

초고속 자기부상열차의 부상 및 안내 제어

Levitation and Guidance Control of Super Speed Maglev Trains

김창현† 이종민* 김봉섭* 한형석*
Chang-Hyun Kim Jong-Min Lee Bong-Seup Kim Hyung-Suk Han

ABSTRACT

Through Korean Urban Maglev Program started in 2006, an urban maglev train was developed and the demonstration line is under construction as of now in 2011. The target speed of the developed maglev train is 110km/h, and the core technologies for super speed maglev trains over 500km/h are being studied. The propulsion and levitation systems of the super speed maglev train under consideration consist of linear synchronous motors (LSM) and levitation electromagnets which also act as a mover of LSM. In addition, guidance electromagnets are used to ensure stable running on curved tracks during super speed operation. The levitation and guidance control is focused on in this paper. For experimental purpose, a small maglev train is being manufactured, and its levitation and guidance controller is studied. The main task of the controller is to maintain the gap between the corresponding electromagnet and the guideway constantly. In general, measurements of the gap, acceleration and current and so on are utilized, and the gap control is implemented independently for each electromagnet. In this paper, the levitation and guidance system is modelled considering mechanical interactions, and the levitation and guidance controller is proposed based on this model. The developed controller is verified by various simulations using MATLAB/Simulink.

1. 서론

자기부상열차는 전자기력을 이용하여 열차를 부상시켜 마찰이 없이 움직여 소음, 진동이 없는 친환경적이 교통수단이다. 국내에서 1989년 연구개발이 시작된 이래 최근에는 2006년 시작된 도시형 자기부상열차 실용화사업을 통해 자기부상열차가 개발되었으며, 2011년 현재 인천국제공항에 시험선을 건설 중이다. 실용화 사업을 통해 개발된 자기부상열차는 상전도 전자석을 이용한 부상방식을 사용하며 110km/h의 운행속도를 가진다. 이와 별도로 500km/h이상의 속도를 가지는 초고속 자기부상열차 개발을 위한 원천기술 확보를 위해 노력 중이다. 현재 개발된 초고속 자기부상열차로는 부상방식에서 초전도 방식을 사용한 일본의 MLX와 상전도 방식을 사용한 독일의 Transrapid가 으며, 추진 방식으로는 위 두 방식 모두 선형 동기 전동기를 사용하고 있다 [1]. 본 논문에서 고려되는 초고속 자기부상열차의 추진 및 부상시스템은 Transrapid와 유사한 형태로 추진용 선형 동기 전동기와 부상용 부상전자석이 일체형으로 구성되어 있다. 또한, 고속 주행시 안정적인 곡선주행성능을 확보하기 위해 안내전자석이 사용된다.

본 논문에서는 초고속 자기부상열차 기술 중 부상 및 안내 제어에 관해 주로 다룬다. 실제 초고속 자기부상열차를 제작하고 시험하기 위해서는 많은 비용이 소모되기 때문에, 선행연구를 위해 자기부상열차 축소모형을 제작하고 있으며 여기에 적용될 부상 및 안내 제어 방법을 연구하였다. 일반적인 부상 및 안내 제어에서는 해당 전자석과 궤도 사이의 공극을 일정하게 유지하도록 제어해주게 되며, 공극, 가속도, 전류 등을 측

† 교신저자, 한국기계연구원, 자기부상연구실, 선임연구원
E-mail : chkim78@kimm.re.kr

* 한국기계연구원, 자기부상연구실

정하여 제어에 이용하게 되며 대부분의 경우 전자석마다 서로 독립적인 제어가 이루어진다. 본 논문에서는 상호간의 영향을 고려하여 부상 및 안내 시스템을 모델링하고 이를 기반으로 부상 및 안내 제어기를 제안하였다. MATLAB/Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 개발된 부상 및 안내 제어를 검증하였다.

2. 초고속 자기부상열차 축소모형

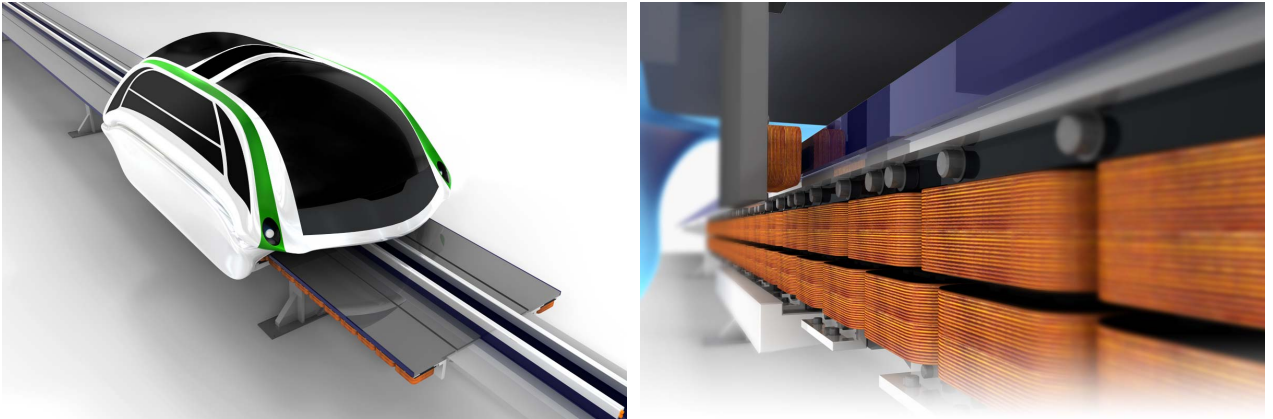


그림 1. 초고속 자기부상열차 축소모형 개념 및 전자석 구성

그림 1의 왼쪽에 대상으로 하는 초고속 자기부상열차 축소모형의 개념도를 나타내었으며, 오른쪽에는 부상/추진 전자석과 안내 전자석의 배치를 나타내었다. 지상에 자기부상열차를 지지할 궤도가 설치되며 전체 궤도를 따라 선형 동기 전동기의 고정자가 지면을 향해 설치된다. 이 고정자에 대향하여 차량에 부착된 부상전자석이 놓이게 된다. 이 부상전자석에 전류를 흘려주면 부상력이 발생하는 동시에 진행방향을 따라 자속 방향이 N극과 S극이 교대로 나타나 선형 동기 전동기의 이동자로도 쓰이게 된다. 마지막으로 차량의 양 측면에는 회전이나 외란 등에 의한 외부 횡력을 보상하기 위해 안내전자석이 사용된다. 부상전자석은 한 측면에 하나씩 총 2개가 설치되며 전후 절반씩 나뉘어 코일이 감겨있어 각 전자석마다 전후 독립적인 구동이 가능하며, 안내전자석은 각 코너별로 하나씩 총 4개가 설치된다.

표 1. 550km/h 실차급 자기부상열차 부상전자석 주요사양

항 목	사 양	항 목	사 양
주극수	10 개	횡방향 폭	200mm
끝극수	2 개	극피치	312 mm
전자석 총길이	882 mm	정격 공극	10 mm (부상제어)
		착지 공극	16-18 mm

표 2. 1/4-스케일 축소모형 자기부상열차 부상전자석 주요사양

항 목	사 양	항 목	사 양
주극수	10 개	횡방향 폭	50 mm
끝극수	2 개	극피치	78 mm
전자석 총길이	882 mm	정격 공극	3 mm (부상제어)
최소공극	1 mm	착지 공극	5 mm

초고속 자기부상열차에 필요한 핵심 기술 중 하나로 부상/추진전자석과 안내전자석을 설계하였다. 전자석 설계시 부상력 특성, 추력 리플 저감, 최소 전력, 선형 발전기 등의 [2, 3] 다양한 요소를 고려하여야 하며, 표 1에 목표속도 550km/h인 실차급 초고속 자기부상열차에 적용가능한 부상전자석의 주요 사양을 나타내었다. 설계된 부상전자석의 극피치는 Transrapid의 258mm보다 조금 더 긴 312mm를 가지며 약 244.8Hz의 동작 주파수에서 550km/h의 속도를 달성할 수 있다. 표 2에는 실차급 자기부상열차를 1/4로 축소시킨 축소모형 자기부상열차 부상전자석의 주요사양을 나타내었다. 이 때, 고려된 차량의 대략적인 크기는 가로, 세로, 높이가 $1,050 \times 700 \times 250\text{mm}^3$ 이며 총 무게는 전자석 포함 300kg이다.

3. 자기부상 및 안내 제어

3.1 자기부상 및 안내 제어 모델

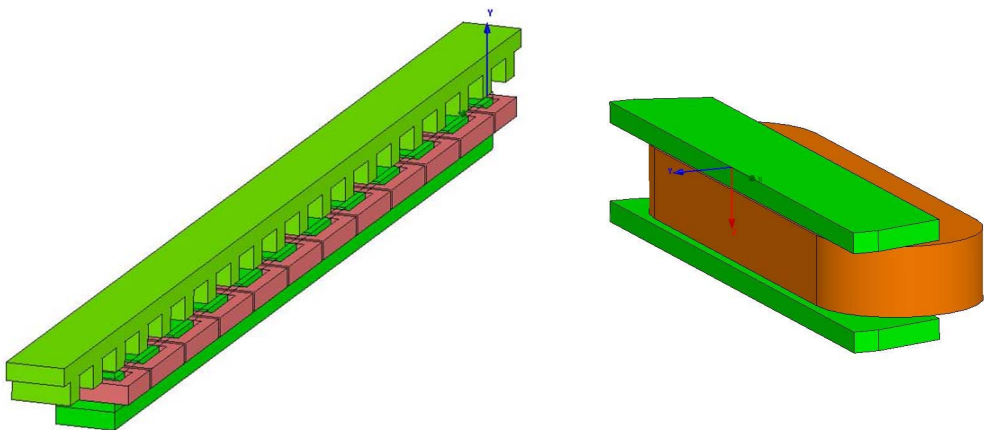


그림 2. 부상/추진 전자석과 안내전자석 개념도

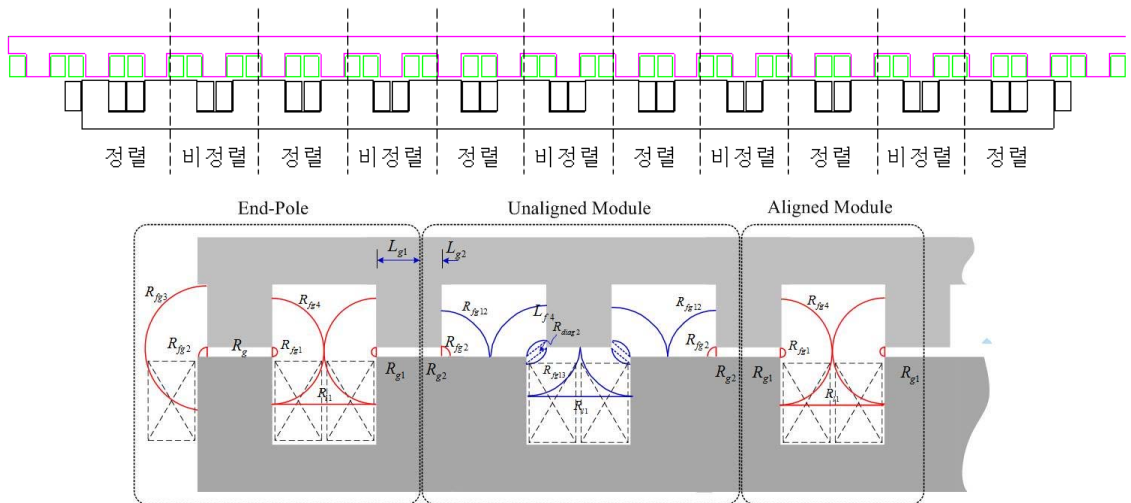


그림 3. 부상/추진 전자석 등가자기회로법 해석 모델

앞서 설명한 바와 같이 자기부상 전자석은 그림 2의 왼편과 같이 지상측에 설치된 선형 동기 전동기 고정자와 차량측에 이동자로 구성이 된다. 이동자는 그림 3에 나타난 바와 같이 정렬 구조와 비정렬 구조를 가지는 단위 전자석들의 반복적 조합으로 볼 수 있다. 고정자가 무한히 길다고 가정하면 양쪽 끝에서 발생하는 끝단효과는 무시 가능하며 단순히 정렬 구조와 비정렬 구조로 이루어지며, 해당 모듈의 부상력은 등가 자기회로해석법을 이용하여 해석을 수행한 후 최종적으로 모두를 조합하므로써 전체 부

상력을 구할 수 있다. 정렬 모듈의 경우 대략적으로 다음과 같이 근사화 할 수 있으나 [4], 비정렬 모듈에서는 극이 겹치는 면적이 적고 프린징 자속이 주를 이루어 부상력이 줄어드는 효과가 있다.

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{z}\right)^2 = K \left(\frac{i}{z}\right)^2 \quad (1)$$

이 때, μ_0 는 공기의 투자율, N 은 극의 코일 턴 수, A 는 겹치는 극의 단면적, i 는 코일 전류, z 는 공극이 된다.

자기회로법을 이용하여 대략적인 부상력을 얻고 전자석 설계에 이용할 수 있으나 오차가 비교적 크며 보다 정밀한 결과를 얻기 위해 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEM)이 많이 이용된다. 하지만 FEM은 형상을 보다 세밀히 분석할수록 많은 연산과 계산시간이 필요하다. 본 논문의 부상 제어 모델은 FEM을 통해 해석한 부상력 특성과 수식 (1)의 모델로부터 역으로 추정하여 구하였다.

그림 4에 FEM으로 해석한 한 코너에 대한 전류 대 부상력 특성과 최소자승법으로 추정된 수식으로 이를 근사화한 결과를 나타내었다. 구해진 $K = 2.9995 \times 10^{-4}$ 로 기준 공극 3mm, 6.64A에서 약 735N의 부상력이 발생하며 네 코너 합하여 총 300kg의 무게를 지탱할 수 있다. 이는 부상전자석이 모두 수식 (1)로 표현되는 정렬 모듈로 이루어졌다고 가정한 경우($\frac{\mu_0 N^2 A}{4} = 5.8601 \times 10^{-4}$)의 1/2수준이며, 이로부터 비정렬 모듈에서는 힘을 거의 내지 못함을 유추할 수 있다.

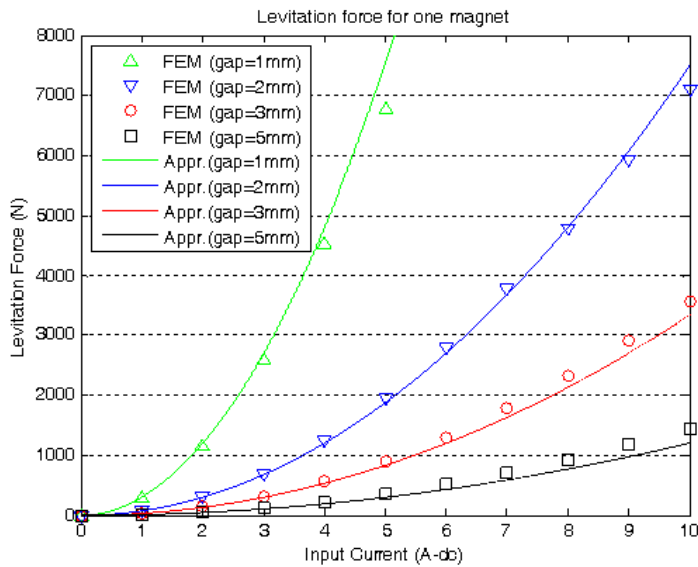


그림 4. 부상전자석의 부상력 특성

안내전자석은 그림 2의 오른쪽 형태를 띠며 극단면 $148 \times 8 \text{mm}^2$, 코일 턴 수 320으로 설계 되었다. 안내 제어 모델도 근본적으로는 부상제어와 유사하게 정렬 모듈 수식 (1)로 모델링 될 수 있다. 하지만 여기서도 동일한 방식으로 FEM 결과를 이용하여 부상력을 모델링하였다. 그림 5에 FEM으로 해석한 안내전자석의 안내력 특성과 근사화된 결과를 나타내었다. 기준 공극 4mm에서 5A에서 10,7N, 10A에서 최대 43.5N의 안내력을 낼 수 있으며, 추정한 $K = 6.1239 \times 10^{-6}$ 이다. 이 경우에도 해석 결과의 $K = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} = 3.8089 \times 10^{-5}$ 의 1/6 수준으로 상당한 차이가 있는데, 이는 궤도측 안내전자석 대향면에 마주하는 돌기가 없고 기준공극 4mm가 극의 너비 8mm에 비하여 작은 값이 아니기 때문으로 판단된다.

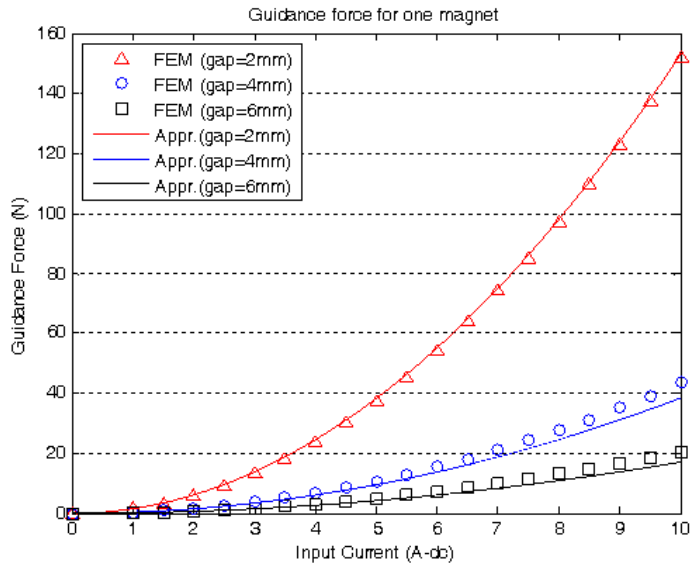


그림 5. 안내전자석의 안내력 특성

3.2 자기부상 및 안내 제어기 및 시뮬레이션

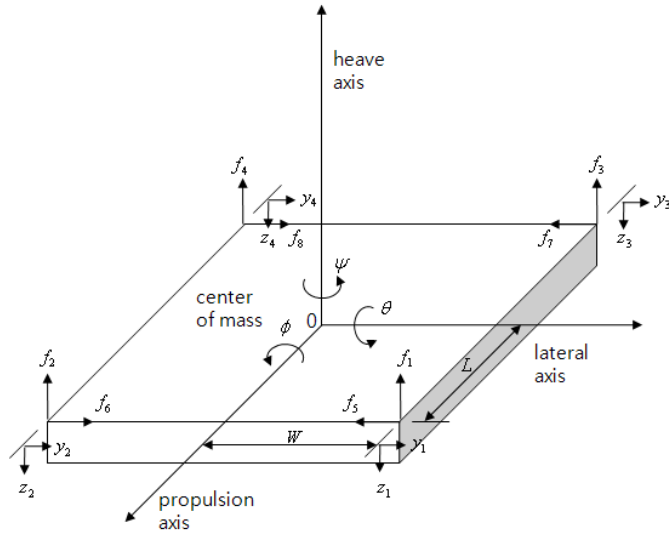


그림 6. 5자유도 부상 및 안내시스템 모델링

자기부상열차의 부상 및 안내 시스템을 그림 6과 같이 5자유도 모델을 이용하여 나타내었다. 여기서 진행방향인 x 좌표는 추진제어에 의해 변화하는 양이므로 본 논문에서는 고려하지 않으며, 네 코너에 부상전자석과 안내전자석이 존재하며 각각의 흡인력 $f_1 \sim f_8$ 이 작용하는 모델로 코너간의 간섭을 고려한 모델이다. 안내력은 수평방향 y 축상으로 작용하며, 부상력은 수직방향 z 축상으로 작용한다. 그림과 같이 rolling 각(ϕ), pitching 각(θ), yawing 각(ψ)를 정의하면 자기부상열차에 작용하는 힘에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M\ddot{z} &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 - Mg & (2) \\
 M\ddot{y} &= (-f_5 + f_6 - f_7 + f_8) \\
 I_\phi \ddot{\phi} &= (f_1 - f_2 + f_3 - f_4)W \\
 I_\theta \ddot{\theta} &= (-f_1 - f_2 + f_3 + f_4)L \\
 I_\psi \ddot{\psi} &= (-f_5 + f_6 + f_7 - f_8)L
 \end{aligned}$$

여기서 M 은 열차의 질량, I_ϕ , I_θ , I_ψ 는 해당축에 대한 질량관성모멘트, W 는 열차 차폭의 반, L 은 열차 길이의 반, g 는 중력가속도이다. 각 코너의 횡변위 y_i 및 부상공극 z_i 를 정의하면 이들로부터 평균 공극, 평균 횡변위 등을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= y_2, y_3 = y_4 & (3) \\
 z &= \frac{1}{4}(z_1 + z_2 + z_3 + z_4) \\
 y &= \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) = \frac{1}{2}(y_1 + y_3) \\
 \phi &= \frac{1}{4W}(-z_1 + z_2 - z_3 + z_4) \\
 \theta &= \frac{1}{4L}(z_1 + z_2 - z_3 - z_4) \\
 \psi &= \frac{1}{4L}(y_1 + y_2 - y_3 - y_4) = \frac{1}{2L}(y_1 - y_3)
 \end{aligned}$$

앞서의 부상력, 안내력 추정수식과 상기 수식을 이용하여 MATLAB/Simulink 상에서 부상제어 및 안내제어 시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다. 부상, 안내제어는 공극센서만 설치된 것을 가정하고 측정된 공극을 기준 공극(부상 3mm, 안내 4mm)으로 유지하도록 하는 제어기를 설계하였다. 일반적으로 많이 사용되는 PID 제어기를 사용하였으며 각각 독립적인 제어기를 구성하였다. 추가적으로 이산화된 제어기의 샘플링 타임, 디지털필터, ADC 및 계산과정의 딜레이 등을 고려하여 실제 실험에서 발생할 수 있는 상황을 반영할 수 있도록 하였다.

4. 모의 실험 결과

시뮬레이션을 통해 설계된 부상 및 안내제어기의 성능을 확인해 보았다. 그림 7은 네 코너 간섭의 영향을 살펴보기 위해 5mm에서 3mm로 부상을 시킨 후 1번 코너에 1Hz, 0.5mm 진폭의 입력을 부가했을 때의 부상공극과 전류 변화를 나타낸 결과이다. 1번 코너는 들어오는 입력을 추종하여 약 0.5mm의 진폭의 응답을 보이며 다른 코너는 기준 공극 3mm를 추종하며 0.2mm 이내의 외란을 보인다. 전류는 15A 이내에서 제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

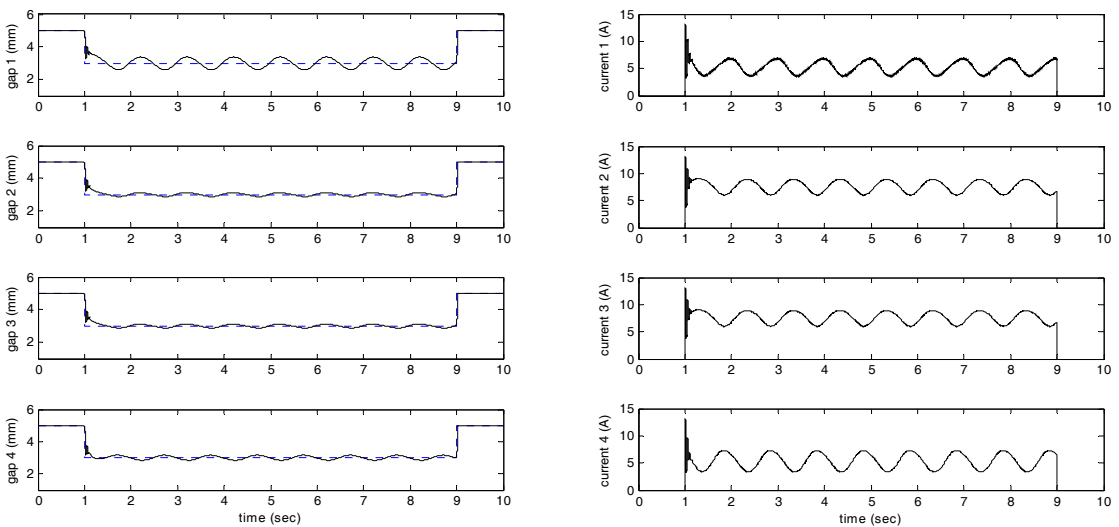


그림 7. 부상 제어 시뮬레이션 결과 (1번코너에 1Hz, 0.5mm 입력)

그림 8은 기준공극 4mm를 기준으로 1Hz, 0.5mm 진폭의 입력을 부가했을 때 횡변위와 전류 변화를 나타낸 결과이다. 전후에 동일한 입력을 가했으며 마찬가지로 입력을 잘 추종하고 있으며, 10A이내의

전류를 이용하여 제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

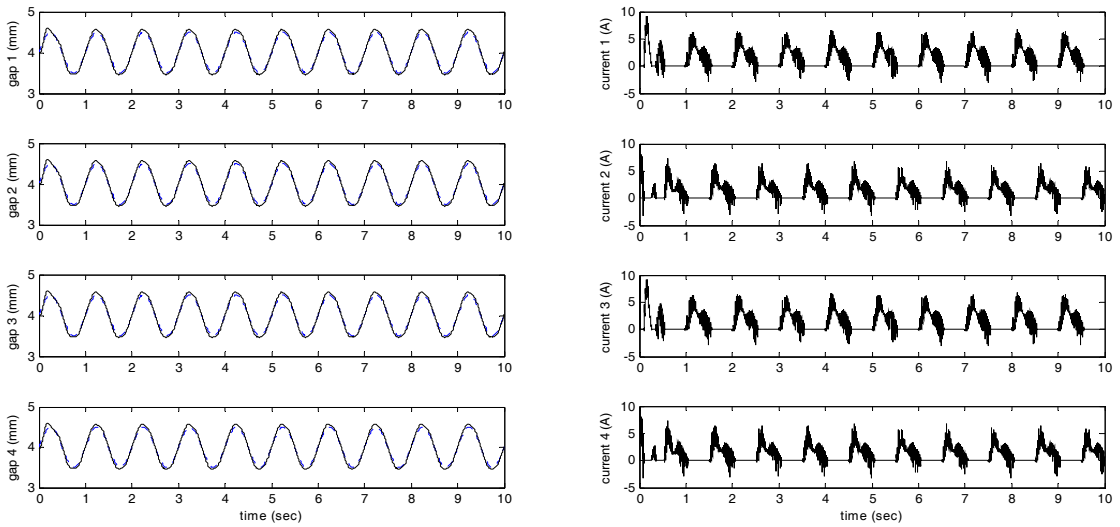


그림 8. 안내 제어 시뮬레이션 결과 (1Hz, 0.5mm 입력)

5. 결론

본 논문에서는 축소형 자기부상열차를 이용해 초고속 자기부상열차의 부상 및 안내 제어를 설계하였다. 설계과정에서 얻어진 부상전자석과 안내전자석의 FEM 해석결과를 바탕으로 시스템을 모델링을 하고 이를 이용해 제어를 설계하였다. 커플링을 고려한 5자유도 시스템 모델을 이용해 시뮬레이션을 수행하였으며 부상 및 안내제어 특성을 확인할 수 있었다. FEM 해석결과를 이용하였기 때문에 보다 실험결과에 근접한 성능을 얻을 수 있으리라 예상된다. 추후과제로는 축소모형 제작이 완료된 후 실제 실험을 통해 설계된 제어기의 성능과 시뮬레이션의 정확도를 점검할 예정이다.

참고문헌

1. H.-W. Lee, K.-C. Kim, and J. Lee, "Review of maglev train technologies," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 42, No. 7, pp. 1917-1925, 2006.
2. 조한욱, 김창현, 한형석, 이종민, 김봉섭, 김동성, 이영신, "초고속 자기부상열차를 위한 하이브리드형 부상 추진 시스템의 설계 및 특성해석", 전기학회논문지, 59권, 4호, pp. 715-721, 2010.
3. Chang-Hyun Kim, Han-Wook Cho, Jong-Min Lee, Hyung-Suk Han, Bong-Seup Kim, and Dong-Sung Kim, "Design of hybrid-excited linear synchronous motor for magnetically levitated vehicle", The 8th LDIA, Netherlands, 2011.
4. P.K. Sinha, "Electromagnetic suspension dynamics & control", Peter Peregrinus Ltd., 1987.
5. 김창현, 김봉섭, 김동성, "EM-PM 복합식 자기부상열차의 Zero-Power 부상 제어", 한국철도학회 추계 학술대회, pp. 1698-1703, 한국, 2009.