동조질량감쇠기를 이용한 해양구조물의 진동제어

Vibration Control of Offshore Platform using Tuned Mass Damper

김 주 명[1] · 이 규 원[2]
Kim, Ju Myung *Lee, Gyu Won*

요 약 : 파랑에 의해 발생하는 해양구조물의 진동을 억제하기 위해 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)를 적용하여 그 효과를 분석하였다. 해양구조물의 운동방정식에 포함된 파랑-구조물 상호작용에 의한 비선형성을 선형화한 경우의 오차와 TMD설계시 선형방정식을 사용한 경우 발생할 수 있는 현상을 분석하였다. TMD설치 전후의 제진효과 분석에서는 주기를 달리한 규칙파에 의한 성능과, 유의파가 서로다른 불규칙파에 의한 성능을 동시에 분석하였다. 규칙파에 의한 해석결과 입사파의 주기가 구조물의 첫 번째 고유주기와 근접한 경우 제진효과가 뛰어났으며 주기가 더 짧거나 더 긴 경우는 제진효과가 감소하였다. 불규칙파에 의한 해석결과는 유의파가 상대적으로 작아 구조물의 고유주기 성분이 많이 포함된 파랑에 대한 제진효과가 뛰어나고, 유의파가 커서 구조물의 고유주기 보다 큰 성분이 많이 포함된 파랑에서는 제진효과를 발견할 수 없었다. 따라서, 해양구조물에 TMD를 적용할 때는 파고가 작은 상시 내습 파랑에 대한 제진효과를 볼 수 있으며 이는 상시 진동제어를 통한 피로수명 확보에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

ABSTRACT : Tuned Mass Damper (TMD) was applied to control the vibration of an offshore structure due to ocean waves. The errors caused by the linearization of the fluid-structure interaction effect and the phenomena when using the linearized equation of motion in TMD design were analyzed. To determine the performance of TMD in controlling vibration, both regular waves with varying periods and irregular waves with different significant wave heights were used. When the offshore structure received regular waves with a period similar to the first natural period of structure, TMD performed well in terms of response reduction. Such was not the case for the other periods, however. In the case of irregular waves, TMD triggered the reduction of structural response for waves with relatively small significant wave height. For irregular waves with relatively big significant wave height, however, TMD did not show any control effect. Therefore, TMD is useful in reducing offshore structural vibration due to ambient waves, thereby helping secure fatigue life.

핵 심 용 어 : 해양구조물, 동조질량감쇠기, 진동제어, 유체구조물 상호작용, 비선형, 모리슨방정식
KEYWORDS : Offshore Structure, TMD, Vibration Control, Fluid-Structure Interaction, Nonlinear, Morison Equation

1. 서 론

해양구조물은 시공 위치에서 발생 가능한 최대의 파고에 대한 안정성을 확보하도록 설계된다. 이것은 최대파고가 발생했을 때 구조물에 미치는 파력이 최대가 되고 구조물은 여기에 대하여 충분한 안전율을 갖도록 하기 위해서이다. 그러나, 최대파고는 대부분 그 발생빈도가 매우 낮으며 실제로 구조물에 가장 많은 시간동안 가해지는 파랑은 오히려 중소규모의 파랑이다. 물론, 총 생애주기 동안에 가장 많이 노출되는 중소규모 파랑은 그 파력이 구조물에 미치는 역학적 영향은 최대파고에 비하여 크다고 할 수 없다. 그러나, 중소규모 파랑에 의한 지속적인 미진동은 강구조물의 국부적 피로현상이나 사용성을 저하시키는 문제를 유발하기도 한다. 따라서, 상시 진동에 대한 적절한 대책을 세우는 것은 구조물의 공용수명 확보와 유지관리 비용의 절감차원에서 적극적으로 고려하여야 한다.

구조물의 진동을 제어하기 위한 방법으로는 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 능동제진기법은 해양구조물과 같이 외부

1) 정회원, 전북대학교 토목공학과 박사과정
(Tel. 051-510-2350, Fax. 051-513-9596, E-mail : kimjm820@moct.go.kr)
2) 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수, 공학박사(lgywon@moak.chonbuk.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

전력공급이 제한된 곳에서는 적용성이 떨어지는 단점이 있고 반능동 제진기법은 수동제진기법에 비하여 크게 개선된 효과를 얻기 어렵다. 반면, 수동제진기법은 외부의 에너지 공급 없이 제진효과를 얻을 수 있으며 동적 안정성(Dynamic Stability)이 확보된 방법으로서 실용성이 매우 뛰어나다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이러한 수동제진장치를 이용하여 해양구조물의 제진효과를 얻고자 하였다.

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. 이 들은 파고의 확률론적 스펙트럼을 이용하여 응답의 분산에 대한 기대치를 최소화 하는 방법을 사용하였다. 그러나, 이러한 연구의 대부분은 구조물의 운동방정식을 모우드공간(modal space)으로 변환하여 1자유도 방정식을 유도하므로써 문제를 단순화하는 방법을 사용하였으며 이 과정에서 비선형 운동방정식을 선형화하여 사용하였다. 이것은 운동방정식을 선형화하므로써 발생하는 오차를 수반할 수 밖에 없고 다자유도 구조물을 일자유도로 해석하였기 때문에 동적거동의 재현에 한계를 가질 수 밖에 없다. 따라서, 다자유도 방정식과 비선형 운동방정식을 그대로 이용한 TMD의 설계 및 제진효과 검증에 대한 연구의 필요성이 제기 되고 있다.

본 연구에서는 해양구조물에 설치된 TMD의 제진효과를 수치적으로 검증하기 위해 유체-구조물 상호작용 효과를 고려한 비선형운동방정식을 이용하였다. 또한, 비선형거동을 선형화하였을 때 나타나는 현상을 분석하여 일반적으로 수행되고 있는 선형화의 문제점을 지적하였다.

2. 해양구조물의 동적해석

2.1 해양구조물의 운동방정식

파랑하중에 노출된 구조물의 동적 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = f \tag{1}$$

여기서, M, C, K는 구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬을 나타내며 z는 구조물의 변위 f는 파랑에 의한 하중을 각각 의미한다. 또한, 미분연산자(·)는 시간에 대한 변화율을 나타낸다. 파랑하중은 구조물의 진동시 상호작용으로 인해 비선형 거동을 하는 것으로 알려지고 있으며 Morison(Chakrabarti, 1987)에 의해 식 (2)와 같이 제안된 바 있다.

$$f = \rho(k_m - 1)V(\ddot{u} - \ddot{z}) + \rho V\ddot{u} + \rho k_d A(\dot{u} - \dot{z})|\dot{u} - \dot{z}| \tag{2}$$

여기서, ρ, k_m, k_d, V, A, u 는 각각 해수중량, 관성계수, 감쇠계수, 부피, 단면 및 해수입자의 변위를 나타낸다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$(M + M_A)\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = f_{eq}^{n} \tag{3a}$$

여기서,

$$f_{eq}^{n} = C_M\ddot{u} + C_D(\dot{u} - \dot{z})|\dot{u} - \dot{z}| \tag{3b}$$

$$M_A = \rho(k_m - 1)V \tag{3c}$$

$$C_M = \rho k_m V \tag{3d}$$

$$C_D = \rho k_d A \tag{3e}$$

파랑에 의한 구조물의 동적운동은 이와 같이 비선형 특성을 띈다. 그러나, 설계목적으로 이를 선형화하여 해석하는 경우 구조물의 동적운동에 대한 통계적 특성을 이용하여 식 (4)의 관계를 적용할 수 있다(Penzien 등, 1972).

$$|\dot{u} - \dot{z}| \cong \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sigma_{\dot{r}\dot{r}} \tag{4}$$

여기서, $\sigma_{\dot{r}\dot{r}}$은 상대속도($\dot{u} - \dot{z}$)의 표준편차를 나타낸다.

식 (4)의 선형화 방법을 식(3)에 적용하면 식 (5a)~(5b)와 같은 선형화된 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$(M + M_A)\ddot{z} + (C + C_A)\dot{z} + Kz = f_{eq}^{l} \tag{5a}$$

여기서,

$$f_{eq}^{l} = C_M\ddot{u} + C_A\dot{u} \tag{5b}$$

$$C_A = \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sigma_{\dot{r}\dot{r}}C_D \tag{5c}$$

2.2 파랑하중 모델

앞에서 유도한 선형운동방정식 (3)과 비선형운동방정식 (5)를 해석하기 위해서는 해수입자의 속도와 가속도를 이용해야 한다. 그러나, 실무적인 관점에서 이보다는 파고 및 주기를 이용하는 것이 훨씬 편리하다. 이를 위해서 최대파고 H인 규칙파의 위치 x, 시간 t에서의 파고를 식 (6)과 같이 정의한다.

$$\eta(x,t)=\frac{H}{2}\cos(\kappa x-wt) \tag{6}$$

여기서, κ와 w는 각각 파수 및 파랑의 각속도를 나타낸다. 식 (6)과 선형파랑이론(linear wave theory)을 이용하여 해수입자의 속도 및 가속도를 구하면 식 (7a)~(7b)와 같다.

$$\dot{u}=\frac{\pi H}{T}\frac{\cosh\kappa(y+d)}{\sinh\kappa d}\cos(\kappa x-wt) \tag{7a}$$

$$\ddot{u}=\frac{2\pi^2 H}{T^2}\frac{\cosh\kappa(y+d)}{\sinh\kappa d}\sin(\kappa x-wt) \tag{7b}$$

여기서, T와 d는 각각 파의 주기와 수심을, y는 수면으로부터의 높이를 나타낸다. 식 (7)을 이용하여 특정주기 및 파고를 가진 규칙파에 대한 구조물의 운동을 수치적으로 해석할 수 있다.

해양구조물의 특성을 평가하기 위해서 식 (7)과 같은 규칙파랑 이외에도 불규칙 파랑을 사용한다. 불규칙 파랑은 파고의 스펙트럼형태로 주어지며 대표적인 것이 식 (8)의 Pierson -Moscowitz 스펙트럼이다(Chakrabarti, 1987).

$$S(w)=\frac{\alpha g^2}{w^5}e^{-\beta\left(\frac{w_0}{w}\right)^4} \tag{8a}$$

여기서,

$$w_0=\sqrt{\frac{0.161g}{H_s}} \tag{8b}$$

여기서, H_s는 유의파고, g는 중력가속도를 의미하며 α와 β는 상수로서 각각 0.0081과 1.25를 사용한다.

3. 동조질량감쇠기

3.1 TMD를 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 설계파고에 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_t, c_t, k_t라 하면 해양구조물과 TMD의 운동방정식은 다음과 같다.

$$(M+M_A)\ddot{z}+C\dot{z}+Kz=f_{eq}^n+f_t\boldsymbol{p} \tag{9a}$$

$$m_t\ddot{z}_t=-f_t \tag{9b}$$

여기서, $\boldsymbol{p}$는 TMD의 설치 위치를 나타내는 벡터이며 f_t는 TMD에 의해 발생하는 반작용력으로서 다음과 같다.

$$f_t=c_t(\dot{z}_t-\boldsymbol{p}'\dot{z})+k_t(z_t-\boldsymbol{p}'z) \tag{10}$$

여기서, $\boldsymbol{p}'$은 벡터 $\boldsymbol{p}$의 transpose를 나타낸다. 식 (9a), (9b) 및 (10)을 하나의 식으로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$\mathcal{M}\ddot{Z}+\mathcal{C}\dot{Z}+\mathcal{K}Z=F \tag{11a}$$

여기서,

$$\mathcal{M}=\begin{bmatrix}M+M_A & 0\\ 0 & m_t\end{bmatrix} \tag{11b}$$

$$\mathcal{C}=\begin{bmatrix}C+c_t\boldsymbol{p}\boldsymbol{p}' & -c_t\boldsymbol{p}\\ -c_t\boldsymbol{p}' & c_t\end{bmatrix} \tag{11c}$$

$$\mathcal{K}=\begin{bmatrix}K+k_t\boldsymbol{p}\boldsymbol{p}' & -k_t\boldsymbol{p}\\ -k_t\boldsymbol{p}' & k_t\end{bmatrix} \tag{11d}$$

$$Z=\{z\ \dot{z}_t\}' \tag{11e}$$

$$F=\{f_{eq}^n\ 0\}' \tag{11f}$$

위의 식을 식 (4)를 이용하여 선형화하면 등가감쇠행렬($\mathcal{C}$)과 등가 하중벡터(F)만 바뀌게 되는데 다음과 같이 쉽게 유도할 수 있다.

$$\mathcal{C}=\begin{bmatrix} C+C_A+c_t\beta\beta' & -c_t\beta \\ -c_t\beta' & c_t \end{bmatrix} \tag{12a}$$

$$F=\{f_{eq}^l\ 0\}' \tag{12b}$$

3.2 TMD의 설계

주구조물의 첫 번째 고유진동수와 TMD의 고유진동수를 동조시키므로써 TMD를 설계한다. TMD의 고유진동수는 질량, 감쇠, 및 강성을 조절하므로써 조정하는데 보통 구조물의 총질량과 TMD의 질량의 비를 질량비(μ)라 정의하며 3~5%범위에서 사용한다. 구조물 진동수와 TMD진동수의 비를 동조비(α)라하며 Soong 등(1997)은 최적의 동조비와 최적의 감쇠비를 식 (13) 및 식 (14)로 각각 제안한 바 있다.

$$\alpha_{opt}=\frac{1}{1+\mu} \tag{13}$$

$$\zeta_{opt}=\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \tag{14}$$

4. 수치해석

4.1 해석모델

수치해석에 사용된 모델은 그림 1과 같다(Penzien 등, 1972). 구조물이 설치된 수심은 103.63m, 총질량은 약 33.8톤이다. k_m, k_d는 상수로서 가정하였으며 각각 2.0, 0.7을 사용하였다. 이 구조물의 동특성을 파악하기 위하여 고유치해석을 수행하였으며 그 결과는 표 1과 같다.

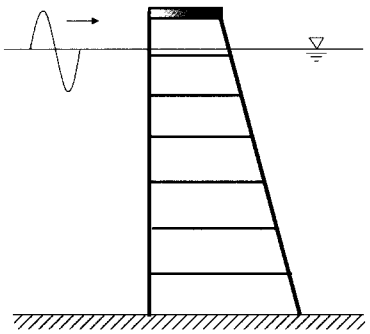

그림 1. 해양구조물 모델

표 1. 구조물의 고유주기(단위 : 초)

번호	1	2	3	4	5	6	7
고유주기	3.29	1.33	0.76	0.56	0.44	0.38	0.33

첫 번째와 두 번째 고유주기가 각각 3.29초와 1.33초이며 세 번째 이후의 고유주기는 모두 1초 이내에 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 파랑이 일반적으로 그 중심주파수가 수초이상인 것을 감안하면 첫 번째 고유주기가 구조물의 진동에 대부분의 영향을 받고 나머지 주기는 파랑에 의한 그 영향이 미미할 것임을 알 수 있다.

4.2 운동방정식의 선형화에 의한 오차

그림 1의 해양구조물 모델에 파고 5m, 주기 3.29초의 규칙파가 가해질 때 비선형 운동방정식인 식 (3)과 이를 선형화한 식 (5)를 이용하여 최상단의 변위를 해석하였다. 이 때 선형화를 위한 부가감쇠의 산정을 위해 식 (4)의 $\sigma_{\cdot rr}$을 반복계산을 통해 구하였다. 반복계산은 식 (15)의 값이 0.001이하로 줄어들 때까지 수행하였다.

$$\text{Enorm}=\frac{|\sigma^c_{\cdot rr}-\sigma^e_{\cdot rr}|}{|\sigma^c_{\cdot rr}|} \tag{15}$$

여기서, 첨자 e는 선형방정식의 해석시 사용한 추정치를 의미하고 c는 해석결과 얻은 응답으로 구한 계산치를 나타낸다. 그림 2가 Enorm의 수렴성을 보여주고 있으며 5번의 반복계산으로 충분한 수렴을 확인할 수 있었다.

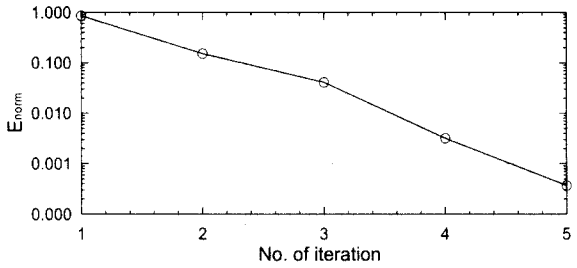

그림 2. 반복계산에 의한 Enorm의 수렴성

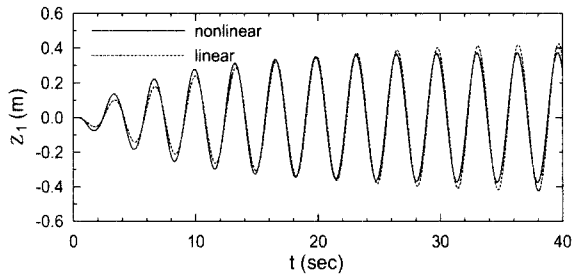

그림 3. 선형 및 비선형 방정식에 의한 응답

반복과정이 끝난 후 최상부 변위를 해석한 결과는 그림 3과 같다. 선형화된 방정식과 비선형방정식의 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 입사파랑의 주기에 따른 선형방정식의 오차를 평가하기 위하여 주기를 달리하며 해석을 수행하여 각 주기별 변위의 최대값만을 그림 4에 나타내었다. 선형화된 운동방정식에 의한 결과는 구조물의 첫 번째 공진주기 이후와 이전에 대하여 다른 양상을 보여주고 있다. 즉, 단주기파에 대하여는 변위 최대값이 작게 나타나고 장주기 파에 대하여는 오히려 변위가 커지는 현상을 보이고 있다. 그래서, 전체적으로는 고유주기 즉, 응답의 최대값이 나타나는 입사파의 주기가 다소 길어지는 효과를 초래하고 있다. 따라서, 해양구조물의 운동방정식을 선형화하여 해석했을 때는 고유특성에 다소 변화가 발생하고 TMD의 설계에도 영향을 미칠 수 있는 것을 알 수 있다.

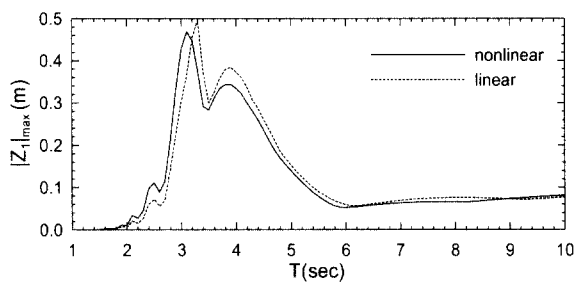

그림 4. 입사파 주기에 따른 응답의 최대값

4.3 규칙파 재하시 TMD효과

TMD의 질량은 일반적으로 구조물 전체질량의 약 1~3%의 무게를 사용하며 감쇠와 강성은 최적의 제진효과를 보일 수 있도록 설계한다. 여기에서는 질량비를 3%로 하여 1,014kg의 질량을 사용하였으며 감쇠비는 0.1045로 설정하였다. 최종적으로 강성을 구하기 위해서 동조계수를 변화시키면서 제진효과를 확인하였다. 그림 5에서 파고 5m, 주기 3.29초의 입사파 내습시 동조비에 따른 응답비를 보여주고 있다. 응답비는 TMD사용전과 후의 최대 응답을 비율로 표시한 값으로 그 값이 작을수록 제진효과가 우수한 것이다. 그림 5에서 비선형방정식을 그대로 이용했을 때의 응답비는 동조비 1.04에서 최소값 42.14%를 가지며 선형방정식에 의해서는 동조비 1.06에서 27.0%를 보여주고 있다. 이와 같은 값들은 식 (13)으로 구한 0.971과는 다소 차이를 보이고 있다. 또한, 여기에서 알 수 있는 것은 선형방정식과 비선형방정식의 최적 동조계수비가 2%차이를 보이고 있다는 점과 선형방정식을 사용할 경우 제진효과를 과대평가할 수 있다는 점이다.

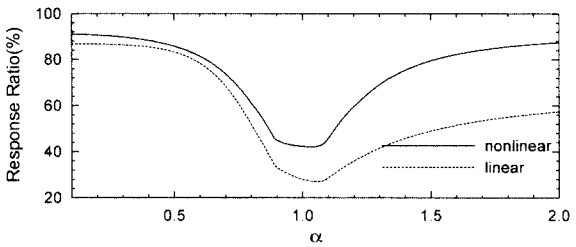

그림 5. 동조비에 따른 TMD효과

여기서 구한 최적동조계수를 이용하여 입사파(파고 5m) 주기에 따른 제진효과를 분석한 결과를 그림 6과 7에서 보여주고 있다. 비선형방정식(그림 6)과 선형방정식(그림 7) 모두 첫 번째 공진주기 근처에서 제진효과가 우수하고 그 이상과 이하의 주기에서는 제진효과가 현저히 줄어듦을 발견할 수 있었다.

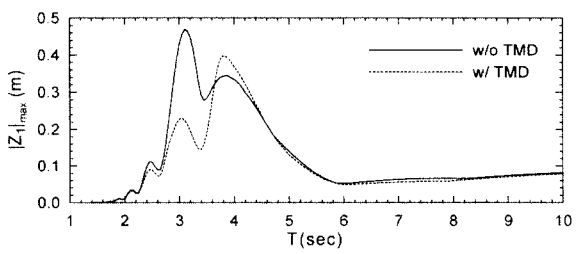

그림 6. 규칙파와 비선형방정식에 의한 TMD효과

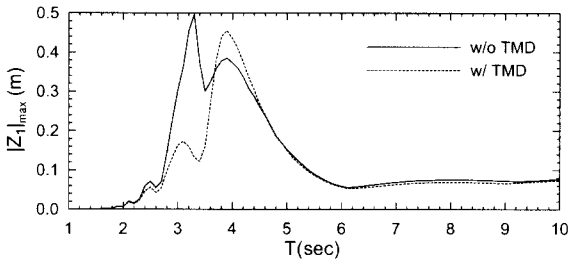

그림 7. 규칙파와 선형방정식에 의한 TMD효과

그림 8은 첫 번째 공진주기(3.29초)를 갖는 파고 5m의 파랑이 입사할 때 구조물 최상부의 변위응답을 비선형 방정식을 통해 해석한 결과를 보여주고 있다. 고유주기와 일치하는 입사파에 대한 제진효과는 우수한 것을 알 수 있다.

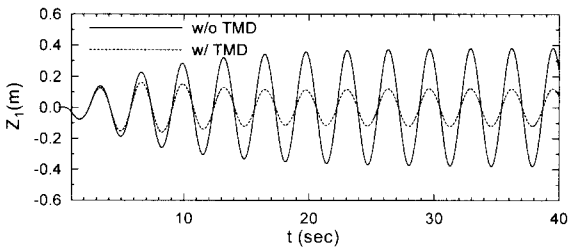

그림 8. TMD 적용 전 · 후의 최상부 변위 시간이력

4.4 불규칙파에 의한 TMD효과

불규칙파에 의한 TMD의 제진효과를 분석하기 위해 식 8의 스펙트럼을 이용하여 파랑을 생성시켰다. 그림 9는 유의파고에 따른 스펙트럼을 보여주고 있다. 유의파고가 클수록 저주파성분이 강하게 나타나고 있는 사실로 볼 때 구조물의 첫 번째 고유주기 성분을 많이 포함한 파랑은 유의파고가 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 고유주기가 3.29초에 해당하는 각진동수는 약 1.91(rad/sec)로써 유의파고 0.5m의 불규칙파가 유의파고 1.0m의 불규칙파보다 공진현상을 일으킬 가능성이 크다고 볼 수 있다. 이 때 생성된 불규칙파의 파고는 그림 10과 같으며 이에 의한 구조물의 변위해석 결과는 그림 11과 같다. TMD의 설치로 인해 구조물의 진동을 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 응답의 최대치는 1.0cm를 넘지 않는 매우 작은 진동임을 알 수 있다. 유의파고를 달리하면서 불규칙파를 재하 했을 때 최상부 변위의 표준편차 및 최대값을 구한 것이 그림 12와 13이다. 여기서 알 수 있는 것은 TMD의 제진효과는 유의파고 성분이 약 1m 이내인 불규칙파에 대하여 효과를 보이고 그 이상의 유의파 성분을 갖는 불규칙파에 대해서는 효과를 보기 어렵다는 것이다. 즉, 해양구조물의 제진효과를 위해 설치하는 TMD는 파고가 커서 구조물의 안정에 영향을 주는 파랑에 대해서는 그 기능이 발휘되지 못하지만 상시에 장기간 동안 내습하는 파고가 작은 파랑에 대하여 제진효과가 있음을 알 수 있다.

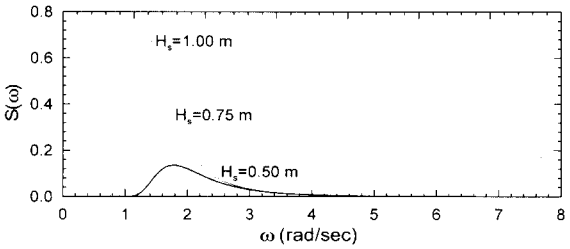

그림 9. Pierson-Moskowitz 스펙트럼

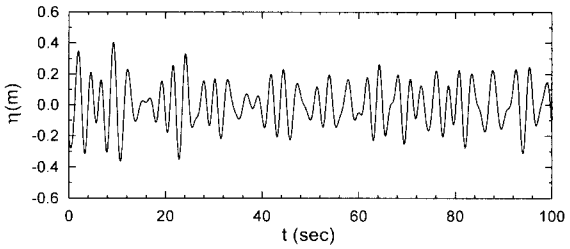

그림 10. 유의파고가 0.5m인 불규칙파

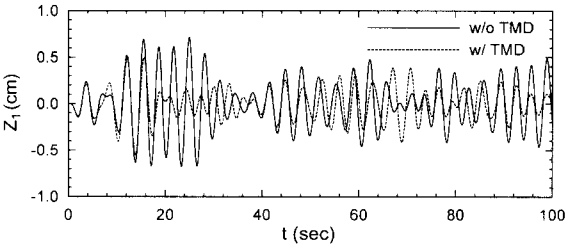

그림 11. TMD적용 전 · 후의 불규칙파에 따른 구조물 변위

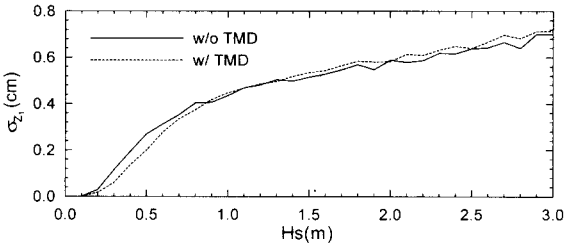

그림 12. 불규칙파에 의한 상단 변위의 표준편차

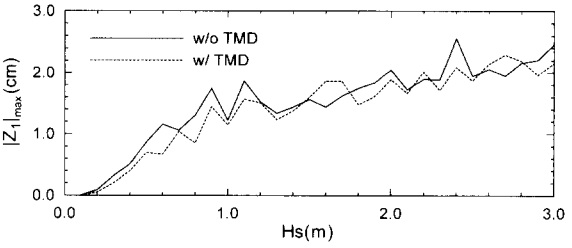

그림 13. 불규칙파에 의한 상단 변위 최대값

5. 결 론

일반적으로 해양구조물은 파랑-구조물 상호작용으로 인해 비선형성을 갖기 때문에 해석의 편리성을 위해 선형화기법을 사용한다. 그러나, 선형화된 방정식을 사용할 경우 본래의 비선형방정식의 운동에 비하여 응답의 최대값과 고유주기와 같은 동특성이 달라짐을 확인하였다. 또한, TMD를 이용하여 제진설계를 수행할 경우 선형방정식을 이용하면 동조점(또는 공진점)이 바뀜과 동시에 제진효과가 과대평가되는 현상을 확인하였다. TMD의 제진효과를 분석한 결과에서는 규칙파가 구조물의 고유주기와일치할 때 제진효과가 크며 이보다 작거나 큰 주기에 대해서는 그 효과가 떨어짐을 확인하였다. 일반적인 해양구조물의 동특성을 감안하면 유의파고 성분이 작은 불규칙파에 대해 효과가 크다. 즉, TMD를 적용하므로써 상시 내습하는 중소파랑에 대한 제진효과를 얻을 수 있으며 결과적으로 피로안정성 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 말

본 연구는 전북대학교 국내연구교수 지원 및 전북대학교 부설공학연구원 공업기술연구센터의 지원으로 이루어 졌습니다.

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 Nonlinear waves, *Applied Ocean Research*, Vol. 17, pp. 1-8.

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 Sytems 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 : 2003. 11. 14 / 심사일 2003. 11. 21 / 심사완료일 2003. 12. 23)