

# 지진하중을 받는 구조물의 MR 댐퍼의 동특성을 고려한 반능동 신경망 제어

## Semiactive Neuro-Control for Seismic Response Reduction Using Smart Damper

이헌재\* · 정형조\*\* · 오주원\*\*\* · 이인원\*\*\*\*

Lee, Heon-Jae · Jung, Hyung-Jo · Oh, Ju-Won · Lee, In-Won

### 1. 서 론

인공신경망은 인공신경망의 학습기능이 해석적인 답을 얻기 어려운 복잡한 공학문제를 풀 수 있는 새로운 가능성을 제시하였기 때문에 공학의 여러 분야에 널리 이용되어 왔다. 특히, 신경망을 이용한 지진하중을 받는 구조물의 진동제어에 관한 연구는 Ghaboussi 등(1995)과 Chen 등(1995)에 의해 동시에 제안되었다. 그들은 신경망이 구조물의 진동제어의 한 방법이 될 수 있음을 보여주었으나 학습시 목표응답을 구하는 문제와 에플레이터 신경망을 사용해야하는 등의 문제점이 드러났다. 김동현 등(2000)은 가격함수와 민감도 계산 기법을 제안함으로써 위와 같은 문제점을 해결하였다.

기존의 신경망을 이용한 구조물의 진동제어 방법은 능동제어방법이기 때문에 구조시스템을 불안정하게 할 가능성이 있다. 그에 비해 반능동제어는 수동제어 시스템이 가지고 있는 신뢰성(Reliability) 뿐 만 아니라 능동제어기법의 장점인 적응성(Adaptability)을 확보할 수 있기 때문에 구조 시스템을 불안정하게 할 가능성이 전혀 없고, 적은 양의 전력을 가지고도 제어가 가능하다. 이헌재 등(2002)은 신경망 제어기법을 이상적인 반능동제어 시스템에 적용함으로써 기존에 대부분 능동제어 시스템에 적용되던 신경망 제어기법이 반능동제어 시스템에도 성공적으로 사용될 수 있음을 보였다.

그에 이어 그에 이어 본 연구에서는 대표적인 반능동 제어장치인 MR 댐퍼의 동특성을 고려한 반능동 신경망 제어 시스템을 제안하였다. 제안된 반능동 신경망 제어 시스템은 적절한 제어력을 계산하는 신경망 제어기와 MR 댐퍼가 계산된 제어력을 낼 수 있도록 하는 clipped algorithm으로 이루어져 있다.

### 2. 신경망을 이용한 능동 제어 시스템

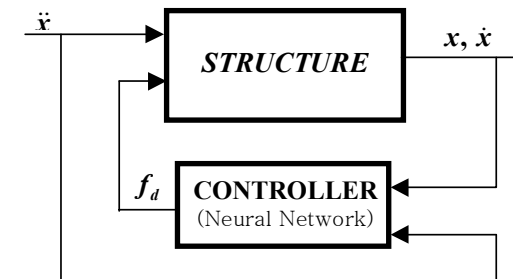


그림 1. 능동 제어 시스템의 블록다이어그램

그림 1은 신경망을 이용한 능동제어시스템의 블록다이어그램이다. 외부하중을 받는 구조물의 응답을 계측하여 신경망의 입력으로 사용하고 신경망의 출력을 제어력으로 사용하여 구조물의 진동을 저감시킨다. 이때, 신경망을 적절한 제어력을 계산하도록 학습시켜야 하는데, 제어기 신경망의 학습규칙은 김동현 등(2000)이 제안한 식 (1)과 같은 가격함수를 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

$$\hat{J} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_f-1} \{ \mathbf{z}_{k+1}^T \mathbf{Q} \mathbf{z}_{k+1} + \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k \} = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_f-1} \hat{J}_k \quad (1)$$

\* 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail : wildhawk7@kaist.ac.kr - 발표자  
 \*\* 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail : hjung@mail.kaist.ac.kr  
 \*\*\* 정희원 · 한남대학교 토목공학과 정교수 · 공학박사 · E-mail : ohjw@mail.hannam.ac.kr  
 \*\*\*\* 정희원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : iwlee@kaist.ac.kr

여기서  $z(n \times 1)$ 와  $u(m \times 1)$ 은 각각 구조물 응답의 상태벡터와 제어력 벡터이고,  $Q(n \times n)$ 와  $R(m \times m)$ 은 상대 가중치 행렬이다. 그리고  $k, N_f$ 는 각각 샘플단계, 총 샘플갯수를 의미한다. 식 (1) 괄호 안의 첫 번째 항은 진동에너지를 두 번째 항은 제어에너지를 나타낸다. 가격함수를 최소화하기 위해 gradient descent 규칙을  $k$ 번째 가격함수에 적용하여 가중치 수정량을 구하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta W_{ih}^1 &= \eta \delta_i^1 I_h & \Delta W_{ji}^2 &= \eta \delta_j^2 o_i^1 \\ \Delta b_i^1 &= \eta \delta_i^1 & \Delta b_j^2 &= \eta \delta_j^2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 가중치 수정량을 얻기위해 필요한 민감도  $\{\partial z_{k+1} / \partial u_{kj}\}$ 는 김동현 등(2001)이 제안한 민감도 계산기법을 이용하여 제어기 신경망의 학습을 용이하게 하였다.

### 3. 신경망과 MR 댐퍼를 이용한 반능동제어 시스템

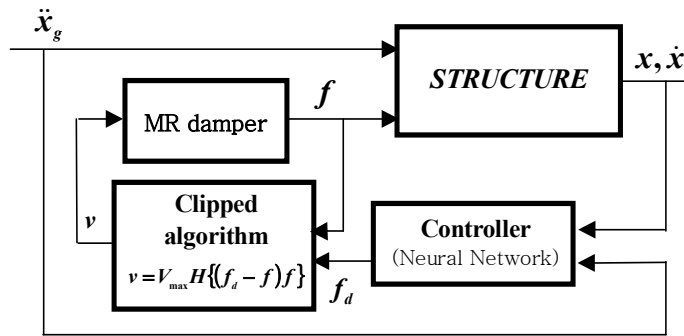


그림 2는 본 논문에서 제안하고 있는 MR 댐퍼를 이용한 반능동제어시스템의 블록 다이어그램이다. 이는 능동제어시스템에서 사용한 동일한 신경망 제어기와 clipped algorithm을 사용하였다. Clipped algorithm은 MR 댐퍼에서 발생하는 힘  $f$ 와 신경망 제어기에서 계산되어진 힘  $f_d$ 를 비교하여 0 아니면 최대전압을 걸어주는 알고리즘이다.

또한, MR 댐퍼를 실제로 모사하기 위해서 Spencer 등(1997)이 제안한 개선된 Bouc-Wen 모델을 사용하였다. 개선된 Bouc-Wen 모델은 기존 Bouc-Wen 모델이 작은 크기의 속도구간을 제대로 모사하지 못하는 점을 개선한 모델이고, 식 (3)의 7개의 방정식으로 표현된다. 여기서  $x$ 는 MR 댐퍼의 변위를  $x_0$ 는 스프링의 초기변위를 나타내고  $y$ 는 MR 댐퍼의 유사변위(pseudo displacement),  $u$ 는 전압 1차 필터의 출력,  $v$ 는 명령전압을 각각 나타낸다. 나머지 여러 가지 변수들은 실험 데이터에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \\ \dot{z} &= -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \\ \dot{y} &= \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y) \} \\ \alpha &= \alpha_a + \alpha_b u & c_1 &= c_{1a} + c_{1b} u \\ c_0 &= c_{0a} + c_{0b} u & \dot{u} &= -\eta (u - v) \end{aligned} \quad (3)$$

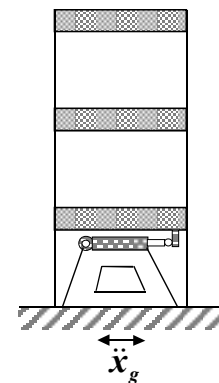


그림 3. 3층 전단건물 모델

### 4. 수치해석

#### 4.1 해석 모델

수치해석에서 사용한 모델은 Dyke 등(1996) 이 사용한 그림 3의 3층 전단건물이다. 1층에 MR 댐퍼가 설치되어 있다.

#### 4.2 제어기의 학습

제어기 신경망은 입력, 은닉, 출력층으로 구성되었고, 입력층은 1층과 3층의 변위, 속도 및 지반의 가속도를 위한 5개의 노드를 사용하였다. 은닉층은 5개의 노드를 사용하였고 출력층은 제어신호를 위한 한 개의 노드를 사용하였다. 수치해석 모델에 대하여 대표적인 역사지진인 El Centro 지진(1940, 0.348 g)에 대하여 제어기 신경망을 학습시켰다.

#### 4.3 제어 성능

학습된 신경망제어기의 검증을 위하여 학습된 신경망 제어기를 주파수 분포와 지진의 세기가 서로 다른 Kobe 지진(1995, 0.8337 g)과 California 지진(1994, 0.156 g)으로 검증하였다. 또, 지진의 세기와 제어성능과의 관계를 알아보기 위해 El Centro 지진의 0.5, 2.0배 지진과 Kobe 지진의 0.25, 0.5배 지진, California 지진의 2.0, 3.0배 지진으로도 검증하였다.

표 1 부터 표 3 까지는 여러 가지 세기의 각 지진들에 대한 능동신경망제어, clipped 최적제어, 제안방법의 최대응답의 비율이 나타나있다. 결과적으로 제안방법의 제어성능이 기존의 clipped 최적제어의 성능보다 많은 부분에서 더 좋음을 알 수 있다. 또한 능동신경망제어에 비해서도 그렇게 제어성능이 떨어진다고 할 수는 없고, 오히려 비슷하거나 더 좋은 성능을 내는 부분도 있다는 것을 알 수 있다. 여기서 능동신경망제어는 제어장치의 동적특성을 전혀 고려하지 않은 매우 이상적인 경우이므로, 제안방법의 제어성능이 능동신경망제어의 제어성능과 비슷하다면, 제안방법이 지진하중을 받는 구조물의 응답을 줄이기 위한 방법으로 매우 효율적인 방법이란 결론을 내릴 수 있다. 또한 clipped 최적제어방법은 지진을 달리했을 때 제안방법보다 제어성능이 좋아지지 않음을 알 수 있고, 일부 응답의 경우 제어하지 않은 경우의 응답보다 더 큰 경우도 있음을 알 수 있다.

또한, 그림 4는 세 가지 지진과 세기를 변화시킨 지진에 따른 clipped 최적제어와 제안방법의 3층 최대 층간 변위와 1층 최대가속도 및 최대제어력을 능동 신경망제어의 성능과 비교한 그래프이다. 3층의 최대 층간 변위를 나타낸 그림 4의 (a)를 살펴보면, 제안방법은 모든 경우의 지진에 대해 clipped 최적제어보다 좋은 결과를 나타내고 있고, 능동 신경망제어와도 최대 25% 정도 차이를 보이며, california의 경우 더 능동 신경망제어보다 더 좋은 성능을 내고 있는 것을 알 수 있다. 또한 1층의 최대가속도를 나타낸 (b)에서는 오히려 제안방법이 능동 신경망 제어보다도 더 성능이 좋은 것으로 나타났다. 최대제어력에 대한 (c)에서도 제안 방법은 능동 신경망제어나 clipped 최적제어보다 대체적으로 더 작은 최대제어력을 갖는 것으로 나타났다. 결론적으로, 제안방법이 기존 방법보다 더 작은 제어력으로 더 좋은 성능을 내고 있다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 지진하중을 받는 구조물의 응답을 감소시키기 위해 MR 유체 감쇠기와 개선된 신경망 제어기를 이용한 반능동 제어방법을 제안하였다. 제안방법의 효율성을 증명하기 위해서 3층 전단 건물 모형을 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, 지진의 종류와 세기에 관계없이 제안방법의 성능이 기존에 반능동제어방법으로 널리 사용되고 있는 clipped 최적제어방법의 성능보다 우수함을 알 수 있었다 (3층 최대 층간변위: 5 ~ 34 % 감소, 1층 최대가속도: 37 ~ 69 % 감소). 그리고 제안방법이 능동 신경망제어 방법에 비해 대체적으로 층간변위의 제어 효과는 다소 떨어졌지만, 절대가속도의 제어효과는 다소 뛰어났다 (3층 최대 층간변위: 6 % 감소 ~ 24 % 증가, 1층 최대가속도: 38 % 감소 ~ 3 % 증가). 하지만, 반능동 제어방법은 능동제어방법에서 발생할 수 있는 시스템의 불안정성 문제가 없고 적은 전력으로도 제어가 가능하기 때문에, 보다 안정적으로 구조물에 적용할 수 있다. 그러므로 제안된 반능동 신경망제어방법은 지진하중을 받는 구조물의 진동을 저감시키는데 매우 효율적인 방법이다.

### 감사의 글

본 연구는 국가지정 연구실인 구조물 내진제어 연구실의 지원 하에 이루어졌습니다. 지원에 깊은 감사 드립니다.

표 1. 여러 가지 세기의 El Centro 지진에 대한 각 방법의 최대응답의 비율

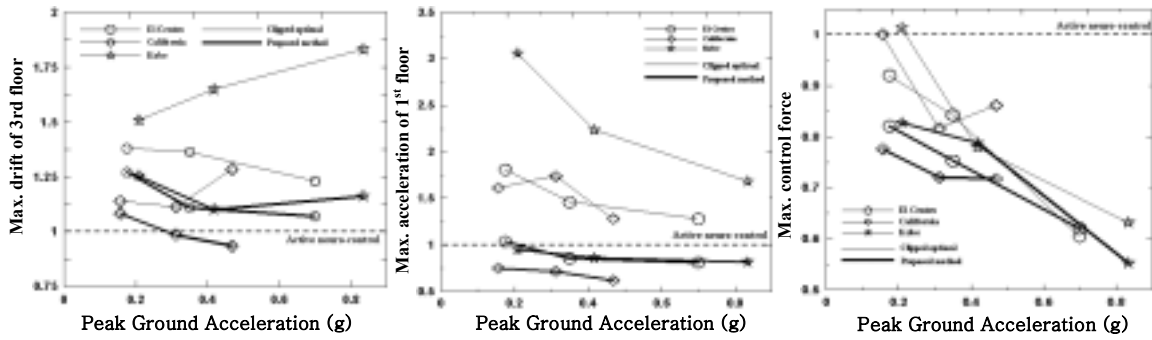
|  | 0.5×El Centro<br>(PGA:0.175 g) |                    |                    | 1.0×El Centro<br>(PGA:0.349 g) |                    |                    | 2.0×El Centro<br>(PGA:0.699 g) |                    |                    |
|--|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
|  | Active<br>neuro                | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method | Active<br>neuro                | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method | Active<br>neuro                | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method |
| $x_i$<br>(cm)                          | 0.185                          | 0.196              | 0.214              | 0.179                          | 0.213              | 0.216              | 0.181                          | 0.255              | 0.226              |
|  | 0.116                          | 0.213              | 0.206              | 0.114                          | 0.225              | 0.207              | 0.122                          | 0.273              | 0.228              |
|  | 0.177                          | 0.245              | 0.266              | 0.173                          | 0.228              | 0.249              | 0.173                          | 0.301              | 0.266              |
| $d_i$<br>(cm)                          | 0.185                          | 0.196              | 0.214              | 0.179                          | 0.213              | 0.216              | 0.181                          | 0.255              | 0.226              |
|  | 0.338                          | 0.325              | 0.400              | 0.334                          | 0.281              | 0.347              | 0.313                          | 0.275              | 0.319              |
|  | 0.366                          | 0.505              | 0.465              | 0.368                          | 0.502              | 0.408              | 0.356                          | 0.438              | 0.381              |
| $\ddot{x}_a$<br>(cm/sec <sup>2</sup> ) | 0.579                          | 1.047              | 0.600              | 0.538                          | 0.851              | 0.498              | 0.562                          | 0.719              | 0.455              |
|  | 0.465                          | 0.683              | 0.538              | 0.456                          | 0.717              | 0.484              | 0.414                          | 0.554              | 0.402              |
|  | 0.369                          | 0.509              | 0.471              | 0.366                          | 0.503              | 0.408              | 0.355                          | 0.436              | 0.381              |

표 2. 여러 가지 세기의 Kobe 지진에 대한 각 방법의 최대응답의 비율

|  | 0.25×Kobe<br>(PGA:0.208 g) |                    |                    | 0.5×Kobe<br>(PGA:0.417 g) |                    |                    | 1.0×Kobe<br>(PGA:0.834 g) |                    |                    |
|--|----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|
|  | Active<br>neuro            | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method | Active<br>neuro           | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method | Active<br>neuro           | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method |
| $x_i$<br>(cm)                          | 0.180                      | 0.411              | 0.282              | 0.186                     | 0.448              | 0.296              | 0.198                     | 0.471              | 0.323              |
|  | 0.148                      | 0.433              | 0.275              | 0.158                     | 0.470              | 0.289              | 0.180                     | 0.498              | 0.345              |
|  | 0.171                      | 0.424              | 0.288              | 0.177                     | 0.468              | 0.298              | 0.193                     | 0.502              | 0.352              |
| $d_i$<br>(cm)                          | 0.180                      | 0.411              | 0.282              | 0.186                     | 0.448              | 0.296              | 0.198                     | 0.471              | 0.323              |
|  | 0.334                      | 0.478              | 0.388              | 0.336                     | 0.515              | 0.385              | 0.313                     | 0.544              | 0.417              |
|  | 0.326                      | 0.492              | 0.409              | 0.333                     | 0.549              | 0.367              | 0.339                     | 0.621              | 0.394              |
| $\ddot{x}_a$<br>(cm/sec <sup>2</sup> ) | 0.497                      | 1.521              | 0.471              | 0.500                     | 1.118              | 0.430              | 0.492                     | 0.828              | 0.402              |
|  | 0.385                      | 0.646              | 0.358              | 0.382                     | 0.701              | 0.379              | 0.381                     | 0.691              | 0.515              |
|  | 0.330                      | 0.493              | 0.410              | 0.334                     | 0.551              | 0.367              | 0.339                     | 0.620              | 0.393              |

표 3. 여러 가지 세기의 California 지진에 대한 각 방법의 최대응답의 비율

|  | 1.0×California<br>(PGA:0.156 g) |                    |                    | 2.0×California<br>(PGA:0.312 g) |                    |                    | 3.0×California<br>(PGA:0.468 g) |                    |                    |
|--|---------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
|  | Active<br>neuro                 | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method | Active<br>neuro                 | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method | Active<br>neuro                 | Clipped<br>optimal | Proposed<br>Method |
| $x_i$<br>(cm)                          | 0.137                           | 0.172              | 0.137              | 0.144                           | 0.213              | 0.133              | 0.148                           | 0.207              | 0.147              |
|  | 0.094                           | 0.196              | 0.148              | 0.096                           | 0.226              | 0.149              | 0.098                           | 0.221              | 0.160              |
|  | 0.120                           | 0.198              | 0.174              | 0.122                           | 0.224              | 0.171              | 0.124                           | 0.226              | 0.184              |
| $d_i$<br>(cm)                          | 0.137                           | 0.172              | 0.137              | 0.144                           | 0.213              | 0.133              | 0.148                           | 0.207              | 0.147              |
|  | 0.235                           | 0.229              | 0.268              | 0.235                           | 0.249              | 0.249              | 0.236                           | 0.247              | 0.262              |
|  | 0.336                           | 0.383              | 0.364              | 0.335                           | 0.373              | 0.330              | 0.340                           | 0.437              | 0.318              |
| $\ddot{x}_a$<br>(cm/sec <sup>2</sup> ) | 0.423                           | 0.683              | 0.318              | 0.431                           | 0.736              | 0.301              | 0.435                           | 0.561              | 0.264              |
|  | 0.354                           | 0.436              | 0.383              | 0.362                           | 0.453              | 0.317              | 0.367                           | 0.525              | 0.284              |
|  | 0.335                           | 0.383              | 0.367              | 0.336                           | 0.371              | 0.330              | 0.339                           | 0.317              | 0.317              |



(a) 3층의 최대 층간 변위      (b) 1층의 최대 절대가속도      (c) 최대 제어력  
 그림 4. 제안 방법과 clipped-optimal 방법의 세기를 달리하는 여러 가지 지진에 대한 성능 비교

참고문헌

1. Ghaboussi, J. and Joghataie, A., "Active Control of Structure using Neural Network", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.121, No.4, 1995, pp.555-567.
2. Chen HM, Tsai KH, Qi GZ, Yang JCS, Amini F., "Neural Network for Structural Control", ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.9, No.2, 1995, pp.168-176.
3. Ju-Tae Kim, Hyung-Jo Jung, In-Won Lee, "Optimal Structural Control using Neural Networks", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol.126, No.2, 2000, pp.201-205.
4. Dong-Hyawn Kim, In-Won Lee, "Neuro-control of Seismically Excited Steel Structure through sensitivity evaluation scheme", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.30, No.9, 2001, pp.1361-1378.
5. Dyke SJ, Spencer BF Jr., "Modeling and Control of Magnetorheological Damper for Seismic Response", Smart Material and Structures, Vol.5, No.5, pp.565-575.