

선형동기전동기 추진 자기부상시스템 동특성 해석

Dynamic Analysis of Magnetically Levitation System Propelled by Linear Synchronous Motor

김 기 정*
(Ki-Jung Kim)

Abstract - This paper deals with dynamic characteristics of the experimental magnetic levitation vehicle employing LSM(Linear Synchronous Motor) for propulsion. To predict the dynamic characteristics of the system, the dynamic model which is composed of the electrical elements such as electromagnets and LSM and mechanical components and is developed based on multibody dynamics is developed. The resulting system equations of motion for the model are a coupled one representing all the mechanical and electrical parts. To verify the dynamic model of the system, air gaps are measured in both running tests and simulation, and the frequency characteristics of air gaps are analyzed. From the results, it can be seen that the frequency responses are almost the same. Finally, to evaluate the levitation stability and the designed controller, numerical simulations are carried out.

Key Words : Maglev vehicle, Electromagnetic suspension system, Linear synchronous motor

1. 서 론

현재 우리나라는 도시형 자기부상열차 실용화 연구를 통해 중저속형 자기부상열차가 인천국제공항 인근에 상용화 시범노선에서 개통되어 운행 중이며 차량의 주행성능 개선과 선로구조물의 최적화를 위한 기술 개발 연구가 진행되고 있다[1]. 또한, 시속 500 km 이상급 초고속형 자기부상열차의 개발 초기연구가 시작되었고, 축소형 모델을 이용한 부상과 추진 연구가 이루어지고 있다. 이외에도 현재까지 전자석을 이용한 부상 및 추진 시스템들이 다양한 분야에서 사용되어 개발되어왔으며, 특히 물체를 운반하는 반송장치 시스템과 차량에 응용되어 왔다[2]. 이러한 자기부상 시스템 연구에 있어 동적특성은 차량-궤도-제어기 시스템의 해석 모델을 통해 제어기 평가와 대차 메커니즘 설계 등을 대상으로 매우 중요한 역할을 수행해 왔다[3-5]. 이러한 시스템의 동역학적 특성은 차량 측면에서는 대차시스템, 궤도 측면에서는 선로의 불규칙도 형상과 궤도의 유연성에 의해 주로 결정되므로 대차시스템 설계와 차량과 궤도의 상호작용 평가 기술이 핵심이라 할 수 있으며 새로운 자기부상시스템 개발 시 개념 설계 단계부터 동역학 해석의 적용이 요구된다.

국내에서 자기부상열차 시스템 적용을 위한 동특성해석 및 제어기 평가에 관한 연구는 주로 중저속형 자기부상열차에 적용되는 'U' 자형 전자석과 그 제어에 관한 연구가 주를 이룬다[6-7]. 특히, 가상시제(Virtual prototyping) 기술의 적용으로 실물 시제

품 제작 없이 성능을 평가하고 설계에 반영하여 자기부상열차의 성능향상에 많은 기여를 하였다[8-9]. 하지만 중저속형은 자기부상열차는 선형유도전동기(Linear induction motor)에 의해 추진되는 방식이고 부상전자석을 통해 능동제어가 이루어지고 안내력은 부상력의 분력으로 수동적으로 결정된다. 반면, 초고속 자기부상시스템은 선형동기전동기(Linear synchronous motor)로 추진되고 부상과 안내 전자석이 독립적으로 제어함으로써 중저속 자기부상시스템과는 차이가 있다. 이에 초고속 자기부상시스템을 대상으로 동역학 해석 모델을 개발하고 동특성을 예측하고 평가할 수 있는 연구가 요구되어 진다. 해외에서는 선형동기전동기를 기반으로 하는 자기부상열차의 대표적 시스템인 독일 TRANSRAPID와 관련된 학술연구 발표에서 차량은 횡방향을 구속시킨 다자유도 모델 그리고 부상력은 등가의 선형스프링으로 표현하여 차량과 궤도의 동적상호작용 평가에 관한 연구내용을 주로 다루었다[10-11]. 최근 독일의 기술을 도입한 중국에서 이에 관련연구가 지속적으로 수행되고 있다. 국내에서는 초고속 자기부상열차에 적용 가능한 부상추진시스템의 설계 및 특성을 분석한 바 있으며, 등가자기회로 모델을 이용한 부상전자석에 대한 연구가 수행되었다 [12]. 본 논문에서는 최근 하이퍼루프와 같은 초고속형 자기부상열차가 대체 교통수단으로 이슈가 되고 있는 바, 이에 연구실 수준에서 실험이 가능한 크기인 실차의 약 1/4 스케일로 축소 설계 제작하여 추후 실차급 초고속 자기부상열차 설계과정에 필요한 요구조건을 검토하고자 한다. 축소형 자기부상 시스템은 Fig. 1과 같이 차량, 대차, 선형동기전동기, 부상 및 안내전자석 그리고 레일로 구성되어 있다. 이 시스템을 적용한 자기부상시스템의 동역학 해석 모델을 다물체 동역학 기반으로 부상 및 안내 전자석과 제어기를 포함하여 개발하고 특히 초고속형 자기

* Corresponding Author : Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Korea.

E-mail : ready2go@cnu.ac.kr

Received : September 26, 2016; Accepted : October 17, 2016

표 1 축소형 자기부상열차의 사양

Table 1 Specifications of small scaled Maglev system

Item	Value
Capacity of levitation force	300 kg
Number of magnets	2 for levitation, 4 for guidance
Number of poles	12 for levitation, 2 for guidance
Nominal air gap	4 mm

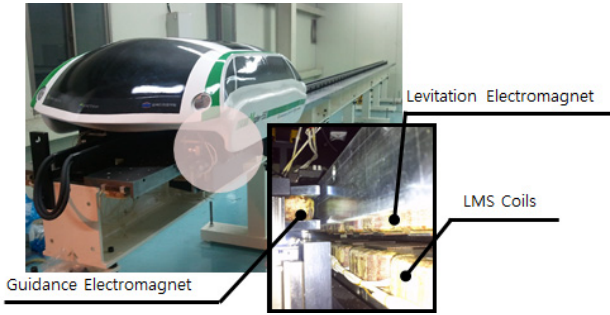


그림 1 축소형 자기부상 시스템

Fig. 1 The small scaled Maglev vehicle

부상열차의 추진시스템으로 적용되는 선형동기전동기의 디텐트력을 반영하여 동특성해석을 수행한다. 실험용 자기부상시스템과 해석 모델을 부상공극의 주파수 분석을 통해 검증하고 선로의 랜덤 불규칙도 형상을 외란으로 입력 하에 설계된 제어기 평가를 수행하였다.

2. 모델링

2.1 자기부상시스템 모델

Fig. 1에 제시된 축소형 자기부상시스템의 동특성을 분석하기 위해 동역학 모델을 개발하였으며, Fig. 2에 제시하였다. 차량과 대차가 각각 1개로 구성되어 있고, 대차 양쪽에 선형동기전동기가 위치하고, 모서리 4곳에 안내 전자석이 위치해 있다. 궤도 하면에 영구자석이 부착되어 있고 선형 동기 전동기의 고정자 역할을 한다.

동역학 모델은 자기부상시스템의 6자유도를 갖도록 모델링 되었고, 선형동기전동기의 부상 및 추진력과 안내 전자석의 안내력 그리고 각각의 제어기를 포함한 통합된 동역학 모델로 개발하였다.

Table 1은 개발된 시스템의 사양을 보여주고 있다.

2.2 부상과 안내 전자석 및 제어 모델

일반적으로 전자석이 발생시키는 힘은 전류와 공극의 비선형 함수로 다음과 같다 [13].

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

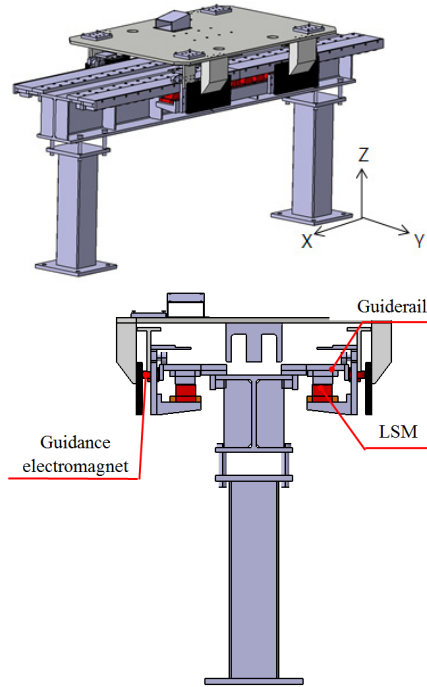


그림 2 축소형 자기부상 시스템의 동역학 모델

Fig. 2 Dynamic model of the small scaled Maglev vehicle

여기서,

μ_0 : 공기 투자율, N : 코일 턴 수, A : 코어 단면적
 z : 부상 공극, i : 전류

본 논문에서는 공극과 전류에 대한 상태 변수를 식 (2)와 같이 평형상태에서 공극과 전류의 변화량($\Delta z(t)$, $\Delta i(t)$)의 합으로 표현하였다. 여기서, 평형상태는 공칭공극(z_0)을 목표 부상공극인 4 mm으로 유지하기 위한 공칭전류 (i_0)를 의미한다.

$$c(t) = z_0 + \Delta z(t), \quad i(t) = i_0 + \Delta i(t) \quad (2)$$

그러면, 평형상태의 공극(z_0)에서 운동방정식을 식 (3)와 같이 정의할 수 있다. 여기서, g 는 중력가속도를 의미하고, $F_d(t)$ 는 물체에 작용하는 외력, $F(i, z)$ 는 식 (1)의 전자석 힘을 의미한다.

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = mg + f_d(t) - F(i(t), z(t)) \quad (3)$$

실제 동작하는 전류와 명령의 전류 사이의 시간 지연(time delay)을 식 (4)와 같이 1차 모델로 표현하였다. 여기서 $\Delta i_r(t)$ 는 지령 전류를 의미하고, ω_c 는 전류드라이버의 차단 주파수(cut-off frequency)이다.

$$\Delta i(t) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta i_r(t) \quad (4)$$

식 (1)의 전자석힘은 비선형 함수로 일정 전류이상을 흘려주도

출력되는 힘이 일정해지는 특성을 갖고 있는데, 본 논문에서의 전자석 힘은 공칭공극 및 공칭전류를 기준으로 선형화 하면 식 (5)와 같이 정의된다.

$$F(i(t), z(t)) = k_z \Delta z(t) - k_i \Delta i(t) + F_0 \quad (5)$$

여기서,

$$k_i = 4A\mu_0 N^2 \frac{i^2}{z_0^2}, \quad k_c = 4A\mu_0 N^2 \frac{i^2}{z_0^3}$$

그리고, 제어를 위한 전류 지령 ($\Delta i_r(t)$)는 PD 제어에 의해 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta i_r(t) = k_p \Delta z(t) + k_D \dot{z}(t) \quad (6)$$

여기서, 제어 게인 (k_p, k_D)는 optimal regulator theory에 의해 식 (7)과 같이 제어 전류 방정식을 정의할 수 있다.

$$\Delta \dot{i}(t) = \omega_c (k_p \Delta z(t) + k_D \dot{z}(t) - \Delta i(t)) \quad (7)$$

여기서 사용된 특성방정식은 필터 공극과 공극속도를 입력으로 하는 1차 상태 방정식으로 (8)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 K_{Cfd}, K_{Cf} 는 필터 게인값, K_{sc} 는 전류방정식의 비유상수계인, K_p, K_d 는 각각 PD제어기 게인, ω_c 는 제어 bandwidth의 1차 모델 값이다. 안내 전자석과 제어기 역시 같은 방식으로 수식화하여 모델링되었다.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -K_{Cf} & 0 \\ 0 & \omega_c \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} K_{Cf} & K_{Cfd} \\ K_{sc} K_p \omega_c & K_{sc} K_d \omega_c \end{bmatrix} u \quad (8)$$

여기서,

$$X = (G_f \ i_f)^T: \text{filtered gap and current}$$

$$u = (z \ \dot{z})^T: \text{gap and velocity of gap}$$

2.3 부상 및 안내 공극 정의

한편 식 (1)의 전자석 힘을 계산하기 위해서는 앞에서 언급된 제어전류뿐만 아니라, 자석 사이의 거리(공극) 계산이 매번 이루어져야 한다. 실제 시스템에서는 공극 센서를 활용하여 센싱된 공극 값을 제어의 입력으로 사용된다. 해석 모델에서는 가상의 센서를 사용하기 위하여, Fig. 3과 같이 다물체 동역학 기법의 기구학 벡터 식을 이용하였다.

위에서 정의된 벡터에 의해서 부상공극 및 횡공극을 각각 식 (9), (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{ui} = r_i - r_l = r_{ot} + A_i s_{ui}' - r_{oi} + A_i s_{ui}' \quad (9)$$

$$r_{tg} = r_t - r_g = r_{ot} + A_i s_{tg}' - r_{og} + A_g s_{gt}' \quad (10)$$

여기서, A_i 는 가이드레일의 관성좌표에서 x-y-z 관성 좌표로

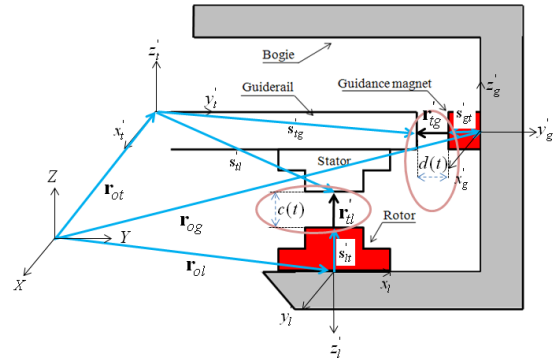


그림 3 좌표축 정의

Fig. 3 Definition of the vector coordination

의 좌표변환 행렬을 의미하고, A_i 는 선형동기전동기의 관성좌표에서 x-y-z 관성 좌표로의 좌표변환 행렬을 의미하며, A_g 는 전자석 관성좌표에서 x-y-z 관성 좌표로의 좌표변환 행렬을 의미한다. 이렇게 계산된 부상공극(r_{ui})과 횡공극(r_{tg})은 x-y-z 관성 좌표의 벡터 이므로, 식 (11), (12)를 통해서 실제 공극 센서로부터 얻을 수 있는 값으로 변환이 가능하다. 계산된 벡터에서 $z(t)$ 와 $d(t)$ 를 각각 부상공극과 횡공극으로 정의할 수 있다.

$$r'_{ui} = \begin{bmatrix} x'_{ui} \\ y'_{ui} \\ c(t) \end{bmatrix} = A_i^T r_{ui} = A_i^T (r_{ot} + A_i s'_{ui} - r_{oi} + A_i s'_{ui}) \quad (11)$$

$$r'_{tg} = \begin{bmatrix} x'_{tg} \\ d(t) \\ z'_{tg} \end{bmatrix} = A_i^T r_{tg} = A_i^T (r_{ot} + A_i s'_{tg} - r_{og} + A_g s'_{gt}) \quad (12)$$

또한, 공극의 속도는 식 (9), (10)의 시간 미분을 통해서 식 (13), (14)와 같은 방법으로 얻을 수 있다.

$$\dot{r}'_{ui} = \begin{bmatrix} \dot{x}'_{ui} \\ \dot{y}'_{ui} \\ \dot{c}(t) \end{bmatrix} = A_i^T (\dot{r}_{ot} + \dot{A}_i \tilde{\omega}_i s'_{ui} - \dot{r}_{oi} + \dot{A}_i \tilde{\omega}_i s'_{ui}) \quad (13)$$

$$\dot{r}'_{tg} = \begin{bmatrix} \dot{x}'_{tg} \\ \dot{d}(t) \\ \dot{z}'_{tg} \end{bmatrix} = A_i^T (\dot{r}_{ot} + \dot{A}_i \tilde{\omega}_i s'_{tg} - \dot{r}_{og} + \dot{A}_g \tilde{\omega}_g s'_{gt}) \quad (14)$$

식 (8)에서 출력된 제어 전류 추정치와 식 (11), (12)으로 부터 계산된 부상 및 안내 공극 추정치 이용하여 식 (1)의 전자석 힘을 추정할 수 있다.

2.3 선형동기전동기 디텐트력

영구자석을 사용하는 선형동기전동기는 디텐트력(detent force)라는 힘이 발생되는데, 고정자와 회전자의 위치에 따라서 힘의 방향이 바뀌게 되고, 그에 따라서 수직방향의 힘이 음과 양의 값

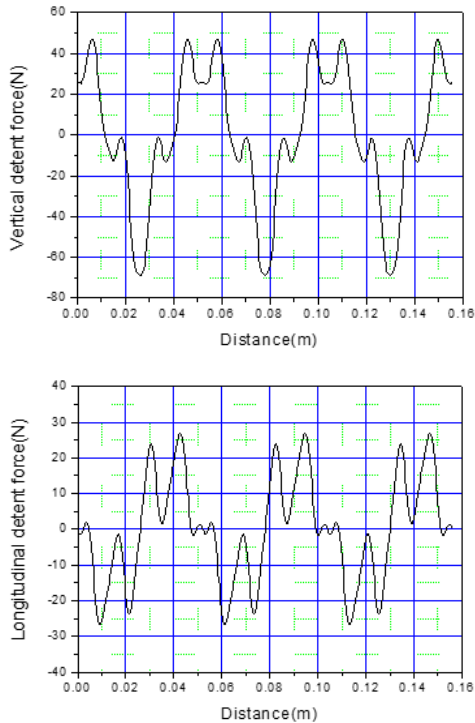


그림 4 수직방향 및 진행방향 디텐트력
 Fig. 4 Vertical and longitudinal detent force

이 발생하게 된다. 이 값은 진행방향(longitudinal)으로 발생하는 힘에도 같은 영향이 발생된다. 이때 힘의 진동의 주기는 Fig. 4와 같이 코어의 폭(stack length)에 의해서 결정된다. 또한 디텐트력은 식 (1)과 같이 부상공극의 크기에 따라서 비선형적으로 달라지는 경향을 가지고 있다. 본 논문에서는 Fig. 4의 디텐트력의 특성을 FEM을 통해 분석하고 스플라인 보간법(spline interpolation)를 사용하여 동역학 모델에 외란으로 적용하였다.

이러한 외력은 다른 서브시스템과의 공진으로 인해, 의도하지 않는 진동을 유발 시킬 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서는 자기부상시스템의 동적 예측과 효과적인 제어를 위해서 선형동기전동기의 동적 효과를 고려한 동역학 모델 개발이 이루어 졌다.

2.5 해석 과정

부상 및 안내 전자석 제어를 포함한 동역학 해석 과정을 Fig. 5와 같이 표현하였으며 순서적으로 다음과 같이 해석을 수행한다.

- 1) 정의된 모델로부터 입력데이터를 인가 받아서, 다물체 모델의 각 물체의 위치 속도를 해석한다. 그 후 UDF (user defined function)가 호출된다.
- 2) 계산된 각 물체의 위치와 속도를 인가받아서, 식 (4)~(7)를 이용하여 각 코너에 위치한 센서에서 측정될 부상공극 및 부상공극 속도를 추정한다.
- 3) 그 후 추정된 공극 값을 이용하여 제어기를 호출하고, 여기서 전자석힘과 위치에 해당되는 디텐트력을 계산한다.

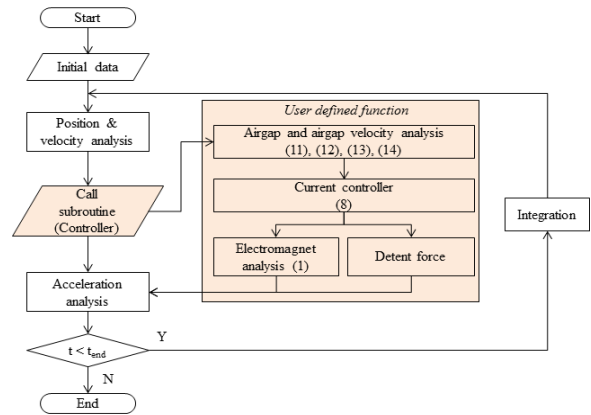


그림 5 동역학 해석 프로세스
 Fig. 5 Process of dynamic analysis

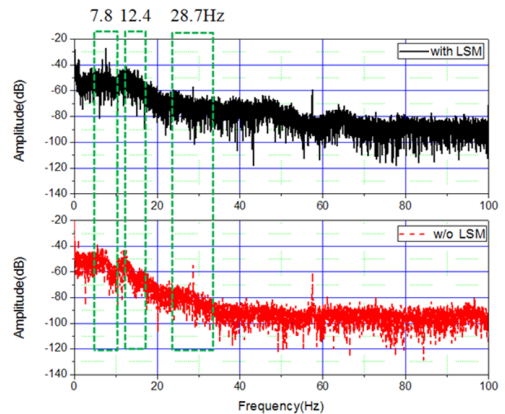


그림 6 디텐트력에 대한 수직방향 가속도 결과
 Fig. 6 Vertical acceleration result with respect to detent force

- 4) 최종적으로 계산된 외력은 다물체 운동방정식에 더해져 전체 운동방정식을 계산한다. 그 뒤 상태변수를 적분하여 해석 루프를 실행한다.

위 과정에서 궤도의 외란(수직방향 처짐 및 불규칙 표면조도)을 정의할 경우 부상공극 방정식 (4), (5)에 각각 더해지는 방식으로 계산할 수 있다.

3. 해석 결과

3.1 해석과 실험 모델의 시스템 분석

앞에서 개발된 동역학 모델의 검증 및 활용을 위하여 Fig. 1과 같은 선형동기전동기 추진 및 부상전자석을 이용한 실험 장치를 구성하였다. 이때 차량의 지지 역할을 하는 궤도는 두꺼운 (10 mm) 강 제질의 H-빔으로 설계되었고, 기둥의 간격이 약 1.88 m으로 짧기 때문에 정적 처짐 및 진동은 발생하지 않는다고

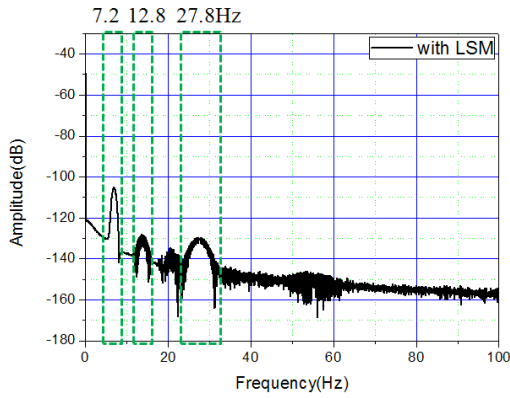


그림 7 수직방향 가속도 해석결과
 Fig. 7 Vertical acceleration of simulation result

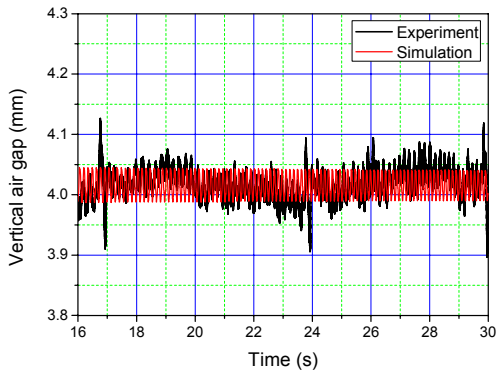


그림 8 수직방향 공극 이력
 Fig. 8 Time history of vertical air gap

가정하였다. 실험에서는 차량의 속도를 약 0.4 m/s로 구동하였다. Fig. 6은 각각 선형동기전동기를 on/off 한 상태에서 차량의 수직방향 가속도를 측정하여, 주파수 분석의 결과이다. 이때, 약 7.8 hz의 저주파가 디텐트력으로 인한 시스템에 발생된 진동 영향이다. 이 값은 차량의 속도와 코어의 간격을 고려하면 예측할 수 있다. 여기서, 12.4 hz와 28.7 hz는 각각 레일의 이음매를 지날 때의 수직 진동 모션과 제어기의 시간 지연 특성이다.

개발된 해석 모델을 이용하여 0.4 m/s의 등속 주행 해석을 수행하였고, Fig. 7과 같은 수직방향 가속도의 주파수 해석 결과를 얻었다. 해석결과를 살펴보면 1차 고유진동수가 7.2 hz로 실험결과와 거의 유사한 결과를 얻었다. 마찬가지로 2차, 3차의 시스템 진동 특성도 유사한 결과를 보였다. 이를 통해서 개발된 해석 모델이 실제 자기부상시스템의 동적 특성과 대부분 유사한 경향성을 보인다고 할 수 있다.

Fig. 8은 개발된 해석 모델과 실험의 부상공극 결과 나타내었다. 공칭 부상공극인 4 mm 부근에서 출력되는 것을 확인할 수 있다. 해석의 경우에는 외란이 선형동기전동기의 디텐트력만 있는 반면에 실제 실험에는 레일의 표면조도 및 이음매 등의 영향으로 다소 진동이 크게 발생하고 있다. 해석을 통해 얻은 디텐트력의 영향이 부상공극에 미치는 영향이 4 mm를 기준으로 약

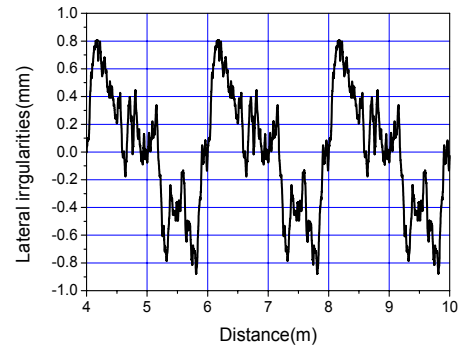
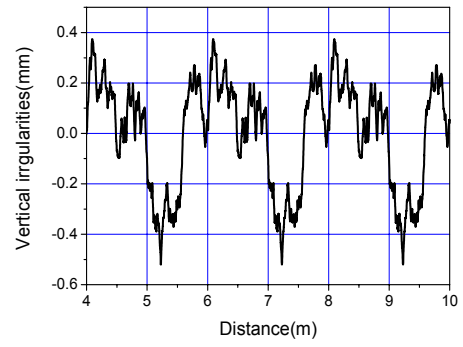


그림 9 랜덤 불규칙도 프로파일
 Fig. 9 Profiles of random irregularities

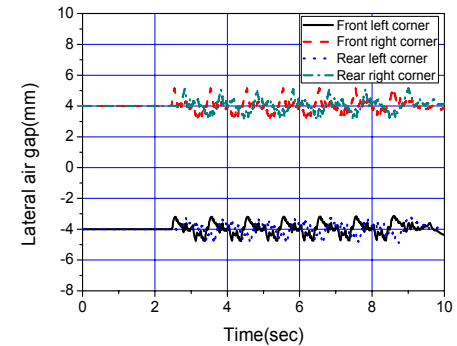
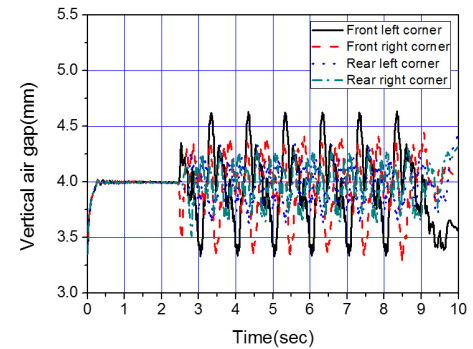


그림 10 수직방향 및 횡방향 공극 응답
 Fig. 10 Vertical and lateral air gap responses

± 0.03 mm으로 매우 미비한 결과를 보였다. 결과적으로 디텐트력이 자기부상시스템에 수직방향 공진을 유도할 수 있지만, 부상공극 관점에서 그 영향이 매우 미비한 것을 확인하였다. 특히 시스템이 고속으로 움직일수록 디텐트력의 효과가 고주파 영역으로 포함되기 때문에 그 영향이 없어진다고 볼 수 있다.

3.2 해석을 통한 동특성 예측

서론에서 언급했듯이 차량의 동역학적 특성은 선로의 불규칙 형상과 궤도의 처짐에 의해 주로 나타난다. 본 논문에서 대상으로 하는 축소형 자기부상시스템은 궤도의 처짐은 미비할 것으로 판단되어 선로의 불규칙 형상만을 외란으로 입력하여 시스템의 동특성을 예측하고 평가하고자 한다. 실제적으로 선로의 불규칙 형상은 도시형 자기부상열차 실용화 사업 중 연구된 랜덤 불규칙 형상을 참고하여 수직은 ± 0.5 mm 그리고 수평은 ± 0.8 mm로 고려하였다. Fig. 9는 외란으로 입력된 수직과 수평 선로 불규칙 형상을 보여주고 있다. 인가된 불규칙 형상은 좌우에 주기를 다르게 하여, 차량의 롤 모션이 발생할 수 있도록 하였다. 여기에 선형동기전동기의 디텐트력과 동시에 반영하여 현실적인 외란으로 간주하여 해석을 수행하였다.

Fig. 10은 차량의 선형동기전동기가 위치한 각 코너의 부상공극과 횡공극 해석 결과를 보여준다. 해석결과를 살펴보면 부상공극이 공칭공극 4 mm를 기준으로 약 ± 0.6 mm 이내로 안정적으로 제어되는 것을 확인할 수 있다. 또한 횡공극 결과도 마찬가지로 공칭공극 4 mm를 기준으로 제어됨을 알 수 있다. 제시된 해석 모델을 이용하여 인가된 불규칙 형상과 선형동기전동기의 디텐트력의 외란에 대하여 설계된 부상 제어가 효과적으로 작동하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 선형동기전동기를 이용하는 부상 및 추진 시스템의 동적 해석을 위한 동역학 모델링을 개발하고, 그 과정을 정립하였다. 또한 선형동기전동기의 디텐트력 특성을 FEM 해석을 통해 분석하고 이를 모델에 적용하였다. 선형동기전동기 추진 자기부상시스템을 분석하기 위해 실험을 통해 주파수 특성을 분석하였고, 약 7.8 Hz의 저주파가 디텐트력으로 인한 시스템에 발생된 진동 특성이라는 것을 확인하였다. 마찬가지로 본 논문에서 개발된 해석 모델에 디텐트력 외란 입력을 통한 부상공극 주파수 분석 결과 유사한 진동 특성을 확인하여, 시스템 해석 모델과 유사성을 통해 검증을 수행하였다. 또한, 디텐트력이 부상안정성에 미치는 영향을 분석한 결과 그 영향성은 미비함을 확인하였다. 마지막으로 선로의 불규칙한 형상에 의해서 발생하는 동특성이 분석하고자 부상안정성 응답 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해서 다양한 외란 주파수에서도 부상 및 안내 제어가 효과적으로 동작하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해서 제안된 모델링 방법을 이용하여 추후 개발될 실차급의 초고속 자기부상열차에서 시스템의 진동 특성을 고려한 효과적인 선형동기전동기의 설계와 제어기 설계에 활용될 수 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 국토교통부(15RTRP-B070556-03)로부터 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

References

- [1] D. A. Kim, A study on the commercialization of middle-low speed maglev train, Master degree Thesis, Hanyang University, 2016.
- [2] K. J. Kim, H. S. Han, C. H. Kim, and S. J. Yang, "Dynamic Analysis of a Maglev Conveyor Using an EM-PM Hybrid Magnet," J Electr Eng Technol, Vol. 8, No. 6, pp. 1571-1578, 2013.
- [3] K. J. Kim, H. S. Han, and S. J. Yang, "Analysis of Dynamic Interaction Between Maglev Vehicle and Guideway," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 37, No. 12, pp. 1559-1565, 2013.
- [4] C. H. Kim, K. J. Kim, J. S. Yu, and H. W. Cho, "Dynamic Performance Evaluation of 5-DOF Magnetic Levitation and Guidance Device by Using Equivalent Magnetic Circuit Model." IEEE Trans. Magn, Vol. 49, No. 7, pp. 4156-4159, July 2013.
- [5] J. D. Yau, "Vibration control of maglev vehicles traveling over a flexible guideway," J Sound Vib, vol. 321, pp. 184-200, 2009.
- [6] H. G. Dai, Dynamic behavior of maglev vehicle/guideway system with control, Ph.D. dissertation, Case Western Reserve University, 2005.
- [7] K. J. Kim, J. K. Lee, H. S. Han, and S. J. Yang, "Effect of Lateral Deformations of Guideway on Guidance Characteristics of Maglev Train," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 39, No. 11, pp. 1161-1167, 2015.
- [8] K. J. Kim, J. B. Han, H. S. Han and S. J. Yang. "Coupled vibration analysis of Maglev vehicle-guideway while-standing still or moving at low speeds," Veh Syst Dyn. vol. 53, no. 4, pp. 587-601, 2015.
- [9] N. Hagele, F. Dignath, "Vertical dynamics of the maglev vehicle transrapid," Multibody Syst Dyn, vol. 21, pp. 213-231, 2009.
- [10] GW. Shu, R Meisinger, G Shen, "Simulation of a MAGLEV train with periodic guideway deflections," 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing, pp. 421-425, 2008.
- [11] H. W. Jo, C. H. Kim, J. M. Lee, and H. S. Han, "Analysis on the Levitation Force Characteristics of Longitudinal Flux Type Levitation Magnet using Equivalent Magnetic Circuit Model," The Trans. of the Korean Institute of

Electrical Engineers Vol. 60, No. 12, pp. 2236-2245, 2010.

- [12] H. W. Jo, C. H. Kim, H. S. Han, J. M. Lee, B. S. Kim, D. S. Kim, and Y. S. Lee, "Design and Characteristic Analysis of Hybrid-Type Levitation and Propulsion Device for High-Speed Maglev Vehicle," The Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 59, No. 4, pp. 715-721, 2010.
- [13] P. K. Sinha, "Electromagnetic suspension dynamics & control," Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1987.

저 자 소 개



김 기 정 (Ki-Jung Kim)

1974년 10월 7일생. 2009년, 2011년, 2014년 충남대학교 메카트로닉스공학과 공학사, 공학석사, 공학박사 졸업. 2014년 3월~현재 충남대학교 첨단수송체연구소 연구 교수

Tel : 042-821-7788

E-mail : ready2go@cnu.ac.kr