승차감을 고려한 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 처짐 한계

이진호^{1†}

¹부경대학교 해양공학과 부교수

Deflection Limit for a Maglev Railway Guideway Considering Ride Comfort

Jin Ho Lee^{1†}

¹Associate Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National Univ., Busan, 48513, Korea

Abstract

A standard for the vibration magnitude of a maglev train is presented herein to ensure a comfortable ride for the passengers. The vibration magnitude is determined from the vertical acceleration of the car body. A parameter analysis of the maglev train system is then performed considering the vehicle-structure interaction, and a deflection limit of $L/1300$ is proposed to satisfy the standard for the vertical acceleration. The proposed deflection limit is applied to the dynamic analysis of the actual maglev train system to assess applicability. Compared with the existing standard for the guideway structure, the proposed deflection limit is expected to enable economical design and construction.

Keywords : maglev railway, guideway, deflection limit, vehicle-structure interaction, ride comfort

1. 서론

산업혁명 이후 주요한 육상 운송수단으로 활용되어 온 철도는 교통 체증의 영향을 받지 않고 언제 어디서나 신속한 인적, 물적 자원의 운송이 가능하다. 이런 장점으로 인해 다양한 고속/일반철도 및 도시철도 시스템이 개발되어 운행되고 있다. 철도 시스템은 궤도 방식에 따라 크게 바퀴식 철도와 자기부상식 철도로 구분할 수 있다. 자기부상철도는 고유의 여러 가지 장점들로 인해 꾸준히 연구되어 왔는데(Lee *et al.*, 2006), 우리나라에서는 2016년 2월 3일 '인천공항 자기부상철도'가 개통되어 운행 중이다. 또한, 한국철도기술연구원에서는 최고시속 1200km/h로 운행할 수 있는 하이퍼튜브 시스템을 개발중이다(Jang *et al.*, 2017). 하이퍼튜브는 전자기유도반발식 자기부상 방식과 선형동기모터 추진방식을 채용하고 있어, 자기부상기술과 이를 이용한 자기부상철도는 미래 교통수단으로서 연구가 활발히 이루어지고 있다.

자기부상열차 시스템의 동적 거동을 정확히 예측하기 위해

서는 차량-구조물 상호작용을 엄밀히 고려해야 하므로, 이를 고려한 다양한 해석기법이 개발되어 왔다(Zhou *et al.*, 2010). 자기부상열차는 계측된 부상공극의 크기에 따라 제어되는 전자기력에 의해 부상하게 되고, 부상력은 가이드웨이에도 작용하여 가이드웨이의 변형을 발생시킨다. 그러므로 부상공극 제어 알고리즘은 자기부상열차 시스템의 동적 해석에서 주요하게 고려해야 하는 요소이다. 기존의 연구에서는 부상공극의 제어를 위해 관측 상태변수 궤환제어기(Jung *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2014), Linear Quadratic Gaussian 능동 제어기(Lee *et al.*, 2009), PI 제어기(Yau, 2009), 가속도 되먹임 기반 부상공극제어기법(Lee and Kim, 2016)을 사용하였다.

이 연구에서는 가속도 되먹임 기반 부상공극제어기법을 사용하는 자기부상열차와 가이드웨이 간의 상호작용을 고려한 동적거동 해석기법을 사용하여(Lee and Kim, 2016), 가이드웨이의 공간길이와 차량 자중에 의한 정적처짐의 비에 따른 자기부상열차 시스템의 동적 거동 변화를 살펴보고자 한다. 이로 부터 편안한 승차감을 위한 차체 연직가속도에 대한 기준을 만

[†]Corresponding author:

Tel: +82-51-629-6591; E-mail: jholee0218@pknu.ac.kr

Received September 14 2020; Revised October 16 2020;

Accepted October 17 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

측시킬 수 있는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 제안하고자 한다. 이를 위해 2장에서는 대상 시스템의 동적 해석기법에 대하여 간단히 설명하고, 3장에서는 승객에게 편안한 승차감을 제공할 수 있는 차체 연직가속도에 대한 기준을 설명하고자 한다. 이 기준을 만족할 수 있는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 매개변수 해석을 통하여 4장에서 제안하고, 실제 자기부상열차 시스템의 동적 해석에 적용하여 제안한 처짐한계의 적절성을 검토하고자 한다. 마지막으로 이 연구의 결론과 향후 연구방향에 대해 5장에서 제시한다.

2. 동적 해석기법

가속도 되먹임 부상공극제어기법을 이용한 자기부상열차와 가이드웨이 상호작용계의 동적 해석기법은 Lee와 Kim(2016)에 제시되어 있는데, 여기서는 이를 간략히 설명하고자 한다. Fig. 1은 이 연구에서 고려하는 2차원 자기부상열차 시스템의 개념도이다. 자기부상열차의 차체와 대차는 강체질량으로 근사하고, z축 방향 병진운동(heave)과 y축 중심 회전운동(pitch)

의 2차원 운동만 고려한다. y축 방향 병진운동(sway), x축 중심 회전운동(roll), z축 중심 회전운동(yaw)의 3차원 운동은 이 연구를 확장한 후속 연구에서 고려하고자 한다. 이 연구에서 고려하는 자기부상철도 시스템의 주요 변수를 Table 1에 정리하였다. Table 1의 변수들의 정지 부상상태에서의 값은 변수에 위첨자 0을 붙여서 나타내고, 정지 부상상태에 대한 변동량은 변수 앞에 Δ 를 붙여 나타낸다. 한편, Table 1의 상수 K_p , K_v , K_a 는 가속도 되먹임 기반 부상공극제어기법의 되먹임 이득으로서 각각 부상공극의 변동량 Δu_{jl}^{ems} , 부상 전자석의 설치된 위치의 속도의 변동량 $\Delta \dot{z}_{jl}^{ems}$ 와 가속도의 변동량 $\Delta \ddot{z}_{jl}^{ems}$ 에 작용하는 되먹임 이득이다(Sinha, 1987).

가속도 되먹임 기반 부상공극제어기법을 적용하여 Fig. 1의 자기부상열차 시스템의 동적 지배방정식을 Table 2와 같이 유도할 수 있다. 강체 대차의 회전 운동에 의해 부상 전자석력이 작용하는 위치가 변하게 되는 비선형 특성을 고려하기 위해, 자기부상열차와 전자석의 지배방정식과 가이드웨이의 운동방정식을 교대로 만족시키도록 다음의 반복계산 과정을 거쳐 전체 시스템의 해를 얻는다.

Fig. 1 2-Dimensional maglev train-guideway interaction system

Table 1 Physical properties for a maglev train-guideway system

Property	Explanation	Property	Explanation
V	Velocity of a maglev train	$i_{jl}^{ems}(t), v_{jl}^{ems}(t)$	Current and voltage in the l th EMS of the j th bogie
N_b	Number of bogies per cabin	$u_{jl}^{ems}(t), \dot{z}_{jl}^{ems}(t), \ddot{z}_{jl}^{ems}(t)$	Air-gap, velocity, and acceleration at the l th EMS of the j th bogie
M_c, I_c	Mass and rotational inertia of a cabin	$F_{z,jl}^{ems}(t)$	Electromagnetic force in the l th EMS of the j th bogie
M_b, I_b	Mass and rotational inertia of a bogie	EI, m	Flexural rigidity and mass per unit length of a guideway
$z_c(t), \theta_c(t)$	Displacement and rotation of a cabin	L	Span length of a guideway
$z_{b,j}(t), \theta_{b,j}(t)$	Displacement and rotation of the j th bogie	N_{gw}^w	Number of considered natural modes of a guideway
N_s	Number of the second suspensions	$\phi_n^w(x)$	The n th natural mode of a guideway
k_x, k_z, c_x, c_z	Spring and damping constants of a suspension	$q_n^w(t)$	The n th modal coordinate of a guideway
$F_{x,jk}^{sus}(t), F_{z,jk}^{sus}(t)$	Forces in the k th suspension of the j th bogie	M_n^w, C_n^w, K_n^w	The n th modal mass, damping, and stiffness of a guideway
N_{ems}	Number of electromagnetic suspensions (EMSs)	$w(x, t)$	Deflection of a guideway
μ_0	Magnetic permeability of vacuum	K_p, K_v, K_a	Feedback gains
$n_{ems}, A_{ems}, R_{ems}$	Number of turns of coil, effective area of magnetic pole, and reluctance of EMS		

- (1) 시간 $t - \Delta t$ 에서 얻은 자기부상열차-가이드웨이 상호작용계의 수렴해를 다음 시간 t 에서의 초기 예측치로 사용한다.
- (2) 시간 t 에서 식 (2)~(4)를 반복 계산하여 차체의 변위 Δz_c , $\Delta \theta_c$, 대차의 변위 $\Delta z_{b,j}$, $\Delta \theta_{b,j}$, 부상전자석 전류 Δi_{jl}^{ems} 를 얻는다. 단, 가이드웨이의 모드좌표 Δq_n^w 는 시간 $t - \Delta t$ 에서 구한 값으로 가정한다.
- (3) 단계 (2)에서 수렴해를 얻으면, 부상전자기력 $F_{z,jl}^{ems}$ 을 계산한다.
- (4) 단계 (3)에서 계산한 부상전자기력을 이용하여 식 (5)를 풀어서, 모드좌표 Δq_n^w 를 갱신한다.
- (5) 갱신된 모드좌표를 사용하여 단계 (2)~(4)의 계산을 다시 수행한다. 전체 자기부상열차-가이드웨이 상호작용계가 평형을 만족할 때까지 이 과정을 반복한다.
- (6) 전체 시스템에 대하여 수렴해를 얻으면 다음 시간 $t + \Delta t$ 로 진행한다.

3. 승차감 기준

앞에서 서술한 차량-구조물 상호작용을 고려한 해석기법을 사용하여 차체의 연직가속도를 포함한 자기부상열차 시스템의 동적 상태를 결정할 수 있다. 철도 차량의 운행 시 편안한 승차감을 제공하기 위해서는 차체의 연직가속도는 진동 사용성을 고려하는 기준을 만족시켜야 한다.

진동의 VDV(Vibration Dose Value)는 진동의 편안함과 가장 높은 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(British Standards Institution, 1987). 하지만, VDV는 짧거나 긴 지속시간을 가지는 진동에는 사용할 수 없어, 단주기 진동이나 장주기 진동에 대해서는 적절하지 않다는 단점이 있다. 이에 이 연구에서는 Table 2의 지배방정식으로부터 얻은 차체의 연직가속도 $\ddot{z}_c(t)$ 의 진동 크기로 중간주기 영역에서는 VDV, 단주기와 장주기 영역에서는 RMQ(Root-Mean-Quad) 값을 계산하고, 이 진동 크기가 식 (1)과 같이 허용치 이하가 되도록 한다.

$$\begin{aligned}
 \ddot{z}_{c,RMQ} &= \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int \{\ddot{z}_c(t)\}^4 dt} \leq \ddot{z}_{c,RMQ}^{allow} \quad \text{for } T < T_S \\
 \ddot{z}_{c,VDV} &= \sqrt[4]{\int \{\ddot{z}_c(t)\}^4 dt} = \sqrt[4]{T} \ddot{z}_{c,RMQ} \leq \ddot{z}_{c,VDV}^{allow} \quad (1) \\
 &\text{for } T_S \leq T \leq T_L \\
 \ddot{z}_{c,RMQ} &= \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int \{\ddot{z}_c(t)\}^4 dt} \leq \ddot{z}_{c,RMQ}^{allow} \quad \text{for } T > T_L
 \end{aligned}$$

여기서, T 는 진동의 지속시간을 의미하고, T_S 와 T_L 은 각각 2초와 32초로 결정한다(Lee *et al.*, 2020). BS 6841:1987와 ISO 2631-1에서는 ‘uncomfortable’에 해당하는 진동의 RMS(Root-Mean-Square) 값으로 0.8m/s^2 를 규정하고 있다(British Standards Institution, 1987; International Organization for Standardization, 1997). 한편, EN 1990: 2002+A1에서는 철도교량에 대해 ‘very good’에 해당하는 진동의 수준으로 1.0m/s^2 를 제안하고 있고,

Table 2 Governing equations for a maglev train-guideway system

For the cabin	$ \begin{aligned} & \left[\begin{matrix} M_c \\ I_c \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta \ddot{z}_c \\ \Delta \ddot{\theta}_c \end{matrix} \right\} + \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} c_z & -(a_{x,j} + b_{x,k})c_z \\ -(a_{x,j} + b_{x,k})c_z & (a_{x,j} + b_{x,k})^2 c_z + H_c^2 c_x \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta \dot{z}_{b,j} \\ \Delta \dot{\theta}_{b,j} \end{matrix} \right\} \\ & + \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} -c_z & b_{x,k}c_z \\ (a_{x,j} + b_{x,k})c_z & -b_{x,k}(a_{x,j} + b_{x,k})c_z + H_b H_c c_x \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta \dot{z}_{b,j} \\ \Delta \dot{\theta}_{b,j} \end{matrix} \right\} \\ & + \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} k_z & -(a_{x,j} + b_{x,k})k_z \\ -(a_{x,j} + b_{x,k})k_z & (a_{x,j} + b_{x,k})^2 k_z + H_c^2 k_x \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta z_c \\ \Delta \theta_c \end{matrix} \right\} \\ & + \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} -k_z & b_{x,k}k_z \\ (a_{x,j} + b_{x,k})k_z & -b_{x,k}(a_{x,j} + b_{x,k})k_z + H_b H_c k_x \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta z_{b,j} \\ \Delta \theta_{b,j} \end{matrix} \right\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned} $	(2)
For the jth bogie	$ \begin{aligned} & \left[\begin{matrix} M_b \\ I_b \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta \ddot{z}_{b,j} \\ \Delta \ddot{\theta}_{b,j} \end{matrix} \right\} + \sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} -c_z & (a_{x,j} + b_{x,k})c_z \\ b_{x,k}c_z & -b_{x,k}(a_{x,j} + b_{x,k})c_z + H_b H_c c_x \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta \dot{z}_c \\ \Delta \dot{\theta}_c \end{matrix} \right\} \\ & + \sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} c_z & -b_{x,k}c_z \\ -b_{x,k}c_z & b_{x,k}^2 c_z + H_c^2 c_x \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta \dot{z}_{b,j} \\ \Delta \dot{\theta}_{b,j} \end{matrix} \right\} + \sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} -k_z & (a_{x,j} + b_{x,k})k_z \\ b_{x,k}k_z & -b_{x,k}(a_{x,j} + b_{x,k})k_z + H_b H_c k_x \end{matrix} \right] \left\{ \begin{matrix} \Delta z_c \\ \Delta \theta_c \end{matrix} \right\} \\ & + \left(\sum_{k=1}^{N_z} \left[\begin{matrix} k_z & -b_{x,k}k_z \\ -b_{x,k}k_z & b_{x,k}^2 k_z + H_b^2 k_x \end{matrix} \right] + \sum_{l=1}^{N_{ems}} \left[\begin{matrix} -k_{u,jl}^{ems} & e_{x,j}k_{u,jl}^{ems} \\ e_{x,j}k_{u,jl}^{ems} & -e_{x,j}^2 k_{u,jl}^{ems} \end{matrix} \right] \right) \left\{ \begin{matrix} \Delta z_{b,j} \\ \Delta \theta_{b,j} \end{matrix} \right\} + \sum_{l=1}^{N_{ems}} \left\{ \begin{matrix} k_{i,jl}^{ems} \\ -e_{x,j}k_{i,jl}^{ems} \end{matrix} \right\} \Delta i_{jl}^{ems} \\ & = \sum_{l=1}^{N_{ems}} \left\{ \begin{matrix} -k_{u,jl}^{ems} \sum_{n=1}^{N_{gw}} (\phi_{n,jl}^w q_n^w - \phi_{n,jl}^{w0} q_n^{w0}) \\ e_{x,j}k_{u,jl}^{ems} \sum_{n=1}^{N_{gw}} (\phi_{n,jl}^w q_n^w - \phi_{n,jl}^{w0} q_n^{w0}) \end{matrix} \right\} \end{aligned} $ <p>where $k_{i,jl}^{ems} = \frac{\mu_0 n_{ems}^2 A_{ems}^2}{2(u_{ems0}^2)^2}$, $k_{u,jl}^{ems} = \frac{\mu_0 n_{ems}^2 A_{ems}^2 (j_{jl}^{ems0})^2}{2(u_{ems0}^2)^3}$</p>	(3)
For the lth EMS of the jth bogie	$ \begin{aligned} & \Delta i_{jl}^{ems} + \frac{R_{ems}}{L_{jil}^{ems0}} \Delta i_{jl}^{ems} - \frac{K_a}{L_{jil}^{ems0}} \Delta \ddot{z}_{b,j} - \left(\frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}} + \frac{K_v}{L_{jil}^{ems0}} \right) \Delta \dot{z}_{b,j} - \frac{K_p}{L_{jil}^{ems0}} \Delta z_{b,j} \\ & + \frac{K_a}{L_{jil}^{ems0}} e_{x,j} \Delta \ddot{\theta}_{b,j} + \left(\frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}} + \frac{K_v}{L_{jil}^{ems0}} \right) e_{x,j} \Delta \dot{\theta}_{b,j} + \frac{K_p}{L_{jil}^{ems0}} e_{x,j} \Delta \theta_{b,j} \\ & = -\frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}} \sum_{n=1}^{N_{gw}} \left(\frac{d\phi_{n,jl}^w}{dx} q_n^w - \frac{d\phi_{n,jl}^{w0}}{dx} q_n^{w0} \right) - \frac{k_{u,jl}^{ems}}{k_{i,jl}^{ems}} \sum_{n=1}^{N_{gw}} (\phi_{n,jl}^w q_n^w - \phi_{n,jl}^{w0} q_n^{w0}) - \frac{K_p}{L_{jil}^{ems0}} \sum_{n=1}^{N_{gw}} (\phi_{n,jl}^w q_n^w - \phi_{n,jl}^{w0} q_n^{w0}) \end{aligned} $ <p>where $L_{jil}^{ems0} = \frac{\mu_0 n_{ems}^2 A_{ems}}{2u_{jil}^{ems0}}$, $\left(\frac{d\phi_n^w}{dx} \right)_{jl} = \frac{d\phi_n^w}{dx} \Big _{x=x_i+a_{i,j}+\tilde{e}_{z,j}}$, $\tilde{e}_{x,jl}(t) = e_{x,j} + e_{z,j}\theta_{b,jl}(t)$</p>	(4)
For the nth mode of guideway deflection	$ M_n^w \Delta \ddot{q}_n^w + C_n^w \Delta \dot{q}_n^w + K_n^w \Delta q_n^w = \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{l=1}^{N_{ems}} \phi_{n,jl}^w F_{z,jl}^{ems} - \sum_{j=1}^{N_b} \sum_{l=1}^{N_{ems}} \phi_{n,jl}^{w0} F_{z,jl}^{ems0} $ <p>where $\phi_{n,jl}^w = \phi_n^w(x_c + a_{x,j} + \tilde{e}_{x,jl})$</p>	(5)

Fig. 2 Allowable vertical acceleration of a cabin

우리나라의 호남고속철도 설계지침도 이에 근거하여 허용처짐기준을 제시하고 있다(European Committee for Standardization, 2002; Korea Rail Network Authority, 2007). 그러므로 이 연구에서는 0.8m/s²와 0.4m/s²의 RMS 값에 대응하는 RMQ(Root-Mean-Quad) 값 0.885m/s²과 0.442m/s²을 단주기 영역과 장주기 영역에서의 허용값으로 결정한다(Lee *et al.*, 2020). Fig. 2는 이와 같이 결정된 차체 연직가속도 진동크기의 허용 기준을 도시한다.

4. 처짐한계 산정

매개변수 해석을 통하여 3장에서 서술한 기준을 만족시키는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 산정하고자 한다. 이를

Fig. 3 Maglev train

위해 가이드웨이 구조물의 처짐비를 변화시켜 가며 2장에서 서술한 동적 해석기법으로부터 자기부상열차 차체의 연직가속도를 결정하고, 이 연직가속도가 편안한 승차감을 제공하는 기준을 만족시키는지 검토한다.

우선 차체 1개와 대차 1개로 구성된 간략한 차량에 대해 처짐한계를 산정하고, 이를 Fig. 3의 인천공항 자기부상열차 시스템에 적용하고자 한다. 인천공항 자기부상차량은 2량 1편성으로 구성되어 있고, 1량 당 4개의 대차가 있다. 각 대차에는 8개의 부상전자석이 설치되어 있다. 차량의 만차 중량은 556.4kN이다. 가이드웨이 구조물은 단위길이당 질량이 5671.8kg/m인 단순교로 가정한다. 이 2차원 차량에는 총 32개의 부상전자석이 설치되어 있어, $M_c=1272\text{kg}$, $M_b=500\text{kg}$ 인 간략한 차량이 $m=177.2\text{kg/m}$ 인 가이드웨이를 운행하는 경우에 대해 처짐한계를 산정한다.

4.1 부상공극제이기법 되먹임 이득 산정

고려하는 간략한 차량-가이드웨이 시스템의 동적 해석을 위해서는 부상공극제이기법의 되먹임 이득 K_p , K_v , K_a 를 결정하여야 한다. 이를 위해 차량 현가장치의 고유진동수 $f_n = 1/2\pi \sqrt{k_z/M_c} = 1\text{Hz}$ 와 감쇠비 $\xi = c_z/4\pi M_c f_n = 10\%$, 차량의 자중에 의한 가이드웨이의 정적 처짐 $\delta = (M_c + M_b)gL^3/48EI = L/1000$, 운행속도 $V=100\text{km/h}$ 로 가정한 후, 다양한 경간길이 L 에 대해 되먹임 이득을 결정한다. 인천공항 자기부상철도 설계기준에서는 부상공극을 $8\pm 3\text{mm}$ 로 제한하므로(Korea Rail Network Authority, 2010), 부상공극의 변동량 $\Delta u^{ems}(t)$ 의 절대값이 $\Delta u_{allow}^{ems}=3\text{mm}$ 이내가 되도록 최적화를 수행하여 되먹임 이득을 결정한다. 유전 알고리즘을 이용하여 결정된 되먹임 이득과 $\Delta u^{ems}(t)$ 의 상대오차 $\epsilon_{\Delta u^{ems}} = (\max_t |\Delta u^{ems}(t)| - \Delta u_{allow}^{ems}) / \Delta u_{allow}^{ems}$ 가 Table 3에 주어져 있다. Fig. 4는 $L=30\text{m}$ 일 때 간략한 차량-가이드웨이 시스템의 부상전자석의 부상공극 $u^{ems}(t)$, 차체의 연직가속도 $\ddot{z}_c(t)$, 대차의 변위 $z_b(t)$ 와 차량이 위치한 곳에서의 가이드웨이의 처짐 $w(t)$ 의 시간이력을 보여준다.

Table 3 Physical properties for a maglev train-guideway system

$L(\text{m})$	$K_p(\text{V/m})$	$K_v(\text{V}\cdot\text{sec/m})$	$K_a(\text{V}\cdot\text{sec}^2/\text{m})$	$\epsilon_{\Delta u^{ems}}$
10	2.794E+06	2.086E+03	1.463E+03	3.024E-06
20	3.752E+05	5.238E+03	2.807E+02	6.640E-03
30	1.598E+06	1.991E+04	1.981E+03	4.519E-03
40	9.266E+05	8.908E+03	1.758E+03	1.753E-08
50	6.622E+05	1.357E+04	3.619E+02	1.255E-03
60	7.637E+05	1.580E+04	1.063E+02	1.375E-03
70	9.213E+05	1.819E+04	3.329E+02	3.142E-07
80	9.234E+05	1.918E+04	2.409E+02	3.348E-03
90	7.648E+05	9.657E+03	1.964E+03	8.352E-03
100	8.197E+05	1.673E+04	7.428E+02	5.286E-03

Fig. 4 Dynamic response of the simplified maglev train-guideway system

Fig. 4의 응답에 대하여 차량의 운행속도 $V=100\text{ km/h}=27.78\text{m/s}$, 가이드웨이의 경간길이 $L=30\text{m}$ 이므로, 진동지속시간 $T=1.808\text{s}$ 이고 Fig. 2로부터 결정된 허용 RMQ 값 $\ddot{z}_{c,RMQ}^{allow}$ 은 0.885m/s^2 이다. 한편, Fig. 4의 $\ddot{z}_c(t)$ 로부터 계산한 RMQ 값 $\ddot{z}_{c,RMQ}$ 은 2.151m/s^2 으로 허용치에 대한 비 $\ddot{z}_{c,RMQ}/\ddot{z}_{c,RMQ}^{allow}$ 는 2.430이다. 즉, 이 경우에는 3장에서 서술한 차량의 승차감 기준을 만족시키지 못하게 되는 것이다. 이와 같은 경우에는 가

이드웨이의 휨강성 EI 를 증가시켜, 가이드웨이의 변형과 함께 차체의 가속도와 RMQ 값을 감소시키고 승차감 기준을 만족하도록 한다.

4.2 가이드웨이 처짐한계 산정

고려하는 간략한 차량-가이드웨이 시스템에서 차량 자중에 의한 가이드웨이의 정적 처짐 δ 를 변화시켜 가며 차체의 연직 가속도 $\ddot{z}_c(t)$ 의 RMQ 값을 조사하고 이를 허용치와 비교한다. 이를 위해 차량의 운행속도 V , 차량 현가장치의 고유진동수 f_n 와 감쇠비 ξ , 가이드웨이의 경간길이 L 를 다음과 같이 변화시킨다.

운행속도 V : 50km/h, 60km/h, ..., 100km/h

고유진동수 f_n : 0.1Hz, 0.2Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz

감쇠비 ξ : 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50%

경간길이 L : 10m, 20m, ..., 100m

Fig. 5는 $f_n=1\text{Hz}$, $\xi=10\%$ 일 때, $\ddot{z}_{c,RMQ}/\ddot{z}_{c,RMQ}^{allow}$ 의 변화를 보여준다. $\ddot{z}_{c,RMQ}/\ddot{z}_{c,RMQ}^{allow} \leq 1$ 일 때 3장의 승차감 기준을 만족하는 것이므로, 이 그림으로부터 3장의 승차감 기준을 만족하는 정적 처짐 δ 를 결정할 수 있다. 이와 같은 과정을 상기의 차량 현가장치 고유진동수와 감쇠비에 대하여 수행한 후 이를 평균하여, 3장의 승차감을 만족하는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 결정할 수 있다. 단, 차량은 가이드웨이를 운행할 때 공진이 발생하지 않도록 설계하여야 하므로, $0.8L < V/f_n < 1.2L$ 인 경우는 고려하지 않고 처짐한계를 산정한다.

이상과 같은 과정을 거쳐 결정한 처짐한계를 차량의 운행속도와 가이드웨이의 경간길이에 대하여 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에는 비교를 위해 $L/1300$ 과 $L/2000$ 의 처짐한계도 같이 도시하였다. 현재 우리나라에서 운행 중인 인천공항 자기부상철도의 가이드웨이 교량구조물 설계기준은 단순교의 최대 처짐이 $L/2000$ 이 되도록 규정하고 있다(Korea Rail Network Authority, 2010). 하지만, 이 규정은 자기부상 열차와 가이드웨이 구조물의 상호작용을 고려하지 않고, 차량의 관점에서

Fig. 5 Ratios of the RMQ values of vertical acceleration of a cabin to the allowable values

Fig. 6 Deflection limits for a guideway structure

안정적인 자기부상 공극을 유지하기 위해 제안되었다. 이로 인해 보수적인 단면 성질을 가진 가이드웨이 구조물의 설계가 요구되었고, 물리적인 현상을 엄밀히 고려한 설계기준 제정의 필요성이 제기되어 왔다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, $L/1300$ 의 처짐한계에 대해서도 3장에서 서술한 승차감 기준을 고려하는 차량 운행속도와 가이드웨이 경간길이에 대해 만족할 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 기존 설계기준에서 규정한 $L/2000$ 의 처짐한계보다 완화된 $L/1300$ 의 처짐한계에 대하여 가이드웨이 구조물을 설계하여도 차량 승차감의 관점에서 만족할 수 있는 자기부상철도 시스템을 설계할 수 있고, 완화된 설계기준으로 인해 좀 더 경제적인 가이드웨이 구조물의 설계와 시공이 가능해 질 것이다.

4.3 자기부상철도 시스템의 동적 해석

4.2절에서 제안한 $L/1300$ 의 가이드웨이 구조물 처짐한계는 차체 1개와 대차 1개로 구성된 간략한 차량에 대하여 산정된 것이다. 여기서는 Fig. 3의 인천공항 자기부상열차 시스템의 동적 해석을 통하여 제안된 처짐한계가 실제 자기부상철도 시스템에 대해서도 적절한지 검토하고자 한다.

다양한 가이드웨이 구조물을 고려하기 위해 단위길이당 질량 m 이 11343.6kg/m, 5671.8kg/m, 3781.2kg/m이고 경간길이 L 이 30m인 단순교를 차량이 100km/h로 운행하는 경우에 대하여 해석을 수행한다. Fig. 3과 같이 분포하는 자기부상차량의 자중에 대해 처짐한계를 만족하는 가이드웨이의 휨강성은 $EI=11.092 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 로 산정된다.

2장의 해석기법을 사용하여 대상 시스템의 동적 해석을 수행한다. Fig. 7은 자기부상열차의 첫 번째 대차 첫 번째 부상전

Fig. 7 Dynamic response of the maglev train-guideway system

자석이 설치된 곳에서의 부상공극의 크기 $u^{ems}(t)$, 첫 번째 차체의 연직가속도 $\ddot{z}_c(t)$, 가이드웨이의 첫 번째 경간에서의 중앙부 처짐 $w(t)$ 을 보여주고 있다. 부상공극의 최대 변동량은 고려하는 가이드웨이 구조물 각각에 대하여 2.287mm, 2.110mm, 2.098mm이므로 인천공항 자기부상철도 설계기준을 만족함을 확인할 수 있다. 또한, 차체의 가속도로부터 계산된 RMQ 값은 각각 0.2761 m/s^2 , 0.2762 m/s^2 , 0.2683 m/s^2 이고 차량이 가이드웨이를 통과하는 진동지속시간 1.08 s이므로, 이는 3장의 승차감 기준을 만족하고 있음을 관찰할 수 있다.

이상의 해석 결과로부터 이 연구에서 제안한 $L/1300$ 의 자기부상철도 가이드웨이 처짐한계를 적용하더라도, 기존 자기부상철도 설계기준에서 규정하고 있는 자기부상공극 변동량의 제한 기준을 충분히 만족할 수 있을 뿐만 아니라 승차감과 관련된 진동 기준도 만족할 수 있음을 확인할 수 있다. 기존의 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 설계 기준은 단순교의 최대 처짐이 $L/2000$ 이 되도록 규정하고 있음을 고려할 때, 이 연구에서 제안한 $L/1300$ 의 처짐한계를 적용하면 경제적인 가이드웨이 구조물의 설계가 가능할 것이다.

5. 결론

이 연구에서는 승객에게 편안한 승차감을 제공할 수 있도록 자기부상열차 차체 연직가속도의 진동크기에 대한 기준을 제시하고 이를 만족하는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 제안하였다. 자기부상열차 시스템의 동적 거동은 차량-구조물 상호작용에 의해 영향을 받으므로, 이를 고려한 해석기법을 사용하여 자기부상열차와 가이드웨이 시스템의 동적해석을 수행하였다. 가이드웨이의 경간길이와 차량 자중에 의한 정적처

짐의 비에 따른 자기부상열차 시스템의 동적 거동 변화를 검토하여 차체 연직가속도에 대한 기준을 만족할 수 있는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 $L/1300$ 로 제안하였다. 이를 실제 자기부상열차 시스템의 동적 해석에 적용하여 제안한 처짐한계의 적절성을 검토하였다. 기존의 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 설계 기준은 단순교의 최대 처짐이 $L/2000$ 이 되도록 규정하고 있음을 고려할 때, 이 연구에서 제안한 $L/1300$ 의 처짐한계를 적용하면 경제적인 가이드웨이 구조물의 설계와 시공이 가능할 것으로 기대된다.

이 연구에서는 최고시속 100km/h의 중저속 도시형 자기부상철도에 대하여 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 제안하였다. 현재 국외에서는 최고시속 430km/h의 초고속 자기부상열차가 상용 운행 중이고, 최고시속 1200km/h로 운행할 수 있는 하이퍼튜브 시스템에 대한 연구도 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 이 연구에서 사용한 방법론을 확장 적용하여 중고속, 초고속 자기부상철도와 하이퍼튜브 시스템의 가이드웨이 구조물에 대한 설계기준도 개정하거나 새로이 제정할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부에서 시행하는 “도시경관 친화형 경전철 고가구조물 설계기술 개발” 과제로부터 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R111A3068424).

References

- British Standards Institution** (1987) *Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated*, BSI, p.6841.
- European Committee for Standardization** (2002) *Eurocode - Basis of Structural Design*, EN 1990:2002+A1.

- International Organization for Standardization** (1997) *Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. Part 1: General Requirements*, ISO 2631-1.
- Jang, J., Lee, J., Jun, H., Lee, K.** (2017) Analysis and Improvement of Stability of Hypertube, *Proceedings of the 2017 Spring Conferece of the Korean Society of Railway*, KSR2017S051.
- Jung, M.-R., Min, D.-J., Lee, J.-S., Kwon, S.-D., Kim, M.-Y.** (2011) Dynamic Interaction Analysis of Train and Bridge According to Modeling Methods of Maglev Trains, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(2), pp.167~175.
- Korea Rail Network Authority** (2007) *Design Manual of Honam High Speed Railway*, Korea Rail Network Authority, Deajeon.
- Korea Rail Network Authority** (2010) *Structural Design Report for Demonstration Line of Urban Maglev Program*.
- Lee, H.W., Kim, K.C., Lee, J.** (2006) Review of Maglev Train Technologies, *IEEE Trans. Magn.*, 42, pp.1917~1925.
- Lee, J.H., Kim, L.H., Kim, S.I.** (2014) Verification of an Analysis Method for Maglev Train-Guideway Interaction Using Field Measurement Data, *J. Korean Soc. Railw.*, 17, pp.233~244.
- Lee, J.H., Kim, S.I.** (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.
- Lee, J.H., Kim, S.I., Shin, J.R.** (2020) Proposal of Deflection Limits for Elevated Guideways for Light Rail Transit Considering Ride Comfort, *J. Korean Soc. Railw.*, 23, pp.298~305.
- Lee, J.S., Kwon, S.D., Yeo, I.H., Kim, M.Y.** (2009) The Dynamic Interaction Analysis of Actively Controlled Maglev and Guideway Bridge Systems, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 29(4D), pp.523~533.
- Sinha, P.K.** (1987) *Electromagnetic Suspension: Dynamics and Control*, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
- Yau, J.D.** (2009) Vibration Control of Maglev Vehicles Traveling over a Flexible Guideway, *J. Sound & Vib.*, 321(1-2), pp.184~200.
- Zhou, D., Hansen, C.H., Li, J., Chang, W.** (2010) Review of Coupled Vibration Problems in EMS Maglev Vehicles, *Int. J. Acoust. & Vib.*, 15(1), pp.10~23.

요 지

승객에게 편안한 승차감을 제공할 수 있도록 자기부상열차 차체 연직가속도의 진동크기에 대한 기준을 제시하고 이를 만족하는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 제안한다. 차량-구조물 상호작용을 고려한 해석기법을 사용하여 자기부상열차 시스템의 매개변수 해석을 수행하고, 차체 연직가속도에 대한 기준을 만족할 수 있는 가이드웨이 구조물의 처짐한계를 $L/1300$ 로 제안한다. 이를 실제 자기부상열차 시스템의 동적 해석에 적용하여 제안한 처짐한계의 적절성을 검토한다. 기존의 자기부상철도 가이드웨이 구조물의 설계 기준과 비교하였을 때, 이 연구에서 제안한 처짐한계를 적용하면 경제적인 가이드웨이 구조물의 설계와 시공이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 자기부상철도, 가이드웨이, 처짐한계, 차량-구조물 상호작용, 승차감