

궤도의 유연성을 고려한 자기부상열차 주행 시뮬레이션

Simulation of the Maglev Running on the Flexible Guideway

한형석* 김동성* 이종민*
Han, Hyung-Suk Kim, Dong-Sung Lee, Jong-Min

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 FEM, it is useful to calculate 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 dynamic interaction between the maglev vehicle and the flexible guideway is possible.

1. 서론

자기부상열차는 지상이 아니라 고가궤도를 주행하는 것이 일반적인 주행조건이다. 고가궤도의 주 재료로는 강, 알루미늄 및 콘크리트보 등이 이용되며 상단에 레일이 설치된다. 구조상 고가궤도는 자기부상열차 운행 시 동적 상호작용에 의한 탄성 변형을 일으킨다. 차량은 2단계의 현가장치로 구성되어 있다. 1차 현가는 자기부상 모듈이며 2차 현가는 일반 차량과 유사하게 공기 스프링, 감쇠기, 견인바 등으로 구성된다. 궤도의 유연성으로 인하여 자기부상열차와 고가궤도는 하나의 동역학 시스템을 이루게 된다. 자기부상열차 주행 시 차량과 고가궤도의 동적 상호작용 특성은 차량 및 궤도의 설계 측면에서 중요한 검토 사항이다. 특히 중요한 동적 특성이 임계속도로, 차량의 현가장치 즉 대차와 고가궤도의 공진이 발생하는 속도이다. 설계 시 최고 운행속도 내에서는 이러한 공진이 발생하지 않도록 해야 한다. 또한 승차감 평가 및 자기부상 제어기 설계에 있어서 자기부상열차/고가궤도의 동적 상호작용에 대한 해석 기술 및 이해가 요구된다. 더 나아가 주행 중 궤도에 발생하는 동응력에 대한 해석이 요구된다.

* 한국기계연구원, 정회원

유연케도를 주행하는 자기부상열차의 동적 모델링은 전형적으로 케도를 2차원 Bernoulli-Euler beam 방정식에 기초를 둔 모드 중첩으로 표현하여 왔다[1-5]. 차량은 강제 저 자유도로 표현하는 것이 일반적이었다. 이러한 접근법은 자기부상열차/고가케도의 동적 상호작용의 기본적 특성을 이해하는데 유용하게 이용되어 왔다. 그러나 동적 상호작용의 깊은 이해와 다양한 동적 응답을 얻기 어려운 측면이 있다. 국내에서 3차원 전체차량 기반의 동적 모델링 및 시뮬레이션에 대한 연구가 수행되었다 [6-7]. Han에 의한 연구는 차량 및 자기부상 제어기는 3차원적으로 모델되었으나 고가케도의 유연성 고려는 이루어지지 않았다.

본 논문은 유연케도와 차량간의 동적 상호작용 해석을 위한 새로운 모델링 기법을 제안하는데 목적이 있다. 제안된 모델링 기법은 차량 및 고가케도를 전체적으로 FEM으로 표현하는 것으로 사례가 없는 접근법이다. 제안된 기법과 구조동역학 해석 프로그램 LS-DYNA를 이용하여 한국기계연구원에서 시험운행 중인 UTM01에 적용한다. 해석과 시험에 의한 거동의 변형이 유사하였으며 UTM-01의 임계속도가 최고 운행속도 이상임을 알 수 있었다. 이를 통하여 구조동역학을 유연케도를 주행하는 자기부상열차의 동적 상호작용 해석에 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 모델링

2.1 자기부상열차

한국기계연구원에서 시험 운행중인 UTM-01을 그림 1과 같이 유한요소로 모델한다. 차체는 강제 구속조건을 적용하여 질량과 관성을 부과한다. 대차는 3개로 구성되며 상대변형이 가능하도록 한다. 2차 현가를 구성하는 공기스프링, 감쇠기, 부시, 견인바를 LS-DYNA의 스프링-댐퍼를 표현하는 DISCRETE 요소로 모델한다. 강성 및 감쇠계수는 모두 선형으로 가정한다.

2.2 자기부상력

일반적으로 페루프 제어기에 의한 전자기력은 갭, 갭의 미분, 전류 및 제어법칙의 함수이다. 전자기력은 그림 2와 같이 비선형적이고 수학적으로 상세하게 묘사하기 힘들다. 본 논문에서는 차량과 케도의 동적 상호작용 해석에 있어서는 자기부상력을 식(1)과 같은 선형모델을 이용한다.

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

본 논문에서는 식(1)의 k, c 를 추정하기 위하여 참고문헌 [7]의 연구결과를 이용한다. 여기서, 전자기부상력을 모델하기 위하여 LS-DYNA의 CONTACT 요소를 이용한다[그림3.]. 레일을 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 어려워 CONTACT 요소로 정의된 모든 위치에서 각기 침투량 즉 갭을 측정하여 힘을 계산하도록 한다[그림4]. 향후 이 자기부상력에 대한 유한요소적 모델링 기법에 대한 보완이 요구된다.

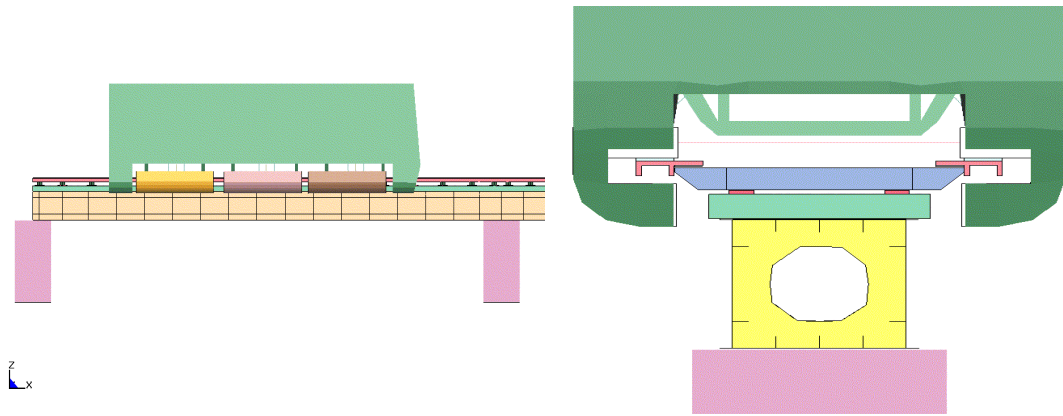


그림 1. 도시형 자기부상열차 UTM01의 유한요소 모델

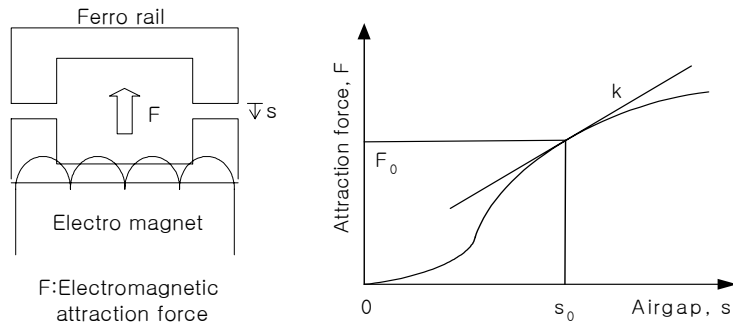


그림 2. 전자기력 특성 곡선

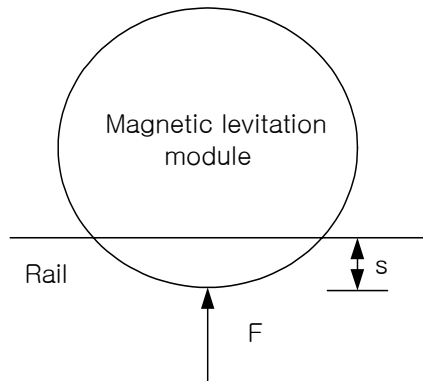


그림 3. 전자기력 표현을 위한 CONTACT 요소

2.3 고가궤도

고가궤도는 그림 4와 같이 3개의 경간에 대하여 이루어진다. 2개의 경간이 한 구간이나 차량의 진입을 고려

하기 위하여 좌측 첫 번째 경간을 포함시켰다. 그러나 첫 경간과 나머지 경간 사이에는 분리되어 있다. 고가궤도의 경계조건은 그림 5와 같이 중앙부는 고정구속이고 양단은 수직방향 운동이 가능하다. 이러한 경계조건은 실제 고가궤도와 동일하다.



그림 4. 고가궤도 유한요소 모델

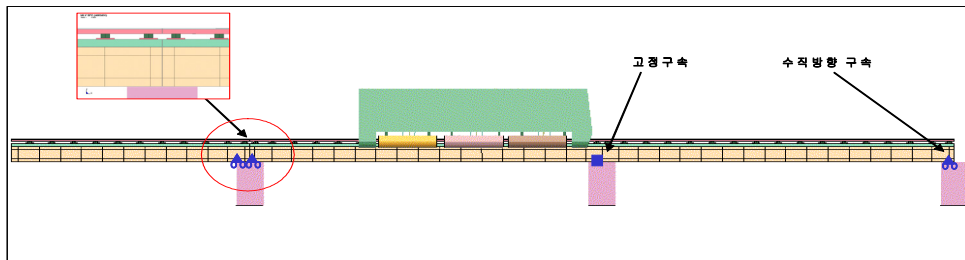


그림 5. 고가궤도 유한요소 모델의 경계

3. 해석

2.장에서 제안한 방법으로 자기부상열차의 주행해석을 수행하였다. 그림 6은 경간 중심에서의 수직방향 변위를 보여주고 있다. 9 km/h 속도에서 최대 변위는 약 5.7 mm 임을 알 수 있다. 그림 7은 동일 위치에서의 실험에 의하여 측정된 변위를 보여주고 있는데 약 5mm로 해석에 의한 결과와 약간 큰 것을 알 수 있다. 이를 통하여 해석 모델이 실험과 유사함을 알 수 있다. 이 해석 모델을 이용하여 속도를 증가시키면서 공진속도 즉 임계속도를 검토하였다. UTM-01의 최고 운행속도는 110 km/h 임으로 130 km/h 까지 증가시켰다. 그림 8은 속도에 따른 거더의 처짐에 대한 가속도를 30 km/h 증분에 대하여만 표시하였다. 그림 8에서와 같이 속도 증가에 따라 가속도 응답이 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉 공진이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 최소한 130 km/h 이내에서는 공진이 발생하지 않을 것으로 예상된다. 그림 9는 중심 대차의 수직방향 가속도를 보여주고 있다. 대차역시 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 10, 그림 11에서와 같이 동응력을 평가한 결과 강도상 안전한 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 구조동역학을 이용하여 자기부상열차/궤도의 상호작용 해석을 수행하면 다양한 동적 상호작용 응답을 얻을 수 있는 장점이 있다.

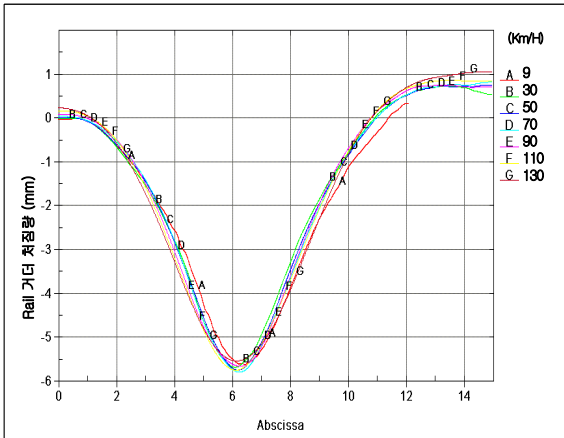


그림 6. 해석에 의한 경간 중심의 처짐 응답

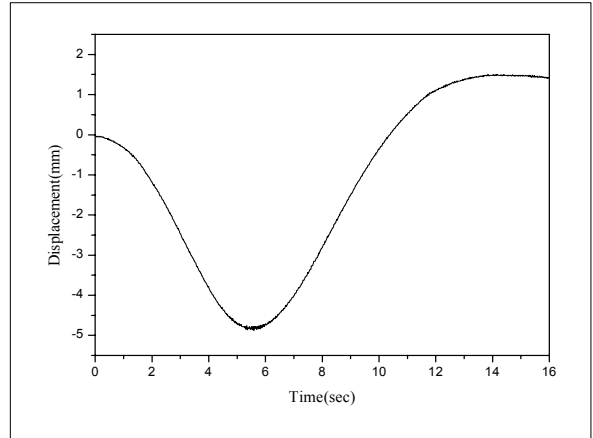


그림 7. 실험에 의한 경간 중심의 처짐 속도 응답

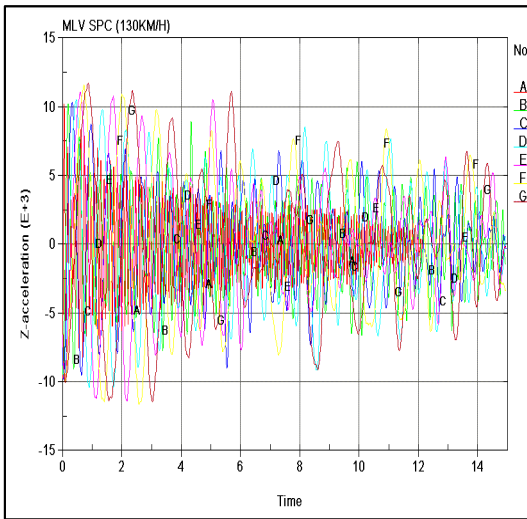


그림 8. 거저 중심점의 수직방향 가속도

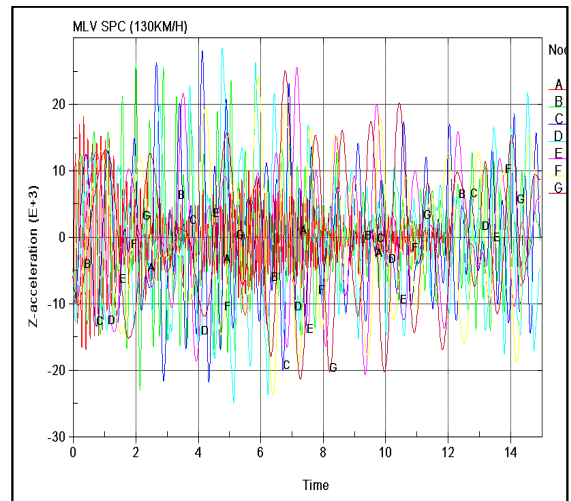


그림 9. 속도 변화에 따른 차체 중심 변위

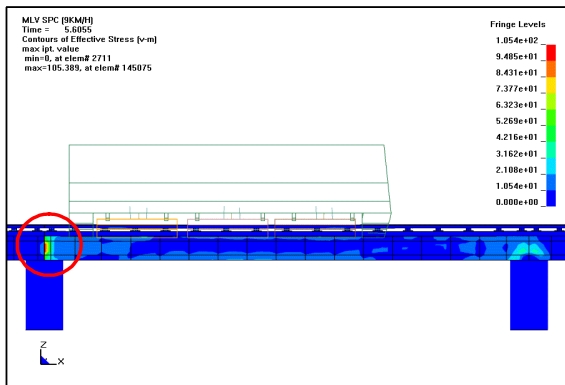


그림 10. 9 km/h에서의 동응력

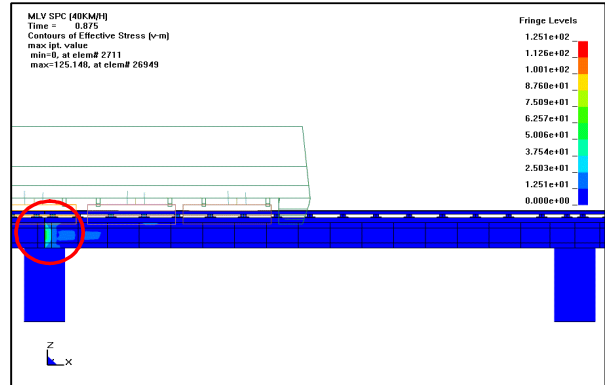


그림 11. 40 km/h에서의 동응력

4. 결론

본 논문에서는 궤도의 유연성을 고려한 자기부상열차의 주행 시뮬레이션을 구조동역학을 적용하는 것을 제안하였다. 제안된 기법을 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. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. H.Y. Han(2003), "A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle," JSME International, Vol. 46, No. 4 pp. 1497-1501.