

# 자기부상열차 - 교량의 동적 상호작용 해석기법 기술현황

## Technical Trend on Dynamic Interaction Analysis of Maglev System



김 문 영\*



민 동 주\*\*

\* 성균관대학교 건축토목공학부 정교수  
\*\* 성균관대학교 건축토목공학부 석박사통합과정

### 1. 자기부상열차란?

자기부상열차는 주행 중 차내뿐만 아니라 차외 소음이 적고, 저렴한 유지보수 및 탁월한 주행 안정성 등에서 기존 열차보다 우수한 장점을 가지고 있어서, 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 기존 바퀴식 철도 열차를 대체할 수 있는 수단으로 활발한 연구가 진행되었다.

자기부상열차는 그림 1에서 보는 바와 같이 자석의 힘으로 차량을 부상시켜 가이드웨이(guideway)상에서 자기장에 의해서 일정한 공극을 유지하면서 선로 위를 주행하는 새로운 형태의 교통수단이다. 일반적으로 자기부상열차는 열차를 선로에서 부상시키는 방법에 따라 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 자석양극의 반발력을 이용하는 반발식(electrodynamic suspension)과 자석간의 인력을 이용하는 흡인식(electromagnetic suspension)으로 나눌 수 있다(그림 2와 표 1 참조). 또한 열차의 추진 방식에 의해 2가지로 분류할 수 있는데, 선형유도전동기(LIM : Linear Induction Motor)를 이용한 방식과 선형동기전동기(LSM : Linear Synchronous Motor)를 이용한 방식이다. 자기부상열차의 속도에 따라 분류하자면, 장거리 지역간 교통수단으로 활용할 수 있는 초고속형과 도시내부 교통수단으로 활용할 수 있는 중저속형으로 구분할 수 있다(표 2). 초고속형의 부상방식은 각기 다르나, 추진은 선형

동기전동기(LSM)를 사용한다. 중저속형은 상전도 흡인식의 부상방식과 선형유도전동기(LIM)를 사용한 추진방식이 주류를 이룬다.

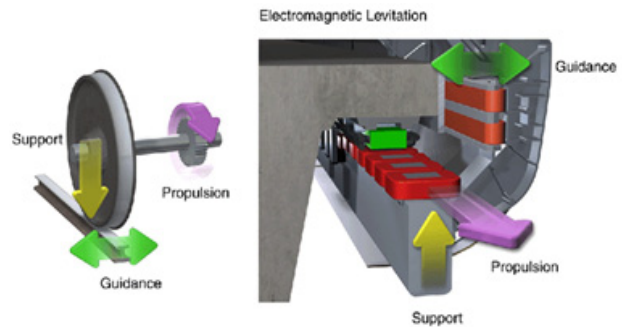


그림 1 기존 바퀴식 철도열차와 자기부상열차의 부상방식

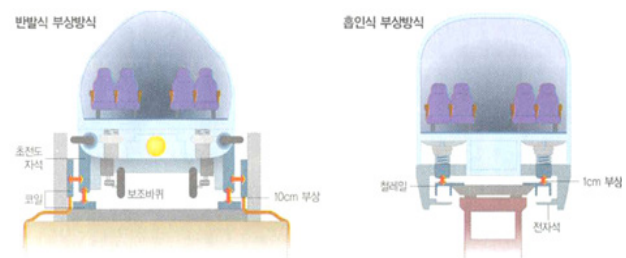


그림 2 자기부상열차의 부상방식

표 1 자기부상열차의 부상방식

방식	원리	비고
흡인식	레일 밑에 위치한 차량의 전자석이 철로 된 레일을 끌어 당기는 힘으로 부상	정지시와 저속에서도 부상이 가능
반발식	차량에 설치된 초전도 자석과 설치된 코일 사이의 반발력으로 부상	일반적으로 흡인식보다는 제어가 쉬움

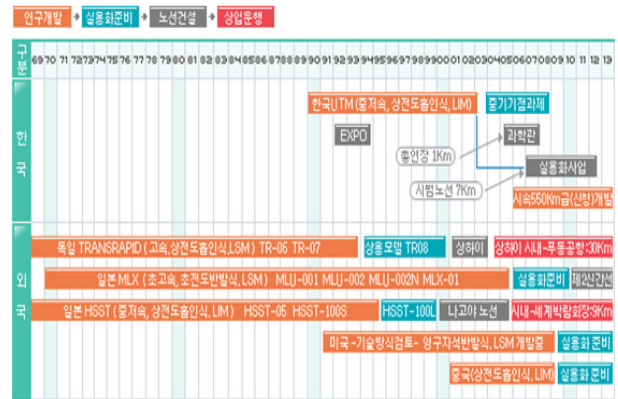
표 2 속도에 따른 자기부상열차 분류

구분	부상방식	추진방식	적용사례
초고속형	상전도 흡인식	LSM	Transrapid(중국, 상하이)
	초전도 흡인식	LSM	MLX-01(일본), M2000(플로리다)
중저속형	상전도 흡인식	LIM	UTM-01, UTM-02(한국), HSST(일본, 나고야), ODU(미국, 노퍽)
	영구자석 반발식	LSM	GA (미국, 샌디에고)

## 2. 자기부상열차 국내외 연구 사례

자기부상열차의 개념은 20세기 초 독일의 헤르만 쾰퍼 등에 의해 제안되었으며, 20세기 중반 미국의 제임스포엘, 고든덴비 등에 의해 초전도방식에 의한 고속자기부상열차의 기본설계개념이 정립되었다. 자기부상열차는 1969년에 독일에서 개발을 시작한 Transrapid가 세계최초의 자기부상열차이며, 이 열차는 상전도 흡인식 부상방식과 선형동기전동기(LSM)의 추진 시스템을 채택하여 개발을 추진하였으며, 일본은 1970년부터 초전도자석을 이용한 반발식 초고속자기부상열차 개발에 착수하였다. 중국은 1980년대 후반부터 실험실 수준의 연구개발을 시작하였고, 1990년대 중반부터는 고속자기부상열차에 대한 조사연구 등을 시작하여 활발한 연구를 진행하였다. 우리나라의 자기부상열차 개발은 1989년 12월 과학기술부 국책연구 착수와 함께 본격적으로 시작되었으며, 자기부상열차의 상용화를 국책사업으로 선정해 현대차 그룹의 철도차량 제조업체인 로템과 대전 대덕연구단지 내 기계연구원에서 국내기술로 자기부상열차 개발이 진행되고 있다.

일본의 중저속자기부상열차 HSST는 1972년 나리타 공항 연결노선 적용을 위해 일본항공(JAL) 주도로 개발을 시작했다. 독일의 기술을 도입하여 개발하기 시작한 HSST는 1991년부터 나고야 1.5km 시험선로 상에서 실용화 모델 시험을 거쳐, 2005년 초 일본 나고야 시에서 HSST의 상용화



- LIM (Linear Induction Motor, 선형유도모터) - LSM (Linear Synchronous Motor, 선형동기모터)

그림 3 국내외 자기부상열차 기술개발현황

가 이루어졌다. 2005년 신교통시스템으로 Linimo라고 명명되어진 자기부상열차가 선정되어 2002년부터 공사를 진행하여 2005년 3월 개통하여 현재 정상 운행 중이다. 또한 일본의 초고속형 자기부상열차 개발은 동경과 오사카 간 신간선 노선의 포화에 대비한 제2신간선 건설을 목표로 1970년부터 시작되었으며, 최근에 약 42km의 시험구간에서 테스트한 결과 최고속도 500km/h를 돌파하였다.

독일에서의 본격적인 개발은 1969년부터 시작되어 연방과학기술성(BMFT)의 중점지원으로 1990년대 초 시속 450km급 Transrapid 모델 개발을 완료하였다. 1999년에는 실용화 모델 Transrapid 08을 개발하여 중국 상하이 시내와 푸둥국제공항 간 30km노선을 2004년 1월 세계 최초로 상업운행을 시작하였다.

중국은 1990년대 중반부터 고속자기부상열차에 대한 조사연구 등을 시작하여, 독일의 Transrapid를 도입하는 쪽으로 정책의 방향을 설정하고, 2001년 3월 상하이 푸둥국제공항과 시내를 연결하는 30km 노선 건설에 착수, 단기간 내에 공사를 완료하여 2004년 1월 세계 최초로 고속자기부상열차 상용노선을 개통하였다.

국내에서의 자기부상열차 개발은 1989년을 시작으로 상전도 흡인식(EMS) 부상방식을 이용하고 선형유도전동기를 사용한 최고시속 110km급의 자기부상차량 UTM을 개발하여, 1998년 UTM-01, 2006년 UTM-02를 성공적으로 개발하였으며 2006년 12월부터 2012년 12월까지 지속되는 도시형 자기부상열차 실용화사업을 수행하여 왔다. 이러한 연구결과로 세계 2번째 도시형 자기부상열차 상용화 성공, 시범노선인 1단계는 영종도 국제공항~용유역 6.1km구간, 2단계 구간은 차량기지~국제업무지역(9.7km)이고, 3단계 구간은 국제업무지역~인천공항(37.4km)으로, 올해 개통을 목표로 하고 있다.

### 3. 자기부상열차-가이드웨이 교량 상호작용 해석

자기부상열차 시스템은 다양한 기술이 종합적으로 연계되어 있는 시스템이며, 크게 차량시스템, 선로구조물, 전력시스템, 신호통신시스템 등으로부터 상세한 부상, 추진, 분기기, 전력설비 등의 세부 기술로 분류가 이루어지는 복합기술이다. 이러한 다양한 기술에 관한 연구가 세계적으로 이루어지고 있으며, 특히 토목관련 분야로는 자기부상열차를 지지하는 가이드웨이의 설계에 집중된 경향이 있다. 하지만 자기부상열차는 앞서 언급하였듯이 복합적인 시스템이고, 가이드웨이의 여러 가지 특성들이 거꾸로 자기부상차량의 주행성에 영향을 미치므로 이를 평가할 수 있는 해석이 동반 되어야만 한다. 또한 자기부상열차 특성상 일반 바퀴식 열차와는 달리 레일과 직접적으로 접촉되지 않으며, 자기부상열차를 부상시키는 자기력이 제어기에 의해 수시로 변화하게 된다. 그러므로 제어기에 의한 부상력을 정확하게 구현해야만 제대로 된 열차-교량 동적 상호작용 해석을 실시할 수 있게 된다.

기존 자기부상열차 관련 연구(Bullock, 1985; Wheeler,

1975; Aylwin, 1977; Jayawant 등, 1976; Sinha 등, 1979; Zhao 등, 2002)를 보면, 주로 전자기력에 의한 EMS(Electro Magnetic Suspension)를 등가의 강성과 감쇠를 가진 선형화된 수동계로 치환하여 모델링한 연구가 다수를 차지하고 있고 자기부상열차와 관련된 초기 연구의 경우 실험결과에 관한 연구(Hedrick 등, 1974) 및 해석적인 방법(Hullender 등, 1974)에 의한 분석 등이 그 주류를 이루고 있다. 그 외 기계 혹은 전자 분야 연구자들이 차량과 가이드웨이의 간격을 감지하여 제어하는 능동시스템을 연구하였으나(Zhao, 2002; Kusagawa, 2004; Dai, 2005; Zheng, 2000) 대부분 차량의 관점에서 부분적으로 교량의 영향을 고려하거나 하지 않았고, 최근까지 교량의 영향을 동적상호작용의 관점에서 직접적으로 고려한 연구는 드물다(Tsunashima 등, 1998). 최근에 들어서 자기부상열차-가이드웨이 동적 상호작용해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, Wang 등(2007)은 가이드웨이와 자기부상열차의 상호작용을 통한 수치 시뮬레이션을 실시하였으며, Yau(2009, 2010A, 2010B)는 풍하중과 지진하중, 지점침하 등 외부하중에 의한 자기부상열차의 진동 및 제어방법 등을 소개한바 있다. 또한 Yau(2013)

표 3 각국의 자기부상열차 개발 모델 개요

	<p>독일(Transrapid) : 1969년부터 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고속형 : 시속 450km/h (일반전자석을 이용한 흡인식 부상)</li> <li>- 실용화 : 중국 상하이 (30km, 2004년 1월 개통)</li> </ul>
	<p>일본(HSST) : 1974년부터 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중저속형 : 시속 100km/h (일반전자석을 이용한 흡인식 부상)</li> <li>- 실용화 : 일본 나고야 (9km, 2005년 3월 개통)</li> <li>- 초고속형(MLX) : 1970년부터 개발 (초전도자석을 이용한 반발식 부상)</li> </ul>
	<p>한국(UTM) : 1989년부터 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중저속형 : 시속 110km/h (일반전자석을 이용한 흡인식 부상)</li> <li>- 실용화사업 : 추진중 ('06~'12, 7km급 시범노선)</li> <li>- 2013년 개통 예정</li> </ul>
	<p>미국 : 1995년부터 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중저속형 : 시속 100km/h (영구자석을 이용한 반발식 부상)</li> <li>- 연구개발 단계</li> </ul>
	<p>중국 : 2000년부터 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중저속형 : 시속 100km/h (일반자석을 이용한 흡인식 부상)</li> <li>- 연구개발단계, 시제품 개발 및 시험중</li> </ul>

은 장지간의 현수교 위를 주행하는 자기부상열차의 동적 상호작용 해석법을 제시하였다. Wang 등(2013)은 1개의 전자기석을 이용한 간단한 모델을 사용하여 실제 실험을 통한 결과와 이론적인 해석값을 비교하였다. 또한 이란과 네덜란드(Yaghoubi and Rezvani, 2011; Shibo 등 (2010))에서도 자기부상열차-교량 상호작용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내에서도 다양한 범위에서 자기부상열차와 관련된 연구가 선행되고 있는데(조홍제 등, 1998) 주로 초기 제작과정의 자기부상열차의 실험과 관련된 논문 및 제어관련 부분이 생략된 해석논문이 다수를 차지하고 있다. 진병무 등(2007)은 최적화된 가이드웨이 구조물을 선정하기 위한 연구를 진행하였으며, 또한 한형석 등(2006)은 UTM-01의 제어를 포함하는 주행성능을 파악하기 위한 연구를 수행하였고, 주로 주파수영역 해석법에 의한 제어기의 특성파악에 주목하고 있는 편이다. 권순덕 등(2008)은 풍하중을 고려한 5자유도를 갖는 자기부상열차-현수교 가이드웨이와의 동적상호작용 해석에 대해 연구한 바 있으며, 이준석 등(2009)은 다양한 조건하에 자기부상열차-가이드웨이의 상호작용해석을 통해 여러 가지 매개변수에 대한 연구를 실시하였다. 또한 민동주 등(2012)은 3차원 자기부상열차모델과 가이드웨이의 상호작용 해석기법에 주목한 연구를 진행하였다.

(1) 자기부상열차 모델

제어기에 의한 부상공극의 피드백을 포함한 자기부상열차-가이드웨이 교량의 상호작용해석을 위해 다양한 열차

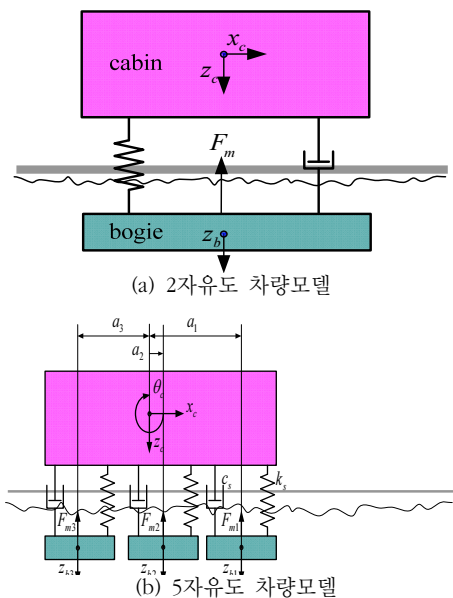


그림 4 2자유도 차량 및 5자유도 자기부상열차 모델

모델이 제시된 바 있다. 자기부상열차 모델 중 가장 간단한 형태인 2자유도 모델은 차체와 대차의 수직방향 자유도만을 고려한 단순화된 모델이다. 그림 4(a)와 같이 자기부상열차의 차체와 대차 사이에는 2차 현수장치인 에어스프링이 설치되어 있고, 가이드웨이와 대차 사이에는 전자기석에 의해 자기력이 작용한다. 또한 5자유도 모델은 그림 4(b)와 같이 1개의 차체와 3개의 대차로 구성되어 있으며 차체의 수직 및 피칭(Pitching)운동, 그리고 각 대차의 수직운동을 고려한 모델이다. 여기서 더 진화된 형태로 1개의 차체와 4개의 대차로 구성된 모델인데, 이 모델은 차체와 각 대차의 수직 및 피칭 운동 모두를 고려한 10자유도를 갖는 형태이다. 앞서 설명한 3개 모델은 2차원 모델이지만, 여기서 한발 나아가 3차원 자기부상열차 모델은 그림 6과

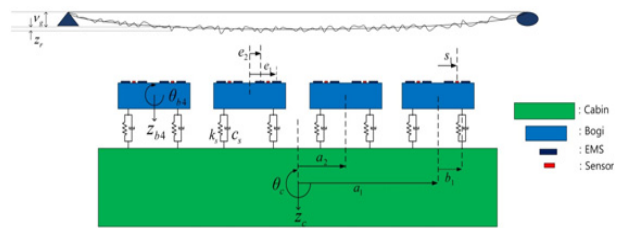
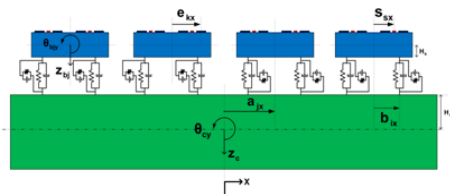
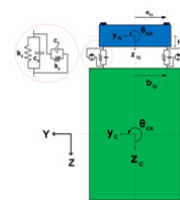


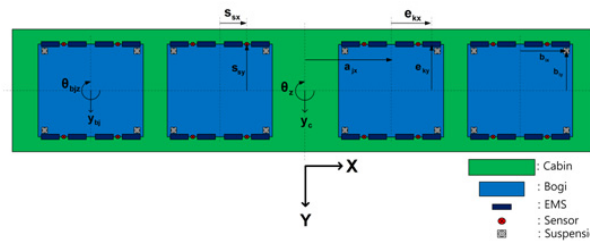
그림 5 10자유도 2차원 자기부상열차 모델



(a) 측면도



(b) 정면도



(c) 조감도

그림 6 25자유도 3차원 자기부상열차 모델

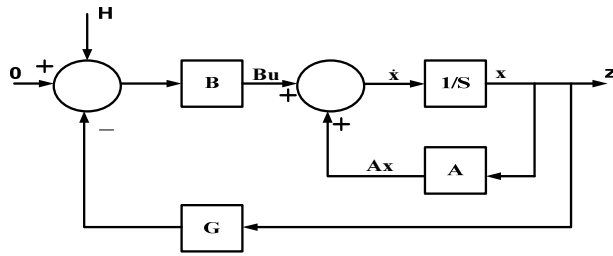


그림 7 LQR제어 다이어그램

같다. 3차원 자기부상열차 모델은 1개의 차체와 4개의 보기로 구성되어 있으며, 각 보기당 8개의 EMS(Electro Magnetic Suspension)와 4개의 Sensor로 구성되어 있다. 각 보기와 차체의 수직 자유도 및 수평 자유도와 피칭(Pitching), 롤링(Rolling) 그리고 요잉(Yawing)을 포함한 총 25자유도 자기부상열차에 대한 운동방정식을 구성하여 2차원 모델보다 더 상세한 해석을 실시할 수 있는 형태이다.

(2) 제어기

자기부상열차의 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 되는데 일반적으로 자기부상열차는 최적제어기법의 대표적인 기법인 전상태(full state) 피드백을 이용하는 LQR(그림 7)과 관측상태 피드백(feedback)을 사용하는 제어방식을 이용하여 자기부상열차의 전압을 제어하고 있다. 열차모델에 따라 제어방식이 다르게 되며, 한국의 자기부상열차인 UTM열차의 경우 5개의 관측 상태변수를 이용한 전압을 제어하는 방법을 이용한다. 대표적으로 UTM-02 열차에 적용된 제어 알고리즘을 소개하자면 아래와 같다. 여기서  $v_{js}$ 는 제어알고리즘에 의해 결정되는 전압을 의미하며,  $\hat{x}_s$ 는 관측상태변수를, 그리고  $y_s$ 는 실측가속도와 부상공극으로 구성된다.

$$v_{js} = k_1 \ddot{x}_{bjs} - k_1 \dot{x}_{1js} + (-k_1 V_1 + k_2) \hat{x}_{2js} + k_3 \hat{x}_{3js} + (k_1 V_1 + k_4) \hat{x}_{4js} + k_5 \hat{x}_{5js} \quad (1)$$

$$\hat{x}_s = A_s \hat{x}_s + L_s y_s \quad (2)$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ -\frac{1}{T_1} & -\frac{V_1}{T_3} & 0 & \frac{V_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & -\frac{V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{V_3}{T_4} & -\frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{bmatrix}, L_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) 가이드웨이 교량

가이드웨이 교량의 동적해석 방법에는 이론적 해석과 수치적 해석이 있으며, 이론적 해석이 어려운 대형구조물의 경우에는 수치해석이 일반적인 방법이다. 수치해석에서 이용하는 동적해석의 방법으로는 직접 적분법과 모드 중첩법이 있다. 직접 적분법은 구조물의 운동방정식을 축약하지 않고 해석하기 때문에 정확하지만 계산량이 많다. 또한 해석의 안정성을 위해 시간증분을 작게 하면 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이에 반해 모드 중첩법은 구조물의 동적 특성을 잘 나타내는 소수의 저차 모드로써 구조물의 운동방정식을 축약하여 해석하기 때문에 경제적이다. 일반적으로 교량-차량 상호작용해석에 있어서 널리 쓰이고 있으며, 자기부상열차시스템에 적용 또한 용이하여 많은 연구자들이 모드중첩법을 이용하고 있다. 대표적으로 3차원 자기부상열차 해석에 있어서 모드 중첩법을 이용한 가이드웨이 교량의 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $F_{zmo} + F_{ejkz}$ 는 전자기석에서 발생하는 수직방향의 자기부상력,  $F_{ejky}$ 는 수평방향 자기부상력,  $\phi_{zn}, \phi_{yn}, \phi_{\theta n}$ 는 각각 n번째 모드의 수직방향, 수평방향, 회전에 대한 모드형을 의미한다.

$$\ddot{q}_n = -2\xi_n \omega_n \dot{q}_n - \omega_n^2 q_n + \sum_{i=1}^{N_{mag}} \sum_{k=1}^{N_{em}} \{ \phi_{zn}(x_{jk}) + e_{ky} \phi_{\theta n}(x_{jk}) \} (F_{zmo} + F_{ejkz}) + \sum_{i=1}^{N_{mag}} \sum_{k=1}^{N_{em}} \{ \phi_{yn}(x_{jk}) - H_g \phi_{\theta n}(x_{jk}) \} F_{ejky} \quad (4)$$

(4) 자기부상열차의 동적 시간이력 응답 및 교량의 동적확대계수

자기부상열차의 부상특성상 EMS와 가이드웨이 사이의 부상공극은 굉장히 중요한 요소 중 하나이며, 적절한 제어를 통한 자기부상력의 통제가 이루어져야만 주행안정성 뿐만 아니라 승객 승차감 또한 확보할 수 있다. 마찬가지로 자기부상열차가 가이드웨이 교량위를 주행할 때 교량에 미치는 영향을 정확하게 파악해야만 최적의 가이드웨이를 설계할 수 있을 것이다. 이러한 최적의 설계를 위해 많은 연구를 진행하고 있으며, 앞서 설명한 동적 상호작용 해석을 통하여 주행 성능 평가 및 다양한 조건하에서 동적 응답을 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

일반적으로 열차의 주행성에 영향을 미치는 변수로는 차량속도, 레일의 불규칙성과 교량의 처짐 등이 있는데, 자기부상열차의 경우도 유사한 변수를 적용할 수 있다. 가이드

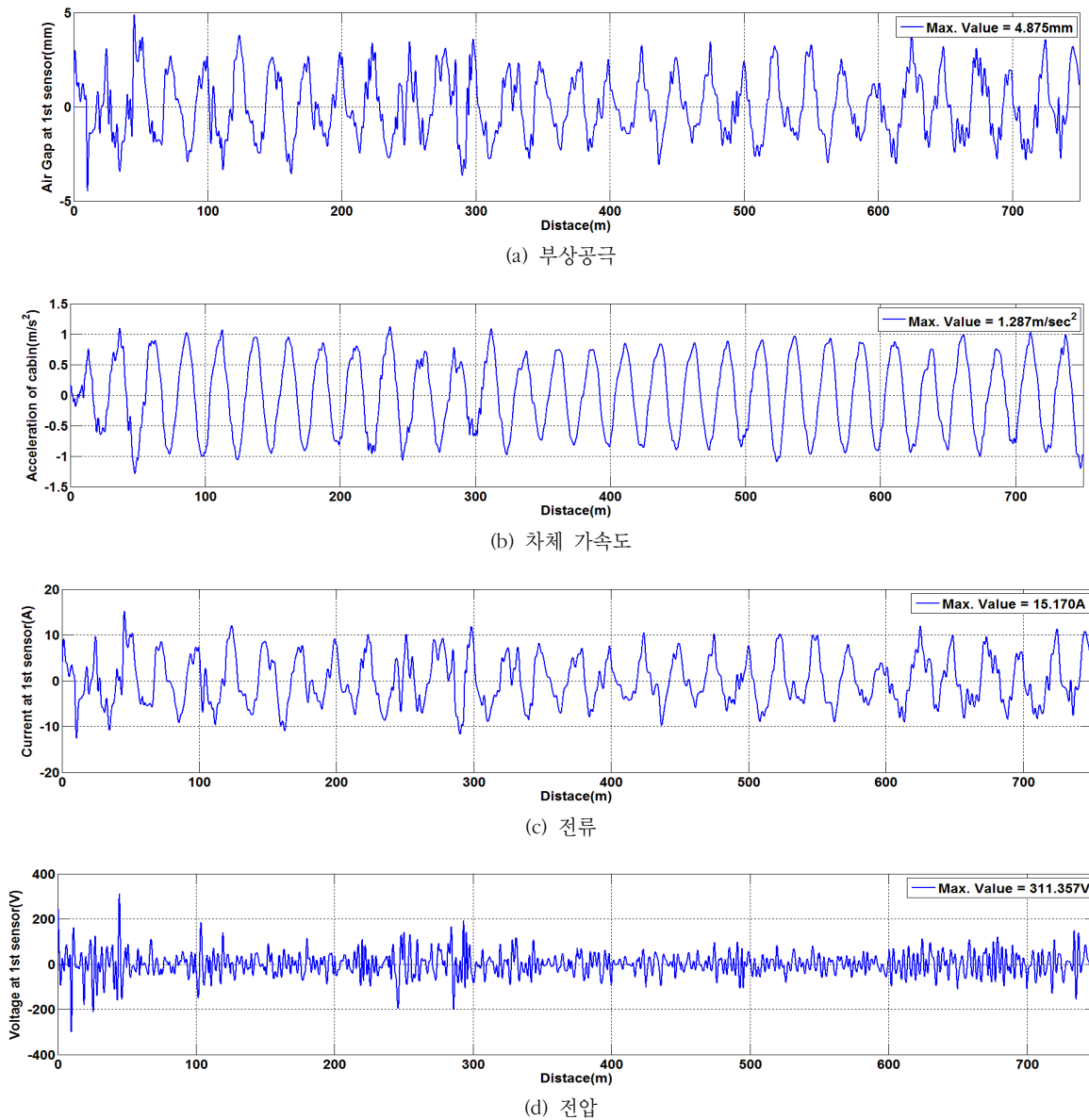


그림 8 자기부상열차의 동적 응답 시간이력 그래프

웨이 교량의 구조적 형식, 교량의 고유진동수와 차량/교량 질량비와 같은 동특성, 경간장 등 다양한 요인들을 예로 꼽을 수 있다. 대표적으로 단순교의 가이드웨이 교량과 2차원 열차모델, 열차속도 300km/h 주행, 노면조도의 불규칙성을 고려한 경우에 대해 열차의 시간이력을 살펴보면 그림 8과 같이 나타난다. 순서대로 부상공극이 허용범위를 만족하는지 확인하기 위한 부상공극의 시간이력, 승차감에 직접적인 영향을 미치는 차체 가속도, 제어기에 의해 결정되는 전류와 전압을 나타낸다.

앞서 설명하였듯이 자기부상열차에 의해 가이드웨이에 미치는 영향을 정확히 파악해야만 최적의 가이드웨이 설계

를 할 수 있다. 일반적으로 열차-교량 상호작용 해석 시 교량의 동적인 거동을 파악하기 위해 동적확대계수(Dynamic magnification factor)를 이용하는데, 이는 동적 해석결과와 정적 해석결과 최대값의 비로 나타낼 수 있다. 정해석 결과는 하중이 일정하기 때문에 그 응답은 일정하지만 동해중은 시간과 속도에 따라 변하기 때문에 동해석 응답은 변화하게 된다. 그러므로 이 동적확대계수를 통하여 공진유발 속도를 피하거나 공진이 유발되지 않도록 교량의 경간장 및 진동수를 변화시켜 이를 반영한 최적설계가 가능하게 된다. 그림 9는 대표적으로 차량속도 50 & 300km/h 주행시에 가이드웨이 교량 중앙의 처짐을 시간이력 그래프로 나

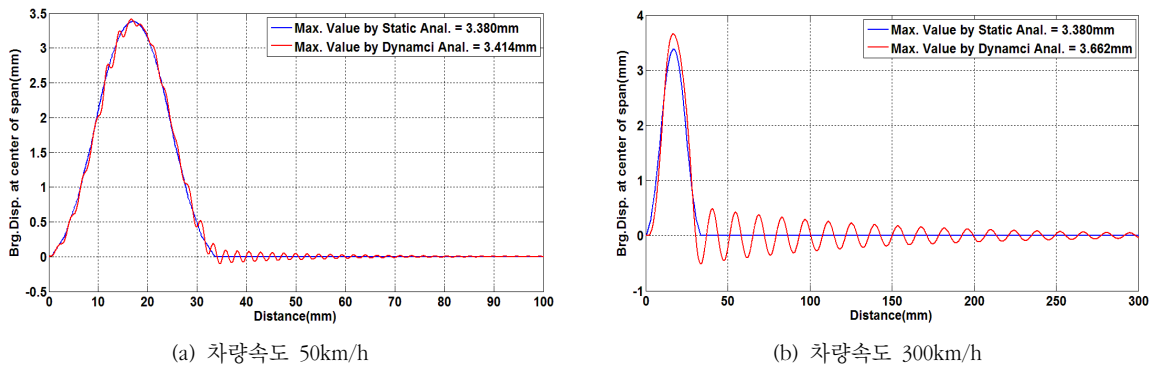


그림 9 가이드웨이 교량 중앙에서 처짐 시간이력 그래프

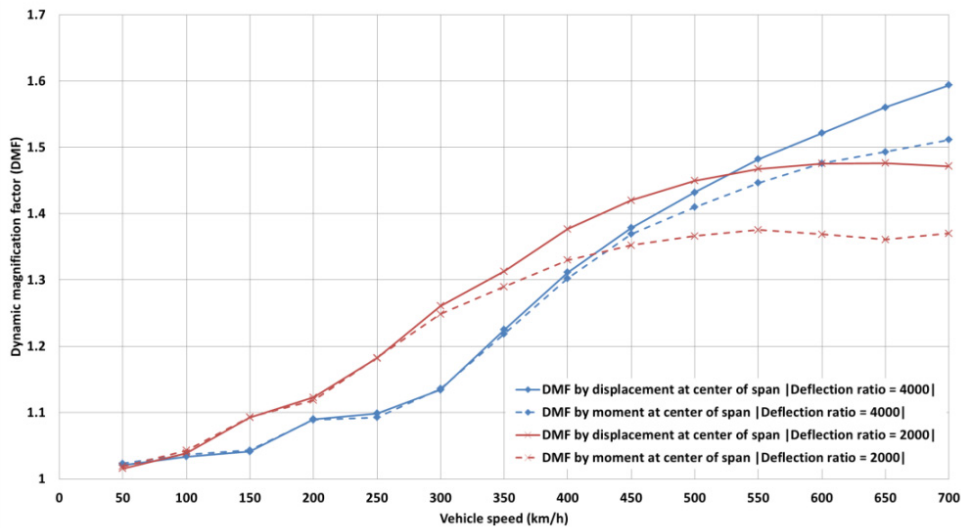


그림 10 자기부상열차 속도에 따른 교량 중앙에서의 동적확대계수

타낸 것이며, 그림 10은 속도에 따른 동적확대계수의 변화를 나타내고 있다.


#### 4. 요약 및 결론

지금까지 자기부상열차 시스템에 대한 기본적인 원리, 부상 및 추진방식, 국내외 기술 현황 및 연구 동향, 대표적으로 자기부상열차-가이드웨이 상호작용 해석기법 등에 대해서 살펴보았다. 자기부상열차는 기존 바퀴식 철도 열차를 대체할 수 있는 수단으로써, 그리고 기존 열차보다 주행 중 차내뿐만 아니라 차외소음이 적고, 저렴한 유지보수 및 주행 안정성 등에서 우수한 장점을 가지고 있어 우리나라 뿐만 아니라 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 1969년에 독일에서 개발을 시작으로 일본, 한국, 중국 그리고 미국뿐만 아니라 세계 각국에서의 기술개발이 진행되고 있으며, 일본과 중국에 이어 우리나라에서도

2013년에 개통을 앞두고 있다. 자기부상열차 시스템은 다양한 기술이 종합적으로 연계되어 있는 복합기술이며, 열차-교량 상호작용 해석뿐만 아니라 차량, 기계부품, 전기, 전자, 제어, 정보통신 등 다양한 연구를 통하여 기술역량을 키워나가야 할 것으로 판단된다. 또한 고속주행이 가능한 만큼 향후 한중일 3국을 잇는 도로와 철도 개발사업에 있어서도 적용 가능한 기술이라 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. <http://www.maglev.re.kr/>
2. 민동주, 황인관, 김문영(2012), 3차원 자기부상열차와 가이드웨이의 3차원 상호작용 해석, 한국전산구조공학회 2012년도 춘계학술대회논문집, 한국전산구조공학회.
3. 조홍제, 이종민(1998), 상전도자기부상열차의 주행성능시험 및 평가. 한국소음진동공학회 1998년도 춘계학술대회

- 논문집, 한국소음진동공학회, pp.102-107.
4. Aylwin D. G.(1977), The design of controlled d.c. magnetic suspension systems., M. Phil thesis, University of Sussex.
  5. Bullock J. P.(1985), Analysis and design of an electromagnetic suspension system, Internal Report, University of Warwick.
  6. Dai H.(2005), Dynamic Behavior of Maglev Vehicle/Guideway System with Control, Ph.D. Dissertation, Case Western Reserve University.
  7. Han S. H., Kim Y. J., Shin B. C., Kim B. H.(2006), Simulation of dynamic interaction between maglev and guideway using FEM. Maglev2006, Dresden, Germany.
  8. Hedrick J. K, Ravera R.J, Anderes J.R.(1975), The effects of elevated guideway construction tolerances on vehicle ride quality, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, ASME, 97(4), pp. 408.
  9. Hullender D. A.(1975), Analytical models for certain guideway irregularities of Dynamic Systems, Measurement and Control, Trans. ASME, 97(4), pp. 417-423.
  10. Jayawant B. V., Sinha P.K., Wheeler A.R., Whorlow R.J.(1976), Development of 1-ton magnetically suspended vehicle using controlled d.c. electromagnets, Proc. IEE, 123, pp. 941-948.
  11. Jin B. M., Kim I. G., Kim Y. J., Yeo I. H., Chung W. S., Moon J. S. (2007), Proposal of maglev guideway girder by structural optimization : civil works of Center for Urban Maglev Program in Korea, Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea. pp. 1959-1962.
  12. Kusagawa S., Baba J., Shutoh K., Masada E.(2004), Multipurpose design optimization of EMS-type magnetically levitated vehicle based on genetic algorithm, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14(2).
  13. Kwon S. D., Lee J. S., Moon J. W., Kim M. Y.(2008), Dynamic interaction analysis of urban maglev vehicle and guideway suspension bridge subjected to gusty wind, Engineering Structures, 30(12), pp. 3445-3456.
  14. Lee J. S., Kwon S. D., Kim M. Y., Yeo I. H. (2009), A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guideway bridges, Journal of Sound and Vibration, 328(3), pp. 301-317.
  15. Sinha P. K.(1979), Magnetic suspension for low-speed vehicles, ASME J. Dyn. Syst. Mesa. & Control, 100, pp. 333-342.
  16. Tsunashima H, Abe M.(1998), Static and dynamic performance of permanent magnet suspension for maglev transport vehicle, Vehicle System Dynamics, 29, pp. 83-111.
  17. Wang H. P., Li J., and Zhang K.(2007), Vibration analysis of the maglev guideway with the moving load, Journal of Sound and Vibration, 305(4-5), pp. 621-640.
  18. Wang H. P., Li J., Zhong X., Shen G., Reinhold M.(2013), Comparison Between Simulation and Test Results of an Observer-Controlled MAGLEV Vehicle on Elastic Guideway, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Germany.
  19. Wheeler A. R.(1975), Aspects of the design and construction of d.c. magnetic suspension systems, D. Phil thesis, University of Sussex.
  20. Yau J. D.(2009), Vibration control of maglev vehicles traveling over a flexible guideway, Journal of Sound and Vibration, 321(1-2), pp. 184-200.
  21. Yau J. D.(2010A), 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.
  22. Yau J. D.(2010B), Aerodynamic vibrations of a maglev vehicle running on flexible guideways under oncoming wind actions, Journal of Sound and Vibration, 329(1), pp. 1743-1759.
  23. Yau J. D.(2013), Response of high speed EDS maglev train moving on a suspended guideway shaken by horizontal earthquake, Recent Advances in Engineering Mechanics, Structures and Urban Planning.
  24. 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.
  25. Zheng X. J. Wu J. J., Zhou Y. H.(2000), Numerical analysis on dynamic control of five-degree-of-freedom maglev vehicle moving on flexible guideways, J. of Sound and Vibration, 235(1), pp. 43-61. 

[담당 : 조정래 편집위원]