

## NN을 이용한 자기부상 시스템에서의 레귤레이션 제어기 설계

장석명, 성소영, 성호경, 조홍제  
 충남대학교 전기공학과, 한국기계연구원 자기부상열차 개발 그룹

### Design of Regulation Controller for Electromagnetic Suspension System Using Neural Network

S.M. Jang, S.Y. Sung, S.K. Sung, H.J. Jo  
 Dept. of Electric Eng. Chungnam National Univ., KIMM Maglev Project Team

**Abstract** - The regulation performances needs high control gain in novel output feedback controller but high control gain is decreased relative stability of the total system. Thus, this paper proposed neural network controller(NNC) for output feedback controller. In this scheme, output feedback controller are guarantee global stability and NNC are controller steady-state error and defined optimal control law. And we demonstrated this scheme by simulations.

#### 1. 서 론

자기부상시스템은 자력을 이용하여 두 물체사이의 공극을 일정하게 유지시키는 시스템으로 자기부상열차나 자기베어링등 그 이용범위가 다양하다. 또한, 비접촉식으로 기계적인 마모가 없어 유지보수가 거의 필요 없다. 이 자기부상 시스템의 대표적인 응용분야로 자기부상열차를 들 수 있는데, 자기부상열차는 상전도 흡인식과 초전도 반발형이 있는데, 상전도 흡인식은 레일 밑에 전자석을 배치한 구조로 전자석의 흡인력을 이용하여 부상하는 방식으로 한국기계연구원의 UTM-01[1]과 독일의 Transrapid, 일본의 HSST가 이 방식을 채택하고 있고 [2], 초전도 반발형은 일본의 MLX시스템이 있다[3].

상전도 흡인식 자기부상 시스템은 시스템 자체의 특성이 개 루프 불안정하고 매우 비선형성이 강한 시스템이다. 따라서 일반적인 PID제어로는 제어성능을 만족시키기 가 제한적이므로 상태공간영역에서의 상태공간 제어나, 출력례환 제어를 구성하는 것이 일반적이다[4]. 이러한 제어기는 대부분이 시스템의 동작점에서 선형화한 선형제어기 구조를 갖는다. 선형 제어기는 동작점에서 선형화 하였기 때문에, 동작점에서는 시스템의 모델이 원래의 비선형 시스템을 대변할 수 있으나, 자기부상 시스템과 같은 매우 비선형성이 강한 시스템에서는, 동작점을 벗어나기 시작하면 시스템의 모델이 시스템의 특성을 모두 대변하지 못하게 되어 불안정하게 될 수 있다. 때문에, 이러한 선형 상태 공간 제어기와 PI제어를 같이 사용하여 정상상태 오차를 줄이는 방법 또한 많이 시도되고 있다. 그리고 자기부상 시스템은 공극을 측정하기 위하여 공극센서를 사용하는데, 레일과 전자석간의 물리적인 구조로 인하여 공극센서에서 매우 많은 외란이 들어오게 된다. 특히 공극의란은 시스템의 특성에 매우 악영향을 주어 때로는 시스템을 불안정하게 하는 요인이 된다. 따라서, 외란이 들어왔을 때 동작점을 정확하게 유지시키기 위해서는 시스템의 제어 이득을 매우 높게 설정해야 하나, 제어이득을 높게 설정하면 위상여유가 줄어들어 시스템이 불안정해 질 수 있다[5]. 따라서 신경회로망의 학습기능을 이용하여 제어명령을 조정하면 정상상태 에러를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 시스템의 비선형성도 보상할 수 있다. 그러나 자기부상 시스템과 같이 개 루프 불안정하고 빠른 동특성을 요구하는 시스템에서는 신경회로망 제어기만으로는 시스템의 전체

안정성을 보장할 수 없다. 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 먼저 신경회로망을 학습하여 시스템 identification을 통하여 미리 학습을 하는 과정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 [5]에서 설계한 출력례환 제어기로 자기부상 시스템의 안정도를 보장하고, 신경회로망을 사용하여 제어명령을 조정함으로써 정상상태 오차를 줄일 수 있도록 한다. 이런 구조를 취함으로써 신경회로망을 미리 학습시키지 않고도 출력례환 제어기로 주 제어를 담당하면서 온라인으로 신경회로망을 학습시켜 정상상태 오차를 줄일 수 있도록 하였다. 또한 시간이 지날수록 신경회로망의 제어 명령이 점점 커지게 되어서 전체 제어명령의 최적화를 가져올 수 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 전자석의 부상 동특성과 출력례환 제어기

전자석의 부상 동특성의 상태방정식 행렬은 (5)로부터 식 (1)로 쓸 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 5702 & 0 & -2.2808 \\ 0 & 2500 & -45.455 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 45.455 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 5702 & 0 & -2.2808 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

또한 동특성 보상기를 사용하여 제어기를 구성하였으므로 동특성 보상기 상태방정식 행렬은 식은 (5)로부터 식 (2)로 쓸 수 있다.

$$A_{o\_mv} = \begin{bmatrix} -13 & 2500 & -3.198 & 0 \\ 0 & -576.92 & 0 & -100 \\ 10 & -1923.1 & 0 & 0 \\ 0 & -1923.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_{o\_mv} = \begin{bmatrix} 0.08333 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{o\_mv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 1923.1 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 \\ -13 & 2500 & -3.198 & 0 \end{bmatrix}, D_{o\_mv} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.0833 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 동특성 보상기를 포함한 전체 시스템의 블록도를 그림 1에 나타냈다.

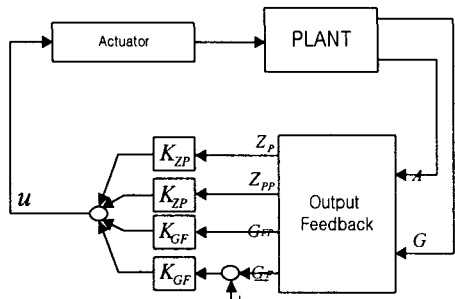


그림 1 동특성 보상기를 포함한 전체 시스템의 블록도

이 때의 고유치는 식 (3)과 같다.

$$[-9.7047 \quad -3.2953 \quad -2.88 \times 10^2 \pm 3.30 \times 10^2 i] \quad (3)$$

식 (3)에서 알 수 있는 바와 같이, 출력궤환제어기를 사용하여 전체 시스템의 극점을 s-평면의 좌측으로 보낼 수 있어, 전체 시스템의 안정도를 보장할 수 있다. 이 출력궤환 제어기를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 2에 나타냈다. 그림 2에서 보는바와 같이 정상상태 오차가 약 1mm 정도 존재함을 알 수 있다. 이 정상상태 오차를 줄이기 위해서는 제어이득을 높게 설정해야 하나, 제어이득을 높게 설정하면 시스템의 상대안정도에 영향을 주어, 전체 시스템의 안정도에 영향을 준다.

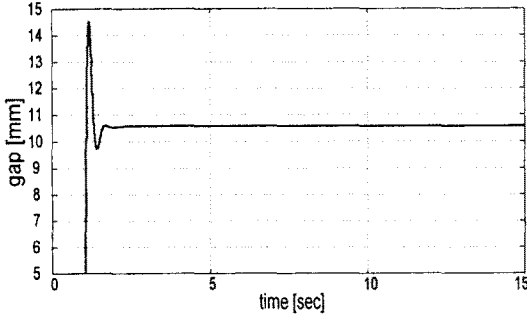


그림 2 출력 궤환 제어기의 스텝 응답특성

### 2.2 신경 회로망 제어기 설계 (6)

일반적인 제어시스템의 설계는 대상 시스템의 수학적 모델을 특정 동작점에서 선형화한 선형 모델로부터 제어기를 설계한다. 그러나 이러한 기법은 제어대상 플랜트가 고차의 미분방정식으로 표현되는데 따른 복잡성과 플랜트의 비선형성, 그리고 플랜트 모델링의 부정확성으로 인하여 만족할만한 제어 성능을 얻기에 어려움이 있다. 따라서 신경회로망을 사용하여 시스템의 비선형성을 보상하여, 시스템의 성능을 높일 수 있다.

신경회로망 제어기를 구성하기 위하여 그림 3과 같은 피드포워드 회로망을 구성하였다. 이 신경회로망의 학습 신호는 공극오차로 하였다. 즉

$$e = gap - ref \quad (4)$$

여기서 *gap*은 공극센서로부터의 신호이고 *ref*는 공극 기준입력이다. 따라서 플랜트의 제어명령은 식 (5)로 주어진다.

$$U = U_C + U_N \quad (5)$$

여기서  $U_C$ 는 출력궤환 제어기의 출력이고,  $U_N$ 은 신경회로망 제어기의 출력이다.

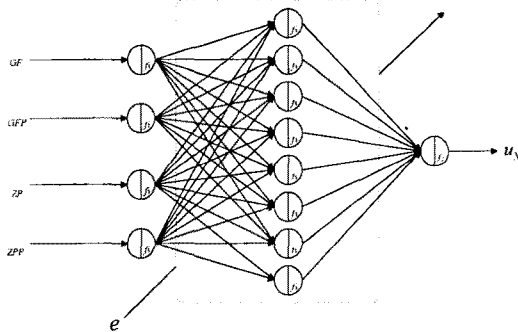


그림 3. 신경회로망 제어기의 구조

신경회로망의 학습알고리즘은 역전파 알고리즘을 통해 은닉층의 가중치가 학습된다. 신경회로망의 활성화함수는 식 (6)으로 주어지는 양방향 시그모이드 함수를 사

용하였다.

$$f(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}} \quad (6)$$

### 2.3 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 전체 시스템의 블록도를 그림 4에 나타냈다. 이 구조에서 주의해야 할 점은 이미 출력 궤환제어기가 안정도를 보장하고 있으므로 신경회로망의 초기 가중치를 매우 작은 값으로 설정해야 한다는 것이다. 즉, 신경회로망의 출력  $U_N$ 의 값이 매우 작아, 초기에는 시스템에 영향을 주지 않는 상태에서 출력 궤환 제어기만으로 시스템의 전체 global안정도를 보장하고, 정상상태에서 정상상태 오차를 줄이도록 신경회로망을 학습시킨다.

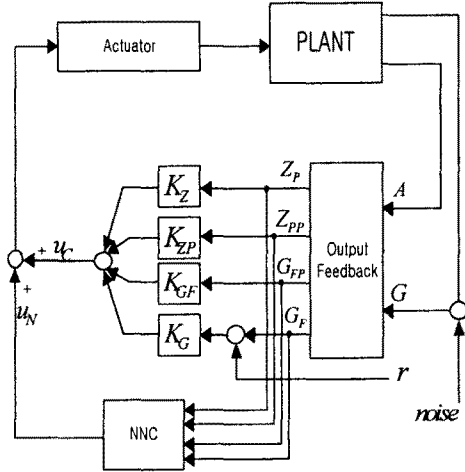


그림 4 신경회로망을 포함한 전체 시스템의 블록도

그림 4에서  $A$ 는 가속도신호이고,  $G$ 는 공극신호,  $Z_P$ 는 절대 속도,  $Z_{PP}$ 는 절대가속도,  $G_F$ 는 상대공극,  $G_{FP}$ 는 상대속도이다[5].

시뮬레이션은 정상상태에서 신경회로망 제어기를 사용하여 정상상태 에러를 줄이는 경우와 그림 4의 공극신호에 규칙적인 외란을 가중했을 경우, 불규칙적인 외란을 가중했을 경우에 대해서 수행하였다. 그림 5에 외란을 가중하지 않고 정상상태 에러만 보상한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었고, 그림 6에 스텝 응답에 대한 각 제어기의 제어 명령을, 그림 7에 규칙적인 외란을 가중하였을 때, 그림 8에 불규칙적인 외란을 가중하였을 때의 결과를 나타내었다.

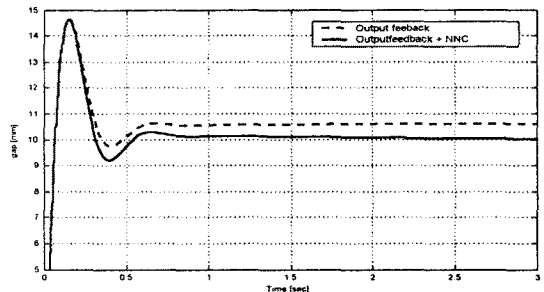


그림 5 NNC를 사용한 경우의 스텝 응답특성

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 신경회로망 제어기를 사용하면 효과적으로 정상상태 에러를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 6에 이때의 각 제어명령을 보였다.

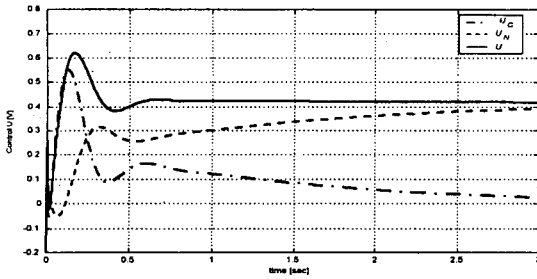


그림 6 스텝입력에 대한 각 제어기의 제어명령

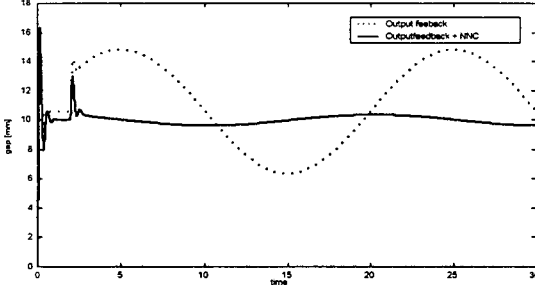


그림 7 규칙적인 공극 외란 인가시 응답특성

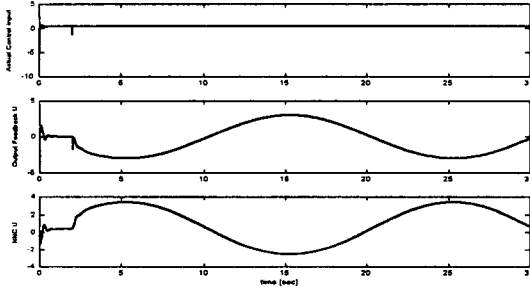


그림 8 규칙적인 외란을 인가했을때의 제어명령

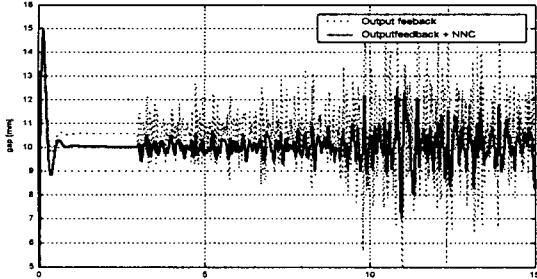


그림 9 불규칙적인 공극외란신호 인가시 응답특성

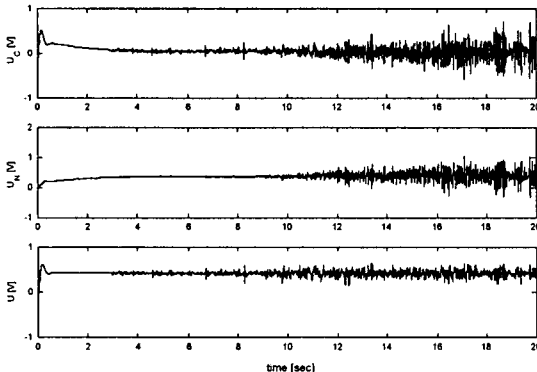


그림 10 불규칙적인 외란을 가중했을때의 제어명령

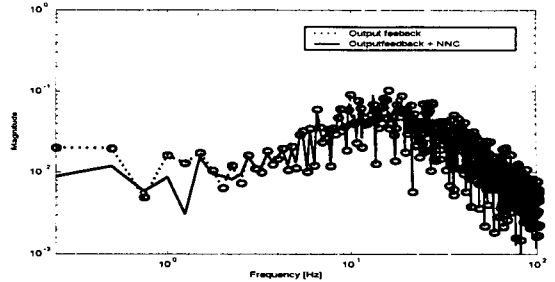


그림 11 불규칙적인 외란을 가중했을때의 FFT 분석

그림 6에서 보는 바와 같이 출력제한 제어기가 초기의 과도상태의 응답특성을 결정하고 정상상태로 갈수록 신경회로망의 제어명령이 커지게 되어서 전체 시스템의 제어명령을 담당하게 된다. 또한 이렇게 됨으로써 제어입력의 값을 최적의 값으로 갖도록 하여 최적제어의 효과 있음을 알 수 있다. 그림 7, 8은 규칙적인 외란입력에 대한 응답특성이다. 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 규칙적인 저주파 외란에 대해서는 거의 성공적으로 외란을 제거하는 것을 알 수 있다. 그림 9, 10에 불규칙적이고 랜덤한 공극외란을 가중하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 규칙적인 외란을 가중하였을 때보다 외란에 대한 응답특성이 좋지 않게 나타나는데 그 이유는 신경회로망이 급격하게 변하는 외란에 대해서는 잘 추종하지 못하는 것으로 사료된다. 그림 11은 불규칙적인 공극외란을 가중하였을 때의 FFT분석 결과를 나타내었다. 그림 11에서 보는바와 같이 신경회로망을 사용하였을 때 저주파영역에서는 각주파수에서의 크기를 약간이나마 줄일 수 있었으나 10Hz이상의 영역에서는 공극외란의 크기가 다소 줄어들지 않음을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 [5]에서 설계된 출력제한 제어기를 바탕으로 신경회로망 제어기를 설계하여 출력제한 제어기가 초기의 주제를 담당하도록 하고, 시스템의 비선형성과 정상상태 오차를 신경회로망이 담당하도록 함으로써 시스템의 제어이득을 높이지 않고도 공극외란 및 정상상태 오차를 줄일 수 있음을 보였다. 또한 제어명령을 조정함으로써 기존의 출력제한 제어기만으로는 제어명령의 최적화를 구현할 수 없었으나 신경회로망이 제어명령을 조정함으로써 제어명령의 최적화를 구현할 수 있었다. 앞으로 본 논문에서 제안된 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 검토하여 제안된 알고리즘을 검증하여야 할 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] In-Kun Kim, Mun-Hwan Yoo, Kyu-Hwan Han, Gye-Seo Park, Heung-Sung Bae, "Status of the Maglev Development in KOREA", MagLev98, 1998, pp. 34-38
- [2] PADDISON, Jonathan. E., GOODALL, Roger. M., "EMS Maglev suspension comparison and Trends", MAGLEV'98 pp. 324-329, 1998
- [3] Nakashima, Hiroshi, Isoura, Katsutoshi, "Superconducting Maglev Development in Japan", Maglev98 April, 1998, pp.25-33, 1998
- [4] David L. Trumper, Sean M. Olson, Pradeep K. Subrahmanyam, "Linearizing Control of Magnetic Suspension Systems", IEEE Transactions on Control systems Technology, Vol. 5 No. 4 July, 1997
- [5] 장석명, 성소영, 김인근, 성호경, "상전도 흡인식 자기부상 제어기 설계 (II)", 대한전기학회 '99학계학술대회, pp101-104
- [6] Richard P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Nets", IEEE ASSP Magazine, 1987, 4 pp. 4-22