

# 자기부상열차의 모델링방법에 따른 열차-교량의 동적상호작용 해석

## Dynamic Interaction Analysis of Train and Bridge According to Modeling Methods of Maglev Trains

정명락\*      민동주\*      이준석\*\*      권순덕\*\*\*      김문영†  
Jung, Myung-Rag      Min, Dong-Ju      Lee, Jun-Seok      Kwon, Soon-Duck      Kim, Moon-Young

### 요 지

본 연구에서는 속도의 변화 그리고 모델링방법이 자기부상열차의 주행성에 미치는 영향을 파악하는데 목적을 두고 있다. 이를 위하여 2000:1의 처짐비를 가지는 동일한 교량 위를 속도를 변화시키면서(100km/h에서 700km/h까지 100km/h간격으로) 6가지 모델의 자기부상열차를 주행시키기 위하여 4자유도 6자유도 10자유도 차량에 대한 운동방정식을 구성하고 4계 룬지쿠타법을 적용하여 수치해석을 수행한다. 해석결과를 보면 속도가 낮을수록 보기 및 EMS의 개수가 많은 모델일수록 자기부상열차의 주행성이 향상됨을 알 수 있다.

**핵심용어** : 자기부상열차, 조도, 주행성, 4계 룬지쿠타법

### Abstract

The purpose of this study is to examine the impact that change in speed and modeling methods has on maglevs' runnability. The study constructed equations of motion on 4-DOF, 6DOF, and 10-DOF vehicles respectively and carried out numerical analysis, applying 4th Runge Kutta method, in order to run six different model maglev as changing the vehicles speed on the same bridge that had 2000 to 1 deflection. The analysis revealed that maglev's runnability improved as speed was lower and the specific model had higher number of bogey and EMS

**Keywords** : maglev, roughness, runnability, 4<sup>th</sup> Runge-Kutta method

## 1. 서 론

자기부상열차는 자석의 힘으로 차량을 지지하고 가이드웨이를 상에서 자기장에 의해서 일정한 부상공극을 유지하면서 이동하는 새로운 형태의 교통수단이다. 국제적으로 독일, 일본에서 자기부상열차 연구가 시작되어 상당한 기술의 진보가 있었으며 최근에 자기부상열차의 상용화가 이루어지기도 하였다. 국내에서도 자기부상열차의 상용화를 국책사업으로 선정해 2013년 첫 운행을 목표로 인천공항을 잇는 자기부상열차를 개발 중에 있다. 이에 따라 자기부상열차와 관련된 연

구가 국내에서도 활발히 진행되고 있다.

기존의 자기부상열차 관련 연구(Sinha 등, 1987; Zhao 등, 2002)는 EMS(Electro Magnetic Suspension)를 선형화된 수동계로 치환하여 모델링하는 연구(Cai, 1994)가 주로 이루어졌다. 또한 한형석 등(2003, 2007)은 한국기계 연구원에 설치된 도시형 상전도 흡인식 자기부상열차 UTM-01 및 UTM-02의 제어기를 포함하는 주행성능을 파악하기 위한 연구를 수행하였으나 주로 주파수영역 해석법에 의한 제어기의 동적 특성파악에 초점을 맞추었다. Hu 등(2010)은 고속에서 승객의 위치가 열차-교량의 동적상호작용에 어

† 책임저자, 중신회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수  
Tel: 031-290-7514 ; Fax: 031-290-7548  
E-mail: kmye@skku.edu

\* 학생회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정

\*\* 정회원 · 청석엔지니어링 과장

\*\*\* 정회원 · 전북대학교 토목공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

떠한 영향을 미치는지에 관한 연구가 수행되었으며, 이준석 등(2009)은 능동제어를 고려한 자기부상열차 거더교량 상호작용 선형해석법을 제시하였지만 1대의 차량 3개의 보기 1개의 EMS로 고정된 차체모델을 적용하였다. 민동주 등(2010)은 자기부상열차의 중저속 및 초고속 주행 시 차량의 주행특성 및 교량의 동적응답결과를 제시하였지만 4개의 보기 4개의 EMS로 이준석 등(2009)과 마찬가지로 자기부상열차의 고정된 모델에 대하여 해석결과를 제시하였다.

자기부상열차 개발을 위해서 속도의 변화에 따른 가이드웨이가 열차 동적상호작용 해석 시, 열차의 보기 및 EMS의 개수를 몇 개로 모델링하는 것이 적절한지 조사하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 자기부상열차는 차체의 2 자유도 운동과 1개, 2개 그리고 4개 보기의 연직 방향운동 및 회전운동을 각각 고려한 4, 6, 그리고 10자유도 차량 모델을 고려하였으며, EMS의 개수가 각 보기에 대해 1개 또는 4개의 EMS를 가지는 모델을 고려하여 총 6종류의 자기부상열차 모델에 대한 운동방정식을 유도하고 해석결과를 제시한다. 정식화에서 가이드웨이의 진동모우드를 이용하는 모우드중첩법을 적용하였으며, 부상안정성을 위하여 UTM-01차량의 제어방식을 적용하여 전압을 제어하였다.

2. 자기부상열차 운동 방정식

EMS에서 발생하는 자기부상력과 입력 전류의 지배방정식은 비선형이지만, 부상공극이 미소하다고 가정하면 초기의 정지부상상태( $z_0, i_0$ )를 기준으로 다음과 같이 선형관계식으로 나타낼 수 있고, 또한 전기적 저항과 전류와 관련된 전압의 변화량은 다음과 같이 표현할 수 있다(Sinha, 1987).

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

여기서,

$A_m$  : 자석 면적,  $i_0, i$  : 초기 및 변동 입력전류

$k_i, k_z$  : 전류와 공극에 비례하는 등가 강성

$L_0 = \mu_0 N_m^2 A_m / 2z_0$  (자석의 인덕턴스),  $N_m$  : 코일수

$\mu_0$  : 진공에서 투과계수

$z_o, z_{bj}$  : 정적 평형 공극 및 상대 공극

차체와 각 보기의 운동 방정식을 유도하기 위하여 차체와 보기를 분리시켜서 각각의 자유물체도로부터 동역학적 관점에서 운동 방정식을 도출한다. 그림 1은 1개의 차체, 4개의 보기, 그리고 보기 당 2개의 2차 현가장치, 센서 그리고 4개의 EMS를 갖는 열차의 자유물체도를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 2차 현가장치로부터 발생하는 감쇠력, 복원력과 차체의 무게, 그리고 관성력을 포함한 차체는 자유물체도로부터 운동방정식 (2)와 (3)을 유도할 수 있다.

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

$$I_c \ddot{\theta}_c = \sum_{j=1}^{N_{bogi}} \sum_{i=1}^2 (a_j + b_i) [k_s \{z_c - (a_j + b_i)\theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj}\} + c_s \{\dot{z}_c - (a_j + b_i)\dot{\theta}_c - \dot{z}_{bj} + b_i \dot{\theta}_{bj}\}] \tag{3}$$

여기서,  $z_{cbj} = z_c - (a_j + b_i)\theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj}$

보기의 운동방정식 역시 위와 같은 방식으로 식 (4)와 (5)가 유도된다.

$$m_b \ddot{z}_{bj} = \sum_{i=1}^2 [k_s \{z_c - (a_j + b_i)\theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj}\}] \tag{4}$$

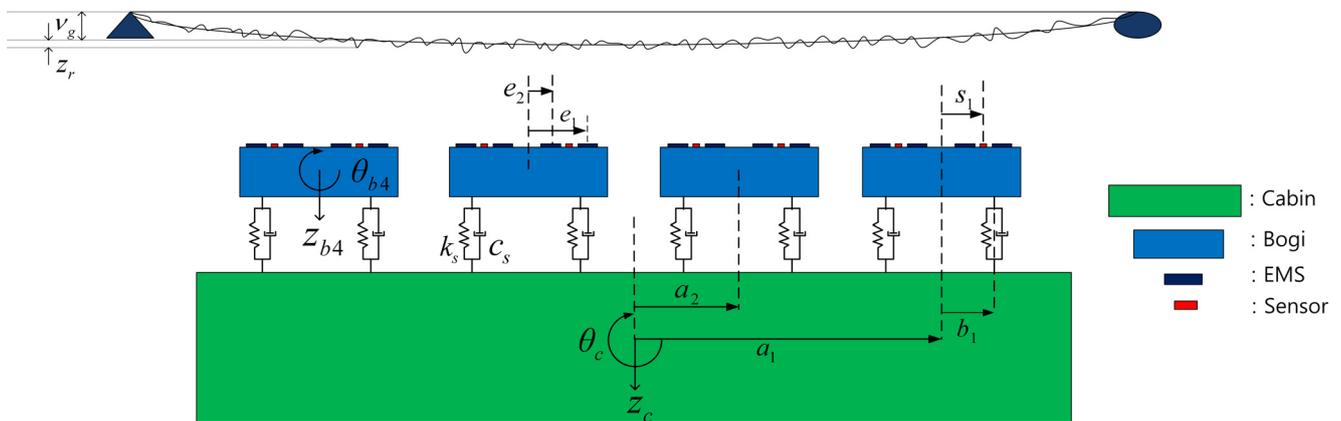


그림 1 차체 자유물체도

$$\begin{aligned}
 &+ c_s \{ \dot{z}_c - (a_j + b_i) \dot{\theta}_c - \dot{z}_{bj} + b_i \dot{\theta}_{bj} \} \\
 &+ \sum_{i=1}^2 [-k_i i_{jk} + k_z (z_{bj} - e_k \theta_{bj} - v_{gjk} - z_{rjk})] \\
 I_b \ddot{\theta}_{bj} = & - \sum_{i=1}^2 b_i [k_s \{ z_c - (a_j + b_i) \theta_c - z_{bj} + b_i \theta_{bj} \} \\
 &+ c_s \{ \dot{z}_c - (a_j + b_i) \dot{\theta}_c - \dot{z}_{bj} + b_i \dot{\theta}_{bj} \} \\
 &+ \sum_{k=1}^{N_{ems}} e_k [k_i i_{jk} - k_z (z_{bj} - e_k \theta_{bj} - v_{gjk} - z_{rjk})]
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서,

- $a_j$  : 차체 중심에서  $j$ 번째 보기까지 거리
- $b_i$  : 보기 중심에서  $i$ 번째 2차 현가장치까지 거리
- $c_s$  : 2차 현가장치의 감쇠계수
- $e_k$  : 보기 중심에서  $k$ 번째 EMS까지 거리
- $F_m$  : 자기부상력
- $I_c$  : 차체의 질량관성 모멘트

- $I_{bj}$  :  $j$ 번째 보기의 질량관성 모멘트
- $k_s$  : 2차 현가장치의 스프링계수
- $m_b$  : 보기의 무게
- $m_c$  : 차체의 무게
- $s_s$  : 보기 중심에서  $s$ 번째 센서까지 거리
- $x_{jk}$  :  $j$ 번째 보기의  $k$ 번째 위치의 좌표
- $z_{rjk}$  :  $j$ 번째 보기의  $k$ 번째 EMS에서의 조도 크기
- $z_{bj}$  :  $j$ 번째 보기의 수직 변위
- $z_c$  : 차체의 수직 변위
- $z_{bj}$  : 가이드웨이와 보기 사이의 상대변위(부상공극)
- $z_r$  : 조도 크기
- $z_{cbji}, \dot{z}_{cbji}$  :  $j$ 번째 보기  $i$ 번째 2차 현가장치에서의 차체와 보기의 상대변위 및 속도
- $\theta_{bj}$  :  $j$ 번째 보기의 회전각
- $\theta_c$  : 차체의 회전각

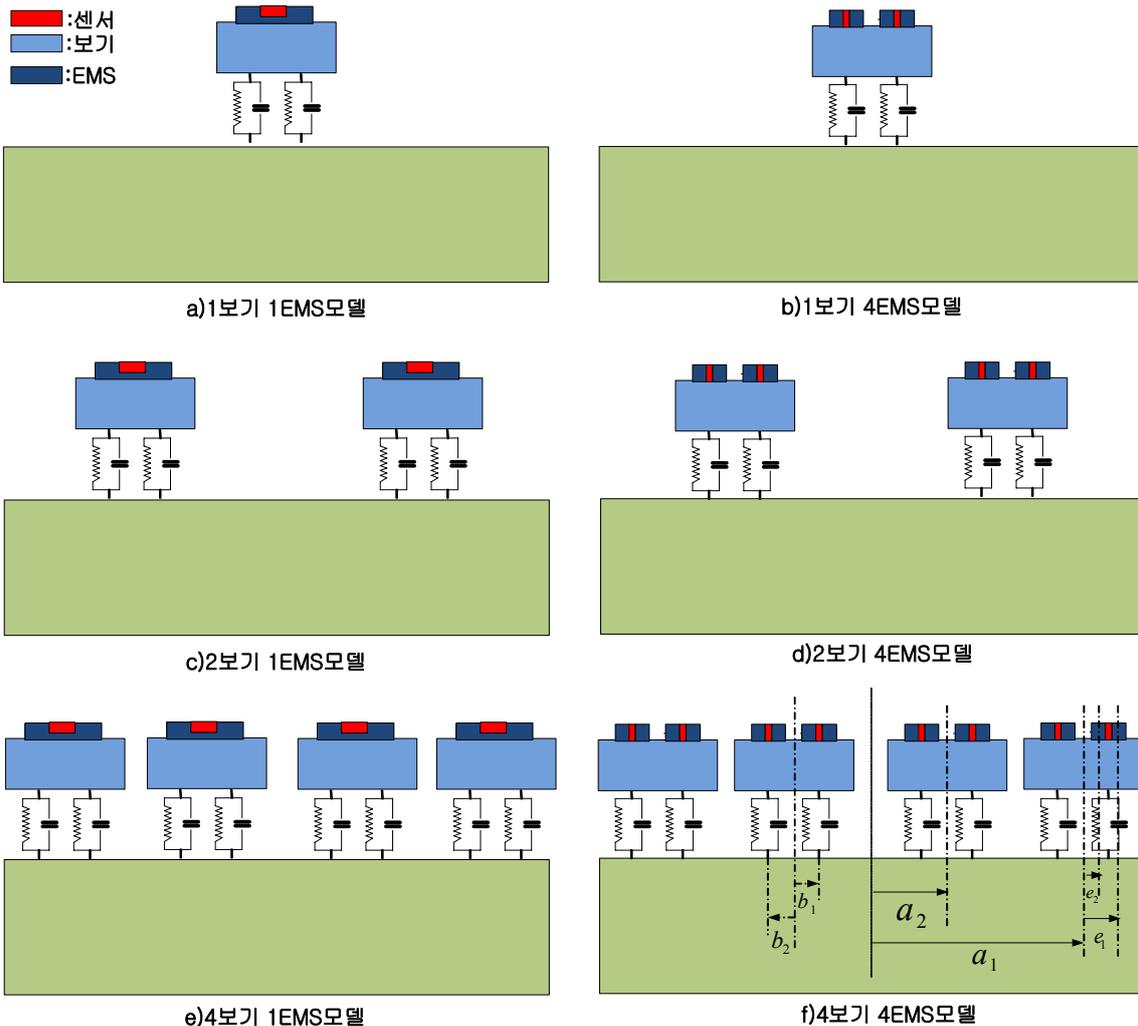


그림 2 6종류의 자기부상열차 모델링

본 연구에서는 차체는 1개로 변동이 없지만 보기는 1개, 2개, 그리고 4개의 세 가지, EMS는 보기 당 1개(1센서), 4개(2센서)의 두 가지 경우를 고려하여 총 6개의 차체 모델링 방법을 생각한다(그림 2 참조). 이 경우 차체 및 보기는 각각 수직 및 회전 자유도를 고려하므로 자기부상열차는 4자유도, 6자유도 그리고 10자유도의 운동방정식을 얻는다. 또한 6개의 해석모델이 동역학적으로 서로 등가(equivalent)가 되도록 하기 위하여 해석 시 사용된 제원은 표 1과 2에 제시하였다.

표 1 UTM-01 차체의 제원

|         |                   |                        |                            |
|---------|-------------------|------------------------|----------------------------|
| 차체      | 질량( $m_c$ )       |                        | 19000kg                    |
|         | 질량관성 모멘트( $I_c$ ) |                        | 1419000kgm <sup>2</sup>    |
| 보기      | 질량( $m_b$ )       | 1보기 모델                 | 4060kg                     |
|         |                   | 2보기 모델                 | 2030kg                     |
|         |                   | 4보기 모델                 | 1015kg                     |
|         | 질량관성 모멘트( $I_b$ ) | 1보기 모델                 | 2231.2kgm <sup>2</sup>     |
| 2보기 모델  |                   | 1115.6kgm <sup>2</sup> |                            |
| 4보기 모델  |                   | 557.8kgm <sup>2</sup>  |                            |
| 2차 현가장치 | $K_s$             | 1보기 모델                 | 3.2×10 <sup>5</sup> N/m    |
|         |                   | 2보기 모델                 | 1.6×10 <sup>5</sup> N/m    |
|         |                   | 4보기 모델                 | 8×10 <sup>4</sup> N/m      |
|         | $C_s$             | 1보기 모델                 | 2.08×10 <sup>5</sup> N·s/m |
|         |                   | 2보기 모델                 | 1.04×10 <sup>5</sup> N·s/m |
|         |                   | 4보기 모델                 | 5.2×10 <sup>4</sup> N·s/m  |
| EMS     | $\mu_0$ (공통)      |                        | 4π×10 <sup>-7</sup>        |
|         | $N_m$ (공통)        |                        | 400turn                    |
|         | $A_m$             | 1EMS 모델                | 0.288m <sup>2</sup>        |
|         |                   | 4EMS 모델                | 0.072m <sup>2</sup>        |
|         | $R$               | 1EMS 모델                | 0.032Ω                     |
|         |                   | 4EMS 모델                | 0.008Ω                     |

표 2 각 모델링별 보기, EMS 및 공기스프링 위치

|                     |         |  |
|---------------------|---------|--|
| 차체 중심에서 보기까지의 거리    | 1보기 모델  | $a_1 = 4.05m$<br>$a_2 = 1.35m$<br>$a_3 = -1.35m$<br>$a_4 = -4.05m$     |
|                     | 2보기 모델  | $a_1 = 2.7m$<br>$a_2 = -2.7m$  |
|                     | 4보기 모델  | $a_1 = 0m$   |
| 보기 중심에서 공기스프링까지의 거리 | 공통      | $b_1 = 1.08m$<br>$b_2 = -1.08m$  |
| 보기 중심에서 EMS까지의 거리   | 1EMS 모델 | $e_1 = 0m$   |
|                     | 4EMS 모델 | $e_1 = 1.005m$<br>$e_2 = 0.415m$<br>$e_3 = -0.415m$<br>$e_4 = -1.005m$ |

### 3. 교량의 운동방정식

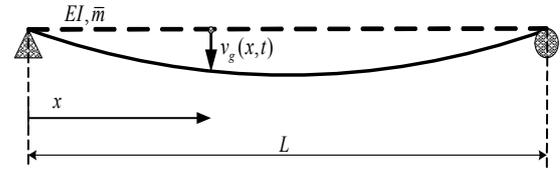


그림 3 단순보 형식의 가이드웨이

단순지지 된 보를 진동모드의 직교성을 이용하고 가이드웨이의 감쇠력을 비례감쇠로 가정하였을 때 자기부상열차가 작용하는 가이드웨이의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{y}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{y}_n + \omega_n^2 y_n = \frac{1}{mL} F_m(t) \phi_n(x_1) \quad (6)$$

이제 식 (1)~(6)으로부터 임의 시간  $t$ 에 열차가 위치  $x_1 (= Vt)$ 을 통과할 때 자기부상열차-가이드웨이 사이의 연동된 운동방정식은 다음과 같이 유도된다.

교량의 운동방정식

$$\ddot{y}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{y}_n(t) = \frac{1}{mL} [(m_c + m_b)g + k_i i(t) - k_z \{z_b(t) - \sum_{m=1}^{N_{mode}} y_m(t) \phi_m(x_1)\}] \phi_n(x_1) \quad (7)$$

$n = 1, 2, 3, \dots, N_{mode}$

### 4. 조 도

본 연구에서는 선로의 특성 중 조도의 영향을 고려하기 위해 미국 FRA에 적용하고 있는 궤도 불규칙성에 대한 지수스펙트럴 밀도함수를 이용하여 생성하였으며 각각의 궤도 불규칙성은 실험적으로 정량화 되어있다. 이러한 궤도 불규칙성은 모의 발생기법을 이용하여 생성 가능하며, 그중에서 super elevation(cross level) 4등급을 임의 생성하여 고려한다.

FRA 조도를 임의 생성하기 위해서는 궤도불규칙성의 평균값이 영인 정규확률 분포로 가정하고, 지수 스펙트럴 밀도로 주어진 불규칙성을 DFT(Discrete Fourier Transform) 기법을 이용하여 조화함수의 합으로 나타낼 수 있으며, 궤도의 불규칙성은 식 (9)으로 정의된다. 여기서  $s$ 는 거리이며,  $\Delta\Omega$ 는 주파수의 간격  $n$ 은 정규화된 파형의 개수,  $\theta_i$ 는 균일 확률 변수로써  $[0, 2\pi]$ 의 범위를 가지며, 궤도의 불규칙성을 발생시키기 위해서  $\Omega$ 의 범위를 0.001~1.0cycle/m로 한정 하였으며, 생성된 조도는 그림 4와 같으며, 최소값 및 최대

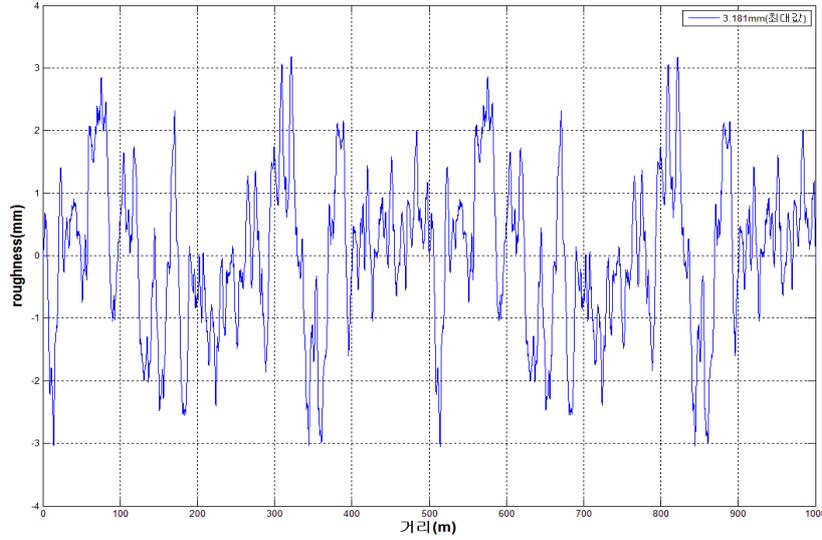


그림 4 생성조도(Super elevation 4등급)

값은 3.181mm의 크기를 갖는다.

$$S_r(\Omega) = \frac{A\Omega_2^2}{(\Omega^2 + \Omega_1^2)(\Omega^2 + \Omega_2^2)} \quad (\text{for super elevation}) \quad (8)$$

$$w(s) = \sum_{i=1}^n \sqrt{4s_r(\Omega)\Delta\Omega \cos(\Omega_i s - \theta_i)} \quad (9)$$

### 5. 열차의 자기부상 제어방법

자기부상 열차의 주행성을 증가시키기 위해서 EMS에서 발생하는 부상력을 제어할 필요가 있으며, 센서에서 부상 공극 및 연직 가속도를 제어기에서 받아들여 전압을 결정하게 된다. 본 논문에서는 UTM-01 열차에 적용된 제어 방식을 이용하였으며 제어 알고리즘은 아래와 같다(‘주행특성 및 승객 안전성 향상’ 1단계 실적보고서).

$$\hat{X}_s = A_s \hat{X}_s + L_s y_s \quad (10)$$

$$\hat{X}_s = \{x_{1js}, x_{2js}, x_{3js}, x_{4js}, x_{5js}\}^T, \quad y_s = \{z_{bj}, g_{js}\}^T$$

$$A_s = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ \frac{-1}{T_1} & \frac{-V_1}{T_3} & 0 & \frac{V_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & \frac{-V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-V_3}{T_4} & \frac{-1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{pmatrix}, \quad L_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\ddot{z}_{bj} = \ddot{z}_{bj} - s_s \ddot{\theta}_{bj}, \quad g_{js} = z_{bj} - s_s \theta_{bj} - z_{rjs}$$

$$v_{js} = k_1(-x_{1js} - V_1 x_{2js} + V_1 x_{4js} + \ddot{z}_{bj}) + k_2 x_{2js} \quad (12)$$

$$+ k_3 x_{3js} + k_4 x_{4js} + k_5 x_{5js}$$

$$= k_1 \ddot{z}_{bj} + (-k_1)x_{1js} + (-k_1 V_1 + k_2)x_{2js}$$

$$+ k_3 x_{3js} + (k_1 V_1 + k_4)x_{4js} + k_5 x_{5js}$$

자기부상 열차의 상호작용이 고려된 식들을 상태공간 방정식의 형태로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있으며, 식 (13)과 식 (14)에 대한 자세한 설명은 부록으로 첨부한다.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + f(t) \quad (13)$$

$$x = \{x_b; x_v; \hat{x}\}^T, \quad A = \begin{bmatrix} A_{bb} & A_{bv} & A_{b\hat{x}} \\ A_{vb} & A_{vv} & A_{v\hat{x}} \\ A_{\hat{x}b} & A_{\hat{x}v} & A_{\hat{x}\hat{x}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

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

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

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

$$\hat{x} = \{\hat{x}_{111}, \hat{x}_{211}, \hat{x}_{311}, \hat{x}_{411}, \hat{x}_{511}, \dots, \hat{x}_{342}, \hat{x}_{442}, \hat{x}_{542}\}^T \quad (15)$$

결국 전체적인 상태 공간 방정식은 연립상미분방정식이 되므로 비교적 정확한 방법인 4th Runge Kutta 방법을 적용한다.

$$x_{i+1} = x_i + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \quad (16)$$

여기서 ,

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

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

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

$$k_4 = A(t_i + \Delta t)(x_i + k_3 \Delta t) + f(t_i + \Delta t)$$

$i$ 번째 위치에서의  $A(t_i + \Delta t)$ ,  $f(t_i + \Delta t)$ ,  $A(t_i + \Delta t/2)$ ,  $f(t_i + \Delta t/2)$  및  $A(t_i)$ ,  $f(t_i)$ 를 각각 구하여 4th Runge Kutta방법으로 해석하였으며, 해석은 속도의 변화에 따른 보기의 개수 및 EMS의 개수가 자기부상열차의 동특성에 미치는 영향을 알아보기 6개의 차량모델을 속도의 변화를 주며 해석을 실시한다.

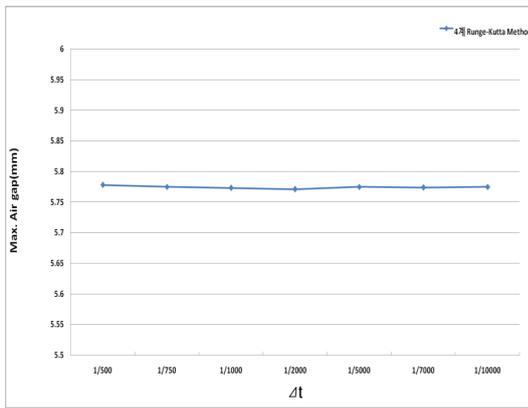


그림 5 700km/h일 때 Δt의 변화에 따른 부상공극 최대값 변화

Runge-Kutta방법의 안정성을 확인하기 위해서 700km/h의 속도로 주행시킬 때 Δt를 1/500초에서 1/10000초까지 변화시켜가며 부상공극의 최대값을 나타낸 그래프가 그림 5와 같다. 아래 그림을 통해서 룬지쿠타 방법을 동역학 문제에 적용시킴에 있어서 시간증분 및 물성에 따른 안정성/수렴성이 확보됨을 확인할 수 있다.

### 6. 수치해석 결과

해석에 적용된 제원은 UTM01에 사용된 제원을 사용하였으며 그 제원은 표 2와 같다. UTM01의 차량 모델은 4보기 4EMS일 때의 제원이므로 4보기 4EMS일 경우에는 표 1의 값을 그대로 적용하였고 질량의 경우 2보기의 모델링은 2배 1보기의 모델링은 4배를 해주어 등가로 맞춰주며 EMS의 경우에는 보기의 질량을 맞춰주듯이 EMS의 면적의 크기를 등가로 맞춰주는 작업을 통해서 모델링을 하며, 등가의 강성과 감쇠를 가지게 모델링을 하여 6개의 차량모델을 개발한다. 해석에 사용된 교량의 제원은 표 3과 같다.

그림 6은 자기부상열차가 300km/h로 주행할 때 6개의

표 3 교량의 제원

|          |                                       |
|----------|---------------------------------------|
| 활하중      | 2500kg/m                              |
| 단면2차모멘트  | 0.471m <sup>4</sup>                   |
| 탄성계수     | 2.16×10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup> |
| 단위길이당 질량 | 3040kg/m                              |
| 교량길이(m)  | 25m                                   |

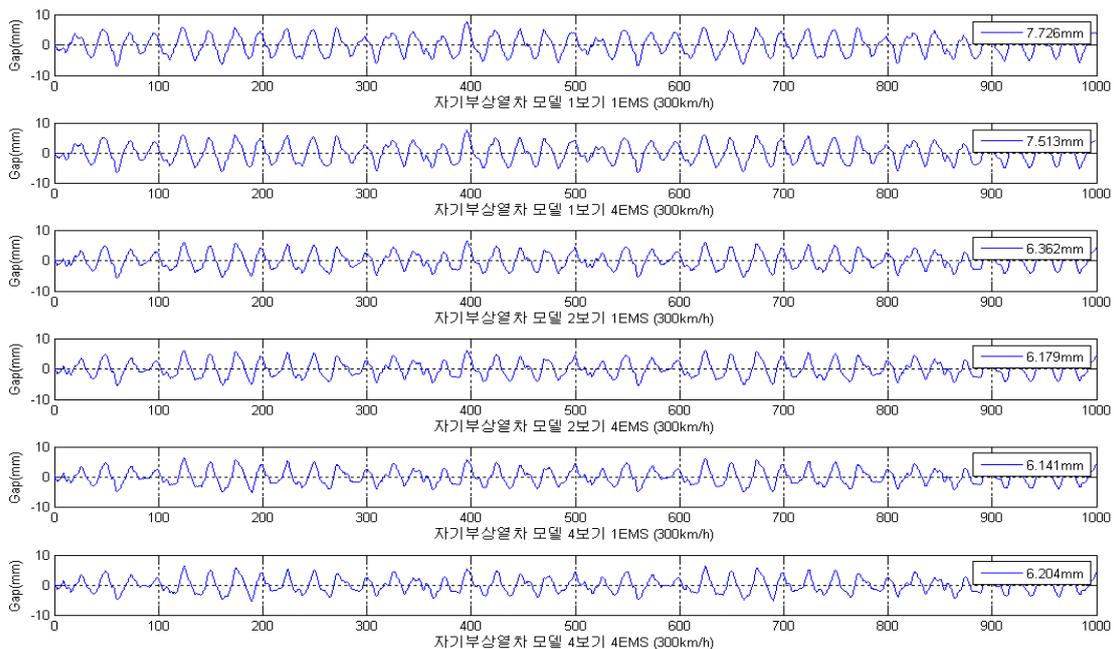


그림 6 300km/h일 때 자기부상열차 모델링 방법에 따른 위치별 부상공극

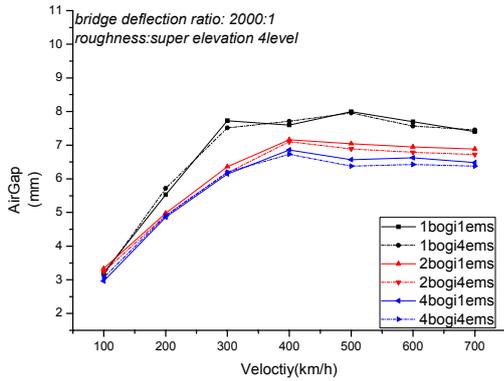


그림 7 자기부상열차 모델링 방법에 따른 속도별 부상공극의 최대값

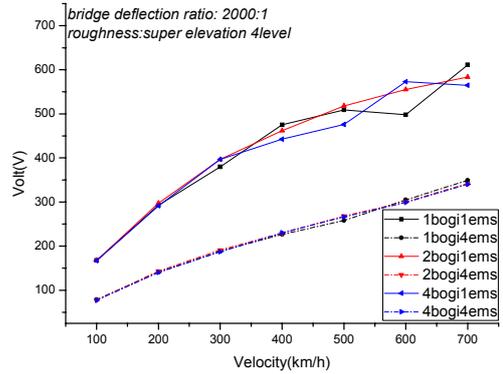


그림 9 자기부상열차 모델링 방법에 따른 속도별 전압의 최대값

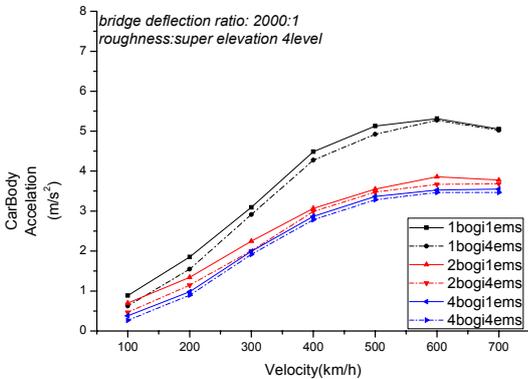


그림 8 자기부상열차 모델링 방법에 따른 속도별 차체가속도의 최대값

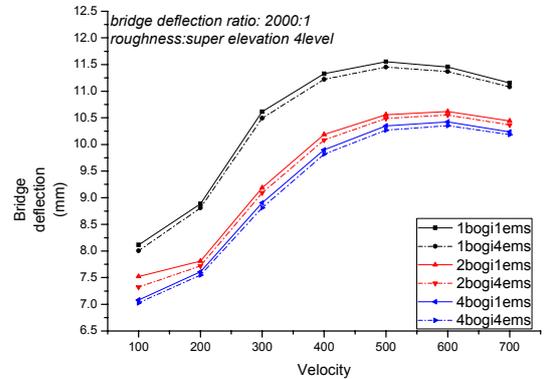


그림 10 자기부상열차 모델링 방법에 따른 속도별 교량처짐의 최대값

해석모델에 대한 부상공극의 해석결과를 보여주고 있다. 1보기 모델이 2보기, 4보기 모델에 비하여 상대적으로 다소 큰 최대부상공극 값을 주는 것을 알 수 있다.

그림 7에서 그림 10은 처짐비가 2000:1의 경우에 열차속도를 증가시키기에 따라 6개의 모델링에 의한 동적상호작용 해석의 결과로부터 최대부상공극, 최대차체가속도, 최대전압, 그리고 교량의 중앙처짐값을 나타낸 것이다.

부상 공극과 차체가속도의 경우 속도가 증가함에 따라 점점 증가하는 경향을 보이다가 일정속도를 지나게 되면 수렴하는 경향을 보인다. 또한 최대 부상공극 및 최대 차체가속도의 크기를 감소시키는데 EMS의 개수보다 보기의 개수에 더 큰 영향을 받음을 확인할 수 있다.

속도가 증가함에 따라 전압의 최대값의 크기는 계속 증가하고 전압의 최대값의 경우 보기 개수보다 EMS의 개수에 더큰 영향을 받는 것을 그림 10을 통해 확인할 수 있다.

속도가 증가함에 따라 처짐도 같이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 600km/h이상일 경우 수렴하는 경향을 확인할 수 있다. 보기의 개수가 많을수록 교량의 최대처짐의

크기가 작아지고 EMS의 개수가 많을수록 최대처짐의 크기가 작아지지만 보기의 개수가 더 지배적임을 그림 10을 통해 확인할 수 있으며, 2보기 모델과 4보기 모델의 차이는 1보기 모델과 2보기 모델의 차이에 비해 적게 나타남을 확인할 수 있다.

## 7. 결 론

총 6가지 자기부상열차 모델에 대하여 열차의 속도를 증가시키면서 자기부상 시스템의 교량-열차간 동적상호작용 효과를 고려한 해석을 수행하였다 열차의 보기 및 EMS의 개수가 자기부상열차의 동적 응답에 미치는 영향을 조사한 결과 1) 일반적으로 자기부상열차의 속도가 증가할수록 부상공극, 차체가속도, 전압, 그리고 교량처짐의 최대값이 증가하는 경향을 보였으며, 2) UTM-01 제어기법을 적용한 자기부상열차의 단순화된 모델을 적용하는 경우에 보기 수는 적어도 2개 이상으로 하여야 신뢰성 있는 해석이 가능하였고, 3) 자기부상열차의 동특성중 전압의 최대값을 제외하면 EMS수

의 경우에 1개로 단순화시켜도 가능하다는 결론을 얻을 수 있다.

### 감사의 글

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

### 참 고 문 헌

국토해양부 한국건설 교통기술 평가원 (2009) 주행특성 및 승객안전성 향상, 1단계 실적보고서, pp.265~282.

민동주, 정명락, 이준석, 김문영 (2010) 열차교량의 동적상호작용을 고려한 중저속 및 초고속 자기 부상열차의 동특성 해석, 한국지진공학회, (심사중).

이준석, 권순덕, 여인호, 김문영 (2009) 능동제어를 고려한 자기부상열차와 가이드웨이 교량의 동적상호작용 해석, 대한토목학회 논문집, pp.523~533.

한형석, 임봉혁, 이남진, 문석준, 정정훈 (2007) 전자석 현가 시스템의 부상 공극 주파수 응답 해석, 한국철도학회 추계 학술발표회, 한국철도학회, pp.912~917.

Han, H.S. (2003) A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle, *JSME International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing*, 46(4), pp.1497~

1501.

Hu, C.Y., Chen, K.C., Chen, J.S. (2010) Dynamic Interaction of a Distributed Supported Guideway and an Asymmetrical Multimagnet Suspension Vehicle with Unbalanced Mass, *Journal of Mechanics*, 26(1), pp.1~14.

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 Structures, *Journa of Sound and Vibration*, 328, pp.301~317.

Sinha, P.K. (1987) *Electromagnetic Suspension Dynamics & Control*, Peter Peregrinus, London, U.K.

Zhao, C.F., Zhai, W.M. (2002) Maglev Vehicle/Guideway Vertical Random Response and Ride Quality, *Vehicle System Dynamics*, 38(3), pp.185~210.

- 논문접수일 2010년 9월 28일
- 논문심사일
  - 1차 2010년 10월 1일
  - 2차 2011년 1월 17일
- 게재확정일 2011년 2월 11일

[부 록]

 $\dot{x} = Ax + F$  (1보기, 1EMS, 1Sensor, UTM01 Controller)

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \\ z_c \\ \dot{z}_b \\ \vdots \\ \dot{z}_c \\ \dot{z}_b \\ \vdots \\ \dot{i} \\ \hat{x}_{111} \\ \hat{x}_{211} \\ \vdots \\ \hat{x}_{311} \\ \hat{x}_{411} \\ \hat{x}_{511} \end{pmatrix}_{(2n+10) \times 1} & x &= \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \\ z_c \\ z_b \\ \vdots \\ z_c \\ z_b \\ \vdots \\ i \\ \hat{x}_{111} \\ \hat{x}_{211} \\ \vdots \\ \hat{x}_{311} \\ \hat{x}_{411} \\ \hat{x}_{511} \end{pmatrix}_{(2n+10) \times 1} & A &= \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} & 0_{n \times 2} & 0_{n \times 2} & 0_{n \times 1} & 0_{n \times 5} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0_{n \times 2} & A_{25} & 0_{n \times 5} \\ 0_{2 \times n} & 0_{2 \times n} & 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 5} \\ A_{41} & 0_{2 \times n} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & 0_{2 \times 5} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & 0_{n \times 5} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} & F &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \phi_1(x)(F_{m_o} + k_z z_r) \\ \phi_2(x)(F_{m_o} + k_z z_r) \\ \vdots \\ \phi_n(x)(F_{m_o} + k_z z_r) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -k_z z_r / m_b \\ -k_z z_r / k_i - k_1 k_z z_r / L_o m_b \\ 0 \\ -k_z z_r / m_b T_1 \\ 0 \\ z_r / T_4 \\ 0 \end{pmatrix}_{(2n+10) \times 1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{bb} &= \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} & A_{bv} &= \begin{bmatrix} 0_{n \times 2} & 0_{n \times 2} \\ A_{23} & 0_{n \times 2} \end{bmatrix} & A_{bi} &= \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ A_{25} \end{bmatrix} & A_{b\hat{x}} &= \begin{bmatrix} 0_{n \times 5} \\ 0_{n \times 5} \end{bmatrix} & A_{vb} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times n} & 0_{2 \times n} \\ A_{41} & 0_{2 \times n} \end{bmatrix} & A_{vv} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} & A_{vi} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ A_{45} \end{bmatrix} & A_{v\hat{x}} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 5} \\ 0_{2 \times 5} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{ib} &= [A_{51} \ A_{52}] & A_{iv} &= [A_{53} \ A_{54}] & A_{ii} &= [A_{55}] & A_{i\hat{x}} &= [A_{56}] & A_{x_b} &= [A_{61} \ 0_{n \times 5}] & A_{x_v} &= [A_{63} \ A_{64}] & A_{x_i} &= [A_{65}] & A_{x\hat{x}} &= [A_{66}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{21} &= \begin{bmatrix} -\omega_1^2 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & -\omega_n^2 \end{bmatrix}_{n \times n} & k_z &+ & \begin{bmatrix} \phi_1^2(x) & \phi_1(x)\phi_2(x) & \dots & \phi_1(x)\phi_n(x) \\ \phi_2(x)\phi_1(x) & \phi_2^2(x) & & \phi_2(x)\phi_n(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_n(x)\phi_1(x) & \phi_n(x)\phi_2(x) & \dots & \phi_n^2(x) \end{bmatrix}_{n \times n} & A_{22} &= \begin{bmatrix} -2\xi_1 \omega_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & -2\xi_n \omega_n \end{bmatrix}_{n \times n} & A_{23} &= -k_z \begin{bmatrix} 0 & \phi_1(x) \\ 0 & \phi_2(x) \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \phi_n(x) \end{bmatrix}_{n \times 2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{25} &= k_i \begin{bmatrix} \phi_1(x) \\ \phi_2(x) \\ \vdots \\ \phi_n(x) \end{bmatrix}_{n \times 1} & A_{41} &= k_z \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\phi_1(x)/m_b & -\phi_2(x)/m_b & \dots & -\phi_n(x)/m_b \end{bmatrix}_{2 \times n} & A_{43} &= k_s \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_c} & \frac{1}{m_c} \\ \frac{1}{m_b} & -\frac{1}{m_b} + \frac{k_z}{k_s m_b} \end{bmatrix}_{2 \times 2} & A_{44} &= c_s \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_c} & \frac{1}{m_c} \\ \frac{1}{m_b} & -\frac{1}{m_b} \end{bmatrix}_{2 \times 2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{45} &= \begin{bmatrix} 0 \\ k_i \\ -\frac{1}{m_b} \end{bmatrix}_{2 \times 1} & A_{51} &= \left[ -\frac{k_z}{k_i} V\phi_1'(x) - \frac{k_z k_1}{L_o m_b} \phi_1(x) - \frac{k_z}{k_i} V\phi_2'(x) - \frac{k_z k_1}{L_o m_b} \phi_2(x) \dots - \frac{k_z}{k_i} V\phi_n'(x) - \frac{k_z k_1}{L_o m_b} \phi_n(x) \right]_{1 \times n}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{52} &= \left[ -\frac{k_z}{k_i} \phi_1(x) - \frac{k_z}{k_i} \phi_2(x) \dots - \frac{k_z}{k_i} \phi_n(x) \right]_{1 \times n} & A_{53} &= \left[ \frac{k_s k_1}{L_o m_b} \frac{(k_z - k_s) k_1}{L_o m_b} \right]_{2 \times 1} & A_{54} &= \left[ \frac{c_s k_1}{L_o m_b} \frac{k_z}{k_i} - \frac{c_s k_1}{L_o m_b} \right]_{2 \times 1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{55} &= \left[ -\frac{R}{L_o} - \frac{k_i k_1}{L_o m_b} \right]_{1 \times 1} & A_{56} &= \left[ -\frac{k_1}{L_o} \frac{k_2 - k_1 V_1}{L_o} \frac{k_3}{L_o} \frac{k_4 + k_1 V_1}{L_o} \frac{k_5}{L_o} \right]_{1 \times 5} & A_{61} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ k_z \phi_1(x) & k_z \phi_2(x) & \dots & k_z \phi_5(x) \\ m_b T_1 & m_b T_1 & \dots & m_b T_1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \phi_1(x) & \phi_2(x) & \dots & \phi_5(x) \\ \frac{1}{T_4} & \frac{1}{T_4} & \dots & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{5 \times n}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{63} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_s & k_z - k_s \\ m_b T_1 & m_b T_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 5} & A_{64} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ c_s & -c_s \\ m_b T_1 & m_b T_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 5} & A_{65} &= \begin{bmatrix} 0 \\ -k_i \\ m_b T_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{1 \times 5} & A_{66} &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ \frac{-1}{T_1} & \frac{-V_1}{T_3} & 0 & \frac{V_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & \frac{-V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-V_3}{T_4} & \frac{-1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{bmatrix}_{5 \times n}
 \end{aligned}$$