

FEM을 이용한 자기부상열차/궤도 동적 상호작용 시뮬레이션

Simulation of Dynamic Interaction Between Maglev and Guideway using FEM

한형석* 김동성* 이종민* 강흥식*
Han, Hyung-Suk Kim, Dong-Sung Lee, Jong-Min Kang, Heung-Sik

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 introduces a dynamic interaction simulation technique that applies FEM. The proposed method uses FEM to model the elevated guideway and the Maglev vehicle, which is different from conventional studies. Because the proposed method uses FEM, it is useful to calculate the deformation of the elevated 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 according to velocity increase and can be reviewed again. From the result of the study, we concluded that FEM simulation of the dynamic interaction between the maglev vehicle and the guideway is possible.

1. 서론

그림 1.과 같이 자기부상열차는 고가궤도를 주행하는 것이 많은 경우이다. 고가궤도로 강, 알루미늄 및 콘크리트 보 등이 이용되며 상단에 레일이 설치된다. 구조상 고가궤도는 자기부상열차 운행 시 동적 상호작용에 의한 변형을 일으킨다. 차량은 2단계의 현가장치로 구성되어 있다. 1차 현가는 자기부상 모듈이며 2차 현가는 일반 차량과 유사하게 공기 스프링, 감쇠기, 견인바 등으로 구성된다. 그러므로 자기부상열차와 고가궤도는 하나의 동역학 시스템이다. 자기부상열차 주행 시 차량과 고가궤도의 동적 상호작용 특성은 차량 및 궤도의 설계 측면에서 중요한 인자가 된다. 특히 중요한 것이 임계속도로 차량과 고가궤도의 공진이 발생하는 속도이다. 승차감 및 자기부상 제어기 설계에 있어서 자기부상

* 한국기계연구원, 정회원

열차/고가궤도의 동적 상호작용에 대한 해석 기술 및 이해가 또한 요구된다. 더 나아가 주행 중 궤도에 발생하는 동충력에 대한 이해가 필요하다.

자기부상열차/궤도의 동적 모델링은 전형적으로 궤도를 2차원 Bernoulli-Euler beam 방정식에 기초를 둔 모드 중첩으로 표현하여 왔다[1-6]. 차량은 강체 저 자유도로 표현하는 것이 일반적이었다. 이러한 접근법은 자기부상열차/고가궤도의 동적 상호작용의 기본적인 특성을 이해하는데 유용하게 이용되어 왔다. 그러나 동적 상호작용의 깊은 이해와 더 많은 정보를 얻기 어려운 측면이 있다. 국내에서 3차원 전체차량 기반의 동적 모델링 및 시뮬레이션에 대한 연구가 수행되었다[8]. Han에 의한 연구는 차량 및 자기부상 궤어기는 3차원적으로 모델되었으나 고가궤도의 유연성 고려는 이루어지지 않았다.

본 논문은 자기부상열차/고가궤도의 동적 상호작용 해석을 위한 새로운 모델링 기법을 제안하는데 목적이 있다. 제안된 모델링 기법은 차량 및 고가궤도를 전체적으로 FEM으로 표현하는 것으로 사례가 없는 접근법이다. 제안된 기법과 대변형 유한요소 해석 프로그램 LS-DYNA를 이용하여 그림 1.의 UTM01에 적용한다. 연구 결과 제안된 방법이 자기부상열차/고가궤도의 동적 상호작용 해석에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

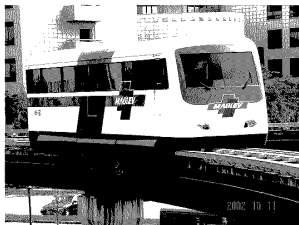


그림 1. 도시형 자기부상열차 UTM01

2. 모델링

2.1 자기부상열차

그림 1.의 차량을 그림 2.와 같이 유한요소로 모델한다. 차량은 강체 구속조건을 적용하여 절망과 관성을 부과한다. 대차는 3개로 구성되며 상대변형이 가능하도록 한다. 2차 현가를 구성하는 공기스프링, 감쇠기, 부시, 권인바를 LS-DYNA의 스프링-댐퍼를 표현하는 DISCRETE 요소로 모델한다. 감성 및 감쇠계수는 모두 선형으로 가정한다. 그림 2.는 차량의 유한요소 모델을 보여주고 있다.

2.2 자기부상력

일반적으로 레우프 제어기에 의한 전자기력은 갭, 갭의 미분, 전류 및 제어법칙의 함수이다. 전자기력은 비선형적이고 수학적으로 상세하게 묘사하기 힘들다. 차량과 레도의 동적 상호작용 해석에 있어서는 선형모델이 주로 이용된다. 다음과 같은 선형모델이 자기부상력을 표현하는데 이용된다.

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

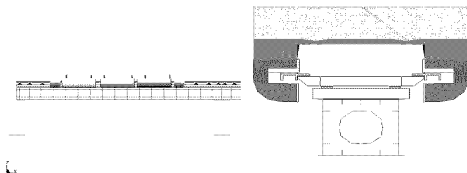


그림 2. 도시형 자기부상열차 UTM01의 용원요소 모델

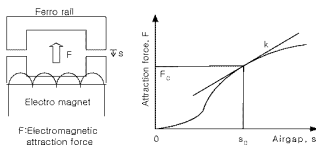


그림 3. 전자기력 특성 곡선

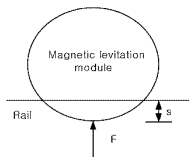


그림 4. 전자기력 표현을 위한 CONTACT 요소

본 논문에서는 식(1)의 k, c 를 추정하기 위하여 참고문헌 [8]의 연구결과를 이용한다. 여기서, 전자기부상력을 모델하기 위하여 LS-DYNA의 CONTACT 요소를 이용한다[그림4.]. 레일링 MASTER로, 대차의 자기부상모듈의 레일측 면을 SLAVE로 정의한다. 실제 차량에서는 갭을 대차의 중앙에서 측정하여 제어하기 때문에 한 자기부상모듈에서의 힘은 동일하다. 그러나 이러한 실제 현상을 유한요소 모델에서는 정의하기 어려운 CONTACT 요소로 정의된 모든 위치에서 각 기 침투량 측 갭을 측정하여 힘을 계산하도록 한다[그림4.].

2.3 고가궤도

고가궤도는 그림 5와 같이 3개의 경간에 대하여 이루어진다. 2개의 경간이 한 구간이나 차량의 진입을 고려하기 위하여 좌측 첫 번째 경간을 포함시켰다. 그러나 첫 경간과 나머지 경간 사이에는 분리되어 있다.

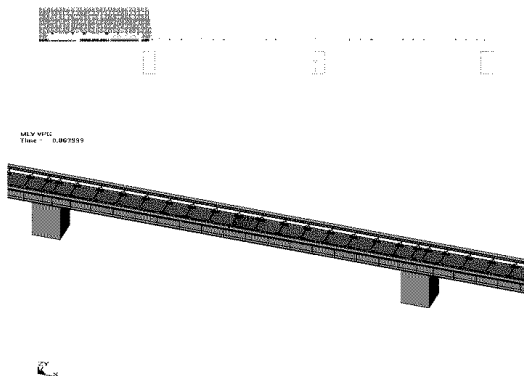


그림 5. 고가궤도 유한요소 모델

3. 해석

2.장에서 제안한 방법으로 해석을 수행하였다. 그림 6은 경간 중심에서의 수직방향 변위를 보여주고 있다. 저속인 9 km/h를 보면 일반적인 경향을 보이는 것을 알 수 있는데 차량이 경간 중앙에 위치할 최대 변위를 나타낸다. 경간 진출입시에 발생하는 변동은 실차 주행보다 크다고 평가되는데 이는 연속분포하중인 자기부상력을 FEM 모델에서는 이산화시켰기 때문으로 판단된다. 이러한 변동을 줄이기 위해서는 이산화 시 노드의 수를 증가시키는 것이다. 그림 6.에서 속도 증가에 따라 변동도 증가한다. 최고 속도인 120 km/h에서도 발생하지 않으므로 임계속도는 120 km/h 이상이라고 할 수 있다. 이를 좀더 상세히 검토하기 위하여 그림 7.에서는 경간중심 지점의 속도를 보여주고 있다. 그림 7.에서와 보너바와 같이 시간이 경과함에 따라 수렴하는 것을 볼 수

있다. 즉 시스템의 안정성이 120 km/h 까지는 보장되고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 FEM 적용의 한 장점을 보기 위한 결과로 동응력을 예시 보여주고 있다. 해석 결과 구조강도 상의 과이사항은 발생하지 않았으며 향후 고가속도 구조 설계에 응용할 수 있으리라 기대된다. 그림 9는 차체의 수직방향 변위를 보여주고 있다. 이러한 변위 및 가속도 결과는 차량의 승차감 평가에 이용할 수 있다. 이와 같이 FEM 이용하여 자기부상열차/레일의 상호작용 해석을 수행하면 다양한 동적 상호작용 응답을 얻을 수 있는 장점이 있다.

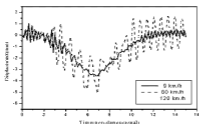


그림 6. 해석에 의한 경간 중심의 처짐 응답

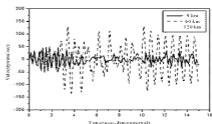


그림 7. 실험에 의한 경간 중심의 처짐 속도 응답

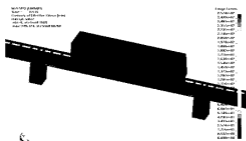


그림 8. 응력 분포

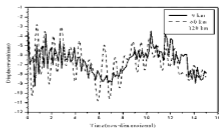


그림 9. 속도 변화에 따른 차체 중심 변위

4. 결론

본 논문에서는 자기부상열차/고가궤도 동적 상호작용 해석을 위하여 FEM을 적용하는 방법을 제안하고 도시형 자기부상열차 UTM01에 적용하였다. 제안된 방법에 의한 결과를 실험과 비교한 결과 유사함을 알 수 있었다. FEM을 적용하였기 때문에 차량 및 궤도의 동적인 거동뿐만 아니라 동응력도 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 결과는 자기부상열차 시스템의 설계에 적용가능하리라 기대된다. 해석 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 자기부상력의 상세 모델링과 현가 요소의 비선형성 고려가 요구된다.

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.