

부상제어 시스템에서 유연레일의 특성 분석

김중문, 김춘경
한국전기연구원 계측제어연구그룹

Characteristics Analysis of Flexible Rail in Levitation Control System

Jong-Moon Kim and Choon-Kyung Kim
I & C Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this paper, characteristics of the flexible rail in levitation control system are analysed. The magnetic levitation system is an electromagnet type and is full-scaled vehicles. The system consists of electromagnet, chopper, flexible rail, secondary suspension system and levitation controller. The mathematical modelling for the whole system is carried out. Especially, the flexible rail is modelled using second-order mass-spring-damper system. Using the derived model, the dynamic characteristics for the system are presented with different vehicle speed.

1. 서 론

자기부상열차는 소음, 진동, 마모가 적어 친환경적인 시스템이면서, 가속 성능이 뛰어나며, 급구배 및 곡선 레일에서 기존의 바퀴식 열차 시스템에 유리하여 최근에 관심이 많아지고 있다. 독일과 일본은 수십 년간 연구를 하여 실용화에 성공을 하였고, 국내도 꾸준히 투자하여 실용화를 앞두고 있다.

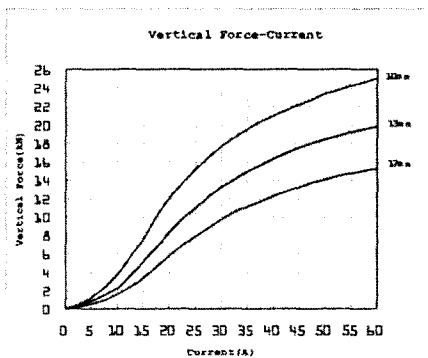
상업용 자기부상열차는 실험실 수준의 시스템과 달리 매우 복잡한 요소 기술로 이루어져 있으며, 특히, 부상제어 시스템은 다양한 외란에 영향을 받게 된다. 또한, 상업화에서는 경제성도 매우 중요하며, 궤도의 슬림화가 그 해결방법 중의 하나가 된다. 따라서 슬림화된 궤도로부터 부상제어 시스템에 외란이 미치게 되어 부상제어 성능에 나쁜 영향을 주게 된다.

레일을 포함한 전체 자기부상열차의 모델링 방법에서 많이 사용하는 ADAMS 소프트웨어[1]는 매우 복잡한 시스템에는 적당한 방법이지만 부상제어를 설계하기 위한 방법으로는 부담이 많은 접근 방법이다. 따라서 이 논문에서는 2차 시스템으로 근사화한 방법을 사용하여 부상시스템의 주파수 특성 해석 및 부상제어기 설계를 하고자 한다. 차량속도가 변하면 레일에 가해지는 힘의 크기 및 주파수 성분이 변하게 되며, 레일에 스텝 형태의 단차가 있을 경우, 차량 속도에 따라 마그네트 공극, 전류, 가속도 및 보기의 위치 변화, 가속도 등의 신호 응답은 다르게 된다. 실제 자기부상열차의 궤도가 슬림화가 되면, 레일 진동이 심하게 발생하게 되어, 이 레일 진동의 크기를 일정할 값 이하로 유지하는 것이 매우 중요하다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델링

자기부상열차는 마그네트에서 발생하는 부상력에 의해 지지되므로 부상력 제어가 제일 중요하다고 볼 수 있다. 그것은 부상 마그네트, 초퍼, 부상제어기 등으로 이루어진 부상시스템이 자기부상열차에서 차지하는 비중이 그 만큼 크다는 것을 의미한다. 이 논문에서 다룬 대상은 산업자원부 주관의 중기거점과제 (주)로템이 개발 중인 자기부상열차이다. 먼저 부상시스템의 수학적인 모델을 유도한다[2]. 그림 1은 부상 마그네트의 부상력 대 전류 특성곡선이며, 동작점은 갭이 10 mm, 전류는 21 A이다.



<그림 1> 마그네트의 부상력 대 전류 특성곡선

마그네트의 누설전류가 없다고 가정하고, μ_0 는 공기 중의 투자율, N 는 코일 권선수, A_δ 는 마그네트 극 단면적, m_m 는 마그네트 무게, g 는 중력가속도이고, δ , i , v 는 각각 마그네트 공극, 전류, 전압이다.

1차 서스펜션 시스템에서 마그네트 부상력 f_m 은

$$f_m = \frac{\mu_0 N^2 A_\delta}{4} \left(\frac{i}{\delta} \right)^2$$

이고, 마그네트의 가속도는

$$\ddot{\delta} = \frac{(-f_m + m_m g)}{m_m}$$

이다. 또한, 코일 전류의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{di}{dt} = -\frac{2\delta}{\mu_0 A_\delta N^2} (v - Ri) + \frac{i}{\delta} \dot{\delta}$$

트랙의 운동방정식은

$$\frac{d}{dt} v_t = \frac{f_m - k_t x_t - c_t v_t + m_t g}{m_t}$$

$$\frac{d}{dt} x_t = v_t$$

이고, 트랙의 고유주파수는 다음과 같다.

$$f_t = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_t}{m_t}} = 9.2 \text{ Hz}$$

여기서 m_m 는 160 kg, R 는 1.2 Ω , 트랙의 강성계수 k_t 는 10⁶ N/m, 트랙의 댐핑계수 c_t 는 10³ Nsec/m, 트랙의 무게 m_t 는 300 kg이다. 또한, x_t 는 트랙의 변위, v_t 는 트랙의 변위의 속도를 의미한다.

한편, 2차 서스펜션에 의한 객실의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} v_s = \frac{m_s g - c_s (v_s - \dot{\delta}) - k_s (x_s - \delta)}{m_s}$$

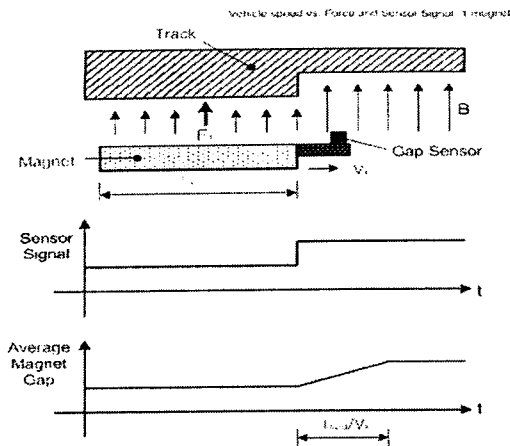
$$\frac{d}{dt} x_s = v_s$$

여기서 객실의 무게 m_s 는 923 kg, 2차 서스펜션의 강성계수 k_s 는 46,000 N/m, 댐핑계수 c_s 는 3,706 Nsec/m이고, v_s 와 x_s 는 각각 객실의 변위와 속도를 의미한다.

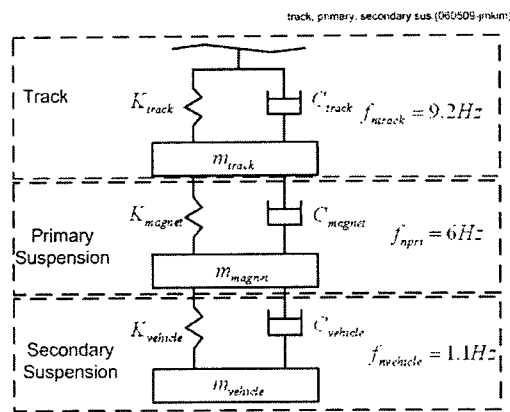
이제 앞에서 구한 비선형 모델에 대한 비선형 시뮬레이션을 한다. 여기서는 레일이 유연하여 진동이 발생할 때, 레일에 스텝 형태의 외란이 존재한다는 것을 가정하였다. 일반적인 상전도 자기부상열차에서는 마그네트 모듈의 양단에 갭 센서를 설치한다. 이 갭 센서 신호는 특정 지점의 갭만을 측정하지만, 실제 마그네트의 평균 갭은 이 센서 값과 차이가 있다. 따라서 차량속도가 올라가면 갭 센서 값과 마그네트 평균 갭 사이의 오차가 줄어들어 마그네트 갭의 변화가 줄어들게 된다. 물론 이것은 차량속도 이외의 상태는 동일하다는 가정이고, 만약 차량속도가 올라가면 외란이 커져 갭 변화가 커질 수 있다.

위에서 계산된 레일의 고유주파수는 약 9.2 Hz 이고, 레일 스텝의 크기는 1 mm이다. 차량 속도는 각각 10 m/s와 100 m/s이며, 시뮬레이션 시간은 0.6 초이다.

그림 2는 차량속도를 고려한 자기부상 시스템의 모델링을 보여 준다. 갭 센서 신호는 트랙의 스텝 변화 시점에서 스텝 형태로 변화지만, 마그네트 평균 갭은 차량속도에 따라 램프 형태가 된다. 따라서 차량속도가 작으면 갭 센서와 실제 마그네트 갭 사이에 오차가 커져 문제가 발생하게 된다. 그림 3은 트랙, 1차 및 2차 서스펜션 시스템으로 이루어진 전체 부상시스템의 고유주파수를 보여 주며, 각각 9.2, 6.0, 1.1 Hz가 된다.



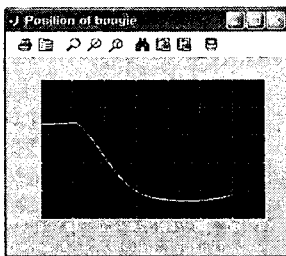
〈그림 2〉 차량속도를 고려한 자기부상 시스템 모델링



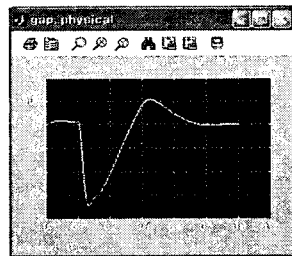
〈그림 3〉 트랙, 1차 및 2차 서스펜션 시스템 개념도

1) 차량속도가 10 m/s인 경우

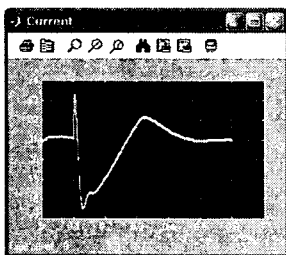
그림 4~8은 차량속도가 10 m/s일 때의 차량위치, 마그네트 공극, 전류, 전압 및 가속도 신호를 보여 준다. 정상상태 공극은 10 mm이고, 전류는 21 A이다. 차량위치는 낮은 고유주파수 때문에 응답이 매우 느리고, 마그네트 공극은 약 0.4 초 지난 후에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.



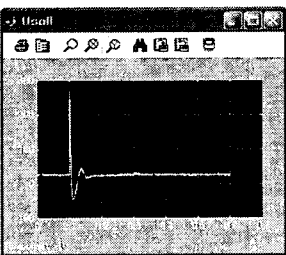
〈그림 4〉 차량위치



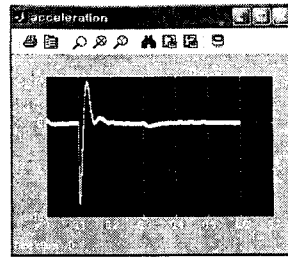
〈그림 5〉 마그네트 공극



〈그림 6〉 마그네트 전류



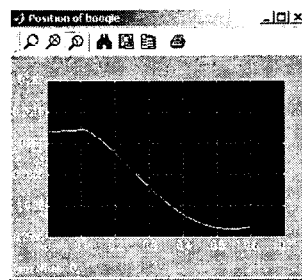
〈그림 7〉 마그네트 전압



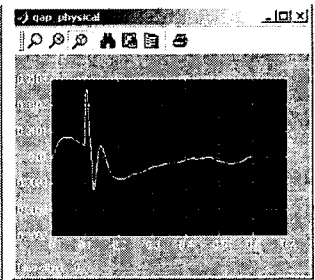
〈그림 8〉 마그네트 가속도

2) 차량속도가 100 m/s인 경우

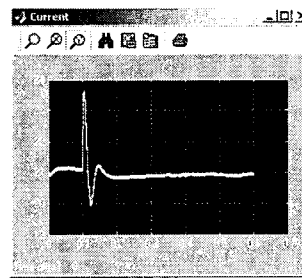
그림 9~13은 차량속도가 100 m/s일 때의 차량위치, 마그네트 공극, 전류, 전압 및 가속도 신호를 보여 준다. 이 경우, 마그네트 공극, 전류, 가속도 변화 크기가 모두 차량속도가 10 m/s의 경우보다 다 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 차량속도가 빠르면 마그네트 갭과 갭 센서 값의 오차가 줄어들기 때문이며, 또한, 트랙에서 오는 외란이 1차 서스펜션 시스템에 전달될 때, 자동적으로 필터링되어 트랙의 스텝 변화의 효과가 줄어드는 것도 이유가 된다.



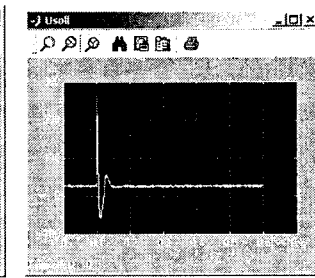
〈그림 9〉 차량위치



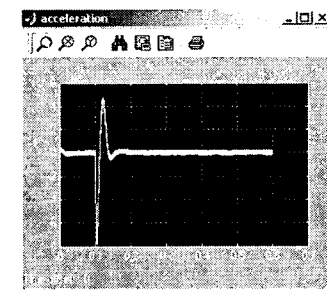
〈그림 10〉 마그네트 공극



〈그림 11〉 마그네트 전류



〈그림 12〉 마그네트 전압



〈그림 13〉 마그네트 가속도

3. 결 론

이 논문에서는 자기부상열차의 차량속도를 고려한 비선형 시뮬레이션 결과를 보였다. 상업용 자기부상열차는 다양한 외란으로부터 영향을 받으며, 트랙의 변화도 그 중 하나다. 앞의 결과에서, 차량속도가 빠르면 갭 및 가속도 신호가 작게 변한다는 것을 알 수 있었고, 이러한 부상 시뮬레이션 툴을 이용하여 개선된 부상제어기 설계가 가능하다는 것을 보였다.

[참 고 문 헌]

[1] MSC Software, *ADAMS User's Guide*, 2004.
 [2] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrius, 1987.