

환경적 부하로 인해 발생하는 건축물의 진동을 위한 지능형 예측 PID 제어시스템에 관한 연구

조현철*, 이영진, 이진우, 이권순
 동아대학교 전기공학과

A Study on Intelligent Predictive PID Control Systems for Vibration of Structure due to Environmental Loads.

Hyun C. Cho*, Young J. Lee, Jin W. Lee, kwoon S. Lee
 Dept. of Electrical Eng. Dong-A University, Pusan, Korea
 E-mail : kslee@seunghak.donga.ac.kr

Abstract - In recent years, advances in construction techniques and materials have given rise to flexible light-weight structures.

Because these structures extremely susceptible environmental loads, these random loadings u produce large deflection and acceleration on structures. Vibration control system of structure becoming an integral part of the structural syst the next generation of tall building.

The proposed control system is applied to s degree of structure with mass damping and com with conventional PID and neural network PID system.

1. 서 론

최근, 건축기술의 발달로 인하여 건축물은 고층화, 대형화 그리고 경량화와 유연성의 추세로 나아가고 있다. 이런 건축물들은 낮은 탄성과 높은 강도로 특성화되어 바람이나 지진과 같은 환경적 부하에 매우 민감하다. 따라서 건축물에 큰 변위나 가속도가 야기되어 건축물은 진동하게 되어 거주자에게 불쾌감이나 질병을 일으킬 뿐만 아니라 건축물의 안정성에도 상당한 영향을 미친다. 최근에 환경적 부하로 인해 발생하는 건축물의 진동을 억제하기 위한 연구가 활발히 진행중이다[1].

건축물의 진동을 억제하는 제어시스템은 크게 수동제어(Passive Control), 능동제어(Active Control) 그리고 혼합 제어시스템(Hybrid Control System)으로 나눌 수 있다. 수동 제어시스템은 건축물에 제동시스템(Damping System)을 구조적으로 증착하여 외부에너지를 흡수 또는 발산함으로써 진동을 억제하며, 능동 제어시스템은 제어이론을 바탕으로 외부에너지를 발생하여 액츄에이터를 작동시킴으로써 진동을 억제한다. 그리고 혼합 제어시스템은 수동과 능동 제어시스템의 장점으로 구성된 시스템이다[2].

현대 제어의 눈부신 발달로 인하여 여러 가지 제어이론이 발표되었으며, 건축물의 진동제어에도 많이 적용되어 왔다. 그러나, 기존의 제어이론은 비선형성을 갖는 플랜트에 대해서는 수학적 표현이 어렵고 적용하기가 곤란하다는 단점이 있다. 이런 단점들을 해결하고자 최근에 신경회로망이나 퍼지 이론과 같은 지능형 알고리즘을 제어이론에 응용한 연구가 많이 되고 있다. 이런 알고리즘들은 수학적 표현이 간단할 뿐만 아니라 시스템의 강인성과 적응성을 잘 보장하는 특징을 지닌다[3].

본 연구에서는 신경회로망을 이용하여 건축물의 진동 제어를 위한 예측 제어시스템을 제안하고자 한다. 예측

기는 신경회로망을 이용하여 구성하였으며, 플랜트에 인가한 과거와 현재의 입출력 정보를 이용하여 미래에 발생될 출력을 예측한다. 제어기는 산업현장에서 많이 사용되는 PID 제어를 사용하였으며, 최적의 제어기 파라미터를 산출하기 위해 신경망 동조기를 구성하였다. 건축물의 모델은 중량 댐퍼를 갖는 단자유도 건축물을 이용하였으며, 시뮬레이션을 통해 성능의 우수성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 신경회로망 예측 PID 제어시스템

본 연구에서 제안하는 신경회로망 예측 PID(NNPPID) 제어시스템의 블록선도는 그림 1과 같으며 예측기, 신경회로망 동조기 및 PID 제어기로 구성이 된다.

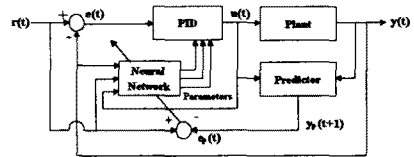


그림 1 예측 PID 제어시스템의 블록선도.

예측기는 신경회로망으로 구성하였으며, 예측기로 구성되기 위하여 신경회로망은 플랜트에 대한 모델링이 이루어져야 한다. 신경회로망 모델링에 대한 표현은 식 1과 같으며 플랜트와 신경회로망의 출력오차를 감소하는 방향으로 학습이 이루어진다.

$$y_m(t) = NN[y(t-1), y(t-2), \dots, u(t), u(t-1), \dots] \quad (1)$$

모델링에 대한 학습이 종료되면 플랜트의 동특성을 충분히 내포하게 되는 신경회로망은 예측기로 구성이 될 수 있다. 예측기는 과거와 현재의 입출력 정보를 이용하여 구성되며, 식 2와 같이 표현될 수 있다.

$$y_p(t+1) = NN[y(t), y(t-1), \dots, u(t), u(t-1), \dots] \quad (2)$$

신경회로망 동조기는 예측 출력값과 설정치값의 오차를 줄이는 방향으로 학습하여 최적의 제어기 파라미터를 산출한다. 학습법은 일반적으로 가장 많이 이용되는 백프로퍼게이션 알고리즘[4]을 사용하였으며 각 층에 대한 가중치의 변화량은 식 3과 식 4와 같다.

$$\Delta W_{jk}(t+1) = \alpha \delta_k o_j + \beta \Delta W_{jk}(t) \quad (3)$$

$$\Delta W_{ij}(t+1) = \alpha \delta_j o_i + \beta \Delta W_{ij}(t) \quad (4)$$

식 3은 은닉층과 출력층사이의 가중치 변화량이며, 식 4는 입력층과 은닉층사이의 가중치 변화량이다. α 는 학습률이고 β 는 모멘트상수이다. o_j 와 o_i 는 출력층과 은닉층에서의 입력값을 나타내며, δ_k 와 δ_j 는 출력층과 은닉층의 오차신호를 나타낸다. 신경회로망 동조기는 PID 제어기 파라미터를 출력으로 하며, 출력층의 오차신호는 식 5와 같다.

$$\begin{aligned} \delta k_p &= (r(t+1) - y_p(t+1)) \frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} f'(\text{net}k_p) \frac{\partial u(t)}{\partial k_p} \\ \delta k_i &= (r(t+1) - y_p(t+1)) \frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} f'(\text{net}k_i) \frac{\partial u(t)}{\partial k_i} \\ \delta k_d &= (r(t+1) - y_p(t+1)) \frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)} f'(\text{net}k_d) \frac{\partial u(t)}{\partial k_d} \end{aligned} \quad (5)$$

$f'(\cdot)$ 는 가중치의 합에 대한 출력의 미분식이며, $\frac{\partial y(t+1)}{\partial u(t)}$ 는 입력과 출력 변화량을 나타낸다.

2.2 중량 댐퍼를 갖는 단자유도 건축물

그림 2는 본 연구에서 적용한 중량 댐퍼를 갖는 단자유도 건축물에 대한 모델이다.

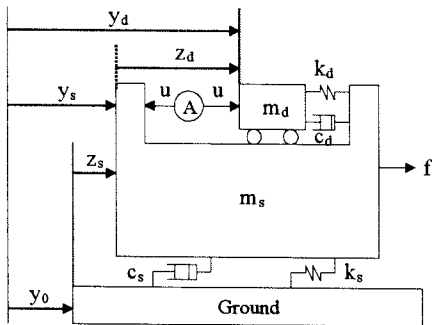


그림 2 중량 댐퍼를 갖는 단자유도 건축물.

이 모델은 건축물의 진동제어 연구에 많이 적용되고 있는 모델로써 건축물의 상층부위에 부착이 된 제동시스템은 건축물에 작용하는 외부에너지를 흡수 또는 발산하여 진동을 억제한다[5]. m_s , k_s , c_s 는 건축물의 중량(Mass), 탄성(Stiffness), 제동(Damping) 계수이며, m_d , k_d , c_d 는 제동시스템에 대한 계수를 나타낸다. \textcircled{A} 는 제동시스템을 구동하기 위한 액츄에이터(Actuator)이다.

이 모델에 대한 운동방정식은 식 6과 같으며, 상태공간 표현법은 식 7과 같다.

$$\begin{aligned} m_s(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s) + c_s \dot{z}_s + k_s z_s - c_d \dot{z}_d - k_d z_d &= f(t) - u(t) \\ m_d(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s + \ddot{z}_d) + c_d \dot{z}_d + k_d z_d &= u(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, f 와 \ddot{y} 는 바람과 지진에 대한 식을 나타낸다. u 는 능동제어기의 출력이 되며, 중량 댐퍼를 작동하기 위한 액츄에이터의 입력신호가 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{z}_d \\ \ddot{z}_s \\ \ddot{z}_d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_d}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{c_d}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_s} & -(\frac{k_d}{m_d} + \frac{k_d}{m_s}) & \frac{c_s}{m_s} & -(\frac{c_d}{m_d} + \frac{c_d}{m_s}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ z_d \\ \dot{z}_s \\ \dot{z}_d \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m_s} \\ \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_d} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m_s} & -1 \\ -\frac{1}{m_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ \ddot{y}_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 시뮬레이션 및 결과 검토

제안한 제어시스템을 그림 2의 모델에 적용하였으며 환경적 부하로써 바람을 인가하여 건축물에 대한 변위를 관측하였다. 건축물과 제동시스템에 사용된 파라미터값은 표 1과 같다.

표 1 건축물의 파라미터값.

Parameters	Structure	Damper
Mass[kips-sec ² /in]	104	2.08
Stiffness[kips-sec/in]	2.08	0.137
Damping[kips/in]	104	1.73

신경회로망 예측기와 동조기는 각각 3층 구조로 하였으며, 예측기의 은닉층과 출력층의 활성화 함수는 시그모이드함수와 선형함수로 하였고 동조기는 모두 시그모이드함수로 하였다. 가중치의 초기값은 0.5에서 1사이의 랜덤한 값으로 하였으며, 샘플링 시간은 0.1초이며 전체 제어시간은 100초로 하였다. 바람에 대한 모델은 식 8과 같다.

$$f_w = p(3 \sin \omega t + 7 \sin 2\omega t + 5 \sin 3\omega t + 4 \sin 4\omega t) \quad (8)$$

여기서, p 는 바람의 크기(Magnitude)를 나타내고 ω 는 기본 주파수(Fundamental frequency)를 나타낸다. 본 논문에서는 ω 를 1.0 [rad/sec], p 는 9.75 [kips]로 하여 시뮬레이션을 실시하였으며 그림 3은 풍력파형을 나타낸다.

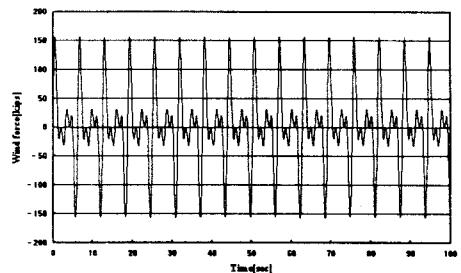


그림 3 풍력(Wind Force).

그림 3의 풍력을 인가하였을 때, 수동제어기에 대한 건축물의 변위는 그림 4와 같다. 그리고 그림 5는 고전 PID 제어기로 구성하였을 때의 건축물의 변위이고 그림 6은 예측기가 구성되지 않은 신경회로망 PID(NNPID) 제어기에 대한 변위이며, 그림 7은 본 논문에서 제안한 제어시스템을 구성하였을 때의 건축물의 변위이다.

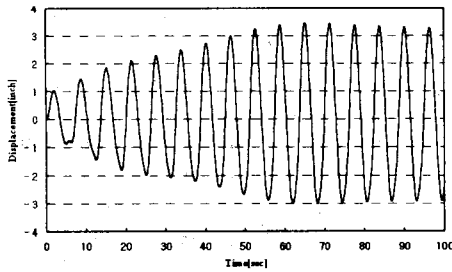


그림 4 수동 제어시스템에 대한 응답.

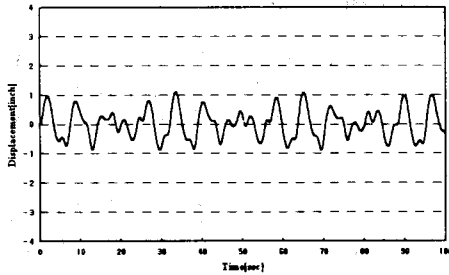


그림 5 고전 PID 제어시스템에 대한 응답.

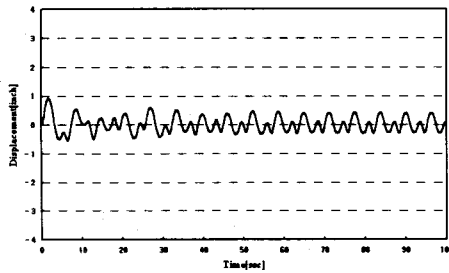


그림 6 NNPID 제어시스템에 대한 응답.

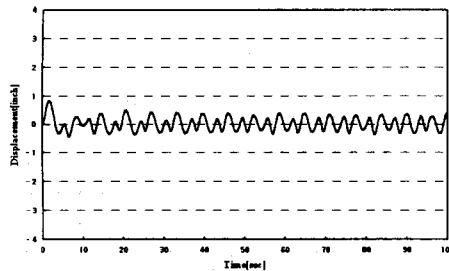


그림 7 NNPPID 제어시스템에 대한 응답.

수동 제어시스템은 진동을 억제하기 위한 외부에너지가 없고 건축물에 부착된 댐퍼시스템에만 의존하므로 제어초기부터 변위가 증가하다가 일정시간이 경과하게 되면 바람과 동일한 주파수로 진동이 계속된다. 그러나, 능동 제어시스템을 구성하였을 때는 수동시스템보다 현저하게 변위가 줄어든 것을 알 수 있다. 특히, 제안된 제어시스템으로 구성하였을 때는 기존의 제어시스템보다 성능이 우수함을 알 수 있다. 표 2는 각각의 제어시스템에 대한 최대변위와 실효변위를 나타낸다.

표 2 각각의 제어기에 대한 건축물의 변위.

CONTROLLER	$y_s(\text{peak})$ [inch]	$y_s(\text{rms})$ [inch]
PASSIVE	3.448	1.992
PID	1.097	0.491
NNPID	0.917	0.291
NNPPID	0.883	0.186

수동 제어시스템에 대하여 각각의 제어시스템에 대한 성능의 개선정도를 보면 최대변위의 경우 PID는 68.18%, NNPID는 73.41%, NNPPID는 74.39%정도가 개선되었고, 실효변위의 경우, PID는 75.35%, NNPID는 85.39%, NNPPID는 90.67%의 개선정도를 보이고 있다.

3. 결 론

본 연구는 중량 댐퍼를 갖는 단자유도 건축물의 진동 제어를 위한 예측 PID 제어시스템을 제안하였다. 예측기는 신경회로망으로 구성을 하였으며, 건축물에 인가한 과거와 현재의 입력력 정보들을 이용하였다. 현재출력과 예측출력에 대한 오차를 보상하기 위해 신경회로망 동조기는 최적의 제어기 파라미터를 동조한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘의 우수성을 입증하여 보았고 기존의 제어시스템과 비교 분석을 하였다.

향후 지진에 대해서도 제안한 시스템을 적용하고 실제 건축물의 축소모델에 실시간 제어를 실시하여 본 연구의 우수성을 입증하고 차세대 건축 시스템으로써의 적용 가능성을 보이고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. Kobori, "Technology development and forecast of Dynamic Intelligent Building(D.I.B)," in *Intelligent Structures*(K. P. Chong, S. C. Liu, and J. C. Li (Eds.)), pp. 42-59, London: Elsevier Applied Science, 1990.
- [2] H. Iemura et al., "Comparison of passive, active and hybrid control techniques on earthquake response of flexural structure," *Proceedings of the U.S.-Italy-Japan Workshop/Symposium on Structure Control and Intelligent System*, pp. 117-125, 1992.
- [3] M. J. Willis, G. A. Montague, C. D. Massimo, and M. T. Tham, "Artificial Neural Networks in Process Estimation and Control," *Automatica*, Vol. 1, pp. 1181-1187, 1992.
- [4] K. S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Network," *IEEE Trans. on Neural Network*, Vol. 1, pp. 4-27, 1990.
- [5] A. C. Nerves and R. Krishnan, "Active control strategies for tall civil structures," 1995 IEEE 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, pp. 962-967, 1995.