

유연궤도를 고려한 자기부상열차 주행 시뮬레이션

Simulation of a Maglev Vehicle Running on the Flexible Guideway

한형석[†] · 김영중* · 신병천** · 권정일***

Hyung-Suk Han · Young-Joong Kim · Byung-Chun Shin · Jeong-Il Kwon

Abstract

Maglev vehicles, which are levitated and propelled by electromagnets, often run on elevated flexible guideways comprised of steel, aluminum and concrete. Therefore, an analysis of the dynamic interaction between the Maglev vehicle and the flexible guideway is needed in the design of the critical speed, ride, controller design and weight reduction of the vehicle. This study introduces a dynamic interaction simulation technique that applies structural dynamics. Because the proposed method uses detailed 3D FE models, it is useful to analyze the deformation of the elevated flexible guideway, the dynamic stress, and the motion of the vehicle. By applying the proposed method to an urban transit Maglev vehicle, UTM01, the dynamic response is simulated and validated. From the result of the study, we concluded that the simulation of dynamic interaction between the Maglev vehicle and the flexible guideway is possible and a potential of using computational mechanics.

Keywords : Maglev(자기부상), Flexible guideway(유연궤도), Structural dynamics(구조동역학), LS-DYNA

1. 서론

자기부상열차는 대부분 유연한 고가궤도(guideway)에서 주행한다. 고가궤도는 강재나 콘크리트 재료인 거더, 크로스 압, 가이드 레일 및 반발 레일로 구성된다. Fig. 1은 국내에서 개발되어 시험운행 중인 자기부상열차 UTM-01으로, 강재 거더로 구성된 고가궤도에서 주행하는 것을 보여주고 있다. UTM-01은 Fig. 1 경우와 같이 강재 거더로 구성된 고가궤도나 Fig. 1에 나타나지는 않았으나 콘크리트 거더로 구성된 고가궤도를 주행한다. 강재 거더 고가궤도나 콘크리트 거더 고가궤도 모두 자기부상열차가 주행하면 탄성 변형을 일으킨다. 이 탄성 변형은 자기부상열차와 상호작용을 일으키면서 차량의 주행성능에 영향을 미치게 된다. 그러므로 자기부상열차의 주행성능을 시뮬레이션하기 위해서는 고가궤도의 탄성변형을 고려하여야만 한다. 주행성능 시뮬레이션은 부상제어기의 안정성, 승차감, 곡선추종성, 고가

궤도 안전성 등의 평가를 실물 없이 수행할 수 있기 때문에 유용하게 이용될 수 있다.

유연궤도를 주행하는 자기부상열차의 동적 모델링 및 시뮬레이션 연구는 TRANSRAPID 개발과정에서 주로 수행되었다 [1-5]. 연구자들은 전통적으로 유연궤도를 단순 Bernoulli-Euler beam 방정식에 기초를 둔 모드 중첩법으로 표현하여 왔다 [1-5]. 이러한 방법은 자기부상열차의 기본적 동특성과 경향을 이해하는데 매우 유용하게 이용되어 왔다. 그러나 이러한 Bernoulli-Euler beam 모델을 적용하기 위해서는 불규칙적이고 복잡한 형상을 갖는 궤도를 Bernoulli-Euler beam으로의 단순화가 요구된다.

본 논문은 보다 실제적인 3D FE(유한요소) 모델을 이용한 자기부상열차의 주행 시뮬레이션 방법을 제안하고자 한다. 고가궤도와 차량은 단순화를 최소화 한 상세한 FE 모델로 표현된다. 제안된 방법을 이용한 모델링 및 시뮬레이션은 구조동역학 해석 프로그램 LS-DYNA에 의하여 수행된다. 시뮬레이션을 통하여 주행안정성 및 궤도의 처짐 등이 검토된다. 그 결과, 제안한 방법을 자기부상열차의 주행 시뮬레이션에 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 연구 결과를 통하여 개선 사항이 논의 된다.

† 책임저자: 정회원, 한국기계연구원, 자기부상열차실용화사업단
E-mail: hshan@kimm.re.kr

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

* 한국기계연구원, 자기부상열차실용화사업단

** 한국기계연구원, 자기부상열차실용화사업단

*** 한국기계연구원, e-엔지니어링연구센터

2. 모델링

2.1 차량

2.1.1 차체

본 논문에서 대상으로 하는 자기부상열차 UTM-01의 차체 형상은 Fig. 1에서와 같다. 차체의 구조는 전형적인 철도차량 차체의 구조와 유사하다. 이 차체의 유한요소 모델은 주로 빔과 쉘 요소로 구성되며 Fig. 2에서 보여주는 것과 같다.

2.1.2 대차

UTM-01은 Fig. 1에서와 같이 3개의 대차로 구성된다. 대차의 구조는 Fig. 3에서 보여주는 것 같이 전자석, 사이드 프레임, 타이 빔, 견인바, 견인바 그리고 현가 요소인 공기 스프링, 감쇠기, 견인 바를 연결하는 고무로 구성된다. 현가 요소의 강성과 감쇠는 일반적으로 비선형이지만 본 논문에서는 선형으로 가정한다. 그런 후 현가요소는 선형 스프링-댐퍼를 표현하는 LS-DYNA의 DISCRETE 요소로 모델한다. Fig. 2는 차체 및 대차의 유한요소 모델을 보여주고 있다. 차체와 대차는 23,778 개의 요소 구성되어 있다.

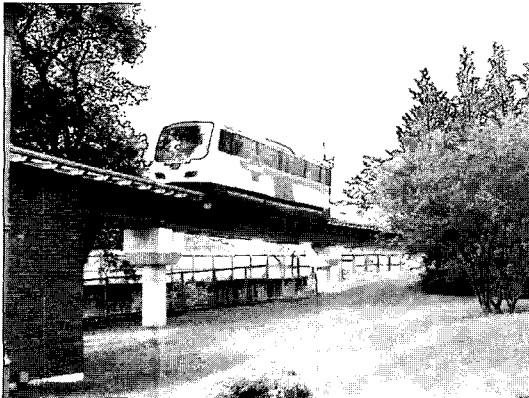


Fig. 1. Maglev vehicle UTM-01 running on a elevated guideway

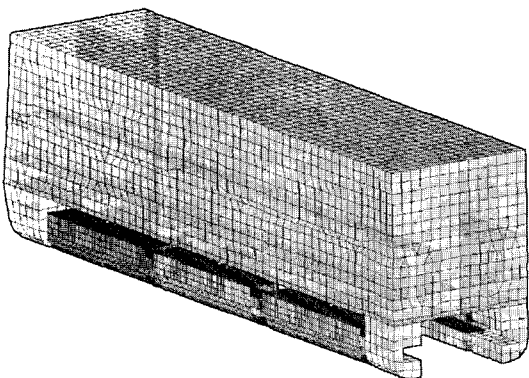


Fig. 2. FE model of UTM-01

2.1.3 자기부상력

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 : area
 μ_0 : electrical coefficient
 N : number of turns

저항 R 을 갖는 시스템의 전압과 전류의 관계식은 다음과 같다.

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

식 (1)과 (2)를 통해 알 수 있듯이 $F(i,c)$ 는 결국 전압 $v(t)$ 를 이용하여 제어하게 된다.

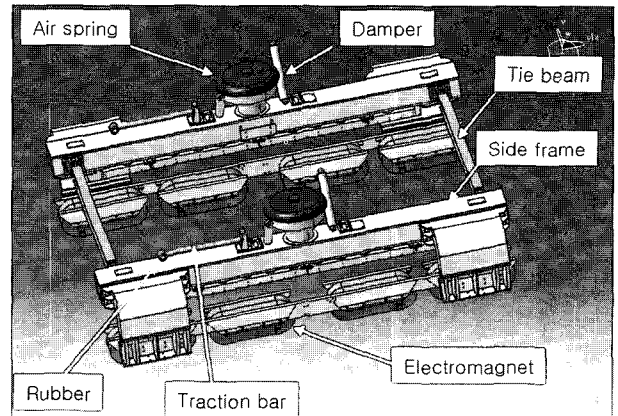


Fig. 3. Bogie of UTM-01

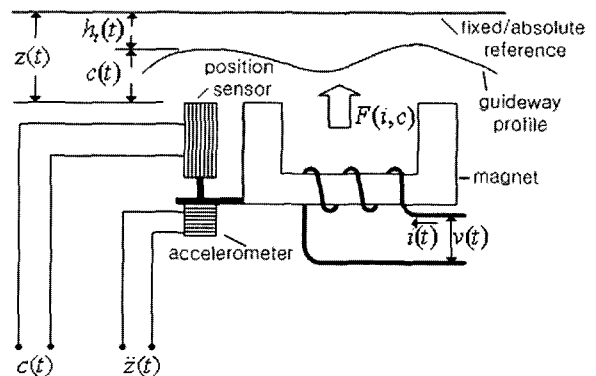


Fig. 4. Electromagnetic suspension system

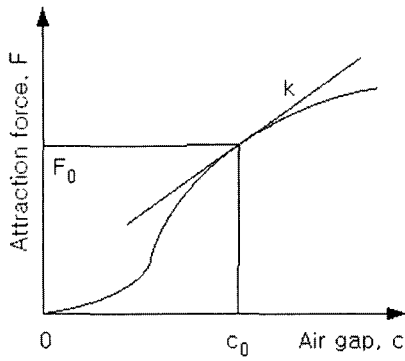


Fig. 5. Force-distance characteristics

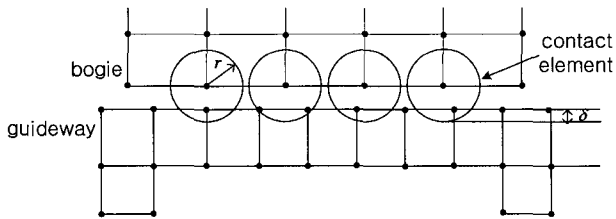


Fig. 6. Model of interaction between Maglev vehicle and guideway

자기부상열차의 주행을 시뮬레이션하기 위해서는 부상 제어기를 시뮬레이션 모델에 포함시켜야 한다. 식 (1)~식 (2)에 의한 자기부상력 특성은 Fig. 5와 같은 비선형 특성을 나타낸다. 그러나 시뮬레이션을 용이하게 하기 위하여 정상 상태 위치에서 선형화시키는 기법이 이용될 수 있다[7]. 본 논문에서도 자기부상력을 다음 식 (3)과 같은 단순 선형 모델로 표현한다.

$$F = F_0 + k(c - c_0) + \dot{c} \quad (3)$$

식 (3)에 포함된 강성 k 와 감쇠 d 의 추정치는 참고문헌 [7]과 같이 제어기가 포함된 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 이용하여 이루어진다. 본 논문에서는 자기부상력을 모델하기 위하여 LS-DYNA의 CONTACT 요소를 이용한다. 가이드웨이를 MASTER로, 대차를 SLAVE로 정의한다. Fig. 6에서와 같이 본 논문에서는 CONTACT 요소에서의 침투량 δ , 속도 $\dot{\delta}$ 를 측정된 후 식 (3)의 c , \dot{c} 을 δ 과 $\dot{\delta}$ 으로 대체하여 자기부상력을 계산한다. 향후 구조동역학을 적용함에 있어서 자기부상력에 대한 사실적 모델링 기법에 대한 보완이 요구된다.

2.2 고가궤도

고가궤도는 Fig. 7과 같은 구조이다. 이러한 구조에 대한 FE 모델이 Fig. 8과 같이 이루어지고 80,961 개의 요소로 구성된다. Fig. 8에서와 같이 강재 거더, 콘크리트, 크로스

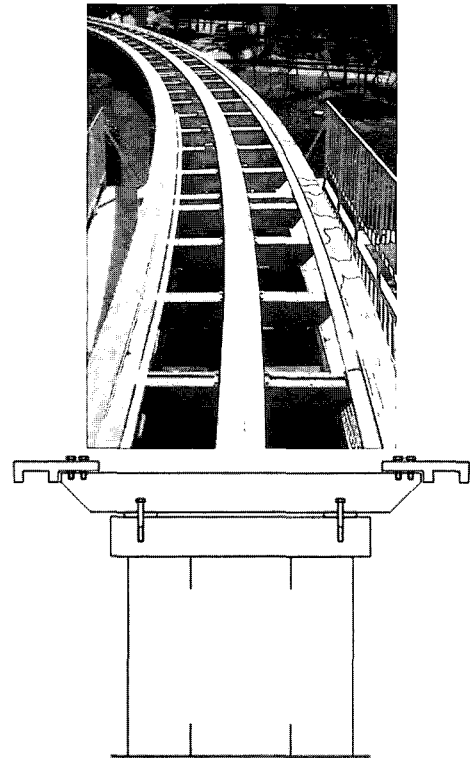


Fig. 7. Guideway of UTM-01

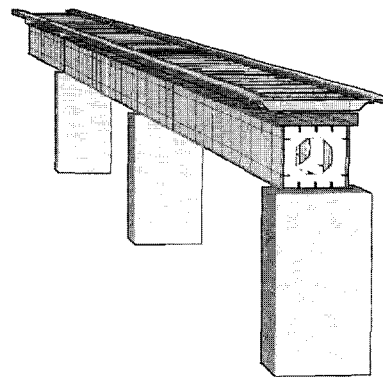


Fig. 8. FE Model of UTM-01 track

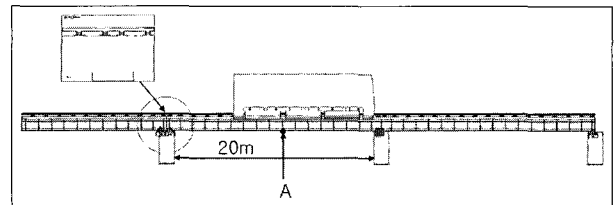


Fig. 9. Track model and its boundary conditions

암 및 가이드 레일의 상세한 형상이 고려된다. Fig. 9는 고가궤도의 경계조건과 시뮬레이션 구간을 보여주고 있다. 시뮬레이션 관심 구간은 2경간으로 길이는 40m이다. 그러나 Fig. 9에서와 같이 차량 진입을 위하여 좌측 1개의 경간을

포함시키고 첫 경간과 나머지 2 경간 사이는 분리되어 있다. 고가궤도의 경계조건은 Fig. 9와 같이 중앙부는 고정구속이고 양단은 수평방향 운동이 가능하다. 이러한 경계조건은 실제 고가궤도와 동일하다.

3. 결과

2장에서 제안한 방법으로 자기부상열차 UTM-01의 주행 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 10은 자기부상열차가 고가궤도를 주행하는 것을 보여주고 있다. Fig. 11은 Fig. 9에 나타난 경간 중심의 거더 하부의 A점에서의 수직방향 변위를 보여주고 있다. 10km/h 속도에서 최대 변위는 약 5.5mm임을 알 수 있다. Fig. 12은 동일 위치에서의 실차 주행 중 측정된 변위를 보여주고 있는데 약 5mm로 해석에 의한 결과보다 약간 큰 것을 알 수 있으나 그 차이가 10%로 시뮬레이션과 실험이 유사함을 알 수 있다. 다음으로 주행 속도를

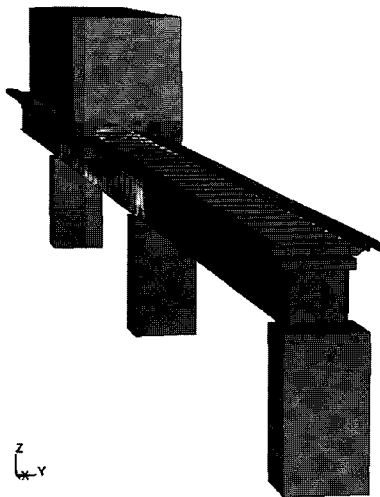


Fig. 10. Animation of UTM-01 running on the elevated track

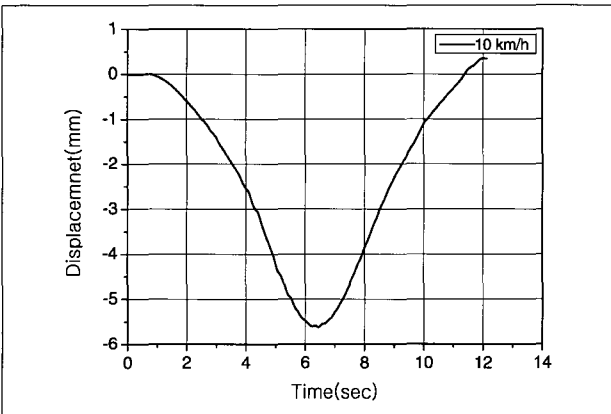


Fig. 11. Simulated displacement of the girder at 10 km/h

증가시키면서 주행안정성을 검토하였다.

주행안정성을 평가하기 위하여 30km/h~130km/h까지 20km/h 씩 증가시켰다. Fig. 13은 속도 증가에 따른 거더의 변위를 보여주고 있다. Fig. 13에서, 속도 증가에 따른 응답 비고를 용이하게 하기 위하여 시간을 차량의 선두부 진행거리로 정규화시켰다. 결과적으로 Fig. 13의 가로축은 차량의 주행거리를 의미한다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 130km/h까지는 속도 증가에 따라 변위 응답이 발산하지 않고 안정

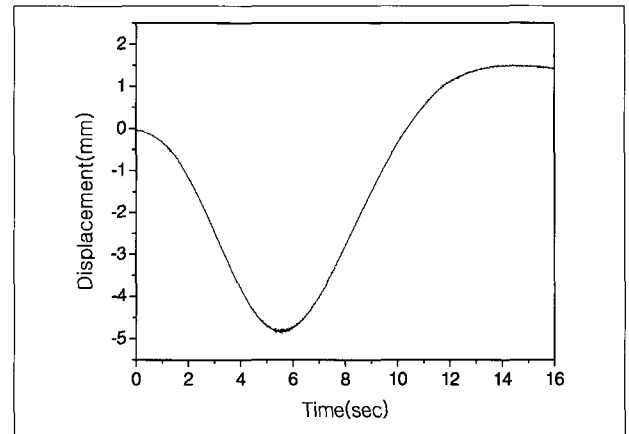


Fig. 12. Measured displacement of the girder at 10 km/h

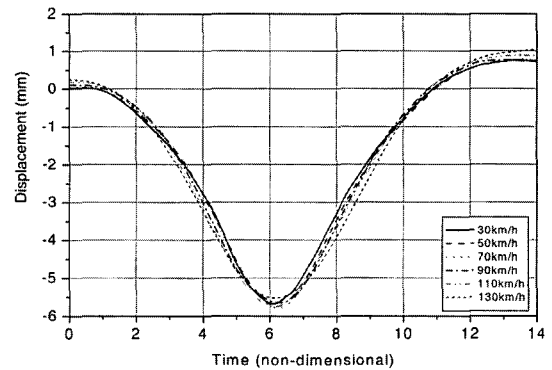


Fig. 13. Simulated displacements of the girder

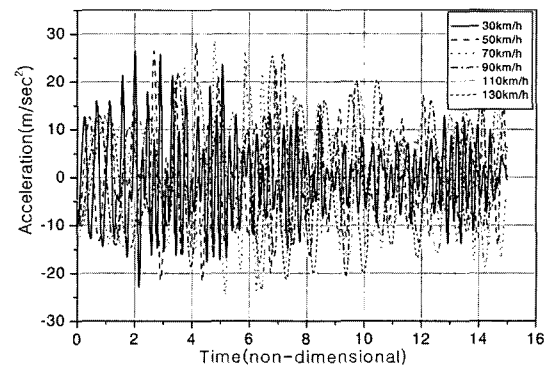


Fig. 14. Accelerations of the second bogie

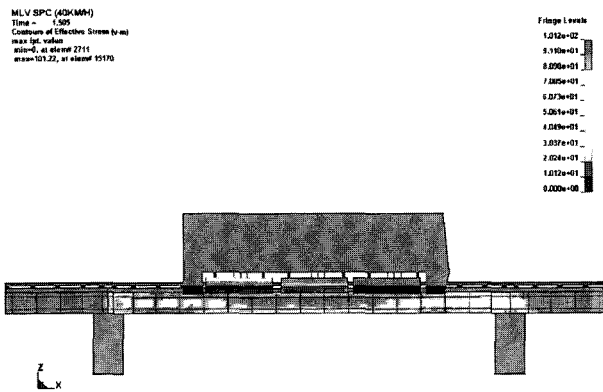


Fig. 15. Contours of stress at 130 km/h

화되는 것을 알 수 있다. 그러나 엄밀한 안정성 평가를 위해서는 자기부상력 제어를 사실적으로 모델하여 비선형성 및 주파수 영향을 고려하여야 한다. Fig. 14는 중앙대차의 수직방향 가속도를 보여주고 있다. 거더의 변위와 마찬가지로 가속도가 발산하지 않고 안정화되는 것을 볼 수 있다. Fig. 15는 자기부상열차의 주행으로 인한 동하중이 고가궤도에 미치는 응력을 보여주고 있다. 해석 결과, 고가궤도가 속도 130km/h 까지는 궤도 연결부에서 최대 100MPa로 나타나며, 그 이외 나머지 부분에서는 이보다 매우 작은 응력 분포를 보임에 따라 구조강도상 안전한 것으로 판단된다. 이와 같이 상세한 3D FE 모델을 적용하면 시스템의 변위, 속도, 가속도 및 동응력을 평가할 수 있는 장점이 있다. 반면에 다양한 주행 조건의 고려가 여전히 어려운 면이 있다. 본 논문에서는 엄밀한 주행시뮬레이션 결과의 평가보다는 주행 시뮬레이션 방법에 초점을 두고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 3D FEM을 적용한 자기부상열차의 주행 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 도시형 자기

부상열차 UTM-01에 적용하였다. 제안된 방법은 고가궤도와 차량을 상세한 3D FE 모델을 이용하기 때문에 차량과 고가궤도의 상세한 거동뿐만 아니라 동하중도 검토할 수 있는 장점이 있다. 이러한 결과는 자기부상열차의 차량 및 고가궤도의 설계에 적용가능하리라 기대된다. 그러나 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 자기부상력의 상세 모델링과 현가 요소의 비선형성 고려 및 계산 시간의 단축이 요구된다.

참고 문헌

1. Tsunashims, H., Tzeng, T.F. and Wang, T.C. (1994), "Dynamics of a Mechanically Controlled Permanent Magnet Suspension for Maglev Transport Vehicle", Transportation Systems, ASME, DSC-Vol.54/DE-Vol. 76.
2. Cai, Y., Chen, S.S., Rote, D.M. and Coffey, K.T. (1994), "Vehicle/Guideway Interaction for High Speed Vehicle on a Flexible Guideway", Journal of Sound and Vibration, Vol.175, No.5, pp.625-646.
3. Tzeng Y.K. and Wang, T.C. (1995), "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.
4. Seki A. and Osada, Y. (1996), "Dynamics of the Bogie of a Maglev System with Guideway Irregularities", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, No.5, pp.5043-5045.
5. Zhao C.F. and Zhai, W.M. (2002), "Maglev Vehicle/Guideway Vertical Random Response and Ride Quality", Vehicle System Dynamics, Vol.38, No.3, pp.185-210.
6. Kim, J.S. and Park, J.S. (1992), "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.
7. Han, H.S. (2003), "A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle", JSME International, Vol.46, No.4, pp.1497-1501.