

자기부상열차의 주행성능 시뮬레이션 기술 현황

한형석, 김영중, 김병현 | 한국기계연구원

1. 서론

자기부상열차 개발에 있어서 요구되는 핵심기술 중의 하나가 차량의 주행성능 시뮬레이션기술이다. 주행성능 시뮬레이션은 여러 목적으로 필요한 기술이다. 그 예로, 첫째, 주행 안정성 해석에 의한 부상제어기의 평가를 위해서 필요하다. 둘째, 승차감, 주행 안정성 해석에 의한 대차 시스템의 메커니즘과 현가 요소의 평가를 위해서이다. 셋째로, 자기부상열차 상용화에 있어서 초기 투자비용의 80~90%를 차지하는 고가궤도의 교각 형상, 건설 공차의 평가에 또한 이용된다. 이와 같이 주행성능 시뮬레이션은 자기부상열차의 주행성능 향상과 고가궤도 건설비 절감에 있어서 필수적으로 연구가 요구되는 분야이다.

본 고에서는 자기부상열차의 주행성능 시뮬레이션 기술에 대한 국내외 기술현황을 소개하고 향후 발전 방향을 검토하고자 한다.

2. 대차 시스템

2.1 고려사항

자기부상열차의 주행성능에 지배적인 영향을 미치는 것은 대차 시스템이기 때문에 대차 시스템에 대한 이해가 우선 요구된다. 대차 시스템은 기존의 대차와 마찬가지로 차량의 지지, 안내 및 진동절연 기능을 갖는다. 그러나 차륜방식의 대차와는 다르게 다음과 같은 특징이 고려된다.

- 초전도 반발식 자기부상열차는 부상력의 제어가 필요 없으나 동시에 1차현가(부상력)의 감쇠력이 부족하다.
- 상전도흡인식 역시 1차현가의 감쇠력이 부족하다.
- 궤도(guideway)의 형상에 불규칙이 존재한다.
- 초전도 반발식의 경우 궤도에 설치된 코일의 위치에 오차가 있어 이로 인하여 부상력, 안내력에 불규칙이 존재하고 이로 인하여 진동이 유발된다.
- 고속 운행 시 공기에 의한 진동이 발생한다.
- 궤도의 유연성에 의하여 궤도와 대차와의 동적 상호작용으로 인한 불안정성이 존재 한다.
- 궤도의 유연성으로 인하여 궤도가 진동한다.

- 차체의 유연성이 승차감에 영향을 미칠 수 있다.

2.2 사례

2.1절에서의 소개한 특징과 자기부상 방식에 따라 여러 종류의 대차가 국내외에서 개발되었다.

2.2.1 MLX

MLX는 대표적인 고속형 초전도 반발식 자기부상열차로 최고 속도 561 km/h를 기록하였다.^[1] MLX는 부상, 안내 및 추진력이 궤도의 측면에 설치된 코일과 차량에 설치된 초전도 자석에 의하여 이루어진다. 이러한 초전도 반발식은 EDS(electrodynamic suspension) 방식이기 때문에 기본적으로 1차 현가 즉 부상, 안내력에 감쇠가 부족한 특성을 갖는다.^[1] 또한 궤도에 설치된 코일의 위치에 오차가 있어 이로 인하여 진동이 유발된다. 또한 선형동기모터, 공기 저항력에 의하여 진동이 발생한다. 이러한 특성을 반영한 MLX의 대차 구조를 그림 1에서 보여주고 있다. MLX의 대차는 승차감 향상을 위하여 초전도자석(SCM)이 탄성 지지된 대차인 것이 특징이다. 자기부상력의 증가 강성은 상대적으로 크기 때문에 이로 인한 대차의 진동 모드에 대한 차체의 가속도 크기를 줄이는 것은 어렵다. 이 경우 차체의 진동은 대차의 진동과 역 위상을 갖는다. 그래서 대차 프레임을 초전도자석이 설치된 프레임과 다른 부품이 설치된 대차 프레임으로 나누었다. 그런 후 대차 프레임이 초전도 프레임에 탄성 지지되는 구조이다. 이러한 구조로 궤도 불규칙으로 인한 진동을 줄이기 위하여 초전도자석을 포함한 SCM 프레임의 질량과 다른 부품이 설치된 대차 프레임의 질량비가 작아야한다. 예로, 1 또는 1보다 작은 비로 설계하여 차체의 진동을 줄이는 효과를 얻었다.^[2] 또한 2차 현가 및 1차 현가의 감쇠력을 제어하기도 한다.^[1]

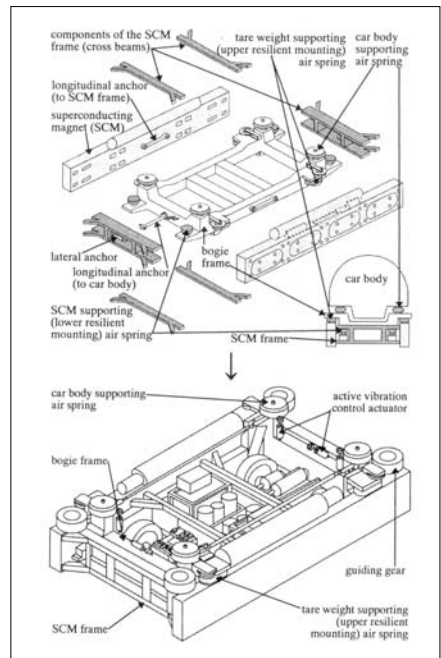


그림 1. MLX 대차 구조

2.2.2 HSST

그림 2는 2005년에 상용화된 LINIMO의 원형인 HSST대차 구조를 보여주고 있다.^[3] HSST는 도시형으로 경전철이다. 때문에 곡선선로에 대한 고려가 많은 것을 알 수 있다. 2차 현가는 각 대차의 모서리부에 4개의 슬라이드 테이블에 부착되어 있다. 슬라이드 테이블에는 전후 대차의 공기스프링이 연결되어 있다. 이 슬라이드 테이블은 곡선 주행 시 차체와 상대적으로 횡방향으로 이동이 가능하고 기계적으로 슬라이드 테이블이 연결되어 있어 횡하중을 서로 분담하는 것이 특징이다. 또한 앤티롤빔(anti-roll beam)이

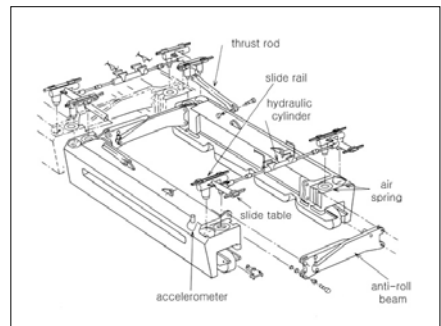


그림 2. HSST 대차 시스템

전후에 설치되어 있어 롤 방향에 대한 탄성이 존재한다.

2.2.3 TRANSPRAPH

그림 3은 독일에서 개발하여 중국 상하이에서 운행 중인 TRANSPRAPH의 대차로 이 열차는 고속형이면서 EMS(electromagnetic suspension) 상전도 흡인식이 것이 특징이다.^[4] 이 열차는 그림 3에서와 같이 부상력을 위한 전자석과 안내를 위한 전자석이 분리되어 있는 것이 특징이다. 모든 자석은 유지보수가 필요 없는 조인트를 이용하여 부상 샴시에 고정된다. 그런 후 필요한 운동은 진동감쇠탄성베어링으로 부상 샴시를 프레임에 연결하여 얻어진다. 즉, 부상 샴시와 프레임의 연결부에 유연성이 존재하도록 하여 작은 범위에서 상대운동이 가능하게 된다. 차량을 지지하기 위한 공기 현가장치는 부상 샴시의 횡단 빔에 설치된다. 기계적 안정화바가 있어서 차체의 롤 운동을 감쇠시키도록 하였다. 대차의 프레임들 간 진동을 절연시키기 위하여 강하고 유지보수가 필요 없는 탄성(금속-고무) 베어링이 연결부에 이용된다.

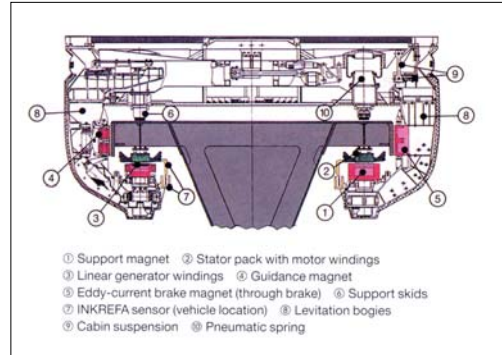


그림 3. TRANSPRAPH 대차 시스템

2.2.4 UTM

그림 4는 국내에서 개발하여 시운전 중인 UTM-01의 대차로 2차 현가장치는 2개의 공기스프링과 수직, 횡 감쇠기로 구성된다. 좌우 대차 프레임은 타이빔(tie beam)이 조인트에 의하여 연결된다. 이 조인트에 의하여 좌우 대차 프레임이 상대 운동이 가능하여 곡선 주행 시 곡선 추종성을 향상시키는 장점이 있다.

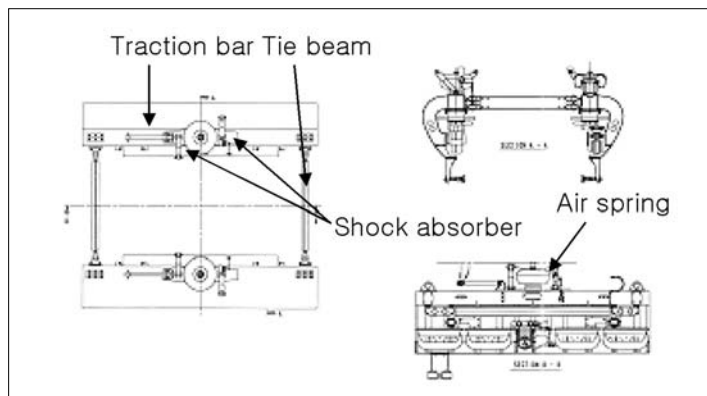


그림 4. UTM-01 대차

3. 시뮬레이션 기술 동향

본 저자들은 주행성능 시뮬레이션 기술을 목적과 모델링 기법에 따라 다음 절과 같이 구분하여 기술 동향을 소

개한다.

3.1 저 자유도 시뮬레이션

이 기술은 제어기의 설계/평가를 목적으로 하는 이론적 접근으로 설계 파라메타의 변화에 따른 동적 응답 경향을 명확하게 평가할 수 있는 장점을 갖는다. Zheng 등은 그림 5와 같이 차량이 5자유도를 갖도록 모델링하였다.^[5] 시뮬레이션 결과 차량 속도, 제어기 게인 및 외란이 차량의 동적 응답에 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 저 자유도 모델에 의한 시뮬레이션은 차량, 제어기, 궤도의 주요 설계변수의 영향을 명확하게 평가할 수 있는 장점을 갖기 때문에 향후 새로운 자기부상열차 개발에 있어서 이러한 모델링 기법에 대한 연구는 개발 초기 단계에서 활발히 이루어져야 할 것이다.

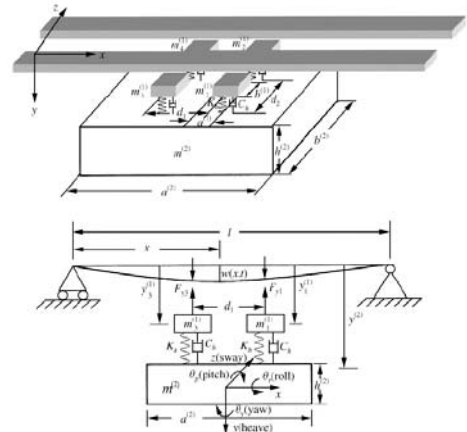


그림 5. 5자유도 차량 모델

3.2 다 자유도 시뮬레이션

다 자유도 모델에 의한 시뮬레이션은 주로 전체차량을 대상으로 한다. 수직면(평면운동)에 대한 모델링이 가장 일반적이며, 때로는 곡선추종성능을 평가하기 위하여 수평면 모델이 이용되기도 한다. 이러한 모델링은 주행안정성, 승차감, 부상제어기 평가, 차간 연결기 평가 등에 이용될 수 있다. Kusagawa 등은 초전도자기부상열차의 승차감 향상을 위하여 그림 6, 그림 7과 같은 다자유도 해석 모델을 이용하였다.^[6] 초전도 차량은 승차감 향상이 필요하다. 2차 현가 제어만으로 2차 현가로부터의 상대적인 고주파수 진동을 절연시키는 데는 부족하다. 그리고 그동안 1차 현가의 진동을 제어하지 못하였다. 그래서 최근에 집전 시스템을 이용한 1차 현가 진동 제어를 실험하고 있다. 1차 현가에 직접 감쇠력을 부가하기 때문에 최적의 고주파수 진동 제어기법이라고 할 수 있다. 이러한 해석 모델을 이용하여 새로운 승차감 향상 제어기의 설계 및 평가를 수행하였다. 그 결과 1, 2차 현가의 제어기를 설계하여 승차감 향상을 얻었다고 한다.

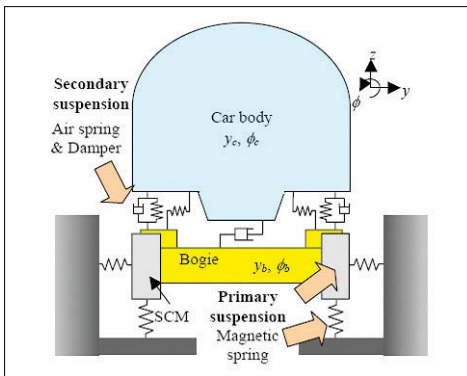


그림 6. 초전도자기부상열차의 다 자유도 해석모델 (단면)

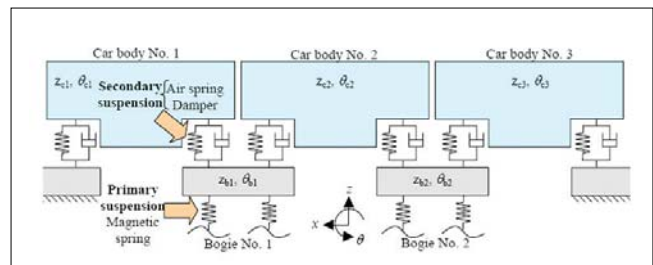


그림 7. 초전도자기부상열차의 다 자유도 해석 모델 (측면)

Zhai는 133 자유도 모델을 이용하여 TRANSRAPID08의 동역학 해석을 수행하였다.^[7] 차량 모델은 그림 8 ~ 그림 9에서와 같다. 궤도는 1차원 Bernoulli-Euler beam model을 이용하였다. 물론, 수직 방향, 횡 방향, 비틀림(twist)를 고려하려면 FEM을 이용하는 것이 더 적합하다. 그러나 오실레이션이 작다고 가정하면 이 3 방향 운동은 서로 독립적이다. 그래서 3개의 1차원 모델을 이용해도 공학적인 측면에서는 의미가 있다고 한다. 본 연구에서는 궤도를 1차원 Bernoulli-Euler로 모델하였다. 제어기는 MATLAB Simulink toolbox를 이용하여 모델하였다. 그리고 시스템 운동방정식 역시 MATLAB 환경에서 이루어졌다. 이 연구를 통하여 궤도의 고유진동수를 평가하고 제어기의 설계변수 최적화에 이용되었다.

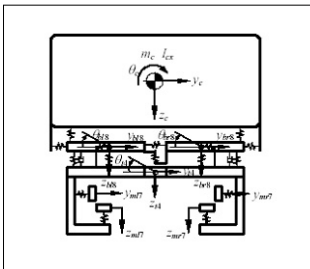


그림 8. TR08 다 자유도 해석 모델

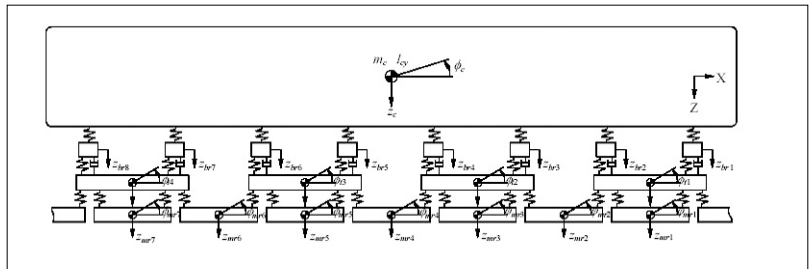


그림 9. TR08 다 자유도 해석 모델

3.3 가상시제 기반 시뮬레이션

컴퓨터의 발전과 공학용 해석 프로그램의 발전으로 실물 시제품의 제작 없이도 성능을 평가하고 설계에 반영하여 개발 기간의 단축과 시제품 제작비용을 줄이는 가상시제 기술이 다양한 분야에 응용되고 있다. 가상시제 기반의 동역학 모델링의 장점은 단순화를 최소화하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 물리적인 시제품을 대체하는 것이다. 가상시제 기반의 시뮬레이션의 장점은 또한 다양하고 상세한 해석 결과를 얻을 수 있다. 더 나아가 타 분야 해석 프로그램과의 인터페이스 또는 통합 해석이 가능한 장점을 갖는다. 그러므로 이러한 접근법은 향후 활발히 적용될 것으로 기대된다. 동역학 모델링에 있어서 가상시제 응용의 중심에는 다물체 동역학이 자리하고 있다. 다물체 동역학에서는 실제 제품과 유사하게 모델하기 위하여 모든 물체(부품)를 고려하고 그 물체들은 기구학적 조인트나 고무, 스프링 같은 힘 요소들로 연결된다. 가상시제 기반의 동역학 모델링은 Han에 의하여 시도되었다.^[8] Han은 그림 10에서의 자기부상력 F를 정의하기 위하여 다음 식(1)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{F} = & -\frac{R}{L_0} \Delta F + \frac{k_{\gamma p} k_i - R k_z}{L_0} \Delta c + \frac{k_{\gamma v} k_i}{L_0} \Delta \dot{c} + \\ & \frac{k_{a p} k_i}{L_0} \Delta z + \frac{k_{a v} k_i}{L_0} \Delta \dot{z} + \frac{k_{a a} k_i}{L_0} \Delta \ddot{z} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

R : reluctance of the magnetic circuit

L : magnet inductance

$k_{\gamma p}, k_{a p}, k_{\gamma v}, k_{a v}, k_{a a}$: the appropriate feedback gains

$$\kappa_i = \frac{\partial F}{\partial i} = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2z_0^2}$$

$$\kappa_z = \frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2z_0^3}$$

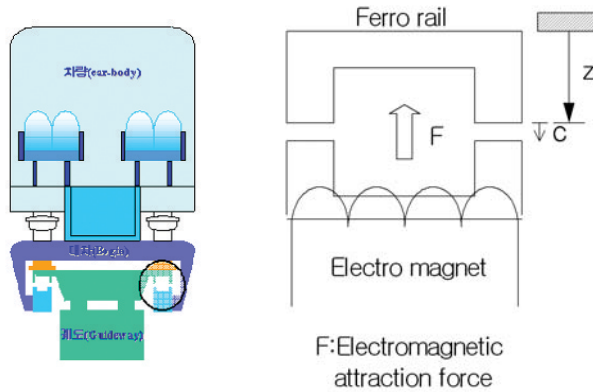


그림 10. UTM-01의 전자기력 개념도

식(1)에서와 같이 자기 흡입력 F는 미분방정식 형태로 표시된다. 식(1)에서 c, z는 그림 10에서 보는 바와 같이 전자석과 궤도 간의 공극과 영구자석의 절대적 위치를 각각 나타낸다. 식(1)에서 제어 계인이 포함되는데 이 계인은 제어기 설계에서 얻어지기 때문에 이 연구에서는 이미 정해진 값들을 이용한다. 궤도는 강체로 가정하였다. 그림 11은 가상시제 기반의 동역학 모델을 보여주고 있다. 동역학 모델링에는 가상시제 기반 시뮬레이션 프로그램 DADS를 이용하였다. 모델링 과정은 1)물체 정의 2)조인트 정의 3)힘 요소 정의 4)구동 조건 및 초기 조건 정의 순으로 이루어진다.

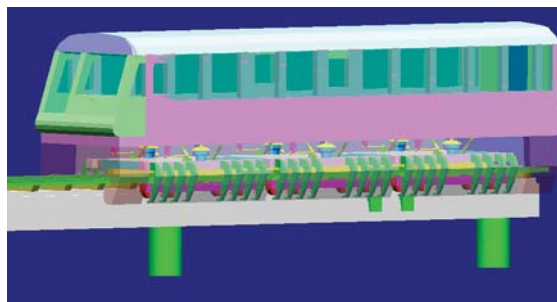


그림 11. UTM-01의 가상시제 동역학 모델

그림 12는 시뮬레이션 결과의 예로, 전기적 상수 R의 영향을 보여주고 있다. R이 증가하면 감쇠 효과가 상대적으로 커져 변위의 안정화 속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 가상시제 모델 즉 다물체 동역학 모델링 기법을 적용하여 자기 부상열차의 1, 2차 현가장치의 상수, 제어기 계인의 평가 및 최적 설계를 수행할 수 있음을 알 수 있다.

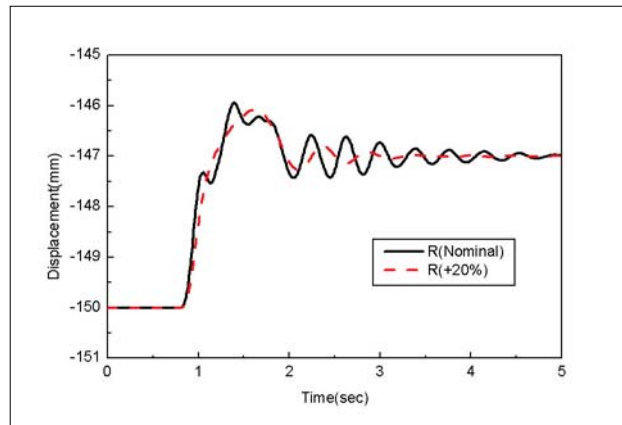


그림 12. 전기적 상수 R의 변화에 따른 대차 수직 변위

3.4 FEM을 이용한 시뮬레이션

FEM(유한요소법)을 이용하는 구조동역학은 모든 부품을 유연체로 표현할 수 있는 장점을 갖는다. 복잡한 구조를 갖는 궤도 및 차량을 모두 유연체로 모델 할 수 있는 장점이 있다. Han은 FEM을 이용하여 UTM-01에 적용하는 연구를 2004 ~ 2005년에 수행하였다.^[9] Han에 의한 이 연구에서는 그림 13에서와 같이 차량과 궤도를 모두 유한요소로 모델하였다. 차량은 차체를 비롯하여 대차 프레임 및 공기스프링과 같은 현가요소를 유한요소로 모델한다. 자기부상력은 선형화된 스프링-댐퍼로 표현된다. 그림 13에서와 같이 궤도는 40 m 구간이 고려된다. 경계조건은 실물과 같도록 중앙 지지점에서는 고정구속이며 양단에서는 횡방향 운동이 가능하다. 제안된 모델링 기법은 차량 및 고가궤도를 전체적으로 상세하게 FEM으로 표현하는 것으로 사례가 없는 접근법이다. 이 방법에서는 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. 일반적으로 페루프 제어기에 의한 전자기력은 공극, 공극의 미분, 전류 및 제어법칙의 함수이다. 전자기력은 비선형적이거나 이 연구에서는 선형 강성, 선형 감쇠 특성을 갖는 LS-DYNA의 CONTACT 요소를 이용한다. 가이드웨이를 CONTACT 요소의 MASTER로, 대차의 자기부상모듈을 SLAVE로 정의한다. 실제 차량에서는 공극을 대차의 중앙에서 측정하여 제어하기 때문에 한 자기부상 모듈에서의 힘은 동일하다. 그러나 이러한 실제 현상을 유한요소 모델에서는 정의하기 어려워 CONTACT 요소로 정의된 모든 위치에서 각기 침투량 즉 공극을 측정하여 힘을 계산하도록 한다.

차량의 주행속도 증가에 따른 동적 응답을 해석하였다. 그림 14는 주행속도 증가에 따른 궤도를 이루는 거더의 처짐에 대한 해석 및 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 14의 (a)는 해석 결과로 차량의 속도가 9 km에서 130 km/h 까지 증가할 때 안정적인 거동을 보여주고 있다. 즉, 불안정성이 나타나지 않아 130 km/h까지는 임계속도가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 최대 변위는 실험에서 약 5 mm, 해석에서는 약 5.5 mm를 나타내 서로 유사함을 알 수 있다. 즉 유한요소법에 의한 변위해석 결과는 실차와 유사함을 검증할 수 있다. 이를 통하여 해석에 의하여 주행 중의 동적 거동을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

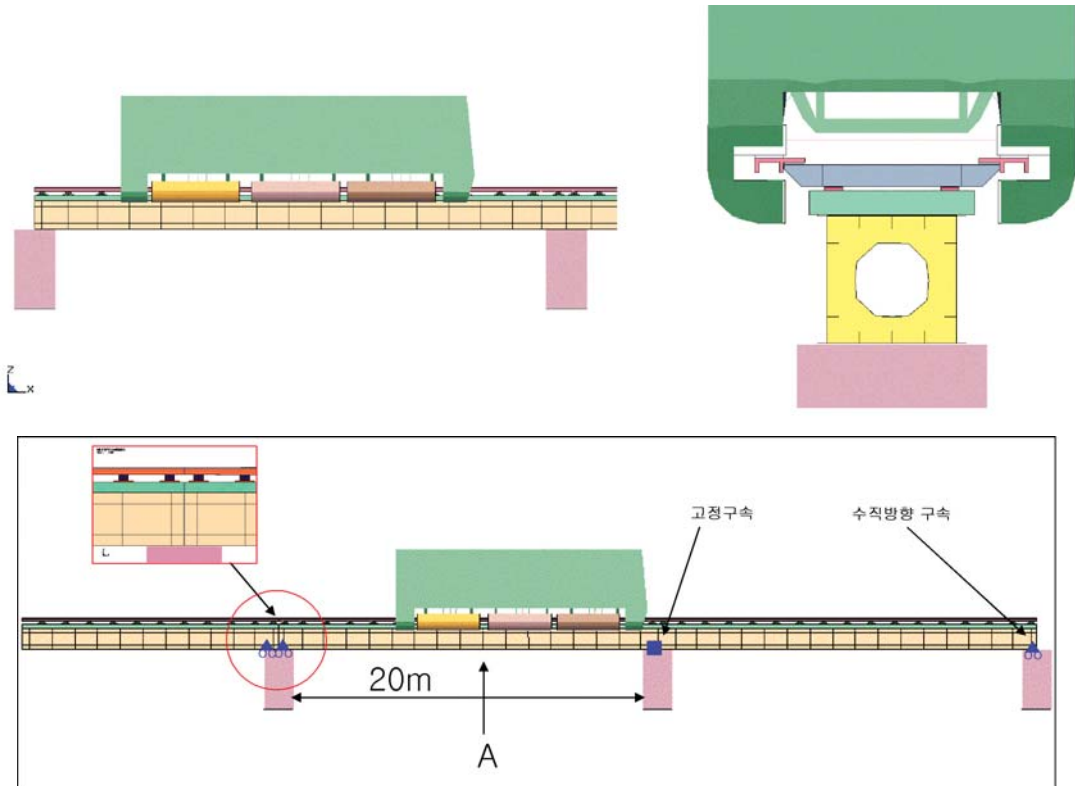
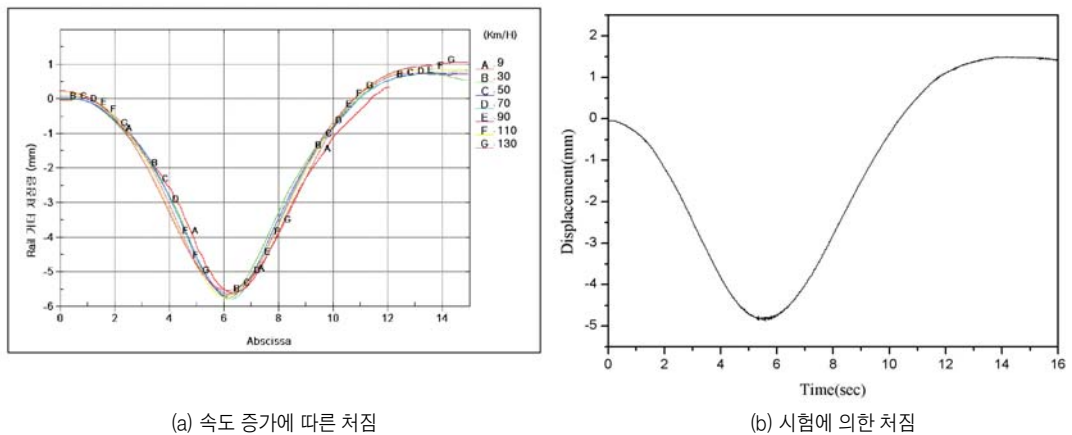


그림 13. 구조동역학을 이용한 자기부상열차 주행해석 모델



(a) 속도 증가에 따른 처짐

(b) 시험에 의한 처짐

그림 14. 거더 처짐 응답

그림 15는 주행 중에 궤도에 발생하는 동하중에 의한 동응력 해석 예이다. 유한요소법에 의한 동적 해석의 장점은 그림 15와 같은 동하중을 직접적으로 얻을 수 있다는 것이다. 해석 결과 그림 15에서 보는 바와 같이 구분된 궤도의 시작점에서 가장 큰 응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러나 그 크기는 강도를 만족하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 FEM에 의한 주행해석은 FEM에서의 제어기 표현 및 궤도의 불규칙을 삽입하는 기법을 추가한다

면 유용할 것으로 평가된다.

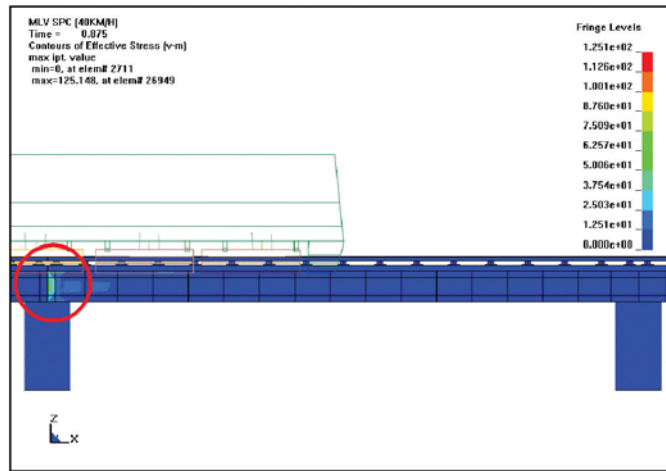


그림 15.주행 중의 동응력 해석 결과 예

4. 결 론

본 고에서 소개한 것 같이 자기부상열차의 개발에 있어서 주행성능 시뮬레이션은 성능 향상과 궤도건설 비용 감소를 위하여 요구되는 기술이다. 이미 자기부상열차를 상용화한 TRANSRAPID와 HSST도 다양한 주행시뮬레이션이 이루어졌다. 국내의 경우도 UTM-01 개발과정에서 그리고 UTM-01 성능 개선 과정에서 연구 및 일부 응용이 있었다. 현재, 국내에서 UTM-01을 기반으로 실용화가 추진되고 있는 상황에서 체계적인 주행시뮬레이션 기술의 개발 및 적용이 요구되고 있다. 3장에서 소개한 시뮬레이션을 위한 모델링 기법들은 각각 장단점이 있기 때문에 그 기법들 중 일부만 선택하여 적용하기 보다는 모든 기법을 적용하는 것이 타당하다고 사료된다.

❁ 참고 문헌

- [1] Watanabe, K., Suzuki, E., Yoshioka, H., Murai, T., Kashiwagi, T. and Tanaka, M., "Vibration Control of Maglev Vehicles Utilizing a Linear Generator," *Maglev 2004*, pp.539-549, 2004
- [2] Watanabe, K., Yoshioka, H. and Suzuki, E., "Combined Control of Primary and Secondary Suspension of Maglev Vehicles," *QR of RTRI, Vol. 45, No. 1*, pp.26-32, 2004
- [3] Paddison, J.E. and Goodall, R.M., "EMS Maglev Suspension Control System Comparison and Trends," *Maglev 1998*, pp.324-329, 1998
- [4] Ebmeyer, J., Kunz, S., Dean, R.J. and Wieschermann, J., "Mechanical Structure of the Vehicle TRANSRAPID 08," *Maglev 1998*, pp.209-213, 1988
- [5] Zheng, X.J., WU, J.J. and Zhou, Y.H., "Numerical Analysis on Dynamic Control of 5-dof Maglev Vehicle

- Moving on Flexible Guideways”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 235, No. 1, pp.43–61, 2000
- [6] Kusagawa, S., Baba, J., Shutoh, K., Masada, E., “Comparision of Total Performances for High-speed EMS-type Magnetically Levitated Railway Vehicle”, Maglev2004, pp.942–952, 2004
- [7] Zhai, W., Zhao, C., Cai, C., “Dynamic Simulation of the EMS Maglev Vehicle-Guideway-Controller Coupling System”, Maglev2004, pp.567–574, 2004
- [8] Han, H.S., “A Study on the Dynamic Modeling of a Magnetic Levitation Vehicle,” JSME International, Vol. 46, No. 4호 pp. 1497–1501, 2003
- [9] 한형석, 김동성, 이종민, “궤도의 유연성을 고려한 자기부상열차 주행 시뮬레이션,” 한국철도학회, 2005년 추계 학술대회 논문집, PP.1–6, 2005



한형석

- 한국기계연구원 e-엔지니어링연구소 선임연구원
- 관심분야 : 자기부상열차 주행성능 시뮬레이션
- E-mail : hshan@kimm.re.kr



김영중

- 한국기계연구원 e-엔지니어링연구소 선임연구원
- 관심분야 : 자기부상열차 주행성능 평가
- E-mail : youngkim@kimm.re.kr



김병현

- 한국기계연구원 e-엔지니어링연구소 책임연구원
- 관심분야 : 자기부상열차 주행성능 시뮬레이션
- E-mail : bhkim@kimm.re.kr