

## 유연다물체 동역학을 이용한 자기부상열차 동역학 모델링 연구

# Modeling of the Maglev Vehicle Running over the Elevated Guideway Using Flexible Multibody Dynamics

한형석<sup>†</sup> · 이종민\* · 김영중\* · 김국진\*\* · 김동성\* · 김숙희\*

Hyung-Suk Han · Jong-Min Lee · Young-Joong Kim · Kuk-Jin Kim · Dong-Sung Kim · Sook-Hee Kim

### Abstract

In general, the Maglev vehicle is ran over the elevated guideway consisted of steel or concrete structure. Since the running behaviour of the vehicle is affected by the flexibility of the guideway, the consideration of the flexibility of guideway is needed for evaluation of dynamics of both the vehicle and guideway. A new technique based on flexible multibody dynamics is proposed to model the Maglev vehicle, levitation controller, and guideway into a coupled model. To verify the technique, an urban Maglev vehicle is analyzed using the technique and discussions are carried out.

**Keywords** : Maglev vehicle(자기부상열차), Flexible body(유연체), Multibody dynamics(다물체동역학), Coupling model (연성모델)

## 1. 서론

환경친화적인 미래형 궤도교통 수단으로 자기부상열차가 중국과 일본에서 실용화되었다[1-2]. 국내에서는 도시형자기부상열차에 대한 연구를 80년대 초부터 시작하여 HML-03, UTM-01이 EXPO 과학공원과 한국기계연구원 시험선로에서 각각 운행되었다. 2003년 10월부터는 (주)로템을 총괄주관기관으로 자기부상열차 실용화 모델(Rotem Maglev) 개발이 산업자원부의 중기거점기술개발 과제로 진행되고 있다. 일반적으로 자기부상열차는 Fig. 1에서와 같이 고가 가이드웨이(elevated guideway)에서 주행한다.

가이드웨이는 주로 콘크리트 거더 구조물로 구성되나 때로는 Fig. 1에서와 같이 강재 거더 구조물로 건설된다. 강 구조물이든 콘크리트 구조물이든 가이드웨이는 차량 주행 시 탄성변형을 일으키면서 진동한다. 이 진동은 차량의 자기부상 제어기와 상호작용을 일으킨다. 이 상호작용은 부상안정성, 승차감, 가이드웨이 진동 등에 영향을 미치게 된다. 그러므로 자기부상열차의 동특성 해석을 통하여 미리 부상안정성, 승

차감, 곡선 추종성을 평가할 필요가 있다. 자기부상열차의 동특성 해석은 전기와 같은 이유로 차량과 가이드웨이의 연성 동역학 모델링이 요구된다. 이러한 분야에 대한 최근 연구는 주로 중국에서 수행되고 있다[1-4]. 그러나 지금까지 발표된 연구에서는 주로 가이드웨이의 유연성을 고려하는데 있어서 단순화시킨 모델을 이용한다[1-4].

가이드웨이를 단순화 시킨 모델은 기본적인 동특성을 해석하는데 유용하다. 그러나 국내에 설치된 가이드웨이는 기존의 연구와 같이 단순화 시 실제의 동특성을 엄밀하게 표현하지 못할 수 있다. 가이드웨이의 전체적인 진동뿐만 아니라 국부적인 진동 특성까지 엄밀하게 해석하기 위해서는 보다 상세한 차량/가이드웨이 연성 동역학 모델링이 요구된다.

본 논문에서는 유연 다물체 동역학을 이용한 동적 모델링 방법을 제안한다. 유연 다물체 동역학은 가이드웨이의 단순화 없이 상세하게 모델하기 때문에 다양한 동특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한, 가상시제(Virtual prototyping)의 중심에 다물체 동역학이 위치하기 때문에 자기부상열차의 개발에 있어서, 가상공학 적용의 기본이 되는 장점이 있다. 제안한 방법을 현재 시험운행 중인 UTM-01에 적용한다. 본 논문은 단지 동역학 모델링 기법에 중점을 두기 때문에 엄밀한 부상제어기 안정성 평가나 승차감 평가는 이루어지지 않는다.

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국기계연구원, 시스템엔지니어링연구본부  
E-mail : hshan@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7814 FAX : (042)868-7418

\* 한국기계연구원

\*\* (주)로템

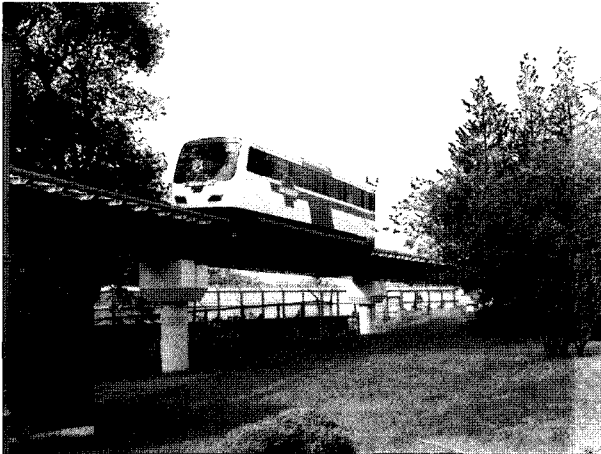


Fig. 1. Maglev vehicle UTM-01 running over the elevated guideway

## 2. 모델링

### 2.1 모델링 과정

본 논문에서 제안하는 자기부상열차/유연가이드웨이의 연성 동역학 모델링 기법의 구성 및 흐름을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 이 기법에서 적용하는 이론은 유연다물체 동역학이다. 유연다물체 동역학은 차량, 부상제어기 및 유연 가이드웨이의 연성 운동방정식을 구성하고 수치해를 구하는 기능을 수행한다. 본 논문에서는 유연 다물체 동역학 해석 프로그램으로 Virtual.Lab Motion 6.A를 사용한다[5]. 유연 다물체 동역학에서 유연 가이드웨이는 모드중첩법에 의하여 표현된다. 유한요소 모델과 진동모드를 얻기 위해서는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용한다. Fig. 2에서의 주요한 내용은 다음과 같다.

- Virtual.Lab Motion은 형상 모델링, 물체 모델링, 조인트 모델링, 현가장치 모델링, 유연체 모델링, 자기부상제어기 모델링, 경계조건 모델링을 수행하고 해를 구한다.
- 자기부상제어기는 Virtual.Lab Motion의 User-defined subroutine와 제어 요소(control element)에 의하여 정의된다. 제어 요소는 대차의 가속도, 공극(air gap)을 감지한다. User-defined subroutine은 감지된 대차의 가속도와 공극을 이용하여 부상제어기에 대한 연립 동역학 방정식을 정의한다. 동시에 자기부상력을 계산하여 차량과 가이드웨이에 작용시키는 기능을 수행한다.
- ANSYS는 가이드웨이에 대한 유한요소 모델을 생성하고 진동모드를 해석한다. 여기서, 진동모드 해석에 필요한 경계조건 및 하중 조건은 Virtual.Lab Motion로부터 생성된다. 진술한 과정에 대한 추가 설명은 다음 절에서 이루어진다.

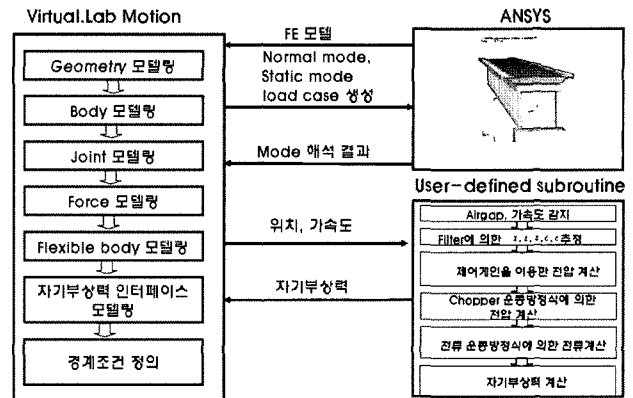


Fig. 2. Dynamic analysis flow

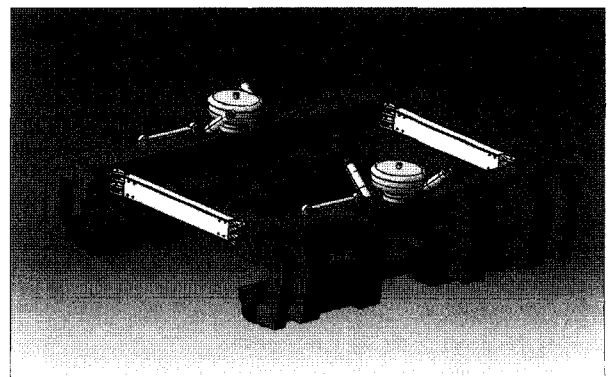


Fig. 3. Virtual.Lab Motion model of the bogie

### 2.2 대차

Fig. 1의 대차 구조는 Fig. 3에서와 같이 좌우 2개의 사이드 프레임, 각 사이드 프레임에 8개의 전자석, 전후 2개의 타이빔, 좌우 2개의 공기 스프링, 좌우 4개의 완충기, 전후 2개의 견인바, 그리고 견인바 속에는 고무가 내재되어 있다. 타이빔과 사이드프레임은 회전조인트로 연결된다. 이러한 대차는 Fig. 3에서와 같이 Virtual.lab Motion에 의하여 상세하게 모델된다. 부상제어기 및 부상력 이외의 대차에 대한 동적 모델링 방법은 기존의 철도차량과 유사하다. 때문에 부상제어기와 부상력은 다음절에서 상세히 설명하고 그 이외의 대차 모델링에 대한 상세한 내용은 생략한다.

### 2.3 자기부상 제어기

#### 2.3.1 제어기

상진도 흡인식 자기부상 현가시스템의 원리를 Fig. 4에서 보여주고 있다. Fig. 4에서 자기부상력  $F(i, c)$ 는 다음 식 (1)과 같이 정의되며 전류  $i(t)$ 와 부상공극  $c(t)$ 의 함수이다[6].

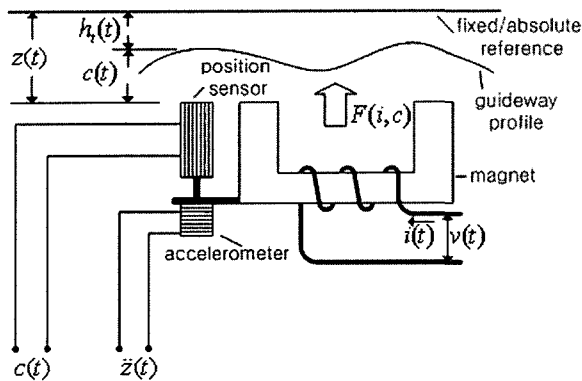


Fig. 4. Electromagnetic suspension system

$$F(i, c) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{c(t)} \right]^2 \quad (1)$$

여기서,

- $A$ : sectional area of magnet
- $\mu_0$ : permeability factor
- $N$ : number of turns of magnet coil

자기부상력은 식 (1)에서와 같이 전류  $i(t)$ 를 제어하여 얻게 된다. 전류  $i(t)$ 의 제어는, 저항  $R$ 을 갖는 시스템의 전압과 전류의 관계식 (2)를 이용하여 결과적으로 전압으로 제어된다.

$$\frac{\mu_0 N^2 A}{2c(t)} \frac{di(t)}{dt} = \frac{\mu_0 N^2 A i(t)}{2z(t)^2} \frac{dc(t)}{dt} - Ri(t) + v(t) \quad (2)$$

여기서, 식 (1)과 식 (2)를 직접 이용할 수 있으나 식 (1)과 식 (2)에 대한 선형 방정식이 자주 이용된다[6]. 평형 점  $(i_0, c_0)$ 에 대한 식 (1), 식 (2)의 선형 방정식은 식 (3), 식 (4)와 같이 정의된다[6].

$$\Delta F = k_z \Delta z - k_i \Delta i \quad (3)$$

$$\Delta \dot{i} = \frac{k_z}{k_i} \Delta \dot{z} - \frac{R}{L_0} \Delta i + \frac{1}{L_0} \Delta v \quad (4)$$

여기서,

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2z_0}$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2z_0^2}$$

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

본 논문에서는 식 (3)과 식 (4)를 적용하여 자기부상력 변

화량과 전류 변화량을 결정한다. 전압  $v(t)$ 를 결정하는 제어 방법은 다양하게 존재할 수 있는데 본 논문에서는 식 (5)를 이용한다.

$$v(t) = k_z \ddot{z}^*(t) + k_z \dot{z}^*(t) + k_3 z^*(t) + k_4 \dot{c}^*(t) + k_5 c^*(t) \quad (5)$$

여기서,

- $\ddot{z}^*$ : absolute acceleration
- $\dot{z}^*$ : absolute velocity
- $z^*$ : absolute position
- $\dot{c}^*$ : relative velocity
- $c^*$ : relative position (filtered gap signal)

식 (5)에서  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ 는 제어게인이다. 식 (5)에서  $\ddot{z}^*, \dot{z}^*, z^*, \dot{c}^*, c^*$ 는 다음과 같은 필터 상태방정식에 의하여 결정된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T \\ u &= [\ddot{z}, c]^T \\ y &= [\ddot{z}^*, \dot{z}^*, z^*, \dot{c}^*, c^*]^T \\ A, B, C, D &: \text{matrix} \end{aligned}$$

결과적으로 자기부상제어기에 대한 동역학 방정식은 식 (4)와 식 (6)으로 구성된다. 즉 6 개의 상태변수로 부상제어기의 동역학 방정식이 구성된다. 그러나 이 이외에 추가로 전장품의 동역학이 고려되면 상태변수의 수는 그에 따라 증가하게 된다. 이 부상제어기 운동방정식은 Virtual.Lab Motion의 General element와 General element의 서브루틴인 ode.f에 의하여 정의된다[5]. General element는 부상제어기의 상태변수의 수, 입출력 등을 정의하고 ode.f에서는 구체적으로 부상제어기 운동방정식 (4), (6)을 정의한다. 본 차량은 24개의 전자석 모듈이 제어되기 때문에 결과적으로 144개의 부상제어기 운동방정식이 정의된다. 본 논문에서는 부상제어기에 관련한  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ 와  $A, B, C, D$ 를 하나의 예시로 선정하여 적용한다.

### 2.3.2 부상력 인터페이스

자기부상력은 앞절에서 설명한 Virtual.Lab Motion의 User-defined subroutine ode.f에서 식 (3)을 이용하여 계산하게 된다. 이 계산된 자기부상력은 대차의 전자석과 가이드웨이에 작용시켜야 한다. 가이드웨이의 동특성은 진동 모드 좌표로 표현되기 때문에 가이드웨이에 부상력을 작용시키는 것은 단순하

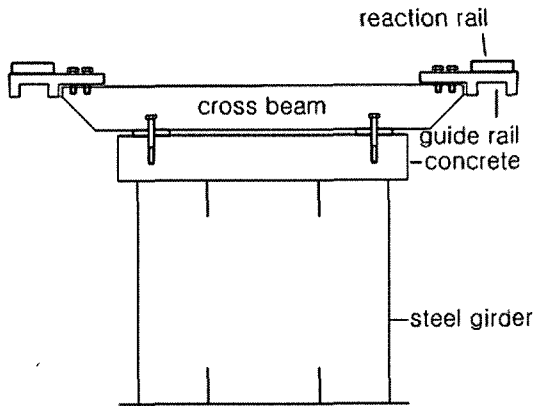
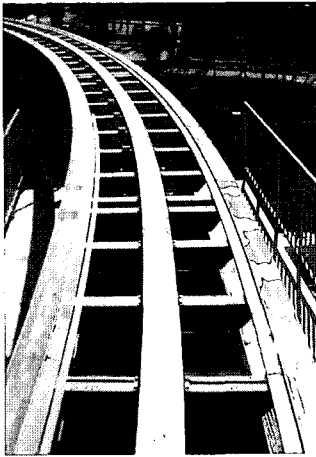


Fig. 5. Structure of the guideway composed of steel girder

지 않다. 부상력을 대차에 전달하는 것은 Virtual.lab Motion의 함수를 이용한다. 유한요소 모델인 가이드웨이에 부상력을 전달하기 위해서는 부상력을 절점력으로 분산시킨 후 Virtual.Lab Motion 내부에서 모달력으로 변환하게 된다. 이러한 기능은 Virtual.Lab Motion의 Flexible Contact element를 응용하여 이루어진다. Flexible Contact element는 자기부상력을 가이드웨이에 전달하기 위하여 집중하중으로 계산된 부상력을 절점력으로 변환한다.

## 2.4 가이드웨이

한국기계연구원에 설치된 가이드웨이는 Fig. 1에서와 같이 고가궤도이며 거더는 콘크리트나 강으로 구성된다. Fig. 5는 가이드웨이의 상부에서의 사진과 거더가 강인 경우의 단면 형상을 보여주고 있다. 거더가 강으로 구성된 경우에 차량과의 상호작용이 콘크리트 거더에 비하여 상대적으로 중요하게 된다.

본 논문에서는 이러한 가이드웨이는 ANSYS를 이용하여 Fig. 6에서와 같이 모델된다. 가이드웨이의 유한요소 모델은 40m 구간에 대하여 1329개의 요소로 이루어진다. 거더, 가이드 레일, 크로스 빔은 Shell, Beam 요소로 모델되고 콘크리트

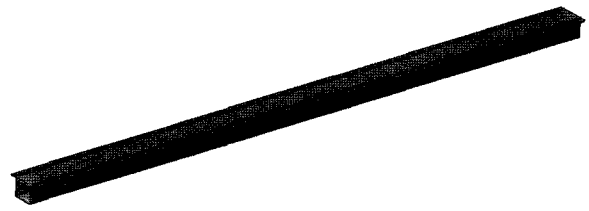


Fig. 6. FE model of the guideway

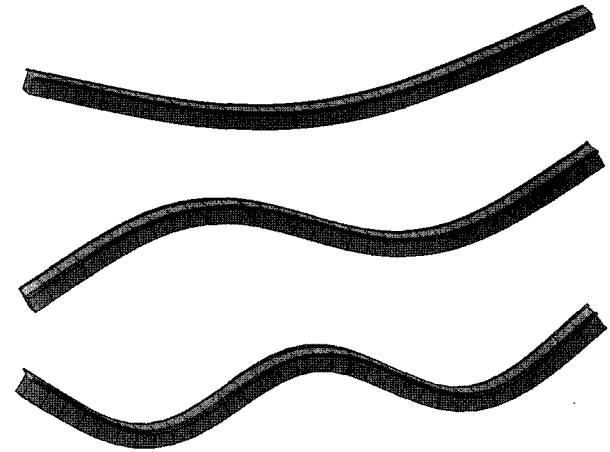


Fig. 7. Vibration modes of the guideway

슬레이브는 Solid 요소로 모델된다. Fig. 6과 같은 유한요소 모델이 생성되면 이 모델을 이용하여 Virtual.Lab Motion은 경계조건과 진동모드 해석 조건을 자동 생성한다. 진동모드는 ANSYS의 Craig-Bampton 법을 이용하여 해석한다. 이 방법은 경계조건을 부여한 상태에서의 진동모드를 해석한다. 진동모드는 정규모드와 정적모드를 모두 포함하여 해석하는데 본 논문에서는 총 178 개의 진동모드를 이용한다. 이용된 진동모드 중 1차, 2차, 3차 모드를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 각 모드의 고유진동수는 각각 4.4Hz, 11.2Hz, 20.3Hz이다. 여기서, 특히 사항으로 부상력을 가이드웨이에 전달하기 위해서는 자기부상력이 전달될 모든 절점 각각에 대한 정적 모드를 사용한다. 즉, Fig. 6과 같은 유한요소 모델에 대한 정적 모드는 150개가 이용된다.

## 2.5 시스템 모델

본 논문에서 제안한 자기부상열차/유연가이드웨이의 연성 동역학 해석 모델을 Fig. 8에서 보여주고 있다. Fig. 8에서와 같이 차량 및 가이드웨이가 상세하게 모델된다. 가이드웨이의 불규칙도는 좌우 비대칭으로 고려가 가능하게 개발되었으나 본 논문에서는 불규칙도가 없는 것으로 가정한다. 유연체

가이드웨이는 길이가 40m이고 교각은 3개인 2경간으로 구성되어 있다. 차량은 2량 1편성으로 구성된다. 가이드웨이는 중간 교각에 고정되어 있고 좌우 교각에서는 길이방향으로 이동이 가능하다.

### 3. 해석

본 논문에서 제안한 자기부상열차 동특성 해석방법의 유용성을 검토하기 위하여 UTM-01에 적용하였다. 실차 주행 결과와 비교하기 위하여 경간 중심에서 가이드웨이의 처짐과

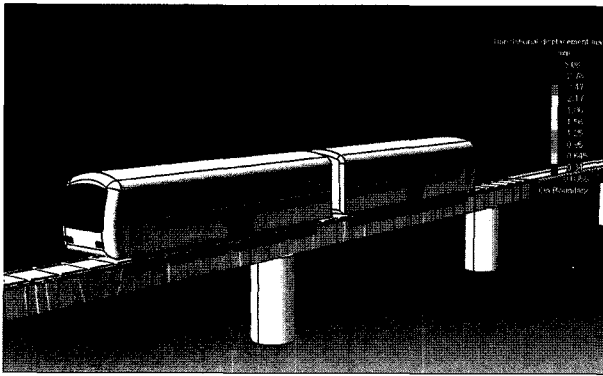


Fig. 8. Coupling model of the Maglev vehicle/guideway

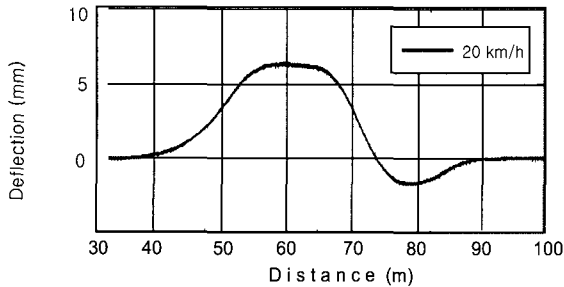


Fig. 9. Measured deflection of the guideway

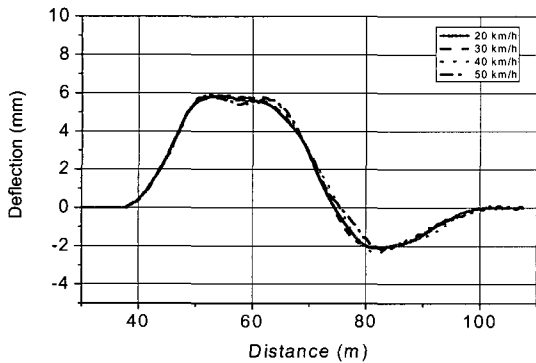
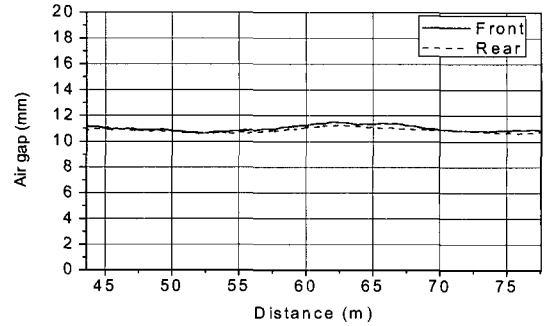
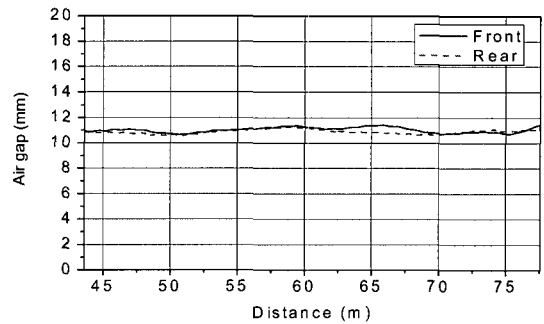


Fig. 10. Predicted deflections of the guideway with different speeds

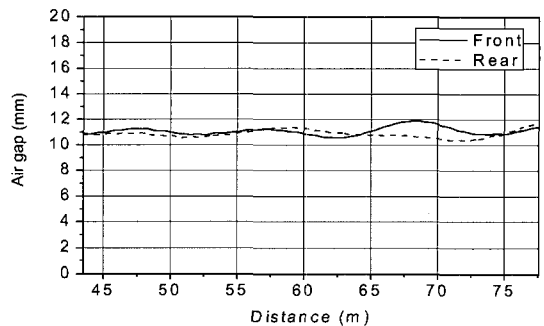
선두차량 중간 대차에서의 공극을 측정하였다. 차량 속도가 20km/h 일 때의 가이드웨이의 처짐에 대한 계측 결과와 해석 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에서 각각 보여주고 있다. 최대 처짐의 경우 해석에서는 약 6mm, 실측은 약 6.5mm로 비교적 유



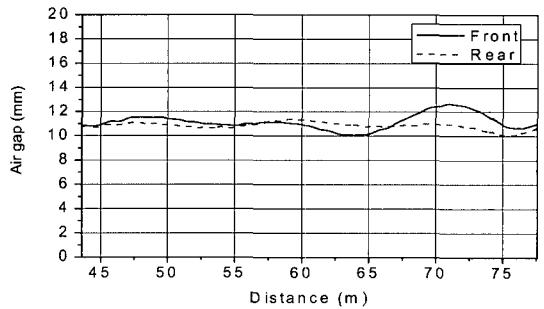
(a) 20km/h



(b) 30km/h



(c) 40km/h



(d) 50km/h

Fig. 11. Predicted air gaps with different speeds

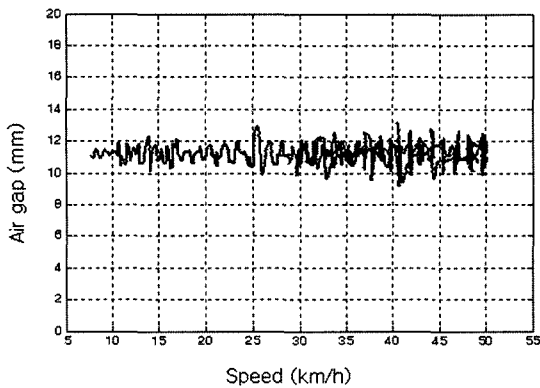


Fig. 12. Measured air gaps according to speeds

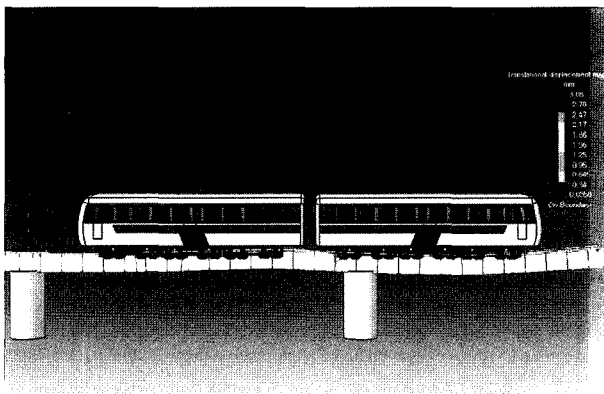


Fig. 13. Animation of the vehicle running over the flexible guideway

사함을 알 수 있다. 또한 처짐의 전체적인 경향도 유사함을 볼 수 있다. Fig. 10은 속도 증가에 따른 가이드웨이 처짐을 보여주고 있다. 속도가 증가할 수록 변곡점에서의 상대적인 변동이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향으로 인하여 차량의 속도 증가시 엄밀한 동특성 해석이 요구된다. Fig. 11은 속도 증가에 따른 선두차량 중간대차의 공극 응답을 보여주고 있다. Fig. 12는 UTM-01의 단일 차량 편성 시 중간대차에서의 공극 측정 결과이다. Fig. 11에서와 같이 속도가 증가할 수록 공극 편차는 증가하는 것을 알 수 있다. 50km/h의 경우 최대 편차는 약 2mm를 보여주고 있다. Fig. 12에서의 실차 주행조건과 해석에서의 주행조건에는 차이가 있다. 시험에서는 가이드웨이의 불규칙도가 존재하고 가이드웨이의 경간 간격도 일정하지 않다. 또한 주행속도가 일정하지 않고 증가하고 있다. 그러므로 직접적인 비교는 어렵지만 변동의 최대 크기가 비교적 유사한 것을 알 수 있다. 국부적인 공극 변화는 가이드웨이의 불규칙도에 의하여 결정되기 때문에 엄밀한 비교를 위해서는 가이드웨이의 불규칙도를 해석에 포함

하여야 한다. Fig. 13은 해석 결과를 이용한 가시화를 보여주고 있다. 가이드웨이 처짐을 100배 확대한 것이며 가시적으로 차량과 가이드웨이의 운동을 확인할 수 있다. 이와 같이 본 논문에서 제안하는 자기부상열차/가이드웨이 동역학 모델링 기법이 실제 차량의 동특성을 표현함을 알 수 있었다. 또한 기존의 가이드웨이 단순모델 기법에 비하여 좀더 엄밀한 동특성 해석이 가능할 것으로 기대된다. 일반적으로 이러한 동특성 해석은 자기부상열차의 부상안정성, 승차감, 곡선추종성 등의 평가에 이용될 수 있다. 또한 가이드웨이의 형상에 따른 동특성을 평가하여 가이드웨이의 형상 설계에 이용될 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 자기부상열차/유연가이드웨이의 동역학 해석을 위한 모델링 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 유연다물체 동역학을 적용하고 있으며 가이드웨이는 모드중첩법에 의하여 모델된다. 제안한 모델링 기법을 UTM-01에 적용하여 동역학 모델링 기법의 타당성을 검토하였다. 제안된 모델링 기법은 상세한 동역학 해석 모델을 이용하기 때문에 다양한 종류의 동특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 제안된 기법은 부상안정성 예측, 승차감 예측 및 고가이드웨이 형상에 따른 동특성 예측에 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 해석 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 가이드웨이의 유한요소 모델을 동특성 해석에 적합하도록 생성할 필요가 있었음을 알 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. Zhao, C., Zhai, W., Wang, K. (2004), "Dynamic response of the low speed maglev vehicle on the curved guideway," *Maglev 2004, Proceedings*, pp.559-566.
2. Zhai, W., Zhao, C., Cai, C. (2004), "Dynamic simulation of the EMS maglev vehicle-guideway-controller coupling system," *Maglev 2004, Proceeding*, pp.567-574.
3. Hong, H.J., Wensen, J.C. (2004), "The levitation control simulation of Maglev bogie based on the virtual prototyping platform and MATLAB," *Maglev2004, Proceeding*, pp.1006-1010.
4. Early, R., Abe, Y., Ohsaki, H. (2002), "Numerical analysis of the vehicle dynamics of the superconduction maglev system at the Yamanashi test line," *Maglev 2004, Proceedings*, pp.1-10.
5. Virtual.Lab Motion 6.A., LMS International inc.
6. Sinha, P.K. (86), *Electromagnetic suspension dynamics & controls*, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.