

자기부상 열차 동특성 예측을 위한 해석 모델 개발

Development of Simulation Model for Predicting Dynamic Behavior of Maglev Train

김지웅† 박길배* 이강운* 우관제*
Chi-Ung Kim Kil-Bae Park Kang-Wun Lee Kwan-Je Woo

ABSTRACT

Maglev train system has been continuously received attention as it provides good ride quality and low noise and vibration level. Furthermore it is an eco-friendly transport system with little dust pollutant. However the dynamic performance of the vehicle has been influenced by the track layout and the structural stability of guideways and girders, etc. Especially the levitation control of magnetic module is the most important performance of the Maglev system and is very sensitive about the control algorithm and the parameters of the controller. In this paper, the co-simulation of the control and dynamic model has been proposed and the simulation results for the running simulation on the curve track has been shown.

1. 서론

자기부상열차는 전자석을 이용하여 가이드웨이와의 접촉이 없이 부상한 상태에서 주행하는 시스템으로서 기존 철도차량에 비하여 안락한 승차감 및 저소음 및 저진동의 특성을 보이며, 분진 발생이 적은 친환경적인 교통 시스템으로 주목받고 있다.

단, 자기부상열차는 가이드웨이 위에서 일정 간극을 유지하면서 구동되는 시스템이기 때문에 전자석의 정밀한 제어가 요구되며, 외부의 외란에 대해서도 일정한 간격을 유지할 수 있는 강건한 제어기 성능이 필요하다. 이러한 제어시스템은 주행 선로의 선형이나 가이드웨이 및 거더의 구조적 안정성, 차량의 주행 상태 등에 민감한 영향을 받게 된다. 특히, 자기부상열차의 간극 제어의 특성은 전체 차량 시스템의 동적 거동에 지대한 영향을 주게 되므로 간극 제어를 위한 적절한 제어기 알고리즘 구성 및 제어기 파라미터가 선정되어야 한다.

본 논문에서는 자기부상열차의 다물체 동역학 모델과 전자석 모듈과 가이드웨이 간의 부상 제어 알고리즘 모델의 상호 연동 해석을 통한 자기부상열차의 동특성 해석 모델을 수립한 결과를 나타내었으며, 향후 이러한 해석 모델을 이용하여 자기부상열차의 제어 성능을 확인하고, 차량의 거동을 미리 예측함으로써 차량 설계에 활용할 수 있는 가능성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 자기부상열차 개요

그림 1은 인천공항 실용화 도시형 자기부상열차 노선을 보여주고 있다. 이와 같은 노선에서 운행될 자기부상열차 시험용 차량은 그림 2와 같다. 본 차량은 상전도 흡인방식의 전자석 모듈을 채용하여

† 교신저자, 현대로템(주), 응용기술연구원
E-mail : kjw73@hyundai-rotem.co.kr
* 현대로템(주), 응용기술연구원

부상력을 얻고 있고 리니어 모터를 이용하여 구동력을 발생시켜 최고 시속 110 km/h의 속도로 가이드웨이 위를 8 mm 부상하여 운행될 예정이다. 본 차량은 본격적인 실용화를 앞두고 현재 대전 소재 한국기계연구원의 시험노선에서 시험 운행중에 있다. 그림 3은 시험 노선의 가이드웨이 형상 및 거더 구성도를 보여주고 있다.



그림 1 실용화 자기부상열차 인천공항 노선도



그림 2 자기부상 열차 전경

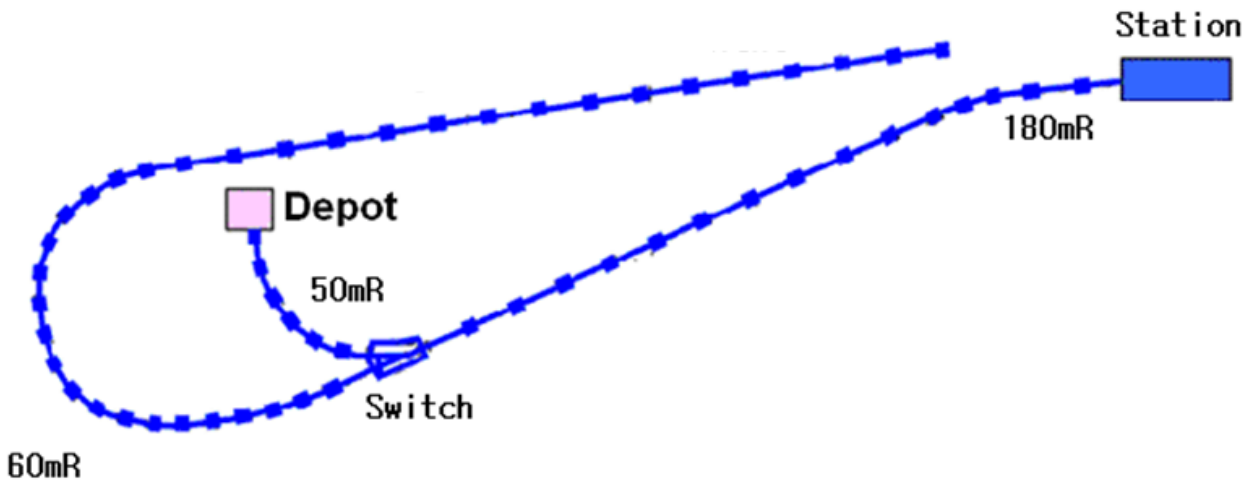


그림 3 기계연구원 시험 노선도

2.2 자기부상열차 차량 모델

표 1에 나타난 바와 같이 본 차량은 총 2량 1편성으로 량당 4대차로 구성되어 있으며 상전도 흡입 방식의 부상방식을 사용하고 있고 리니어 모터에 의해 구동되는 방식을 사용하고 있다. 그림 4는 자기부상열차 차량 해석 모델로서 표 2에 도시된 바와 같이 총 180 자유도를 가지는 다물체 동역학 모델로 구성하였다. 그림 5는 차량의 대차 모델을 포함하는 차량 해석 모델을 나타내어주고 있다. 하나의 전자석 모듈에는 4개의 전자석 코일이 구성되어 있으며, 이중 전방 2개 1셋의 코일과 후방 2개 1셋의 코일이 각각 독립적인 부상 제어가 이루어지도록 구성되어 있다.

표 1 차량 제원

구분	사양	비고
차량 구성	총 2량 (량당 4대차 구성)	
치수	전장 : 24m / 전폭 : 2.6 m	
부상 방식	U자형 상전도 흡입식	구동방식 : 리니어 모터

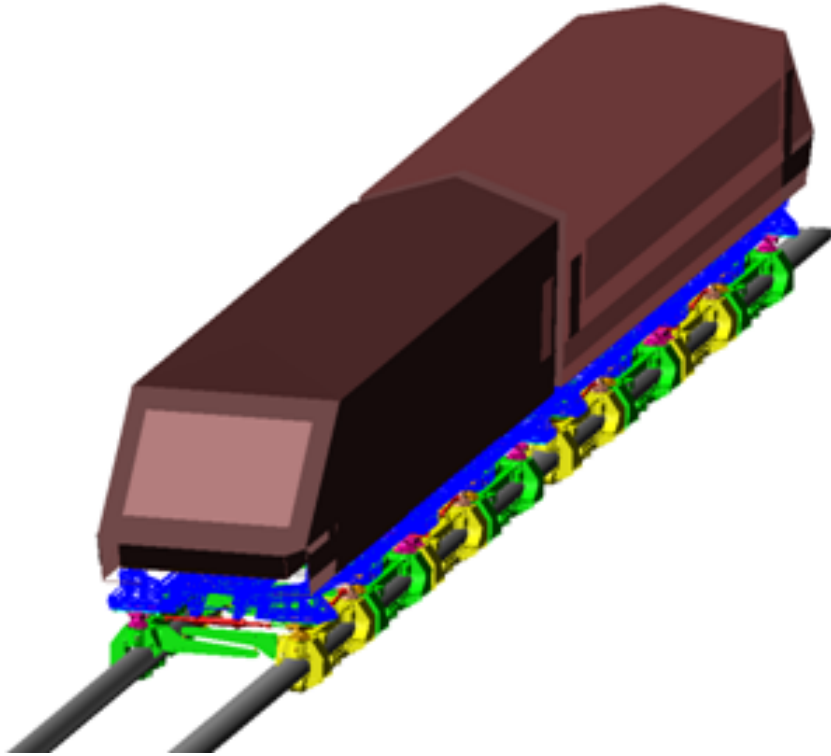


그림 4 자기부상열차 차량 해석 모델(ADAMS)

표 2 동역학 해석 모델 기구학적 구성

기구 구성		수치
Part		169
Joint		184
Force	General Force (Levitation/Lateral/Longitudinal)	320
	Traction rod Bushing	32
	Air Spring	32
	Yaw Damper	1
	Intercar Connector Bushing	2
자유도		180

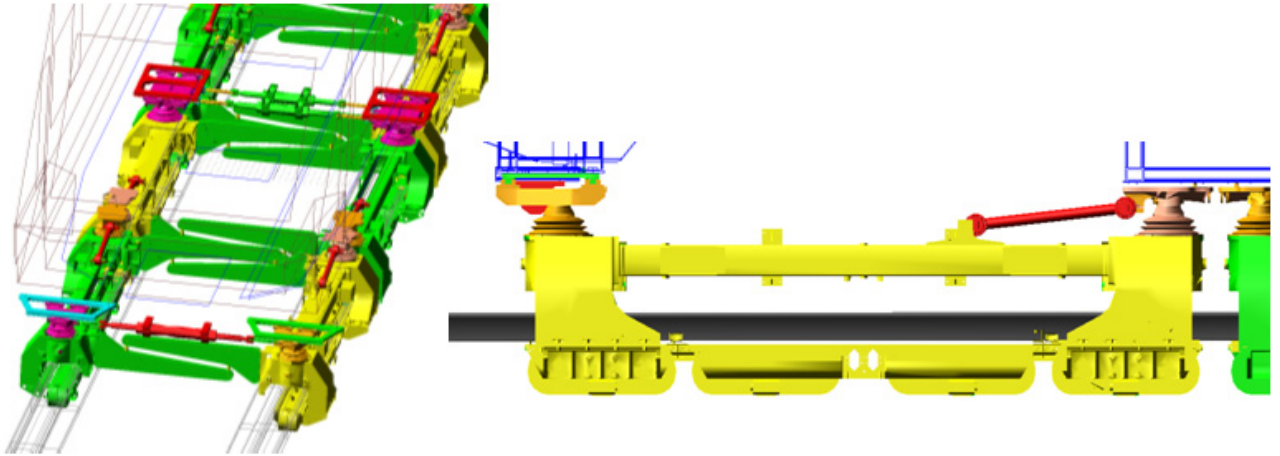


그림 5 전자식 대차 모듈을 포함한 차량 해석 모델(ADAMS)

2.3 자기부상열차 부상 제어모델

그림 6은 자기부상열차 전자식 모듈과 가이드웨이 사이의 부상력 모델을 보여주는 것으로서, 하나의 코일에 5개의 전자기력 분포하중을 구성하여 한 전자식 대차 모듈에 총 20개의 전자기 분력으로 나누어 분포하중을 형성하도록 하였다. 전자식 모듈에서 발생하는 전자기력은 전자식에 인가되는 전류와 전자식과 가이드웨이의 에어갭에 의하여 결정된다. 그림 7은 당 해석에서 사용된 전류 및 에어갭 변화에 대한 자기 부상력 변화를 나타내는 그래프로서, 전자식 모듈의 전자기력 실측 데이터를 바탕으로 하여 추출된 그래프이다. 그림에서 보는바와 같이 자기 부상력은 전자식 인가 전류에 대해서 비례하고, 에어갭에 대해서 반비례 관계를 가진다. 이와 같은 데이터를 활용하여 에어갭에 따른 전자기력을 형성시켜 해석에 사용하였다. 그림 8은 전류 및 에어갭 변화에 대한 횡방향 복원력 변화를 나타내는 그래프로서, 역시 횡방향 쏠림 변위에 대한 복원력으로서 해석에 활용하였다. 그림에서 보는바와 같이 횡방향 복원력은 전자식 인가 전류 및 횡방향 쏠림 변위에 대해서 비례 관계를 가진다. 그림 9는 부상 제어 해석에서 사용된 제어기 해석 모델이다. 제어기 입력은 전자식 모듈과 가이드웨이 사이의 에어갭과 전자식 모듈의 수직방향 가속도이며, 이를 바탕으로 하여 자기부상 제어기는 부상간극을 유지하도록 PWM 출력을 전자식 모듈에 발생시켜 부상력을 발생시키는 페루프를 구성한다. 당 제어기 모델은 MATLAB/Simulink를 이용하여 수립하였다. 이것과 ADAMS를 이용한 차량 모델과 연동하여 제어-동역학 연동 해석을 수행하였다.

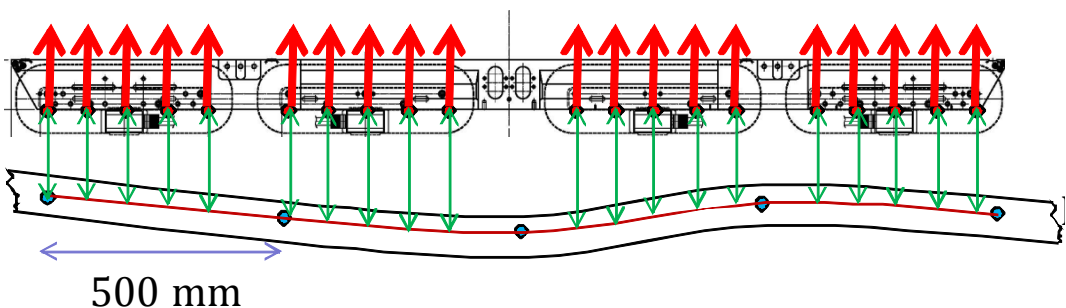


그림 6 전자식 대차 모듈과 가이드웨이 사이 부상력 분포하중 구성

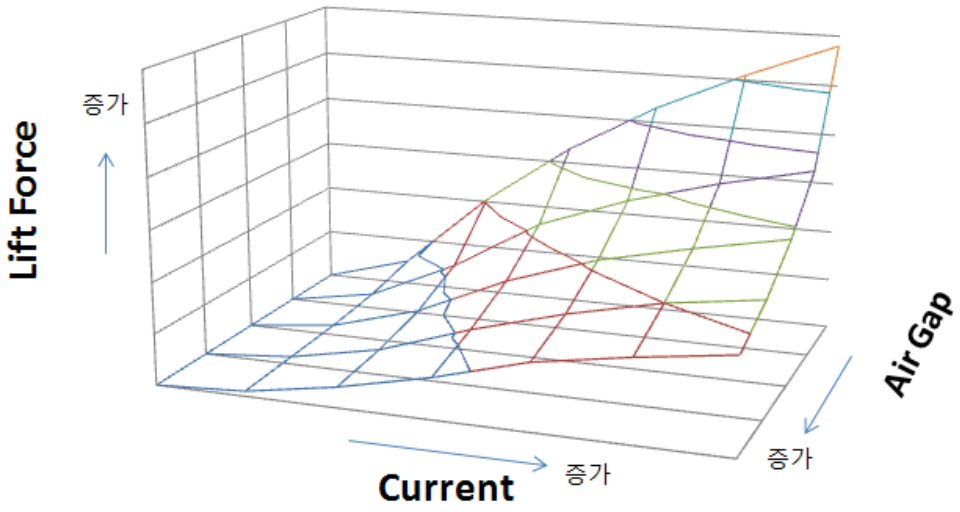


그림 7 전류 및 에어갭에 따른 자기부상력 변화

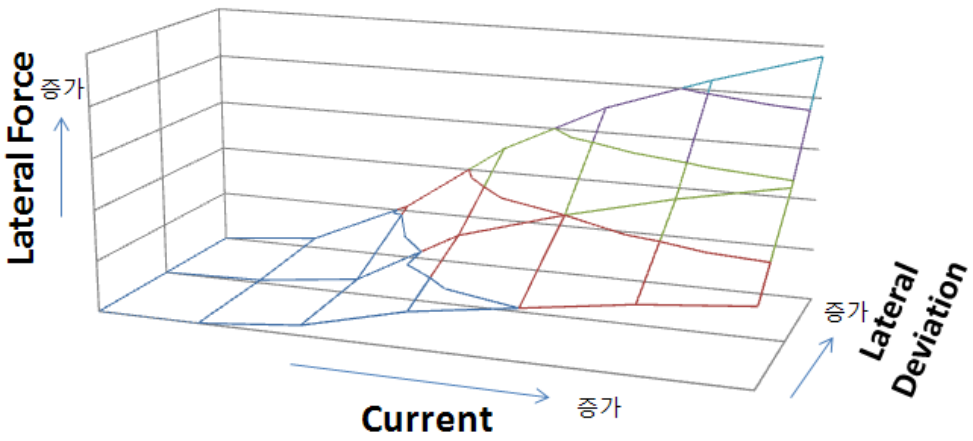


그림 8 전류 및 에어갭에 따른 횡방향 복원력 변화

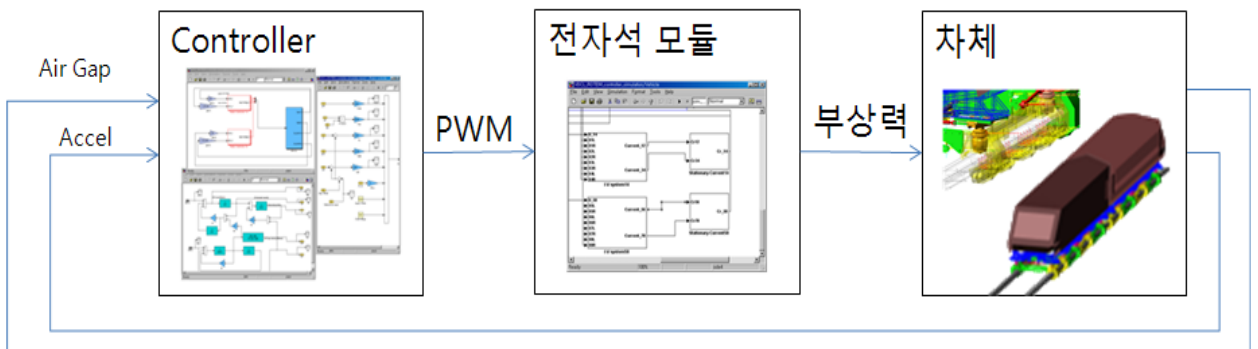


그림 9 자기부상 제어 해석 모델(MATLAB/Simulink-ADAMS)

2.4 자기부상열차 부상 제어 해석

본 해석에서는 직선구간에서 곡선구간 진입시 제어기의 안정적인 부상제어 성능을 확인하고자 그림10 과 같이 직선에서 곡선 구간으로 넘어가는 구간으로 정하여 해석 노선 조건을 구성하였다. 그림에 표시된바와 같이 차례대로 1단계는 직선 주행구간, 2단계는 완화곡선(캔트), 3단계는 정상원 곡선 구간이다. 이때 완화곡선 캔트는 2°로 설정되어 있고, 완화구간 길이는 30m, 곡선 구간 반지름은 60m로 설정되었다. 주행 속도 조건은 최초 정지에서 20km/h로 가속한 후 곡선구간 진입 전후로 정속 주행하도록 설정되었다.

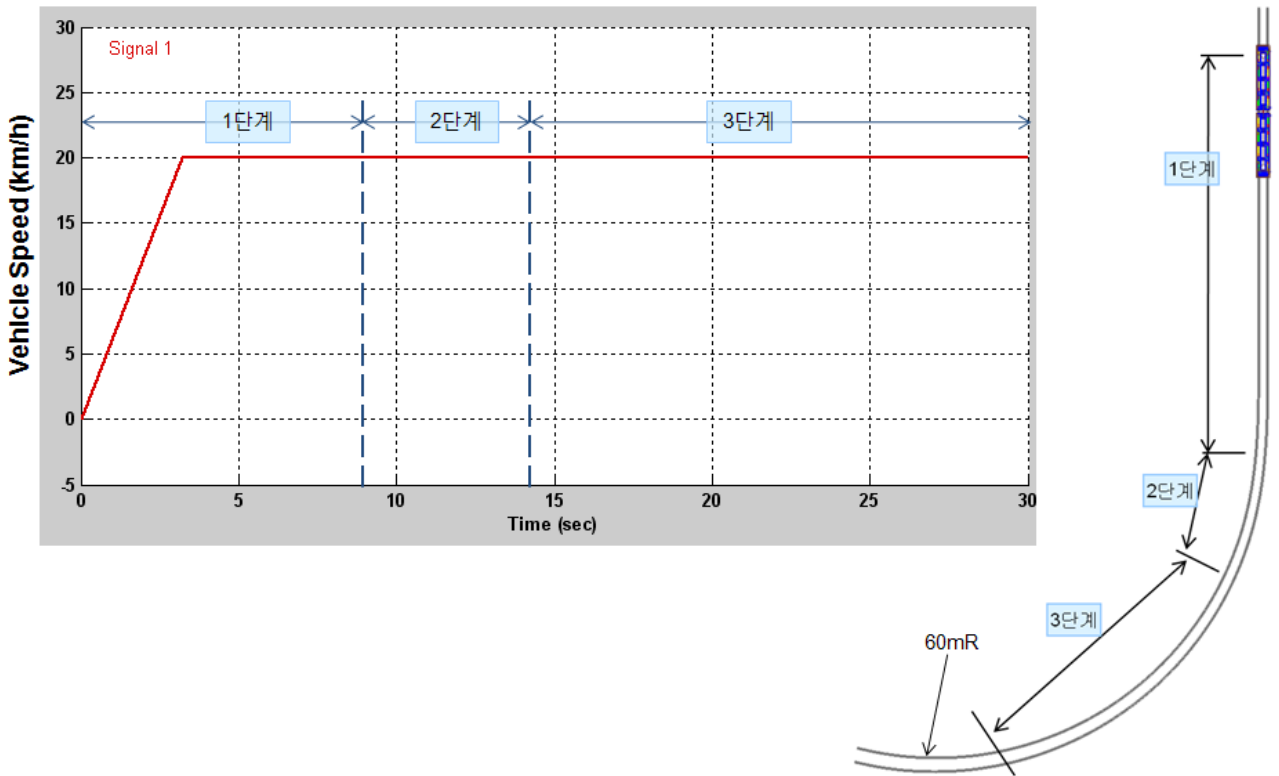


그림 10 해석 코스 및 주행 조건

2.5 해석 결과

자기부상 열차에 대한 제어해석 모델에 대한 해석 수행 결과 다음과 같은 결과를 얻어내었다. 그림 12는 각각 1번 대차의 좌측 최전단측과 중간, 최후단측 전자기력 작용점 위치의 에어갭을 나타낸 그래프이다. 각 작용점 위치는 그림 11에 표시된 바와 같다. 에어갭은 3지점 모두 최초 직선구간에서 목표 제어값인 8mm를 유지하며 정속 주행하나 완화곡선 구간(8.5초 부근)을 진입하면서 전단측(front) 지점의 에어갭은 10mm까지 상승하며 중간지점(middle)은 8.5mm, 후단측(rear)에서는 7mm 수준으로 떨어지는 결과를 보이고 있다. 이것은 완화 곡선 구간에서는 차량이 진행함에 따라 캔트(Cant)가 변하므로 전자석의 최전단측과 중간 및 후단측에서의 에어갭이 서로 달라지게 되기 때문으로 보인다. 이후 정상원 곡선 구간(13초 부근)을 진입한 이후로는 약간의 진동현상이 발생되나 대체로 안정적인 주행을 보여주고 있다. 그림 13은 해석시 입력된 제어 전류값을 나타낸다. 곡선구간에서 전단측 모듈과 후단측 모듈에 공급되는 전류의 편차가 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 곡선구간 진입시 캔트 구간에서 전단측과 후단측의 에어갭의 변동이 발생되면서 전단측은 에어갭을 줄이는 방향으로 제어가 되며, 후단측은 에어갭을 증대시키는 방향으로 제어됨에 따라 발생된 편차로 여겨진다.

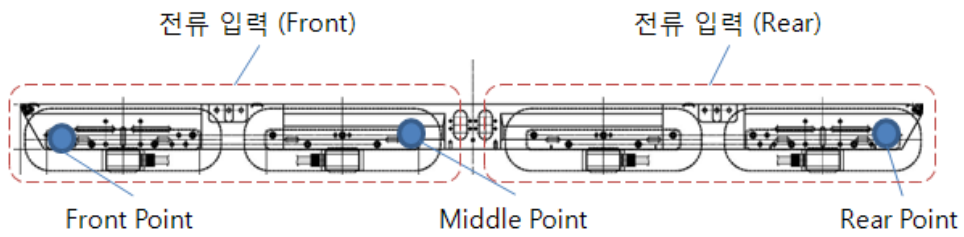


그림 11 에어갭 측정 위치와 전류 제어 입력 범위

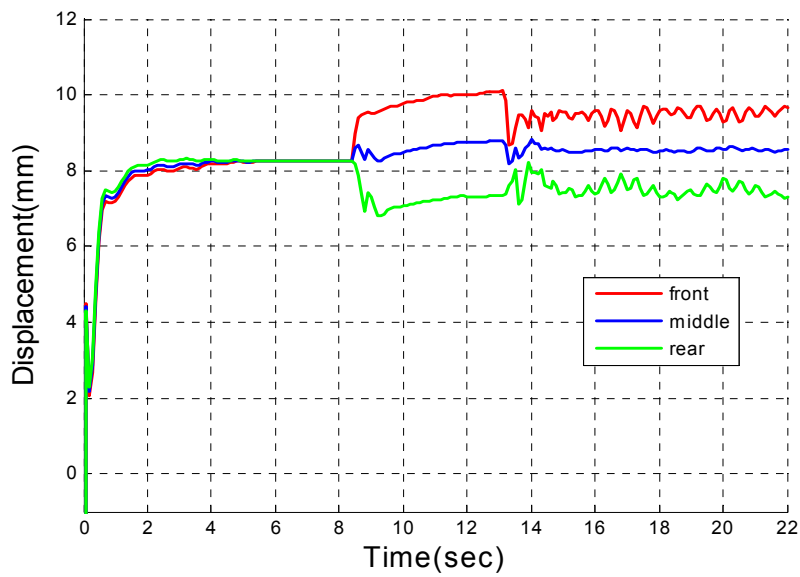


그림 12 전자석 모듈-가이드 웨이간 에어갭

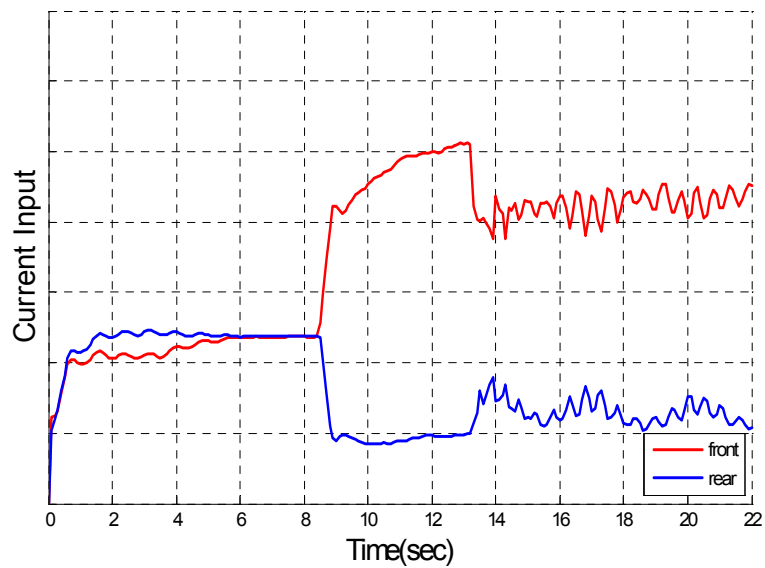


그림 13 입력 제어 전류값

3. 결론

자기부상 열차는 부상력을 제어하는데 있어서 제어 알고리즘을 어떻게 구성하고 제어 파라미터를 어떻게 설정하느냐에 따라 매우 민감한 영향을 받는다. 본 연구에서는 현재 실용화를 앞두고 있는 자기부상열차에 대한 제어기에 대한 검증을 위하여 자기부상열차의 부상 제어-동역학 해석 모델을 개발함으로써 향후 전개될 차량 개발에 있어서 보다 효율적이고 신뢰성 있는 설계, 개발에 응용하고자 한다. 이후 실제 차량 실험 결과와 비교하여 해석모델의 신뢰도를 높이는 작업을 진행하도록 할 것이다.

참고문헌

1. Sinha, P. K., "Electromagnetic Suspension Dynamics and Controls", Peter Peregrinus Ltd, London, 1997.
2. 한형석, 김영중, 신병천, 권정일, "유연궤도를 고려한 자기부상열차 주행 시뮬레이션", 한국철도학회논문집, 제9권, 제4호, pp.499-503, 2006.
3. 한형석, 이종민, 김영중, 김국진, 김동성, 김숙희, "유연다물체 동역학을 이용한 자기부상열차 동역학 모델링 연구", 한국철도학회논문집, 제9권, 제6호, pp.792-797, 2006.