

유연보 모델에 의한 자기부상열차/궤도 동적 상호작용 시뮬레이션

Simulation of the Dynamic Interaction Between Maglev and Guideway using a Flexible Beam Model

한형석* 이종민* 김동성* 김봉섭*

Han, Hyung-Suk Lee, Jong-Min Kim, Dong-Sung Kim, Bong-Sup

ABSTRACT

Maglev vehicles, which are levitated and propelled by electromagnets, often run on elevated guideways comprised of steel, aluminum and concrete. Therefore, an analysis of the dynamic interaction between the Maglev vehicle and the guideway is needed in the design of the critical speed, ride, controller design and weight reduction of the guideway. This study proposes a dynamic interaction simulation technique using a flexible beam model based on multi-body dynamics. The vehicle and the elevated guideway are represented as a multi-body dynamics model and a two-dimensional flexible beam, respectively. The proposed model was applied to an urban transit Maglev vehicle, UTM01, which is undergoing test drive. As a result of the proposed method, we concluded that it is possible to analyze the dynamic interaction between the Maglev vehicle and the guideway.

1. 서론

자기부상열차는 전자기력에 의해 부상 및 추진이 이루어지는 환경 친화적인 첨단 교통수단이다. 자기부상열차는 외국의 경우 주로 독일, 일본에서 연구 개발되어 왔고 일부 노선에서 실용화되었다. 국내에서는 도시형 자기부상열차 UTM01 시험차량을 개발하여 시험 운행 중에 있으며 수년 내 실용화 모델이 개발될 예정이다[그림 1]. 그림 1의 예와 같이 자기부상열차는 고가궤도를 주행하는 것이 많은 경우이다. 고가궤도는 강, 알루미늄 및 콘크리트 보를 구성하며 상단에 레일이 설치된다. 구조상 고가궤도는 자기부상열차 운행 시 동적 상호작용에 의하여 변형을 일으킨다. 고가궤도는 고유한 진동 특성을 갖게 된다. 차량은 2단계의 현가장치로 구성되어 있다. 1차 현가는 자기부상 모듈이며 2차 현가는 일반 차량과 유사한 구조를 갖는다. 그러므로 자기부상열차 주행시 차량과 고가궤도의 동적 상호작용 특성은 차량 및 궤도의 설계 측면에서 중요한 인자가 된다. 특히 중요한 것이 임계속도로 차량과 고

* 한국기계연구원, 정회원

가레도의 동적 속도이다. 더 나아가 승차감 및 자기부상 제어기 설계에 있어서 자기부상열차/고가레도의 동적 상호작용에 대한 해석 기술 및 이해가 요구된다.

자기부상열차의 동적 모델링 및 시뮬레이션은 주로 일본과 독일에서 연구가 활발히 수행되어 왔다 [1-6]. 전형적으로 고가레도를 Bernoulli-Euler beam 방정식에 기초한 두 모드 중심으로 표현하여 왔다 [2-6]. 차량은 저 자유도로 표현하는 것이 일반적이었다. 이러한 접근법은 자기부상열차/고가레도의 동적 상호작용의 기본적인 특성을 이해하는데 유용하게 이용되어 왔다. 그러나 동적 상호작용의 깊은 이해와 확장된 정보를 얻기 위해서 제어기의 통합이나 고자유도 차량 모델을 포함하기 어려운 측면이 있다. 국내에서는 자기부상 열차에 대한 연구가 단지 약 10년 정도 됐기 때문에 동적해석 모델링에 대한 연구는 부족하였다. 2자유도 단순 모델에 대한 연구가 국내에서의 연구 시작이라 할 수 있고 고가레도를 강체화 하고 3차원 전체차량 기반의 동적 모델링 및 시뮬레이션에 대한 연구가 수행되었다 [8]. Han에 의한 연구는 차량 및 자기부상 제어기는 3차원적으로 모델되었으나 고가레도의 유연성 고려가 되지 않았다.

본 논문은 자기부상열차/고가레도의 동적 상호작용 해석을 위한 모델링 기법을 제안하는데 목적이 있다. 제안된 모델링 기법에서는 차량을 다물체 동역학적으로 모델하고 고가레도는 Bernoulli-Euler beam 유연요소 운동방정식으로 표현한다. 이분대수방정식으로 표현되는 차량 운동방정식과 상비분방정식으로 표현되는 고가레도 운동방정식을 통합 해석하는 프로그램 ODYN111을 개발하여 UTM01에 적용한다. 연구 결과 제안된 기법이 자기부상열차/고가레도의 동적 상호작용 해석에 적용할 수 있음을 알 수 있다.



그림 1. 도시형 자기부상열차 UTM01

2. 모델링

2.1 자기부상열차/고가레도

그림 1은 전형적인 고가레도 구간에서의 자기부상열차 주행을 보여주고 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 고가레도는 강으로 구성된 거더(Girder)와 레일로 구성된다. 차량과 고가레도의 구조

는 그림 2.에서와 같다. 그림 2.에서와 같이 대차에 설치된 자기부상모듈(Magnetic levitation module)에 의하여 대차(bogie)가 부상되고 다음으로 공기스프링과 감쇠기로 구성된 2차 현가장치에 의하여 차체가 부상하게 된다. 차량의 추진은 대차에 설치된 선형 모터에 의하여 이루어지며 본 논문에서는 부상만을 다룬다.

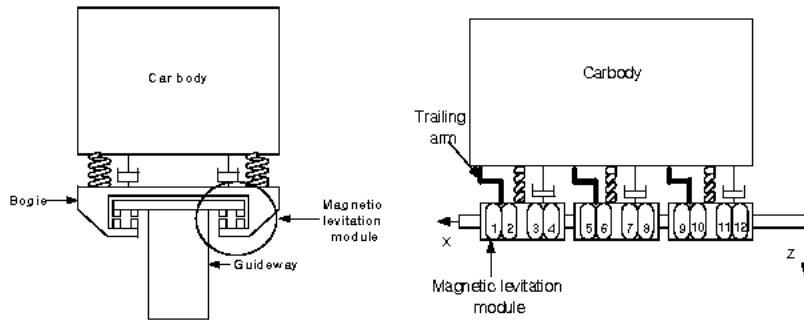


그림 2. 도시형 자기부상열차 UTM01의 차량과 고가궤도의 관계

2.2 자기부상력

그림 3.에서와 같은 전자기력은 갭, 갭의 미분, 전류 및 제어법칙의 함수이다. 전자기력은 비선형적이고 수학적으로 상세하게 묘사하기 힘들다. 차량과 궤도의 동적 상호작용 해석에 있어서는 선형모델이 주로 이용된다. 다음과 같은 선형모델이 자기부상력을 표현하는데 이용된다.

$$F = F_0 + k(s - s_0) + cs' \quad (1)$$

본 논문에서는 식(1)의 k, c 를 추정하기 위하여 참고문헌 [8]의 연구결과를 이용한다. 여기서, 자기부상력은 분포하중이나 현실적인 해석을 위하여 유한개의 집중하중으로 표현된다.

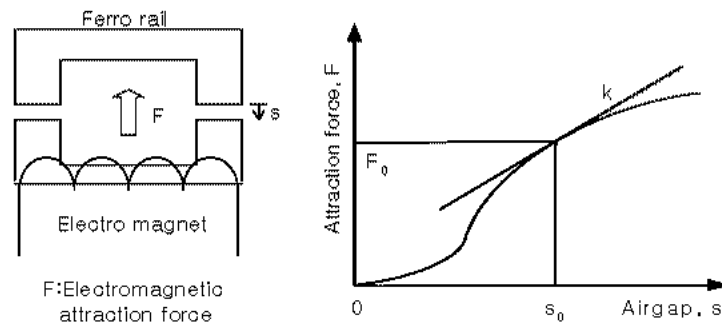


그림 3. 전자기력 특성 곡선

2.3 차량

그림 1.의 차량은 3개의 대차로 구성된다. 대차와 차체 사이에는 각 대차당 공기 스프링 2개, 감쇠기 2개, 전후 견인바로 구성된다. 대차의 1차 현가장치는 자기부상 모듈로 구성된다. 차량의 모델링은 직교좌표계를 이용하는 다물체 동역학이 이용된다. 다물체동역학에 대한 상세한 이론은 참고문헌 [10]으로 대치한다. 다물체 동역학의 최종적인 운동방정식은 식(2)와 같다. 식(2)에는 물체, 구속조

건, 힘요소가 포함되어 있다. 본 논문에서는 차량의 모든 부품을 고려하여 모델한다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (2)$$

2.4 고가레도

본 논문에서는 고가레도가 그림 4와 같은 Bernoulli-Euler beam 으로 표현된다. Bernoulli-Euler beam 모델에 의한 운동방정식은 참고문헌 [9]에 상술되어 있다. Bernoulli-Euler beam 의 평형방정식은 식(3)으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(EA(x) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) = 0, \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (3)$$

식(3)을 이용한 유연보의 유한요소 운동방정식은 식(4) 표시된다. 자기부상력은 식(4)의 우변에 포함되게 된다. 즉 레도와 대차의 잭과 잭의 속도를 감지한 후 식(1)을 이용하여 부상력을 계산하여 식(4)의 우변에 삽입하게 된다.

$$[M]_e \ddot{v}_e + [C]_e \dot{v}_e + [K]_e v_e = P_e \quad (4)$$

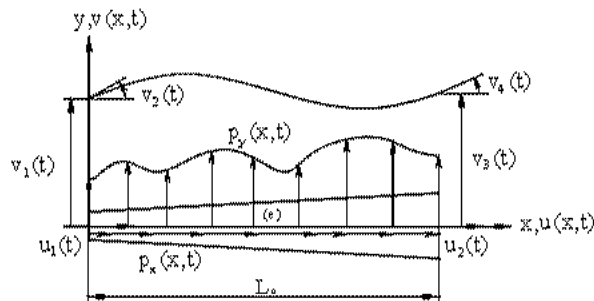


그림 4. 유한요소 Bernoulli-Euler beam

2.5 수치해석

자기부상열차/고가레도의 동적 상호작용 시스템 운동방정식은 식(2)와 식(4)를 연성하여 구성한다. 연성된 시스템 운동방정식의 해는 미분대수방정식 해법을 적용하여 얻게 된다. 본 논문에서는 이를 위하여 ODYN 프로그램이 자체 개발되어 이용된다[11].

3. 적용

2.장에서 제안한 자기부상열차/고가레도의 동적 상호작용 해석 방법을 그림 1.의 UTM01에 적용하였다. 그림 5.와 같이 해석은 2개의 경간으로 구성된 한 구간을 대상으로 한다. 유연보의 유한요소 수는 8개로 하였다. 그림 6.은 차량 속도가 9km/h일 때의 거더의 처짐[A점]을 보여주고 있다. 그림 7.은 동일 조건에서의 실험에 의

한 처짐을 보여주고 있다. 전체적인 변형 거동 형상이 유사하며 최대 처짐에 있어서는 해석에서 약 5.5 mm, 실험에서는 약 5 mm로 유사함을 알 수 있다. 이를 통하여 본 논문에서 제안한 방법이 적용 가능함을 보여준다. 그림 8.은 차체의 가속도로 물론 외란이 없고 저속이기 때문에 가속도 크기는 작지만 가속도를 이용하여 승차감을 평가할 수 있음을 보여준다. 그림 9.는 주행속도 증가에 따른 변위 응답을 보여주고 있다. 설계 속도 120 km/h 까지 큰 차이가 없는 것을 나타내 현 차량의 임계속도는 120 km/h 이상인 것을 알 수 있다.

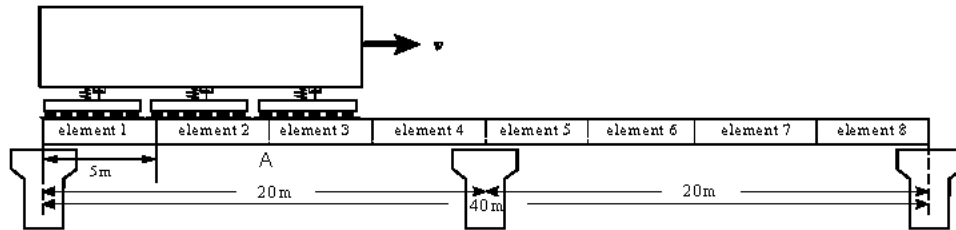


그림 5. 자기부상열차/레도 동적 상호작용 해석 모델 형상

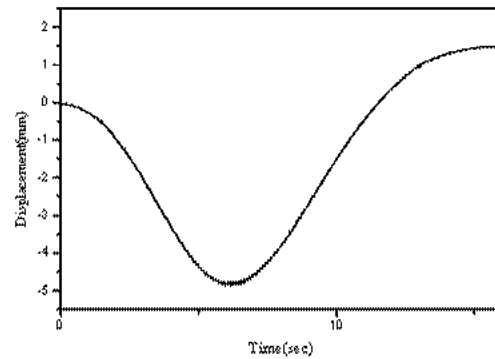
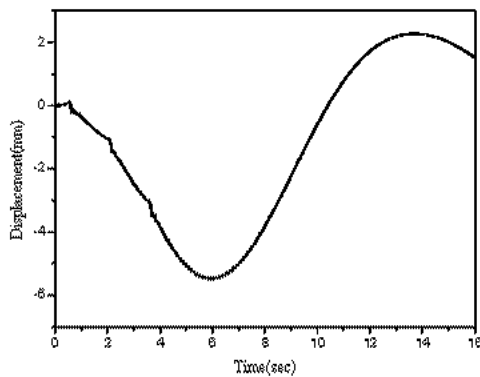


그림 6. 해석에 의한 거더 A점의 처짐 응답

그림 7. 실험에 의한 거더 A점의 처짐 응답

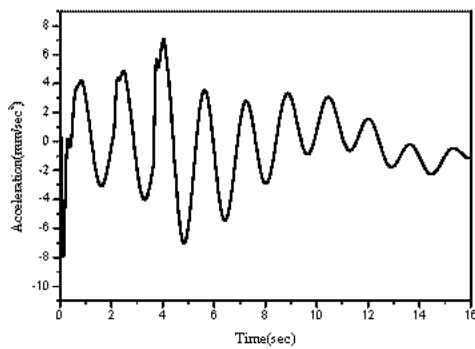


그림 8. 차체의 수직 가속도

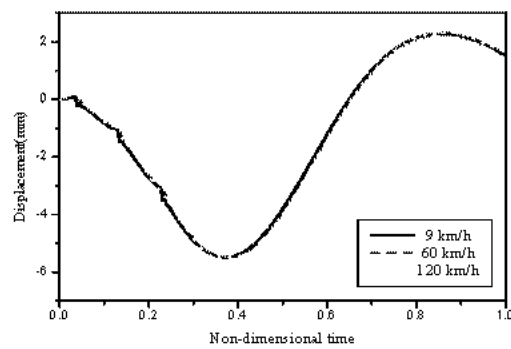


그림 9. 속도 변화에 따른 A점의 처짐 응답

4. 결론

본 논문에서는 자기부상열차/고가레도 동적 상호작용 해석을 위하여 다물체동역학 기반으로 고가레도를 유연 보로 모델하는 방법을 제안하고 도시형 자기부상열차 UTM01에 적용하였다. 제안된 방법에 의한 결과를 실험과 비교한 결과 유사함을 알 수 있었다. 이를 통하여 제안된 방법을 자기부상열차/레도의 동적 상호작용을 이해하고 설계하는데 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 특히, 다물체 동역학을 기반으로 해석 방법을 제안하였기 때문에 시스템의 상세 모델링 및 주행환경의 다양화가 가능하다. 제안된 방법의 효용을 높이기 위해서는 제어기의 통합 해석 및 레도의 불규칙 모델이 포함될 필요가 있다.

참고문헌

1. W. Kortum, W. Schwartz, and I. FayeFont(1988), "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.
2. H. Tsunashims, T.F. Tzeng and T.C. Wang(1994), "Dynamics of a Mechanically Controlled Permanent Magnet Suspension for Maglev Transport Vehicle," Transportation Systems, ASME, DSC-Vol.54/DE-Vol. 76.
3. Y. Cai, S.S. Chen, D.M. Rote, and K.T. Coffey(1994), "Vehicle/Guideway Interaction for High Speed Vehicle on a Flexible Guideway," Journal of Sound and Vibration, Vol. 175, No. 5, pp. 625-646.
4. Y. K. Tzeng and T.C. Wang(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.
5. A. Seki and Y. Osada(1996), "Dynamics of the Bogie of a Maglev System with Guideway Irregularities," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 5043-5045.
6. C.F. Zhao and W.M. Zhai(2002), "Maglev Vehicle/Guideway Vertical Random Response and Ride Quality," Vehicle System Dynamics, Vol. 38, No. 3, pp. 185-210.
7. J.S Kim and J.S. Park(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.
8. H.Y. Han(2003), "A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle," JSME International, Vol. 46, No. 4호 pp. 1497-1501.
9. 박찬중, 박태원(2000), "유연한 보 구조물 위를 이동하는 구속 기계계의 동역학 해석(I):일반적인 접근법", 한국정밀공학회지, 제 17권 제 11호, pp.165-175.
10. E.J. Haug(1989), *Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems*, Vol. I: Basic Methods, Allyn and Bacon.
11. 한형석, 이재경, 서종휘, 송현석, 박태원(2003), "객체지향 개념을 이용한 다물체 동역학 해석 시스템 개발", 한국정밀공학회지, 20권 8호 pp.115-125.