

상전도 흡인식 자기부상열차의 주행 안정성 해석

한 형 석^{*1)} · 김 숙 희¹⁾ · 임 봉 혁²⁾ · 허 영 철¹⁾

한국기계연구원¹⁾ · 충남대학교 대학원²⁾

Stability Analysis of a Maglev Vehicle Utilizing Electromagnetic Suspension System

Hyungsuk Han^{*1)} · Sookhee Kim¹⁾ · Bonghyuk Yim²⁾ · Youngchul Hur¹⁾

¹⁾Vibration & Shock Research Team, KIMM, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 13 September 2007 / Accepted 15 January 2008)

Abstract : The levitation stability of a Maglev vehicle utilizing electromagnetic suspension is primarily influenced by the deformation, roughness, and vibration of the guideway. Optimum design for both the vehicle and the guideway is desirable in order to reduce guideway construction cost, while meeting requirements for stability and ride quality. This paper presents an analysis of the levitation stability of the UTM-01, an urban Maglev vehicle, using a numerical simulation. The ODYN/Maglev, a dynamics analysis program, is used to simulate dynamics to evaluate the stability. A running test of the UTM-01 is also carried out to verify the results of the simulation. Using the simulation results, the levitation stability of the UTM-01 can be numerically analyzed at a variety of vehicle speeds.

Key words : Electromagnet(전자석), Levitation(부상), Maglev(자기부상), Stability(안정성)

1. 서론

전자석을 현가 시스템으로 사용하는 상전도 흡입식 자기부상열차는 반발식에 비하여 상대적으로 작은 크기의 전자석과 가이드웨이의 간극인 부상 공극(air gap)을 유지하도록 능동적으로 전압을 제어한다. 국내외의 상전도 흡인식 자기부상열차들은 8~10 mm의 공칭 부상 공극을 사용하고 있다. 또한 공칭 부상 공극으로부터의 최대 편차도 제한되고 있으며 이 부상 공극 편차는 부상 안정성 평가 척도의 하나이다. 부상 공극 편차가 과다할 경우 전자석과 가이드웨이 사이의 물리적 접촉이 발생할 수 있다. 국내에서 2006년부터 개발 중인 도시형 자기부상열차의 경우 공칭 부상 공극은 8 mm 이고 허용 편

차는 ±3 mm이다. 부상 공극 변동은 다양한 외란에 의하여 발생하는데 자연환경 조건을 제외하면 가이드웨이의 처짐, 표면 조도 및 가이드웨이 진동에 의하여 주로 결정된다.¹⁾ 가이드웨이의 표면 조도와 처짐을 줄일수록 부상 공극 변동과 승차감에는 긍정적이다. 반면에 가이드웨이 건설 및 유지보수 비용이 증가한다. 가이드웨이 건설비용을 줄이기 위해서는 부상 안정성, 승차감과 같은 주행성능을 확보하면서 가이드웨이의 유연성과 표면 조도 한계를 크게 하는 것이 추천된다.¹⁾ 그러므로 부상 안정성과 승차감을 확보하면서 가이드웨이 건설비용을 최소화하기 위한 자기부상열차 시스템의 최적 설계는 매우 중요한 기술적 사안이라고 할 수 있다. 특히, 실용화 및 상용화를 위한 자기부상열차 시스템 개발에 있어서는 더더욱 중요하다.

*Corresponding author, E-mail: hshan@kimm.re.kr

현재, 국내에서 도시형 자기부상열차 실용화 사업을 2006년 말에 시작하여 6년간 진행 중에 있다. 본 사업에서도 상기에서 언급한 관점에서의 목표를 달성하기 위하여 부상 안정성 해석을 통하여 차량과 가이드웨이의 최적 설계가 요구되고 있다. 단순 모델에 의한 시간역, 주파수역에서의 일반적 부상 안정성 해석 방법은 이미 알려져 있다.^{1,2)} 또한 ODE(상미분방정식) 형태의 운동방정식을 이용한 동특성 해석 기술도 여러 연구자들에 의하여 제안되었다.³⁻⁵⁾ 그러나 본 논문에서 소개하는 5개의 관측 상태변수 궤환 제어기를 채택하는 자기부상열차에 대한 단순모델이 아닌 DAE(미분대수방정식) 구조의 다물체 동역학 차량모델 기반의 주행 안정성 해석 사례는 부족하다고 할 수 있다. 특히, 부상 제어기 알고리즘에 따라서 부상 안정성 척도인 부상 공극 응답이 다르기 때문에 관측 상태변수 5개의 궤환 제어기 차량에 대한 부상 공극을 분석할 필요가 있다.

본 논문은 한국기계연구원에 설치된 시험선 가이드웨이를 바탕으로 이미 개발되어 시험 운행 중인 자기부상열차 UTM-01(Photo. 1)의 주행 안정성을 평가하기 위하여 부상 공극을 속도 증가에 따라서 해석하는데 목적이 있다. 대상 자기부상열차는 5개의 관측 상태변수 궤환 제어법칙을 사용하는 도시형 상전도 흡입식 자기부상열차이다. 이를 위하여 시험선 표면 조도가 우선 정량화된다. 부상 공극 시뮬레이션은 다물체 동역학 해석 프로그램인 ODYN/Maglev 프로그램으로 수행된다.⁶⁾ 시뮬레이션에 의한 부상 공극을 검증하기 위하여 UTM-01에 대한 실차 주행시험을 수행한다. 검증된 부상 공극 시뮬레이션 방법을 이용하여 차량 주행속도 증가에 따른 주행 안정성을 평가한다. 본 논문의 결과는 현재 진행 중인 도시형 자기부상열차 실용화사업에서 부상 시스템 설계와 가이드웨이 구조 설계에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 모델

도시형 상전도 흡입식 자기부상열차의 동특성 시뮬레이션을 위하여 저자들이 제안한 통합 모델, 지배방정식 구조 및 프로그램 개발에 대한 소개는 참고문헌에 나타나 있다.⁶⁾ 서론에서 언급한 바와 같이

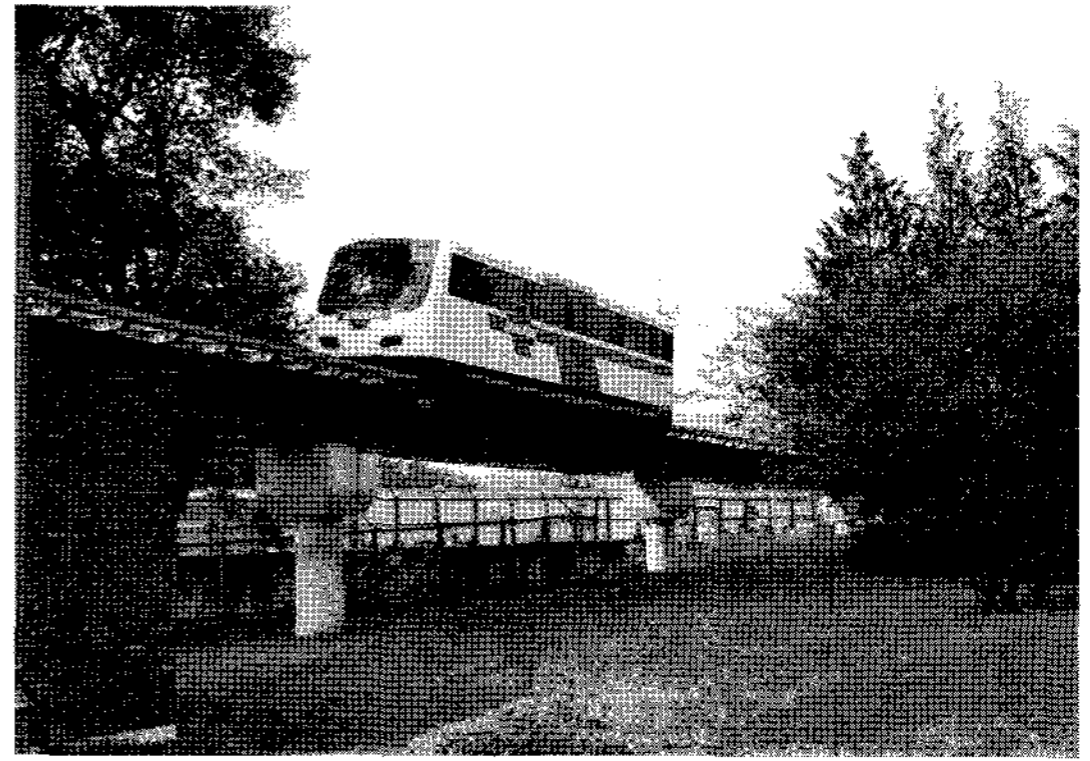


Photo. 1 Urban Maglev vehicle UTM-01 running over the elevated guideway

본 논문에서는 관측 상태변수 궤환 제어기를 이용하는 차량의 안정성 해석에 중점을 두고 있기 때문에 제어기 모델에 대한 상세한 내용이 추가되었다.

2.1 표면 조도

주행 안정성 해석에 있어서 기초는 차량이 주행하는 가이드웨이의 표면 조도의 정량화이다. 본 논문에서 대상으로 하는 한국기계연구원(KIMM)의 시험선 가이드웨이 표면 조도를 정량화하기 위하여 가이드웨이의 높이 측정 데이터를 이용한다. 가이드웨이 높이 측정은 약 1.25 m 간격으로 양측 가이드레일에서 이루어졌다. Fig. 1은 측정된 시험선 가이드웨이 높이를 보여주고 있다. 이 높이는 절대 높이를 나타내며, 이 절대 높이를 직접 동특성 해석의 외란 입력으로 사용할 수도 있으나 Versine 기법이 현실적으로 이용된다.²⁾ Versine 기법은 일정한 현길이(chord length)의 중간 지점에서의 편차를 표면 조도로 정의한다. 현 길이는 주요한 공간 파장 및 가이드레일의 단위 길이를 이용하여 정의한다. 본 논문에서는 Versine을 얻기 위해서 5 m 현길이가 이용되었다. 현재 시험선의 가이드웨이에 설치된 가이드레일의 길이가 5 m이기 때문이다. Fig. 2는 Fig. 1에 Versine 기법을 직선 구간(400 ~ 1000 m)에 적용하여 계산한 Versine 측 표면 조도를 보여주고 있다. 일반적으로 이 높이 편차 즉 Versine은 Gauss 분포를 갖는 것으로 알려져 있다. 이러한 불규칙도의 정량적 평가는 일반적으로 PSD(power spectral density)로 이루어진다.^{1,7)} 그러나 본 논문에서는 시간영역에서

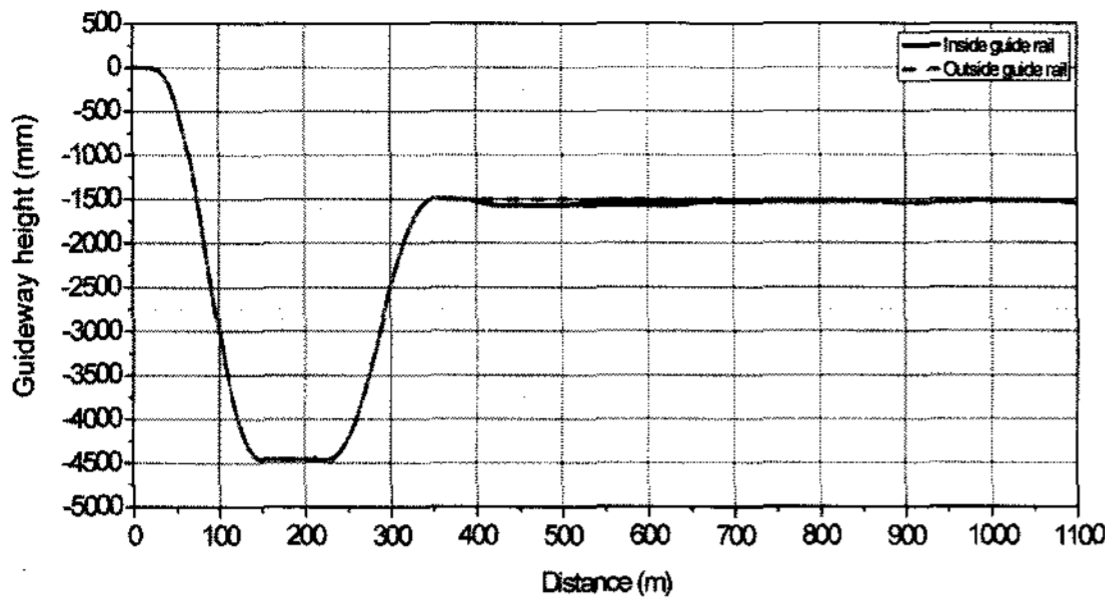


Fig. 1 Height of the guideway of the test track at KIMM

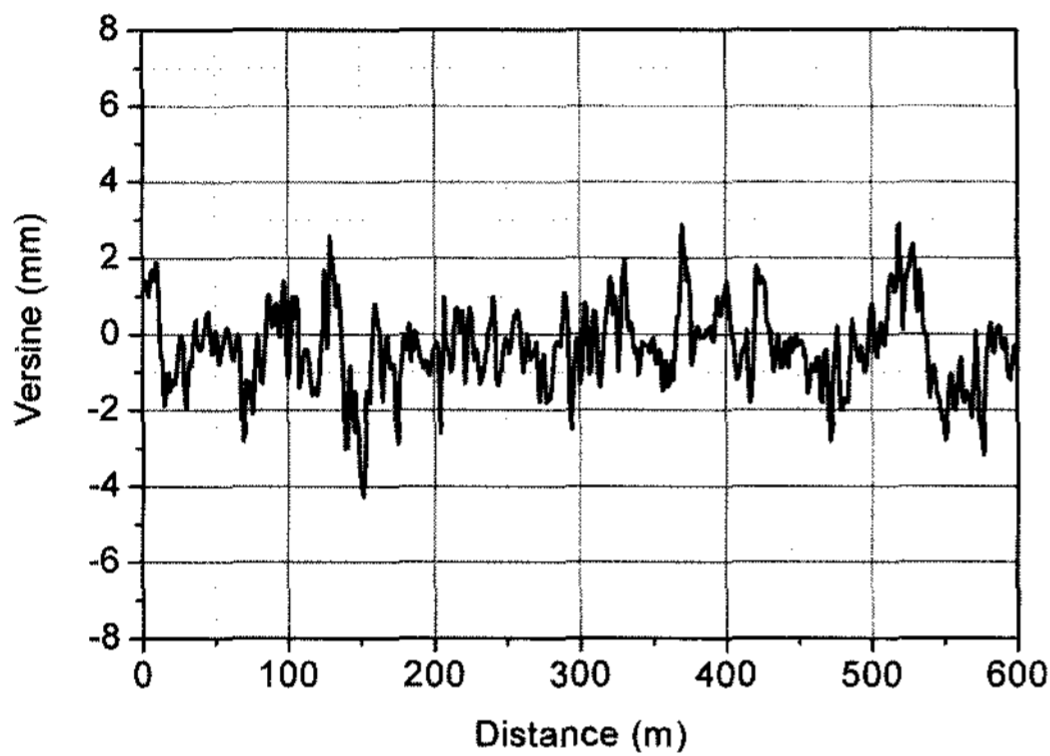


Fig. 2 Versines of the guideway

해석하고 시험과 비교하기 위하여 Fig. 2를 외란 입력으로 직접 사용한다. Fig. 2를 외란 입력으로 사용함에 있어서 이산적인 형상 데이터를 Cubic spline 보간법을 이용하여 연속 형상화하고, 형상의 기울기도 Cubic spline 보간법으로 계산한다.

2.2 해석 모델

2.2.1 부상 제어 시스템

상전도 흡인식 자기부상 현가 시스템의 원리를 Fig. 3에서 보여주고 있다. Fig. 3에서 자기부상력 $F(i, c)$ 는 2차 함수이나 일반적으로 평형 점 즉 공칭점 (i_0, c_0) 에서의 선형화 모델이 자주 이용된다.¹⁾ 평형 위치에서의 선형화에 따른 부상력과 전류의 변화량은 식 (1), 식 (2)와 같이 정의된다.¹⁾

$$\Delta F(i, c) = k_c \Delta c(t) - k_i \Delta i(t) \quad (1)$$

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

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 : levitation force

A : section area of magnet (m^2)

μ_0 : permeability factor

N : number of turns 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)

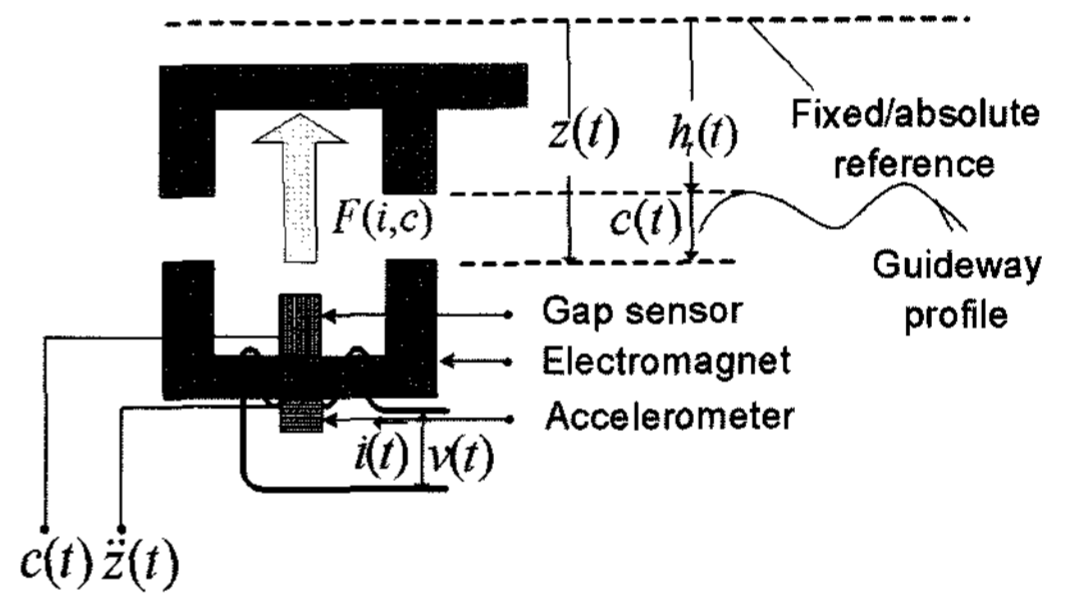


Fig. 3 Electromagnetic suspension

부상 공극 변화량 $\Delta c(t)$ 를 허용 범위내로 유지하기 위하여 UTM-01은 5개의 관측 상태변수를 이용한 전압 $\Delta v(t)$ 을 제어하는 방법을 이용한다.

$$\Delta v(t) = k_1 \ddot{\hat{z}}(t) + k_2 \Delta \dot{\hat{z}}(t) + k_3 \Delta \hat{z}(t) + k_4 \Delta \dot{\hat{c}}(t) + k_5 \Delta \hat{c}(t) \quad (3)$$

여기서,

$\ddot{\hat{z}}(t)$: acceleration estimate

$\Delta \dot{\hat{z}}(t)$: velocity estimate

$\Delta \hat{z}(t)$: position estimate

$\Delta \dot{\hat{c}}(t)$: air gap velocity estimate

$\Delta \hat{c}(t)$: air gap estimate

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 : control gains

상태 제환에 이용되는 5개의 관측 상태 변수 즉, $\Delta\ddot{z}(t), \Delta\dot{z}(t), \Delta\hat{z}(t), \Delta\dot{c}(t), \Delta\hat{c}(t)$ 는 다음 식 (4), (5) 와 같이 단지 실측 가속도 $\Delta\ddot{z}(t)$ 와 실측 부상 공극 $\Delta c(t)$ 을 이용하는 관측기에 의하여 추정한다.⁸⁾

$$[\dot{x}(t)] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_3} & 0 & \frac{-1}{T_3} & 0 \\ \frac{-1}{T_1} & \frac{-V_1}{T_1} & 0 & \frac{V_1}{T_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & \frac{-V_2}{T_2} & 0 & \frac{V_2}{T_2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-V_3}{T_4} & \frac{-1}{T_4} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_5} & 0 \end{bmatrix} [x(t)] \quad (4)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{1_1}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_4} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [u(t)]$$

$$[y(t)] = \begin{bmatrix} -1 & -V_1 & 0 & V_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [x(t)] + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [u(t)] \quad (5)$$

여기서,

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), x_5(t)]^T$$

$$u(t) = [\Delta\ddot{z}(t), \Delta c(t)]^T$$

$$y(t) = [\Delta\ddot{z}(t), \Delta\dot{z}(t), \Delta\hat{z}(t), \Delta\dot{c}(t), \Delta\hat{c}(t)]^T$$

결과적으로 UTM-01의 자기부상 제어기에 대한 동역학 방정식은 식 (1)~(5)로 구성된다. 즉 6개의 상태 변수로 부상제어기의 동역학 방정식이 구성된다.

2.2.2 차량

차량은 Photo. 1에서와 같이 단일 차량 또는 여러 대의 차량을 연결하여 운행한다. 차량과 대차의 구조를 Fig. 4와 Fig. 5에서 각각 보여주고 있으며, 대차 당 좌우 8개의 전자석과 좌우 사이드 프레임, 전후 타이빔, 좌우 2개의 공기 스프링, 좌우 4개의 감쇠기, 좌우 2개의 견인바, 그리고 견인바에 내재된 고

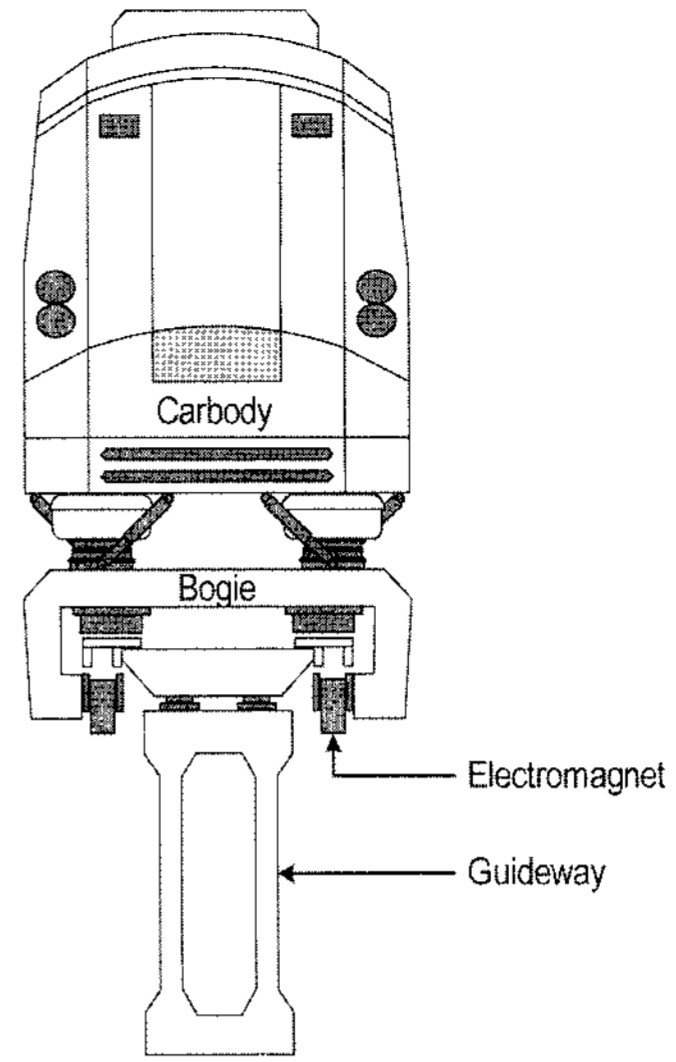


Fig. 4 Section schematic of the UTM-01

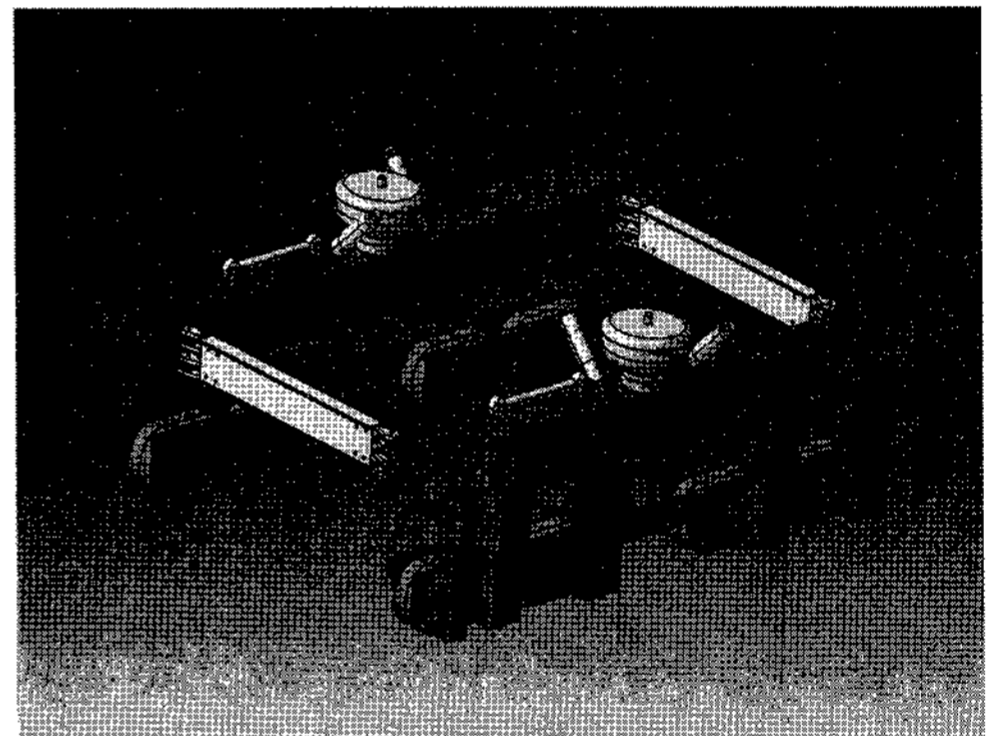


Fig. 5 Bogie configuration

무로 구성된다. 타이빔과 사이드 프레임은 회전 조인트로 연결되어 있다. 차량에 대한 운동방정식은 비선형 구속 다물체계 동역학 운동방정식을 이용한다. 다물체 동역학 운동방정식의 장점은 차량을 구성하는 물체(부품), 조인트, 힘 요소 등을 상세하게 표현할 수 있는 장점을 갖는다.⁹⁾ 본 논문에서는 결과적인 다물체 동역학 운동방정식만을 소개한다. 다물체 동역학 운동방정식은 식 (6)~식 (9)과 같다. 즉, 차량을 구성하는 물체, 조인트, 힘 요소들은 식 (6)~식 (9)으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$\Phi(q,t) = [\Phi_1(q,t), \dots, \Phi_m(q,t)]^T = 0 \quad (7)$$

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \equiv \nu \quad (8)$$

$$\Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{qt} \dot{q} - \Phi_{tt} \equiv \gamma \quad (9)$$

여기서,

$q(t)$: position

$\dot{q}(t)$: velocity

$\ddot{q}(t)$: acceleration

$M(t)$: mass matrix

$\Phi_q(t) \equiv [\partial\Phi_j / \partial q_i]_{m \times n}$: constraint Jacobian

$Q(t)$: external force

$\lambda(t)$: Lagrange multiplier

이러한 운동 방정식은 ODYN/Maglev에서 자동적으로 생성하고 해를 구한다. ODYN/Maglev는 공간 운동방정식을 사용하지만 유연 가이드웨이 모델이 평면 운동이기 때문에 차체와 대차의 자유도 중 평면 병진 자유도와 하나의 회전 자유도 이외에는 구속시켰다. 향후 공간적 유연 가이드웨이 모델이 이용된다면 차량은 당연히 공간적으로 표현가능하다. 가이드웨이 모델이 평면 운동을 갖기 때문에 대차는 그림 Fig. 6과 같이 평면 모델화되었다. 결과적으로 1량1편성인 경우 그림 Fig. 7과 같은 모델이 이용되며 1량1편성이 이용된 이유는 실험과 비교하기 위해서이다.

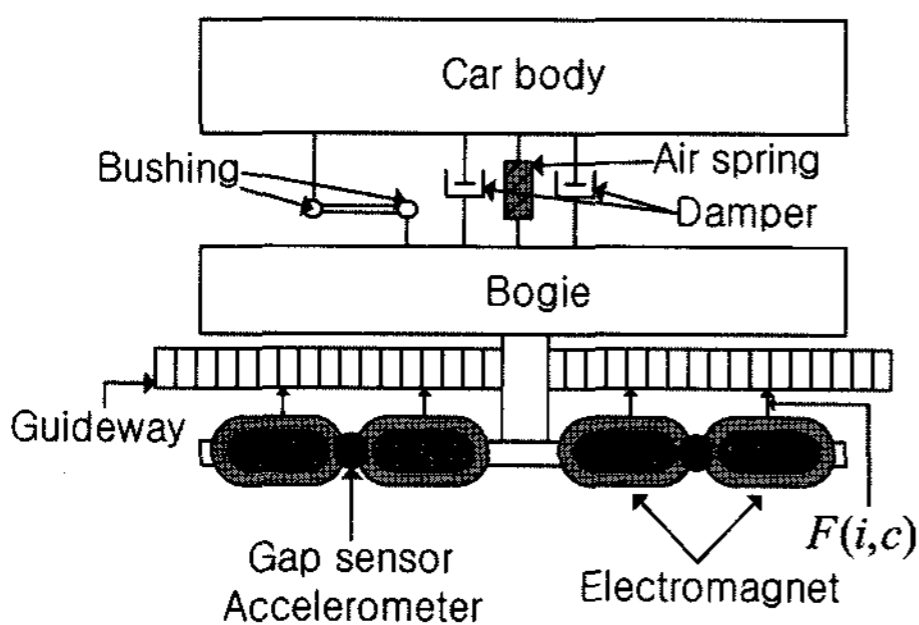


Fig. 6 Bogie model

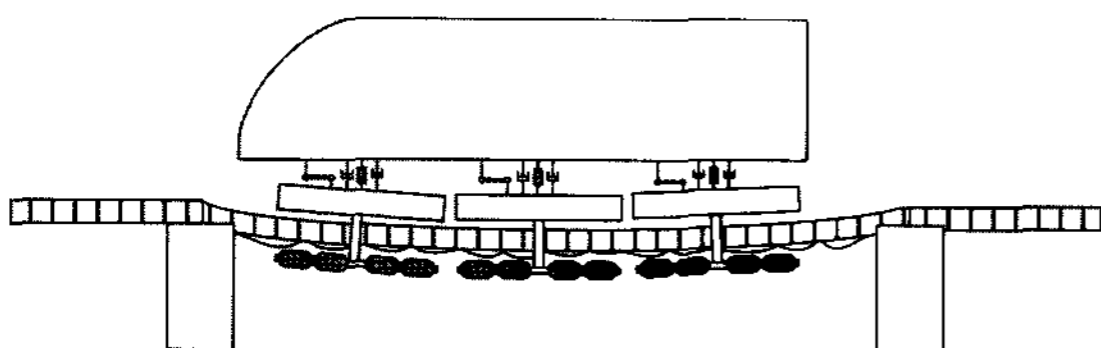


Fig. 7 Maglev vehicle/guideway model

2.2.3 가이드웨이

가이드웨이는 교각으로 지지되며 거더는 콘크리트나 강으로 제작된다. 본 논문에서는 이러한 가이드웨이를 모델하기 위하여 Fig. 8에서와 같은 전통적인 Euler-Bernoulli 빔 모델을 적용한다.¹⁰⁾ 결과적인 Euler-Bernoulli 빔 모델의 한 요소에 대한 운동방정식은 식 (10)과 같다.

$$[M]_e \ddot{v}_e + [C]_e \dot{v}_e + [K]_e v_e = P_e \quad (10)$$

여기서,

$$\{v\}_e = [u_1, v_1, v_2, u_2, v_3, v_4]_e^T :$$

nodal coordinate

$$\{P\}_e = [P_{u_1}, P_{v_1}, P_{v_2}, P_{u_2}, P_{v_3}, P_{v_4}]_e^T :$$

nodal force

$[M]_e$: element mass matrix

$[K]_e$: element stiffness matrix

$$[C]_e = a[M]_e + b[K]_e :$$

element damping matrix

차량은 Fig. 9와 같은 단위 가이드웨이가 다수로 구성된 가이드웨이를 주행한다. Fig. 9에서 요소의 수는 계산의 효율과 해의 정확도에 영향을 미치는데 본 논문에서 대상으로 하는 도시형 상전도흡인식 자기부상열차에서는 제어 주파수 대역폭이 50 Hz 이하로 알려져 있기 때문에 25 m 길이의 가이드웨이를 8개의 요소로만 모델하여도 차량과 가이드웨이의 동적 상호작용을 표현할 수 있다. 표면 조도 즉 Fig. 2는 Fig. 9에 추가되어 차량과 상호작용이 이루어진다.

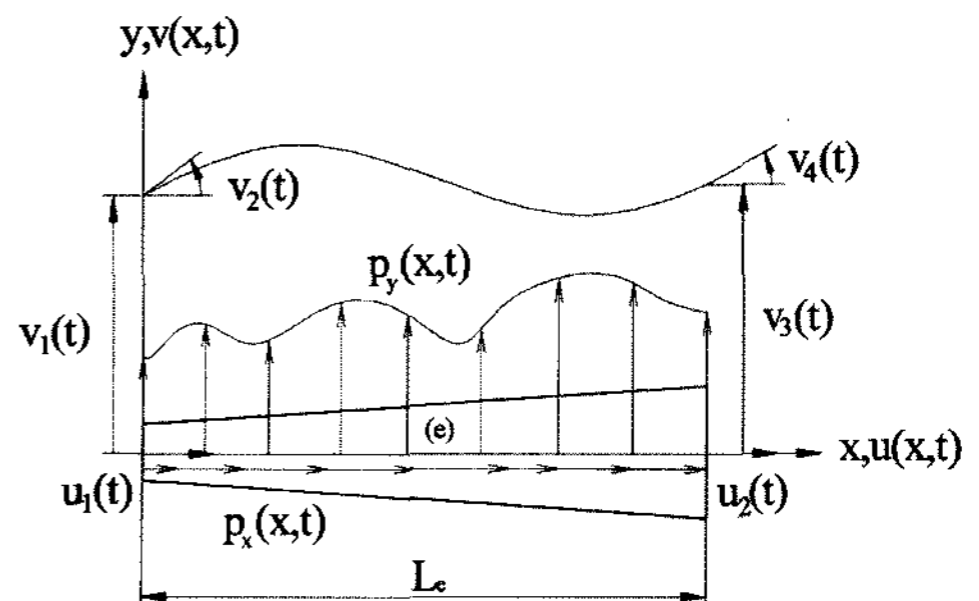


Fig. 8 Euler-Bernoulli beam

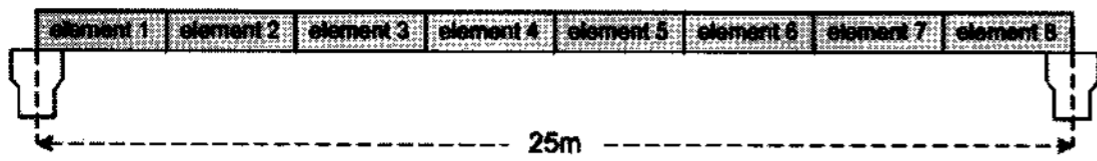


Fig. 9 Guideway FE model

2.3 프로그램

전 절에서 설명한 자기부상 제어기, 차량 및 유연 가이드웨이 운동방정식은 모두 연성되어 있기 때문에 연성 운동 방정식을 구성하고 수치 해석적으로 연성 운동방정식의 해를 구하게 된다. ODYN/Maglev 식 (2), 식 (4), 식 (5), 식 (6), 식 (7), 식 (8) 및 식 (10)을 연성시켜 해를 구해야 한다. 이러한 연성 운동방정식은 미분대수방정식(Differential-algebraic equations) 형태를 갖으며, 안정성이 뛰어난 일반좌표 분리법(Generalized coordinate partitioning algorithm)을 적용한다.⁹⁾ 일반좌표분리법을 응용한 연성 운동방정식의 수치해석 알고리즘의 흐름을 Fig. 10에서 보여주고 있다. Fig. 10에서의 주요한 사항에 대해서만 설명하면 다음과 같다.

- (1) 초기치 $t_0, q(t_0), \dot{q}(t_0)$ 을 이용하여 차량의 조립여부를 식 (7)을 이용하여 평가한다.
- (2) $\Phi_q(t_0)$ 의 rank를 구하여 잉여구속 존재 여부를 평가한다.
- (3) $\Phi_q(t_0)$ 을 분해하여 $q = [u, v]^T$ 을 독립좌표 v 와

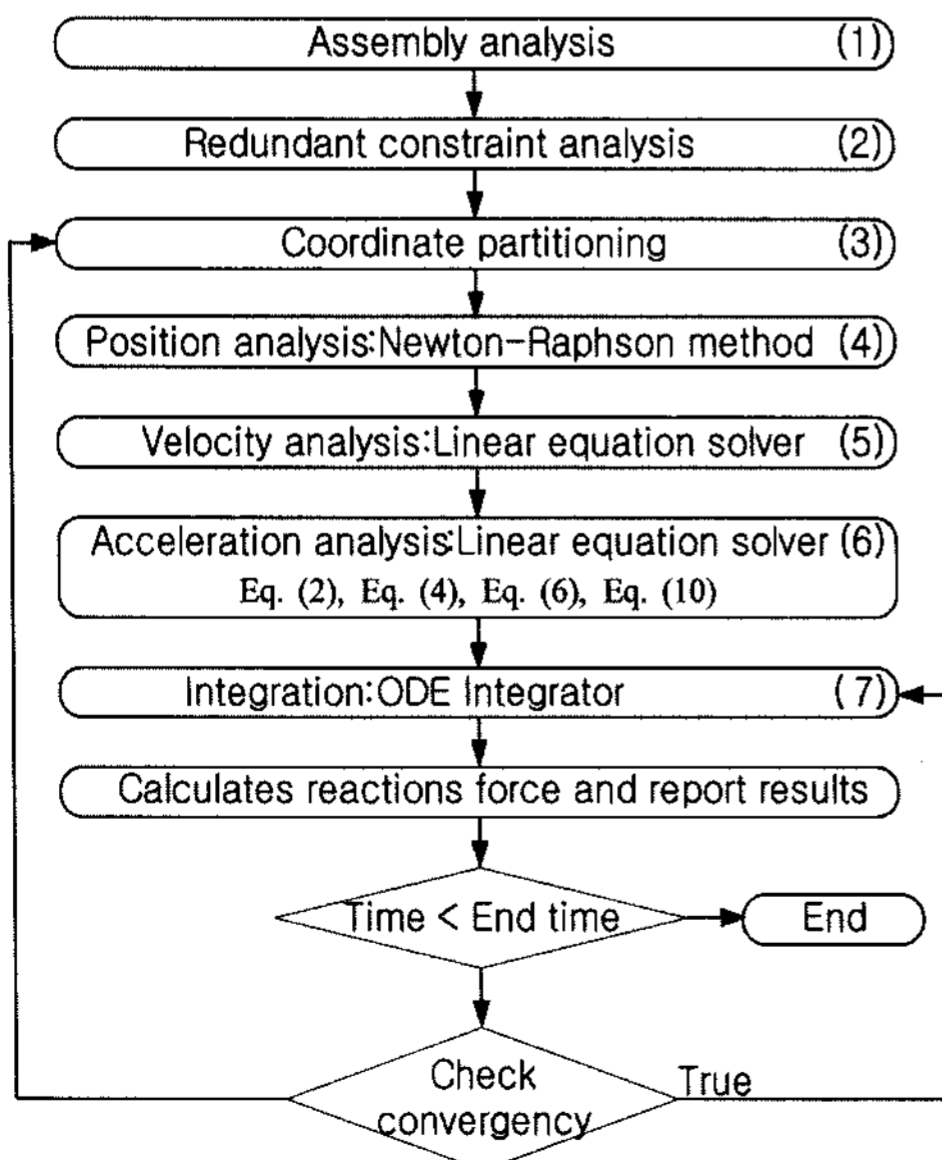


Fig. 10 Numerical analysis flow of the ODYN/Maglev

종속좌표 u 로 분리한다. 이 분리된 좌표 집합은 수치적 불안정이 일어날 때까지 유지되며, 수치적 불안정이 일어나면 재 분해를 실시하여 새로운 독립 좌표와 종속좌표 집합을 구한다.

(4) Newton-Raphson을 식 (7)에 적용하여 종속좌표 $u(t_{i+1})$ 에 대한 해를 $\Phi(u, v, t) = 0$ 으로부터 구한다. (v : fixed)

(5) 식 (8)을 이용하여 종속좌표 속도 $\dot{u}(t_{i+1})$ 에 대한 해를 $\Phi_q \dot{q}(u, v) = -\dot{\Phi}_t$ 으로부터 구한다. (\dot{v} : fixed)

(6) 임의의 시간 t_i 에서 식 (2), 식 (4), 식 (5), 식 (6) 및 식 (10)을 연립하여 해를 구한다.

(7) ODE 수치적분법을 이용하여 수치 적분을 수행한다.

3. 해석

3.1 검증

2장에서 설명한 동특성 해석 모델을 이용하여 주행안정성 평가 척도 중 하나인 부상 공극을 시뮬레이션 하였다. Table 1 ~ Table 3은 이용된 물성치 및 상수들이 나타나 있다. 차량은 속도를 30 km/h로 일정하게 유지하면서 Fig. 2의 불규칙 형상을 갖는 가이드웨이를 주행한다. Fig. 11은 시뮬레이션에 의한 3개 대차의 전방 부상 공극 감지기 위치에서의 부상 공극 응답을 보여주고 있다. 공칭 부상 공극 10 mm을 중심으로 변동하는 것을 볼 수 있다. 부상 안정성을 평가함에 있어서 시간영역에서의 응답뿐만이 아니라 Fig. 12와 같이 부상 공극 편차의 스펙트럼 분석이 이용된다. 부상 공극 스펙트럼 분석을 통하여 부상 시스템의 성능을 보다 명확하게 평가할 수 있다. 이러한 예측 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 UTM-01의 실차 시험을 수행하였다. 실차 주행 시험은 시험선의 직선 구간에서 수행하였다. Fig. 13은 실험에 의하여 얻어진 부상 공극 편차 스펙트럼을 보여주고 있다. Fig. 12와 Fig. 13을 비교하면 0.2 Hz 이하의 영역을 제외하면 어느 정도 경향이 유사함을 알 수 있다. 실측에서는 본 논문에서 고려하는 외란 이외에도 다양한 외란이 작용하여 부상 공극 편차를 일으키기 때문에 엄밀한 비교는 한계가 있어 통계적으로 평가하는 것이 현실적이다. 시뮬레이션

Table 1 Properties of the UTM-01

Item	Specification
Carbody mass (kg)	12,120
Bogie mass (kg)	3,100
Air spring stiffness (N/m)	136,000
Damping coefficient (Ns/m)	10,780

Table 2 Properties of the guideway

Item	Specification
E (N/m ²)	30,000,000,000
I (m ⁴)	0.64673
A (m ²)	1.244
Mass density (kg/m ³)	2,805
Span length (m)	25

Table 3 Properties of the levitation control system

Item	Specification
μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$
N (Turn)	660
A (m ²)	0.04
R (Ω)	1.6
c_0 (m)	0.01
i_0 (A)	20
k_1	33
k_2	495
k_3	0
k_4	26400
k_5	49500
T ₁	0.22
T ₂	0.011
T ₃	0.3439
T ₄	0.000242
T ₅	0.022
V ₁	1.43
V ₂	1.1
V ₃	0.22

결과와 실험 결과의 통계적 비교를 위하여 Fig. 12, Fig. 13을 이용하여 부상 공극 편차 RMS 값을 비교하였다. 그 결과, 시뮬레이션에 의한 값은 0.42 mm 이고 실측에서는 0.48 mm으로 비교적 유사함을 확인할 수 있다. 이로써, UTM-01에 대한 ODYN/Maglev를 이용한 부상 공극 시뮬레이션의 신뢰성이 통계적인 측면에서는 현실적으로 입증되었다고 사

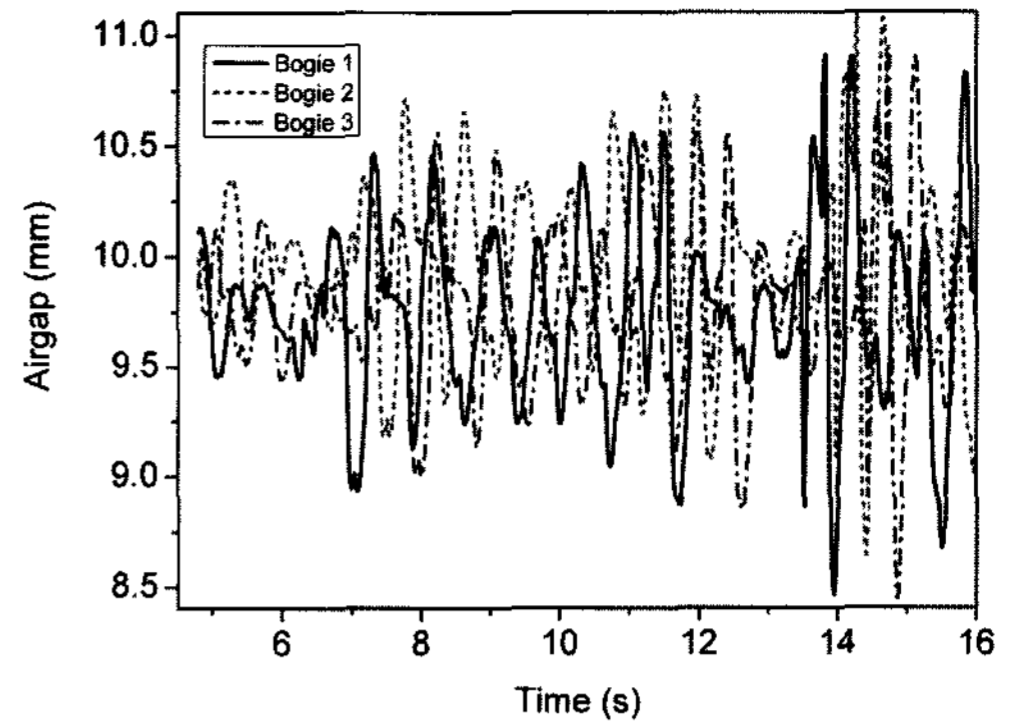


Fig. 11 Predicted air gaps of each bogie at 30 km/h

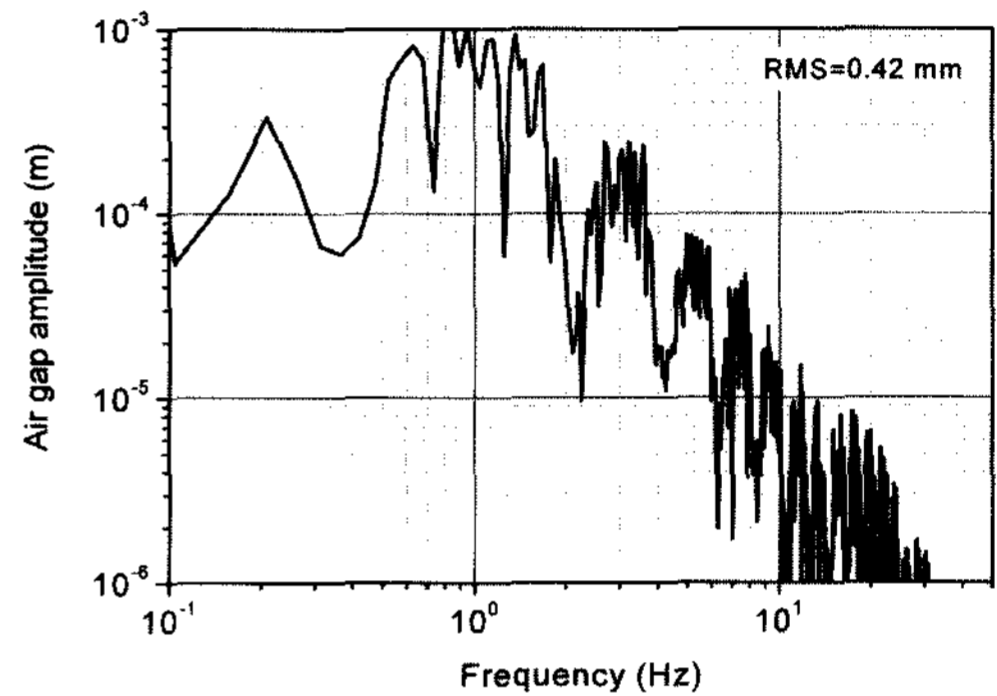


Fig. 12 Predicted air gap deviation spectrum at 30 km/h

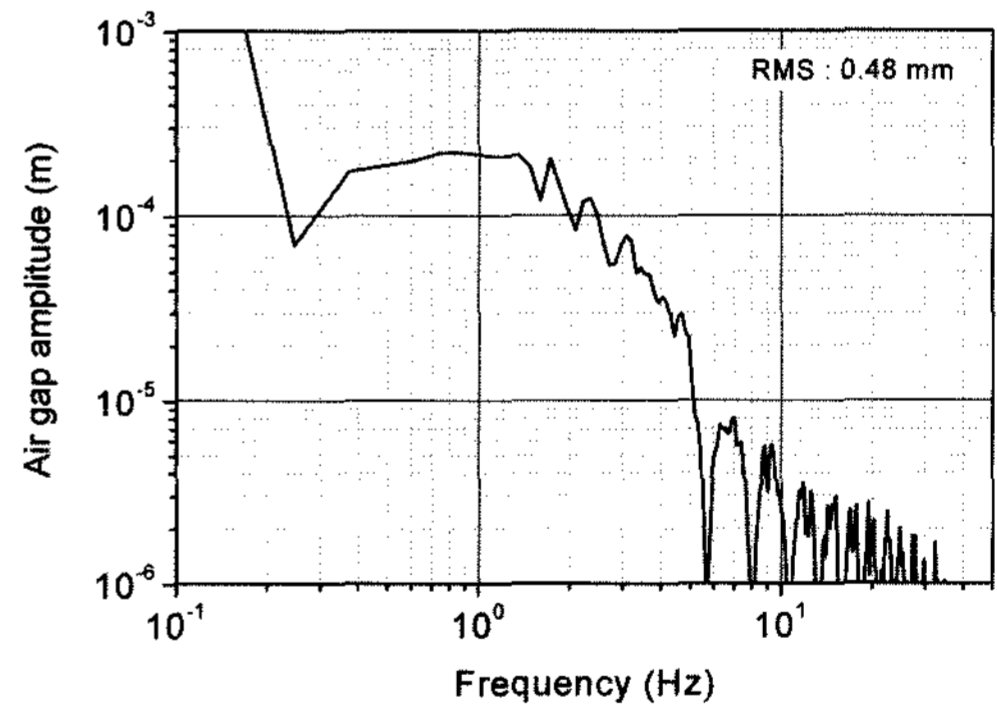


Fig. 13 Measured air gap deviation spectrum at 30 km/h

료되어 이를 이용하여 속도 증가의 영향을 다음절에서 해석하였다.

3.2 속도 영향

3.1에서의 결과를 기초로 본 논문에서 초점을 두는 속도 증가에 따른 부상 공극을 시뮬레이션 하여 주행 안정성을 해석하였다. 현재, 시험선 길이의 한계로 실차는 60 km/h 이상을 주행할 수 없기 때문에

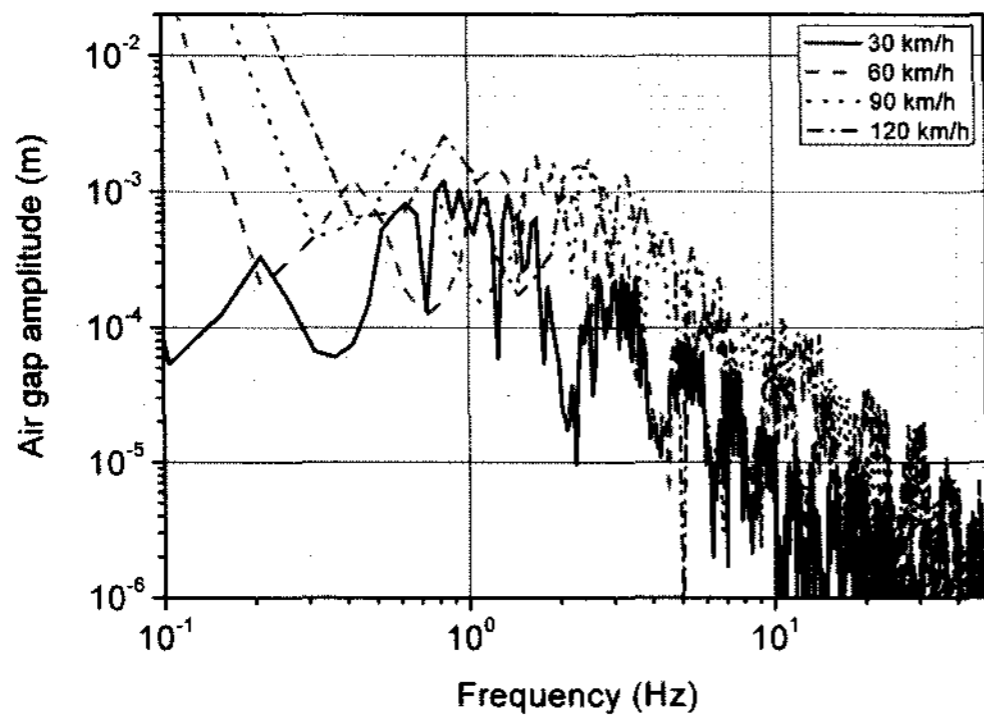


Fig. 14 Predicted air gap deviation spectrum with different speeds

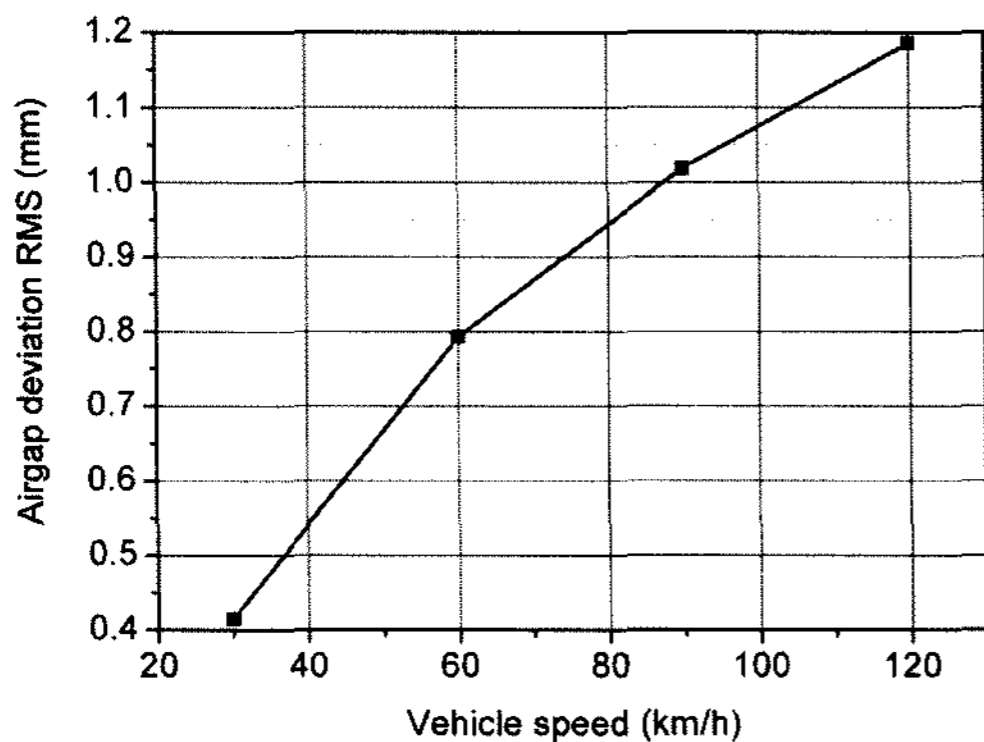


Fig. 15 Air gap deviation RMS with different speeds

시뮬레이션에 의하여 60 km/h 이상의 속도에서의 부상 공극 편차 예측은 상당한 의미가 있다고 할 수 있다. 차량의 속도를 30 km/h로부터 120 km/h 까지 증가시키면서 부상 공극 편차를 시뮬레이션 하였다. Fig. 14는 차량 속도에 따른 부상 공극 편차 스펙트럼을 보여주고 있다. 차량 속도가 증가할수록 부상 공극 편차 진폭이 증가하면서 진동수 영역이 우측 즉 주파수가 증가 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은, 차량 속도 증가에 따라서 가이드웨이의 처짐 및 가이드웨이 표면 조도의 입력 주파수가 증가하기 때문에 예상되는 결과라고 할 수 있다. 보다 더 차량 속도 증가에 따른 응답을 분석하기 위하여 Fig. 14의 결과를 이용하여 부상 공극 편차 RMS 값을 Fig. 15와 같이 표시하였다. Fig. 15에서 확인할 수 있듯이 차량의 속도 증가에 따라서 부상 공극 편차 RMS도 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 차량 속도 증가에 따라서 부상 공극 편차 허용 값을 초과할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들

어, 부상 공극 편차 한계가 ± 3 mm 라면 부상 공극 편차 RMS 값이 최대 1 mm를 초과해서는 안된다고 할 수 있다. Fig. 15에서와 같이 90 km/h 이상에서는 RMS 값이 1 mm를 초과함으로 UTM-01은 90 km/h 이상으로 주행하면 부상 공극 편차 한계가 ± 3 mm를 초과할 수 있다고 예측 할 수 있다. 이러한 결과를 통하여 본 논문에서 사용하는 5개의 관측 상태변수 궤환 부상 제어기는 부상 공극 편차 한계 ± 3 mm를 만족하면서 즉 주행 안정성을 만족하면서 차량의 속도를 100 km/h 이상으로 증가시키기 위해서는 여러 요인에 대한 개선이 필요함을 알 수 있다. 즉, 가이드웨이 구조적 특성, 표면 조도 및 차량의 부상 시스템에 대한 개선이 필요하다고 할 수 있다. 바람직한 부상 공극 편차 응답은 차량의 속도 증가에 따라서 Fig. 15보다는 완만한 상승이라고 할 수 있다.

4. 결론

이상과 같이 전자석 현가 시스템을 이용하는 도시형 자기부상열차 UTM-01의 주행안정성의 척도 중 하나인 부상 공극 시뮬레이션을 수행하였다. ODYN/Maglev을 이용하여 UTM-01의 부상공극을 예측한 결과 실험과도 어느 정도 유사함을 알 수 있었다. 차량의 속도를 120 km/h 까지 증가시키면서 부상 공극 편차를 예측한 결과, 속도 증가에 따라서 부상 공극 편차도 증가하여 허용치를 초과할 수 있음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 5개의 관측 상태변수 궤환 제어기를 사용하는 차량의 주행 속도를 120 km/h까지 향상시키기 위해서 가이드웨이 표면 조도, 가이드웨이 처짐과 같은 외란 입력의 영향도를 분석하여 궤도 건설비를 경감시키면서도 부상안정성을 확보하는 설계 방향을 설정할 수 있다. 설계 개선 방향의 예로, 표면조도의 효과는 약 60 km/h 이상에서 가이드웨이 처짐에 비하여 상대적으로 작기 때문에 현재의 표면 조도를 유지하면서 가이드웨이의 강성을 현재 값 이상으로 유지하는 것이다. 둘째는, 차량 부상시스템의 가이드웨이 추종성을 향상시키는 것이다. 이를 위해서 차량의 경량화와 전자석의 응답성을 향상시켜 가이드웨이 추종오차를 감소시키는 설계가 필요하다고 할 수 있다.

향후 본 연구의 실용성을 증가시키기 위해서는

가이드웨이의 3차원적 모델 사용과 곡선주행을 포함한 부상안정성을 평가하는 것이라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부 도시형 자기부상열차 실용화 사업과 한국기계연구원 기본사업에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) P. K. Sinha, Electromagnetic Suspension Dynamics & Control, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1987.
- 2) M. Morita, "The Characteristics of the Levitation System of Linimo," Maglev2004, pp.525-532, 2004.
- 3) C. F. Zhao and W. M. Zhai, "Maglev Vehicle/Guideway Vertical Random Response and Ride Quality," Vehicle System Dynamics, Vol.38, No.3, pp.185-210, 2002.
- 4) Y. Cai and S. S. Chen, "Dynamic Characteristics of Magnetically-levitated Vehicle Systems," Applied Mechanics Reviews, Vol.50, No.11, Part 1, pp.647-670, 1997.
- 5) A. Furukawa and S. Hashimoto, "Relationship between Maglev Guideway Irregularity and Riding Quality," Quarterly Report of RTRI, Vol.30, No.3, pp.170-177, 1994.
- 6) H. S. Han, H. K. Sung, Y. J. Kim and B. H. Kim, "Coupling Model of the Maglev Vehicle/Guideway," Journal of KSR, Vol.10, No.2, pp.243-250, 2007.
- 7) G. J. Choi and S. J. Heo, "Classification of the Korean Road Roughness," Transactions of KSAE, Vol.14, No.5, pp.115-120, 2006.
- 8) H. K. Sung, B. S. Jung, J. M. Cho, S. M. Jang, J. M. Lee and H. J. Cho, "Magnetic Levitation Control using DSP TMS320LF2407," Proceedings of the KIEE Summer Conference, pp. 1340-1342, 2004.
- 9) E. J. Haug, Computer-aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, USA, 1986.
- 10) C. J. Park and T. W. Park, "Dynamic Analysis of Constrained Mechanical System Moving on a Flexible Beam Structure(I) : General Approach," Journal of KSPE, Vol.17, No.11, pp.165-175, 2000.