

# Flexible guideway 교량과 자기부상열차의 동적 상호작용 해석

## Dynamic interaction analysis of urban transit maglev vehicle and guideway suspension bridge

김문영\* · 권순덕\*\* · 이준석\*\*\* · 민동주\*\*\*\* · 정명락\*\*\*\*\*

Kim, Moon-Young · Kwon, Soon-Duck · Lee, Jun-Seok · Min, Dong-Ju · Jung, Myung-Rag

### 요 약

본 논문에서는 flexible guideway 교량과 능동적으로 제어되는 자기부상 열차간의 동적 상호작용에 대한 수치해석 모델을 개발하였다. 중·저속 자기부상열차의 동적 응답에 대한 열차와 guideway 사이의 특성에 대한 연구를 실시하였다. 동적 지배방정식은 10자유도계의 자기부상열차 모델, guideway 구조물의 모드 특성과 UTM02 부상제어모델을 결합함으로써 유도하였다. 수치해석으로부터 열차의 부상공극은 차량의 속도, 트랙조도의 영향을 크게 받는 것을 발견하였다.

**keywords** : guideway, 자기부상열차, roughness, dynamic interaction

### 1. 서 론

자기부상열차의 근본개념은 1930년대 독일에서 처음 나온 이래 1970년대부터 독일과 일본에서 집중적으로 연구되고 있다. 특히 2003년부터는 독일에서 개발된 초고속 자기부상열차 Transrapid가 중국 상하이에서 상업운행중이며, 일본의 경우도 자기부상열차인 MLX(Magnetic Levitation eXpress) 및 도시형 자기부상열차인 HSST(High Speed Surface Transport)의 개발에 투자하고 있다.

자기부상열차는 EMS(electro magnetic suspension)의 전자기력으로부터 부상력을 유도하여 부상-운행되는 열차시스템이다. 특히 주행 중인 자기부상열차의 부상공극(gap)의 변동량은 자기부상열차의 주행성능에 매우 큰 역할을 하며, 이를 수치적인 방법으로 적절히 시뮬레이션 할 필요가 있다. 기존 자기부상열차 관련 연구(Cai, 1994; Zhao, 2002)를 보면, 주로 전자기력에 의한 EMS를 등가의 강성과 감쇠를 가진 선형화된 수동계로 치환하여 모델링한 연구가 다수를 차지하고 있다.

본 연구에서는 교량-자기부상열차간의 상호작용을 고려한 운동방정식을 유도하고 이를 이용한 해석프로그램을 개발하였으며, 이로부터 교량의 특성이 자기부상열차의 주행성능에 미치는 영향 및 주행 중인 자기부상열차가 교량에 미치는 영향을 파악하였다. 모드형상이 질량행렬에 대하여 정규화된 대상 교량의 자유진동해석 결과를 사용하였다. 또한 조도를 인공적으로 생성하기 위해서 Tsunashima(1998)이 제안한 가이드웨이의 조도 PSD를 적용하였다.

\* 정회원 · 성균관대학교 토목공학과 교수 kmye@skku.edu

\*\* 전북대학교 토목공학과 교수 sdkwon@chonbuk.ac.kr

\*\*\* 청석엔지니어링 연구원 junsok73@nate.com

\*\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 토목공학과 석사과정 marshow@nate.com

\*\*\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 토목공학과 석사과정 psjihun@hotmail.com

## 2. 자기부상열차-교량의 동적상호작용해석

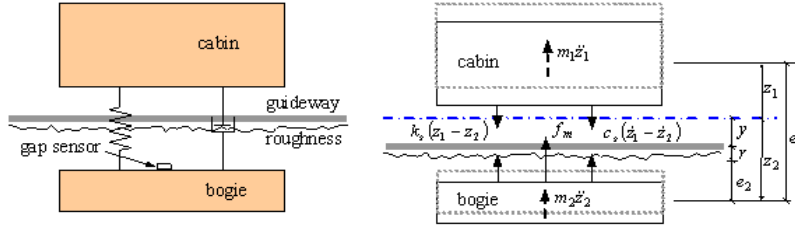


그림1 자기부상열차-가이드웨이 해석모델

자기부상열차는 대차에 설치된 전자석으로부터 부상력을 얻어서 가이드웨이 위를 떠서 지나게 된다. 자기 부상열차에서는 초당 수천번씩 대차와 가이드웨이의 간격을 측정하고, 이를 바탕으로 전자기력을 조정한다. 아울러 EMS는 대차와 레일의 공극이 커질수록 부상력이 약해지는 네거티브 강성을 지니고 있으므로 기본적으로 불안정 시스템이다. 따라서 적절한 피드백을 통하여 전류를 조절하는 제어 시스템을 구성해야 한다.

그림 1은 자기부상열차와 대차 그리고 가이드웨이 거더의 상호작용을 간략히 묘사한 개념도이다. 그림에서 보듯이 객차(cabin)와 대차(bogie)는 2차 현가장치로 연결되어 있고, 대차와 가이드웨이는 EMS로 연결되어 있다. 그리고 객차와 가이드웨이 사이에는 레일 조도와 가이드웨이의 처짐이 존재하게 된다.

각 EMS의 자기부상력은 EMS위치가 아닌 센서위치에서 연직가속도 및 부상공극을 관측하여 각 제어기의 제어전압을 형성한다. 이렇게 생성된 제어전압으로부터 각 EMS에 전류를 전달하고 전류로부터 전자석의 자기력이 형성되어 부상하게 된다. 센서는 두개를 중복시켜 동일한 위치에 장착하며 각 보기당 4개가 할당된다. EMS는 각 센서당 2개로 구성되어 있다.

차체와 4개의 대차는 강체로 가정하며 차체의 바운싱, 피칭 및 대차의 바운싱, 피칭을 고려하였다. 교량의 경우 질량에 의해 정규화된 모우드 형상을 이용하여 운동방정식을 구성할 수 있으며, 최종적으로 자기부상열차-교량간의 상호작용을 고려한 운동방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\ddot{y}_i = -2\xi\omega_i\dot{y}_i - \omega_i^2 y_i + \sum_{j=1}^{N_{bogi}} \sum_{k=1}^{N_{ems}} \phi(x_{jk}) \{F_{m0} + k_i \Delta i_{js} - k_z g_{jk}\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{mode} \quad (1)$$

$$m_b \ddot{z}_{bj} = k_s z_{cb} + c_s \dot{z}_{cb} + \sum_{k=1}^{N_{ems}} \{-k_i \Delta i_{js} + k_z g_{jk}\} \quad j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$I_{bj} \ddot{\theta}_{bj} = \sum_{k=1}^{N_{ems}} e_{jk} F_{mjk} \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$m_c \ddot{z}_c = - \sum_{j=1}^{N_{bogi}} \{k_s z_{cbj} + c_s \dot{z}_{cbj}\}, \quad I_c \ddot{\theta}_c = \sum_{j=1}^{N_{bogi}} a_j \{k_s z_{cbj} + c_s \dot{z}_{cbj}\} \quad (4, 5)$$

$$\Delta i_{js} = \frac{k_z}{k_i} \dot{g}_{js} - \frac{R}{L_0} \Delta i_{js} + \frac{1}{L_0} \Delta v_{js} \quad s = 1, 2 (\text{센서수}) \quad (6)$$

EMS의 부상제어는 한형석(2008)에서 제시한 한국형 자기부상열차의 제어방식을 따른다. 결과적으로, 식 (1)-(6)과 부상제어식을 공간상대방정식으로 유도하고 4계 Runge-kutta법을 이용하여 해석을 수행하였다.

### 3. 자기부상열차의 부상안전성 해석 및 결과분석

차량은 현재 한국기계연구원-로템에서 제작중인 차량을 모델로 구성하였다. 그림 2는 해석 모델을 평면도, 측면도, 정면도 등을 보여주고 있으며, 주요 현가시스템으로 Air Spring을 고려하였다.

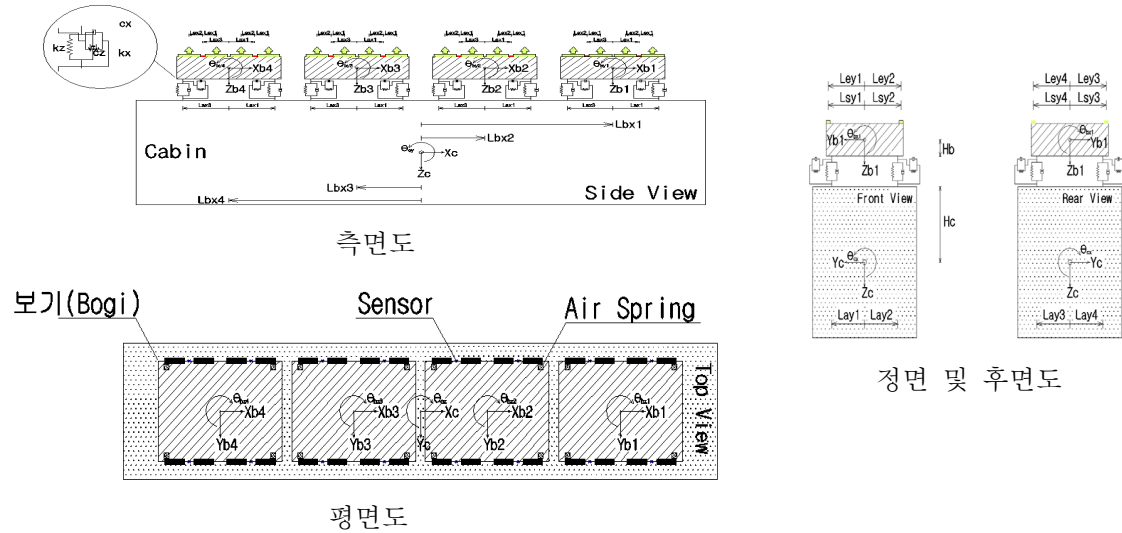


그림 2 자기부상열차(1량) 강체 모델

해석에 사용된 교량은 그림 3과 같으며, 교량 시점 20m 후방에서 주행을 시작하여 최종적으로 선두의 위치를 405m까지 주행시킨다.

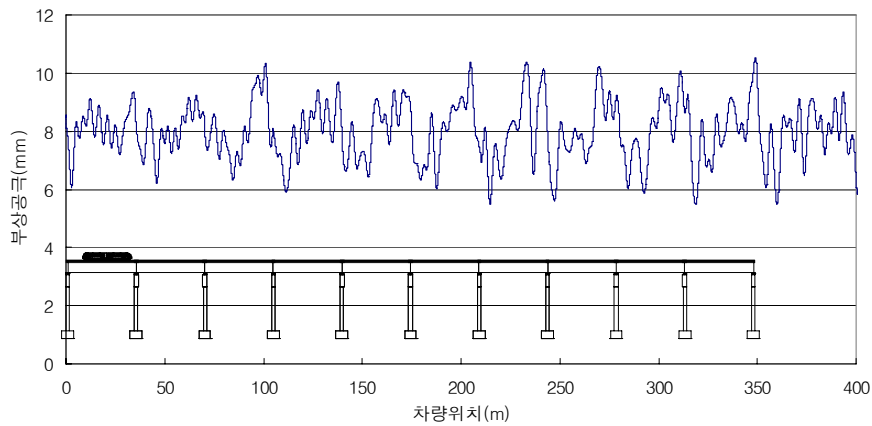


그림 3 해석대상 교량 및 부상공극에 대한 해석결과

해석대상구간에서 차량속도와 레일조도에 따른 부상공극의 변화량 및 교량최대연직변위는 다음 표와 같이 정리된다.

표 1 부상공극변화량(mm) 및 교량최대연직변위(mm)

차량속도 최대레일조도	50	70	90	110
	부상공극변화량(mm)			
Type 1(Good)	-1.78 ~ 1.31	-2.36 ~ 1.64	-2.56 ~ 2.26	-2.96 ~ 2.91
Type 2(Normal)	-1.53 ~ 1.59	-2.19 ~ 2.29	-2.86 ~ 2.87	-3.29 ~ 3.16
Type 3(Bad)	-1.91 ~ 1.58	-2.57 ~ 2.05	-3.07 ~ 2.58	-3.39 ~ 2.82
	교량최대연직변위(mm)			
Type 1(Good)	6.348323	6.396079	6.345507	6.427705
Type 2(Normal)	6.348594	6.394196	6.375303	6.443251
Type 3(Bad)	6.348545	6.397645	6.352972	6.436647

최대레일조도 Type 1의 경우에 시속 110km/h 주행시  $\pm 3\text{mm}$ 이내의 허용범위로 들어왔으며, 실하중에 의한 정적최대교량변위가 6.32mm임을 고려하면 충격효과는 미미한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

교량-자기부상열차의 동적상호작용 응답이 자기부상열차의 응답 및 교량의 응답에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해서 상호작용이 고려되지 않는 교량의 효과에 의한 차량의 주행성능과 상호작용이 고려될 경우의 차량의 주행성능을 비교 분석하였으며, 동시에 레일조도의 유무가 동적응답에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 연구를 수행하는 과정에서 2차원 모델에 대한 해석툴을 개발하였다. 본 연구에서는 차량을 10자유도 모델로 구성하였지만, 보다 정밀한 해석을 위해서는 차량이동시 롤링(rolling), 요잉(yawing)등을 고려한 3차원 차량 모델이 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- 이준석(2007), “능동제어되는 자기부상열차-가이드웨이의 동적상호작용 해석”, 성균관대학교 대학원 박사학위논문
- Cai, Y., et al.(1994), Vehicle/guideway interaction for high speed vehicles on a flexible guideway, *J. of Sound and Vibration*, 175(5), pp.625~646.
- Fryba L.(1996), *Dynamics of railway bridges*, Czech Republic: Thomas Telford House,
- Hyungsuk Han, Sookhee Kim, Bonghyuk Yim, Youngchul Hur(2008) Stability Analysis of a Maglev Vehicle Utilizing Electromagnetic Suspension System, *Transactions of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 16(3), pp.118-126
- Zhao, C.F. and Zhai, W.M.(2002), Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality, *Vehicle System Dynamics*, 38(3), pp.185~210