

제진장치 설치 해양구조물의 생애주기 지진위험도

김동현*

*군산대학교 해양건설공학과

Lifetime Seismic Risk of Offshore Structures with a Built-in Vibration Control Device

Dong-Hyawn Kim*

*Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

KEY WORDS: Control device 제진장치, seismic risk 지진위험도, fragility 취약도, vibration control 진동제어, performance evaluation 성능평가, neuro-control 신경망제어

ABSTRACT: The analysis of the seismic risk of an offshore structure with a control device is presented. First, a probability density function was developed to represent seismic hazard, and seismic fragility under artificial earthquake conditions was determined. Fragility curves for an offshore structure with both passive and active control devices were determined. Displacement criteria were set to evaluate the performance of the structure. Based on numerical analysis, the seismic risk to the structure was considerably reduced when the structure had a seismic control device. The seismic risk to the actively controlled structure was decreased by 80% compared to the uncontrolled case. Reasonable performance evaluations of offshore structure with control devices can be conducted through risk analysis.

1. 서 론

지진에 의한 구조물의 성능저하 및 붕괴방지를 위해 수동제진장치, 능동제진장치 등을 설치하고 있다. 제진장치 설치여부에 대한 판단이나 어떤 제진장치를 설치할 것인지를 평가하기 위해서는 동적해석으로부터 구한 구조물의 응답이 얼마나 감소하는지를 해석한다. 그러나 구조물의 변위 또는 응답이 몇 퍼센트 감소하는지를 평가하는 것은 매우 일방적이고 단편적인 평가가 될 수 있다. 그 이유는 우선, 구조해석에 사용하는 수학적 모델은 구조물의 설계 당시 사용한 공칭값을 이용하여 구하는데 이것은 실제 구조물의 상황을 정확하게 묘사하는데 한계가 있다. 구조물에 추가되거나 감소하는 각종 질량과 시공방법에 따라 접합부 등에서 발생하는 강성의 변화는 수학적 모델과는 전혀 다른 동적 거동을 유발할 수 있다. 특히 인간이 거주하는 구조물의 경우는 질량의 변동폭이 시간에 따라 매우 다르게 나타난다. 따라서, 단지 수학적 모델로부터 얻은 구조물의 응답 감소폭은 실제 지진이 발생했을 때 그대로 재현되지 않을 수도 있다. 또 다른 이유로 구조물이 시공되는 지역의 지진발생 확률을 고려하지 않고 단지 몇 개의 인공지진을 사용한 구조물의 성능평가는 단편적일 수 밖에 없다. 구조물을 사용하는 생애주기 동안 어떠한 크기의 지진이 얼마나 자주 발생하는지를 고려할 때 합리적인 성능평가가 가능하다.

구조물의 성능평가를 위한 방법으로 취약도 해석에 관한 다

양한 연구가 발표된 바 있다(Karim and Yamazaki, 2003; Park et al., 2009; Shinozuka et al., 2000; 김상훈 등, 2004; 이진학 등, 2004). 수동제진장치가 설치된 구조물에 대한 취약도 평가를 수행한 연구도 보고되고 있다(김동석 등, 2006). 그러나, 능동제진장치를 가진 구조물에 대한 성능평가를 위해 취약도 및 위험도 평가를 수행한 연구는 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 기존의 제진장치 설치구조물에 대한 성능평가의 한계를 극복하고자 제진장치가 설치된(Built-in) 구조물의 지진위험도 평가기법을 개발하였다. 지진재해위험과 구조물의 지진취약성을 동시에 고려한 생애주기 동안의 지진위험도를 평가하므로써 위험감소의 정도를 정량적으로 평가할 수 있다. 따라서, 제진장치의 도입여부는 물론 어떤 종류의 제진장치를 도입할 것인지를 결정하기 위한 도구로서의 활용가능성을 제시하고자 한다.

2. 진동제어 이론

2.1 구조물의 운동방정식

진동제어 대상구조물로 해양구조물을 선정하였다. 해양구조물의 운동은 유체입자의 운동과 지진에 의한 지반운동을 모두 고려하면 식 (1)과 같다(Malhotra and Penzien, 1970; Chakrabarti, 1987).

$$M\ddot{Z}_t + C\dot{Z}_t + KZ = \rho(k_m - 1) V(\ddot{X} - \ddot{Z}_t)$$

$$+ \rho V \ddot{X} + \rho k_d A (\dot{X} - \dot{Z}_i) \cdot |\dot{X} - \dot{Z}_i| \quad (1)$$

여기서, M , C , K 는 구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬을 나타내며 Z_i , 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 간단히 표현하면 다음과 같다.

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

여기서,

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

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

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

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

여기서 M_d , C_m , C_d 는 각각 해수에 의한 부가질량, 관성감쇠, 유체감쇠 행렬이다. 위 식에서 구조물의 진동에 의한 해수의 운동을 무시하면 과량 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 $Z_i = Z + \{1\}z_g$ 이므로 위 식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

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

여기서,

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

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

2.2 제어를 고려한 운동방정식(Kim, 2009)

고층건물이나 교량 또는 관제탑 등과 같이 장대구조물의 과도한 진동을 억제하고자 구조물에 제진장치를 설치한다. 여기에는 대표적으로 수동제진장치(Tuned mass damper, TMD)와 능동제진장치(Active mass damper, AMD) 그리고 반능동제진장치가 있다. 그 중 수동제진장치는 질량, 감쇠 및 강성으로 구성된 2차 시스템(또는 부구조물)을 구조물의 고유진동수에 동조시키므로써 주구조물의 진동을 흡수하는 기능을 갖고 있다. 능동제진장치는 부착된 질량을 능동적으로 구동시켜 구조물에 제진력을 가하는 장치이다. 이러한 제진장치들은 구조물의 과도한 진동으로 인해 안정성에 문제가 될 때 이를 해결하기 위해 사용하기도 하지만 상시에 발생하는 미소진동으로 인한 피로수명 단축을 방지하기 위해 사용하기도 한다. 해양구조물 또한 지진이 발생할 경우 과도한 진동이나 손상의 방지를 위해서 제진장치를 사용할 수 있다.

제진장치의 질량, 감쇠, 및 강성이 각각 m , c , k 라 하면 해양구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_0 \ddot{Z} + \dot{C}Z + KZ = F + H \ddot{z}_g + Lf_c \quad (4)$$

여기서, L 은 제진장치의 설치 위치를 나타내는 벡터이며 f_c 는

제진장치에 의해 발생하는 반작용력으로 다음과 같이 표현된다.

$$f_c = c(\dot{z}_c - L^T \dot{Z}) + k(z_c - L^T Z) + u \quad (5)$$

여기서, z_c 는 제진장치의 변위를 의미하고 u 는 능동제진장치를 사용할 때의 제어력이다. 한편, 제진장치의 운동은 다음과 같이 표현된다.

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

식 (4)~(6)을 하나의 식으로 표현하면 식 (7a)~(7h)와 같다.

$$\hat{M} \ddot{\hat{Z}} + \hat{C} \dot{\hat{Z}} + \hat{K} \hat{Z} = \hat{F} + \hat{H} \ddot{z}_g + Bu \quad (7a)$$

여기서,

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} M_0 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad (7b)$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} C + cLL^T & -cL \\ -cL^T & c \end{bmatrix} \quad (7c)$$

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} K + kLL^T & -kL \\ -kL^T & k \end{bmatrix} \quad (7d)$$

$$\hat{Z} = \begin{Bmatrix} Z \\ z_c \end{Bmatrix}; \hat{F} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7e, f)$$

$$\hat{H} = \begin{Bmatrix} H \\ -m \end{Bmatrix}; B = \begin{Bmatrix} L \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (7g, h)$$

2.3 제어기 설계

주구조물의 첫 번째 고유진동수와 제진장치(TMD 및 AMD)의 고유진동수를 동조시키므로써 제진장치 질량을 설계한다. 제진장치의 고유진동수는 질량, 감쇠, 및 강성을 조절하므로써 조정하는데 보통 구조물의 총 질량과 제진장치의 질량비를 μ 라 정의하며 3~5% 범위에서 사용한다. 구조물 진동수와 제진장치의 진동수 비를 동조비(α)라하며 Soong and Dargush(1997)은 최적의 동조비와 최적의 감쇠비를 식 (8) 및 식 (9)로 각각 제안한 바 있다. 제진장치의 질량을 해양구조물 전체 질량의 3%로 결정한 후 식 (8)을 이용하여 제진장치의 강성을 구하고 (9)를 이용하여 제진장치의 감쇠비를 결정하였다.

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (8)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \quad (9)$$

2.4 신경망제어기

능동제진장치를 사용할 경우 제어신호의 생성은 신경망을 이용하였다(Kim, 2000). 신경망제어기는 Fig. 1과 같이 입력층, 은닉층, 출력층 등 모두 3개의 층으로 구성되어 있다. 각층의 노드를 잇는 신경망가중치(Neural network weight)는 모두 초기화 되어 있다.

학습되지 않은 신경망을 이용하여 제진성능을 갖는 제어기로 학습하기 위해서 식 (10)과 같은 가격함수(Cost function)를 정

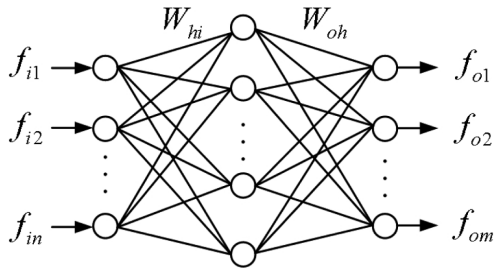


Fig. 1 Neural network structure

의하고 이를 최소화하는 방향으로 신경망을 학습시킨다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_s} (y_k^T Q y_k + u_k^T R u_k) \quad (10)$$

여기서, Q , R 은 진동에너지와 제어에너지에 대한 가중치행렬이고 y_k , u_k 는 k 번째 해석 단계의 구조물의 응답과 제어력이다. 가역함수를 최소화하기 위해서 Gradient descent rule을 적용하면 은닉층(침자 h)-출력층(침자 o)을 잇는 신경망가중치의 학습 법칙은 다음과 같다.

$$W_{oh} = -\alpha \delta_o f_h^T \quad (11)$$

$$\delta_o = [\text{diag}(f_o')] \left\{ y_k^T Q \left[\frac{\partial y_k}{\partial u_k} \right] + u_k^T R \right\} \quad (12)$$

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

$$W_{hi} = -\alpha \delta_h f_i^T \quad (13)$$

$$\delta_h = [\text{diag}(f_h')] W_{oh}^T \delta_o \quad (14)$$

여기서, f_i 는 신경망의 입력값을 나타낸다. 식 (15)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.

$$\left[\frac{\partial y_k}{\partial u_k} \right] = (e^{AT_s} - I) A^{-1} B \quad (15)$$

3. 위험도해석 이론

3.1 지진재해도

구조물의 지진위험도를 평가하기 위한 첫 번째 단계는 해당 지역에서 얼마나 큰 지진이 얼마나 자주 발생하는 가에 대한 정보이다. 즉, 특정지역에서 지진이 발생할 확률적 분포를 지진 크기에 따라 정량적으로 추정할 량이다. 지진의 크기는 최대지반가속도(PGA, Peak ground acceleration)를 이용한다. 지진재해도 추정을 위해 1회 발생하는 지진의 PGA를 확률변수 A_1 이라 하고, 이 값의 년 최대값을 확률변수 A 로 정의하면 각각

Poisson process와 극치분포를 따르므로 년최대 지진가속도의 누적확률분포를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_A(a) = e^{-\lambda_E [1 - F_{A_1}(a)]} \quad (16)$$

여기서, λ_E 는 년평균 지진발생회수를, a 는 지진가속도 크기를 각각 의미한다. 구조물에 손상을 주는 최소 지진가속도가 a_0 라면 A_1 의 누적확률분포함수를 이용하면 다음과 같다.

$$F_{A_1}(a_0) = 0 \quad (17)$$

위 두식을 이용하면 지진의 년평균 발생회수는 다음과 같다.

$$\lambda_E = -\ln[F_A(a_0)] \quad (18)$$

지진재해도를 확률밀도함수로 나타내기 년최대 지진가속도의 극치분포를 Type II분포로 가정하면 다음과 같다.

$$F_A(a) = \exp\left\{-\left(\frac{a}{u}\right)^{-\alpha}\right\} \quad (19)$$

여기서, a 와 u 는 해당지역의 재현주기별 최대지반가속도를 이용하여 추정할 수 있다. 식 (19)를 식 (18)에 대입하면 년평균 발생회수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_E = \left(\frac{a_0}{u}\right)^{-\alpha} \quad (20)$$

한편, 식 (19)와 (20)을 식 (16)에 대입하면 최종적으로 1회 발생지진의 PGA가 가지는 누적분포는 다음과 같다.

$$F_{A_1}(a) = 1 - \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha} \quad (21)$$

위에 상응하는 확률밀도함수는 누적분포함수를 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_{A_1}(a) = \left(\frac{\alpha}{a_0}\right) \left(\frac{a}{a_0}\right)^{-\alpha-1} \quad (22)$$

3.2 지진취약도

지진이 발생했을 때 그 지진의 크기에 따라 구조물이 얼마나 취약한지를 나타내는 곡선이 취약도 곡선이다. 취약도는 성능 또는 손상단계 k 에 대하여 다음과 같은 대수정규분포함수로 나타낸다.

$$F_k(a) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{a}{c_k}\right)}{\zeta_k}\right) \quad (23)$$

여기서, Φ 는 표준정규분포의 누적확률분포함수이며 a 는 지진가속도, c_k , ζ_k 는 각각 중간값과 대수표준편차로서 최우도법을 이용하여 구한다. 취약도함수를 추정하는 방법으로는 손상여부에 대한 정보만을 이용할 경우 우도함수를 이용하며 만일 특정 지진크기와 손상에 대한 파괴확률 정보를 이용한다면 식 (23)을 회귀분석하여 구할 수 있다.

3.3 지진위험도

지진위험도는 특정 지역에서 발생하는 지진에 대하여 특정 구조물이 가지는 위험도를 평가하는 것이다. 특정 지역의 지진 발생확률인 지진재해도와 특정구조물의 지진에 대한 취약도를 고려하면 사용기간에 따른 지진위험도를 산정할 수 있다. 1회 발생지진에 의한 지진위험도는 취약도 곡선 $F_k(a)$ 를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$P_f = \int_{a_0}^{a_{max}} F_k(a) \cdot f_{A1}(a) da \quad (24)$$

N년 사용동안의 종합 지진위험도는 총 확률에서 지진에 의해 한번도 파손되지 않을 모든 확률을 빼므로서 구할 수 있으므로 다음과 같다.

$$P_f^T = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda_E T)^n}{n!} \exp[-\lambda_E T] (1 - P_f^c)^n \quad (25)$$

위 식에서 지수함수의 무한급수 성질을 이용하면 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$P_f^T = 1 - \exp[-\lambda_E T P_f^c] \quad (26)$$

4. 수치해석

4.1 지진재해도

항만 및 어항설계기준(해양수산부, 2005)에는 Fig. 2와 같이 우리나라 전역에 대한 평균재현주기별 설계지반운동이 제시되어 있다. 이것은 지역별로 과거의 지진기록을 통계분석하여 재

Table 1 PGA and return period of Mokpo area

Mean return period (yrs)	Excess propbability/period	PGA (g)
50	10%/5	0.020
100	10%/10	0.025
200	10%/20	0.040
500	10%/50	0.060
1000	10%/100	0.080
2400	10%/250	0.110
4800	10%/500	0.140

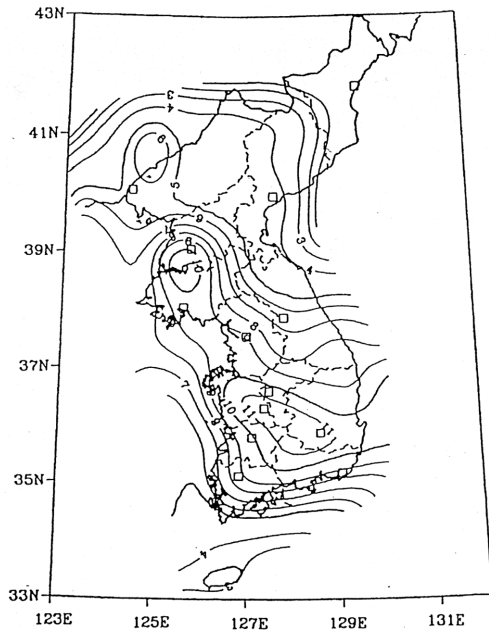
Table 2 Parameters of distribution

	Value	Description
α	2.267	Extreme distribution
u	3.606×10^{-3}	
λ_E	4.766×10^{-1}	Mean annual occurrence

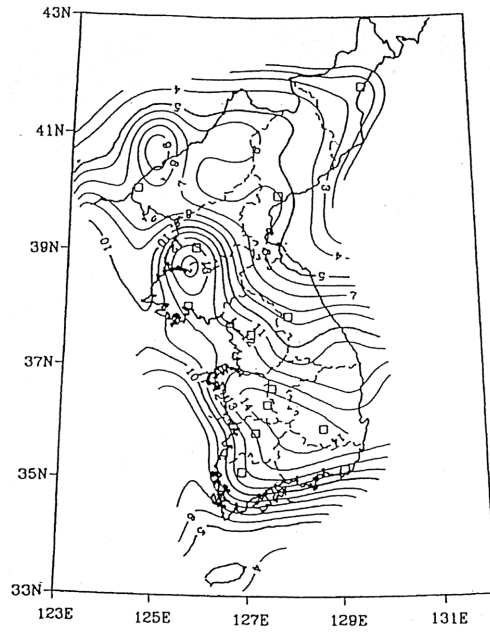
현주기에 따른 설계지반운동을 PGA값으로 표준화한 것이다. 만일 구조물이 목포 인근 해역에 설치되었다면 지진재해도로부터 Table 1과 같은 재현주기별 PGA를 추출할 수 있다.

평균재현주기 별로 제시된 PGA를 회귀분석하면 극치분포함수에 사용되는 계수를 구할 수 있으며 구조물에 손상을 유발하는 최소지진 가속도(a_0)를 0.005로 설정하면 Table 2와 같은 계수를 얻을 수 있다.

Fig. 3은 지진재해도에 나타난 PGA에 따른 초과확률과 회귀 분석으로 구한 둘 사이의 관계를 보여주고 있다.



(a) Return period of 500yrs



(b) Return period of 1000yrs

Fig. 2 Peak ground acceleration according to return period

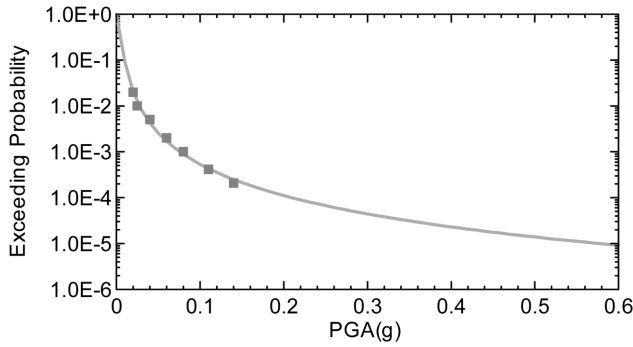


Fig. 3 Exceedance probability of PGA

4.2 지진취약도

구조물의 지진해석에 사용한 인공지진은 설계스펙트럼으로부터 생성한 Fig. 4와 같은 시간이력이다(해양수산부, 2005). PGA는 0.08(g)이며 다양한 지진크기에 대한 구조물의 응답을 얻기 위해 가속도에 계수를 곱하므로써 서로 다른 크기의 지진가속도를 만들어 해석에 사용하였다.

Fig. 5는 수치해석에 사용한 해양구조물이다. 7층으로 이루어진 고정식 해양구조물로서 제진을 위해 최상단에 제어신호에 따라 질량을 구동하므로써 제진효과를 얻는 능동 제진장치를

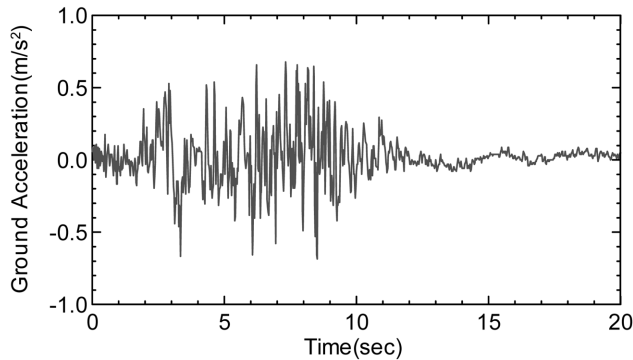


Fig. 4 Time history of artificial ground acceleration

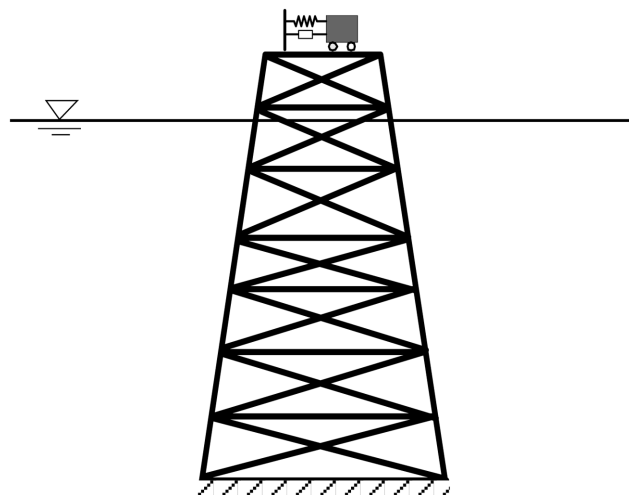


Fig. 5 Offshore structure with control device

Table 3 Natural period

No	1	2	3	4	5
Period (sec)	1.59	0.73	0.37	0.24	0.17

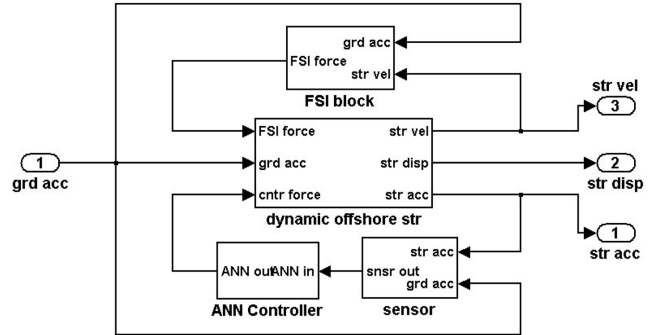


Fig. 6 Block diagram for structural control

설치하였다. 만일 특별한 제어신호를 가하지 않는다면 수동제진장치로서의 역할을 수행할 수 있다. 해양구조물의 고유주기는 운동방정식을 선형화하여 얻을 수 있으며 제진장치가 없을 때 Table 3과 같다.

Fig. 6은 능동제어를 수행할 경우의 제어블록선도이다. 신경망 제어기를 사용하여 제어신호를 만들며 계측기 신호는 신경망 입력을 만들게 된다. 신경망제어기는 인공지진에 의한 해양구조물의 거동을 이용하여 학습시킬 수 있다. 학습시에는 계측기 잡음(Noise power = 0.005)을 포함하였으며 잡음이 포함된 계측신호의 변화는 Fig. 7과 같다. Fig. 8은 신경망 제어기를 학습시키는 과정에서 진동에너지와 제어에너지의 합으로 표현되는 가격함수가 최소화되는 과정을 보여주고 있다.

Fig. 9는 PGA 0.3g인 인공지진에 의한 구조물 최상단의 변위를 보여주고 있다. 비제어(UNC)시 변위응답이 0.303m(7.76초)

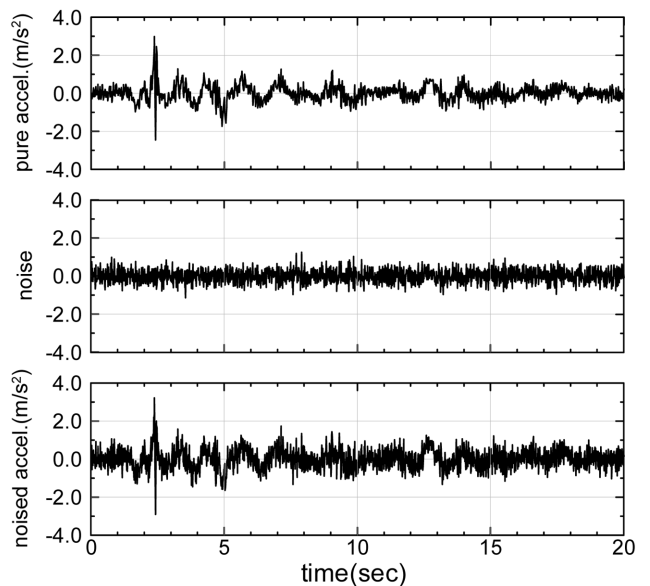


Fig. 7 Measured acceleration contaminated by noise

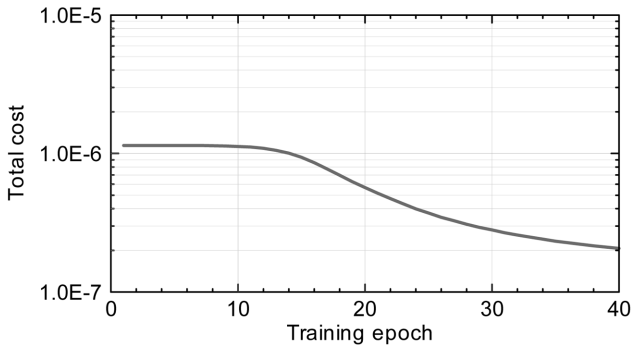


Fig. 8 Convergence of cost function during training

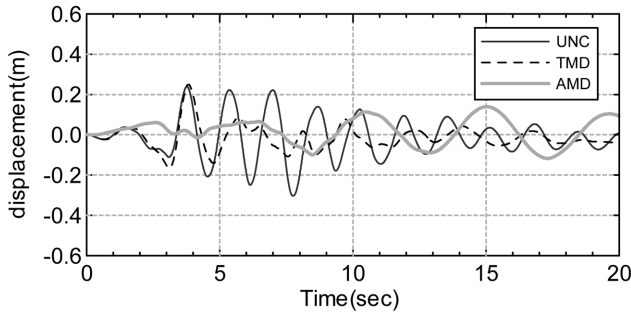


Fig. 9 Displacement under ground acceleration of PGA = 0.3 g

로 가장 크며 수동제어(TMD)시는 변위가 0.141m(4.77초)로 53.5% 감소하였다. 또한 능동제어(AMD)시에는 0.139m(15.03초)로 54.2% 감소하였다. 그러나 이것은 구조물의 질량, 강성 등의 변수가 상수로 가정하여 얻은 결과이며 실제로 구조물은 설계에서 사용한 공칭값과는 다른 확률적 변동성을 보여준다. 따라서 구조물의 변위는 같은 지진입력에 대해서도 서로 다르게 나타난다. Fig. 10은 질량과 강성의 변동계수를 0.05로 가정한 경우 PGA가 0.3g인 인공지진이 가해진 해양구조물의 최대변위에 대한 빈도분포를 보여주고 있다. 총 1000회의 동적해석을 수행한 결과이며 0.3m 부근에서 가장 큰 빈도를 보이지만 이 보다 작거나 큰 변위를 보여주는 경우가 상당 수 존재한다. 따라서 구조변수의 확률적 변동에 따른 최대변위의 변동성을 고려해야 합리적인 성능 평가가 가능하다.

변위기반 취약성 평가를 위해 다음 식과 같은 한계상태함수를 정의하였다.

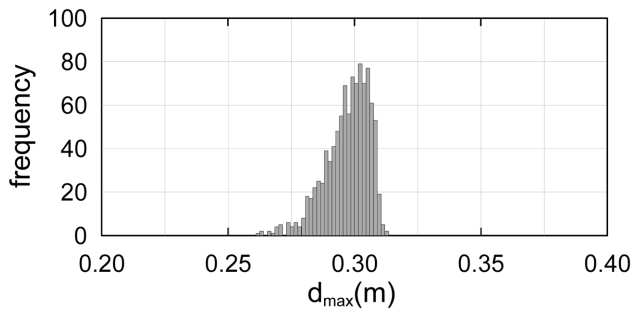


Fig. 10 Distribution of maximum displacement due to PGA 0.3 g

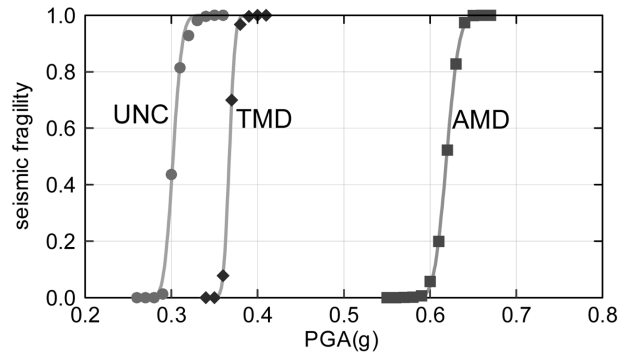


Fig. 11 Fragility curves

Table 4 Median and log-standard deviation

Type	Median	Log standard deviation
UNC	3.0207e-001	2.7623e-002
TMD	3.6727e-001	1.4351e-002
AMD	6.1927e-001	1.8212e-002

$$g(X) = d_{lim} - d_{max} \tag{27}$$

여기서, d_{lim} 은 성능한계 변위이고 d_{max} 는 구조물의 최대변위이다. 본 연구에서는 성능한계를 0.3m로 설정하였다. 따라서 각 한계변위를 초과하는 경우를 성능기준 초과에 의한 파괴상태로 정의하였다.

구조변수의 변동성은 질량과 강성 모두 평균치비(=평균값/공칭값)를 1.0으로, 변동계수(=표준편차/평균치)를 0.05로 가정하였다. 한 가지 크기의 인공지진을 이용하여 1000회 변위응답을 구하였으며 이 중 식 (27)의 성능기준을 초과하는 회수를 이용하여 파괴확률을 산정하였다. 그리고 인공지진의 크기를 변화시켜가면서 파괴확률을 산정하였다. Fig. 11은 PGA에 따른 비제어(UNC), 수동제어(TMD), 및 능동제어(AMD)에 대한 파괴확률을 표시한 취약도 곡선이다. 취약도 곡선의 중간값(ξ_c)과 대수표준편차(ξ)는 Table 4와 같다.

4.3 지진위험도

지진재해도와 지진취약도를 이용하여 구한 사용기간에 따른 지진위험도는 Fig. 12와 같다. 비제어 시에 비하여 수동제어와 능동제어의 경우 위험도가 획기적으로 줄어들고 있음을 알 수 있으며 특히 능동제어의 경우 약 20% 수준으로 위험도가 감소하고 있다. 따라서, 능동제어의 경우 지진에 대비한 위험제어 대책으로 매우 우수한 것으로 평가할 수 있다.

구조물의 지진 대책으로 지금까지 수동제어, 능동제어 방법들이 많이 제시되어 왔다. 그러나 지금까지 많은 경우 단순히 구조물의 변위나 응력을 얼마나 감소시키느냐에 따라 제진장치의 성능을 평가하였다. 이러한 방법은 해당지역의 지진특성이나 제진장치가 설치된 구조물의 취약성을 고려하지 않은 제진장치만의 독립적인 성능평가에 그치기 쉽다. 따라서, 제진장치가 설치된 구조물의 성능을 종합적으로 평가하기 위해서는 해당지역의 지진재해도와 구조물의 지진취약도를 모두 고려한 위험도

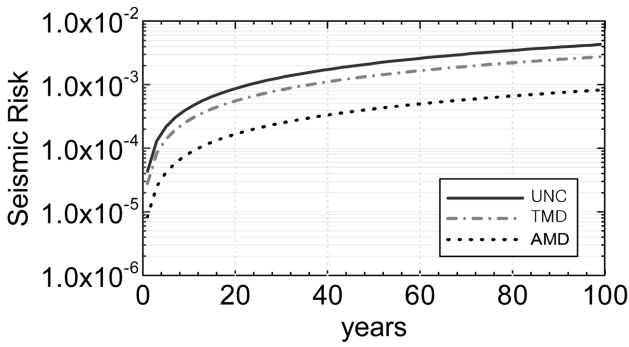


Fig. 12 Seismic risk of offshore structure

기반 성능평가를 수행해야 한다.

5. 결 론

제진장치가 설치된 구조물의 성능평가를 위해 지진위험도 해석기법을 적용하였다. 기존의 제진장치 성능평가는 구조물 시공 위치의 지진특성이나 구조물의 지진에 대한 취약도를 고려하지 않고 단지 제진장치가 설치된 후의 지진에 대한 진동감소 효과가 얼마나 되는지에 대한 평가 방법이 대부분이었다. 이러한 방법은 실제 발생할 수 있는 지진의 특성과 구조물의 지진에 대한 취약성에 대한 고려가 없이 수행되는 것이기 때문에 제진장치에 대한 일방적인 평가가 될 수 밖에 없다. 따라서, 본 연구에서 제안한 지진위험도에 기반한 제진장치의 성능평가 방법은 제진장치 도입 후 전체 시스템에 대한 지진위험도가 얼마나 감소되는지를 이해할 수 있는 합리적인 성능평가 방법이라 할 수 있다.

후 기

본 연구는 군산대학교 해양개발연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김동석, 최현석, 박원석, 고현무 (2006). "에너지 소산장치를 장

착한 사장교의 지진취약도 해석", 한국지진공학회논문집, 제10권, 제3호, pp 1-11.

김상훈, 이진학, 김호경 (2004). "교량의 지진취약도 해석 시 사용되는 성능 스펙트럼 기법의 평가", 지진공학회 논문집, 제8권, 제1호, pp 67-76.

이진학, 윤진영, 윤정방 (2004). "지진취약도 분석을 통한 교량의 지진위험도 평가", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제6호, pp 31-43.

해양수산부 (2005). 항만 및 어항설계기준.

Chakrabarti, S.K. (1987). Hydrodynamics of Offshore Structures, Springer-Verlag, Germany.

Karim, K.R. and Yamazaki, F. (2003). "A Simplified Method of Constructing Fragility Curves for Highway Bridges", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 32, pp 1603-1626.

Kim, D.H. (2000). Vibration Control of Structures using Neural Networks, Ph.D. Dissertation, KAIST.

Kim, D.H. (2009). "Neuro-control of Fixed Offshore Structure under Earthquake", Engineering Structures, Vol 31, No 2, pp 517-522.

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.

Park, J., Tawashiraporn, P., Craig, J.I. and Goodno, B.J. (2009). "Seismic Fragility Analysis of Low-rise Unreinforced Masonry Structures", Engineering Structures, Vol 31, pp 125-137.

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J. and Naganuma, T. (2000). "Statistical Analysis of Fragility Curves", Journal of Engineering Mechanics, Vol 126, No 12, pp 1224-1231.

Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997). Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons, New York.

2010년 4월 6일 원고 접수
 2010년 10월 6일 심사 완료
 2010년 10월 6일 게재 확정