

### 자기부상제어기의 특성분석

김종문, 김춘경  
한국전기연구원 계측제어연구그룹

### Characteristics Analysis of Magnetic Levitation Controller

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

**Abstract** - In this paper, the characteristics analysis results of the levitation controller of magnetically-levitated vehicle are presented. To get a good closed-loop system, the observer and controller must be designed to meet the control performance and ride quality requirements. So the transfer functions of the observer filter are described and analysed by using the relative and absolute signal concepts.

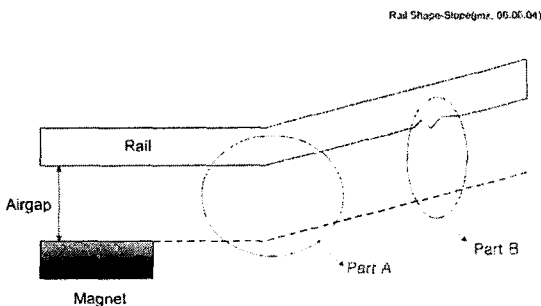
#### 1. 서 론

지난 40여 년 동안 독일과 일본은 꾸준히 자기부상열차를 개발하여 왔으며, 각각 2004년 1월과 2005년 3월에 상업운전을 시작하였다. 자기부상열차는 기존의 바퀴식 열차와 비교하여 친환경적이고, 가속 성능이 우수하다는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 국내에서도 과학기술부 주관으로 지난 1998년 도시형 자기부상열차인 UTM(urban transit maglev) 시스템을 개발하였고, 2003년부터 산업자원부 주관으로 개선된 자기부상열차를 개발 중에 있고, 현재는 건설교통부 주관으로 실용화 사업을 추진 중에 있다[1].

한국전기연구원은 UTM 시스템의 부상제어기 개발[2]을 담당하였고, 기술과 경험이 실용화 사업에서 많은 도움이 될 것으로 본다. 기반기술과 인력 그리고 개발경험이 풍부한 독일과 일본과 달리 우리는 여러 가지 면에서 부족한 실정임을 감안하면 연구진과 연구체계 등을 효율적으로 이용을 해야만 할 것이다. 특히, 차량시스템은 부상, 추진, 전원 등으로 이루어진 전기 시스템과 대차, 차체 등으로 이루어진 기계 시스템으로 나눌 수 있는데, 자기부상열차가 다른 기존의 열차와 다른 부분이 부상 및 추진 시스템이기 때문에 전기 시스템의 역할이 차량 시스템의 핵심기술이라 할 수 있다. 부상제어 시스템은 부상 마그네트, 부상 제어기, 조파, 센서 및 DC/DC 컨버터로 이루어져 있고, 이 중에서 부상 제어기는 자기부상열차에서 가장 중요한 기술이라 할 수 있다.

실차형 자기부상열차가 실제로 운행할 때에는 궤도 형상이 매우 다양하다. 궤도 형상에는 직선, 구배, 곡선, 수직 단차, 이음매 등이 있고, 궤도가 강체 또는 유연체에 따라 그 특성이 매우 다르게 된다. 그림 1은 레일에서의 저주파 및 고주파 성분의 형상을 보여 준다. 부상제어 시스템은 부상 후 추진 때, 마그네트가 추종해야 할 성분을 추종할 수 있도록 제어를 하는 역할을 한다. 즉, 그림 1에서 레일에 파트 A처럼 저주파 성분이 있으면 마그네트는 레일과 일정한 공극을 유지하면서 레일을 추종하게 되며, 반면에 고주파 성분이 있으면 레일을 추종하지 않고, 절대 기준면인 해수면과 평행선을 추종해야만 한다. 그 이유는 고주파 성분을 추종하면 객실에서의 승차감이 떨어지기 때문이다[3].

이 논문에서는 다양한 레일의 형상을 갖는 경우에도 제어성능과 승차감을 동시에 만족하는 부상제어 시스템을 설계하기 위한 방안으로 껍, 속도 및 가속도의 상대 및 절대 신호를 이용한 관측자의 분석 및 설계에 대해 언급한다. 이 관측자는 상대 껍, 상대 속도, 절대 가속도, 절대 속도 및 절대 껍 신호를 출력으로 하고, 이 출력 신호에 게인이 곱해져 상태 궤환형 부상제어 알고리즘이 된다.

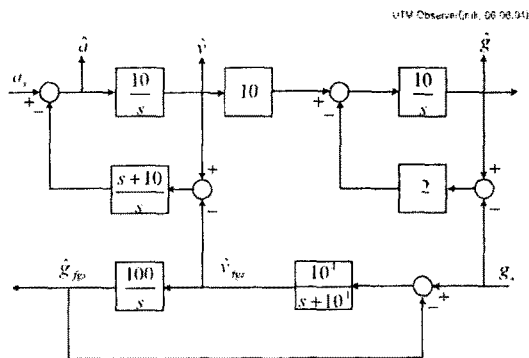


<그림 1> 레일에서의 저주파 및 고주파 성분의 형상

#### 2. 본 문

##### 2.1 관측자 분석

실차형 자기부상열차의 부상제어 알고리즘을 구현하기 위해서는 관측자 및 제어기를 구성해야 하며, 관측자는 상태 궤환형 제어기를 위해서 결정적으로 중요한 역할을 하게 된다. 그림 2는 UTM 시스템의 관측자 블록도를 보여 준다. 이 관측자의 입력은 껍 센서와 가속도 센서 신호이고, 출력은 추정된 상대 껍( $\hat{g}_{fgs}$ ), 추정된 상대 속도( $\hat{v}_{fgs}$ ), 추정된 가속도( $\hat{a}$ ), 추정된 속도( $\hat{v}$ ) 및 추정된 껍( $\hat{g}$ ) 신호이다.



<그림 2> UTM 부상제어기의 관측자 블록도

그림 2에서  $\hat{g}_{fgs}$ 는 추정된 상대 껍,  $\hat{v}_{fgs}$ 는 추정된 상대 속도,  $\hat{a}$ 는 추정된 가속도,  $\hat{v}$ 는 추정된 속도,  $\hat{g}$ 는 추정된 껍을 의미한다. 먼저 수식 전개에서 필요한 신호 정의를 한다.

- $G_{HP}$  : 고역통과 필터
- $G_{LP}$  : 저역통과 필터
- $w_n$  : 필터의 대역폭
- $\zeta$  : 필터의 감쇠비
- $g_s$  : 껍 센서 신호
- $a_s$  : 가속도 센서 신호
- $a_{fgs}$  : 필터링된 상대 가속도 신호
- $v_{fgs} = \hat{v}_{fgs}$  : 상대 속도 신호
- $g_{fgs} = \hat{g}_{fgs} = \frac{100}{s} v_{fgs}$  : 상대 껍 신호
- $v_{as} = \frac{1}{s} a_s$  : 절대 속도 신호
- $g_{as} = \frac{1}{s} v_{as}$  : 절대 껍 신호

위의 정의에서  $v_{fgs}$ ,  $g_{fgs}$ ,  $v_{as}$ ,  $g_{as}$ 는 센서 신호로부터 직접 적분 또는 미분한 신호이고,  $\hat{a}$ ,  $\hat{v}$ ,  $\hat{g}$ 는 가속도 센서 및 껍 센서 신호의 조합에 의해 만들어진 신호이다. 이 관측자의 출력 신호  $\hat{g}_{fgs}$ ,  $\hat{v}_{fgs}$ ,  $\hat{a}$ ,  $\hat{v}$ ,  $\hat{g}$ 가 피드백 게인이 곱해져 결국 제어신호가 계산이 된다.

이제 그림 2의 관측자 출력 신호를 껍 및 가속도 센서에 의해 표현하고, 그 전달함수를  $G_{HP}$ 와  $G_{LP}$ 에 의해 나타낸다.

먼저, 추정된 상대 껍 신호  $\hat{g}_{fgs}$ 는

$$\hat{g}_{fgs} = \frac{\frac{10^4}{s+10^4} \frac{100}{s}}{1 + \frac{10^4}{s+10^4} \frac{100}{s}} g_s = \frac{10^6}{s^2 + 10^4 s + 10^6} g_s$$

이 되어, 잼 센서 신호에 대역폭( $w_n$ )과 감쇠비( $\zeta$ )는 다음과 같다.

$$w_n = 1000 \text{ rad/sec}, \quad \zeta = \frac{10000}{2w_n} = 5$$

추정된 상대 속도 신호  $\hat{v}_{fgs}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{v}_{fgs} = \frac{10^4 s}{s^2 + 10^4 s + 10^6} g_s$$

위의 두 상대 신호는 모두 잼 센서 신호만 포함하고 있으며, 가속도 신호는 포함하고 있지 않다. 반면에 다음의 신호들은 잼 센서 뿐 만 아니라 가속도 센서 신호도 포함하고 있다.

추정된 가속도 신호  $\hat{a}$ 는

$$\begin{aligned} \hat{a} &= a_s - \left( \frac{s+10}{s} \right) (\hat{v} - \hat{v}_{fgs}) \\ &= a_s - \left( \frac{s+10}{s} \right) \left( \frac{10}{s} \hat{a} - \frac{10^4 s}{s^2 + 10^4 s + 10^6} g_s \right) \\ &= a_s - \frac{10(s+10)}{s^2} \hat{a} + \frac{10^4 (s+10)}{s^2 + 10^4 s + 10^6} g_s \end{aligned}$$

이 되고, 다시 정리하면

$$\left( 1 + \frac{10(s+10)}{s^2} \right) \hat{a} = a_s + \frac{10^4 (s+10)}{s^2 + 10^4 s + 10^6} g_s$$

그 결과, 가속도 신호  $\hat{a}$ 는

$$\begin{aligned} \hat{a} &= \frac{s^2}{s^2 + 10s + 100} \left( a_s + \frac{10^4 (s+10)}{s^2 + 10^4 s + 10^6} g_s \right) \\ &= \frac{s^2}{s^2 + 10s + 100} a_s + \frac{10^4 (s+10)s^2}{(s^2 + 10s + 100)(s^2 + 10^4 s + 10^6)} g_s \\ &= \frac{s^2}{s^2 + 10s + 100} a_s + \frac{(10s+100)}{(s^2 + 10s + 100)} \frac{10^3 s^2}{(s^2 + 10^4 s + 10^6)} g_s \\ &= \frac{s^2}{s^2 + 10s + 100} a_{as} + \frac{(10s+100)}{(s^2 + 10s + 100)} a_{fgs} \\ &= G_{HP} a_{as} + G_{LP} a_{fgs} \end{aligned}$$

이 되고, 절대 가속도 신호는 고역통과 필터  $G_{HP}$ 에 곱해지고, 상대 가속도 신호는 저역통과 필터  $G_{LP}$ 에 곱해진 후, 최종적으로는 두 신호가 합해진 형태로 된다. 그림 3은 전달함수  $G_{HP}$ 와  $G_{LP}$ 의 보드선도이며, 이 그림에서 나타낸 것처럼

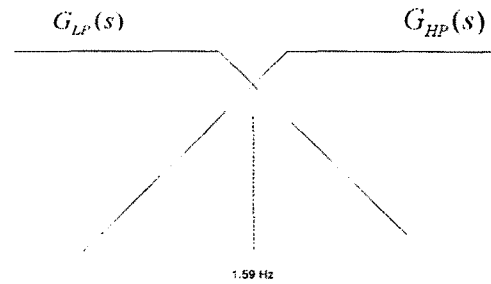
$$\begin{aligned} \hat{a} &\approx a_{as} \quad @f \gg 1.59 \text{ Hz} \\ \hat{a} &\approx a_{fgs} \quad @f \ll 1.59 \text{ Hz} \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 두 전달함수의 중간주파수는 자기부상열차의 부상 시스템에서의 제어성능과 객실에서의 승차감을 좌우한다. 즉 이 주파수가 커지면 마그네트는 높은 주파수 성분의 레일을 추종하게 되어 제어성능은 향상되나, 객실에서의 승차감은 떨어지게 된다. 반면에, 주파수가 낮아지면 마그네트가 낮은 주파수 성분의 레일만 추종하게 되어 제어성능은 저하되고, 승차감은 향상된다.

이 개념은 앞의 서론에서 언급을 하였지만 그림 1처럼 레일에 주파 성분은 주로 있으면 추정된 가속도 신호  $\hat{a}$ 는 주로 신호  $a_{fgs}$ 를 포함하여 마그네트는 레일을 추종하게 된다. 반면에 레일에 고주파 성분이 있으면 주로 신호  $a_{as}$ 를 포함하게 되어 마그네트는 레일을 추종하지 않고 절대 기준면인 해수면과 평행인 면을 추종하게 된다.

그림 2에서 추정된 속도 신호  $\hat{v}$ 는

$$\begin{aligned} \hat{v} &= \frac{10}{s} \hat{a} \\ &= \frac{10}{s} \left( \frac{s^2}{s^2 + 10s + 100} a_{as} + \frac{10s+100}{s^2 + 10s + 100} a_{fgs} \right) \end{aligned}$$



<그림 3> 전달함수  $G_{HP}(s)$ 와  $G_{LP}(s)$ 의 보드선도

$$\begin{aligned} &= 10 \left( \frac{s^2}{s^2 + 10s + 100} v_{as} + \frac{10s+100}{s^2 + 10s + 100} v_{fgs} \right) \\ &= 10(G_{HP} v_{as} + G_{LP} v_{fgs}) \end{aligned}$$

속도 신호  $\hat{v}$ 는 가속도 신호  $\hat{a}$ 와 마찬가지로 절대 속도 신호는 고역통과 필터  $G_{HP}$ 에 곱해지고, 상대 속도 신호는 저역통과 필터  $G_{LP}$ 에 곱해진 후, 최종적으로는 두 신호가 합해진 형태로 표현된다. 그리고 추정된 잼 신호  $\hat{g}$ 는

$$\begin{aligned} \hat{g} &= \frac{10}{s} (10\hat{v} - 2(\hat{g} - g_s)) \\ &= \frac{100}{s} \hat{v} - \frac{20}{s} (\hat{g} - g_s) \\ &= \frac{100}{s} \hat{v} - \frac{20}{s} \hat{e}_g \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 잼 신호  $\hat{g}$ 는 속도  $\hat{v}$ 의 적분한 값에다가 잼 추종오차  $\hat{e}_g$ 를 적분 보상한 값을 더한 값으로 표현된다. 초기에 잼 추종오차가 0이 아니면 적분 보상에 의해 정상상태에서 오차는 0으로 수렴하게 된다. 수렴속도를 결정하는 것은 잼 오차에 대한 적분 계인이며, 값이 커지면 그만큼 빨리 수렴하게 된다.

지금까지 구한 관측자 출력신호는 피드백 계인이 곱해진 후, 다시 더해져 제어신호가 된다. 부상제어 알고리즘의 목적은 제어성능과 승차감에 대한 사양을 동시에 만족하는 것이며 이를 위해 상대 및 절대 신호 개념을 도입하여 잼, 속도 및 가속도 신호에 대한 가중치를 결정해야만 한다.

### 3. 결 론

지금까지 UTM 자기부상열차의 부상제어기에서 구현된 관측자에 대한 분석 결과에 대해 언급을 하였다. 자기부상열차에서 사용하는 센서는 잼 센서와 가속도 센서이며, 이를 이용한 다양한 필터를 구성하여 제어성능과 승차감을 동시에 만족해야만 한다. 제어성능과 승차감에 대한 사양은 참고문헌 [3]에 잘 나타나 있으며, 부상 및 추진 때, 매우 다양한 레일에 대한 외란을 잘 제어할 수 있는 부상제어기 설계가 핵심이 된다.

여기서는 관측자 모델에 대한 분석 결과에 대해 주로 언급하였지만, 부상 제어 시스템의 페루프 시스템을 구성하는 마그네트 모듈, 초퍼, 부상제어기, 센서를 포함하는 전체 시스템의 해석도 이루어져야 하며, 현재 작업 중에 있다. 또한 차체, 2차 서스펜션, 유연체 레일 및 마그네트 모듈을 포함하는 전체 시스템에 대한 해석 및 설계 작업도 꼭 필요하다. 이를 위해 수학적 모델링을 완료하였으며, 이를 이용한 다이나믹 시뮬레이션을 준비 중에 있다.

### [참고 문헌]

- [1] 한국철도기술연구원, 자기부상열차 실용화 사업에 대한 예비타당성 조사, 2005년 4월.
- [2] 한국전기연구원, 부상 및 추진 제어기술 개발, 1998. 9.
- [3] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.