

자기부상열차의 부상제어 요구 성능을 고려한 시스템의 설계

System Design Considering the required performance of the Levitation Control in Maglev

조정민* 이종민** 강병관** 박성호** 김철호** 최종목** 김국진***
Jo, Jeong-Min Lee, Jong-Min Kang, Byung-Gwan Park, Sung-Ho
Kim, Cheol-Ho, Choi, Jong-Mook Kim, Kuk-Jin

ABSTRACT

The performance of magnetic levitation controller is affected from not only levitation control algorithm but also the interaction between compositing system, so it is important to design maglev system considering the character of magnetic levitation controller in order to get the required performance of Maglev.

The factors affecting the levitation controller of maglev are the dynamics of levitation magnet, the carrying weight of the overall system, the normal force and lateral force of traction motor and rail condition. In this paper the interaction between magnet and vehicle weight is analysed on side of stability of levitation controller in order to get the required performance of levitation controller.

1. 서 론

자기부상시스템은 차세대 교통수단으로써 자기부상열차의 핵심기술인 부상제어기술은 기본적으로 고속 운행을 지향하고 있지만 중저속의 차량에도 낮은 유지보수비와 저소음 그리고 높은 등반능력등과 같은 많은 이점을 제공하기 때문에 부상제어기술이 안정화된다면 그 활용도가 매우 높다.[1]

자기부상열차의 부상제어성능은 자기부상열차가 여러 가지 구성 품으로 이루어진 종합시스템임으로 부상제어 알고리즘뿐만 아니라 차량을 구성하고 있는 구성품의 상호작용에 의해 결정되어진다. 따라서 자기부상열차의 부상제어 성능향상을 위해서는 자기부상제어의 특성을 고려한 시스템의 설계가 중요하다. 부상제어에 영향을 미치는 주요 요소로는 부상마그네트의 동특성 및 시스템의 하중, 추진 장치의 수직/수평힘 그리고 레일의 조건 등이 있다.[2][3]

본 논문에서는 자기부상제어의 성능에 영향을 주는 여러 가지 요소 중 차량측면에서 부상제어에 가장 많은 영향을 미치는 부상마그네트의 부담하중과 마그네트 인덕턴스 변화에 대한 상관관계를 분석하였다. 분석방법으로는 부상마그네트의 부담하중 또는 마그네트 인덕턴스를 특정 값으로 변화시켰을 경우 부상제어시스템의 극점이동과 보드선도의 상대안정도의 변화를 분석하는 방식을 택하였다. 그리고 부상시스템의 보드선도와 실제 주행시에 나타나는 주행공극파형과의 연관성을 분석하기위해서 한국기계연구원 자기부상열차(UTM-01)의 마그네트 드라이브를 대상으로 주파수 응답 실험하였고 그 실험결과(보드선도)와 50[km/h] 주행시 얻어진 주행공극신호를 FFT분석하여 얻어진 결과를 비교하였다.

* 현대로템, 전장품개발팀, 비회원

E-mail : jmjo@hyundai-rotem.co.kr

TEL : (031)460-1903 FAX : (031)460-1788

** 현대로템, 전장품개발팀, 비회원

*** 현대로템, 선형제품개발팀, 비회원

2. 부상시스템 구성 및 시스템 파라미터 변경시 특성변화

2.1 부상시스템 구성[4]

그림 1은 부상제어시스템의 구성을 나타내고 있다. 부상제어를 위한 주요 구성품은 부상용 마그네트와 레일, 레일과 마그네트의 상대공극을 측정할 수 있는 공극센서, 가상의 절대 기준 축을 기준으로 마그네트의 상하변위를 나타내는 가속도 센서, 그리고 이러한 신호를 검출 받아 전류를 제어하는 마그네트 드라이브 유닛 등이 있다.

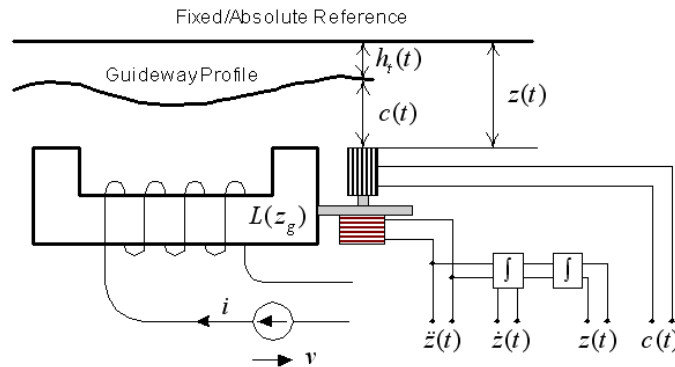


그림 1 부상제어 시스템의 구성

그림 1과 같은 부상제어 시스템은 마그네트의 여자전류 $i(t)$ 에 의해 발생하는 부상력을 제어하여 수직방향으로의 동특성을 제어한다. 이러한 부상시스템을 수식적으로 모델링하여 상태공간방정식의 형태로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{c}(t) \\ \Delta \ddot{z}(t) \\ \Delta \dot{i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_z}{m} & 0 & \frac{-k_i}{m} \\ 0 & \frac{k_z}{k_i} & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta c(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \\ \frac{1}{L_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v(t) \\ f_d(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에서, $k_i = -\frac{\mu_0 N^2 S i_0}{2z_0^2}$, $k_z = -\frac{\mu_0 N^2 S i_0^2}{2z_0^3}$, $L_0 = -\frac{\mu_0 N^2 S}{2z_0}$ 이며, N 은 마그네트의 권선수, S 는 마그네트 폴의 면적, i_0 와 L_0 는 운전점에서의 부상전류 및 인덕턴스를 나타낸다. 그리고 m : 단위마그네트의 부담하중, R_0 : 마그네트 저항, z_0 : 정격공극을 나타낸다. 이때 기계연구원의 자기부상열차(UTM-01) 시스템 및 실용화 자기부상열차(C-Maglev)에 적용할 부상시스템의 각종 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시스템 파라미터

항목	UTM-01	C-Maglev	항목	UTM-01	C-Maglev
m	1000[kg]	600[kg]	z_0	0.01[m]	0.008[m]
S	0.04[m ²]	0.04[m ²]	i_0	20[A]	30[A]
R0	1.3[ohm]	0.57[ohm]	L0	1.35[H]	0.43[H]

2.2 부상제어기 구성 및 제어기 설계

2.2.1 부상제어기 구성

그림 2는 자기부상시스템의 극배치 제어를 위한 시스템 모델을 나타내고 있다. 실제 시스템의 경우 시스템의 상태변수를 모두 측정하기가 어렵기 때문에 상태변수를 추정하기 위한 관측기 설계가 필요하나 본 논문에서는 시스템의 특성을 파악하는데 관측기의 극점이 영향을 줄 수 있으므로 모든 상태변수는 EMS(Electro-Magnet System)으로부터 직접검출 받는 것으로 하였다.

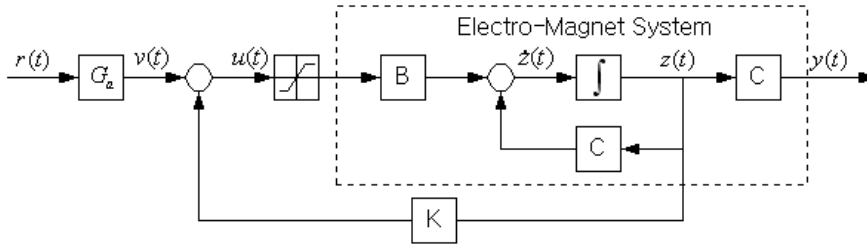


그림 2 이득을 포함한 상태 피드백 제어시스템

2.2.2 부상제어기 설계

그림 2와 같은 극배치 제어를 하기 위해서는 원하는 극점을 설정하여야 한다. 따라서 극점 설정을 위한 요구사항은 다음과 같이 정하였다. 마그네트의 전류를 제어하기 위한 백분율 오버슈트 P.O는 운전점에서 마그네트의 인덕턴스 값이 매우 크므로 속응성을 위해 P.O. = 30%로 하였다. 따라서 감쇠비는 $\zeta = 0.33$ 이 된다. 고유주파수는 시스템의 특성을 고려하여 $\omega_n = 2 \times \pi \times 5$ 로 하였다. 따라서 제동인자 $\alpha = 10.4$ 값이 되었다. 이러한 값을 기반으로 원하는 근위위치를 구하면 그림 3과 같다.

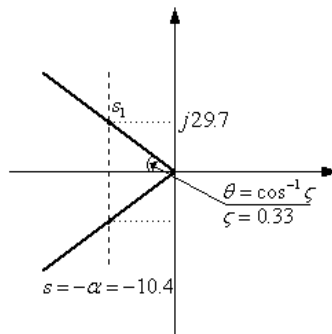


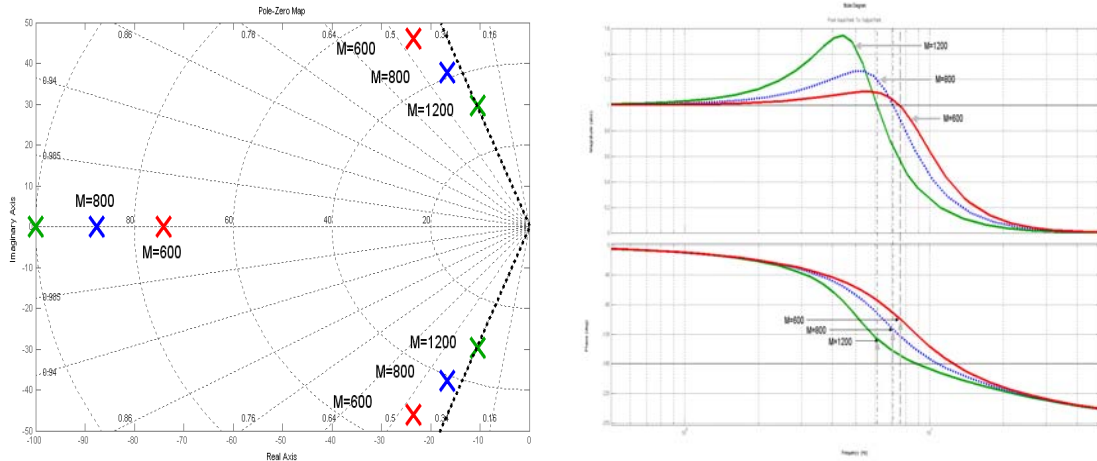
그림 3 극점 설정

그림 3으로부터 두개의 제어기의 극점이 설정되었고 나머지 극점은 부상제어응답에 영향을 주지 않도록 실수축으로부터 먼 값인 -100 으로 하면, 부상제어기의 극점은 $s_{1,2} = -10.4 \pm j29.7$, $s_3 = -100$ 이 된다. 그리고 그림 2의 제어기 지령 이득행렬 G_a 는 식(2)과 같다.

$$G_a = \frac{1}{C(-A + BK)^{-1}B} \quad (2)$$

2.2 단위 마그네트의 부담 하중변화에 대한 특성

부상 시스템은 부상마그네트가 분담하는 하중의 크기에 따라서 부상특성이 달라진다. 이러한 특성을 파악하기 위해 그림 2와 같이 제어기를 구성하고 제어기의 극점을 $s_{1,2} = -10.4 \pm j29.7$, $s_3 = -100$ 로 설정한 후 부상마그네트의 부담하중을 각각 1200[kg] → 800[kg] → 600[kg]으로 변화시켜 보았다.



a. 각각에 대한 극점이동

b. 각각에 대한 Bode 선도

그림 4 단위부상 마그네트의 부담 하중의 변화에 따른 시스템의 특성

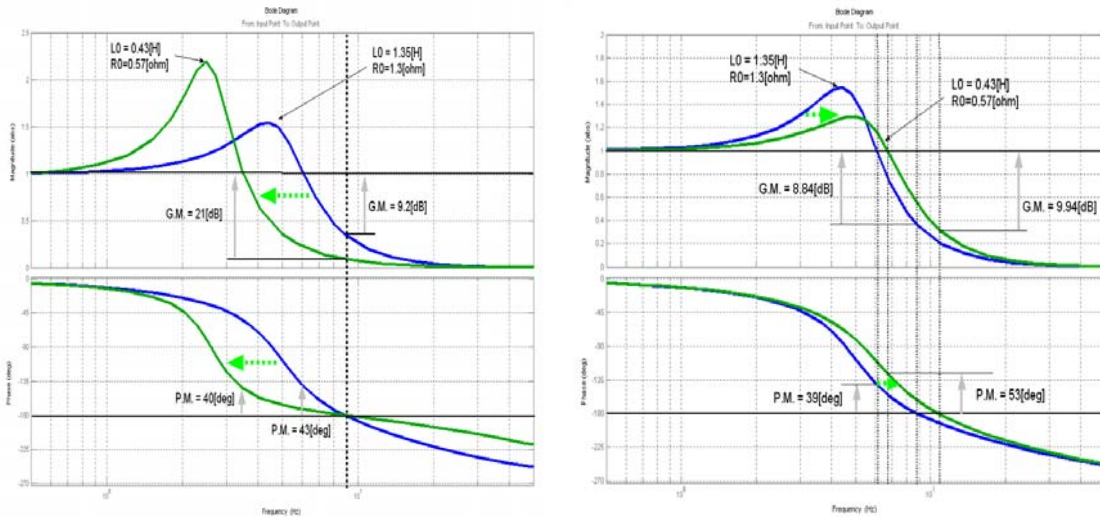
그림 4는 부상제어시스템에서 단위 마그네트의 부담 하중을 변화시켰을 때의 결과파형으로 4.a는 각각의 부담하중변화에 대한 극점의 이동경로를 나타내었고 4.b는 각각에 대한 보드선도(Bode Plot)로써 제어시스템의 대역폭(Bandwidth)과 위상여유(P.M.)를 나타내고 있다. 그림 4.a 결과로부터 부상마그네트의 부담하중이 줄어들수록 감쇠비 ζ 가 증가하며 극점이 좌측으로 이동하여 시스템의 응답특성이 개선되는 것을 알 수 있다. 그림 4.b의 결과도 마찬가지로 시스템의 하중이 감소할수록 제어기 대역폭이 증가하며 첨두치 값도 감소하는 것을 알 수 있다.

2.2 마그네트의 전기적 파라미터 변화에 대한 특성

부상마그네트의 부상력은 식 (3)과 같이 권선 턴수비 및 부상전류의 제곱에 비례한다. 즉 마그네트 설계시 고려해야할 사항은 우선 부상시스템의 요구 부상력을 산정한 후 부상전류와 마그네트의 동특성을 고려하여 권선수를 정한다. 식 (3)은 부상마그네트의 부상력과 각종 파라미터와의 상관관계식을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 F(i, z) &= \frac{B^2 A}{\mu_0} \\
 &= \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left[\frac{i(t)}{z(t)} \right]^2
 \end{aligned} \tag{3}$$

그림 5는 부상마그네트의 권선수를 달리하여 두 개의 부상마그네트의 인덕턴스 및 저항 값을 변경시켰을 경우 부상시스템의 동특성변화를 나타내고 있다. 그림 5.a의 시험조건은 부상제어기의 이득을 일정하게 유지하고 마그네트의 인덕턴스와 저항 값을 $R_0 = 1.3[\Omega]$, $L_0 = 1.3[H]$ 에서 $R_0 = 0.57[\Omega]$, $L_0 = 0.43[H]$ 으로 변경 하였다.



a. 인덕턴스 변화에 대한 극점이동 b. G.M과 P.M을 비슷한 값으로 한 경우

그림 5 부상마그네트의 인덕턴스와 저항 값을 변경한 경우

그림 5.a의 결과로부터 마그네트의 인덕턴스가 작은 경우에는 제어기의 대역폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 마그네트의 인덕턴스가 큰 경우에 비하여 이득여유가 G.M. = 9.2[dB]에서 G.M. = 21[dB]로 증가하는 것을 알 수 있다. 그래서 그림 5.b의 시험조건은 그림 5.a와 같은 조건에서 제어기의 이득을 조절하여 두 가지의 경우가 모두 비슷한 크기의 이득여유를 갖도록 조절하였다. 부상제어기의 이득 여유를 서로 비슷한 값으로 조절한 경우의 결과는 그림 5.b와 같다. 그 결과로부터 마그네트의 인덕턴스가 작은 경우 이득여유 G.M.= 9.94[dB]와 위상여유 P.M.=39[deg]가 마그네트의 인덕턴스가 큰 경우의 이득여유 G.M.= 8.84[dB]와 위상여유 P.M. =39[deg]에 비해 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉 마그네트의 인덕턴스를 적정수준에서 값을 줄이면 상대안정도가 높아질 뿐만 아니라 제어기의 대역폭도 증가되는 것을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과 고찰

이상과 같이 부상마그네트의 동특성변화는 부상마그네트의 부담하중과 인덕턴스의 변화에 대하여 변화됨을 부상제어기의 보드선도를 통하여 분석해보았다. 그리고 본 장에서는 부상제어시스템의 보드선도로 예측한 성능과 실제 주행시 나타나는 공극변화와의 상관관계를 시뮬레이션과 실험을 통해 분석하였다.

그림 8은 표 1의 시스템 파라미터를 기반으로 UTM-01과 C-Maglev의 MDU 동특성에 대한 보드선도를 서로 비교하여 나타내었다. 시뮬레이션 결과 UTM-01의 제어기 대역폭은 대략 B.W.=5.1[Hz]이며 이득여유 및 위상여유가 비교적 큰 것을 알 수 있다. C-Maglev에 적용될 마그네트 드라이브는 제어기의 특성을 최적화하였으며 이때의 제어기 대역폭은 대략 B.W. = 8.5[Hz] 정도를 나타내고 있다. 이러한 결과는 C-Maglev의 부상제어 동특성이 UTM-01에 비하여 많이 개선될 수 있음을 보여준다.

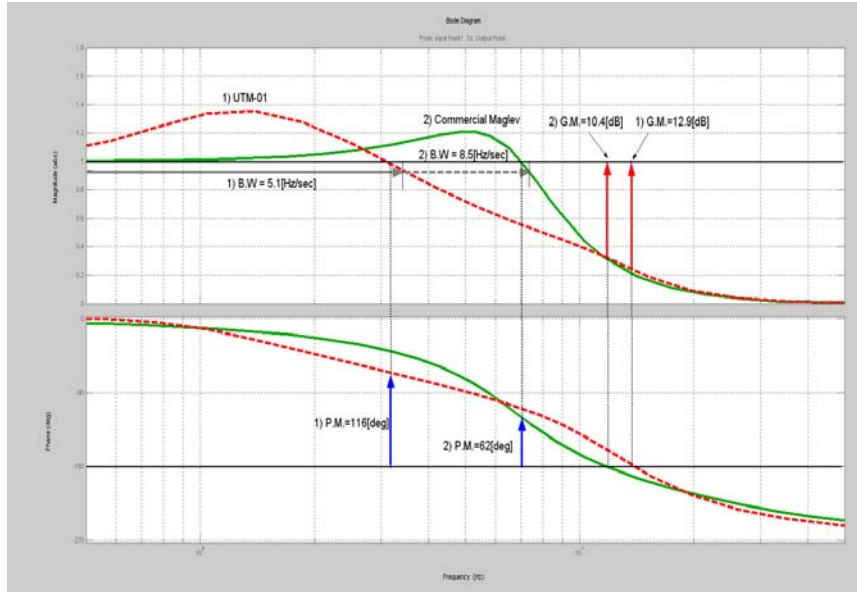
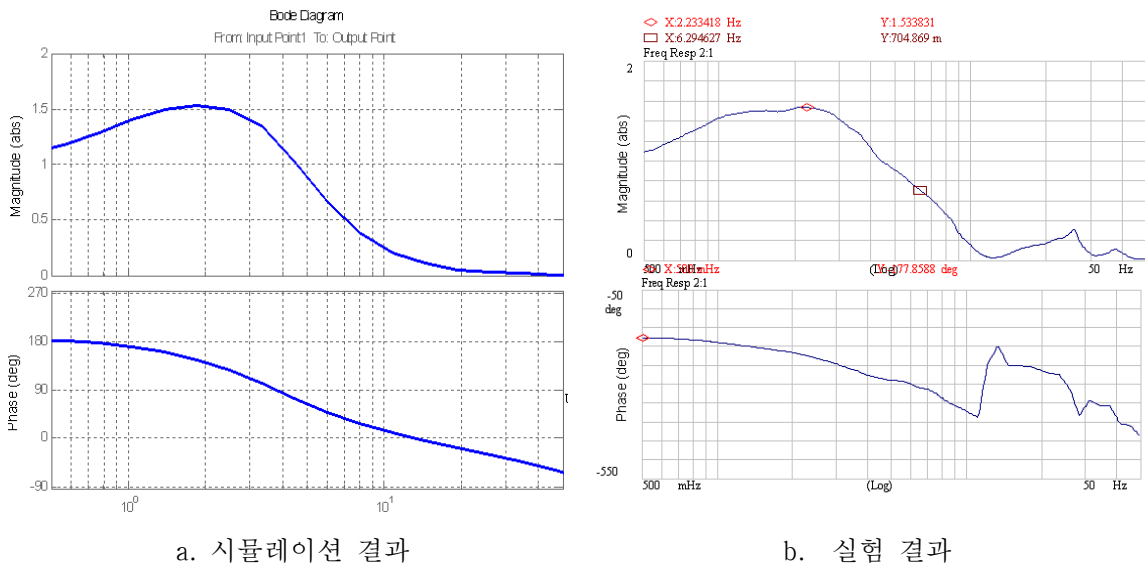


그림 8 UTM-01과 C-Maglev의 MDU 동특성 비교

그림 9는 UTM-01의 MDU의 동특성에 대한 시뮬레이션 결과와 Control System Analyzer(CSA)를 이용하여 얻어진 실험한 결과를 보드선도로 나타내고 있다. 그 결과 10[Hz]이하의 저주파 영역에서 시뮬레이션 결과와 실험결과가 매우 유사하며 10[Hz]이상의 주파수영역에서는 시뮬레이션과 실험결과가 다소 차이를 보여주고 있다. 이러한 차이점은 부상제어 시스템의 시뮬레이션 모델링이 실제 시스템에 존재하는 2차 서스펜션을 고려하지 않아서 생기는 차이점과 실험 중 측정오차로 인한 차이인 것으로 판단된다.



a. 시뮬레이션 결과

b. 실험 결과

그림 9 UTM-01 마그네트 드라이브의 보드선도

그림 10은 그림 9와 같은 MDU의 동특성을 갖는 자기부상열차(UTM-01)가 트랙위를 최고속도 50[km/h]까지 주행하였을 경우 주행속도에 따른 공극신호변동(3번 대차)을 나타내고 있다. 실험결과로부터 주행 최고속도는 대략 50[km/h]이며 부상공극은 10[mm]이고 공극 변동율은 ± 2 [mm]이내인 것을 알 수 있다.

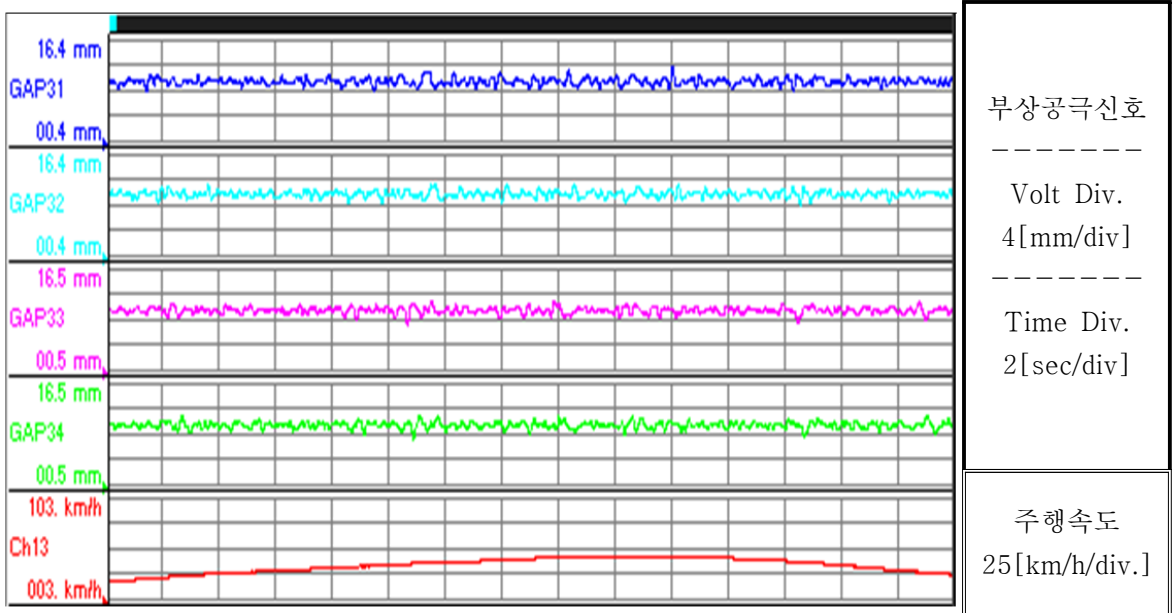
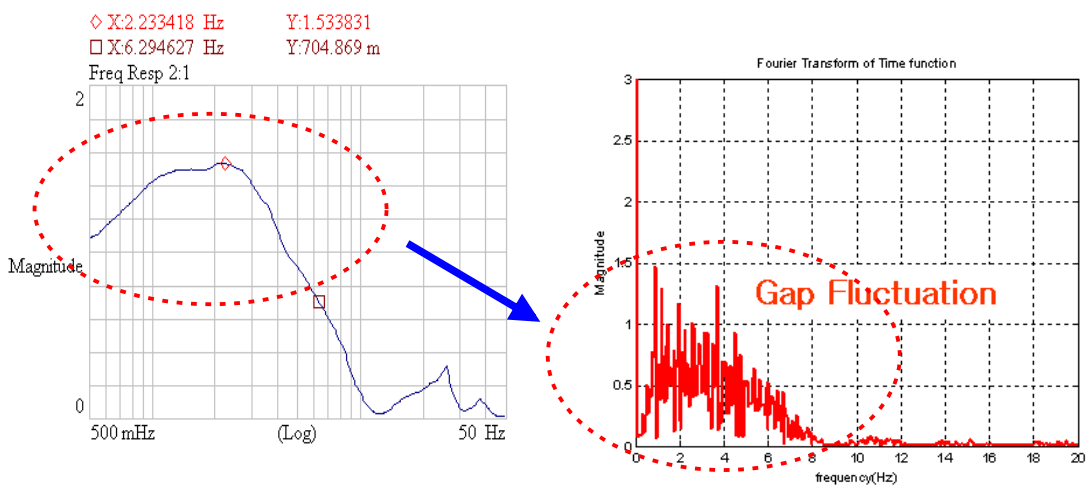


그림 10 UTM-01의 3번 대차 공극신호 및 주행속도

그림 11은 CSA를 이용하여 얻어진 보드선도와 실제 주행시 나타나는 공극변동과의 상관관계를 알아보기 위해서, MDU의 동특성에 대한 보드선도와 실제 주행시 얻어진 공극신호를 주파수도메인에 나타낸 결과이다. 비교 결과로부터 CSA로부터 얻어진 결과는 실제 주행하여 얻어진 결과와 유사한 형태를 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있다. 이로써 자기부상열차 부상마그네트의 부담하중을 줄이고 부상마그네트의 인덕턴스를 적절한 값으로 작게하여 부상력의 응답특성을 빠르게 할 경우 주행시에도 부상능이 개선될 수 있음을 확인하였다.



a. MDU의 동특성에 대한 보드선도

b. 주행공극신호의 FFT 분석결과

그림 11 0[km/h] → 50[km/h]로 주행시 공극신호에 대한 주파수분석결과

4. 결론

본 논문에서는 자기부상열차의 부상제어에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 요소 중 차량측면에서 가장 주요한 영향을 주는 단위 부상마그네트의 부담하중과 마그네트 파라미터 변화에 대한 상관관계를 고찰하였다. 이를 위해 시뮬레이션을 수행하였고 시뮬레이션결과(보드선도)와 주행특성과의 상관관계를 파악하기위해서 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 자기부상시스템을 구성하는 각각의 부상마그네트가 부담하는 하중이 작으면 부상제어시스템의 대역폭이 증가하고 제동비 ζ 도 증가하여 부상제어의 응답특성이 개선된다.
2. 부상 마그네트의 인덕턴스 값이 감소하면 부상전류에 의한 부상력 변화율이 증가되어 부상제어시스템의 속응성을 기대할 수 있다.
3. 자기부상열차가 정상적인 궤도조건하에서 주행시 나타날 수 있는 부상제어성능은 CSA를 이용한 시스템응답특성(보드선도)으로 대략적인 예측이 가능하다.

이상과 같이 자기부상열차의 부상제어성능은 부상제어 알고리즘만의 문제가 아니라 차량을 구성하고 있는 구성품의 상호작용에 의해 결정되어지는 것을 확인할 수 있었다. 그래서 자기부상열차는 부상시스템의 안정화를 위한 시스템 설계가 고려되어야 하며 시스템의 경량화가 필수 요건인 것을 알 수 있다. 향후 과제로는 시뮬레이션과 같은 MDU의 동특성을 얻기 위해서 부상마그네트의 운전범위 내에서 자속 포화현상이 없어야 하며 이를 위해서는 부상마그네트의 공극 자속밀도를 운전영역에서 0.5[T]로 설계하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. Jonathan E Paddison, Hiroyuki Ohsaki, Eisuke Masada(1996), "Control Strategies for Maglev Electromagnetic Suspension Bogies" , IEEE Proceeding of the 35th Conference, TP08, pp. 4:40
2. K.Fujisaki and E.Masada(1984), " Dynamic Behaviour of a Magnetic Wheel" , IEEE Trans., Vol. Mag-20, No. 5, pp1678~1680
3. Takafumi Koseki, Kazuya hayafune, Eisuke Masada(1987), " Lateral Motion of a Short-Stator Type Magnetic Wheel", IEEE Trans., Vol. Mag-23, No.5, pp2350-2352
4. P.K. Sinha(1987), "Electromagnetic suspension Dynamics & Control", IEE control engineering series; V.30