

신경회로망 예측 제어를 이용한 건축 구조물의 진동제어

論 文

48A - 4 - 12

A Vibration Control of Building Structure using Neural Network Predictive Controller

曹賢哲* 李榮珍** 姜錫奉*** 李權純§

(Hyun-Cheol Cho · Young-Jin Lee · Suk-Bong Kang · Kwon Soon Lee)

Abstract - In this paper, neural network predictive PID (NNPPID) control system is proposed to reduce the vibration of building structure. NNPPID control system is made up predictor, controller, and self-tuner to yield the parameters of controller. The neural networks predictor forecasts the future output based on present input and output of building structure. The controller is PID type whose parameters are yielded by neural networks self-tuning algorithm. Computer simulations show displacements of single and multi-story structure applied to NNPPID system about disturbance loads - wind forces and earthquakes.

Key Words : Vibration Control, Building Structure, Predictive Control, PID, Neural Network

1. 서 론

SVC는 FACTS 기기중 현재 완전 성숙된 단계로 정착된

최근 건축자재의 발달과 시공기술의 발전으로 인하여 건축 구조물은 고층화, 대형화, 유연 경량화의 추세로 가고 있으며, 앞으로도 이런 추세는 계속 되리라 예상되고 있다. 그러나, 이런 건축 구조물들은 낮은 강성도(stiffness)와 높은 강도(strength)를 갖는 것이 특징이며, 이로 인하여 풍력이나 지진과 같은 환경적 외란에 매우 민감하여 건축 구조물은 진동을 일으키게 된다. 건축 구조물의 진동은 거주자의 불쾌감을 야기시키는 것은 물론, 건축 구조물의 안전성에도 큰 영향을 미치며 심지어 붕괴사고까지도 초래한다. 현재 건축 구조물의 진동을 억제하는 연구가 활발히 진행중이며, 특히 지진대에 놓여 있는 선진국가에서는 토목 구조물이나 고가 교량 등의 대형 구조물에 대해서 설계단계부터 준공 후 구조물의 수명이 다할 때까지 진동으로 인한 안전 등의 문제를 고려한 연구가 활발히 수행되고 있다[1].

건축 구조물의 진동을 억제하는 방법과 메카니즘은 많은 연구가 되어 왔으며, 현재는 혼합 제어시스템을 건축 구조물에 적용하여 진동을 억제하는 방법을 많이 이용하고 있다. 혼합 제어시스템은 수동과 능동시스템의 장점으로 구성된 것으로 수동·능동의 전환이 가능하며, 능동 시스템에 비해 적

은 제어에너지를 요구하기 때문에 매우 경제적이다. 특히 여러 가지 제어이론을 접목시킴으로써 다양한 사양과 목적에 맞는 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다.

현대 제어이론의 눈부신 발전으로 인하여 여러 가지 제어 이론들이 발표가 되고 있으며, 건축 구조물의 진동제어에도 많이 적용되어 왔다. 특히, 피드백 제어(Feedback control)나 LQG/LQR 과 같은 선형 제어이론 등은 수학적 표현이 비교적 단순하며 기존의 제어용 소프트웨어의 발달로 인해 진동 제어에 많이 적용되어 왔다. 그러나, 이런 선형 제어기법들은 시스템의 비선형성을 선형화로 전환하여 해석 또는 설계하기 때문에 비선형성 요소를 많이 내포하고 있는 건축 구조물의 경우 그 동특성을 충분히 표현하기가 어렵기 때문에 만족스러운 제어성능을 기대하기가 어렵다. 더욱이, 시스템의 파라미터가 변화한다던가 미지의 불확실성 요소로 인해 설계 초기시 원하는 사양을 기대하기가 어렵다. 이런 단점들을 보완하기 위해 자기동조 제어, 기준모델 적응제어, 적응 예측제어, 강인제어 등과 같은 이론들이 발표되었다. 그러나, 이러한 제어기법도 제한된 불확실성 내에서 적용 가능하며 비선형성이 강하거나 동작점의 범위가 넓은 경우는 또 다른 대책을 강구해야 한다[2]. 따라서, 현재 수학적 구현이 매우 단순하면서도 비선형 시스템에 대하여 동특성을 잘 내포할 수 있는 지능 제어기법이 현재 활발히 연구가 되고 있다. 지능 제어기법들은 인간의 생체 및 두뇌 구조를 모델로 하여 구성된 신경회로망, 퍼지이론, 유전 알고리즘 등과 같은 알고리즘을 제어이론에 접목한 것이다.

특히, 신경회로망은 인간의 두뇌 및 신경구조 모델을 본따서 구성된 것으로 복잡하고 광대한 정보량을 적절하고 유효하게 처리할 뿐만 아니라, 미지의 구조를 학습을 통해 정확하게 제어할 수 있다. 신경회로망의 구조는 간단한 연산자와

* 準會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 碩士課程 卒業

** 準會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 蔚山大 工大 建築學部 副教授 · 工博

§ 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1998년 11월 4일

最終完了 : 1999년 2월 5일

연결강도로만 구성되어 매우 단순한 구조와 비교적 쉬운 수학적 표현이 가능하며, 연결강도를 학습시킴으로써 자기구성(Self-organizing) 능력을 가지게 되어, 시스템 자체나 외부 환경에서 발생하는 변화에 대해 적응능력이 뛰어난 것으로 알려져 있다[3]. 따라서, 본 연구에서는 신경회로망을 이용하여 예측 제어시스템을 구성하며, 건축 구조물의 진동시스템에 적용한다. 예측 제어시스템은 건축 구조물에 대한 모델링 학습이 이루어진 신경회로망에 건축 구조물의 현재의 입출력을 정보로 하여 미래의 응답을 예측하며 예측출력은 제어기의 파라미터를 산출하는 신경회로망의 입력정보로 이용된다. 제어기는 산업현장에서 널리 이용되고 있는 PID 제어기를 이용하였으며, 제어기 파라미터는 신경회로망 자기 동조기를 이용하여 산출됨으로써 적응형 PID 제어시스템으로 구성이 된다.

본 논문에서 구성한 제어시스템은 단층과 다층 건축 구조물의 진동제어에 적용되어 풍력이나 지진으로 인해 발생하는 건축 구조물의 응답변위를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 그리고, 기존의 선형 제어기법과 비교 분석하여 성능의 우수성을 입증함으로써 건축 구조물의 제진 대책에 대한 기초 연구가 되고자 한다.

2. 신경회로망 모델링 및 예측기

신경회로망 예측기가 구성되기 전 신경회로망은 건축 구조물에 대한 모델링 학습이 이루어져야 한다. 신경회로망 모델의 학습에 대한 블록선도는 그림 1과 같다.

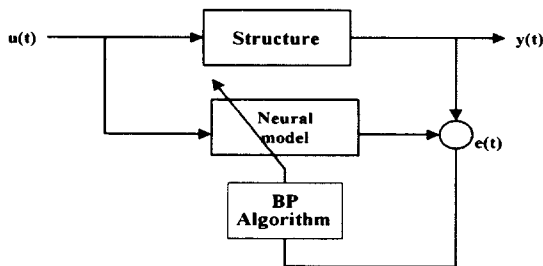


그림 1. 신경회로망 모델링
Fig. 1. Neural network modeling

신경회로망 모델은 건축 구조물에 인가되는 입력을 신경회로망에 동일 입력으로 하고, 건축 구조물의 출력과 신경회로망의 출력과의 오차를 감소하는 방향으로 정해진 학습 알고리즘에 의해 학습하는 것을 말한다. 이 때 신경회로망의 구조와 학습패턴의 적절한 선정은 모델링 학습성능을 좌우하는 요인이 되며, 예측기의 구성에 있어 매우 중요한 부분이 된다. 그림 2는 모델링에 이용된 신경회로망 구조를 나타낸다.

그림 2에서 n 과 d 는 $u(t)$ 와 $y(t)$ 에 대한 차수를 각각 나타내며, 이것은 신경회로망의 입력패턴의 개수를 결정하게 된다. n 과 d 의 선정은 수학적 방정식으로 선정할 수 있지만, 실시간 제어의 경우 수학적 모델링이 표현하지 못한 동특성까지 고려하기 위해 여러 번의 실험과 시행착오를 거쳐 선정해야 한다. 신경회로망 모델이 건축 구조물의 동특성을 충분히 내포할 수 있도록 학습이 완료되면 신경회로망은 예측기로

구성될 수 있다[4]. 그림 3은 신경회로망 예측기의 구조를 나타낸다.

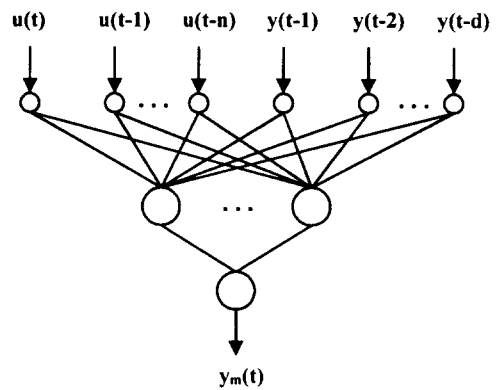


그림 2. 신경회로망 모델의 구조
Fig. 2. Structure of neural network model

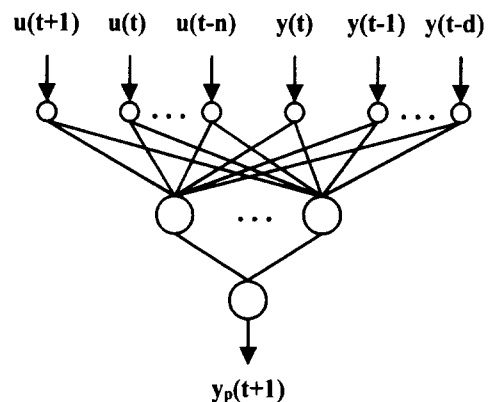


그림 3. 신경회로망 예측기
Fig. 3. Neural network predictor

신경회로망 예측기는 신경회로망 모델에 건축 구조물의 현재 입·출력을 바탕으로 하여 건축 구조물의 출력을 예측할 수 있다. 그리고, 신경회로망을 직렬로 연결하여 다단계 예측기도 구성할 수 있으나, 1단계보다 성능이 저하될 수도 있기 때문에 시행착오와 실험을 통해서 적절하게 단계 수를 결정해야 한다.

3. 신경회로망 예측 PID 제어시스템

본 논문에서 구성한 신경회로망 예측 PID (NNPPID) 제어시스템의 블록선도는 그림 4와 같다.

NNPPID 제어시스템은 신경회로망 예측기와 제어기 그리고 제어기의 파라미터를 산출하는 신경회로망 자기동조기로 구성된다. 신경회로망 자기동조기는 예측출력과 현재출력에 대한 오차를 보상하기 위해 온-라인 학습을 통해 제어기의 파라미터를 산출하게 된다. 신경회로망 자기 동조기의 구조

는 그림 5와 같다.

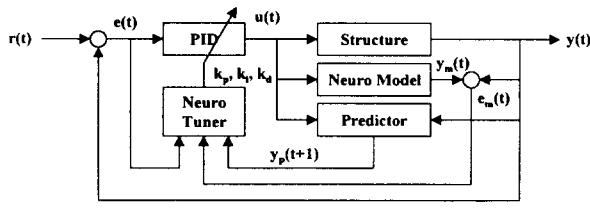


그림 4. 신경회로망 예측 PID 제어시스템
Fig. 4. Neural network predictive PID control system

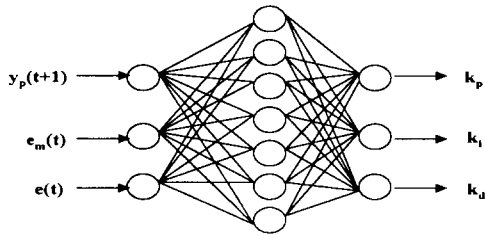


그림 5. 신경회로망 자기 동조기
Fig. 5. Neural network self-tuner

자기동조기로 이용된 신경회로망의 입력정보는 예측출력, 신경회로망 모델과 건축 구조물 출력 오차 그리고 건축 구조물의 현재 출력에 대한 오차로 하였으며, 출력층은 식 (1)의 PID 제어기의 파라미터를 산출한다.

$$\Delta u(t) = k_p (e(t) - e(t-1)) + k_i e(t) + k_d (e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)) \quad (1)$$

여기서, k_p , k_i , k_d 는 제어기의 파라미터로서 비례 (proportional), 적분(integral), 미분이득(differential gain)을 각각 나타낸다. 평가함수는 다음 식과 같은 2차형 오차함수로 하였으며, 자기 동조기는 이 오차함수를 줄이는 방향으로 온-라인(On-line) 학습을 하게 된다.

$$E = \frac{1}{2} [r(t+1) - y(t+1)]^2 \quad (2)$$

오차 역전과 학습알고리즘에 의한 출력층의 오차신호와 은닉층의 오차신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta k_p = (r(t+1) - y(t+1)) \frac{\partial y_p(t)}{\partial u(t)} f'(net k_p) \frac{\partial u(t)}{\partial k_p}$$

$$\delta k_i = (r(t+1) - y(t+1)) \frac{\partial y_p(t)}{\partial u(t)} f'(net k_i) \frac{\partial u(t)}{\partial k_i} \quad (3)$$

$$\delta k_d = (r(t+1) - y(t+1)) \frac{\partial y_p(t)}{\partial u(t)} f'(net k_d) \frac{\partial u(t)}{\partial k_d}$$

$$\delta_j = \sum_k \delta_k W_{jk} f'(net_j) \quad (4)$$

여기서, k 는 출력층 노드(node) 수를 나타내며, $f'(\cdot)$ 는 신경회로망의 각각의 노드에 대한 출력 미분식을 나타낸다.

4. 건축 구조물의 모델

본 논문에서 적용한 건축 구조물의 모델은 상층부위에 제동시스템(damping system)이 부착된 단층과 다층 건축 구조물을 이용하였다.

4.1 단층 건축 구조물

그림 6은 단층 건축 구조물에 대한 현상학적 모델을 나타낸다[5]. 건축 구조물의 상층 부위에 부착된 제동시스템은 건축 구조물과 같은 주파수 또는 위상추이(phase shift)로 진동하여 외란 에너지를 운동 에너지로 변환시킴으로써 진동을 억제한다.

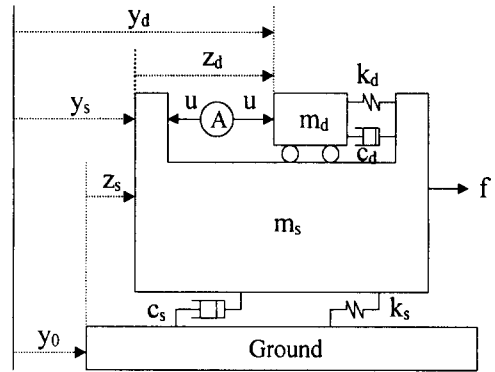


그림 6. 단층 건축 구조물
Fig. 6. Single layer structure

그림 6에서 m_s , c_s , k_s 와 m_d , c_d , k_d 는 건축 구조물과 제동시스템에 대한 중량, 제동, 탄성을 각각 나타낸다. 그리고, \textcircled{A} 는 제어입력을 바탕으로 하여 제동시스템을 구동시키는 액추에이터(Actuator)에 대한 기호이다.

이 모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m_s \ddot{y}_s + c_s(\dot{y}_s - \dot{y}_d) + k_s(y_s - y_0) + c_d(\dot{y}_s - \dot{y}_d) + k_d(y_s - y_d) = f(t) - u(t) \quad (5)$$

$$m_d \ddot{y}_d + c_d(\dot{y}_d - \dot{y}_s) + k_d(y_d - y_s) = u(t) \quad (6)$$

그림 6에서 $y_s = y_0 + z_s$ 이고, $y_d = y_0 + z_s + z_d$ 이므로 이 식을 식 (5)와 식 (6)에 대입하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_s(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s) + c_s \dot{z}_s + k_s z_s - c_d \dot{z}_d - k_d z_d = f(t) - u(t) \quad (7)$$

$$m_d(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_b + \ddot{z}_d) + c_d \dot{z}_d + k_d z_d = u(t) \quad (8)$$

상태방정식으로 나타내기 위하여 식 (7)과 식 (8)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_s = & -\frac{c_s}{m_s} \dot{z}_s - \frac{k_s}{m_s} z_s + \frac{c_d}{m_s} \dot{z}_d + \frac{k_d}{m_s} z_d \\ & + \frac{1}{m_s} f(t) - \frac{1}{m_s} u(t) - \dot{y}_0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dot{z}_d = -\frac{c_d}{m_d} \dot{z}_d - \frac{k_d}{m_d} z_d - \frac{1}{m_d} u(t) - \dot{y}_0 - \dot{z}_s \quad (10)$$

식 (9)를 식 (10)에 적용하면 식 (10)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_d = & \frac{c_s}{m_s} \dot{z}_s + \frac{k_s}{m_s} z_s - \left(\frac{c_d}{m_d} + \frac{c_d}{m_s} \right) \dot{z}_d \\ & - \left(\frac{k_d}{m_d} + \frac{k_d}{m_s} \right) z_d - \frac{1}{m_s} f(t) \\ & + \left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_d} \right) u(t) \end{aligned} \quad (11)$$

이 모델에 대한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Hw(t) \quad (12)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s}{m_s} & \frac{k_d}{m_s} & -\frac{c_s}{m_s} & \frac{c_d}{m_s} \\ \frac{k_s}{m_s} & -\left(\frac{k_d}{m_d} + \frac{k_d}{m_s} \right) & \frac{c_s}{m_s} & -\left(\frac{c_d}{m_d} + \frac{c_d}{m_s} \right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m_s} \\ \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_d} \end{bmatrix} & \quad H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m_s} & -1 \\ -\frac{1}{m_s} & 0 \end{bmatrix} \\ x = \begin{bmatrix} z_s \\ z_d \\ \dot{z}_s \\ \dot{z}_d \end{bmatrix} & \quad w = \begin{bmatrix} f \\ \ddot{y}_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

그리고, f 는 풍력에 대한 기호이며, \ddot{y}_0 는 지반 가속도 (ground acceleration) 즉, 지진에 대한 내용을 나타낸다.

4.2 다층 건축 구조물

그림 7은 n 층 건축 구조물의 현상학적 모델을 나타낸다[6].

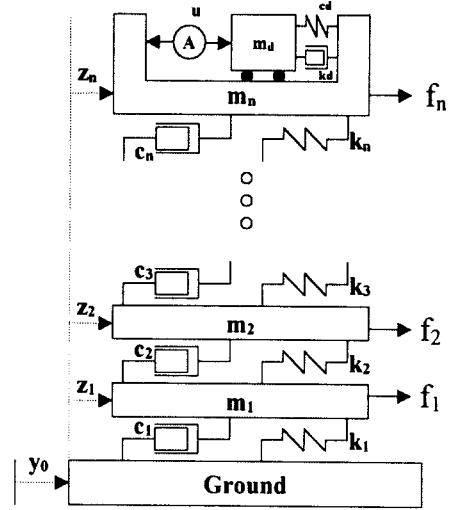


그림 7. 다층 건축 구조물
Fig. 7. Multi layers structure

이 모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_1) + c_1 \dot{z}_1 + k_1 z_1 \\ - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2(z_2 - z_1) = f_1(t) \\ m_i(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_i) + c_i(\dot{z}_i - \dot{z}_{i-1}) + k_i(z_i - z_{i-1}) \\ + c_{i+1}(\dot{z}_i - \dot{z}_{i+1}) + k_{i+1}(z_i - z_{i+1}) = f_i(t) \\ m_n(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_n) + c_n(\dot{z}_n - \dot{z}_{n-1}) + k_n(z_n - z_{n-1}) \\ + c_d \dot{z}_d + k_d z_d = f_n(t) - u(t) \\ m_d(\ddot{y}_0 + \ddot{z}_s + \ddot{z}_d) + c_d \dot{z}_d + k_d z_d = u(t) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, $i = 2, \dots, n$ 이며 n 은 건축 구조물의 층수를 나타낸다. 그리고, $z_i, \dot{z}_i, \ddot{z}_i$ 는 i 번째 층에 대한 변위, 속도, 가속도를 각각 나타낸다. 위의 운동방정식을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = f + u - m \ddot{y}_0 \quad (16)$$

여기서, M, C, K, z, f, u 는 중량, 계동, 탄성계수와 변위, 외란, 제어입력에 대한 벡터를 각각 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & \\ 0 & 0 & \dots & m_n & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \dots & \dots \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & -c_n & c_n + c_d \\ & & & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & \dots \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & -k_n & k_n + k_d \\ & & & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_{n-1} \ z_n \ z_d]^T \quad (20)$$

$$f = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{n-1} \ f_n \ 0]^T \quad (21)$$

$$u = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ -1 \ 1]^T \quad (22)$$

$$m = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_{n-1} \ m_n \ m_d]^T \quad (23)$$

상태벡터를 다음과 같이 정의하면,

$$x(t) = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad w = \begin{bmatrix} f \\ \ddot{y}_0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

상태방정식(state equation)은 식 (25)와 같다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1} & -M^{-1}m \end{bmatrix} w \quad (25)$$

5. 모의 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 NNPPID 제어기의 성능을 알아보기 위해 단층과 8층 건축 구조물에 능동제어기로 각각 적용하였으며, 풍력이나 지진을 인가하였을 때 발생하는 건축 구조물의 변위를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 그리고, 진동 제어이론으로 많이 사용되고 있는 LQ 최적제어를 적용하였을 경우와 능동제어기가 적용되지 않은 상태인 수동시스템에 대해서 비교 분석을 하였다. LQ 제어에서 상태 가중행렬과 제어 가중행렬은 MATLAB을 이용하여 구한 후 시행착오를 거쳐 최적의 값으로 하였다. NNPPID 제어시스템에서 모델링에 이용한 신경회로망은 3층 구조로 하였으며, 각 층에 대한 노드 수는 4, 7, 1로 하였다. 학습패턴은 풍력을 인가하였을 경우, 수동시스템에 대한 건축 구조물의 1층 응답변위로

하였다. 그리고, 예측기의 구성은 풍력에 대해서는 1단 예측기로 하였으며, 지진에 대해서는 4단 예측기로 구성하였다. 자기동조기로 구성된 신경회로망도 3층 구조로 하였으며, 각 층에 대한 노드 수는 3, 7, 3으로 하였다. 그리고, 학습율과 모멘트 계수는 각각 0.5와 0.9로 하였고 가중치의 초기치는 0.5~1사이의 랜덤한 값으로 하였다. 시뮬레이션에 적용된 건축 구조물의 파라미터는 표 1과 같다. 그리고, 시뮬레이션에 적용된 풍력에 대한 방정식은 다음과 같다[7].

$$f_i = \frac{i}{n} p (3 \sin \omega t + 7 \sin 2\omega t + 5 \sin 3\omega t + 4 \sin 4\omega t) \quad (26)$$

식 (26)에서 ω 는 풍력의 기본주파수(fundamental frequency)이고 p는 풍력의 크기(magnitudes)를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서는 ω 를 1[rad/sec]로 하였고, p는 43.4[kN]으로 하였다. 그림 8은 단층 건축 구조물에 인가한 풍력의 파형을 나타낸다. 그리고, 지진은 1940년 미국의 Imperial Valley에서 발생한 El Centro wave를 적용하였으며, 그림 9는 파형을 나타낸다[8].

표 1. 건축 구조물의 파라미터
Table 1. Parameters of the structures

Structure	Floor	m [ton]	c [kN-sec/m]	k [kN/m]
Single	Damper	362	23.8	301
	1	181×10^2	362	181×10^2
8 Story	Damper	172.8	76.98	843.97
	8	345.6	196	1.37×10^5
	7	345.6	243	1.69×10^5
	6	345.6	298	2.07×10^5
	5	345.6	348	2.43×10^5
	4	345.6	386	2.69×10^5
	3	345.6	410	2.85×10^5
	2	345.6	467	3.26×10^5
1	345.6	490	3.40×10^5	

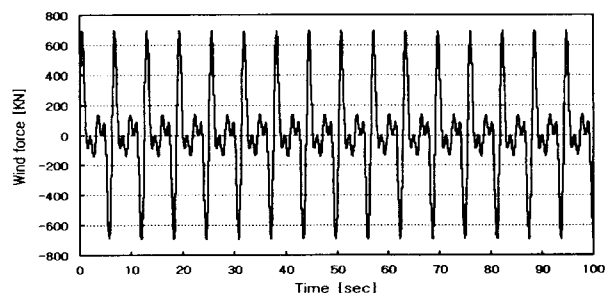


그림 8. 풍력 파형
Fig. 8. Wind forces

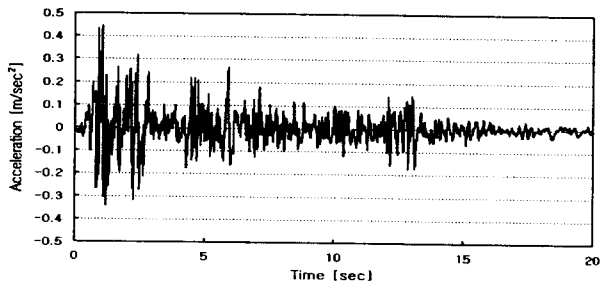
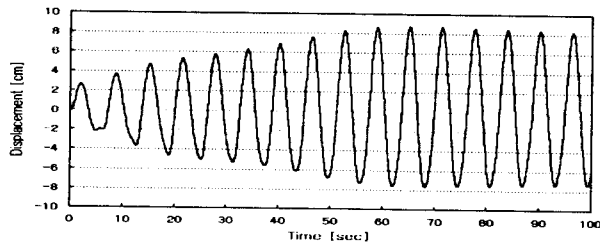


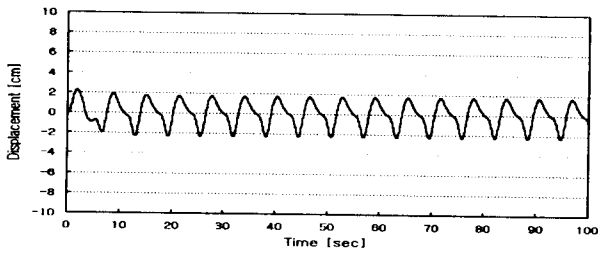
그림 9. 지진 파형
Fig. 9. El Centro wave

5.1 단층 건축 구조물의 응답 결과

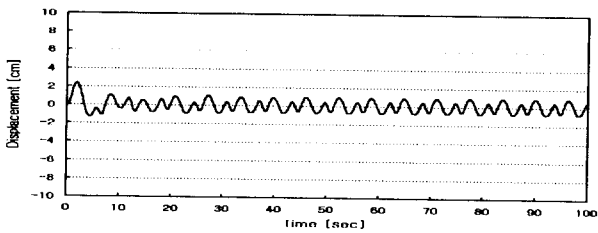
그림 10은 풍력을 인가 시 수동시스템, LQ 제어 그리고 NNPPID 제어기를 각각 적용하였을 경우 나타나는 건축 구조물 응답변위를 나타낸다.



(a) Passive control (without control)



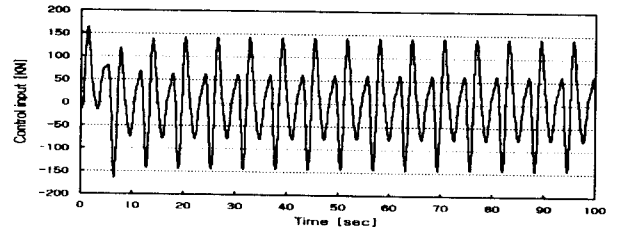
(b) LQ control



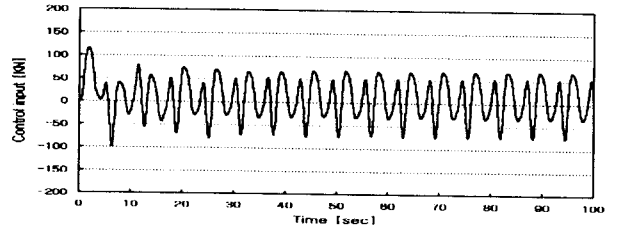
(c) NNPPID control

그림 10. 풍력에 대한 응답 변위
Fig. 10. Displacements for wind forces

그림 11은 능동제어기의 제어에너지 파형을 나타낸다.



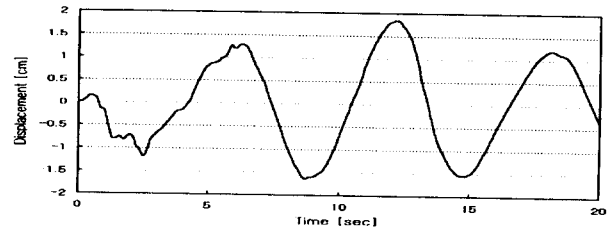
(a) LQ control



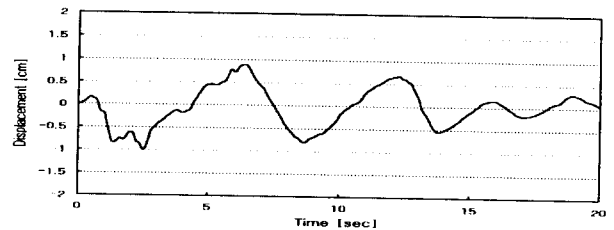
(b) NNPPID control

그림 11. 제어 에너지
Fig. 11. Control forces

수동시스템의 경우, 건축 구조물의 변위는 시간에 따라 진동의 폭이 계속적으로 증가하다가 약 50sec 부터는 일정한 크기로 진동하는 것을 알 수 있다. LQ나 NNPPID의 경우 제어 초기에 약 2.2cm의 최대 변위를 발생시키며 실효치(RMS) 변위의 경우 LQ는 약 1.25cm이며 NNPPID는 0.62cm를 가진다. 따라서, NNPPID는 LQ에 비해 전체적으로 약 50% 정도로 변위를 감소시킨다. 한편, 제어 에너지의 경우에 NNPPID는 LQ에 비해 전체적으로 적은 양을 발생시키며 이것은 NNPPID의 제어 에너지가 매우 효율적으로 인가가 되어 제어 시스템을 작동시키는 것으로 분석이 된다. 그림 12는 El Centro wave를 인가하였을 경우 각각의 제어시스템에 대한 건축 구조물의 응답 파형을 나타낸다.



(a) Passive control (without control)



(b) LQ control