열차-교량의 동적 상호작용을 고려한 중·저속 및 초고속 자기부상열차와 가이드웨이의 동특성 해석

Dynamic Interaction Analysis of Low, Medium and Super-high Speed Maglev and Guideways

민동주¹⁾ · 정명락²⁾ · 이준석³⁾ · 김이현⁴⁾ · 김문영⁵⁾

Min, Dong Ju · Jung, Myung Rag · Lee, Jun Seok · Kim, Lee Hyeon · Kim, Moon Young

국문 요약 >> 자기부상열차가 중·저속 및 초고속 주행 시 차량의 주행특성 및 교량의 동적 응답 결과를 제시하고자 한다. 수직 자유도 및 회전 자유도를 포함한 10자유도 자기부상열차에 대한 운동방정식을 유도하고, 모드 중첩법을 이용하여 교량의 운동방정식을 구성하였다. 또한 제어 방법으로 UTM01제어기법을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 해석 예제로 노면조도, 가이드웨이의 처짐비, 차량 속도 등이 교량의 처짐과 차량의 부상공극 및 여러 가지 변수에 미치는 영향을 파악하였다. 부상공극은 조도의 조건에 따라 그 차이가 확연히 드러나고 또한 자기부상열차의 속도가 증가함에 따라 부상공극이 증가함을 알 수 있었다. 그리고 자기부상열차가 중, 저속 주행 시에는 교량에 대한 영향이 미비하지만 초고속 주행 시 교량에 대한 동적확대계수가 큰 값을 보여주었다.

주요어 10 자유도 자기부상 열차, 처짐비, 조도, 동적확대계수, 모드 중첩법, 초고속

ABSTRACT >> The purpose of this study is to examine the dynamic characteristics of low, medium and high speed Maglev trains and guideways through dynamic interaction analysis. The coupled dynamic equations of motion for a vehicle of 10-dof and the associated guideway girders are developed by superposing vibration modes of the girder itself. The controller used in the UTM-01 Maglev vehicle is adopted to control the air gap between the bogie and guideway in this study. The effect of roughness, the guideway deflection-ratio and vehicle speed on the dynamic response of the maglev vehicle and guideway are then investigated using the 4th Runge-Kutta method. From the numerical simulation, it is found that the air gap increases with an increase of vehicle speed and the roughness condition. In particular, the dynamic magnification factor of the guideway girder is small at low and medium speeds, but the factor is noticeable at super-high speeds.

Key words 10-dof Maglev train, Deflection-ratio, Roughness, Mode superposition, Uper-high speed

1. 서 론

자기부상열차는 근래에 들어 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 현재 자기

부상열차가 상용화되어 운행되고 있는 나라는 일본(리니모)과 중국(상해)뿐이며 중국에서는 2014년을 목표로 초고속 자기부상열차를 개발 중이다. 우리나라는 자기부상열차의 상용화를 국책 사업으로 선정해 철도차량 제조 업체인 로템과 대전 대덕 연구단지 내 기계연구원에서 국내 기술로 자기부상열차 개발이 진행되고 있다. 우리나라 역시 2013년 첫 운행을 목표로 인천공항을 잇는 중·저속 자기부상열차를 개발 중이다.

기존 자기부상열차 관련 연구를 보면⁽¹⁰⁻¹²⁾, 주로 전자기력에 의한 EMS(Electro Magnetic Suspension)를 등가의 강성과 감쇠를 가진 선형화된 수동계로 치환하여 모델링한 연구가 다수를 차지하고 있다.⁽⁶⁾ 그 외 기계 혹은 전자 분야 연구자들이 차량과 교량의 간격을 감지하여 제어하는 능동

¹⁾ 성균관대학교 건설환경 시스템 공학과 · 석사과정
(교신저자: marshow@nate.com)

²⁾ 성균관대학교 건설환경 시스템 공학과 · 석사과정

³⁾ 청석엔지니어링 과장 · 공학박사

⁴⁾ 한국철도기술연구원 · 선임연구원

⁵⁾ 정회원 · 성균관대학교 건설환경 시스템 공학과 · 정교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 9. 28 / 수정일 1차: 2010. 11. 29, 2차: 2011. 1. 14 / 게재확정일 : 2011. 1. 17)

시스템을 연구 하였으나⁽¹²⁾, 대부분 차량의 관점에서 부분적으로 교량의 영향을 고려하거나 하지 않았고, 최근까지 교량의 영향을 동적 상호작용의 관점에서 직접적으로 고려한 연구는 드물다.

국내에서도 다양한 범위에서 자기부상열차와 관련된 연구가 선행되고 있는데⁽⁴⁾, 주로 초기제작과정의 자기부상열차의 실험과 관련된 논문 및 제어관련 부분이 생략된 해석 논문이 다수를 차지하고 있다. 또한, 한형석 등(2007)⁽⁵⁾은 UTM-01의 제어를 포함하는 주행성능을 파악하기 위한 연구를 수행하였고, 주로 주파수영역 해석법에 의한 제어기의 특성파악에 주목하고 있는 편이다. 이준석(2007)⁽²⁾은 자기부상열차와 교량의 상호작용을 고려한 동특성에 대한 연구를 하였으며, 권순덕 등(2008)⁽⁷⁾은 변동 풍속이 작용하는 자기부상열차의 응답에 대한 연구를 수행하였다. 최근에 이준석 등(2009)⁽³⁾은 능동제어를 고려한 중·저속 자기부상열차-교량 상호작용 선형 해석법을 제시하였다.

본 논문에서는 중·저속뿐만 아니라 초고속 자기부상열차(700km/h)에 대한 부상 특성을 고려하는 자기부상 시스템의 능동제어 알고리즘 (UTM01 제어기)을 적용하여 선로 시스템과 자기부상 열차간의 동적 상호작용 효과를 고려하였고, 이 해석방법을 이용한 차량의 주행특성 및 교량의 동적 응답 결과를 제시하고자 한다. 특히, 처짐비와 조도 같은 가이드웨이의 특성과 열차간의 동적 상호 작용해석을 통하여 선로특성이 자기부상열차의 주행성에 미치는 영향을 분석하고 이때의 자기부상열차의 동적 거동을 조사하였다. 초고속으로 주행할 때의 동적 거동을 알아보고자 중·저속으로 주행할 때와 비교하여 최고 속도 700km/h까지 해석을 실시 하였다. 수직 자유도 및 회전 자유도를 포함한 10자유도 자기부상열차에 대한 운동방정식을 구성하고, UTM01에 적용된 제원을 사용하여 수치해석을 수행하였고, 해석 예제로 노면조도, 가이드웨이의 처짐비, 차량 속도 등과 같은 선

로시설물의 특성이 차량의 부상공극 및 여러 가지 변수에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 자기부상열차 및 교량 운동 방정식

본 논문에서는 차체와 각 보기의 수직 자유도 및 회전 자유도를 포함한 10자유도 자기부상열차에 대한 운동방정식을 유도하였다. 차량은 하나의 차체에 4개의 보기로 구성되어 있다. 각 보기는 8개의 EMS와 4개의 센서로 구성되어 있고 4개의 2차 현가장치로 차체와 연결되어 있다. 자기부상 열차의 모델은 3차원 이지만 2차원 강체 모델로 가정하여 동일한 위치에 있는 EMS, 센서 및 2차 현가장치는 두 개를 중복시켜 그림 1과 같이 모델링 한다.

2.1 자기부상력

EMS에서 발생하는 자기부상력과 입력 전류의 지배방정식은 비선형이지만, 부상공극이 미소하다고 가정하면 초기의 정지부상상태(z_0, i_0)를 기준으로 다음과 같이 선형관계식으로 나타낼 수 있다.

$$F_m = F_{m0} + \Delta F_m \quad (1)$$

$$F_{m0} = \frac{\mu_0 N_m^2 A_m i_0^2}{4 z_0^2}, \quad \Delta F_m = k_i i(t) - k_z z_{bg}(t) \quad (2a, b)$$

여기서,

$$k_i = \frac{\mu_0 N_m^2 A_m i_0}{2 z_0^2}, \quad k_z = \frac{\mu_0 N_m^2 A_m i_0^2}{2 z_0^3} \quad (3a, b)$$

또한 전기적 저항과 전류와 관련된 전압의 변화량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

〈그림 1〉 10자유도 자기부상열차 모델

$$v_0 + v(t) = Ri_0 + Ri(t) + L_0 \dot{i}(t) - k_z z(t) \quad (4)$$

위 식을 정리하면

$$i(t) = \frac{k_z}{k_i} \dot{z}_{bg} - \frac{R}{L_0} i(t) + \frac{1}{L_0} v(t) \quad (5)$$

여기서,

$$L_0 = \frac{\mu_0 N_m^2 A_m}{2z_0} \quad (6)$$

2.2 차체 및 보기의 운동방정식

차체와 각 보기의 운동 방정식은 차체와 보기를 분리시켜서 각각의 자유물체도로부터 동역학적 관점에서 운동 방정식을 도출한다. 그림 2에서 보듯이 차체는 8개의 2차 현가장치로부터 발생하는 힘과 차체의 무게, 그리고 관성력을 포함한 힘의 평형으로부터 운동방정식 (7)과 (8)을 유도할 수 있다.

$$m_c \ddot{z}_c = - \sum_{j=1}^{N_{bogi}} \sum_{i=1}^2 [k_s \{z_c - (a_j + b_i) \theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj}\} + c_s \{\dot{z}_c - (a_j + b_i) \dot{\theta}_c - \dot{z}_{bj} + b_i \dot{\theta}_{bj}\}] \quad (7)$$

$$I_c \ddot{\theta}_c = \sum_{j=1}^{N_{bogi}} \sum_{i=1}^2 (a_j + b_i) [k_s \{z_c - (a_j + b_i) \theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj}\} + c_s \{\dot{z}_c - (a_j + b_i) \dot{\theta}_c - \dot{z}_{bj} + b_i \dot{\theta}_{bj}\}] \quad (8)$$

$$z_{cbji} = z_c - (a_j + b_i) \theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj} \quad (9)$$

위와 같은 방식으로 각 보기의 운동방정식 식 (10)과 (11)을 얻을 수 있다.

〈그림 2〉 차체의 자유물체도

〈그림 3〉 보기의 자유물체도

$$m_b \ddot{z}_{bj} = \sum_{i=1}^2 [k_s \{z_c - (a_j + b_i) \theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj}\} + c_s \{\dot{z}_c - (a_j + b_i) \dot{\theta}_c - \dot{z}_{bj} + b_i \dot{\theta}_{bj}\}] + \sum_{k=1}^{N_{ems}} \{-k_i i_{jk} + k_z (z_{bj} - e_k \theta_{bj} - v_{gik} - z_{rjk})\} \quad (10)$$

$$I_{bj} \ddot{\theta}_{bj} = - \sum_{i=1}^2 b_i [k_s \{z_c - (a_j + b_i) \theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj}\} + c_s \{\dot{z}_c - (a_j + b_i) \dot{\theta}_c - \dot{z}_{bj} + b_i \dot{\theta}_{bj}\}] + \sum_{k=1}^{N_{ems}} e_k \{k_i i_{jk} - k_z (z_{bj} - e_k \theta_{bj} - v_{gik} - z_{rjk})\} \quad (11)$$

2.3 교량의 운동방정식

본 연구에서는 단경간 25m 교량의 고유진동수와 진동 모드를 통한 모드 중첩법을 적용하여 교량의 처짐을 표현하였으며 이를 통해 교량의 운동방정식을 유도 하였다. 기본적인 단순지지 교량의 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M \ddot{y}_n + C \dot{y}_n + K y_n = F_m \quad (12)$$

이때 교량의 연직 변위 $y_n(x, t)$ 은 일반화된 좌표 $q_n(t)$ 과 모드 형상인 $\Phi_n(x)$ 의 곱의 합으로 나타내면

$$y_n(x, t) = \sum_{n=1}^{N_{mode}} \phi_n(x) q_n(t) \quad (13)$$

여기서 단경간 교량의 진동수 및 모드 형상은 다음과 같다.

$$\omega_n = n^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}, \quad \phi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{mL}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (14a, b)$$

식 (13)을 식 (12)에 대입하고 모드 형상의 직교성을 이용하여 정리하면

〈표 1〉 가이드웨이 제원

경간장 (m)	처짐비	폭 (m)	높이 (m)	두께 (m)	넓이 (m ²)	2차 단면 모멘트(m ⁴)	단위 무게 (ton/m)	1 st 고유진동수 (Hz)
25	500	1.35	0.93	0.2	0.75	0.078	2.25	2.56
25	1000	1.35	1.21	0.2	0.86	0.157	2.59	3.38
25	1500	1.35	1.41	0.2	0.95	0.235	2.84	3.95
25	2000	1.35	1.58	0.2	1.01	0.314	3.04	4.41
25	2500	1.35	1.72	0.2	1.07	0.392	3.21	4.80
25	3000	1.35	1.85	0.2	1.12	0.471	3.36	5.13
25	3500	1.35	1.965	0.2	1.166	0.550	3.50	5.61
25	4000	1.35	2.07	0.2	1.21	0.628	3.62	5.90

〈그림 4〉 가이드웨이에 사용된 BOX형 거더

고 단면은 그림 4와 같이 박스형 거터이다.

3. 제어방식 및 해석 방법

자기부상 열차의 부상공극이 기준 범위 안에서 유지되도록 하기 위해선 EMS에서 발생하는 부상력을 제어할 필요가 있다. 이 부상력을 제어하기 위한 변수가 전압이다. 센서에서 관측된 부상공극 및 연직 가속도를 제어기에서 받아들이 전압을 결정하게 된다. UTM01 열차에 적용된 제어 방식을 이용하였고 제어 알고리즘은 다음과 같다.⁽¹⁾

$$\dot{\hat{X}}_s = A_s \hat{X}_s + L_s y_s \quad (18)$$

$$\hat{X}_s = \{\hat{X}_{1js}, \hat{X}_{2js}, \hat{X}_{3js}, \hat{X}_{4js}, \hat{X}_{5js}\}^T, y_s = \{\ddot{z}_{bjs}, g_{js}\}^T \quad (19a, b)$$

$$\begin{aligned} \phi_n^T(x)M\phi_n(x)\ddot{q}_n(t) + \phi_n^T(x)C\phi_n(x)\dot{q}_n(t) \\ + \phi_n^T(x)K\phi_n(x)q_n(t) = \phi_n^T F_m \end{aligned} \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} \phi_n^T(x)M\phi_n(x) = 1, \phi_n^T(x)C\phi_n(x) = 2\xi_n\omega_n \\ \phi_n^T(x)K\phi_n(x) = \omega_n^2, F_m = F_{m0} + \Delta F_m \end{aligned} \quad (16a-d)$$

즉, 가이드웨이의 운동방정식은 다음과 같이 유도 된다.

$$\begin{aligned} \ddot{q}_n(t) = -2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t) - \omega_n^2q_n(t) \\ + \sum_{i=1}^{Nbogie} \sum_{k=1}^{Nems} \phi_n(x_{jk}) \{F_{m0} + k_i i_{jk} \\ - k_z(z_{bj} - e_k \theta_{bj} - v_{gjk} - z_{rjk})\} \end{aligned} \quad (17)$$

표 1은 논문에서 적용한 교량에 대한 제원으로 단경간 25m 교량에 처짐비 500~4000에 대해 다양하게 고려하였

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ \frac{-1}{T_1} & \frac{-V_1}{T_3} & 0 & \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & \frac{-V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-V_3}{T_4} & \frac{-1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{bmatrix}, L_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20a, b)$$

$$\begin{aligned} v_{js} = k_1(-x_{1js} - V_1 x_{2js} + V_1 x_{4js} + \ddot{z}_{bjs}) + k_2 x_{2js} \\ + k_3 x_{3js} + k_4 x_{4js} + k_5 x_{5js} \\ = k_1 \ddot{z}_{bjs} + (-k_1)x_{1js} + (-k_1 V_1 + k_2)x_{2js} + k_3 x_{3js} \\ + (k_1 V_1 + k_4)x_{4js} + k_5 x_{5js} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\ddot{z}_{bjs} = \ddot{z}_{bj} - s_s \ddot{\theta}_{bj}, g_{js} = z_{bj} - s_s \theta_{bj} - z_{rjs} \quad (22a, b)$$

자기부상 열차의 상호작용이 고려된 식들을 상태공간 방정식의 형태로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + f(t) \quad (22)$$

여기서

$$x = \{x_b; x_v; x_i; \hat{x}\}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{bb} & A_{bv} & A_{bi} & A_{b\hat{x}} \\ A_{vb} & A_{vv} & A_{vi} & A_{v\hat{x}} \\ A_{ib} & A_{iv} & A_{ii} & A_{i\hat{x}} \\ A_{\hat{x}b} & A_{\hat{x}v} & A_{\hat{x}i} & A_{\hat{x}\hat{x}} \end{bmatrix} \quad (23a, b)$$

$$x_b = \{q_1, \dots, q_{nmode}, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_{nmode}\}^T$$

$$x_v = \{z_c, \dot{z}_c, z_{b1}, \dot{z}_{b1}, \theta_{b1}, \dot{\theta}_{b1}, \dots, z_{b4}, \dot{z}_{b4}, \theta_{b4}, \dot{\theta}_{b4}\}^T$$

$$x_i = \{i_{11}, i_{12}, \dots, i_{41}, i_{42}\}^T$$

$$\hat{x} = \{\hat{x}_{111}, \hat{x}_{211}, \hat{x}_{311}, \hat{x}_{411}, \hat{x}_{511}, \dots, \hat{x}_{342}, \hat{x}_{442}, \hat{x}_{542}\}^T \quad (24a, b)$$

결국 전체적인 상태 공간 방정식은 연립상미분방정식이 되므로 비교적 정확한 해석방법인 4계 Runge-Kutta 방법을 적용하였다.

$$x_{i+1} = x_i + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \quad (24)$$

여기서

$$k_1 = A(t_i)x_i + f(t_i)$$

$$k_2 = A\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}\right)\left(x_i + k_1 \frac{\Delta t}{2}\right) + f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}\right)$$

$$k_3 = A\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}\right)\left(x_i + k_2 \frac{\Delta t}{2}\right) + f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}\right)$$

$$k_4 = A(t_i + \Delta t)(x_i + k_3 \Delta t) + f(t_i + \Delta t) \quad (25a-b)$$

4th Runge-kutta법을 적용하는 경우에 식 (25)의 k_i 값 산정 시 i 번째 위치에서 $A(t_i + \Delta t)$, $f(t_i + \Delta t)$, $A(t_i + \frac{\Delta t}{2})$, $f(t_i + \frac{\Delta t}{2})$ 및 $A(t_i)$, $f(t_i)$ 를 구하는 것에 유의하여야 한다. (그림 5 참조)

〈그림 5〉 4계 Runge-kutta 해석법

〈표 2〉 실측 조도(KIMM)

조도 조건	Condition	조도 크기(mm)
KIMM01	상	-1.852~2.062
KIMM02	중	-3.704~4.124
KIMM03	하	-5.550~6.186

〈그림 6〉 KIMM에 의해 실측된 조도

4. 조도

본 연구에서는 선로의 특성 중 레일조도가 자기부상열차에 미치는 영향이 큰 부분을 차지할 것으로 예상하고 다양한 조건에 대해 해석을 실시 하였다. 레일조도는 한국기계연구원(KIMM)이 시험선로에서 가이드웨이의 고도 정보로부터 측정된 조도를 사용하였으며, 노면조도의 상태가 주행성에 미치는 영향을 다양하게 분석하기 위해 조도확대계수를 0.5배, 1배 및 1.5배인 경우에 대한 해석도 동시에 실시하여 각 경우에 대한 조도의 영향을 분석하였다. 적용된 3가지 조도 조건은 표 2와 같으며 그림 6은 표 2에서 KIMM02의 공간이력을 나타낸다.

5. 해석조건 및 결과분석

해석에 적용된 제원은 표 3에서 보는 바와 같이 UTM01 열차에 사용된 제원을 사용하였다. 해석은 총 길이 750m, 각 조도 조건(조도가 없을 경우, KIMM01, 02, 03), 처짐비 500~4000, 그리고 차량의 속도는 50km/h~700km/h까지 실시하여 조도, 처짐비와 속도가 자기부상열차의 동특성에 미치는 영향을 파악하였다. 지상구간 주행 시 조도의 변화에 따른 응답을 비교 분석하였고, 교량 구간에 대해 해석을 실시함으로써 교량에 미치는 영향을 동적확대계수(DMF)를 통하여 살펴 보았다. 다음 그림 7은 대표적으로 자기부상열차의 속도가 200km/h, 처짐비 3000 그리고 조도조건 KIMM02일 때 차량의 위치에 따른 부상공극 및 차체가속도를 나타낸 것이다.

〈표 3〉 자기부상열차(UTM01)의 제원

Index		Value
Cabin의 무게(m_c)	Empty	11000kg
	Full	19000kg
Cabin의 질량관성 모멘트	I_c	1419000kg·m ²
Bogi의 무게	m_b	1015kg
Bogi의 질량관성 모멘트	I_b	557.8kg·m ²
2차 현가장치	k_s	8×10^4 N/m
	C_s	5.2×10^4 N·s/m
EMS	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
	N	400turn
	A	0.036m ²
	R	0.6 Ω

5.1 조도에 의한 영향 분석

이 절에서는 지상 구간을 주행할 때 조도가 자기부상열차의 거동에 미치는 영향을 파악하고자 속도의 증가에 따라 그리고 조도의 조건을 변화시키면서 동적 응답을 확인하였다. 그림 8은 조도 조건과 열차의 중저속 및 초고속 주행에 따른 응답의 최대값을 취하여 그래프로 나타냈다. 전압과 차체의 연직가속도는 속도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 부상공극은 조도의 상태가 불량함에 따라, 열차의 속도가 증가함에 따라 부상공극이 증가하는 경향을 나타냈다.

〈그림 7〉 차량 위치에 따른 부상 공극(위)과 차체 가속도(아래)의 시간이력

(a) 속도의 증가에 따른 최대 부상공극의 변화

(b) 속도의 증가에 따른 최대 차체 가속도의 변화

(c) 속도의 증가에 따른 최대 전압의 변화

(d) 속도의 증가에 따른 최대 전류의 변화

〈그림 8〉 지상구간을 주행 시 속도와 조도의 변화에 따른 최대 응답값

5.2 동적확대계수

교량-열차의 동적 상호작용에 의해서 발생하는 동적 변위와 정적 영향선 해석을 통해서 얻은 최대변위로부터 주행에 의한 동적 충격량(동적확대계수, DMF)을 산정할 수 있다. 표 4는 처짐비 4000, 조도 조건(KIMM02)일 때 속도의 증가에 따른 동적 처짐과 정해석 결과를 비교하여 상대적인 비율로부터 구한 동적확대계수를 보여주고 있다.

표 4에서 알 수 있듯이 동적확대계수는 250km/h 이하에서는 1.09 이하로 미비하지만 400km/h에서는 1.3 이상, 700km/h 주행 시에는 대략 1.6까지 증가하였다. 이로부터 자기부상열차가 중, 저속 주행 시에는 교량에 대한 영향이 미

비하지만 초고속으로 갈수록 교량에 큰 영향을 미치고 있다.

그림 9는 교량의 처짐비와 조도가 동적확대계수에 미치는 영향을 파악하기 위해 속도가 200km/h 일 때 DMF를 도시해 놓았다.

그림 9에서 보는 바와 같이 처짐비가 클수록(교량의 강성이 증가할수록) 동적확대계수가 감소하는 것을 보이지만 조도의 조건에는 민감하게 변화하지 않음을 보여주고 있다. 즉, 자기부상열차가 교량에 미치는 영향은 속도가 클수록 처짐비가 작을수록 크지만 조도와는 무관하였다.

5.3 자기부상열차의 동적 응답

자기부상열차의 동적 거동을 살펴보는데 있어서 여러 가지 변수들이 존재한다. 기본적으로 부상공극을 꼽을 수 있을 것이고 차체의 연직방향 가속도 또한 승차감과 직결되는 중요한 요소 중 하나이다. 또한 EMS와 센서에서 발생하는 전류와 전압도 유심히 살펴보아야 할 변수이다.

대표적으로 속도 200km/h에서 조도 조건과 처짐비의 변화에 따른 결과를 살펴 보겠다. 그림 10은 결과를 한눈에 비교 분석하기 위하여 조도 조건과 속도에 따른 응답의 최대값을 취하여 그래프로 나타내었다. 그림 10(a)에서 보듯이 처짐비가 클수록(교량의 강성이 클수록) 부상공극이 작아지는 경향이 있다. 특히 교량의 강성이 작을 때는 그 변화가 급격하였고 강성이 커질수록 부상공극의 최대값의 변화가 완만함을 보였다. 그림 10(b)과 (d)에서 보듯이 차체가속도와 전류 역시 부상공극과 비슷한 경향을 나타냈다. 하지만 전압은 처짐비에 따른 변화를 보이긴 하지만 조도에 의한 영향이 더욱 두드러지게 나타났다.

〈표 4〉 속도의 증가에 따른 동적확대계수

속도 (km/h)	동적 최대 처짐(mm)	정적 최대 처짐(mm)	동적확대 계수
50	3.432	3.362	1.021
100	3.475	3.362	1.034
150	3.500	3.362	1.041
200	3.665	3.362	1.090
250	3.694	3.362	1.098
300	3.813	3.362	1.134
350	4.118	3.362	1.224
400	4.409	3.362	1.311
450	4.635	3.362	1.378
500	4.814	3.362	1.431
550	4.983	3.362	1.482
600	5.115	3.362	1.521
650	5.246	3.362	1.560
700	5.358	3.362	1.593

〈그림 9〉 주행속도 200km/h일 때 조도 및 처짐비에 따른 동적확대계수의 변화

(a) 처짐비에 따른 최대 부상공극의 변화

(b) 처짐비에 따른 최대 차체가속도의 변화

(c) 처짐비에 따른 최대 전압의 변화

(d) 처짐비에 따른 최대 전류의 변화

〈그림 10〉 속도 200km/h 주행 시 조도 및 처짐비에 따른 최대 응답값

6. 결론

조도 조건의 변화, 가이드웨이의 처짐비 및 열차의 속도가 자기부상열차의 응답에 미치는 영향을 살펴 보았다. 이를 위해 조도 조건을 확대 계수를 통해 바뀌며 차량의 주행 시 응답을 살펴 보았으며 같은 조건하에 최고 속도 700km/h까지 증가 시키며 초고속 주행 시 자기부상 열차의 동적 응답을 살펴 보았다. 속도의 증가에 따라 교량에 미치는 영향을 동적확대계수를 통하여 살펴보고 각 처짐비에 대해서 조도 조건 및 속도를 변화시키며 자기부상열차에 미치는 동적 응답을 도출해 보았다.

1. 조도의 상태가 불량할수록 부상공극 뿐만 아니라 차체의 연직가속도, 전류 및 전압의 최대값이 커지는 경향이 있었다. 즉 노면조건이 불량일수록 자기부상열차의 거동이 불안정 하였다.
2. 평지를 주행할 때 조도 조건하에 속도의 증가에 따른 응답을 살펴 보았다. 조도조건 KIMM01(상)에서는 초고속

주행 시에도 부상공극이 4mm 안에 들어오고 차체의 연직가속도 역시 1m/s^2 내로 거동하여 안전 측에 속하였지만 다른 조도 조건 아래에선 속도의 증가에 따라 부상공극이 점차 증가하여 기준치를 넘어섰다.

3. 동적확대계수는 열차의 속도가 증가함에 따라 초고속 주행 시 큰 폭으로 증가하였다. 또한 교량의 처짐비가 증가할수록(교량의 강성이 증가할수록) 동적확대계수는 줄어들었다. 하지만 조도의 조건에는 민감하게 반응하지 않았다.
4. 중·저속으로 주행하는 자기부상열차의 최대부상공극은 처짐비가 작을수록 그리고 조도조건이 불량할수록 응답이 크게 나왔다.

감사의 글

본 연구는 철도기술 연구원의 초고속 튜브철도 인프라 핵심기술 개발 과제의 일환으로서 수행된 바, 연구 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부 한국건설 교통기술 평가원, 주행특성 및 승객안전성 향상 1단계 실적보고서, 265-282, 2009.
2. 이준석, 능동 제어되는 자기부상열차-가이드웨이의 동적 상호작용 해석, 박사학위논문, 성균관대학교, 2007.
3. 이준석, 권순덕, 여인호, 김문영, “능동제어를 고려한 자기부상열차와 가이드웨이 교량의 동적상호작용 해석,” 대한토목학회 논문집, 523-533, 2009.
4. 조홍제, 이종민, “상전도 자기부상열차의 주행성능시험 및 평가,” 1998년도 춘계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, 102-107, 1998.
5. 한형석, 임봉혁, 이남진, 문석준, 정정훈, “전자석 현가 시스템의 부상 공극 주파수 응답 해석,” 2007년도 추계학술발표회, 한국철도학회, 912-917, 2007.
6. Cai, Y., Chen, S.S., Rote, D.M., and Coffey H.T., “Vehicle/guideway interaction for high speed 6. vehicles on a flexible guide-way,” *J. of Sound and Vibration*, Vol. 175, No. 5, 625-646, 1994.
7. Kwon, S.D., Lee, J.S., Moon, J.W., and Kim, M.Y., “Dynamic interaction analysis of urban maglev vehicle and guideway suspension bridge subjected to gusty wind,” *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, 2008.
8. Lee, J.S., Kwon, S.D., Kim, M.Y., and Yeo, I.H., “A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guideway structures,” *J. of Sound and Vibration*, 328, 301-317, 2009.
9. MATLAB, *Control System TOOLBOX*, The Math Works Inc, 2004.
10. Sinha, P.K., *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus, London, U.K, 1987.
11. Tsunashima, H., and Abe, M., “Static and Dynamic Performance of Permanent Magnet Suspension for Maglev Transport Vehicle” *Vehicle System Dynamics*, 29, 83-111, 1998.
12. Zhao, C.F., and Zhai, W.M., “Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality,” *Vehicle System Dynamics*, Vol. 38, No. 3, 185-210, 2002.

부 록

A_m : 자석 면적

a_j : 차체 중심에서 j번째 보기까지 거리

b_i : 보기 중심에서 i번째 2차 현가장치까지 거리

c_s : 2차 현가장치의 댐핑계수

e_k : 보기 중심에서 k번째 EMS까지 거리

F_{mo} : 정적 평형상태에서의 자력

F_m : 총 자력

ΔF_m : 변동 자력

I_c : Cabin의 질량관성 모멘트

I_{bj} : j번째 Bogie의 질량관성 모멘트

i_o : 초기 입력전류

i_{jk} : j번째 보기의 k번째 EMS에서의 변동 전류

k_s : 2차 현가장치의 스프링계수

k_b, k_z : 전류와 공극에 비례하는 등가 강성

L_o : 자석의 인덕턴스

m_{bj} : j번째 Bogie의 무게

m_c : Cabin의 무게

N_m : 코일의 감긴 횟수

R : 자석의 릴럭턴스

s_s : 보기 중심에서 s번째 센서까지 거리

v_{js} : j번째 보기의 s번째 센서에서의 제어전압

x_{jk} : j번째 보기의 k번째 위치의 좌표

z_{bj} : j번째 보기의 수직 변위

$\ddot{z}_{bj}$: j번째 보기의 연직 가속도

z_o : 정적 평형 공극

z_{bg} : 가이드웨이와 보기 사이의 상대 변위(부상공극)

z_c : Cabin의 수직 변위

$\ddot{z}_c$: Cabin의 연직 가속도

z_r : 조도 크기

z_{rjk} : j번째 보기의 k번째 EMS에서의 조도 크기

$z_{cbji}, \dot{z}_{cbji}$: j번째 보기의 i번째 2차 현가장치에서의 현가장치에서의 Cabin과 Bogie의 상대변위 및 속도

θ_c : Cabin의 회전각

$\ddot{\theta}_c$: Cabin의 회전 가속도

θ_{bj} : j번째 보기의 회전각

$\ddot{\theta}_{bj}$: j번째 보기의 회전가속도

μ_o : 진공에서 투과계수

ω_n : 교량의 n^{th} 진동수

ϕ_n : 교량의 n^{th} mode shape

q_n : 교량의 일반화된 좌표

v_{gjk} : j번째 보기의 k번째 위치에서 교량의 처짐