

고정식 해양구조물의 능동제어 Active Control of Fixed Offshore Structures

방 제묵*
Jae Muk Bang

김 상범**
Sang Beom Kim

윤 정방***
Chung Bang Yun

ABSTRACT

Vibration control of offshore structures subjected to wave loads is studied. The reduction of the dynamic responses of offshore towers subjected to wind generated random ocean waves is an important issue in the aspect of serviceability, fatigue life and safety of the structure. In this thesis, the effectiveness of the active tuned mass damper(ATMD) compared with the tuned mass damper(TMD) is mainly considered. Instantaneous optimal control scheme is employed for the active vibration control and Kalman filtering technique is used for the estimation of unmeasured response of structures. In practice, displacements and velocities could not be measured as easily as accelerations. So the state estimation methods like Kalman filter is very important. Numerical simulation is conducted for guarantee the effectiveness of ATMD for offshore structures.

1. 서론

해양구조물은 파랑, 조류, 바람, 지진하중 및 각종 기계설비로 부터의 진동하중을 받고 있다. 해양구조물의 구조적 파괴는 인명 및 재산 피해와 함께 해양오염 및 해저유전개발에 큰 차질을 초래할 수 있으므로, 이의 안전성은 구조물의 설계와 유지관리에 있어서 가장 중요한 과제이다. 해양구조물과 같이 큰 동하중을 받고 있는 구조물의 진동제어는 구조적 안전성과 함께 구조물상에서 진행되는 각종 작업의 작업조건을 향상시키기 위하여 중요한 문제로 대두되고 있다.

본 연구에서는 고정 해양구조물의 진동제어를 위하여, 수동형 동조질량감쇠장치(TMD)와 능동형 동조질량감쇠장치(ATMD)의 효율성을 비교·분석하였다. 능동형 제어장치에서는 순간최적제어 기법을 사용하였다. 각 제어장치의 효율성은 수치적으로 시뮬레이션한 두 가지 경우의 파랑상태와 이에 의한 가상해양구조물의 응답에 대하여 수행하였는데, 해석결과로부터 순간최적제어기법을 사용한 능동형 진동제어장치(ATMD)가 수동형 제어장치(TMD)보다 해양구조물의 진동을 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있었다.

* 대우엔지니어링 토목구조부 사원
** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
*** 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원

2. 구조물의 운동방정식

본 연구에서는 그림(1)과 같이 단순화한 고정 해양구조물의 모형을 사용하였으며, 각 절점의 수평운동만을 고려하였다. 외력으로는 파랑하중만을 고려하였는데, 재킷형 고정 해양구조물은 파장에 비하여 구조부재단면의 크기가 작으므로, 파동력을 수정된 Morison 방정식[1]을 사용하여 산정하였다. 이 때에 운동방정식은 아래와 같이 얻어진다.

$$M_o \ddot{X} + C_o \dot{X} + K_o X = F_w \quad (1)$$

$$F_w = \rho \nabla \ddot{V} + [C_M - \rho \nabla](\ddot{V} - \ddot{X}) + C_D |\dot{V} - \dot{X}|(\dot{V} - \dot{X}) \quad (2)$$

여기서,

$$C_M = \rho K_M \nabla, \quad C_D = \frac{1}{2} \rho K_D A$$

X, \dot{X}, \ddot{X} : 구조물 절점의 수평변위, 속도, 가속도 벡터
 M_o, C_o, K_o : 구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬
 F_w : 파동력 벡터
 ρ : 해수의 밀도
 ∇, A : 구조물의 수중부피 및 유동방향으로의 투영면적을 나타내는 대각행렬
 K_M, K_D : 실험에 의한 유동의 관성 및 점성계수

식 (2)에서와 같이 파동력항에는 유동의 구조물에 대한 상대속도의 제곱에 비례하는 점성저항력이 나타나며, 이에 의해서 구조물의 운동방정식이 비선형이 된다. 이 비선형항은 다음과 같이 선형화하였다[2].

$$C_D |\dot{V}_j - \dot{X}_j|(\dot{V}_j - \dot{X}_j) = \bar{C}_{D_j} (\dot{V}_j - \dot{X}_j) = C_{D_j} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{(\dot{V}_j - \dot{X}_j)} (\dot{V}_j - \dot{X}_j) \quad (3)$$

위에서 \bar{C}_{D_j} 는 선형화 계수이며, $\sigma_{(\dot{V}_j - \dot{X}_j)}$ 는 절점 j 에 가해지는 유동입자의 구조물에 대한 상대속도의 표준편차인데, 본 연구에서는 이 값을 매시간마다 전 단계 시간까지의 상대속도에 대한 값으로부터 새로이 추정하여 사용하였다.

3. 순간 최적 제어 기법

파랑하중을 받는 구조물에 r -개의 능동동조질량형 감쇠장치를 설치했을 때, 이 구조계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad (4)$$

여기서, $x(t)$: ATMD를 포함한 구조계의 절점변위벡터
 M, C, K : ATMD와 유동효과를 포함한 구조계의 질량, 감쇠, 강성행렬
 $u(t)$: ATMD의 질량에 가해지는 제어력 벡터
 $f(t)$: 선형화된 파랑하중 벡터 ($= C_M \ddot{V} + \bar{C}_D \dot{V}$)

식 (4)의 2계 운동방정식으로부터 1계 상태방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hf(t) \quad z(0) = z_0 \quad (5)$$

$$\text{여기서, } z(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}$$

위의 상태방정식을 임의의 시점 t 와 $t - \Delta t$ 에 대해서 풀면 다음과 같은 순차식을 얻을 수 있다.

$$z(t) = d(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + Hf(t)] \quad (6)$$

$$d(t - \Delta t) = \exp(A \Delta t) \left\{ z(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t - \Delta t) + Hf(t - \Delta t)] \right\} \quad (7)$$

최적의 제어력 $u(t)$ 는 시점 t 에서의 상태변수와 제어력에 관한 아래와 같은 목적함수를 최소화하는 방법으로 산정할 수 있다.

$$J(t) = z(t)^T Qz(t) + u(t)^T Ru(t) \quad (8)$$

식 (8)에서 Q 는 $(2n \times 2n)$ 차원의 준정치(positive semidefinite) 가중행렬이고, R 는 $(r \times r)$ 차원의 정치(positive definite) 가중행렬이다. 상태벡터에 대한 가중행렬 Q 의 값이 제어력에 대한 가중행렬 R 과 비교하여 상대적으로 커지면, 구조물의 응답은 작아지고 제어력은 커진다.

위의 목적함수에 상태방정식을 구속조건으로 포함시키면 다음과 같이 된다.

$$J^* = z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t) + \lambda^T(t) \left\{ z(t) - d(t - \Delta t) - \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + Hf(t)] \right\} \quad (9)$$

여기서 $\lambda(t)$ 는 Lagrange Multiplier 벡터이다.

식 (9)의 최적화 문제를 풀면 다음과 같은 3개의 식을 얻을 수 있다 [3, 4, 5].

$$2Qz(t) + \lambda^T(t) = 0 \quad (10)$$

$$2Ru(t) - \frac{\Delta t}{2} B^T \lambda(t) = 0 \quad (11)$$

$$z(t) = d(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + Hf(t)] \quad (12)$$

일반적으로 제어력 $u(t)$ 를 다음과 같이 결정할 수 있다. 즉 $u(t)$ 를 구조물 거동만의 함수로(closed-loop control) 결정하거나, 구조물에 가해지는 외부하중만의 함수로(open-loop control) 택하거나, 또는 본 연구에서 채택한 바와 같이 구조물의 거동과 외부하중의 함수로(closed-open loop) 정할 수 있다[4,5].

식 (11)에서 보듯이 제어력 $u(t)$ 는 Lagrange Multiplier 벡터 $\lambda(t)$ 와 선형의 관계를 갖으며, 이는 구조물 거동과 외부하중의 함수로 하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda(t) = Pz(t) + q(t) \quad (13)$$

식 (6)-(10) 으로부터, 식 (13) 의 P 와 $q(t)$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P = - \left[I + \frac{(\Delta t)^2}{8} QBR^{-1}B^T \right]^{-1} Q \quad (14)$$

$$q(t) = P \left[d(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} Hf(t) \right] \quad (15)$$

위의 식 (10)-(13)으로 부터 식(8)의 목적함수를 최소로 하는 최적제어력 $u(t)$ 를 구하면, 이는 아래 2개의 식에서 보는 바와 같이 $z(t - \Delta t)$, $f(t)$, $f(t - \Delta t)$ 와 $u(t - \Delta t)$ 의 함수로 나타남을 알 수 있다.

$$u(t) = - \frac{\Delta t}{2} R^{-1} B^T Qz(t) \quad (16)$$

이 때의 상태벡터 $z(t)$ 는 다음과 같다.

$$z(t) = \left[\left(I - \frac{(\Delta t)^2}{8} BR^{-1}B^T \right) \left(I - \frac{(\Delta t)^2}{4} QBR^{-1}B^T \right) Q \right]^{-1} \left\{ d(t - \Delta t) + \frac{(\Delta t)^2}{8} BR^{-1}B^T q(t) + \frac{\Delta t}{2} Hf(t) \right\} \quad (17)$$

4. 예제해석 및 고찰

본 연구에서는 채택한 그림 (1)의 예제 구조물은 전체질량이 $1753.2 \text{ kips sec}^2 / \text{ft}$ 이며(표. 1 참조), 첫번째 고유주기는 3.4 sec 이고 두번째 주기는 1.09 sec 이다. 평균풍속이 25 ft/sec 와 75 ft/sec 인 두 경우의 파랑하중상태에 대하여 각각 예제해석을 하였다. 파랑하중은 선형파이론을 이용하여 Pierson - Moskowitz가 제안한[1] 파고 스펙트럼(그림 3,6)으로부터 각 절점 깊이에서 불규칙파도의 속도와 가속도 시계열을 시뮬레이션[2] 한 후, 이를 이용하여 산정하였다. 제어효과는 가중행력의 값과 최적한 TMD에 많은 영향을 받으므로, 이들 값들을 변화시키면서 해석을 실행하여 가장 효과적이고 경제적인 제어효과를 얻을 수 있도록 해야한다.

본 연구의 예제해석에서는, 구조물의 첫번째 고유주기에 동저된 한개의 TMD가 Deck 위에 설치되었다고 가정하였다. 이 질량은 $8 \text{ kips sec}^2 / \text{ft}$ 로 Deck 질량의 2%이고 전체질량의 0.55%이다. 가중행렬 Q는 대각행렬로서 TMD의 거동에 해당되는 항은 0.0004로 나머지 항들은 1.0으로 일정하게 택하였고, 제어력에 관련된 가중치 R은 4.5×10^{-5} 을 택하였다. 그림 (4)와 (7)에서 보는 바와 같이, 수동제어의 경우는 구조물의 첫 번째 고유진동수 근처의 좁은 영역에 해당하는 구조물의 진동만을 제어하는 반면, 능동제어경우는 보다 넓은 주파수 영역에서 진동제어효과가 있음을 알 수 있다. 그림 (2)와 (5)는 진동제어의 효과가 변위보다는 속도제어에 크게 나타남을 보여준다. 이는 상태벡터(즉, 응답)에 대한 가중치 행렬 Q의 항중에서 변위와 속도에 관한 값들을 적절히 조정함으로써 제어효과를 원하는 방향으로 조절할 수 있다. 하중조건에 따른 제어효과를 보면, 평균풍속이 25 ft/sec 인 경우가 75 ft/sec 인 경우보다 제어효과가 크게 나타난다. 이는 저풍속에 해당되는 파랑하중의 주요 주파수 성분이 구조물의 고유진동수와 더 가까워서 동적증폭효과가 상대적으로 컸던 것을 TMD를 부착함으로써 진동제어의 효과가 크게 나타난 때문인 것으로 분석된다. 일반적으로, 제어효과를 증대시키기 위해서는 가중행렬 중 제어력에 해당되는 값을 작게하는 것이 좋지만, 이 경우 너무 큰 제어력이 필요하게 된다. 따라서, 원하는 제어효과와 이에 소요되는 제어력을 고려하여 제어계수들을 적절히 결정하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. O.C. Zienkiewicz, R.W. Lewis and K.G. Stagg, *Numerical Methods in Offshore Engineering*, John Wiley & 1978.
2. A.K. Malhotra and J. Penzien, "Nondeterministic Analysis of Offshore Structures," *J. Eng. Mech. ASCE* 1970.
3. F.L. Lewis, *Optimal Control*, John Wiley & Sons, 1986.
4. T.T. Soong, *Active Structural Control : Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, 1990.
5. 방 제목, *고정해양구조물의 능동제어*, 한국과학기술원 토목공학과, 석사학위논문, 1994

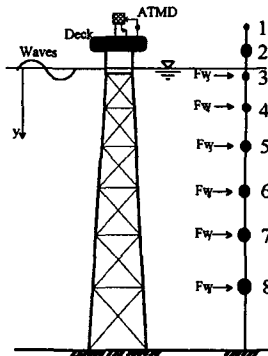
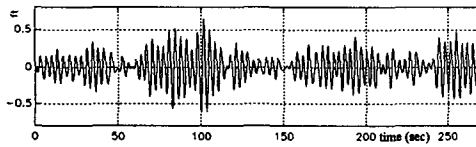


그림 1 고정해양구조물의 모형화

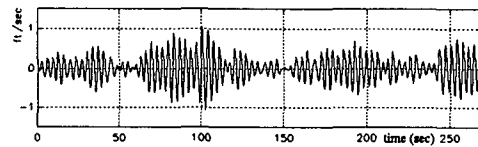
표 1 구조물의 계수

Node	y	M	C_M	C_D	∇	A
1	-75	8	0	0	0	0
2	-75	330	0	0	0	0
3	10	101.2	119.8	16.7	29950	11929
4	75	89.2	114.6	14.1	28650	10071
5	140	165.0	238.4	23.1	59600	16500
6	270	282.0	413.0	33.6	103250	24000
7	400	369.0	541.0	36.4	135250	26000
8	530	417.0	652.0	43.8	163000	31286

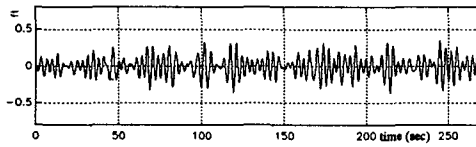
단위 : M, C_M : kips sec² / ft C_D : kips sec² / ft²
 ∇ : ft³ A : ft²
 y : ft



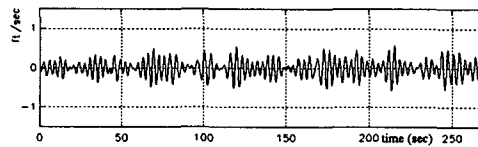
(a-1) w/o Control



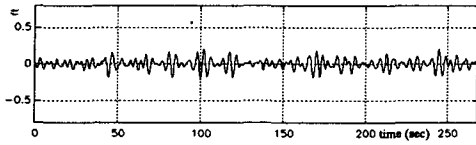
(a-2) w/o Control



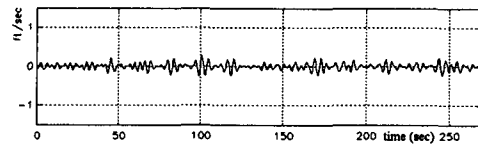
(b-1) w/ TMD



(b-2) w/ TMD



(c-1) w/ ATMD



(c-2) w/ ATMD

그림 2 제어 전.후 Deck의 변위와 속도의 비교 (평균풍속 : 25 ft/sec)

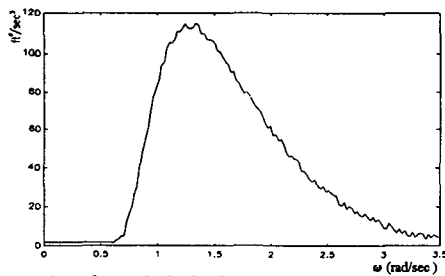


그림 3 유동입자의 가속도의 spectral density

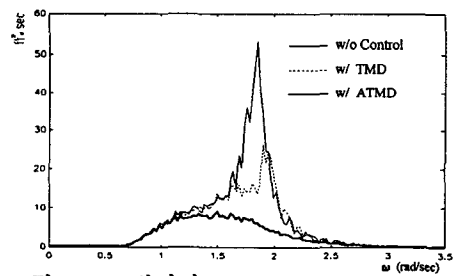


그림 4 Deck변위의 response spectral densities

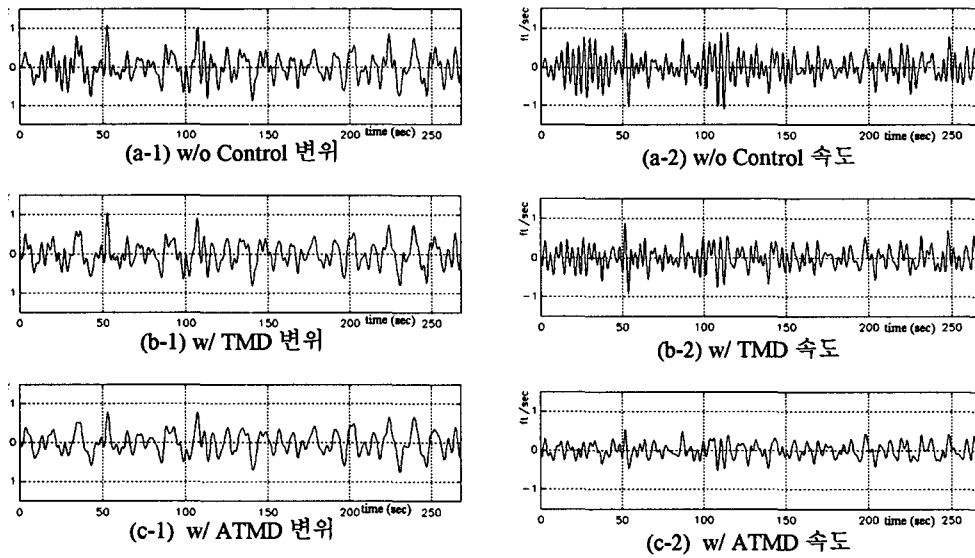


그림 5 제어 전·후 Deck의 변위와 속도의 비교 (평균풍속 : 75 ft/sec)

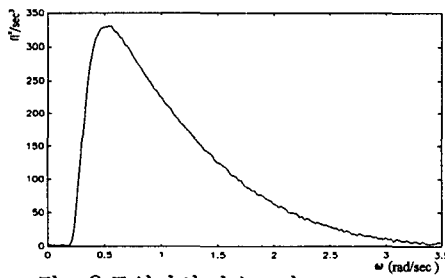


그림 6 유동입자의 가속도의 spectral density

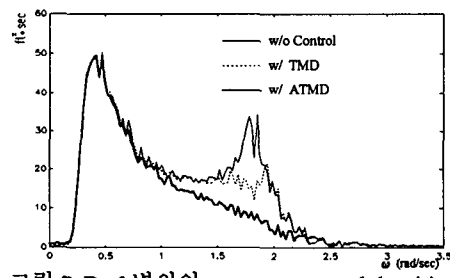


그림 7 Deck변위의 response spectral densities

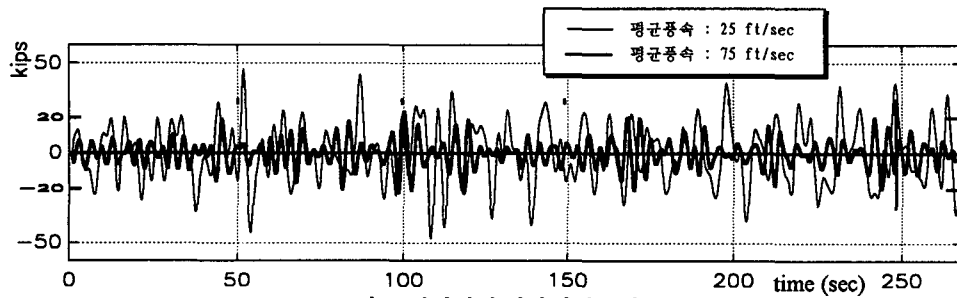


그림 8 제어력의 시간이력곡선

표 2. 갑판의 최대응답의 비교

평균풍속	25 ft/sec		75 ft/sec	
	갑판변위	갑판속도	갑판변위	갑판속도
Without Control	0.647 (0.194)	1.056 (0.332)	1.082 (0.331)	1.088 (0.328)
Passive Control	0.367 (0.130)	0.581 (0.211)	1.045 (0.311)	0.920 (0.266)
Active Control	0.217 (0.068)	0.271 (0.083)	0.794 (0.285)	0.537 (0.185)

주 : 괄호속의 값은 표준편차
단위 : ft, ft/sec