

모드에너지 기반 신경망을 사용한 구조물의 진동제어

Vibration Control for Structures based on Modal Energy based Neural Networks

장 성 규* · 김 두 기** · 김 기 홍*** · 김 윤 석**** · 이 승 우*****

Chang, Seongkyu · Kim, dookie · Kim, Kihong · Kim, Yun-Seok · Lee, Seung-Woo

요 약

본 논문에서는 지진시 구조물의 진동을 줄이기 위한 방법으로 모드에너지 기반 신경망 제어 방법을 제안하였다. 모드에너지 기반 신경망 제어 방법은 신경망의 학습 과정에서 구조물의 모드 에너지를 이용하여 목적함수를 구성하며, 이 목적함수를 최소화 하는 학습을 진행한다. 제안된 제어 알고리즘의 적용성을 검증하기 위해서 능동질량감쇠기(AMD, Active Mass Damper)가 설치된 3층 구조물을 예제 모델로 선택하였으며, El Centro 지진을 이용하여 모드에너지기반 신경망제어 알고리즘을 학습시켰다. 모드에너지 기반 신경망 제어 알고리즘의 제어 성능은 학습 후 임의의 지진에 대한 하중으로 California 지진을 사용하여 검증하였다. 해석 결과에서 California 지진에 대한 제어 전·후의 결과와 기존의 방법인 MLP(Multi-layer Perceptron)의 결과와 비교하였다. 또한 제안된 제어 방법을 적용할 때, 지진시 구조물의 비선형 거동은 제어 후 거의 보이지 않는 것을 확인 할 수 있었다.

keywords : 모드 에너지, 제어, 능동질량감쇠기, 구조물

1. 서 론

고층건물 및 타워, 장 경간 교량과 같은 토목구조물은 지진 및 바람, 자동차와 같은 동적 하중에 대하여 안전하고 신뢰성 있는 설계가 필요하다. 현재 공사 중이거나 계획중인 구조물들은 새로운 재료와 공법의 발달로 더 길어지거나 높아지고 경제적인 설계가 가능해졌다. 그러나 이러한 구조물은 외부 하중에 대하여 진동하기 쉽고, 과도한 진동에 의한 구조물의 파괴 및 인명 손실의 문제를 발생시킨다. 이러한 구조물의 진동을 줄이는 방법에는 능동제어 및 수동제어, 반-능동제어 등이 있으며, 본 논문에서는 구조물의 진동을 줄이기 위하여 모드에너지 기반 신경망을 이용한 능동제어를 사용하였다.

신경망을 이용한 구조물의 진동제어는 1990년대 중반에 Chen (1995) 등에 의해 시작 되었으며, Ghaboussi 와 Joghataie (1995), Bani-Hani 와 Ghaboussi (1998), Liut 등 (1999), 김동현, 이인원 (2001), 조현철(2005), Modan(2007), 이현재 (2007) 등에 의해 개선, 개발되었다.

모드에너지를 이용한 연구는 반능동제어 분야에서 시작하였다 (Lin, 1994; Emad, 1996). Lin 과 Emad는

* (주)티이솔루션 과장/공학박사 skchang@tesolution.com

** 군산대학교 토목공학과 부교수 kim2kie@kunsan.ac.kr

*** (주)다산컨설팅트 기술연구소 수석연구원 khkim@dasan93.co.kr

**** (주)티이솔루션 대표이사 yskim@tesolution.com

***** (주)티이솔루션 부장 swlee@tesolution.com

외력에 대한 기계 구조물의 응답을 줄이는 방법으로 모드에너지 전달을 이용하여 구조물의 강성을 변화시키는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 구조물의 진동을 줄이기 위한 방법으로 모드에너지 기반 신경망 제어 방법을 제안하였으며, 제어 운동을 모사하기 위해서 능동질량 감쇠기가 설치된 3층 구조물을 사용하였다. El Centro 지진을 이용하여 제어 알고리즘을 학습시켰고, 제어 성능을 확인하기 위해서 California 지진을 사용하였다. 제어 결과는 기존의 MLP(Multi-layer Perceptron)의 결과와 비교·검토하였다.

2. 운동방정식

지진에 대한 구조물의 동적 응답을 제어하기 위하여 능동질량감쇠기(AMD, Active mass damper)가 설치된 3층 구조물을 사용하였으며, 이 구조물은 다음과 같은 지진과 제어력을 받는 2계 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + K(x, \dot{x}) = Lf - M[1]\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기에서, M 과 C 는 구조물의 질량, 감쇠 행렬이고, $K(x, \dot{x})$ 는 복원력 벡터이다. x, \dot{x}, \ddot{x} 는 구조물의 변위, 속도, 가속도를 나타내며, f 는 제어력, $[1]$ 은 지진가속도의 위치벡터, \ddot{x}_g 는 지진가속도 이다.

3. 모드에너지 및 성능지수

3.1. 모드에너지

시스템의 총 에너지는 modal parameter로 나타낼 수 있다.

$$TE(t) = \sum_{m=1}^n PE_m + \sum_{m=1}^n KE_m = \sum_{m=1}^n \frac{1}{2} k_m^* q_m^2(t) + \sum_{m=1}^n \frac{1}{2} m_m^* \dot{q}_m^2(t) \quad (2)$$

여기에서 PE_m, KE_m 은 m 번째 모드의 위치·운동에너지, k_m^*, m_m^* 은 일반화된 강성 및 질량이다. q_m 은 각 모드에 대한 시간화 함수이다.

본 연구에서는 신경망의 성능지수에 모드 에너지를 사용하였으며, 제안된 성능지수는 다음과 같다.

$$\hat{J} = \sum_{k=0}^{N_f-1} \left[Q(PE_{k+1} + KE_{k+1}) + \frac{1}{2} u_k^T R u_k \right] = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N_f-1} \left[Q(q_{k+1}^T k^* q_{k+1} + \dot{q}_{k+1}^T m^* \dot{q}_{k+1}) + u_k^T R u_k \right] \quad (3)$$

여기에서 k 와 N_f 는 샘플링 수와 총 시간을 나타내며, Q 는 각 모드의 가중치, R 은 제어 신호의 가중치, u_k 는 제어 신호를 나타낸다.

3.2. 제어 알고리즘 과 제어법칙

식 (3)의 k 시간에 대한 최급하강법을 적용하면, 신경망의 출력층과 은닉층의 가중치 W_{ji}^2 의 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta W_{ji}^2 = -\eta \frac{\partial \hat{J}_k}{\partial W_{ji}^2} \quad (4)$$

여기서 η 는 학습률이다. 식 (4)에 체인룰(chain rule)을 적용하여 정리하면, 식 (4)의 가중치의 변화량은 다

음과 같다.

$$\Delta W_{ji}^2 = -\eta \delta_j^2 o_i^1 \quad (5)$$

여기서

$$\delta_j^2 = - \left[\left\{ (k^* q_{k+1})^T Q \frac{\partial q_{k+1}}{\partial u_k} + (m^* \dot{q}_{k+1})^T Q \frac{\partial \dot{q}_{k+1}}{\partial u_k} \right\} + u_k^T R \right] G_j (f^2)' |_{net_j^2} \quad (6)$$

3. 해석결과 및 결론

모드에너지 기반 신경망 제어기를 이용하여 지진시 구조물의 진동을 줄이기 위하여 10초 동안의 EI Centro 지진(1940)을 학습데이터로 이용하였으며, 신경망의 학습은 200회를 실시하였다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 California 지진을 사용하였으며, 그림 1은 학습시 목적함수의 감소 그래프를 나타내며, 그림 2는 학습후 모드에너지 기반 신경망 제어 방법을 적용한 후, California 지진에 대한 제어 신호 및 제어력을 그림 3은 제어 전·후의 응답을 나타내며, 그림 4는 MLP와의 제어 결과를 보여주고 있다.

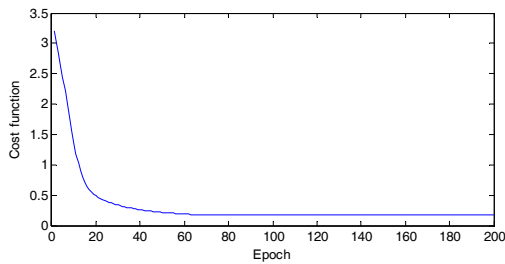


그림 1. 학습시 목적함수 감소 그래프

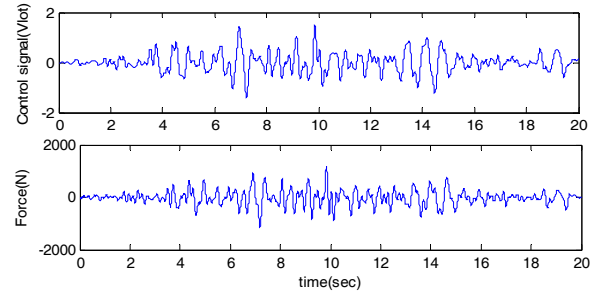


그림 2. 제어신호 및 제어력

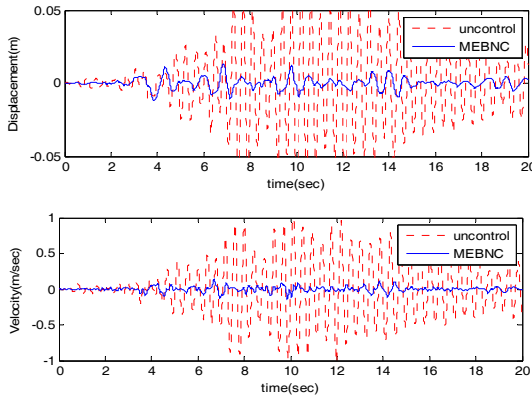


그림 3. California 지진에 대한 변위와 속도

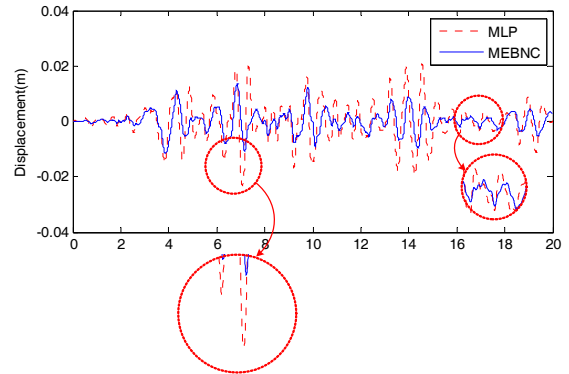


그림 4. California 지진에 대한 변위 비교

그림 3에서 보여 주듯이 3층에서의 변위 및 속도의 최대 감소비율은 각각 81.15%, 86.51%로 상당한 응답 감소 효과를 보여주고 있다. 제안된 모드에너지 기반 신경망 제어 방법은 기존 방법인 MLP에 대하여 변위와 속도에 대한 감소비율은 각각 약 43.47%, 36.66%로 제안된 방법이 구조물의 진동을 줄이는데 더 효과적임을 알 수 있다.

본 논문에서는 비선형 구조물에 대한 제어 성능을 보여주기 위하여, 비선형 구조물의 제어 전·후의 결과를 변위와 복원력으로 나타내었으며, 제어 전의 응답에서는 비선형 이력거동을 보였으나, 본 연구에서 제안된 방법으로 제어했을 경우에는 비선형 거동이 거의 보이지 않음을 알 수 있다(그림 5).

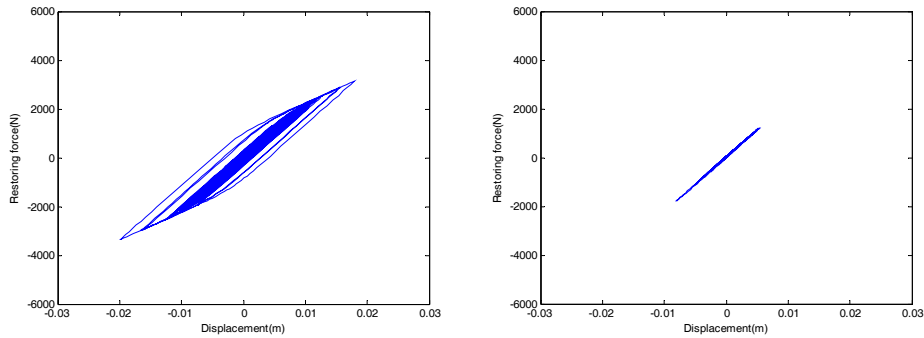


그림 5. California 지진에 대한 복원력 vs. 변위 그래프 (좌: 제어전, 우:제어후)

본 논문에서는 지진시 구조물의 진동을 줄이기 위한 방법으로 모드에너지 기반 신경망 제어 방법을 제안 하였으며, 제안된 제어 알고리즘을 적용하기 위하여 능동질량 감쇠기가 설치된 3층 구조물을 이용하였다. El Centro 지진으로 학습된 제어 알고리즘은 임의의 지진에 대한 검증으로 California 지진을 사용하여 제어 성능을 검토하였다. 제안된 방법은 California 지진에 대해서 탁월한 진동저감효과를 보였으며, 비선형 구조물에 대해서도 좋은 성능을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 구조물-지반 상호작용을 고려한 구조물 비선형 내진 성능평가 도구 개발과제 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Chen, H. M., Tsai, K. H., Qi, G. Z., Yang, C. S., and Amini, F. (1995) Neural network for structure control, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 9(2), pp.168~176.
- Ghaboussi, J. and Joghataie, A. (1995) Active control of structure using neural networks, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 121(4), pp.555~567.
- Bani-Hani, K, and Ghaboussi, J. (1998b) Neural networks for structural control of a benchmark problem, active tendon system, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 27, pp.1225~1245.
- Liut, D.A., Matheu, E.E., Singh, M.P., and Mook, D.T. (1999) Neural-network control of building structures by a force-matching training scheme, *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 28, pp.1601~1620.
- Kim D.H. and Lee I.W. (2001) Neuro-control of seismically excited steel structure through sensitivity evaluation scheme, *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 30, pp.1361~77.
- Cho, H.C., Fadali, M.S. Saiedi, M.S., and Lee, K.S. (2005) Neural network active control of structures with earthquake excitation, *International Journal of Control, Automation, and System*, 3(2), pp.202~210.
- Madan, A. (2005) Vibration control of building structures using self-organizing and self-learning neural networks, *Journal of Sound and Vibration*, 287, pp.759~784.
- Lee, H.J. (2007) Neural network-based structural vibration control system, Doctoral Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea.
- Lin, Y. (1994) Semi-active structural motion control by transfer of modal energy, Doctoral Thesis, University of Texas, USA.
- Emad, N.A. (1996) Acceleration behavior of semi-active structural motion control by transfer of modal energy, University of Texas, USA.