중고속 자기부상열차 시뮬레이션 모델을 위한 부상시스템 매개변수 추출

Parameter estimation of levitation system of a medium to high speed Maglev

김일겸*, 하창완*†, 한형석*, 임재원*, 김창현*

Il-Kyeom Kim*, Chang-Wan Ha*†, Hyung-Suk Han*, Chang-Hyun Kim*

Abstract The development of a medium to high speed Maglev train is in the first step to customize in the range of 100 km/h to 200 km/h. The dynamic simulation model to evaluate the train performance is needed for the optimum design of the levitation system. For this reason, the parameter estimation for the levitation system which is composed of the three kinds of mechanical, electrical and magnetic components is required to make the reliable simulation model. This paper is focused on the parameter estimation for development of the levitation control system. To evaluate the dynamic performance, the levitation-guidance test equipment was installed. This equipment consists of the electromagnet, suspension system and the power feeding equipment. Based on the experiment, the parameter can be estimated and the result is compared to the dynamic simulation.

***Keywords* :** Parameter estimation, Maglev vehicle, Levitation controller, Dynamics simulation

초 록 실용화 단계에 있는 도시형 자기부상열차를 일부 개선한 시속 200km 급 중고속 자기부상열차 개발이 현재 초기 단계에 있다. 자기부상열차의 핵심기술인 부상시스템 설계, 성능예측 및 최적설계를 위해서는 신뢰성 있는 동특성 시뮬레이션 모델이 요구된다. 이를 위해서 전기, 자기, 기계 및 제어요소로 구성된 부상시스템의 매개변수 추출이 선행적으로 이루어져야 한다. 본 논문에서는 중고속 자기부상열차 부상시스템 제어성능 시뮬레이션 모델개발을 위한 매개변수 추출을 목표로 한다. 이를 위하여 전자석, 현가요소 및 전력공급장치로 구성된 단위 부상시스템 시험기를 구축한다. 실험 결과를 바탕으로 매개변수를 추출하고 이를 이용한 시뮬레이션 모델과 부상실험과의 비교검증이 이루어진다.

주요어 : 매개변수 추정, 부상제어기, 동특성 시뮬레이션

1. 서 론

자기부상열차는 바퀴 대신에 자석을 이용하여 선로로부터 부상하여 주행한다. 바퀴식과 달리 바퀴와 레일 사이의 물리적 접촉을 없애 저소음, 저진동 및 저분진의 장점을 갖는다. 또한 견인전동기를 선로에 설치하기 때문에 동력을 크게 공급할 수 있어 고속 주행이 가능한 장점을 갖는다. 이러한 자기부상열차의 친환경성과 고속 주행성능은 미래 철도교통의 한 방식으로 자리잡을 것이라 기대된다. 전자석을 이용하는 자기부상열차에 있어서의 핵심기술 중 하나는 전자석과 레일 사이의 간극 즉 부상공극을 일정하게 유지하는 자기부상 제어기술이다. 전자석에 인가하는 전류량을 조절하여 부상공극을 일정하게 유지하는 자기부상 시스템은 근본적으로 불안정하고 복잡한 시스템이다.

† 교신저자: 한국기계연구원 (hawan@kimm.re.kr)

* 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부 자기부상연구실

따라서, 부상제어계의 모든 설계단계에 있어서 세심한 주의가 요구된다. 부상계의 설계단계 또는 시험에 의한 안정화 단계에서 정확한 부상계에 대한 수학모델이 유용하게 이용될 수 있다. 수학모델을 통하여 부상제어기의 최적화와 동특성 시뮬레이션이 가능하게 된다. 자기부상열차에 대한 수학적 모델의 신뢰성을 확보하기 위하여 모델의 물리적 성질을 나타내는 매개변수의 신뢰성 있는 추정이 필수적이다. 본 논문의 목적은 중고속 자기부상열차 개발을 위한 실험용 차량에 대한 해석모델에 필요한 매개변수를 추정하는데 목적이 있다. 이를 위하여 우선 차량에 대한 기계적, 전기적 구성을 정의한다. 다음으로 각 구성품에 대한 물리적 성질을 나타내는 매개변수를 도면, 해석 및 실험을 바탕으로 얻어낸다. 구해진 매개변수는 정확한 해석모델에 입력데이터로 활용돼 제어기의 최적설계와 동특성 응답 시뮬레이션에 이용될 수 있다.

2. 매개변수 추정

2.1 구성

2.1.1 차량

Fig. 1은 중고속 자기부상열차 개발을 목표로 제작된 부상 전자석을 보여주고 있다. 이 차량의 주요 규격을 Table 1에서 확인할 수 있다. 실험용 차량의 부상과 안내방식은 전자석을 이용한다. 이를 상전도 흡인식이라 부르며 원리는 전자석과 강자성체간에 잡아당기는 힘 즉 흡인력을 이용한다. 부상전자석과 안내전자석은 대차의 하부와 측면에 설치한다. 결과적으로 대차는 선로를 작은 간극으로 감싸는 구조이다. 견인은 선형동기전동기를 이용하는데 고정자가 선로에 설치된다. 부상전자석이 전동기의 이동자가 되고 선로에 설치된 권선이 고정자가 돼 추진력을 얻는 원리이다

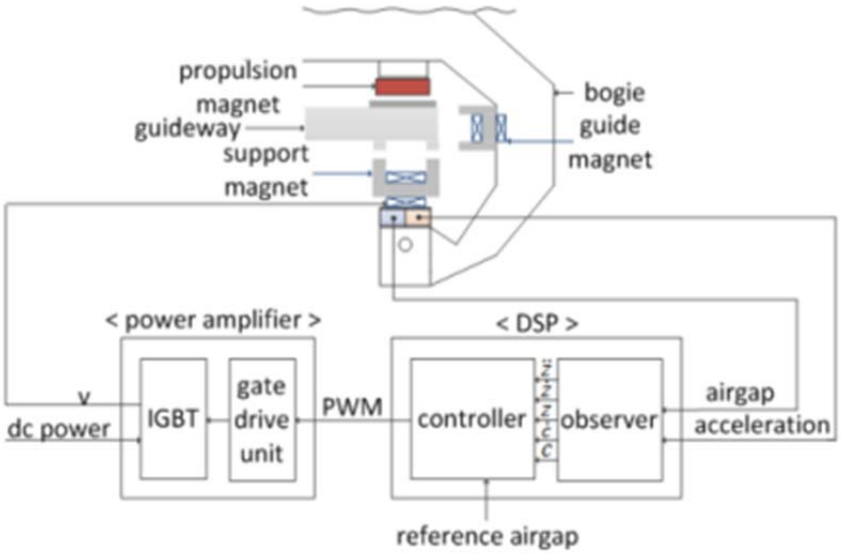

Fig. 1 Photo of the middle-speed Maglev experimental vehicle under development

Table 1 Specifications of the super-speed Maglev experimental vehicle

Items	Values
Maximum design speed	200km/h
Levitation	Electromagnet
Guidance	Electromagnet
Traction	Linear Synchronous Motor
Length	13m
Target mass	Less than 26ton
Levitation air gap	10mm
Guidance air gap	10mm
Acceleration/Deceleration	1.1m/s^2

상전도 흡인식 자기부상 제어계의 핵심은 전자석과 대응면과의 간극 즉 부상공극을 일정하게 유지하는 것이다. 이를 위해서 부상공극과 가속도를 계측한 후에 일정한 부상공극을 유지하기 위하여 전자석에 흐르는 전류량을 조절한다.

2.1.2 부상안내 시험기

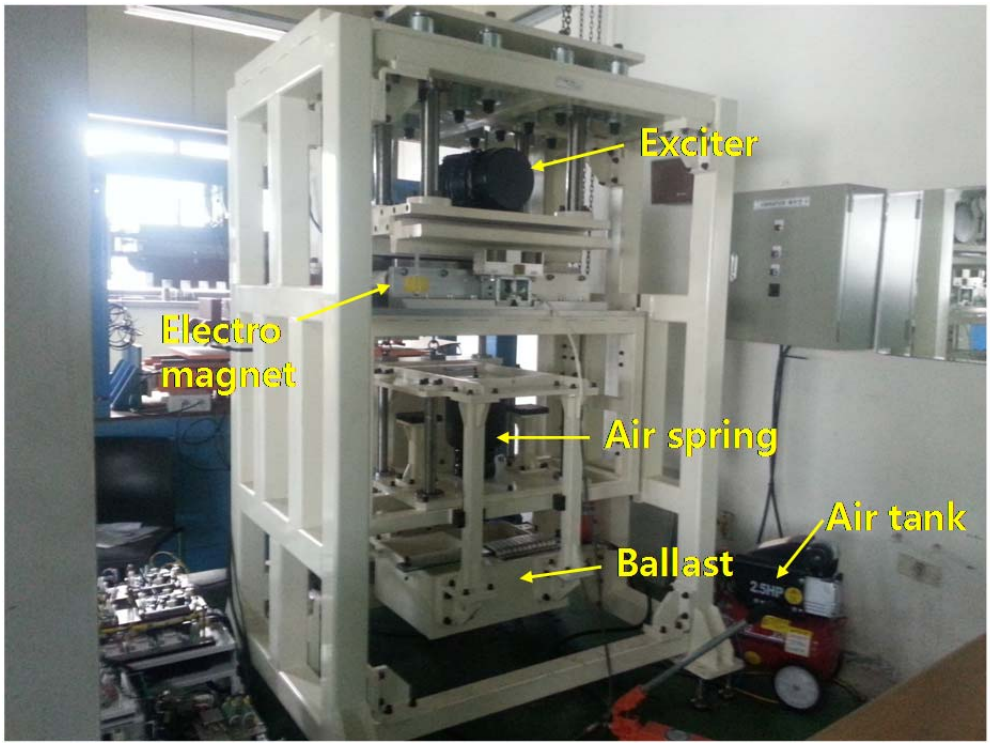

Fig. 2 Photo of the levitation-guidance test equipment

Fig. 2은 부상안내 시험기의 구조이다. 부상안내 시험기는 중고속 열차에 추가로 도입된 안내전자석과 공기스프링의 강성을 제어기 설계에 고려하기 위해 고안된 실험 장비이다. 공기스프링은 공압 조건에 따라 스프링 강성이 달라지며, 이것은 제어 시스템 전체에 영향을 미치게 된다. 따라서 부상안내 시험기에 장착된 공기스프링의 공압 조건에 따른 스프링 강성을 이용하여, 차체 등가모델의 고유진동수를 1 Hz로 맞추었다.

2.2 부상 안내시험기의 제어알고리즘

2.2.1 매개변수

Table 2는 추정된 차량과 전자석의 매개변수이다. 추정된 매개변수를 이용하여, Fig. 3과 같이 전자석의 운동방정식을 이용하여 제어 알고리즘을 구현하였다. Fig. 4는 전자석의 운동방정식을 만들기 위한 운동 변수 및 자유물체도이다. 식(1)의 경우 전자석에서 발생하는 힘에 따른 전자석의 수직방향 운동방정식을 의미한다. 식(2)에서는 부상력에 관한 식으로 공극값과 전자석에 흐르는 전류에 대한 비선형 방정식으로 표현된다. 전자석의 전류는 식(3)에 의해 전자석에 인가된 전압과 공극값에 따라 계산할 수 있다. 여기서 F: 부상력, A: 전자석 면적, R: 전자석 저항, C: 공극, v: 전압, N: 전자석 턴수, μ: 투자율을 각각 의미한다.

Table 2 Parameters and their estimates

Parameters		Properties
Magnet	N(Turn)	187
	A(mm^2)	30
	R(Ω)	0.192
	C_0(m)	0.01
	I_0(A)	55A

$$M\ddot{z} = f(C,i) - Mg \tag{1}$$

$$f(G,i) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4}\left(\frac{i}{C}\right)^2 \tag{2}$$

$$v(t) = Ri(t) + \frac{d}{dt}\left[L(C,i),i(t)\right] = Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2C(t)}\frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2\left[C(t)\right]^2}\frac{dC(t)}{dt} \tag{3}$$

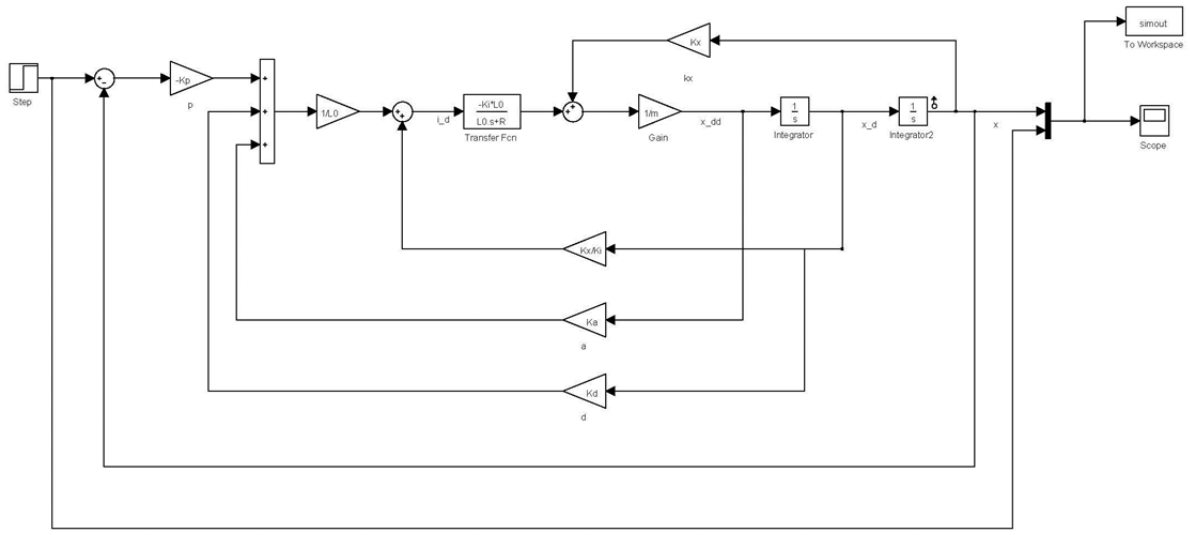

Fig. 3 Control algorithm of the levitation magnet system.

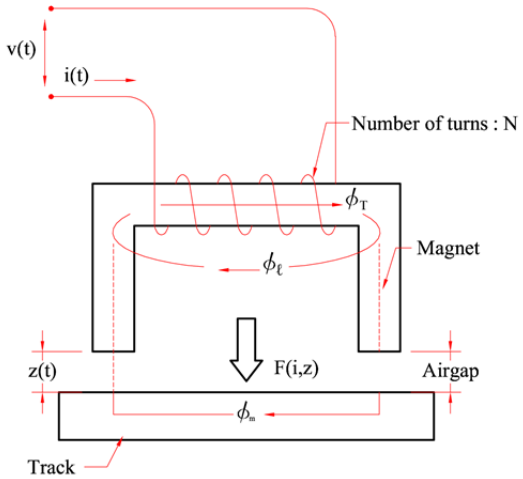

Fig. 4 Suspension of an object by an electromagnet fixed to ground.

부상 시스템의 제어 특성을 규명하기 위해, 개루프(open loop)에서 전달함수를 구하였으며 이에 대한 보드선도를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 시스템의 대역폭(bandwidth)는 약 8.6Hz 정도로 중고속 자기부상열차에서 요구되는 주파수응답특성은 만족하는 것을 확인하였고, 게인여유(gain margin) 15.8dB, 위상여유(phase margin) 64.1으로 시스템에 대한 강인성 또한 어느 정도 확보되었다고 확인할 수 있었다. 시간응답특성으로 분석해 보았을 때, 상승시간은 0.35 sec이고, 감쇠비는 대략 0.7정도로 설계되어 과도응답특성 또한 만족스럽게 제어기가 설계되었다는 것을 확인하였다.

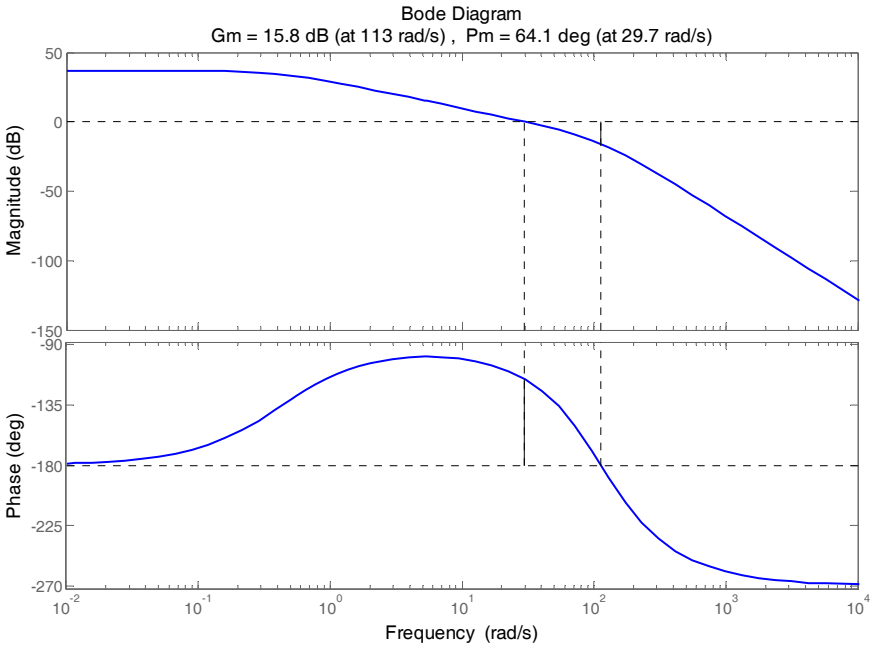

Fig. 5 Open loop frequency response function

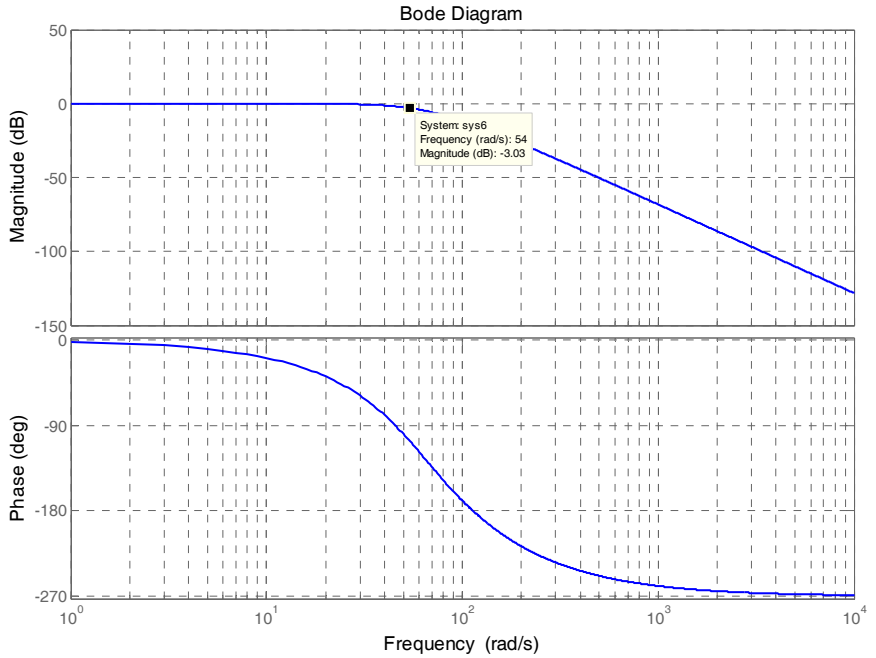

Fig. 6 Closed loop frequency response function

2.2.2 시스템 시뮬레이션

Fig. 7은 사다리꼴 모양의 기준공극에 따른 부상계 과도응답 특성을 보여주고 있다. 착지상태에서 서서히 부상하여 공칭점까지 10㎜ 부상했다가 다시 착지하는 부상-착지 과정을

시뮬레이션 한 것으로 설계한 부상계 시스템이 기준입력을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

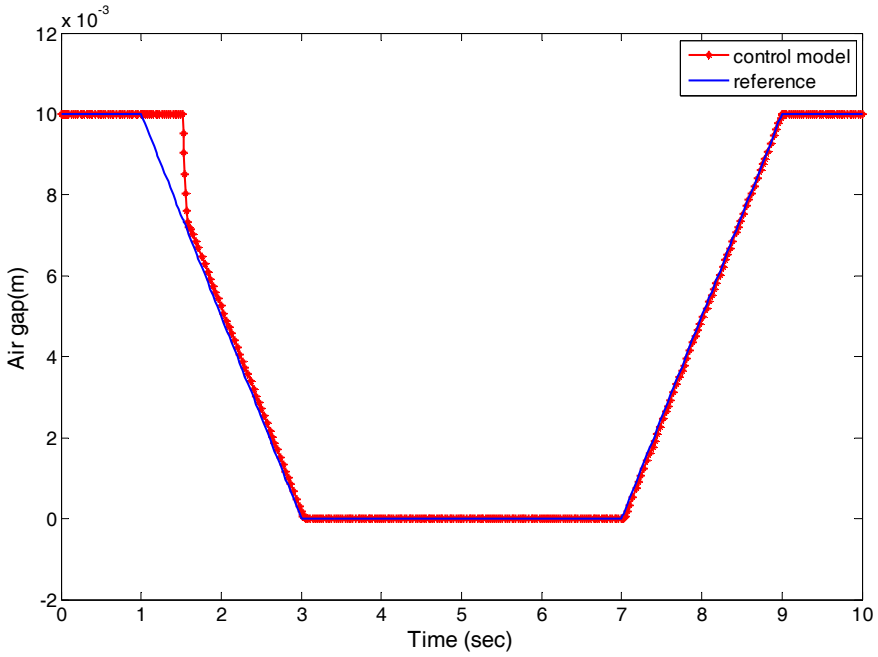

Fig. 7 Simulation of the levitation of the electro magnet

3. 결 론

이상과 같이 중고속 자기부상열차 개발을 위한 실험용 차량에 대한 정확한 수학적 모델을 만들기 위하여 모델을 구성하는 매개변수를 추정하였다. 각 매개변수 추정은 도면, 해석 및 시험에 바탕을 두었다. 추정된 매개변수를 이용하여 부상제어기의 동특성 응답 특성을 확인하였으며, 부상 안정성을 검증하였다. 추후에 2차 현가장치를 고려한 부상안내 시험기의 동특성을 규명하고, 실험과 비교하여 그 성능을 확인할 예정이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 연구비 지원(14PRTD-B061485-04)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] H.S. Han, B.H. Yim, N.J. Lee, et al. (2009) Effects of Guideway's Vibrational Characteristics on the Dynamics of a Maglev Vehicle, *Vehicle System Dynamics*, 47(3), pp. 309-324.