

자기부상열차의 동적 모델링 연구

한형석[#], 조흥재^{*}, 김동성^{*}

A Study of Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle

Hyung Suk Han[#], Heung Jae Cho^{*}, Dong Sung Kim^{*}

ABSTRACT

Interest in advanced vehicles results in correspondingly increased interest in modeling and simulation of the dynamic behavior of Maglev-type vehicle systems. DADS is a program especially suited for the analysis of multibody mechanical systems. This paper demonstrates the application of DADS to the dynamic modeling and simulation of such advanced vehicles. A brief description is made of the modeling requirements of magnetically levitated systems, along with a summary of some of the related capabilities of DADS. As a case study, an analysis of a vehicle based on the UTM01 system is presented. This paper shows that the presented modeling technique is applicable to the dynamic characteristics evaluation and control law design of Maglev-type vehicles.

Key Words : Dynamic Modeling(동적 모델링), Magnetic Levitation(Maglev, 자기부상), Multibody Mechanical System(다물체 기계 시스템)

기호설명

M : mass

Φ_q : Jacobian

\ddot{q} : acceleration vector

Q : applied force

λ : Lagrange multiplier

γ : right side of acceleration

R : reluctance

i_0 : magnet current at steady-state

z_0 : absolute position at steady-state

L_0 : magnetic inductance at (i_0, z_0)

$k_{rp}, k_{ap}, k_{av}, k_{aa}$: feedback gains

μ_0 : electrical coefficient

N : magnetic winding

A : area

1. 서론

자기부상열차는 자기력에 의해 부상되어 운행 되는 환경 친화적인 첨단 교통수단이다. 자기부상 열차는 외국의 경우 주로 독일, 일본에서 연구 개발되어 왔고 실용화를 앞두고 있다. 한국기계연구원은 정부 지원으로 도시형 자기부상열차 UTM01 시험차량을 개발하여 시험 운행 중에 있

2002년 11월 19일 접수
교신저자, 한국기계연구원
Email : hshan@kimm.re.kr, Tel : (042) 868-7814
* 한국기계연구원

다(Fig. 1). 자기부상열차의 제어기 설계, 승차감 향상, 안전성 확보 및 궤도 건설 비용을 감소시키기 위해서는 동적 모델링 및 시뮬레이션이 필수적으로 대두된다. 자기부상열차의 현가 시스템은 2 단계로 구성된다. 1 차 현가는 자기부상 모듈이고 2 차 현가는 공기 스프링과 감쇠기로 구성된다. 그러므로 승차감을 향상시키기 위해서는 자기부상 모듈과 기계적 현가 시스템을 통합한 동적 분석이 요구된다. 안전성 측면에서는 곡선 궤도에서의 탈선을 방지하기 위하여 동적 해석이 또한 필요하다. 차량의 지지 및 안내를 위한 궤도(guideway)는 외국의 경우 알루미늄을 사용한다. 그러므로 알루미늄의 재료비 절감을 위해서는 경량화 설계가 요구된다. 여기서 경량화에 따른 유연성으로 인하여 차량을 불안정하게 만들 수 있기 때문에 차량과 궤도간의 상호작용 연구도 많이 이루어지고 있다.¹ 그러한 동적 해석의 요구 사항에 적합한 모델링 기법으로는 3 차원 전체차량 모델링 기법이 될 것이다. 자기부상 열차의 동적 모델링 및 시뮬레이션은 주로 일본과 독일에서 연구가 활발히 수행되어 왔다.^{2,5} 그러나 대부분 2 차원 단순모델을 이용하고 있다. 국내에서는 자기부상 열차에 대한 연구가 단지 약 10 년 정도 됐기 때문에 동적해석 모델링에 대한 연구는 부족하였다. 2 자유도 단순 모델에 대한 연구는 국내에서도 수행된바 있다.⁶ 현재 한국기계연구원에서 자기부상열차를 개발하여 시험운행 중에 있는데 현 차량의 개선 및 추후 개발될 열차의 동적 설계를 위해서는 3 차원 전체 차량 기반의 동적 모델링 및 시뮬레이션에 대한 기반기술의 확보가 필요하다.

본 논문은 자기부상열차의 동적 모델링에 대한 기초 연구로써 전체차량의 동적 모델링 기법을 제시하는데 목적이 있다. 이를 위하여 자기부상열차의 동적 모델링을 다물체 동역학 이론에 기초를 둔 다물체 동역학 해석 프로그램 DADS⁷를 이용한 모델링 및 시뮬레이션 기법을 소개한다. 연구 결과 자기부상열차의 단순화 모델링이 아닌 전체 차량 모델링의 적용이 가능함이 확인되었다.

2. 다물체 동역학

Fig. 2 는 다물체 시스템을 보여주고 있다. 이 시스템은 nb 개의 강체로 구성되어 있다면 공간에서 시스템의 운동을 표현하기 위해서는 $6 \times nb$ 개



Fig. 1 Photo of UTM01

의 좌표가 필요하다. 이러한 일반좌표는 그러나 인접하는 물체들간의 조인트 때문에 모두 독립은 아니다.

각 물체들의 운동은 일반좌표와 일반좌표의 속도 연관성을 정의하는 기구적 구속에 의한 영향을 받는다. 다물체 시스템의 운동을 제어하고 이해하기 위해서 공간에서의 물체, 조인트, 힘요소의 정의가 필요하게 된다. nb 개의 물체로 구성되는 시스템이 있다면 그 시스템의 일반좌표는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{nb \times 6}]^T \quad (1)$$

만일 시스템에 m 개의 구속조건이 있다면 식(2)와 같이 표시되고 구속 기계 시스템 운동방정식은 식(3)과 같이 정의된다.

$$\Phi(\mathbf{q}, t) = [\Phi_1(\mathbf{q}, t), \dots, \Phi_m(\mathbf{q}, t)]^T = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \Phi_q^T \lambda = \mathbf{Q} \quad (3)$$

식(3)을 유용하게 이용하기 위하여 식(2)의 1,2 차 미분이 필요하다.

$$\Phi_q \dot{\mathbf{q}} + \Phi_t = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\Phi_q \ddot{\mathbf{q}} = -(\Phi_q \dot{\mathbf{q}})_q \dot{\mathbf{q}} - 2\Phi_{qt} \dot{\mathbf{q}} - \Phi_{tt} \equiv \gamma \quad (5)$$

식(3)과 (5)를 이용하여 행렬형태의 시스템 운동방정식을 식(6)과 같이 정의하게 된다.

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

이러한 다물체 동역학 시스템 운동방정식의 해법은 Haug⁸의 문헌을 참조바란다.

다물체 동역학 해석 기법을 적용하면 여러 면에서 장점을 가진다. 다물체 동역학적 해석 모델링은 좀더 물리적인 시스템에 가깝고 가상공학의 응용에도 적합하기 때문이다. 물리적 시스템에 가깝다는 것은 다양한 경계조건외의 고려가 가능하고 검토할 수 있는 인자도 상대적으로 많게 된다. 다물체 동역학 해석 모델은 진동해석, 소음해석, 구조해석, 내구도 해석 등의 종합적인 가상 시제를 이용한 설계의 검토가 실물 없이 가능하도록 할 수 있는 장점을 가진다.

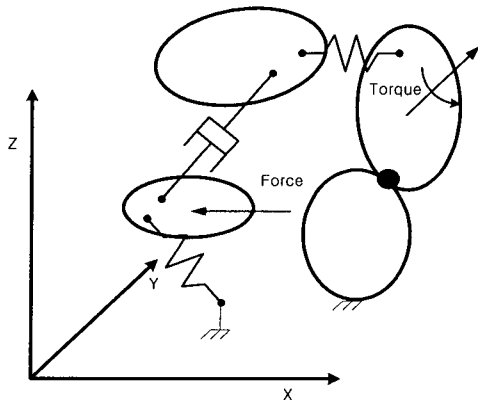


Fig. 2 Multibody system

3. 자기부상 모듈

자기부상열차에 있어서 다른 차량과의 차이점은 차량의 지지, 안내, 추진, 제동이 자기력에 의하여 이루어진다는 것이다. Fig. 3은 자기부상 열차의 부상 원리를 보여주고 있다. Fig. 3에서 자기 흡입력 F 에 의하여 대차를 부상시키게 된다. 자기 흡입력 F 는 다음 식(7)과 같이 정의할 수 있다.⁹

$$\dot{F} = -\frac{R}{L_0} F + \frac{k_{rp}k_i - Rk_z}{L_0} c + \frac{k_{rv}k_i}{L_0} \dot{c} + \frac{k_{ap}k_i}{L_0} z + \frac{k_{av}k_i}{L_0} \dot{z} + \frac{k_{aa}k_i}{L_0} \ddot{z} \quad (7)$$

여기서,

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2z_0^2}, \quad k_z = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2z_0^3}$$

식(7)에서와 같이 자기 흡입력 F 는 미분방정식 형태로 표시된다. 식 (7)에서 c, z 는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 전자석과 궤도 간의 거리와 영구자석의 절대적 위치를 각각 나타낸다. 그러므로 c, \dot{c} 는 매 해석 순간에 감지되는 값이고 z, \dot{z}, \ddot{z} 는 궤도의 형상으로 미리 정의할 수 있다. 그리고 식 (7)에는 제어 개인이 포함되는데 이 개인은 제어기 설계에서 얻어지기 때문에 본 논문에서는 이미 정해진 값들을 이용한다.

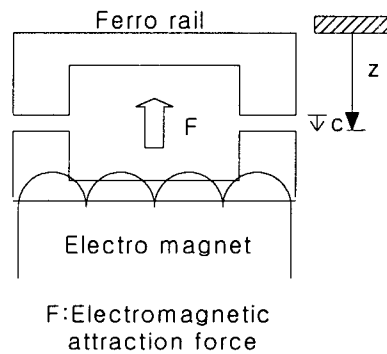


Fig. 3 Mechanism of magnetic levitation

4. 동적 모델링

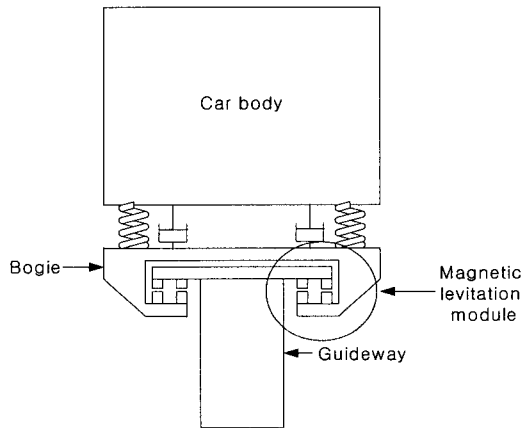
4.1 차량 구조

Fig. 4는 본 논문에서 동적 모델링을 수행하고자 하는 자기부상열차(UTM01)의 구조를 보여주고 있다. 본 논문에서는 1 량에 대한 동적 모델링이 이루어진다. 차량은 3 개의 대차로 구성된다. 대차와 차체 사이에는 각 대차당 공기 스프링 2 개, 감쇠기 2 개, 전후 견인바로 구성된다. 대차의 1 차 현가장치는 자기부상 모듈로 구성된다.

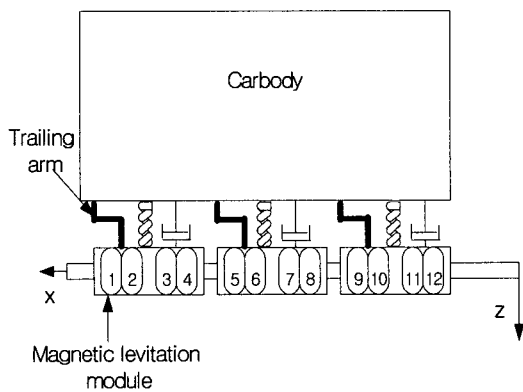
4.2 다물체 동역학 모델링

Fig. 1의 차량을 다물체 동역학적으로 모델링한다. 모델링 과정은 1)물체 정의 2)조인트 정의 3)힘요소 정의 4)구동 조건 및 초기 조건 정의 순으로 이루어진다. 해석 모델은 Body(56 개), General

(24 개), Input function(96 개), Output function(16 개), Beam(18 개), Cylindrical joint(18 개), Planner joint(6 개), Spherical joint(48 개), Initial condition(56), Curve(1 개)로 구성된다. Body 요소는 구성 부품을 정의하기 위하여 이용되며 질량과 관성이 필요하다. General 요소는 상미분방정식을 정의하는 요소로 USR07 과 함께 \dot{F} 를 정의하기 위하여 이용된다. 이에 대하여는 4.3 절에서 상세히 서술한다. Input function 요소는 센서요소로 $c, \dot{c}, z, \dot{z}, \ddot{z}$ 를 감지하거나 정의한다. Output function 은 계산된 F 를 궤도와 자기부상 모듈에 작용시키기 위하여 이용된다. 각 요소에 대한 상세한 것은 DADS User's Manual⁷ 을 참조 바란다.



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 4 Schematic diagram of UTM01

4.3 자기부상 모듈 모델링

3 장에서 언급한 자기부상 모듈은 DADS 와 같은 상용 다물체 동역학 해석 프로그램에서 정의할 수 없다. 이를 DADS 에서 모델하기 위하여 사용자 정의 서브루틴 USR07 이 이용된다. USR07 은 식(8)과 같은 상미분 방정식을 사용자가 정의하여 DADS 가 자동적으로 생성하는 시스템 운동방정식(6)과 연성 시키는 기능을 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t, \mathbf{u}) \\ \mathbf{g} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t, \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (8)$$

즉 사용자가 임의의 상미분 방정식을 USR07 를 이용하여 정의하고 연성시키면 시스템 운동방정식을 식(9)와 같이 수정하게 된다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_q^T & 0 \\ \Phi_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \\ \dot{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t, \mathbf{u}) \\ \gamma \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t, \mathbf{u}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

자기부상력을 식(9)와 같이 시스템 운동방정식과 연성시키기 위해서 3 개의 DADS 함수가 이용된다.

- (1) Input function : $c, \dot{c}, z, \dot{z}, \ddot{z}$ 을 감지한다.
- (2) USR07 : $\dot{F} = f(c, \dot{c}, z, \dot{z}, \ddot{z})$ 를 정의하다.
- (3) Output function : 자기부상력 F 를 자기부상력이 작용하는 물체(Body)에 작용시킨다. 이러한 작용은 식 (9)에서 우변 \mathbf{g} 함수에 해당된다.

이러한 관계를 도식적으로 표현하면 Fig. 5 와 같다.

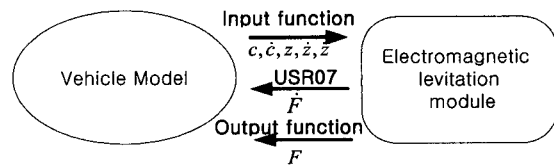


Fig. 5 Modeling concept of Maglev vehicle using DADS

4.4 전체차량 해석 모델

전절에서 설명한 모델링 기법을 이용하여 만들어진 자기부상열차 UTM01 의 DADS 모델은 Fig 6 과 같다. 이와 같은 전체차량 해석 모델은 일단 만들어지면 활용도는 넓어진다. 2 차 현가 장치 설

계, 제어기 개인 설계, 궤도/차량 상호작용 등이 시뮬레이션으로 가능하게 되는 것이다. 향후 궤도의 유연성을 고려한 해석 모델 개발은 연구할 가치가 있다고 할 수 있다.

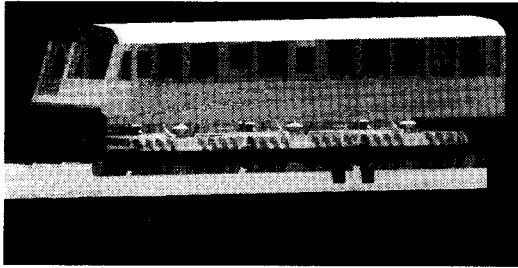


Fig. 6 DADS full vehicle dynamic model of UTM01

5. 해석 결과

5.1 궤도의 계단 형상 해석

4 장에서 개발한 동적 모델의 안정성을 평가하기 위하여 궤도에 불규칙을 입력하여 해석을 수행하였다. 우선 궤도의 형상이 Fig. 7 과 같이 계단 입력(Step input)이 되도록 하였다. 즉 궤도의 높이가 계단적으로 3mm 증가하도록 하였다. Fig. 7 과 같은 형상은 DADS 의 Curve 요소를 이용하여 정의된다. Fig. 8 은 해석 결과로 자기부상 모듈의 높이 즉 z 를 보여주고 있다. 자기부상 모듈은 순차적으로 계단형상의 궤도에 진입한다. 그러므로 각 자기부상 모듈은 시간차를 가지면서 정해진 궤도를 추종하는 것을 볼 수 있다. 또한 정상상태에서는 수렴하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 해석 모델링이 안정성이 있는 것을 알 수 있다. 여기서, 해석 모델과 실험과의 비교검토는 현실적인 어려움으로 수행되지 못하였으나 향후 추진할 계획이다. Fig. 9 는 그 때의 차체 수직 가속도를 보여주고 있다. 가속도 결과를 이용하면 승차감을 고려한 현가 장치의 특성치를 설계할 수 있다.

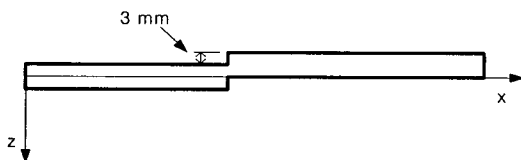


Fig. 7 Guideway profile(step)

5.2 설계인자 변경 해석

두 번째로 2 차 현가장치인 공기스프링의 강성 변경과 자기부상 모듈의 주요 전기적 상수의 변경에 따른 동적 응답을 고찰하였다. Fig. 10 은 공기스프링의 선형 강성을 $\pm 20\%$ 변경하여 그 때의 승차감에 1 차적으로 관련된 저 주파수 영역에서의 가속도 응답을 보여주고 있다. 강성이 감소하면 그에 따라 가속도 크기가 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 강성의 증가는 강성의 감소와 반대의 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과를 이용하여 승차감 설계를 수행할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 11 은 전기적 상수 R 의 영향을 보여주고 있다. R 이 증가하면 감쇠 효과가 상대적으로 커져 변위의 안정화 속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. Fig. 12 는 전기적 상수 L 의 변경에 따른 변위 응답으로 L 이 감소하면 안정화 속도가 느려지는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 본 논문에서 제시하는 모델링 기법을 적용하여 자기 부상열차의 1, 2 차 현가 장치의 설계에 향후 적용 될 수 있음을 알 수 있다. 즉 실물에 의한 실험을 일부 해석적으로 대체하여 개발 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

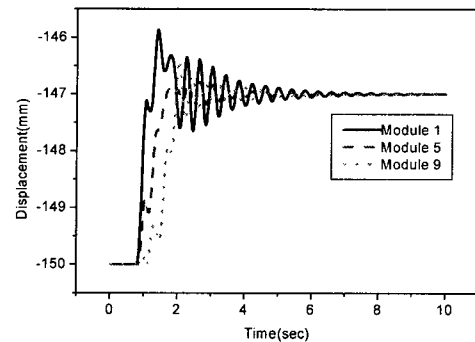


Fig. 8 Displacement responses

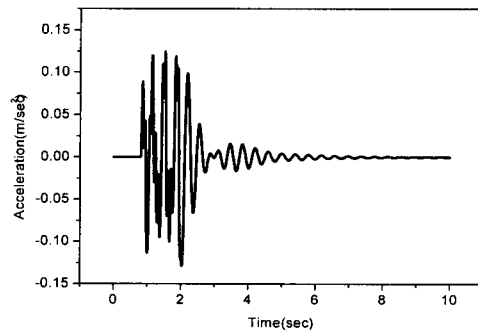


Fig. 9 Acceleration response

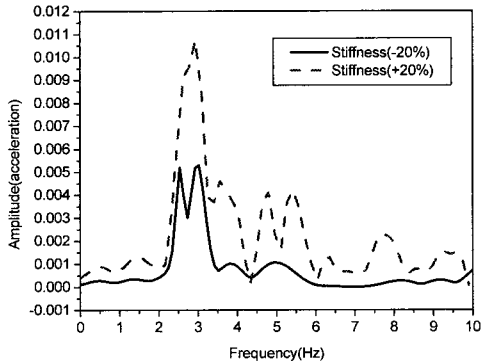


Fig. 10 Acceleration responses at changes in stiffness of air springs

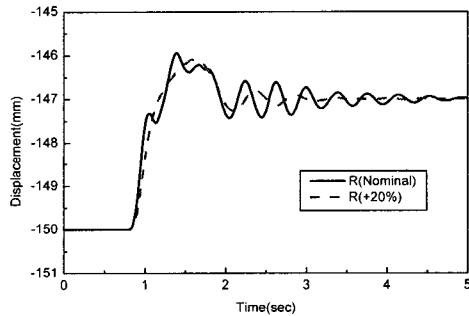


Fig. 11 Displacement responses at changes in R

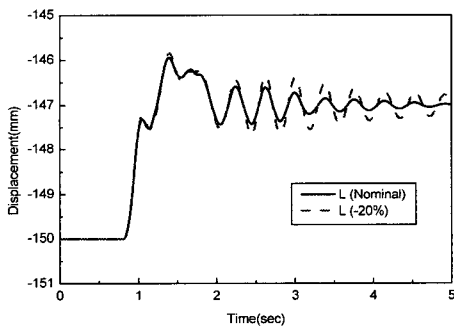


Fig. 12 Displacement responses at changes in L

6. 결론

이상과 같이 자기부상열차에 대한 동적 해석 모델링 기법에 대한 연구를 수행한 결과 및 차후 연구방향은 다음과 같다.

1. 본 논문에서 제안한 다물체 동역학을 이용한 3 차원 전체차량 모델링 기법이 자기부상열차의 동적 해석에 적용 가능함을 알 수 있다.
2. 해석 모델을 이용하면 제어기 설계, 현가장치 설계에 응용할 가능성이 있음을 기대할 수 있다.
3. 공기스프링의 강성을 변경시켜 해석한 결과 강성의 가감에 따른 가속도 응답의 변화가 나타나 승차감 설계에 이용할 수 있음을 알 수 있다.
4. 전기적 저항 R 를 크게 하면 안정화 속도가 빠른 것을 알 수 있다.
5. 전기적 상수 L 을 감소시키면 안정화 속도가 느려지는 것을 알 수 있다.
6. 차후 자기부상력 뿐만이 아니라 안내력을 포함하여 곡선 주행에서의 안전성 해석이 필요하다.
7. 궤도를 유연체로 모델하여 차량/궤도의 동적 상호작용 해석 모델링 기법에 대한 연구가 요구된다.

참고문헌

1. Cai, Y., Chen, S. S., Rote, D. M. and Coffey, K. T., "Vehicle/Guideway Interaction for High Speed Vehicle on a Flexible Guideway," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 175, No. 5, pp. 625-646, 1994.
2. Kortum, W., Schwartz, W. and FayeFont, I., "Dynamic Modeling of High Speed Ground Transportation Vehicles for Control Design and Performance Evaluation," *Dynamics of Controlled Mechanical Systems IUTAm/IFAc Symposium Zurich*, pp. 335-349, 1988.
3. Tzeng, Y. K. and Wang, T. C., "Dynamic Analysis of the Maglev System Using Controlled-PM Electromagnets and Robust Zero-Power-Control Strategy," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 4211-4213, 1995.
4. Seki, A. and Osada, Y., "Dynamics of the Bogie of a Maglev System with Guideway Irregularities," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 5043-5045, 1996.
5. Tsunashims, H., Tzeng, T. F. and Wang, T. C., "Dynamics of a Mechanically Controlled Permanent

- Magnet Suspension for Maglev Transport Vehicle,”
Transportation Systems, ASME, DSC-Vol. 54/DE-
Vol. 76, 1994.
6. Kim, J. S., Park, J. S., “Dynamic Performance
Analysis for Secondary Suspension of Maglev
Control Systems with a Combined Lift and
Guidance,” J. of Korea Society of Precision
Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 53-65, 1992.
 7. DADS User’s Manual, LMS CADSI, 2002.
 8. Haug, E. J., “Computer Aided Kinematics and
Dynamics of Mechanical Systems,” Allyn and Bacon,
USA, 1989.
 9. Sinha, P. K., “Electromagnetic Suspension Dynamics
and Control,” Petre Peregrinus Ltd., Condon, United
Kingdom, 1987.