

# 초고속 자기부상열차의 열차-가이드웨이 3차원 상호작용 해석

## Three Dimensional Dynamic Interaction Analysis of Actively Controlled High Speed Maglev-Guideway Structure

민 동 주\* · 정 명 락\*\* · 김 해 나 래\*\*\* · 김 문 영\*\*\*\*

Min, Dong-Ju · Jung, Myung-Rag · Kim, Hae-Nerae · Kim, Moon-Young

### 요 약

본 논문에서는 3차원 자기부상열차에 대한 열차-가이드웨이 상호작용 해석기법을 제시하고자 한다. 수직 및 수평방향 변위, 피칭, 롤링 그리고 요잉에 대한 자유도를 각 보기와 차체에 대해 고려하여 총 25자유도 자기부상열차에 대한 운동방정식을 유도하였다. 제어방식으로는 UTM01에 적용된 제어기법을 이용하였고, 궤도 틀림을 고려하기 위하여 미국 FRA에 적용하고 있는 궤도 불규칙성에 대한 밀도 스펙트럼 함수를 이용하여 조도를 생성하였다. 같은 조건하에 2차원 모델과 3차원 모델의 동적응답 결과를 비교하여 타당성을 확인하였고, 2차원 모델에서 고려할 수 없는 수평방향 조도를 도입하였을 때 수직방향 부상공극에는 두드러진 영향을 미치지 않았으나, 수평방향 부상변위에 있어서 중요하게 작용함을 확인하였다.

**keywords** : 25자유도, 3차원 자기부상열차, 궤도 틀림, UTM01 제어기법

### 1. 서 론

기존 자기부상열차 관련 연구(Sinha, 1987; Zhao 등, 2002)를 보면, 주로 전자기력에 의한 EMS(Electro Magnetic Suspension)를 증가의 강성과 감쇠를 가진 선형화된 수동계로 치환하여 모델링한 연구가 다수를 차지하고 있다(Cai 등, 1994). 국내에서도 다양한 범위에서 자기부상열차와 관련된 연구가 진행되고 있는데, 한형석 등(2007)은 UTM-01의 제어기를 포함하는 주행성능을 파악하기 위한 연구를 수행하였고, 주로 주파수영역 해석법에 의한 제어기의 특성과악에 주목하고 있는 편이다. 이준석(2007)은 자기부상열차와 교량의 상호작용을 고려한 동특성에 대한 연구를 하였지만 차량모델은 2차원에 국한 되어있다.

본 논문에서는 자기부상열차에 대한 부상 특성을 고려하는 3차원 자기부상 시스템에 능동제어 알고리즘(UTM01 제어기)을 적용하여 선로시스템과 자기부상열차간의 동적 상호작용 해석을 실시하여 차량의 주행 특성 결과를 제시하고자 한다. 특히 수직방향 조도뿐만 아니라 수평방향 조도까지 고려하여 선로의 궤도 틀림이 열차의 주행성에 미치는 영향을 분석하였다. 각 보기와 차체의 수직 및 수평 자유도와 피칭(Pitching), 롤링(Rolling) 그리고 요잉(Yawing)을 포함한 25자유도 자기부상열차에 대한 운동방정식을 구성하였고, 제어 알고리즘을 포함한 상태공간 방정식을 구성하여 Backward-Euler Method를 사용하여 해석 하였다.

\* 학생회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 marshow@nate.com  
\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 psjehun@naver.com  
\*\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 klittel@naver.com  
\*\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수 kmye@skku.edu

## 2. 자기부상열차의 운동 방정식

차체와 각 보기의 운동 방정식은 차체와 보기를 분리시켜서 각각의 자유물체도로부터 동역학적 관점에서 운동 방정식을 도출한다. 순서대로 차체와 보기의 수평방향, 수직방향, Rolling, Pitching 그리고 Yawing에 대한 운동방정식이다.

$$m_c \ddot{y}_c = - \sum_{j=1}^{N_{boqi}} \sum_{i=1}^{N_{spring}} F_{sjiy} , \quad m_c \ddot{z}_c = - \sum_{j=1}^{N_{boqi}} \sum_{i=1}^{N_{spring}} F_{sjiz} \quad (1, 2)$$

$$I_{cx} \ddot{\theta}_{cx} = - \sum_{j=1}^{N_{boqi}} \sum_{i=1}^{N_{spring}} (b_{iy} F_{sjiz} + H_c F_{sjiy}) , \quad I_{cy} \ddot{\theta}_{cy} = \sum_{j=1}^{N_{boqi}} \sum_{i=1}^{N_{spring}} [(a_{jx} + b_{ix}) F_{sjiz} + H_c F_{sjix}] \quad (3, 4)$$

$$I_{cz} \ddot{\theta}_{cz} = \sum_{j=1}^{N_{boqi}} \sum_{i=1}^{N_{spring}} (b_{iy} F_{sjix} - (a_{jx} + b_{ix}) F_{sjiy}) \quad (5)$$

$$m_b \ddot{y}_{bj} = \sum_{i=1}^{N_{spring}} F_{sjiy} - \sum_{k=1}^{N_{ems}} F_{ekjy} , \quad m_b \ddot{z}_{bj} = \sum_{i=1}^{N_{spring}} F_{sjiz} - \sum_{k=1}^{N_{ems}} F_{ekjz} \quad (6, 7)$$

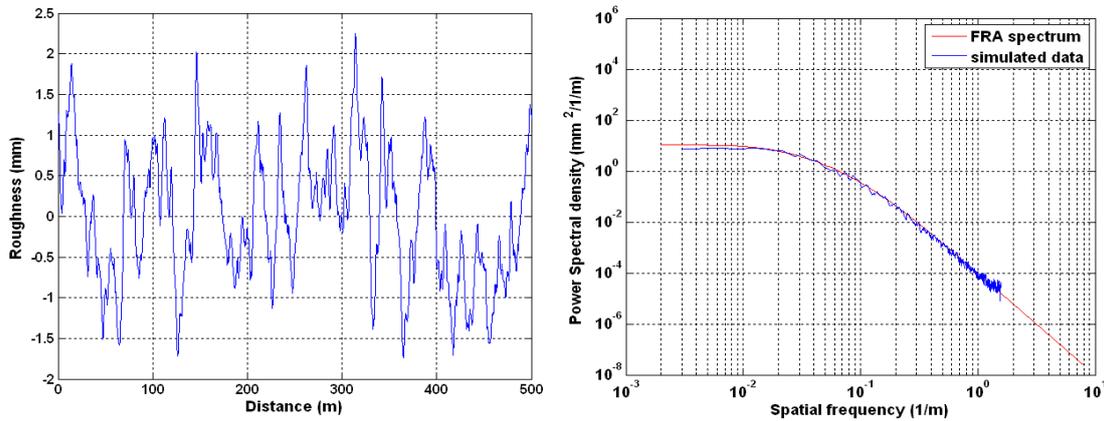
$$I_{bjx} \ddot{\theta}_{bjx} = \sum_{i=1}^{N_{spring}} (b_{iy} F_{sjiz} - H_b F_{sjiy}) + \sum_{k=1}^{N_{ems}} (-H_b F_{ekjy} - e_{ky} F_{ekjz}) \quad (8)$$

$$I_{bjy} \ddot{\theta}_{bjy} = \sum_{i=1}^{N_{spring}} (-b_{ix} F_{sjiz} + H_b F_{sjix}) + \sum_{k=1}^{N_{ems}} (e_{kx} F_{ekjz}) \quad (9)$$

$$I_{bjz} \ddot{\theta}_{bjz} = \sum_{i=1}^{N_{spring}} (b_{ix} F_{sjiy} - b_{iy} F_{sjix}) - \sum_{k=1}^{N_{ems}} (e_{kx} F_{ekjy}) \quad (10)$$

## 3. 조도

이번 연구에서는 조도의 영향을 정확히 분석하고 이론적인 관점에서 파악하기 위하여 미국 FRA에 적용하고 있는 궤도 불규칙성에 대한 밀도 스펙트럼 함수를 이용하여 각 조도에 대한 크기를 생성한다. 좌, 우 레일의 조도를 다르게 생성하였으며 수직 및 수평방향에 대한 조도를 각각 생성하여 적용한다.



(a) 인공생성 조도(수직 방향)

(b) 인공생성 조도의 PSD

그림 1 FRA Class6 인공생성 조도

#### 4. 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 받아들여 전압을 결정하게 된다. 이러한 제어방식으로는 UTM01열차에 적용된 제어 알고리즘을 이용하였다. (출처: ‘주행특성 및 승객안전성 향상’ 1단계 실적보고서, 국토해양부)

자기부상 열차의 상호작용이 고려된 식들을 상태 공간 방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + F(t) \quad (11)$$

전체적인 상태 공간 방정식은 연립상미분방정식이 되므로 Backward-Euler Method를 사용하여 해석한다.

$$x_{i+1} = A_{i+1} x_{i+1} + F_{i+1} \quad (12)$$

#### 5. 해석조건 및 결과분석

해석에 적용된 제원은 UTM01열차에 사용된 제원을 사용하였다. 해석은 총 길이 750m, 조도 조건은 수직 방향 조도만 있을 경우와 수평 방향 조도를 추가했을 경우에 대해 실시하였고, 2차원 해석의 결과와 3차원 해석을 결과를 비교하였으며, 수평 방향 조도의 유무가 자기부상열차의 동특성에 미치는 영향을 파악하였다. 다음 그림은 열차 속도 300km/h, 수직방향 및 수평방향 조도가 각각 다른 확률분포로 생성된 조도를 사용하였을 때의 동적응답을 나타내고 있다.

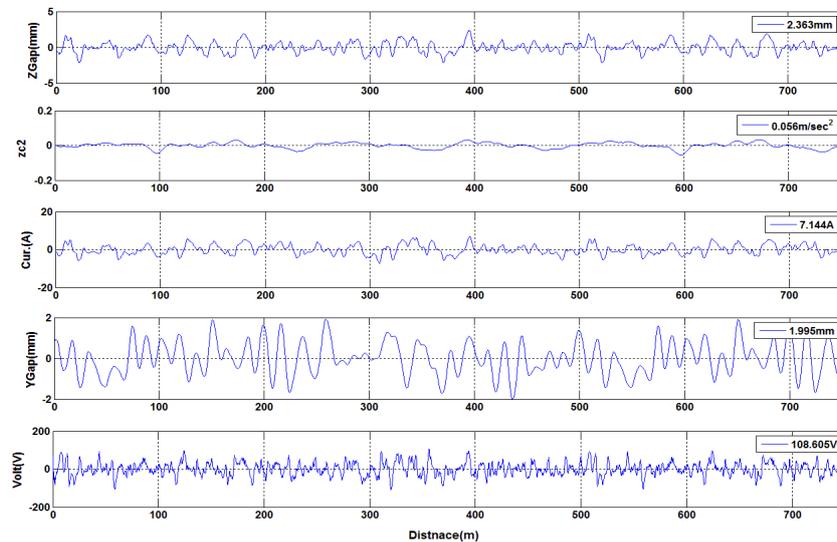
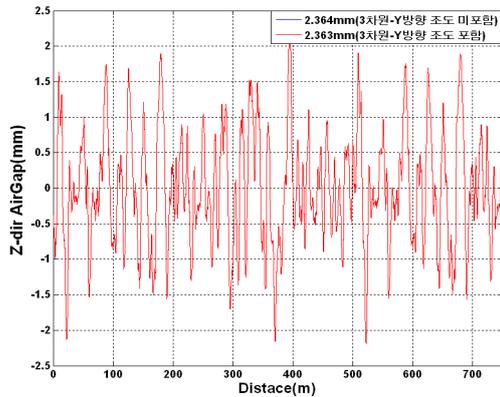
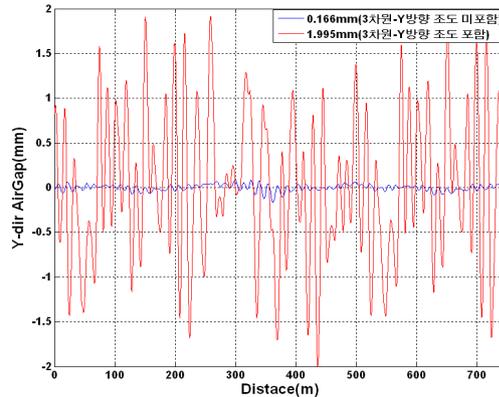


그림 2 3차원 자기부상열차의 동적응답

다음 그림은 3차원 모델에서 수평 방향 조도의 유무에 따른 수직방향 부상공극과 수평 방향 부상변위의 응답을 나타내고 있다. 수직방향 부상공극의 경우 수평 방향 조도의 유무에 관계없이 큰 차이를 보이지 않았다. 즉, 수평 방향 조도가 자기부상열차의 부상공극에 미치는 영향은 미비한 것으로 보인다. 하지만 수평 방향 변위의 경우 수평 방향 조도의 유무에 따라 큰 차이를 보이고 있다.



(a) 수직방향 부상공극



(b) 수평방향 부상변위

그림 3 수평방향 조도 유무에 따른 부상공극의 시간이력

## 6. 결론

자기부상열차의 3차원 모델에 대한 운동방정식을 확립하여 2차원 모델의 결과와 비교 분석하여 보았다. 이를 위해 열차 속도 300km/h, UTM01 제어기 그리고 같은 조도 조건하에서 해석을 실시하여 시간이력 응답을 비교 하였고, 수평 방향 조도가 3차원 자기부상모델에 미치는 영향을 살펴보았다. 2차원과 3차원 모델의 동적 해석 응답은 유사한 거동을 보였으며 3차원 모델의 최대값이 약간 큰 값을 나타냈다. 또한 2차원 모델에서는 고려 할 수 없었던 수평방향 조도를 도입하여 3차원 모델에서 조도의 유무에 따른 응답을 살펴 본 결과 수직방향 부상공극에 미치는 영향은 미비하였지만 수평방향 부상변위에는 큰 변화를 보이고 있었다. 결과적으로 3차원 모델로의 확장을 통해 2차원 모델에서는 해석할 수 없었던 수평방향 부상변위를 고려할 수 있었고 더욱 정확한 해석이 가능하였다.

## 참고문헌

- 국토해양부 한국건설교통기술 평가원 (2009), “주행특성 및 승객안전성 향상’ 1단계 실적보고서”. pp.265~282.
- 이준석 (2007), 능동제어되는 자기부상열차-가이드웨이의 동적 상호작용 해석, 박사학위 논문, 성균관대학교.
- 한형석, 임봉혁, 이남진, 문석준, 정정훈 (2007), “전자석 현가 시스템의 부상 공극 주파수 응답 해석”. 2007년도 한국철도학회 추계학술발표회, 한국철도학회, pp. 912-917.
- Cai Y., Chen S.S., Rote D.M., Coffey H.T. (1994), “Vehicle/guideway interaction for high speed 6. vehicles on a flexible guide-way”, *J. of Sound and Vibration*, Vol.175, No.5, pp.625-646.
- 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).
- Lee, J.-S., Kwon, S.-D., Kim, M.-Y., and Yeo, I.H. (2009), “A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guideway structures”, *J. of Sound and Vibration*. 328, pp.301-317.
- Sinha, P.K. (1998), *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus, London, U.K, 1987.
- 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.