

## 자기부상열차의 다이내믹 시뮬레이션

김종문, 배종일

한국전기연구원 계측제어연구그룹

### Dynamic Simulation of Magnetically-Levitated Vehicle

Jong-Moon Kim and Jong-Il Bae

I & C Group\*, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - In this paper, dynamic simulation results for magnetically-levitated vehicles are presented. The dynamic equations and models for a half-bogie system are derived. They include primary suspension system, module, secondary suspension and cabin. Also, the dynamic characteristics for the derived models are analysed.

능과 신뢰성을 향상시키기 위해 차량 단위의 다이내믹 시뮬레이션에 대한 결과를 언급한다. 궁극적인 목표는 차량 1량에 대한 것이지만 여기서는 1/3 차량에 대한 모델만 고려하기로 하며, 그 수학적인 관계식을 유도하고, 그 특성을 살펴보기로 한다. 이 논문에서는 모듈의 힘을 입력으로 하고, 객실의 가속도를 출력으로 하는 전달함수에 대한 보드선도 결과에 대해 언급한다. 그리고 자기부상열차 전체에 대한 다이내믹 시뮬레이션과 관련된 추후 내용에 대해 자세하게 언급하고자 한다.

#### 1. 서 론

최근 독일과 일본의 친환경 교통수단인 자기부상열차의 상업 운전이 각각 작년 1월과 올해 3월에 시작되었다. 지난 40여 년 동안 독일과 일본은 꾸준히 자기부상열차를 개발하여 왔으며, 그 결실을 이제야 맺고 있다고 볼 수 있다. 자기부상열차는 기존의 바퀴식 열차와 비교하여 친환경 측면에서 큰 장점을 지니고 있고, 최근에 사람들이 환경에 큰 관심을 보이고 있는 것도 상업 운전에 기여를 한 것으로 본다. 물론 독일과 일본의 기술이 크게 발전한 것이 가장 크다고 이유라고 할 수 있다. 국내에서도 한국기계연구원에 자기부상열차 사업단을 설치한 후, 지난 1998년 도시형 자기부상열차인 UTM (urban transit maglev) 시스템을 개발하였다. 하지만 UTM 시스템은 상업화에는 기술적으로 미흡한 상태이고, 상업화 수준에 준하는 기술을 확보하는 것이 필수적이다.

한편, 한국전기연구원은 UTM 시스템의 부상제어기 [1]를 담당하였는데, 현재 시속 70 km의 속도까지 올리는 데 문제가 없는 상태이다. 하지만 기술적 측면에서 실용화 내지 상업화 수준에는 못 미치기 때문에 이러한 미비점을 해결해야만 할 것이다. 그 기술은 여러 가지가 있으나 그 중 하나는 부상계에 대한 다이내믹 시뮬레이션이다.

다이내믹 시뮬레이션[2]은 제어대상 시스템의 실제 동작을 정확하게 모델링하는 것이라고 할 수 있는데, 자기부상열차의 경우, 부상 마그네트와 부상제어기, 가이드웨이와 차량의 동적 특성을 포함한다. 특히 상전도 자기부상열차는 최고 속도가 시속 100 km 정도이므로 항상 이 정도의 속도를 고려해야만 한다. 그리고 가이드웨이는 직선, 커브, 오르막 또는 내리막 등 여러 가지 형상이 있으며, 재질과 형상에 따라 고유 주파수가 변한다. 또한 차량 속도에 따라 가이드웨이와 차량의 상호작용도 다르게 된다. 다시 말해서, 전체적인 자기부상열차의 조건에 따라 동특성은 변하게 되며, 불안정한 상전도 시스템에 대한 안정화 제어기 설계 및 안정도 여유 확인, 객실에서의 승차감 향상 그리고 경제적인 궤도를 설계하기 위해 다이내믹 시뮬레이션은 꼭 필요하다.

이 논문에서는 실차형 자기부상열차 부상제어기의 성

#### 2. 본 론

##### 2.1 시스템 모델링

현재 전세계적으로 상전도 방식의 자기부상열차의 연구는 일본의 HSST(high speed surface transport) 시스템과 한국의 UTM 시스템을 예로 들 수 있다. 이 두 시스템의 형태와 사양은 매우 유사한 데, 차량 하나는 세계의 보기로 이루어져 있고, 보기 하나는 모듈 두 개 그리고 모듈 하나는 4개의 부상 마그네트에 의해 구성되어 있다. 그 모듈의 양쪽 끝은 스프링과 댐퍼로 객실과 연결되어 있다. 이 모델은 일반적인 자동차의 1/2 차량 모델과 그 구조가 유사하며, 그 운동 방정식도 큰 차이가 없다. 따라서 여기서 구한 수학적인 운동 방정식은 자동차의 1/2 차량 모델을 기본으로 구하였다. 그림 1은 자기부상열차의 1/3 차량 모델을 보여주고 있다. 그리고 자기부상 제어기, 마그네트 코일 및 가이드웨이 운동 방정식은 포함시키지 않았다.

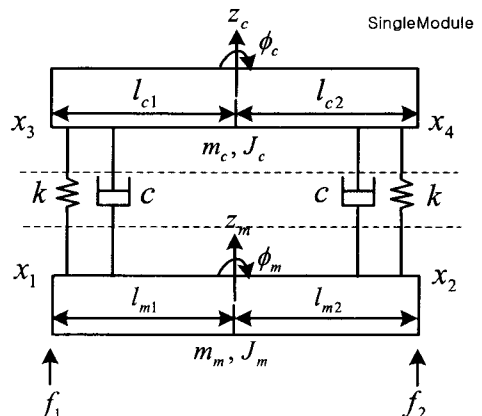


그림 1. 자기부상열차의 1/3 차량 모델

여기서 마그네트 모듈과 객실 사이에 스프링 상수가  $k(N/m)$ 인 스프링과 댐핑 상수가  $c(Nsec/m)$ 인 댐퍼가 있다. 일반적으로 상수  $k$ 와  $c$ 는 2차 서스펜션 시스템의 감쇠 계수  $\zeta$ 가 0.2 내외로 결정하고, 이 값은 객실 내에서의 승차감과 직접적으로 관련이 있다.

그림 1에서  $x_1$ 과  $x_2$ 는 마그네트 모듈 양쪽 끝의 변위이며,  $x_3$ 와  $x_4$ 는 객실 양쪽 끝의 변위이다. 그리고  $\dot{x}_1$ ,  $\dot{x}_2$ ,  $\dot{x}_3$ ,  $\dot{x}_4$ 는 속도이다. 그리고  $z_m$ 와  $z_c$ 는 각각 모듈과 객실의 무게중심의 수직 방향 변위이고,  $\phi_m$ 과  $\phi_c$ 는 각각 모듈과 객실의 무게중심의 피칭각이다. 만약 모듈과 객실의 피칭각이 매우 작다고 가정하면, 변위  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ 와 변위  $z_m$ ,  $z_c$  및 피칭각  $\phi_m$ 과  $\phi_c$ 는 다음과 같이 선형 관계가 있다.

$$x_1 = z_m + l_{m1}\phi_m \quad (1)$$

$$x_2 = z_m - l_{m2}\phi_m \quad (2)$$

$$x_3 = z_c + l_{c1}\phi_c \quad (3)$$

$$x_4 = z_c - l_{c2}\phi_c \quad (4)$$

여기서  $l_{m1}$ 와  $l_{m2}$ 는 모듈의 무게중심에서 각 모듈 코너 중심 사이과의 거리이고,  $l_{c1}$ 와  $l_{c2}$ 는 객실의 무게중심에서 각각의 스프링 및 댐퍼까지의 거리가 된다. 그림 1의 차량에서 모듈과 객실의 무게중심의 수직 방향의 병진 운동과 회전 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m_k \ddot{z}_c = k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) + k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) - m_k g \quad (5)$$

$$J_c \ddot{\phi}_c = l_{c1} [k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)] - l_{c2} [k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)] \quad (6)$$

$$m_m \ddot{z}_m = f_1 - [k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)] + f_2 - [k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)] - m_m g \quad (7)$$

$$J_m \ddot{\phi}_m = l_{m1} \{f_1 - [k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)]\} - l_{m2} \{f_2 - [k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)]\} \quad (8)$$

이 때 모듈과 객실의 무게중심이 중앙에 있다고 가정하면  $l_{m1} = l_{m2} = l_m$ ,  $l_{c1} = l_{c2} = l_c$ 이 된다. 또 모듈과 객실 끝에서의 가속도  $\ddot{x}_1 \sim \ddot{x}_4$ 는 다음과 같다.

$$\ddot{x}_1 = -m_1 q_1 - m_2 q_2 + m_1 f_1 + m_2 f_2 - g \quad (9)$$

$$\ddot{x}_2 = -m_2 q_1 - m_1 q_2 + m_2 f_1 + m_1 f_2 - g \quad (10)$$

$$\ddot{x}_3 = m_3 q_1 + m_4 q_2 - g \quad (11)$$

$$\ddot{x}_4 = m_4 q_1 + m_3 q_2 - g \quad (12)$$

여기서

$$q_1 = k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) \quad (13)$$

$$q_2 = k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) \quad (14)$$

$$m_1 = 1/m_m + l_m^2/J_m \quad (15)$$

$$m_2 = 1/m_m - l_m^2/J_m \quad (16)$$

$$m_3 = 1/m_c + l_c^2/J_c \quad (17)$$

$$m_4 = 1/m_c - l_c^2/J_c \quad (18)$$

이다.

## 2.2 시뮬레이션 결과

지금까지 마그네트 모듈과 스프링, 댐퍼 및 객실로 이루어진 자기부상 시스템의 동역학 방정식을 구하였다. 이제 자기부상 시스템의 파라미터를 구하여 이 모델을 검증하기로 한다. 표 2의 시뮬레이션 파라미터는 일본 HSST 자기부상열차의 자료[3]를 참고로 하였다.

파라미터	값
$m_c$	5880 kg
$m_m$	540 kg
$J_c$	2500 kgm <sup>2</sup>
$J_m$	280 kgm <sup>2</sup>
$k$	38700 N/m
$c$	4930 Nsec/m
$l_c$	1.25 m
$l_m$	1.25 m

표 2 시뮬레이션 파라미터

그림 2는 Simulink를 이용한 시뮬레이션 다이어그램이다. 입력은  $f_1$ 와  $f_2$ 이고, 출력은  $\ddot{x}_3$ 와  $\ddot{x}_4$ 이다. 이 그림에서 보듯이 마그네트의 흡입력에 대한 객실의 가속도의 크기가 승차감을 결정하게 된다.

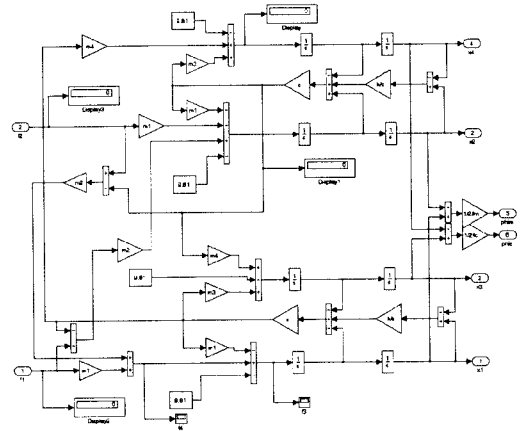


그림 2. Simulink를 이용한 시뮬레이션 다이어그램

그림 3과 4는 입력  $f_1$ 에 대한 객실의 가속도  $\ddot{x}_3$ 와  $\ddot{x}_4$ 의 전달함수에 대한 보드 선도이다. 여기서 댐퍼 상수  $c$ 의 값을 정상적인 때와 20% 정도로 작아질 때의 전달함수의 크기 차이를 보여 준다. 댐퍼 상수가 작아지면 객실 가속도의 크기가 커져 승차감이 저하된다는 것을 보여 준다. 따라서 이 보드 선도를 통하여 승차감에 대한 기준을 만족하도록 스프링 상수와 댐퍼 상수를 결정할 수가 있게 된다. 또한 차량 속도에 따라 모듈로부터 객실에 전달되는 힘의 주파수가 변하게 되고, 이 주파수가 2차 서스펜션 시스템의 공진 주파수와 같게 되면 객실의 가속도는 제일 크게 된다. 따라서 차량 속도와 승차감을

동시에 고려해야만 한다.

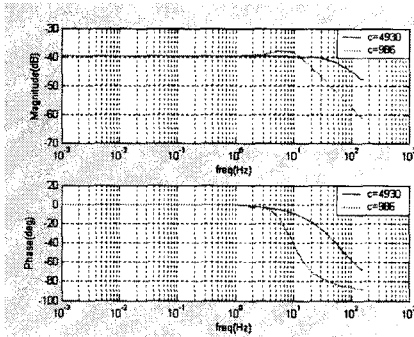


그림 3. 힘  $f_1$ 에 대한 가속도  $\ddot{x}_3$ 의 보드 선도

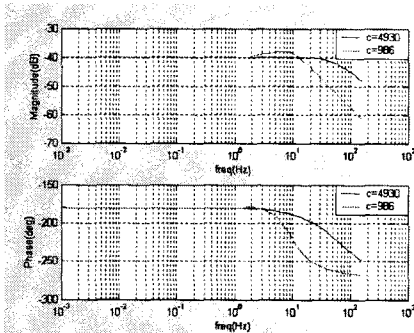


그림 4. 힘  $f_1$ 에 대한 가속도  $\ddot{x}_4$ 의 보드 선도

### 2.3 부상계 전체 모델링 전략

자기부상열차 시스템은 그림 7에서 볼 수 있듯이 크게 부상제어기, 마그네트 모듈, 2차 서스펜션, 가이드웨이 및 객실로 이루어져 있다. 또한 차량이 시속 100 km의 속도로 움직이므로 항상 이 속도값을 고려해야만 한다. 자기부상 제어기는 일반적으로 관측자와 상태 제어기로 이루어져 있으며, 가이드웨이는 유연한 특성을 지니고 있다. 차량의 속도에 따라서 가이드웨이의 굽힘 모드 특성이 변하게 되므로 가이드웨이를 설계할 때에는 차량 속도를 생각해야만 한다. 추후에 가이드웨이의 고유치 분석은 기계 해석용 소프트웨어인 ANSYS를 사용하며, 가이드웨이의 굽힘 모드를 주로 볼 예정이다. 그리고 다이나믹 시뮬레이션에서 중요한 것은 실제 시스템의 파라미터를 정확하게 추출하는 것이다. 이 방법도 역시 강구해야만 한다.

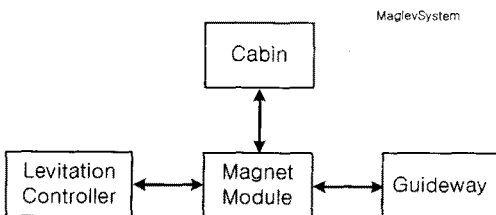


그림 5. Maglev 시스템

한편, 자기부상열차에서는 가이드웨이 형상이 매우 다양하다. 특히, 경사 또는 곡선에서의 운동은 해석이 어려워 다양한 가이드웨이 형상에 대한 해석 연구가 필요하다.

### 3. 결 론

이 논문에서는 자기부상열차의 다이나믹 시뮬레이션을 위한 기본 연구로서, 1/3 차량 모델에 대한 기계적인 운동 방정식을 유도하고, 이 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서는 부상제어기와 가이드웨이의 동역학은 제외하였기 때문에 추후에는 이것도 포함시켜 부상계 전체에 대한 동특성을 연구해야만 한다. 하지만 자기부상 시스템에서는 매우 다양한 외란 및 기구 문제가 발생하기 때문에 다이나믹 시뮬레이션은 쉬운 작업은 아니다. 따라서 정확한 파라미터 추출법과 함께 모델링 능력도 키우는 것이 매우 중요하다고 볼 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전기연구원, 부상 및 추진 제어기술 개발, 1998. 9.
- [2] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [3] 미국 FTA, *Assessment of CHSST Maglev for U.S. Urban Transportation*, 2002. 7.