

인공신경망을 이용한 해양구조물의 지진시 진동제어

Seismic control of offshore platform using artificial neural network

김 동 현¹⁾ · 김 주 명²⁾ · 심 재 설³⁾

Kim, Dong Hyawn · Kim, Ju Myung · Shim, Jae Seol

요약 : 해저지진 시 해양구조물의 진동제어를 위한 인공지능 능동제어기법을 제안하였다. 해양구조물의 동적거동은 유체-구조물 상호작용에 의한 비선형 거동을 고려하였으며 인공신경망의 학습기법을 이용하여 해양구조물의 진동제어기를 구현하였다. 수치해석결과 비제어시와 수동제어 그리고 본 연구에서 개발한 인공신경망 제어기법에 의한 성능을 비교하였다. 진동제어 성능은 능동제어가 가장 우수하였으며 신경망 제어기법은 비선형거동을 하는 해양구조물에 적용하여도 그 성능이 매우 뛰어나함을 확인하였다.

ABSTRACT : An intelligent control technique using a neural network is proposed for offshore structures exposed to sea-bed earthquakes. Fluid-structure interaction effect was considered in developing controller and a training algorithm for the neural network is presented. In the numerical example, the performance of the proposed neural network controller was compared with that of a passive controller and uncontrolled structures. Based on the example, it can be concluded that the proposed neuro-control scheme can be used for offshore structures with nonlinear characteristics due to its interaction with fluid.

핵심 용어 : 해양구조물, 지능제어, 인공신경망, 동조질량감쇠기, 진동제어, 유체구조물 상호작용, 비선형, 모리슨방정식

KEYWORDS : Offshore Structure, Intelligent Control, Artificial Neural Network, TMD, Vibration Control, Fluid-Structure Interaction, Nonlinear, Morison Equation

1. 서론

지진활동은 주로 지진대 주변에서 많이 발생하고 있으며 육상보다는 해저에서 발생빈도와 규모가 큰 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 육상에서는 홍성지진이 관측지진으로서 가장 큰 규모를 가지고 있지만 동해 등지에는 이보다 더 큰 규모의 지진활동이 관측되고 있다. 해저지진의 위험성이 이렇듯 큼에도 불구하고 그동안 구조물의 내진 및 제진설계는 육상구조물에 대해서 강조되었던 것은 구조물의 수요가 육상에 집중되어 있고 또, 지진으로 인한 피해가 육상구조물에서 더 심각했기 때문일 것이다. 그러나, 인류의 자원문제, 공간확보 문제, 레저활동 증가 등으로 인해 해양구조물의 수요 또한 날로 증가추세에 있는 현실에서 해양구조물의 지진안정성에 관한 인식은 새로운 국면을 맞고 있다.

해양구조물의 진동제어 방법에는 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)를 사용하는 수동제진기법(Li 등,

1999)과 능동질량감쇠기(Active Mass Damper, AMD)를 사용하는 능동제진기법(Li 등, 2001), 그리고 이 두 방법의 중간적 위치에 있는 반능동제진기법(Li 등, 2002)이 있다. 이 중에서 수동 제진기법은 외부전력의 공급없이 작동이 가능하다는 장점이 있으나 제진성능이 다소 제한적이며 능동제진기법은 전력공급의 문제가 있으나 제진성능은 수동제진기법에 비해 월등하다. 그리고 반능동 제진기법은 가변적인 제진기 특성을 이용하여 제진효율을 높이고자 하는 방법이나 수동 제진기법에 비해 제진성능 향상 효과가 크지 않다.

본 논문에서는 우수한 제진성능을 갖는 능동제진기법을 개발하였다. 해저지진은 육상보다 그 규모가 크고 또한 구조물에 손상을 입을 경우 다른 구조수단이 전무한 상태이므로 보다 높은 제진성능이 요구된다고 할 수 있다. 그러나, 해양구조물은 파랑-구조물 상호작용에 의해 그 운동이 비선형이다. 제진기를 설계하기 위해서도 이러한 비선형 거동을 고려해야 우수한 제진성능을 발휘할 수 있다. 해양구조물에서 발생하는

1) 교신저자. 군산대학교 교수, 공학박사
(Tel. 063-469-1862, Fax. 063-463-9493, E-mail : welcomed@naver.com)
2) 국토해양부 사무관, 공학박사(kimjm820@mltm.go.kr)
3) 한국해양연구원 책임연구원, 공학박사(jsshim@kordi.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

파랑과의 상호작용에 의한 비선형 거동을 제어기 설계에 반영하기 위해서 인공신경망 제어기법을 적용하였다.

해양구조물의 진동제어를 위해 Li 등(1999)은 다자유도 해양구조물을 등가의 일자유도 구조물로 변환하여 최적의 TMD를 설계하기 위한 방법을 제안한 바 있다. 그들의 논문에서는 구조물 응답의 표준편차를 목적함수로 하는 수치최적화 문제를 정식화하여 최적의 감쇠 및 강성을 구하였다. 또한, Li 등(2000)은 장기 비정상(long term nonstationary) 파동에 대한 TMD의 최적화 기법을 제안한 바 있다. 이들은 파고의 확률론적 스펙트럼을 이용하여 응답의 분산에 대한 기대치를 최소화 하는 방법을 사용하였다.

그러나, 기존연구들에서는 해양구조물이 유체와의 상호작용에 의해 필연적으로 동반되는 동적거동에서의 비선형 특성을 제어기 설계에 반영하지 않고 있다. 이는 제어기의 설계가 대부분 선형방정식에 의존하고 있으며 이를 위해서는 선형화된 부가질량, 부가감쇠, 부가강성 등만으로도 충분하다고 판단하고 있기 때문이다. 그러나, 아무리 부가행렬로 유체-구조 상호작용을 표현하더라도 그 성능에 대한 검증은 제대로 평가되지 못하고 있으며 제어기 설계단계부터 비선형 특성을 고려하여 보다 우수한 성능을 얻고자 하는 필요성이 제기 되고 있다.

본 논문에서는 해양구조물의 유체-구조 상호작용에 동적 비선형 특성을 선형화하지 않으면서 제어기를 설계할 수 있는 인공신경망 제어기법을 개발하였다. 개발된 신경망제어기법을 이용하여 수치해석을 수행한 결과 해저지진에 의한 제진성능이 우수함을 확인하였으며 기존방법의 선형화로 인한 문제점을 극복할 수 있음을 보였다. 제 2장에서는 해양구조물의 동적해석을 위한 이론적 배경을 소개하였으며 제 3장에서는 신경망 제어기의 구성 및 학습규칙을 정리하였다. 그리고 제 4장에서는 수치해석을 통한 제안방법의 검증결과를 보였으며 5장에서 본 연구의 결과를 정리하였다.

2. 해양구조물의 동적해석

유체입자의 운동과 지진에 의한 지반운동을 모두 고려한 해양구조물의 동적 운동방정식은 식 (1)과 같다(Chakrabarti, 1987).

$$M\ddot{Z}_t + C\dot{Z}_t + KZ_t = \rho(k_m - 1)V(\dot{X} - \dot{Z}_t) + \rho V\dot{X} + \rho k_d A(\dot{X} - \dot{Z}_t) \cdot |\dot{X} - \dot{Z}_t| \quad (1)$$

여기서, M, C, K 는 구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬을

나타내며 Z_t, Z 는 구조물의 절대변위 및 지반에 대한 상대변위, ρ, k_m, k_d, V, A, X 는 각각 해수중량, 관성계수, 감쇠계수, 부피, 단면 및 해수입자의 변위를 나타낸다. (\cdot) 는 벡터요소별 곱셈연산자이다. 이 식을 부가질량 등을 이용하여 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$M_0\ddot{Z}_t + C\dot{Z}_t + KZ_t = C_m\dot{X} + C_d(\dot{X} - \dot{Z}_t) \cdot |\dot{X} - \dot{Z}_t| \quad (2a)$$

여기서,

$$M_0 = M + M_a \quad (2b)$$

$$M_a = \rho(k_m - 1)V \quad (2c)$$

$$C_m = \rho k_m V \quad (2d)$$

$$C_d = \rho k_d A \quad (2e)$$

위 식에서 구조물의 진동에 의한 해수의 운동을 무시하면 파랑 하중이 작용하지 않으므로 $\dot{X} = \ddot{X} = 0$ 으로 가정할 수 있다. 지진발생 방향으로 1을 나머지 방향으로 0을 갖는 벡터를 $\{1\}$ 로 나타내면 구조물의 절대변위는 $Z_t = Z + \{1\}z_g$ 이므로 위 식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$M_0\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = F + H\ddot{z}_g \quad (3a)$$

여기서,

$$F = -C_d(\dot{Z} + \{1\}\dot{z}_g) \cdot |\dot{Z} + \{1\}\dot{z}_g| \quad (3b)$$

$$H = -M_0\{1\} \quad (3c)$$

파랑에 의한 구조물의 동적운동은 이와 같이 비선형 특성을 띤다.

해양구조물에 수동제진장치를 설계할 경우는 운동방정식의 선형화가 필요한데 이 경우 구조물의 동적운동에 대한 통계적 특성을 이용하여 식 (4)의 관계를 적용할 수 있다(Penzien 등, 1972).

$$|\dot{Z} + \{1\}\dot{z}_g| \cong \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{\dot{r}_i} \quad (4)$$

여기서, $\sigma_{\dot{r}_i}$ 은 정지상태 유체입자에 대한 구조물의 상대속도인 $|\dot{Z} + \{1\}\dot{z}_g|$ 의 표준편차를 나타낸다.

3. 신경망제어기

3.1 신경망 제어를 고려한 운동방정식

동조질량감쇠기는 고층건물이나 교량 또는 관제탑 등과 같이 장대구조물의 과도한 진동을 억제하고자 구조물에 설치하는 수동제진장치의 일종이다. 이것은 질량, 감쇠 및 강성으로 구성된 2차 시스템(또는 부구조물)을 구조물의 고유진동수에 동조시키므로써 주구조물의 진동을 흡수하는 개념을 갖고 있다. 구조물이 과도한 진동으로 인해 안정성에 문제가 될 때 이를 해결하기 위해 사용하기도 하지만 상시에 발생하는 미소진동으로 인한 피로수명 단축을 방지하기 위해 사용하기도 한다. 해양구조물 또한 설계과고에 대해 충분히 안정성을 확보하도록 설계되지만 평상시 발생하는 중소 파랑에 노출되므로써 피로현상이 발생할 수 있으므로 이에 대한 대책으로 동조질량감쇠기를 적용하고 이의 효과를 검증하고자 한다.

동조질량감쇠기의 질량, 감쇠, 및 강성이 각각 m, c, k 라 하면 해양구조물과 AMD의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_0 \ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = F + H\ddot{z}_g + Lf_c \quad (5)$$

여기서, L 은 AMD의 설치 위치를 나타내는 벡터이며 f_c 는 AMD에 의해 발생하는 반작용력으로 다음과 같이 표현된다.

$$f_c = c(\dot{z}_c - L^T \dot{Z}) + k(z_c - L^T Z) + u \quad (6)$$

여기서, z_c 는 AMD의 변위를 의미하고 u 는 신경망제어기에 의한 제어력이다. 한편, AMD의 운동은 다음과 같이 표현된다.

$$m(\dot{z}_c + \ddot{z}_g) + c(\dot{z}_c - L^T \dot{Z}) + k(z_c - L^T Z) = -u \quad (7)$$

식 (6)~(8)을 하나의 식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$\hat{M}\ddot{Z} + \hat{C}\dot{Z} + \hat{K}Z = \hat{F} + \hat{H}\ddot{z}_g + Bu \quad (8a)$$

여기서,

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad (8b)$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} C + cLL^T & -cL \\ -cL^T & c \end{bmatrix} \quad (8c)$$

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} K + kLL^T & -kL \\ -kL^T & k \end{bmatrix} \quad (8d)$$

$$\hat{Z} = \begin{Bmatrix} Z \\ z_c \end{Bmatrix}; \quad \hat{F} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8e, f)$$

$$\hat{H} = \begin{Bmatrix} H \\ -m \end{Bmatrix}; \quad B = \begin{Bmatrix} L \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (8g, h)$$

3.2 신경망제어기 학습

신경망제어기의 학습법은 Kim(2000)에 의해 개발된 바 있다. 본 연구에서는 김동현의 방법을 해양구조물의 진동제어에 적용하였다. 신경망제어기는 그림 1과 같이 입력층, 은닉층, 출력층 등 모두 3개의 층으로 구성되어 있다. 각층의 노드를 잇는 신경망가중치(neural network weight)는 모두 초기화 되어 있다.

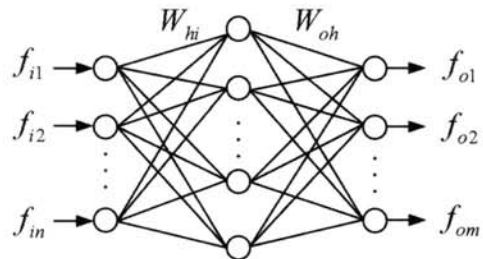


그림 1. 신경망의 구조

학습되지 않은 신경망을 이용하여 제진성능을 갖는 제어기로 학습하기 위해서 식 (9)와 같은 가격함수(cost function)을 정의하고 이를 최소화하는 방향으로 신경망을 학습시킨다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (y_k^T Q y_k + u_k^T R u_k) \quad (9)$$

여기서, Q, R 은 진동에너지와 제어에너지에 대한 가중치 행렬이고 y_k, u_k 는 k번째 해석 단계의 구조물의 응답과 제어력이다. 가격함수를 최소화하기 위해서 gradient descent rule을 적용하면 은닉층(첨자 h) - 출력층(첨자 o)을 잇는 신경망가중치의 학습법칙은 다음과 같다.

$$W_{oh} = -\alpha \delta_o f_h^T \quad (10)$$

$$\delta_o = [diag(f_o')] \left\{ y_k^T Q \left[\frac{\partial y_k}{\partial u_k} \right] + u_k^T R \right\} \quad (11)$$

여기서, α 는 신경망가중치의 학습율, f_h 와 f_o 는 은닉층과 출력층에서의 결과값이다. 또한, 입력층(침자 i)과 은닉층을 있는 가중치의 학습규칙은 다음과 같다.

$$W_{hi} = -\alpha \delta_h f_i^T \quad (12)$$

$$\delta_h = [diag(f_h')] W_{oh}^T \delta_o \quad (13)$$

여기서, f_i 는 신경망의 입력값을 나타낸다. 식 (13)에서 제어력에 대한 구조물 응답의 민감도는 이산제어원리를 이용하여 다음의 식으로 나타낼 수 있으며 실험적으로는 단위 충격하중에 의한 응답으로부터 구할 수 있다. 이 식에서 A, B 는 상태방정식에 의한 시스템행렬이며 T_s 는 해석시간 간격이다.

$$\left[\frac{\partial y_k}{\partial u_k} \right] = (e^{AT_s} - I)A^{-1}B \quad (14)$$

4. 수치해석

4.1 구조물 제원

수치해석에 사용된 모델은 그림 2(Penzien 외, 1972)와 같으며 수심은 103.63m, 총질량은 약 16.9톤이다. k_m, k_d 는 상수로서 가정하였으며 각각 2.0, 0.7을 사용하였다.

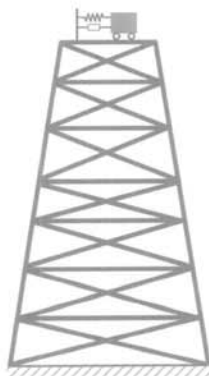


그림 2. 제어가 설치된 해양구조물 모델

유한요소모델은 총 7개의 자유도를 이용하여 구성하였으며

제진장치는 구조물의 최상단에 설치하였다.

4.2 Matlab SimuLink 모델

진동제어 수치해석을 위해 Matlab Simulink를 이용하였다. 제어가 포함된 운동방정식을 SimuLink로 모델링하면 그림 3과 같다. 여기에는 동적시스템 블록, 유체-구조물 상호작용 블록, 센서블럭, 신경망 제어기블럭 등이 포함되어 있다. 각각의 블록은 내부의 보다 구체적 모델을 포함하고 있으며 우선 유체-구조 상호작용 블록의 내부 구성은 그림 4와 같다. 그림 5는 신경망 제어기블럭을 나타내고 있으며 여기에서 사용된 Matlab function은 학습과 제어력 산정을 담당하게 된다. 그림 6은 센서를 모델링한 블록으로서 여기에서는 센서 잡음의 효과를 나타내기 위해 Band limited white noise를 이용하여 잡음을 생성시키고 있다. 또한, 신경망입력으로 사용하는 가속도 신호의 생성을 위해서 버퍼(buffer)를 이용하였으며 구체적인 버퍼의 모양은 그림 7과 같다. 즉, 샘플시간 간격만큼 시간 지연된 3개의 연속되는 가속도를 생성시키도록 하였다.

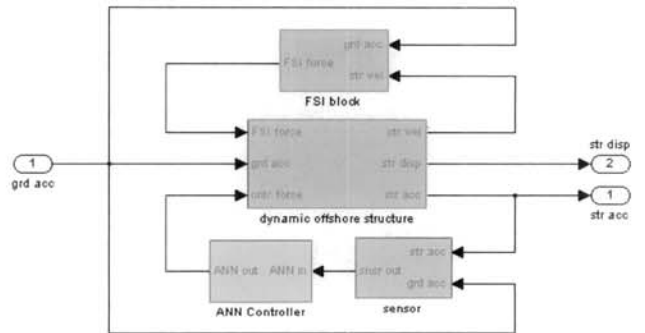


그림 3. 운동방정식 해석을 위한 SimuLink 블록

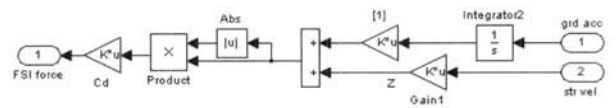


그림 4. 유체-구조 상호작용(FSI) 블럭

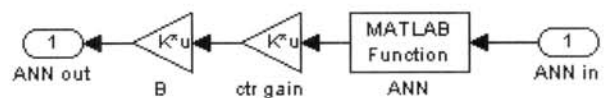


그림 5. 신경망제어기(ANN controller) 블럭

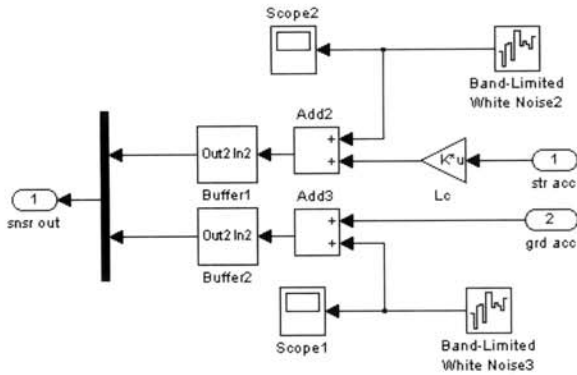


그림 6. 센서(Sensor) 블럭

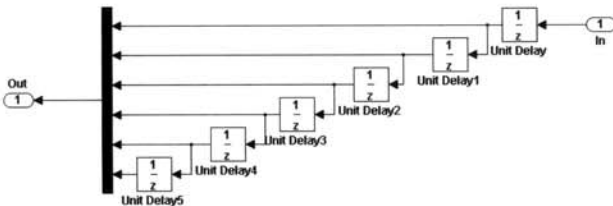


그림 7. 버퍼(buffer) 블럭

4.3 제어기설계

4.3.1 동조질량감쇠기

동조질량감쇠기(TMD)의 구동질량을 구조물 총 질량의 3%로 설정한 후 제어기 강성을 결정하기 위하여 동조질량감쇠기의 고유진동수와 해양구조물의 1차 고유진동수의 비인 동조비를 변화시켜가면서 수동제어 성능을 검토하였다. 그림 8은 동조비의 변화에 따른 최대변위 비를 보여주고 있다. El Centro 지진시에는 동조비가 0.85일 때 제어효과가 가장 우수하였고 Hachinohe 지진시에는 동조비 0.9가 최적이었다. 그러나, Kobe 지진과 Northridge 지진시에는 동조비의 최적값이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 더욱이 Kobe 지진시에는 동조비가 변하더라도 제어성능이 크게 개선되지 않음을 확인하였다. 이상의 결과에서 두 개의 지진에서 최적의 제어성능을 보인 동조비의 범위를 0.85~0.9로 결정하고 최종적으로 0.9를 사용하였다. 위의 모든 경우에서 제어기의 감쇠비는 질량비를 μ 라 할 때 Soong 등(1997)이 제안한 다음의 값을 사용하였다.

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (15)$$

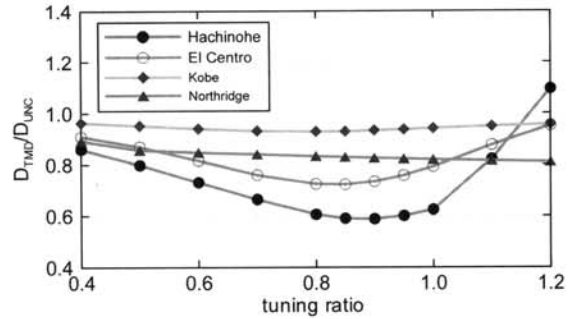


그림 8. 동조비에 따른 TMD 제어성능

4.3.2 능동제어기

능동제어기(AMD)로 사용한 신경망제어기는 그림 6 및 7에서 보는 바와 같이 구조물 최상단의 가속도와 지진가속도를 입력으로 하되 각각 6개의 지연신호를 사용하여 총 12개의 입력노드를 가지며 출력으로는 제어력신호 1개를 가지고 있다. 그림 5의 제어기 이득은 1.0×10^7 을 사용하였으며 식 (10)의 학습률(α)은 0.06, 식 (11)의 가중치 Q 와 R 은 각각 1.0×10^{-9} , 1.0×10^{-25} 을 이용하였다. 신경망제어기의 학습은 Hachinohe 지진을 이용하였으며 학습결과 식 (9)의 첫 항인 가속도응답의 가격(J_a), 두 번째 항인 제어력 가격(J_u) 및 총 가격(J)은 그림 9와 같다. 신경망의 학습 초기에는 제어력을 가하지 않기 때문에 J_u 가 작고 응답을 평가하는 J_a 가 크지만 학습이 진행될수록 적절한 제어력을 출력하면서 J_u 가 커지고 J_a 가 작아지면서 제어의 효과가 나타나고 있다. 총 가격의 합인 J 는 학습진행에 따라 최소화 되고 있으며 총 60회의 반복 학습 후에 신경망 학습이 완료되었다.

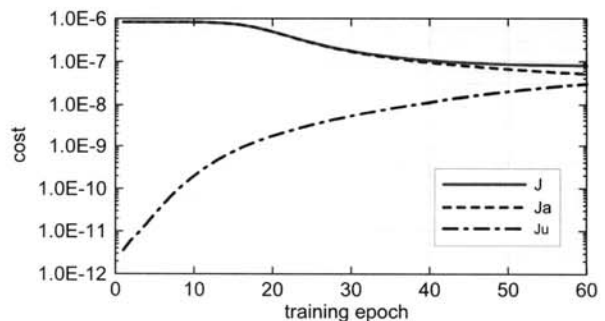


그림 9. 학습을 통한 가격최적화

학습완료 후 해양구조물에 지진 충격하중을 가한 후 얻은 가속도 응답을 통해 하중에 대한 가속도의 전달함수를 그림 10과 같이 얻었다. 비제어시(unc) 0.45Hz 부근에서 첫 번째 고유주파수가 발견되고 수동제어시(TMD)는 피크치가 다소 감소한 것을 볼 수 있다. 능동제어시(AMD)에는 피크치

가 상당히 감소하면서 전체적인 주파수 응답이 하향조정된 것을 볼 수 있다.

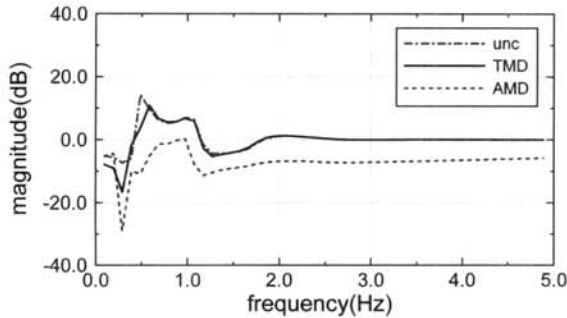


그림 10. 지진에 대한 가속도의 전달함수

4.4 성능검증

Hachinohe지진시 구조물 최상단 변위의 시간이력을 그림 11과 같이 구하였다. 비제어시(unc)에 비하여 수동제어(TMD) 응답이 다소 감소하였으며 능동제어(AMD)의 응답은 급격히 감소하고 있다.

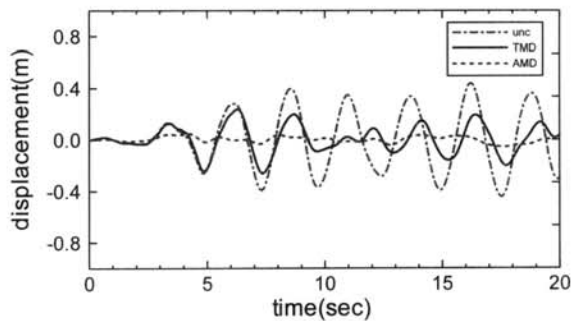


그림 11. Hachinohe 지진시 구조물 최상단 변위

또한 그림 12는 구조물 최상단의 가속도이다. 수동제어(TMD)의 가속도 응답은 초기에 상대적으로 크며 진동이 진행될수록 동조효과로 인해 서서히 감소한다. 반면 능동제어(AMD)의 가속도응답은 지진의 초기부터 제어효과가 크게 관찰되고 있다.

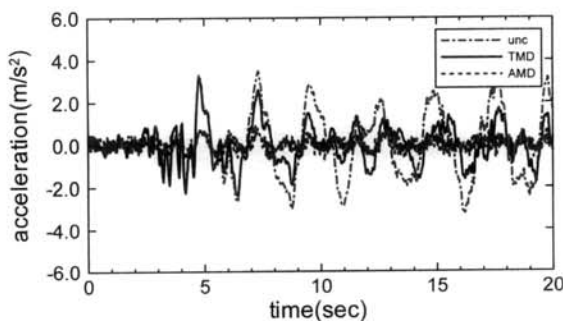


그림 12. Hachinohe 지진시 구조물 최상단 가속도

학습에 사용하지 않은 다른 지진에 대한 제진성능을 파악하기 위하여 3가지 지진을 추가로 해석한 결과 최대변위는 표 2와 같다. 비제어시에 대한 수동제어시의 응답비는 0.588~0.934의 범위를 보였으며 능동제어의 경우 0.114~0.869로 보다 우수한 제진성능을 보였다. 특히 Kobe지진시 수동제어는 성능발휘를 거의 하지 못하였으나 능동제어는 약 13% 변위감소를 유도하였다.

표 2. 제진장치별 최대변위 비교(단위: m)

지진하중	제진방법		
	비제어	수동제어	능동제어
Hachinohe (1965)	0.444 (1.000)	0.261 (0.588)	0.051 (0.114)
Kobe (1997)	0.311 (1.000)	0.290 (0.934)	0.270 (0.869)
El Centro (1940)	0.372 (1.000)	0.273 (0.733)	0.064 (0.171)
Northridge (1994)	0.545 (1.000)	0.451 (0.826)	0.350 (0.642)

그림 9는 동일한 해석에서 구한 가속도 응답이 표준편차를 비교한 결과이다. 변위 비교와 같이 제어전보다 제어 후 가속도가 감소하였으며 수동제어보다는 능동제어가 훨씬 큰 감소효과를 볼 수 있었다.

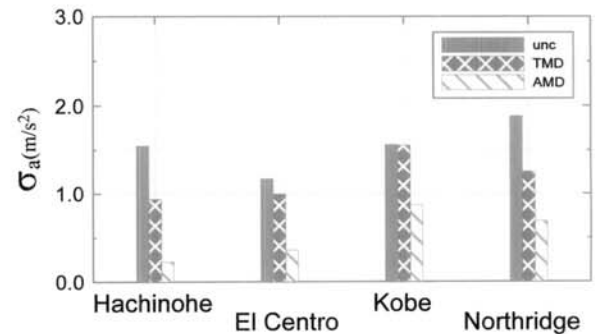


그림 13. 가속도 표준편차 비교

5. 결론

일반적으로 해양구조물은 파랑-구조물 상호작용으로 인해 비선형성을 갖기 때문에 해석의 편리성을 위해 선형화기법을 사용한다. 제어기 설계의 경우에도 비선형 방정식을 선형화한 후 제어기를 설계하는 것이 일반적이다.

그러나, 선형화로 인한 오차가 제어성능의 저하를 가져올 수 있으므로 비선형효과를 고려한 제어기 설계가 요구되며 이러한 경우 기존의 선형제어 방법이 아닌 인공지능경망과 같은 비선형

제어기의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 해양구조물의 비선형 특성을 고려하면서 제어기 설계가 가능한 인공신경망 제어기법을 개발하였으며 수치해석을 통해 해저지진에 의한 진동제어 효과를 확인할 수 있었다. 특히, 선형화 과정을 통해 설계된 수동제어기는 제어효과가 크지 않은 반면 신경망을 이용한 능동제어기의 제진효과는 매우 우수하였다. 본 연구에서 개발한 해양구조물의 인공신경망 제어기법을 해상의 다양한 구조물에 적용한다면 해저지진에 의한 구조물의 안정성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 군산대학교 해양개발연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Chakrabarti, S.K.(1987) *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Springer-Verlag, Germany.
 Duncan, P.E., and Drake, K.R.(1995) A Note on the Simulation and Analysis of Irregular Non-linear waves, *Applied Ocean Research*, Vol. 17, pp.1-8.
 Kim, D.H.(2000) Vibration Control of Structures using Neural Networks, *Ph.D. Dissertation*, KAIST.
 Li, H.J., Hu, S.J., and Takayama, T.(1999) The Optimal Design of TMD for Offshore Structures, *China Ocean Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 133-144.

Li, H.J., Hu, S.J., and Takayama, T.(2001) Optimal Active Control of Wave-induced Vibration for Offshore Platforms, *China Ocean Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp.1-14.
 Li, H.J., Jiang, J.T., Cao, H.S., Ji, C.Y., and Takayama, T.(2000) Optimal Design of TMD under Long-term Nonstationary Wave Loading, *China Ocean Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 25-32.
 Li, H.J., Wang, S.Q., and Ji, C.Y.(2002) Semi-active Control of Wave-induced Vibration for Offshore Platforms by Use of MR Damper, *China Ocean Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp.33-44.
 Malhotra, A.K., and Penzien, J.(1970) Response of Offshore Structures to Random Wave Forces, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 96, No. ST10, pp.2155-2173.
 Penzien, J., Kaul, M.K., and Berge, B.(1972) Stochastic Response of Offshore Towers to Random Sea Waves and Strong Motion Earthquake, *Computers & Structures*, Vol. 2, pp.733-756.
 Soong, T.T., and Dargush, G.F.(1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, New York.
 Terro, M.J., Mahmoud, M.S., and Abdel-Rohman, M. (1999) Multi-loop Feedback Control of Offshore Steel Jacket Platforms, *Computers & Structures*, Vol. 70, pp.185-202.

(접수일자 : 2008. 9. 7 / 심사일 2008. 9. 19 /
 게재확정일 2009. 3. 26)