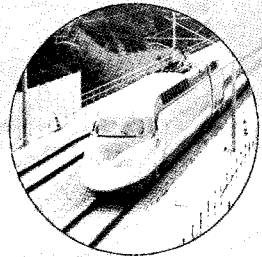


특별Session

흡인식 자기부상제어기 설계

성호경 _ 한국기계연구원



상전도 흡인식 자기부상제어기 설계

A levitation-controller design for EMS (Electromagnetic Suspension)

성호경* 조정민** 이종무** 남용윤** 신병천**
Sung, Ho Kyung Jho, Jeong Min Lee, Jong Moo Nam, Yong Youn Shin, Byung Cheon

ABSTRACT

The EMS system requires a very delicate suspension control to maintain constant air-gap between the magnet and the guide-way rail. To maintain a constant air-gap with attraction force, the EMS system dynamics is changed according to uncertainties and disturbances, and it also requires reliability against component failures. Since uncertainties and component failures are frequently caused in EMS system, it is very important to develop the robust and reliable control system. In this paper, we consider the design problem for robust and reliable controller in the presence of uncertainties and component failures.

1. 서론

증기기관차의 탄생부터 공학자들에게 wheel-on-rail은 궤도차량의 지지기능 및 추진을 위한 유일한 수단이었다. wheel-on-rail에 대안으로 제시된 것으로써, 첫 번째 기록된 시스템은 1864년 Girard에 의해 개발된 floating train이고 1864년 파리의 World Fair에서 실물이 공개되었다. 그 이후로 바퀴가 없이도 움직이는 물체를 떠받치기 위한 시도들이 몇 차례 더 있었고, low-pressure air-jet를 이용하거나 전자기력을 이용하려는 발상이 대두되기 시작했다. 그러나 1960년대에 빠른 electro-mechanical control gear의 개발과 solid-state electronics의 출현이 있었고, 승객 수송차량에 대한 이러한 생각의 적용은 기술적으로 타당하다는 견해만 있었다.

지상교통시스템에 대한 비접촉 지지에 관한 현재 연구들은 거의 2가지 형태(Electro-Dynamic Suspension system 과 Electro-Magnetic Suspension system)를 기반으로 하고 있다. 이 두 가지 자기부상 시스템중 하나인 반발식 자기부상시스템은 본질적으로 안정하며, 복잡한 제어를 필요로 하지 않는다. 흡인식 자기부상 시스템은 본질적으로 불안정하여 섬세한 제어를 요구한다. 두개의 자화되는 본체사이에서 발생하는 반발력 또는 흡입력은 이것들의 간격에 대하여 반비례한다.[1]

* 성호경, 회원, 한국기계연구원, 자기부상연구팀
E-mail : sung-hk@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7191 FAX : (042)868-7618
** 한국기계연구원

흡인식 자기부상 시스템은 마그네트와 가이드 레일사이에 일정한 공극을 유지하기 위해서 아주 섬세한 부상제어를 필요로 한다. 흡인력으로 일정한 부상공극을 유지하기 위해서 흡인식 자기부상시스템의 동특성은 불안정성(uncertainties)과 외란(disturbances)에 따라 변하게 된다. 공극외란은 질량이 변하거나 알 수 없는 동력학관계(unknown dynamics), 필수적인 부분(actuator나 센서와 같은)의 고장상태에서 종종 발생한다. 그래서 흡인식 자기부상 시스템 제어는 불안정성(uncertainties)과 외란의 발행에 대하여 강인성을 갖추어야 하며, 부품고장에 대한 신뢰성을 요구된다.

현재 저작의 역할은 UTM이라 부르는 흡인식 자기부상 시스템 원형으로 개발된 Korean Maglev Project에서 연구를 함께 진행하는 것이다. 이 프로젝트에서 저작의 업무범위(wok-scope)는 강인성 및 신뢰성의 개선으로 진보된 부상제어시스템의 개발을 돕는 것이다. 이번 연구에서 논의되는 많은 문제점들은 1.1km 시험 선로상에 있는 UTM의 시험운행을 통하여 얻어진 것이다. 그림 1.1은 자기부상시스템에 대한 시험차량을 보여주고 있다. 본 논문에서는 불안정성과 부품고장 발생시 강인하고 신뢰성 있는 제어기에 대한 설계상의 문제점을 고찰하고자 한다. 불안정성은 질량변화와 외부입력과 같은 알 수 없는 다이내믹스와 공극외란과 같은 일정치 않은 외부적인 입력이라는 두 가지 주된 항목에 의해 나타나게 된다. 궤한 제어에서 불안정한 시스템의 기본형태는 그림 1.2에서 볼 수 있다. 고장은 actuator 그리고/또는 랜덤 노이즈의 전자기적 간섭으로 인한 센서고장과 같은 다양한 형태로 나타난다. 이러한 특성에 따라서 불안정성은 정현적이고 변칙적인 신호와 같은 외란으로 표현하고, 순시변동과 output zeroing과 같은 것을 각각 soft-type과 hard-type의 고장으로 표현한다.

비쿼식	자기부상식
1. 점착을 통한지지, 공칭점착력은 대략 70,000psi	1. 가이드웨이의 단위면적당 부하를 넓은 면적지지로 줄일 수 있다. 점착력 10-50psi
2. 점착 마찰력에 의한 추진	2. 선형모터에 의한 비접촉 추진
3. 최고속도제한은 점착력과 연관되었음	3. 속도는 자장저항(magnetic drag)과 공기 저항력에 의해 제한
4. 높은 환경 소음기준에 대한 중간급	4. 중간급 소음기준에서 낮은 값
5. 보수가 많이 필요	5. 낮은 유지보수

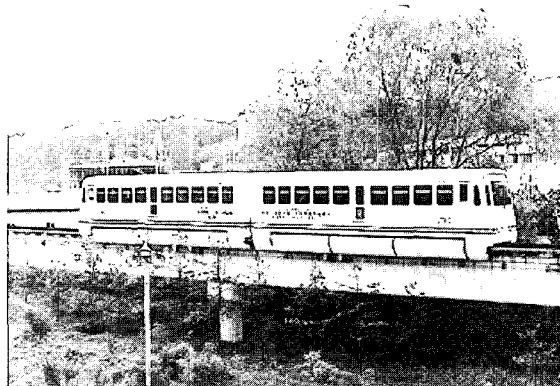


그림 1.1 UTM 시험차량사진

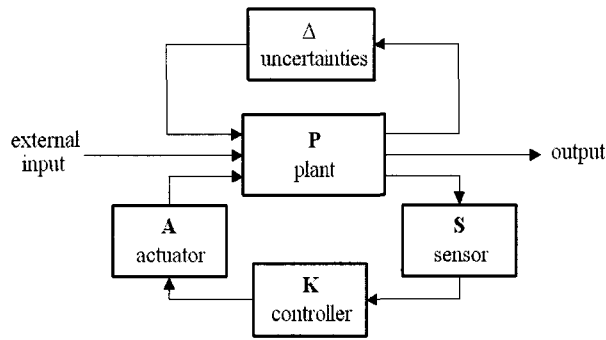


그림 1.2 피드백 제어기반의 불안정 시스템의 표준도

2. 흡인식 자기부상시스템

2.1 흡인식자기부상시스템 모델링 및 특성

흡인식 자기부상 시스템의 open loop instability 특성 때문에 궤한 제어기의 가장 중요한 기능은 마그네트가 모든 운전조건에서 마그네트의 부상을 유지하는 것이다.

자기부상시스템을 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\frac{L_0 z_0}{2m} \left(\frac{x_3}{x_1 - w} \right)^2 + g + \frac{\Delta f}{m}, \\ \dot{x}_3 &= -\frac{x_2}{x_1 - w} \cdot x_3 - \frac{R}{L_0 z_0} \cdot (x_1 - w)x_3 + \frac{x_1 - w}{L_0 z_0} \cdot u \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기에서 $x_1 = z$ 은 수직 공극이고, $x_2 = \dot{z}$ 는 수직 속도, $x_3 = i$ 는 마그네트 전류, $u = v$ 은 제어입력이다. 만일 마그네트 전류가 제어입력이라고 가정하면, 부상 상태방정식은 2차식으로 줄일 수 있다.[2]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{L_0 z_0}{2m} \left(\frac{u}{x_1 - w} \right)^2 + g + \frac{\Delta f}{m} \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기에서 $u = i$ 는 제어 입력이다.

이러한 방정식들은 만일 마그네트 전류를 충분히 높은 전압 구동용량을 갖는 높은 밴드 전류 루프에 의해 제어한다면, 이 시스템을 적절하게 모델링한 것일 수 있다. 대부분의 응용장비에서, 전류제어루프와 같은 것으로 마그네트 코일을 구동하는 것이 대표적인 방식이다. 이것은 본래 전자기적 코일 저항과 인덕턴스의 위치에 종속적인 특성을 제거하기 위한 것이다.

부상 동특성의 정확한 분석은 (2.1)에서 (2.2)의 수식해가 필요할 수도 있지만 보다 상세한 선형모델은 공칭 운전점(i_0, z_0)부근에서 흡인력의 선형 근사값을 이용하여 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\delta 1} &= x_{\delta 2} \\ \dot{x}_{\delta 2} &= \frac{k_z}{m} x_{\delta 1} - \frac{k_i}{m} x_{\delta 3} + \frac{\Delta f}{m}, \\ \dot{x}_{\delta 3} &= \frac{k_z}{m} x_{\delta 2} - \frac{R}{L_0} x_{\delta 3} + \frac{1}{L} u_{\delta} \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기에서 $k_z = \frac{L_0 N_0^2}{z_0^2}$ 과 $k_i = \frac{L_0 N_0}{z_0}$ 이다.

공극외란이 없는 이상적인 선형 흡인식 자기부상 시스템의 블록도는 그림 2.1에 표현되어져 있다. 편차변수(deviation variable)는 다음과 같다.

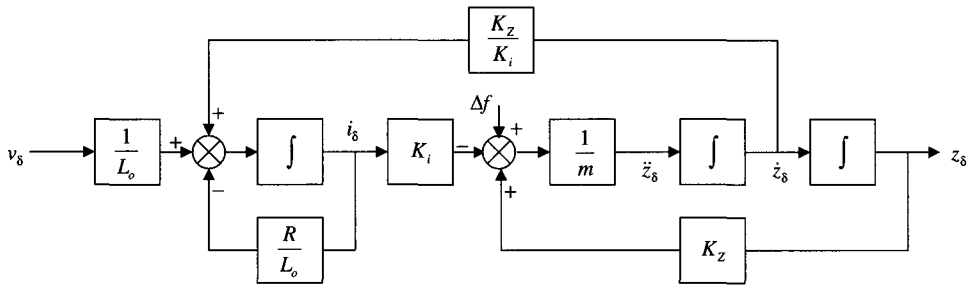


그림 2.1 선형 흡인식 자기부상 시스템의 블록도

$$\begin{aligned} x_{\delta 1} &= x_1 - x_{10}, \\ x_{\delta 2} &= x_2 - x_{20}, \\ x_{\delta 3} &= x_3 - x_{30}, \\ u_{\delta} &= u - u_0 \\ y_{\delta} &= y - y_0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기에서 u_0 와 y_0 는 각각 공칭 운전점에서 입력과 출력을 나타낸다. 이런 경우에, 델타(delta)는 증분량을 나타내고, 하위첨자 0(sub-zero)은 공칭 운전점을 의미한다. (2.1)의 비선형 방정식으로부터 그림 2.2(a)가 만일 $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = u = 0$ 라면 흡인식 자기부상 시스템은 평형점을 포함하지 않는다는 것을 의미한다.

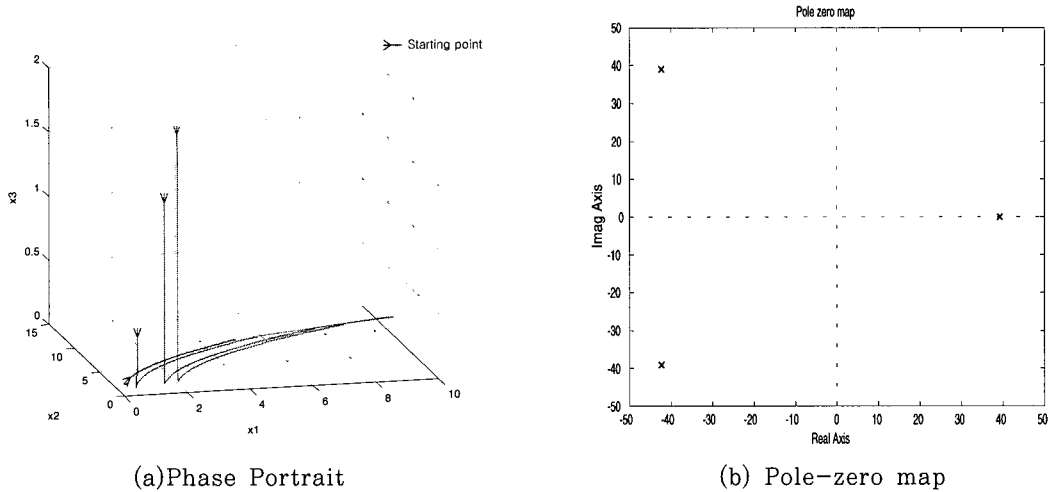
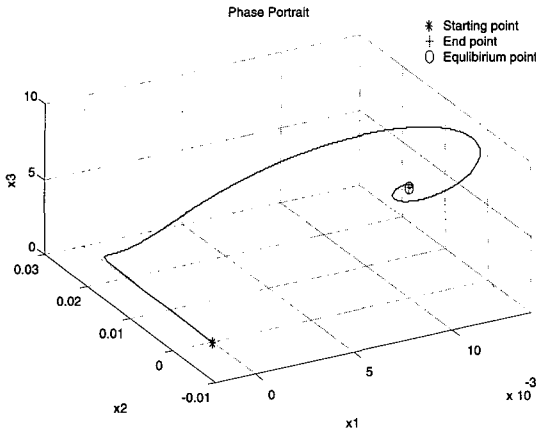
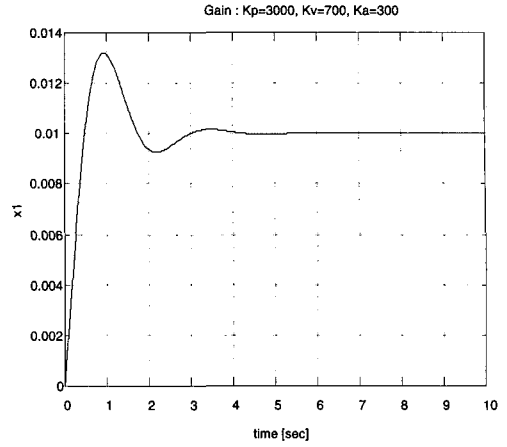


그림 2.2 오픈루프 흡인식 자기부상 시스템

그림 2.3(a)는 안정한 흡인식 자기부상시스템에 대하여 제어입력을 인가했을 때 흡인식 자기부상시스템이 1개의 평형점만을 갖는다는 것을 보여주고 있다. (2.3)에 선형 플랜트 방정식은 우반면에 하나의 극점을 갖고 있으며 이것은 그림 2.2(b)에서 보여주는 것처럼 오픈루프 불안정하다는 것을 나타낸다. 흡인식 자기부상 시스템의 안정조건을 만족시키기 위해서, 흡인식 자기부상 시스템은 active feedback control이 필요하다. 그래서 기존의 상태 궤환 제어기는 공칭 운전점에서 안정한 시스템 특성을 얻기 위해 이용되었다. 그 결과로써, 흡인식 자기부상 시스템의 안정한 응답은 그림 2.3에서 볼 수 있는 폐루프 흡인식 자기부상시스템 시스템의 phase portrait과 스텝 응답으로써 알 수 있고, 그림 2.4로부터 공극 외란을 갖는 폐루프 흡인식 자기부상 시스템의 특성을 볼 수 있다. 스텝응답 결과는 정현적인 진동이 포함된 정상상태 에러를 갖는다는 것을 알 수 있다. 즉 폐루프 흡인식 자기부상 시스템의 현상에 따라 몇 가지 제어방법을 이용할 수 있다. 이러한 제어 방법은 알 수 없는 다이내믹스와 actuator 및 센서고장에 대하여 적합한 방법을 적용할 수 있다.

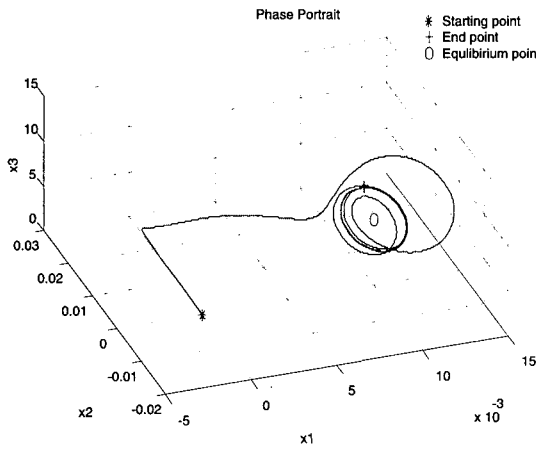


(a)Phase Portrait

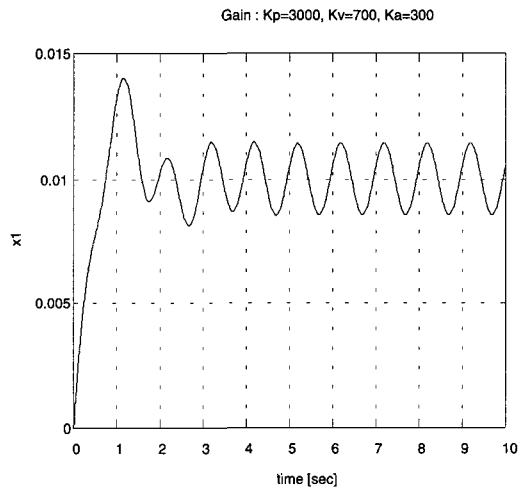


(b)step response

그림 2.3 페루프 흡인식 자기부상 시스템



(a)Phase Portrait



(b)step response

그림 2.4 외란을 갖는 페루프 흡인식 자기부상 시스템

2.2 흡인식자기부상시스템 부상제어 방법

흡인식 자기부상 시스템의 공극제어를 위해 다양한 제어방법들이 있다. 이러한 제어방법은 성능(지령과 외란변동에 대하여), 강인성(파라미터 변동에 대하여), 복잡성, 신뢰성과 센서 요구에 따라 다르다. 다음은 각 제어방법에 대하여 제어구조를 소개하고, 그 장단점을 서술하였다.

2.2.1 전압기반 상태궤환제어와 비선형궤환제어(Voltage based State Feedback Control & Voltage based Nonlinear Feedback Control)

그림 2.5(a)는 전압 지령을 기반으로 하는 상태 궤환 제어기의 블록도를 나타낸다. 제어대상 시스템은 매우 비선형적이고, 공칭 운전점부근에서 선형적이다. 이러한 시스템은 공칭운전점 부근에서는 안정하지만, 다른 포인트에서는 안정하지 않다. 경우에 따라 시스템이 광범위의 운전영역에서 안정한 상태로 남아있어도 성능은 감퇴된다.[3]

선택할 수 있는 또 하나의 방식은 그림 2.5(b)에서 제시되는 것처럼 비선형 궤환 제어를 이용하는 것이다. 여기에서 시스템의 비선형성은 공극과 공극지령값 사이에서 일정한 선형 전달함수를 얻을 수 있도록 충분히 보상된다. 이 방식은 비선형 시스템의 특수성 때문에 시스템에 대하여 정확한 지식이 필요하다. 적분 제어기는 선택적이지만 feed-forward 계수 k_w 의 차수에 영향을 준다. 가속도 센서는 힘에 의한 외란에 대하여 항력을 개선시키는 역할을 하기 때문에 필요하다.[4]

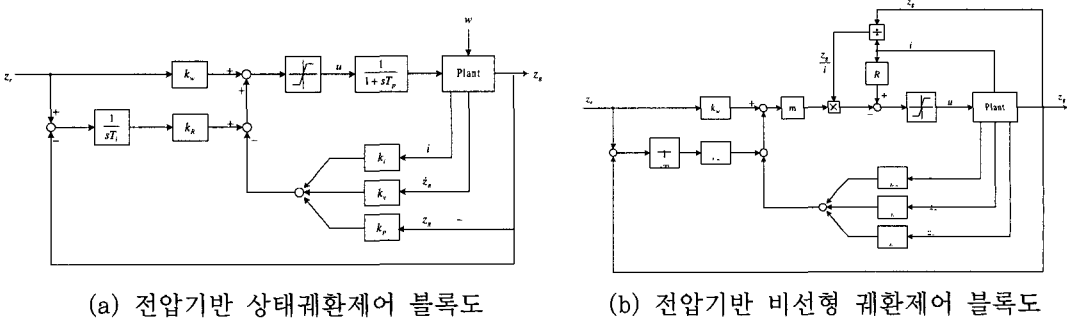


그림 2.5 전압기반 제어 블록도

2.2.2 전류기반 상태궤환제어(Current based State Feedback Control)

지금까지 논의된 2가지 제어법은 전압 지령을 기반으로 하고 있다. 그러므로 전압 그 자체에 영향을 줄 수 있는 모든 것들, 예를 들어 온도, 스위칭 dead-time과 DC link 전압에 영향을 받는 전압원 컨버터의 부하특성등 이런 것들에 대하여 민감하다. 이러한 3가지 영향은 효과적인 공극제어를 얻기 위해서 보상되어야만 한다. 이러한 보상을 피하기 위해서는 전류 지령 방식을 이용하는 것이 바람직하다. 특별한 경우에 있어서 스위칭 모드 전류제어를 겸비하면 시스템 차수를 줄이는 것이 가능하다. 이러한 구조는 그림 2.6에 나타나 있다. 누설자속과 자기력 손실을 보상하는 비선형 보상기능은 reference force와 공극으로부터 지령 전류를 결정하는데 이용된다. 이것은 흡인식 자기부상 시스템을 선형화한다.

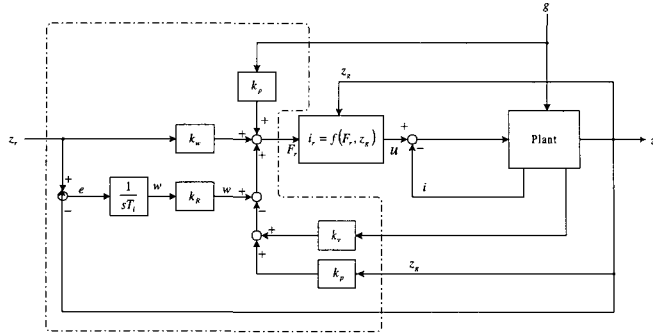


그림 2.6 전류기반 상태궤환제어 블록도

3. 결론

기존의 상태궤환(Conventional State Feedback) 과 출력 궤환(Conventional Output-Feedback)제어기는 불안정성의 발생 또는 부품 고장발생시, 만족스럽지 못한 부상제어성능을 보이거나 또는 심한 경우 부상상태가 불안정하게 된다. 그러므로 불안정성과 부품고장이 발생함에도 불구하고 만족스런 페루프 동작을 보장할 수 있는 궤환 제어기(Feedback controller) 설계에 많은 연구와 관심을 보이고 있다. 따라서 상전도 흡인식 자기부상방식의 경우 강인하고 신뢰성 있는 부상제어시스템을 개발하는 것은 매우 중요하다.

참고문헌

1. EARNSHAW,S,"On the nature of molecular forces which regulate the constitution of luminiferous ether", Trans. Comb. Phil. Soc., Vol.7, pp. 97-112,1842
2. D. L. Trumper, S. M. Olson, And P.K. Subrahmanyam, "Linearizing control of magnetic suspension systems", IEEE Trans. Control Systems Technology, vol. 5, no. 4, pp. 427-438, 1997.
3. M.Azyadine, "Etude de reglage en position de la sustentation magnetique par attraction", PhD report, EPFL-LEI, Lausanne, 1996
4. M.Zayadine,S.Colombi, "Active control of magnetic suspension system", International Symposium MV2 on Active Control in Mechanical Engineering., pp 281-294, Hermes, Paris, 1995