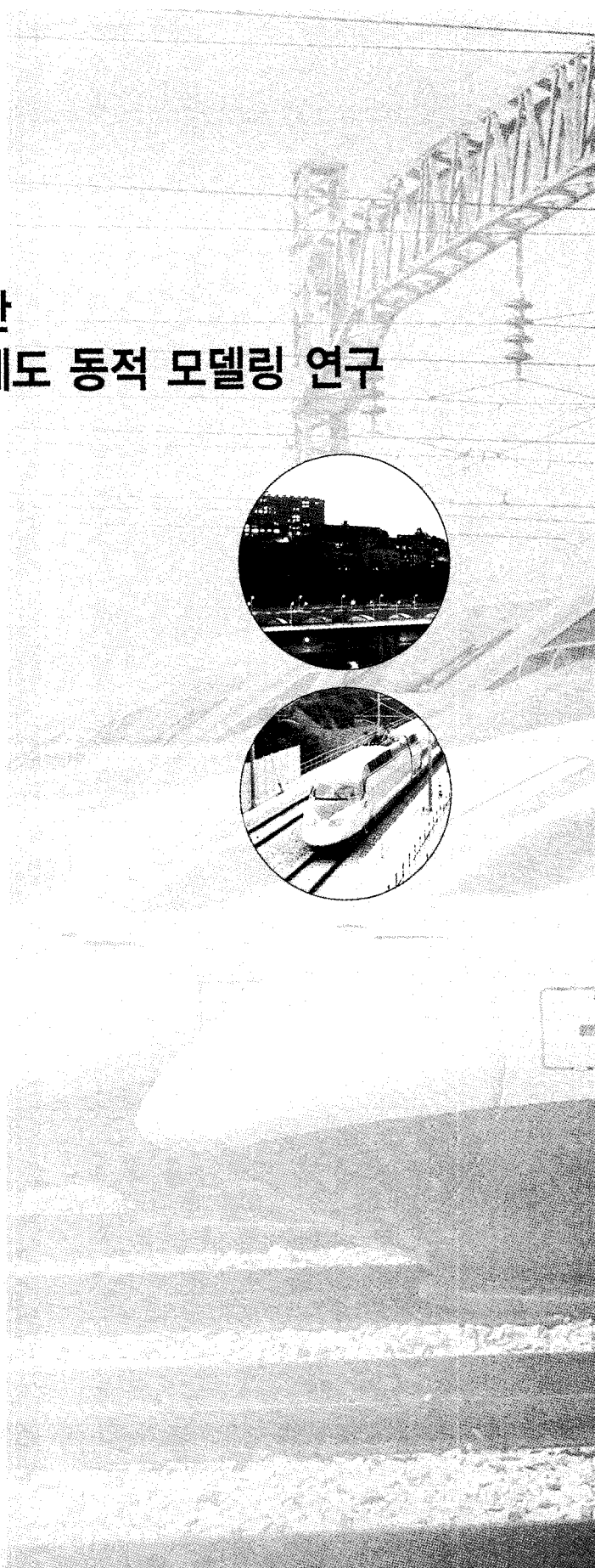
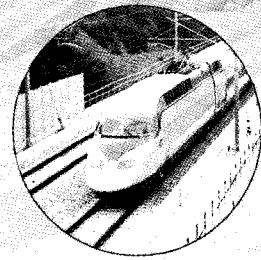


특별Session

모드중첩법을 이용한 자기부상열차/유연궤도 동적 모델링 연구

한형석 _ 한국기계연구원



모드중첩법을 이용한 자기부상열차/유연궤도 동적 모델링 연구 Modeling of the Maglev Vehicle Running over an elevated Guideway Using Flexible Multi-body Dynamics Based on the Model Superposition Method

한형석* 이종민** 김영중** 김동성** 김숙희**
Han, Hyung Suk Lee, Jong Min Lee, Jae Ik Kim, Young Joong Kim, Sook hee

ABSTRACT

In general, the Maglev vehicle is run over an elevated guideway consisting of steel or concrete structure. Since the running behavior of the vehicle is affected by the flexibility of the guideway, the consideration of the flexibility of guideway is needed for evaluating the dynamics of both the vehicle and guideway. A new method based on flexible multibody dynamics is proposed to model the Maglev vehicle. This method combines the levitation controller, vehicle, and guideway into a coupled model. To verify the method, an urban transit is analyzed using the method and discussions are carried out.

1. 서론

환경친화적인 미래형 궤도교통 수단으로 자기부상열차가 중국과 일본에서 실용화되었다.[1-2] 국내에서는 도시형자기부상열차에 대한 연구를 80년대 초부터 시작하여 HML-03, UTM01이 EXPO과학공원과 한국기계연구원 시험선로에서 각각 운행되었다. 2003년 10월부터는 (주)로템을 총괄주관기관으로 자기부상열차 실용화 모델(Rotem Maglev) 개발이 산업자원부 주관의 중기거점기술개발 과제로 진행되고 있다.[Fig. 1] 일반적으로 자기부상열차는 Fig.1에서와 같이 고가 가이드웨이(elevated guideway)에서 주행한다. 고가 가이드웨이는 주로 콘크리트 거더 구조물로 구성되나 때로는 Fig. 1에서와 같이 강재 거더 구조물로 구성된다. 강 구조물이든 콘크리트 구조물이든 고가 가이드웨이는 차량 주행 시 탄성변형을 일으킨다. 이 탄성변형은 차량의 자기부상제어기와 상호작용을 일으킨다. 이 상호작용은 부상안정성, 승차감, 가이드웨이 진동 등에 영향을 미친다. 그러므로 자기부상열차의 동특성을 해석하기 위해서는 차량과 유연성을 고려한 가이드웨이의 동역학 모델링이 요구된다. 이러한 분야에 최근 연구는 주로 중국에서 수행되고 있다.[1-4] 이러한 연구에서는 주로 가이드웨이를 단순화시킨 모델을 이용한다. 그러나 국내에 설치된 가이드웨이는 단순화 시 실제의 동특성을 표현하지 못한다. 엄밀하게 차량과 가이드웨이의 동특성을 평가하기 위해서는 보다 상세한 가이드웨이 모델링이 요구된다.

* 책임저자, 정회원, 한국기계연구원, 시스템즈니어링연구본부
E-mail : hshan@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7814 FAX : (042)868-7818

** 한국기계연구원

본 논문에서는 유연다물체 동역학을 이용한 동적 모델링 방법을 제안한다. 유연 다물체 동역학은 시스템을 상세하게 모델하기 때문에 다양한 동특성 결과를 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 개발 중인 실용화 모델과 한국기계연구원에 설치된 시험선에 적용하였다. 그러나 본 논문은 단지 모델링 방법에 중점을 두기 때문에 엄밀한 부상제어기 안정성 평가나 승차감 평가는 이루어지지 않는다. 또한 실용화모델의 부상제어기는 계속 개선 중이기 때문에 본 논문에서 적용한 제어기는 한 예로, 실용화 모델의 현재 실차 응답과는 다르다.



Fig. 1. Rotem Maglev running over an elevated guideway

2. 모델링

2.1 모델링 과정

본 논문에서 제안하는 자기부상열차/유연가이드웨이의 동역학 모델링 방법의 구성 및 흐름은 Fig. 2에서 보여주는 것과 같다. 이 방법에서 적용하는 이론은 유연 다물체 동역학이다. 유연 다물체 동역학은 차량, 부상제어기 및 유연가이드웨이의 연성 운동방정식을 구성하고 수치해를 구하는 기능을 수행한다. 본 논문에서는 유연다물체 동역학 해석 프로그램으로 Virtual.Lab Motion 6.A를 사용한다. 유연가이드웨이는 유한요소 모델과 유한요소 모델의 진동모드로 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, 유체 모델링, 자기부상제어기 모델링, 경계조건 모델링을 수행 및 해를 구한다.
- 자기부상제어기는 Virtual.Lab Motion의 User-defined subroutine과 제어 요소(control element)에 의하여 정의된다. 제어 요소는 대차의 가속도, 대차의 위치를 감지한다.

User-defined subroutine은 감지된 대차의 가속도와 위치를 이용하여 공극(airgap)을 계산 한 후 제어기에 대한 연립 동역학 방정식을 정의한다. 동시에 자기부상력을 계산하여 차량에 전달하는 기능을 수행한다.

- ANSYS는 가이드웨이에 대한 유한요소 모델을 생성하고 진동모드를 해석한다. 여기서, 진동모드 해석에 필요한 경계조건 및 하중 조건은 Virtual.Lab Motion로부터 생성된다.

전술한 과정에 대한 추가 설명은 하기의 절에서 이루어진다.

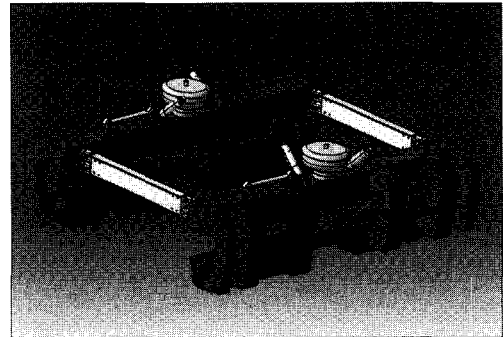
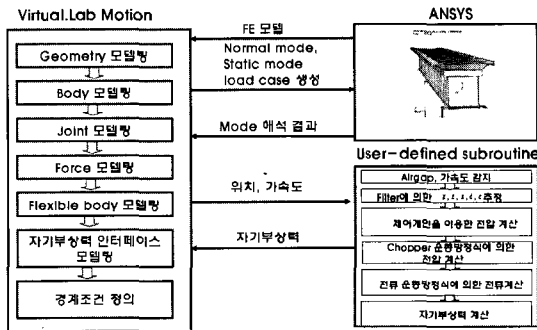


Fig. 2. Process of dynamics analysis of Maglev vehicles

Fig. 3. Virtual.Lab Motion model of Rotem Maglev bogie

2.2 대차

실용화 모델의 대차 구조는 Fig. 3에서와 같이 좌우 2개의 사이드 프레임, 각 사이드 프레임에 8개의 전자석, 전후 2개의 타이빔, 좌우 2개의 공기 스프링, 좌우 4개의 완충기, 좌우 2개의 견인바, 그리고 견인바 속에는 고무가 내재되어 있다. 타이빔과 사이드 프레임은 회전조인트로 연결된다. 이러한 대차는 Fig. 3에서와 같이 Virtual.lab Motion에 의하여 상세하게 모델된다.

2.3 자기부상 제어기

2.3.1 제어기

상전도 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 공극 $c(t)$ 의 함수이다.

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

여기서,

A : sectional area of magnet
 μ_0 : permeability factor
 N : number of turns of magnet coil

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

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

$v(t)$ 를 결정하는 제어방법은 다양하게 존재할 수 있는데 본 논문에서는 전형적인 상태궤환 부상제어기를 사용하였으며 실용화 모델(Rotem Maglev)과는 다르다. 결과적인 $v(t)$ 는 식(3)으로 결정된다.

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

여기서,

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

식 (3)에서 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 는 제어게인이다. 식(3)에서 $\ddot{z}^*(t), \dot{z}^*(t), z^*(t), \dot{c}^*(t), c^*(t)$ 는 필터 상태방정식에 의하여 결정된다. 결과적으로 자기부상제어기에 대한 동역학 방정식은 식(2)와 6개의 상태변수로 구성된 필터 운동방정식으로 정의된다, 이 부상제어기 운동방정식은 Virtual.Lab Motion의 General element와 General element의 서부루틴인 ode.f에 의하여 정의된다. General element는 부상제어기의 상태변수 수, 입출력 등을 정의하고 ode.f에서는 구체적인 부상제어기 운동방정식을 정의한다.

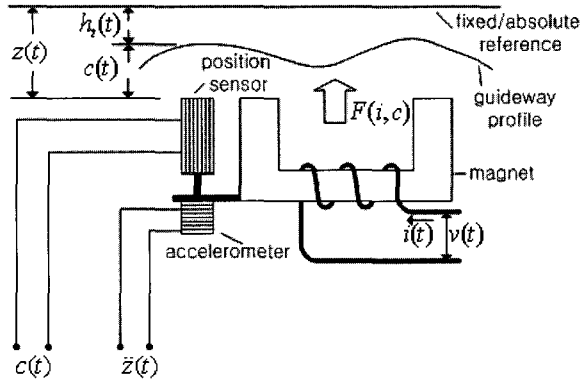


Fig. 4. Electromagnetic suspension system

2.3.2 부상력 인터페이스

자기부상력은 전절에서 설명한 Virtual.Lab Motion의 User-defined subroutine ode.f에서 계산하게 된다. 이 계산된 자기부상력은 대차의 전자석과 가이드웨이에 작용시켜야 한다. 가이드웨이의 동특성은 진동 모드 좌표로 표현되기 때문에 가이드웨이에 부상력을 작용시키는 것은 단순하지 않다. 본 논문에서 이를 위하여 Fig. 5에서 보여주는 기법을 이용한다. 부상력을 가이드웨이에 작용시키기 위하여 가상의 물체를 추가하고, 추가된 물체는 가이드웨이와 유연체 접촉이 일어나도록 한다. 이 유연체 접촉은 접촉력을 노드 힘으로 분산시킨 후 분산된 힘을 다시 모달 힘으로 변환하는 기능을 갖는다. 부상력은 가이드웨이에 직접 작용하지 않고 추가된 가상의 물체에 작용하게 된다.

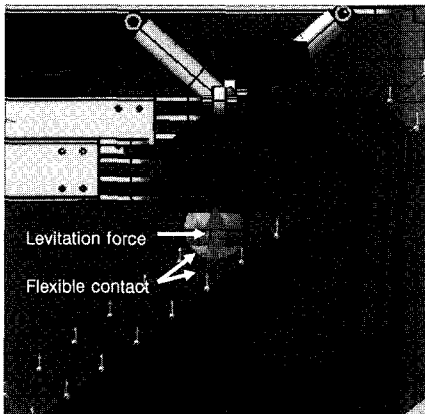


Fig. 5. Applying levitation forces to the guideway through the flexible contact element

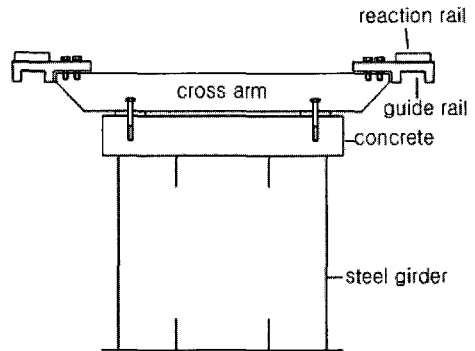


Fig. 6. Section view of the guideway

2.4 가이드웨이

한국기계연구원에 설치된 가이드웨이는 Fig. 1에서와 같이 고가궤도이며 거더는 콘크리트나 강으로 구성된다. Fig. 6은 가이드웨이의 단면 형상을 보여주고 있다. 거더가 강으로 구성된 경우에 차량과의 상호작용이 콘크리트 거더에 비하여 상대적으로 중요하게 된다. 본 논문에서는 이러한 가이드웨이를 모델하기 위하여 Fig. 7에서와 이 ANSYS가 이용된다. 가이드웨이의 유한요소 모델은 40 m 구간에 대하여 1329개의 요소로 이루어진다. 거더, 가이드 레일, 크로스 빔은 Shell, Beam 요소로 모델되고 콘크리트 슬레이브는 Solid 요소로 모델된다. Fig. 7과 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 178개의 진동모드를 이용하였다. 이용된 진동모드 중 주요한 모드를 Fig. 에서 보여주고 있다. 주요한 모드의 고유진동수는 각각 4.4Hz, 11.2Hz, 20.3Hz이다. 여기서, 특히 사항으로 유연체 접촉을 이용하기 위해서는 부상력이 작용하는 가이드레일의 모든 노드 각각에 대한 정적해석이 요구된다.

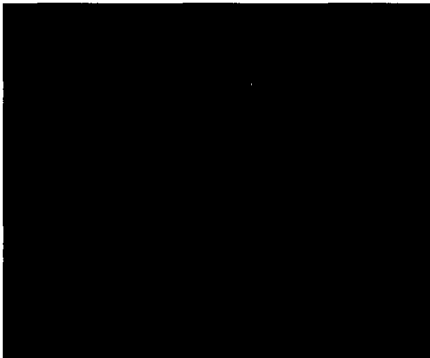


Fig. 7. Vibration modes of the guideway

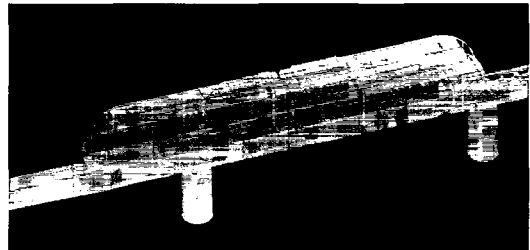


Fig. 8. Virtual.Lab Motion of the Rotem Maglev vehicle/guideway

2.5 연성 시스템

본 논문에서 제안한 자기부상열차/유연가이드웨이의 연성 동역학 해석 모델을 Fig. 8에서 보여주고 있다. Fig. 8에서와 같이 차량 및 가이드웨이가 상세하게 모델된다. 가이드웨이의 불규칙도는 해석 모델에서 고려가 가능하나 논문에서는 불규칙도가 없는 것으로 가정한다. 유연체 가이드웨이는 2경간으로 구성되어 중간 교각에 고정되어 있고 좌우 교각에서는 길이방향으로 이동이 가능하다.

3. 해석

본 논문에서 제안한 자기부상열차 동특성 해석방법의 유용성을 검토하기 위하여 실용화 모델에 대한 동역학 해석을 수행하였다. 실차 주행 결과와 비교하기 위하여 경간 중심에서 거더

처짐을 Fig. 9와 같이 측정하였다. Fig. 9에서 최 상위 결과가 경간 중심에 대한 것으로 최대 값이 약 5.5 mm를 보이고 있다. 우선, 자기부상제어기의 작동여부를 확인하기 위하여 Fig. 10과 같이 정지상태에서의 부상공극 응답을 해석하였다. 목표 공극을 2초 동안 20 mm → 10 mm로 선형증가 시켰을 때, Fig. 10과 같이 부상제어기가 작동하여 부상공극이 목표치를 추종하는 것을 알 수 있다. 다음으로 중요한 사항이 유연가이드웨이 모델이기 때문에 유연가이드웨이의 처짐량을 시험과 비교하였다. 전술한바와 같이 시험에서는 경간 중심부에서 거더 처짐이 최대 약 5.5 mm 이며, 본 해석에서는 약 5.8 mm로 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 11은 거더가 최대로 처질 때의 해석 결과를 표시한 것으로 처짐량을 100 배 확대하여 표시한 결과이다. 이러한 결과를 통하여 유연 다물체 동역학을 이용하여 자기부상열차의 상세한 동특성 해석이 가능한 것을 알 수 있었다. 자기부상열차의 주행안정성, 승차감, 가이드웨이 동특성 및 모든 부품의 동하중을 해석하여 설계에 반영할 수 있을 것으로 기대된다.

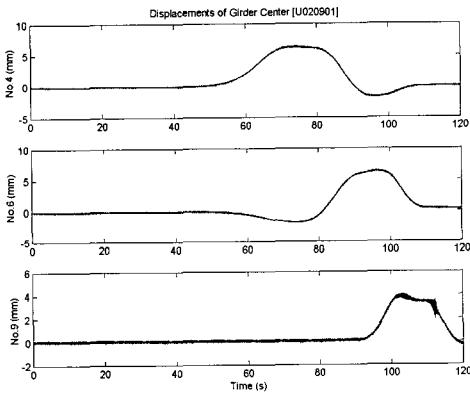


Fig. 9. Measured deflection of the guideway

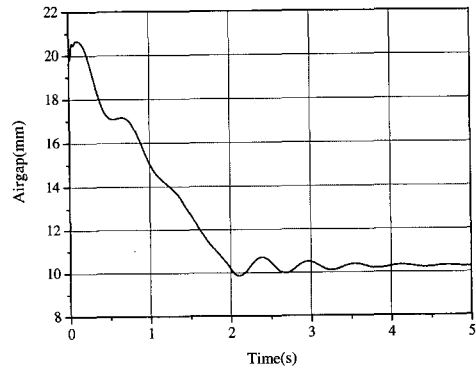


Fig. 10. Airgap

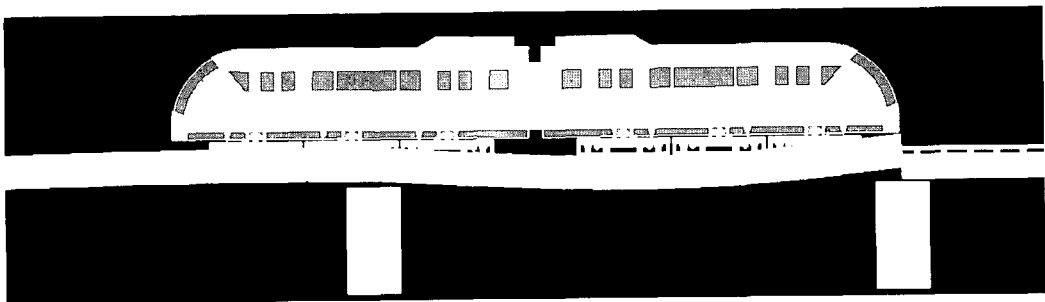


Fig. 11. Rotem Maglev vehicle running over the guideway

4. 결론

이상과 같이 자기부상열차의 상세한 동특성 해석을 위한 모델링 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 유연 다물체 동역학을 이용한다. 가이드웨이의 유연성을 고려하기 위하여 가이드웨이는 진동모드 중첩법이 적용된다. 제안된 모델링 기법을 이용하여 실용화 모델에 적용하여 제안된 기법의 타당성을 검토하였다. 그 결과 유연 다물체 동역학을 이용한 자기부상열차의 동특성을 해석할 수 있음을 볼 수 있었다. 다물체 동역학은 상세한 동특성 해석이 가능하기 때문에 그 응용성이 넓다고 할 수 있다. 그러나, 연구과정에서의 경험을 통하여 여전히 난제가 많은 것을 알 수 있었다. 난제로는 제어기에서 생성된 자기부상력을 유연체인 가이드웨이에 전달하는 것과 유연 가이드웨이의 효율적인 유한요소 모델 생성이 차후 연구 과제라고 할 수 있다.

참고문헌

1. Zhao, C., Zhai, W., Wang, K.(2004), "Dynamic response of th low speed maglev vehicle on the curved guideway, "Maglev2004, Proceedings, pp.559-566.
2. Zhai, W., Zhao, C., Cai, C.(2004), "Dynamic Simulation of the EMS maglev vehicle-guideway-controller coupling system," Maglev2004, 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 th Yamanashi test line," Maglev 2004, Proceedings, pp.1-10.