

자기부상열차 대차 유연 다물체 모델

Flexible Multibody Dynamic Model of a Maglev Vehicle Bogie

김기정* 한형석* 이남진** 김봉섭*
Kim, Ki-Jung Han, Hyung-Suk Lee, Nam-Jin Kim, Bong-Sub

ABSTRACT

The flexible multibody dynamic model of an EMS-type Maglev vehicle is necessary in design stage to predict its behavior, load history and levitation performance. Especially in EMS-type Maglev vehicle, the body flexibility of its bogie with electromagnets affects the levitation performance because its feedback control system is more sensitive to vibration of bogie structure. The flexible multibody dynamic model of a 1/2 Maglev vehicle under test is presented. The basic modeling procedure is almost the same as in other applications. However, the feedback control system model unique in EMS-type maglev vehicle must be included in the model. With the model proposed in this study, the dynamic behavior, load history and levitation performance are more precisely predicted. This model could realize the virtual prototyping in EMS-type Maglev vehicle area.

1. 서 론

자기부상열차의 동특성 또는 부품의 내구수명을 정교하게 예측하기 위해서는 때때로 유연 다물체 동역학 모델이 요구된다[1]. 특히, 전자석을 부상장치로 이용하는 상전도흡인식 자기부상열차는 페루프 제어 시스템이기 때문에 전자석이 체결된 대차의 유연성이 부상제어 성능에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 대차의 거동, 동하중 및 부상성능을 보다 현실적으로 설계단계에서부터 예측하기 위한 유연체 동역학 모델은 자기부상열차에 있어서도 유용하게 이용될 수 있다. 본 논문에서는 현재 제작하여 시험 중인 1/2 차량에 대한 유연체 모델을 소개하는데 목적이 있다. 유연체 모델을 만들기 위한 기본적인 과정은 이미 알려진 기법이 이용된다[2]. 본 차량에 독특한 전자석을 포함시키기 위한 페루프 제어 시스템 및 부상력을 유연체에 적용하기 위한 기법이 제안된다. 제안된 기법을 적용하여 만들어진 모델을 이용하여 차량의 부상안정성의 척도 중 하나인 부상공극 변동 평가가 이루어진다. 이러한 기법은 가상시체를 이용한 자기부상열차 개발에 적용할 수 있다.

2. 모델

2.1 전자석

U-형 전자석을 부상 및 안내 장치로 이용하는 상전도 흡인식 자기부상 열차의 부상 원리를 그림 1에서 보여주고 있다[4]. 전자석에 의한 부상력 $F_0(i,c)$ 는 일반적으로 비선형 함수이나 평형 점 즉 공칭 (i_0, c_0) 점에서의 선형화된 모델이 자주 이용된다[3]. 평형 위치에서의 선형화에 따른 부상력과 전류의 변화량은 식(1), 식(2)와 같이 표시된다.

* 한국기계연구원, 시스템엔지니어링연구본부, 자기부상연구실, 정회원

E-mail : hshan@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7814 FAX : (042)868-7618

** 현대로템

$$F_0(\Delta c(t), \Delta i(t)) = k_c \Delta c(t) - k_i \Delta i(t) + F_{static} \quad (1)$$

$$\Delta i(t) = \frac{k_c}{k_i} \Delta \dot{c}(t) - \frac{R}{L_0} \Delta i(t) + \frac{1}{L_0} \Delta v(t) \quad (2)$$

여기서,

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2c_0}$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2c_0^2}$$

$$k_c = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2c_0^3}$$

F_0 : Idle levitation force,

F_{static} : Static force,

A : Section area of magnet (m^2),

μ_0 : Permeability factor,

N : Number of turn of magnet coil (turn),

i_0 : Nominal current (A),

c_0 : Nominal air gap (m),

c : Air gap (m),

v : Voltage (V),

R : Resistance (Ω).

그림 1에서 전자석의 횡 변위가 $d(t) \neq 0$ 일 때의 부상력 및 안내력은 식(3), 식(4)와 같이 정의 된다.

$$F_z = F_0 \times \left[1 + \frac{2c(t)}{\pi \omega_m} + \frac{2d(t)}{\pi \omega_m} \tan^{-1} \left(\frac{c(t)}{d(t)} \right) \right] \quad (3)$$

$$F_y = F_0 \times \left(-\frac{2c(t)}{\pi \omega_m} \tan^{-1} \left(\frac{d(t)}{c(t)} \right) \right) \quad (4)$$

여기서,

F_y : Guidance force,

F_z : Levitation force,

d : Lateral displacement (m),

c : Air gap (m),

ω_m : Magnet width (m).

차량의 주행 시 전자석의 힘은 극의 길이 방향과 위치에 따라서 가이드 레일과 전자석간의 횡 공극이 다르게 나타난다. 그러므로 전자석의 부상력과 안내력을 정확하게 계산할 필요가 있다. 본 논문에서는

그림 2 에서와 같이 전자석을 10개로 이산화하여 F_{zi} 와 F_{yi} 을 각각 계산하여 합력을 구한다. 도표 1은 주행 해석에 사용된 전자석의 물성치이다.

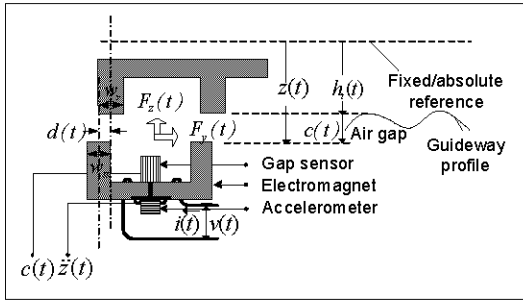


그림 1. System configuration of levitation & guidance forces

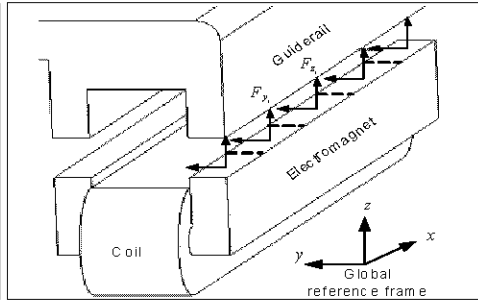


그림 2. Discretized of levitation & guidance force

도표 1. Data for the levitation control system

Item	Specification
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
N (Turn)	396
A (m')	0.037
R (Ω)	0.792
c_0 (m)	0.008
i_0 (A)	24

2.2 유연체 모델

전형적인 변형모드합성법을 이용하는 유연 다물체 동역학 해석 과정은 그림 3에서와 같다. 그림 3은 유연 다물체 동역학 해석 프로그램으로 Virtual.Lab Motion을 사용하고 FEM 프로그램으로 MSC/NASTRAN을 사용할 때의 과정이나 다른 프로그램들을 이용하더라도 그 과정은 유사하다. 유연 다물체 동역학은 차량과 궤도의 연성 운동방정식을 구성하고 수치해를 구하는 기능을 수행한다. 그림 3에서의 주요한 내용은 다음과 같다[4].

-Virtual.Lab Motion은 형상 모델링, 물체 모델링, 조인트 모델링, 유연체 모델링 및 힘 요소 모델링을 수행하고 해를 구한다.

-Virtual.Lab Motion는 정규진동모드, 정적모드, Craig-Bampton 모드를 해석하기 위한 경계조건, 하중 조건을 MSC/NASTRAN 입력 형식으로 생성한다.

-MSC/NASTRAN는 Virtual.Lab Motion가 생성한 입력 파일을 이용하여 모드해석을 수행한다. MSC/NASTRAN는 모드해석 결과 및 질량행렬, 강성행렬을 생성한다. 이러한 결과들은 Virtual.Lab Motion에 의하여 이용된다. 차량의 주행 시 전자석의 힘은 극의 길이 방향과 위치에 따라서 가이드 레일과 전자석간의 횡 공극이 다르게 나타난다. 그러므로 전자석의 부상력과 안내력을 정확하게 계산할 필요가 있다.

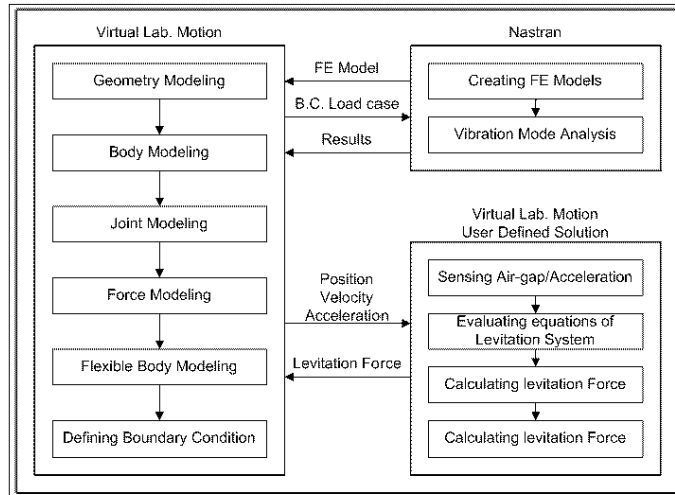


그림 3. 유연체 동역학 해석 과정

그림 4는 현재 제작하여 시험 중인 1/2 자기부상 차량을 보여주고 있다. 시험용 1/2 자기부상 차량의 동역학적 전체차량 모델을 그림 5에서 보여주고 있다. 그림 6은 대차에 대한 유연체 모델을 보여주고 있다. 대차는 좌우 8개의 전자석, 좌우 사이드프레임(Side frame), 전후 안티롤빔(Anti-roll beam), 좌우 4개의 공기 스프링(Air spring), 차체를 견인하는 견인바(Traction rod), 견인바에 내재된 고무 부시(Rubber bush)등으로 구성되어 있다. 사이드 프레임과 안티롤빔은 구조인트(Spherical joint)로 연결되어 있으나 잉여구속(Redundant constraint) 문제로 부시(Bushing)로 대체되었다. 여기서 전자석은 사이드 프레임에 고정되어 있고 부상 제어는 각 코너 별 2개의 전자석을 독립적으로 제어한다.

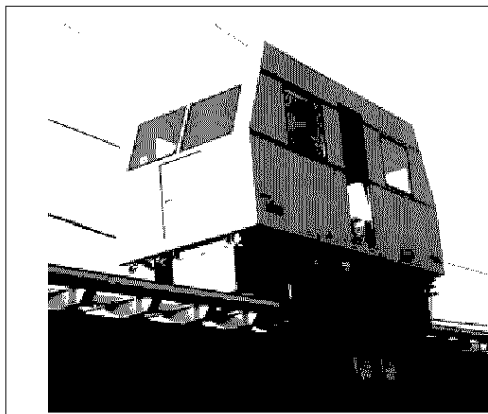


그림 4. 시험용 1/2 자기부상 차량 사진

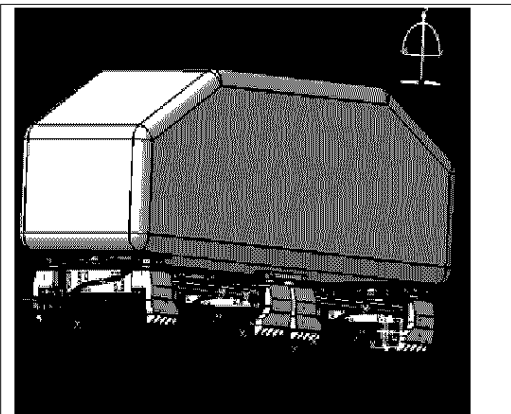


그림 5. 시험용 1/2 자기부상 차량 모델

그림 6은 유연체 대차 모델을 보여주고 있다. 대차를 구성하는 물체는 그림 7에서와 같이 대차 좌우의 사이드프레임과 선형 유도 전동기(LIM) 그리고 안티롤빔 (Anti-roll beam)이다. 사이드프레임은 약 9만 개의 노드와 20만개의 요소, 선형 유도 전동기는 약 1000개의 노드와 요소, 그리고 안티롤빔은 약 6천개의 노드와 4천개의 요소로 각각 구성되어 있다.

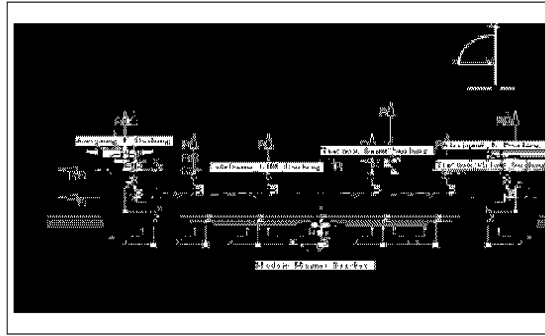
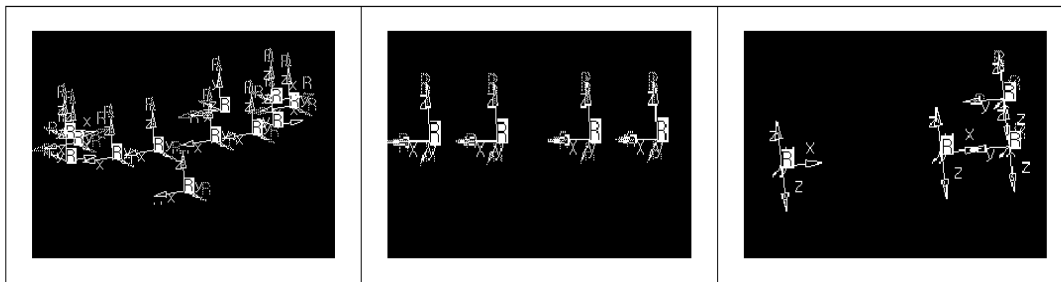


그림 6. 유연 대차 모델



(a) Side frame

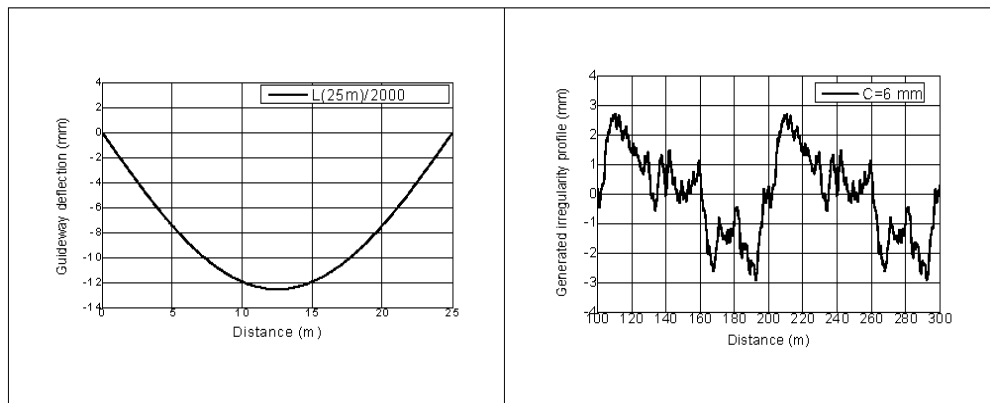
(b) LIM

(c) Anti-roll beam

그림 7. 유연체 유한요소 모델

3. 해석

2장에서 설명한 유연 대차 모델을 이용하여 주행안정성 평가 척도 중 하나인 부상 공극을 시뮬레이션 하였다. 강체 모델과 유연체 모델 차량 각각 110km/h로 일정하게 유지하면서 그림 8의 불규칙 형상을 갖는 가이드웨이를 주행한다.



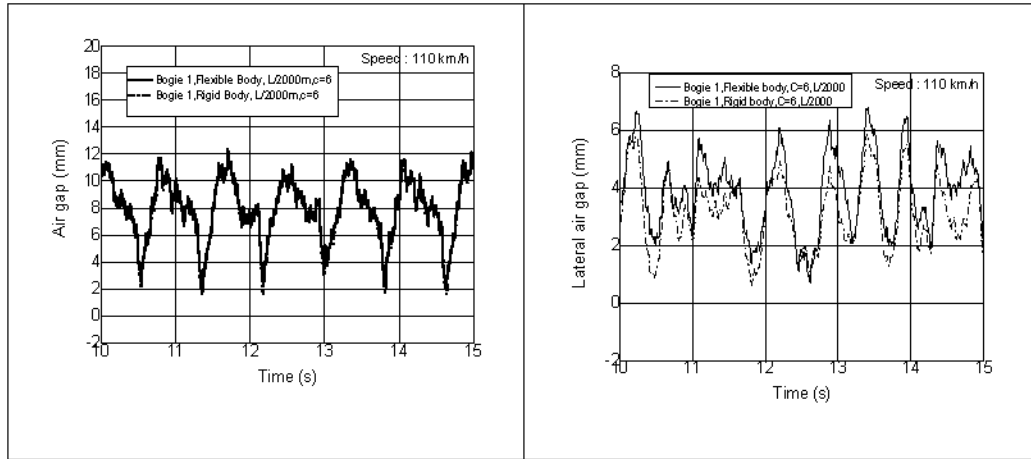
(a) 거더 처짐

(b) 가이드레일 표면 조도

그림 8. 가이드웨이 불규칙 형상

그림 9의 (a)는 강체 모델과 유연체 모델의 수직공극을 비교한 것이다. 최대 변위에서 2%정도 유연체 모델 차량이 더 큰 공극을 가지지만 전반적인 특성은 유사함을 알 수 있다. 그림 9의 (b)는 횡공극을 비교한 것이다. 조금은 큰 차이를 보이며 최대 변위에서 15% 정도 유연체 모델 차량이 더 큰 값을 나타낸다. 이를 통하여 횡공극 시뮬레이션에 있어서는 유연체 모델이 더 큰 변동을 보이기 때문에 강체 또는 유연체 모델 선정에 있어서 신중해야 함을 알 수 있다. 이러한 이유 중의 하나는 그림 10의 Anti-roll beam의 형상 특성상 횡방향 변형이 수직 방향에 비하여 크기 때문에 사이드 프레임에 영향을 주는 것

으로 분석된다. 일반적으로 유연체 모델이 실제 거동과 상대적으로 유사하기 때문에 횡공극 시뮬레이션에 있어서는 유연체 모델이 추천된다고 할 수 있다. 이러한 이유로 곡선 주행 시뮬레이션에 있어서도 유연체 모델을 이용하는 것이 추천된다.



(a) 수직 부상공극

(b) 횡 부상공극

그림 9. 부상공극

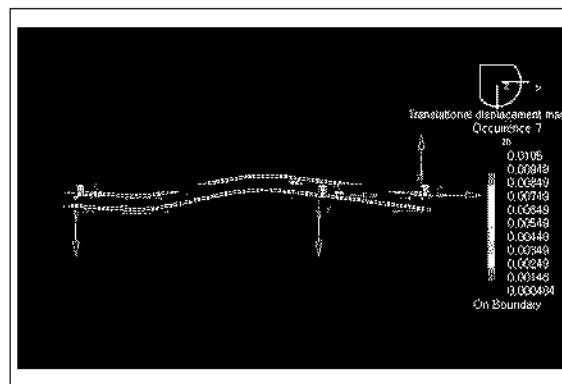


그림 10. 유연체 Anti-roll beam의 변형

4. 결 론

이상과 같이 상전도 흡인식 자기부상열차의 동특성 중 부상공극 시뮬레이션에 있어서 대차를 유연체로 모델하는 것을 제안하였다. 강체 모델과 유연체 모델에 있어서 수직 부상공극에는 차이를 거의 볼 수 없었다. 반면에 횡공극에 있어서는 상당한 차이를 나타냈다. 그러므로 본 논문에서 소개한 대차 구조에 있어서 횡방향 부상공극 응답 또는 곡선 추종성능을 시뮬레이션하기 위해서는 유연체 대차 모델을 사용하는 것이 고려될 수 있다고 할 수 있다.

참고문헌

1. C-J. Park and T-W. Park (2000) "Dynamic analysis of constrained mechanical system moving on a flexible beam structure : general approach", Journal of KSPE, Vol.17.No.11,pp.165-175.
2. H-S. Han, H-K. Sung, Y-J. Kim and B-H. Kim (2007), "Coupling model of the maglev vehicle/guideway", Journal of KSR, Vol.10.No.2,pp.243-250.
3. Sinha, P.K (1987), "Electromagnetic Suspension Dynamics & Control" Peter Peregrinus Ltd., London, UK.
4. Haug B.J. (1986) "Computer-aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems" Allyn and Bacon, USA.