

외란관측기를 이용한 제로파워 부상제어

안준선*, 박종찬*, 임응춘*, 유선종*,
오산대학 전기시스템제어과*

Zero Power Levitation Control Using Disturbance Observer

Joonseon Ahn*, Jong-Chan Park*, Eungchun Lim*, Sunjong Yu*,
Dept. of Electrical Engineering, Osan College*

Abstract - 제로파워 부상제어 기법은 그동안 여러 연구자들에 의해서 연구되어왔다. 이러한 연구들은 부상 시스템의 불안정성과 비선형성을 극복하고 부상의 효율과 성능을 높이는 데 주안점을 두었다. 이를 위해 기존의 연구들은 복잡한 제어 알고리즘들을 사용하여 성능을 구현하여 만족할만한 결과들을 도출하고 있으나 제어기의 복잡함을 피할 수는 없었다. 본 연구에서는 외란을 부하변동으로 가정하고 외란 관측기를 적용한 제로 파워 부상 제어기법을 제안하였다. 앞서 언급한 부상 시스템의 비선형성이나 파라미터의 변동을 외란 관측기가 보상함으로써 복잡하지 않으면서도 외란에 강인한 제로파워 부상 제어 시스템을 구현하는 것이 가능하였다. 제안하는 기법은 시뮬레이션을 통해서 그 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

급전 장치가 없는 자기부상 이송 시스템은 고정자와 가동자간의 기계적인 접촉이 없이 움직일 수 있기 때문에 분진을 발생시키지 않으며 따라서 반도체 공정이나 LCD 제조 공정과 같은 고정정 공정 내부의 이송에 매우 적합하다. 하지만 전원을 연속적으로 공급받는 것이 아니기 때문에 소비전력을 최소화하여 유지하는 것이 중요하며 이를 위해서 제로 파워 공극 제어를 수행하게 된다.[1] 자기 부상 시스템(Magnetic Levitation System, Maglev)은 시스템에 내재된 비선형성으로 인하여 시스템의 안정도가 매우 떨어지며 이로 인해 종래의 비례-적분-미분 제어기법을 적용하면 급작스러운 부하 변동 등의 외란에 대해서 제어 시스템이 폭주하는 등의 불안정성을 나타내게 된다. 이를 극복하기 위해 루엔버거 관측기나 강인구조형 부상 제어기를 적용하는 연구가 진행되어 왔다.[2] 하지만 이러한 연구들은 제어기 구조의 복잡성으로 인해 구현이 어려운 단점이 있다. 최근 주목 받는 제어기법 중에서 외란관측기는 그 구현의 간편함과 전기-기계 결합 시스템에 적합한 주파수 특성 때문에 각광 받고 있다.[3] 따라서 본 연구에서는 외란을 부하변동으로 가정하고 외란 관측기를 적용한 제로 파워 부상 제어기법을 제안하였다. 앞서 언급한 부상 시스템의 비선형성이나 파라미터의 변동을 외란 관측기가 보상함으로써 복잡하지 않으면서도 외란에 강인한 제로파워 부상 제어 시스템을 구현하는 것이 가능하였다. 제안하는 제어기법은 시뮬레이션을 통해서 그 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 제로파워 부상제어

영구자석의 기자력과 중력의 균형을 전자기력을 이용하여 제어하는 제로파워 부상제어 방식은 소비되는 에너지를 최소화하는 방식으로서 연구의 대상이 되어 왔다. 본 방식은 과도상태에 한해서 전력을 소비하는 구조이므로 최소한의 전력으로 시스템을 제어하는 것이 가능하다. 본 절에서는 제로파워 부상제어 시스템의 모델링과 외란관측기의 구현에 대하여 논한다.

2.1.1 자기부상 시스템의 모델링

그림 1에 본 연구의 대상인 자기부상 시스템의 개념도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전류에 의한 힘은 식 (1)과 같고 영구자석에 의한 힘은 식(2)와 같다.

$$F_{mi} = N \times i \quad (1)$$

$$F_{mm} = \psi_m R_m = \frac{l_p}{\mu_m} B_r \quad (2)$$

여기서, F_{mi} 는 전류에 의한 전자기력, F_{mm} 은 영구자석에 의한 힘이며, l_p 는 영구자석의 두께, μ_m 은 영구자석의 투자율, B_r 은 자속밀도이다.

한편 공극의 자속밀도 B 는,

$$B = \frac{1}{S} \psi = \frac{B_r - \frac{\mu_0}{l_p} Ni}{\frac{\mu_m}{\mu_c} \frac{l_c}{l_p} + \frac{\mu_m}{\mu_0} \frac{2}{l_p} z + 1} = \frac{B_r - ci}{a + bz} \quad (3)$$

가 되며, μ_0 는 공기의 투자율, μ_c 는 철심의 투자율을 나타내며, l_c 는 철심의 자로길이, z 는 부상간극이다.

공극의 에너지는 식 (4)가 되고,

$$W = \frac{1}{2\mu_0} B^2 Sz = \frac{1}{2\mu_0} \left(\frac{B_r - ci}{a + bz} \right)^2 Sz, \quad (4)$$

이로부터 부상력 F_m 은,

$$F_m = - \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{S}{2\mu_0} (B_r - ci)^2 \frac{a - bz}{(a + bz)^3} \quad (5)$$

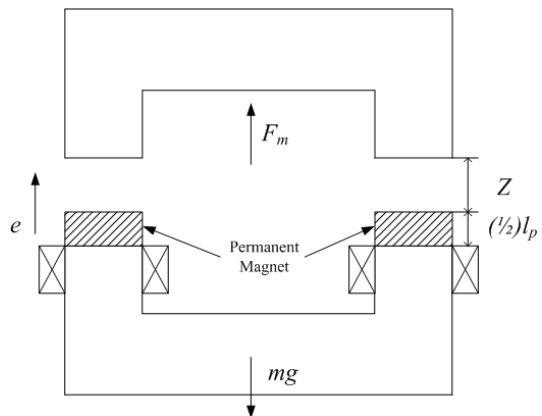
로 유도되며, 여기서 S 는 철심의 단면적을 나타낸다. 따라서 시스템의 기계방정식 식(6) 으로부터 시스템의 상태방정식 식 (7)을 유도할 수 있다.

$$m\dot{v} = mg - F_m \quad (6)$$

$$\dot{z} = v$$

$$m\ddot{v} = mg - \frac{S}{2\mu_0} (B_r - ci)^2 \frac{a - bz}{(a + bz)^3} \quad (7)$$

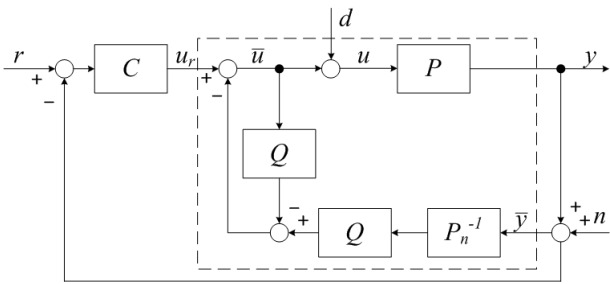
여기서, m 은 가동부의 질량을 나타내고, g 는 중력가속도, v 는 가동부의 이동속도이다.



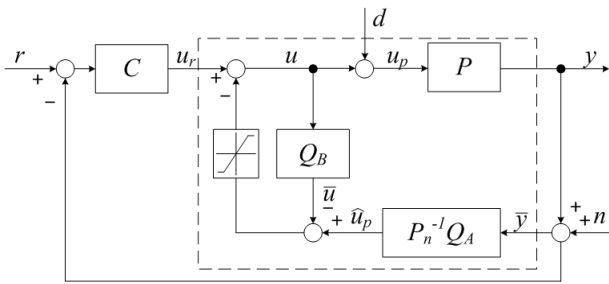
<그림 1> 자기부상 시스템의 모델링

2.1.2 외란관측기

본 연구에 적용하고자 하는 외란관측기(Disturbance Observer, DOB)는 적응제어 제어방법과 마찬가지로 시스템의 불확정성을 파악하여 이를 보상하는 방식의 제어 방법이다. 비교적 저주파수의 움직임 혹은 외란을 갖는 시스템에 적합한 제어방식으로 알려져 있으며, 시스템의 구현이 비교적 간단하여 본 연구의 대상인 제로파워 자기부상 시스템에 적용하기에 적합한 제어 방식이다. 그림 2(a)에 앞서 언급한 외란관측기의 일반적인 형태를 나타내었고 그림 2(b)에는 상태공간 모델에 적용하기 위해 구조를 수정한 외란관측기를 나타내었다.



(a) 일반적인 외란관측기



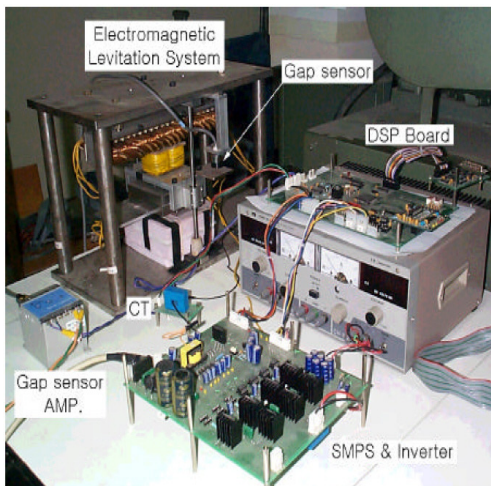
(b) 수정된 외란관측기
 <그림 2> 외란관측기

2.3 시뮬레이션 결과

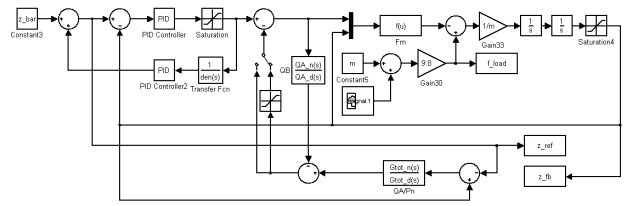
그림 1의 제로파워 자기부상 모델을 실험 구현 모델이 그림 3에 나타난 제로파워 자기부상 장치이다. 본 연구에서는 이러한 제로파워 자기부상 시스템의 부상 성능을 개선하기 위하여 외란관측기를 적용한 부상 제어기를 구성 하였으며 그 타당성과 성능을 평가하기 위해서 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 4에 본 시뮬레이션에 사용한 MATLAB 블록도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 기존의 PID 제어기에 외란에 대한 보상을 수행하기 위한 외란 관측기를 추가하는 형태로 제어기를 구성 하였으며, Q 필터의 차수는 시스템의 전달함수를 고려하여 관측기가 proper 한 시스템이 되고, 시스템의 강인성이 증가하는 방향으로 결정하였으며, 응답이 비교적 느린 기계 시스템을 고려하여 Q 필터의 상수를 결정 하였다.

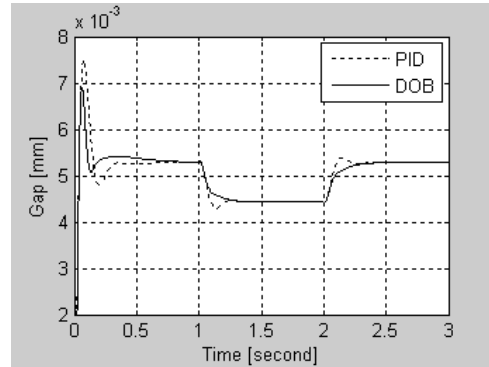
그림 5에는 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 시뮬레이션은 기존의 PID 제어기만으로 구성된 시스템과, 외란 관측기가 추가된 시스템을 비교하는 방식으로 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 외란관측기를 적용한 시스템이 시스템의 안정도 측면에서 더 나은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 과도상태에서의 시스템 응답성 측면에서도 기존 방식의 제어기에 비해서 오버슈트 없이 안정된 상태로 수렴하고 있음을 알 수 있으며, 수렴 시간 역시 기존의 방식과 거의 동등한 성능을 나타내고 있다. 자기 부상 시스템이 가지고 있는 구조적인 불안정성을 고려한다면, 기존의 방식에 대해서 보이고 있는 과도상태에서의 성능개선은 전체 시스템의 안정성 확보 측면에서는 매우 중요한 잇점이 될 수 있다.



<그림 3> 제로파워 부상제어 장치



<그림 4> 제로파워 부상제어 시뮬레이션 블록도



<그림 5> 시뮬레이션 결과: 부상 간극 제어 응답

3. 결 론

본 연구에서는 제로파워 자기부상 시스템의 안정성을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 자기부상 시스템은 시스템의 전달함수가 자체적으로 불안정성을 가지고 있으며, 부상력을 결정하는데 중요한 파라미터인 인덕턴스 역시 부상 간극에 따라서 비선형적으로 변하는 특성을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 비선형적인 특성들이 제어계의 안정성에 미치는 영향을 최소화하고 시스템의 강인성을 향상시키기 위해 외란관측기를 이용하여 부상제어기를 구성하였다. 시뮬레이션 결과 기존의 PID제어방식에 비해서 제안하는 시스템의 과도응답특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 외란관측기가 이러한 비선형적인 요소들을 보상하는 결과로 볼 수 있다.

<표 1> 자기부상 시스템의 제원

| CPM | 중량 | kg | 3.91 |
|-----|-----------|-----------------|---------|
| | 코일턴수 | turn | 334 |
| | 영구자석 | | Nd-Fe-B |
| | 잔류자속밀도 | T | 1.2 |
| | 영구자석 높이 | mm | 2.7 |
| | 영구자석 단면적 | mm ² | 629.35 |
| | 코어 높이 | mm | 33.5 |
| | 코어 길이 | mm | 57.7 |
| | 코어 폭 | mm | 20.5 |
| 고정자 | 코어 사이의 길이 | mm | 16.7 |
| | 전체 높이 | mm | 40 |
| | 전체 길이 | mm | 107 |

[참 고 문 헌]

- [1] Y. H. Kim, K. M. Kim, and J. Lee, "Zero Power Control with Load Observer in Controlled-PM Levitation," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 2851~2854, July 2001.
- [2] D. L. Trumper, S. M. Olson and P. K. Subharmanyan, "Linearizing Control of Magnetic Suspension Systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 5, No. 4, pp.427~438, July 1997
- [3] Y. Choi, K. Yang, W. Chung, H. Kim, I. Suh, "On the Robustness and Performance of Disturbance Observer for Second-order Systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2003.