열차의 운행속도, 가이드웨이 경간장, 2차 현가장치의 고유진동수와 감쇠비를 변화시켜 가며, 부상공극의 크기와 차체의 연직가속도에 대한 사용성 기준을 만족하는 가이드웨이의 처짐한계를 조사하였다.

해석 결과로부터 자기부상철도 시스템에 대해 다음과 같은 요구조건을 제안하고자 한다.

- (1) 자기부상열차 2차 현가장치의 고유진동수 f_n 은 1Hz 이하가 되어야 한다.
- (2) 자기부상열차 2차 현가장치의 감쇠비 ζ 는 0.30 이상이 되어야 한다.
- (3) 가이드웨이 구조물은 Table 2의 처짐한계를 만족시켜야 한다.

이상의 요구조건은 중저속 또는 중고속 도시형 자기부상철도의 건설 시 활용할 수 있다. Table 2의 처짐한계는 인천공항 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 처짐한계보다는 완화된 값이므로, 이상의 요구조건에 기반하여 좀 더 경제적인 가이드웨이 구조물의 설계가 가능해질 것이다.

후 기

본 연구는 국토교통부에서 시행하는 “도시형자기부상철도 운영 및 유지관리 기술개발” 과제로부터 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

References

- [1] H.W. Lee, K.C. Kim, J. Lee (2006) Review of Maglev Train Technologies, *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(7), pp. 917-1925.
- [2] H.-S. Han, Y.-J. Kim, B.-Ch. Shin, J.-I. Kwon (2006) Simulation of a maglev vehicle running on the flexible guideway, *Journal of the*

- Korean Society of Railway*, 9(4), pp. 499-503.
- [3] H.-S. Han, J.-M. Lee, Y.-J. Kim, K.-J. Kim et al. (2006) Modeling of the maglev vehicle running over the elevated guideway using flexible multibody dynamics, *Journal of the Korean Society of Railway*, 9(6), pp.792-797.
- [4] K.-J. Kim, H.-S. Han, S.-J. Yang (2013) Analysis of dynamic interaction between maglev vehicle and guideway, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering A*, 37(12), pp.1559-1565.
- [5] H.-S. Han, H.-K. Sung, Y.-J. Kim, B.-H. Kim (2007) Coupling model of the maglev Vehicle/guideway, *Journal of the Korean Society of Railway*, 10(2), pp.243-250.
- [6] H. Han, S. Kim, B. Yim, Y. Hur (2007) Stability analysis of a maglev vehicle utilizing electromagnetics suspension system, *Transactions of KSAE*, 16(3), pp.118-126.
- [7] H.S. Han, B.H. Yim, N.J. Lee, Y.C. Hur (2008) Effects of the guideway's vibrational characteristics on the dynamics of a maglev vehicle, *Vehicle System Dynamics*, 47(3), pp.309-324.
- [8] J.-S. Lee, S.-D. Kwon, I.-H. Yeo, M.-Y. Kim (2009) The dynamic interaction analysis of actively controlled maglev and guideway bridge systems, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 29(4D), pp.523-533.
- [9] J.D. Yau (2010) Interaction response of maglev masses moving on a suspended beam shaken by horizontal ground motion, *Journal of Sound and Vibration*, 329(2), pp.171-188.
- [10] J.D. Yau (2010) Aerodynamic vibrations of a maglev vehicle running on flexible guideways under oncoming wind actions, *Journal of Sound and Vibration*, 329(10), pp.1743-1759.
- [11] J.H. Lee, S.I. Kim (2016) Dynamic Interaction Analysis between Maglev Train with Airgap Control Algorithm Based on Acceleration Feedback and Guideway, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29(2), pp.193-199.
- [12] D. Zhou, C.H. Hansen, J. Li, W. Chang (2010) Review of coupled vibration problems in EMS maglev vehicles, *International Journal of Acoustics and Vibration*, 15(1), pp. 10-23.
- [13] International Organization for Standardization (1997) Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, International Organization for Standardization, Switzerland.
- [14] British standard (2002) Eurocode-Basis of structural design, British Standards Institution, Brussels.
- [15] B.-G. Jeon, N.-S. Kim, S.-I. Kim (2011) Deflection Limit based on Vibration Serviceability of Railway Bridges Considering the Correlation between Train Speed and Vertical Acceleration on Coach, *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(6), pp. 545-554.
- [16] Korea Rail Network Authority (2007) Design Manual of Honam High Speed Railway, Korea Rail Network Authority, Deajeon.
- [17] Korea Rail Network Authority (2010) Structural Design Report for Demonstration Line of Urban Maglev Program.
- [18] P.K. Sinha (1987) *Electromagnetic Suspension: Dynamics and Control*, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, pp.283-284.
- [19] Korea Rail Network Authority (2013) Railway Design Code.

(Received 5 January 2017; Revised 23 January 2017; Accepted 10 February 2017)

Jin Ho Lee: jholee0218@pknu.ac.kr

Pukyong National University, 56-1 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

Sung Il Kim: sikim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea