

랜덤 하중하에 있는 고정식 해양구조물의 응답 해석

김 창 현* · 박 한 일**

Response analysis of fixed offshore structure under random loads

Chang-Hyun Kim · Han-Il Park

<目 次>

요약문	Ⅲ. 계산 결과 및 고찰
I. 서 론	1. 구조물의 각종 제원
Ⅱ. 동적 해석	2. 계산 결과 및 고찰
1. 기본 방정식	Ⅳ. 결 론
2. 해석법	참고문헌
3. 파하중 시뮬레이션	

요 약 문

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 랜덤 파하중에 의한 고정식 해양구조물의 동적응답 특성을 해석하였다. 랜덤 파하중은 P-M 스펙트럼에 근거하여 재현하였으며, 구조물의 운동방정식에서는 유체점성항을 비선형항으로 취급하였다. 구조물의 응답은 Newmark- β 수치 기법에 근거하여 시간 영역법을 이용하여 수행하였다.

I. 서 론

거친 해양환경에 노출되어 있는 해양구조물의 응답 해석은 구조물의 설계 및 가동에 있어서 매우 중요한 사항이다. 특히 파도는 일반 해양구조물에 있어서 가장 중요한 환경요소이다. 그러나 자연 상태의 파도는 본질적으로 랜덤하게 발생하고, 이로 인한 파하중 또한 랜덤하게 작용한다. 이와 같은 파하중의 특성에도 불구하고 기존의 많은 연구들은 파하중을 결정론적인 관점에 의해서 다루어 왔는데, 이러한 해석방법은 실제현상과 많은 차이점을 나타낸다.

랜덤 파하중에 의한 구조물의 응답해석에는 크게 두 가지 방법, 즉 주파수 영역법과 시간 영역법이 있다

* 한국해양대학교 대학원
** 한국해양대학교 해양공학과

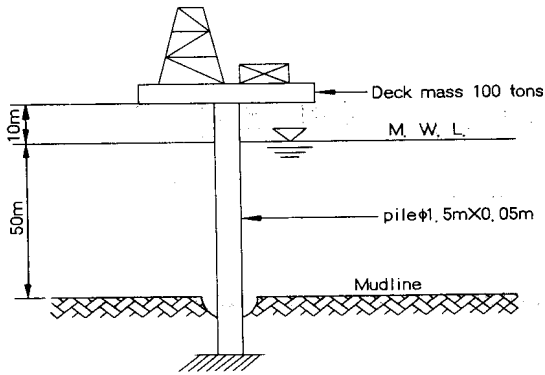


Fig. 1. Geometry of Model Structure

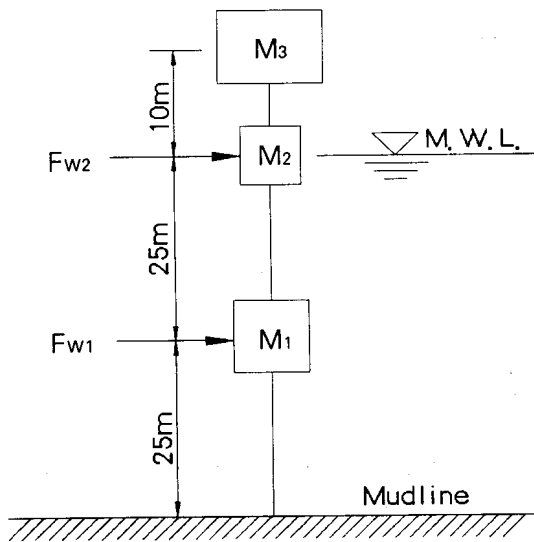


Fig. 2. Lumped Mass System of the Model

[1]. 전자의 방법은 선형 시스템에 대해서만 사용할 수 있으므로, 시스템의 방정식에 포함되어 있는 비선형항을 선형화 시켜야만 한다. 특히 해양구조물의 운동방정식은 Morison 방정식으로부터 얻어지는 파하중의 식이 유체점성항으로 인하여 비선형항을 포함하게 되므로, 주파수 영역에서의 스펙트럼 분석법은 비선형항을 선형화 하여야만 한다. 반면에 시간 영역 해석법에서는 비선형항의 수정 없이도 파고 스펙트럼으로부터 구한 통계적 입력 자료들을 이용하여 직접 구조물의 응답을 구할 수 있다 [2]. 따라서 본 논문에서는 시간 영역 해석법을 이용해서 해양구조물의 응답특성을 해석하였다.

한편, 구조물 자체에 대한 해석모델은 단힌 해를 얻기 위한 순수 해석적인 방법과 근사적인 방법이 있으나 이 방법들은 모델을 아주 단순화해야 하는 단점이 있다 [3]. 반면에 단힌해를 구할 수는 없으나 복잡한 구조해석도 가능한 유한요소법과 같은 수치적 방법이 있다. 본 연구에서는 그림 1과 같은 모델에 대해서 유한요소법을 이용하여 해석하고자 한다. 구조물의 질량은 consistent 질량 매트릭스 또는 집중 질량 매트릭스로 취급할 수 있으나, 본 연구에서는 그림 2와 같이 집중질량화 기법을 사용하였다 [4].

II. 동적 해석

1. 기본 방정식

다자유도 구조시스템의 운동 지배방정식은 다음과 같다.

$$[M] \{\ddot{D}\} + [C] \{\dot{D}\} + [K] \{D\} = \{F_w\} \quad (1)$$

여기서 $[M]$: 구조물 자체의 질량, 구조물 내부의 해수 질량, 동수역학적 부가 질량, 상층부의 질량 그리고 지반의 부가 질량을 합한 전체 질량 행렬

$[C]$: 구조물의 감쇠 행렬

- [K] : 구조물의 강성 행렬
- [D] : 구조물의 질점 변위 행렬
- [F_w] : 각 질점에 작용하는 하중 행렬

2. 해석법

시간증분 해석은 비선형 해석 중 가장 널리 사용되는 Newmark-β법을 사용하였으며, 이에 따른 절차를 간단히 정리하면 다음과 같다[5].

먼저, (1)식을 시간 증분법을 적용하는 일반적 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$[M] \{\ddot{D}\}_{t+\Delta t} + [C] \{\dot{D}\}_{t+\Delta t} + [K] \{D\}_{t+\Delta t} = \{F_w\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

여기서 Newmark-β법의 두 상수 α와 β를 각각 1/2과 1/4이라 하면 행렬 $\{\ddot{D}\}_{t+\Delta t}$ 와 $\{\dot{D}\}_{t+\Delta t}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\{\ddot{D}\}_{t+\Delta t} = \frac{4}{(\Delta t)^2} (\{D\}_{t+\Delta t} - \{D\}_t - (\Delta t) \{\dot{D}\}_t) - \{\ddot{D}\}_t \quad (3)$$

$$\{\dot{D}\}_{t+\Delta t} = \frac{2}{\Delta t} (\{D\}_{t+\Delta t} - \{D\}_t) - \{\dot{D}\}_t \quad (4)$$

(3), (4)식을 (2)식에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{4}{(\Delta t)^2} [M] + \frac{2}{\Delta t} [C] + [K] \right\} \{D\}_{t+\Delta t} \\ & = \{F_w\}_{t+\Delta t} + \left\{ \frac{4}{\Delta t} [M] + [C] \right\} \{\dot{D}\}_t + \left\{ -\frac{4}{(\Delta t)^2} [M] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right\} \{D\}_t + [M] \{\ddot{D}\}_t \end{aligned} \quad (5)$$

(5)식에서 $\{D\}_{t+\Delta t}$ 를 구하면 이 값을 (3), (4)식에 대입하여 $\{\ddot{D}\}_{t+\Delta t}$ 와 $\{\dot{D}\}_{t+\Delta t}$ 를 구할 수 있다. 이때 (5)식의 $\{F_w\}_{t+\Delta t}$ 는 해류의 속도를 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$\{F_w\}_{t+\Delta t} = [M_H] \{\dot{v}\}_{t+\Delta t} + [B] \{ |v|_{t+\Delta t} - |\dot{D}|_{t+\Delta t} | \} (\{v\}_{t+\Delta t} - \{\dot{D}\}_{t+\Delta t}) \quad (6)$$

이때 $[M_H]$ 와 $[B]$ 는 행렬의 주 대각선 성분이 각 질점의 $\rho_w C_m \frac{\pi D_o^3}{4}$ 과 $\frac{1}{2} \rho_w C_d D_o$ 로 이루어진 행렬이다. 여기서, ρ_w : 해수의 밀도

C_m : 부가 관성질량 계수

D_o : 파일의 외경

C_d : 항력 계수

위 (6)식을 (5)식에 대입하면 (6)식의 상대속도항으로 인하여 전체 운동방정식은 비선형 방정식이 되는데 이 방정식을 시간영역에서 풀기 위한 방법으로는 시간 증분 Δt를 충분히 작게 하여 $\{D\}_{t+\Delta t} \approx \{D\}_t$ 로 가정하여 전체 식을 계산한다. 방정식의 초기 조건으로는 $t=0$ 일 때 $\{D\}_{t=0}=0$, $\{\dot{D}\}_{t=0}=0$ 이며, 이들 조건을 (2), (6)식에 대입하면 $\{\ddot{D}\}_{t=0}$ 의 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{\dot{D}\}_{t=0} = [M]^{-1} \cdot \{[M_H] \{v\}_{t=0} + [B] \{v\}_{t=0}\} \quad (7)$$

이들 초기 조건을 이용하여 (5)식에서 $\{D\}_{t+\Delta t}$ 를 구하면, 이 값을 (3), (4)식에 대입하여 $\{\dot{D}\}_{t+\Delta t}$ 와 $\{D\}_{t+\Delta t}$ 를 구할 수 있다. 이후 과정은 시간의 증분에 따라 (5), (3), (4)식을 반복 수행하면 된다.

3. 파하중 시뮬레이션

각 집중질량에 대하여 랜덤하게 작용하는 파하중은 Pierson - Moskowitz 스펙트럼으로부터 시뮬레이션을 하였는데, 그 과정은 다음과 같다 [2], [3].

먼저 주어진 스펙트럼으로부터 시간 영역에서 랜덤한 파랑의 변위를 시뮬레이션하기 위해서는 다음 식과 같이 여러 개의 조화파를 중첩하여 구할 수 있다.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{N_w} \hat{\eta}_i \cos(m_i y - \omega_i t + \phi_i) \quad (8)$$

여기서, N_w : 조화파의 개수

η_i, m_i, ω_i : 각각 i 번째 파요소의 파진폭, 파수 그리고 각진동수

y : 파도의 진행방향에 대한 구조물의 수평거리

ϕ_i : $0 \sim 2\pi$ 사이에 있는 랜덤한 위상각

이때 스펙트럼으로부터 계산되는 파도의 진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\eta}_i = \sqrt{2 \cdot S_{\eta\eta}(\omega_i) \cdot \Delta\omega} \quad (9)$$

여기서, $\Delta\omega$: 진동수 간격

$S_{\eta\eta}(\omega_i)$: 파 스펙트럼

또한 선형파 이론에 의한 심해에서의 수평 파속 및 파 가속도 성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v = \sum_{i=1}^{N_w} \omega_i \hat{\eta}_i e^{m_i z} \cos(m_i y - \omega_i t + \phi_i) \quad (10)$$

$$\dot{v} = \sum_{i=1}^{N_w} \omega_i^2 \hat{\eta}_i e^{m_i z} \sin(m_i y - \omega_i t + \phi_i) \quad (11)$$

여기서, z : 정수면으로부터 윗방향을 (+)로 하는 수직좌표

시간의 증가에 따라 각 집중질량에 작용하는 파하중은 위에서 구한 파입자의 속도와 가속도를 (6)식에 대입하여 계산할 수 있다.

III. 계산 결과 및 고찰

1. 구조물의 각종 자원

본 연구에서 사용한 구조물은 그림 1과 같이 하부구조는 길이에 따라 단면 특성이 일정한 하나의 파일

구조로 가정하였고 그 상단에 갑판이 있는 것으로 고려하였다. 해석에 사용된 구조물의 각종 재원 및 기타 입력 자료는 다음과 같다.

해저면부터 파일(Pile) 상단까지의 거리 : $H=60\text{m}$,

평균 수심 : $h=50\text{m}$,

파일의 외경 : $D_o=1.5\text{m}$,

파일의 벽두께 : $t=0.05\text{m}$,

파일의 밀도 : $\rho_p=7850\text{kg/m}^3$

파일의 탄성계수 : $E=2.06 \times 10^{11}\text{N/m}^2$

상층부의 질량 : $m_{\text{deck}}=100\text{tons}$

구조물의 감쇠비 : $\zeta_s=0.01$

해수의 밀도 : $\rho_w=1024\text{kg/m}^3$

부가 관성질량계수 : $C_m=2.0$

항력 계수 : $C_d=1.3$

P-M 스펙트럼의 유의파고 : $H_{1/3}=3.5\text{m}$

본 연구에서는 전체 시뮬레이션 시간(T)을 500sec, 시간증분(Δt)을 0.1sec로 하였으며, 이로 인한 진동수 간격($\Delta\omega$)은 $2\pi/T$ 를 사용하였고, 최대진동수(ω_{max})는 Nyquist 진동수($\pi/\Delta t$)로 하였다. 또한 문제를 간단히 하기 위해서 해류의 속도는 없는 것으로 가정하였고, 구조물 속에는 물이 가득 찬 것으로 하여 계산을 수행하였다.

2. 계산 결과 및 고찰

먼저 구조물의 고유진동수는 다자유도 운동방정식인 (1)식으로부터 계산할 수 있다. 본 연구에서 다분다자유도계의 경우에는 전체 운동모드가 세 개이고, 계산에 따르면 각각의 운동모드에 대한 고유진동수는 $\omega_1=1.0(\text{rad/sec})$, $\omega_2=7.69(\text{rad/sec})$, $\omega_3=22.7(\text{rad/sec})$ 이다.

파일자의 속도 및 가속도를 시뮬레이션하기 위해서 그림 3에 보여진 P-M 스펙트럼을 사용하였고, 이로부터 시간 영역에 대하여 시뮬레이션을 한 파변위는 그림 4와 같다. 나아가 프로그램 계산을 통해 얻어진 상부구조물(M_d)의 시간 영역에 대한 가속도와 변위를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5에서 주어진 상부구조의 가속도 변화는 각종 갑판 기기의 작동성능에 영향을 미치므로 전체 구조설계시 고려해야 할 사항이다. 그림 6은 상부구조물의 변위응답을 나타내는데, 그림 4에 주어진 랜덤파의 변위와 비교해 볼 때 구조물의 응답 진폭이 반이상으로 줄어들었음을 알 수 있다. 이것은 구조물의 고유진동수($\omega_1=1.0 \text{ rad/sec}$)와 랜덤파의 중심진동수(0.7 rad/sec)의 차이가 크기 때문이다. 그림 6에 주어진 상부구조물의 변위응답은 discrete Fourier transform을 통하여 그림 7과 같이 구하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 스펙트럼의 주된 진동수 값이 일차모드의 고유진동수인 1.0(rad/sec) 지점에 집중되어 있는 것을 볼 수 있다.

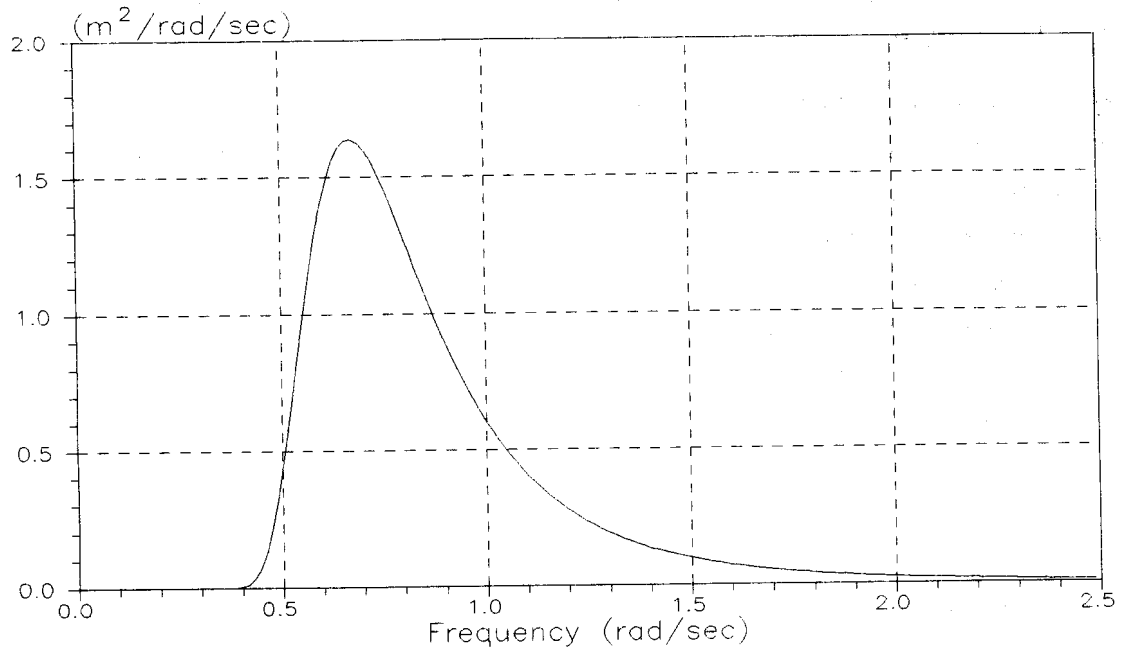


Fig. 3. P-M Spectrum

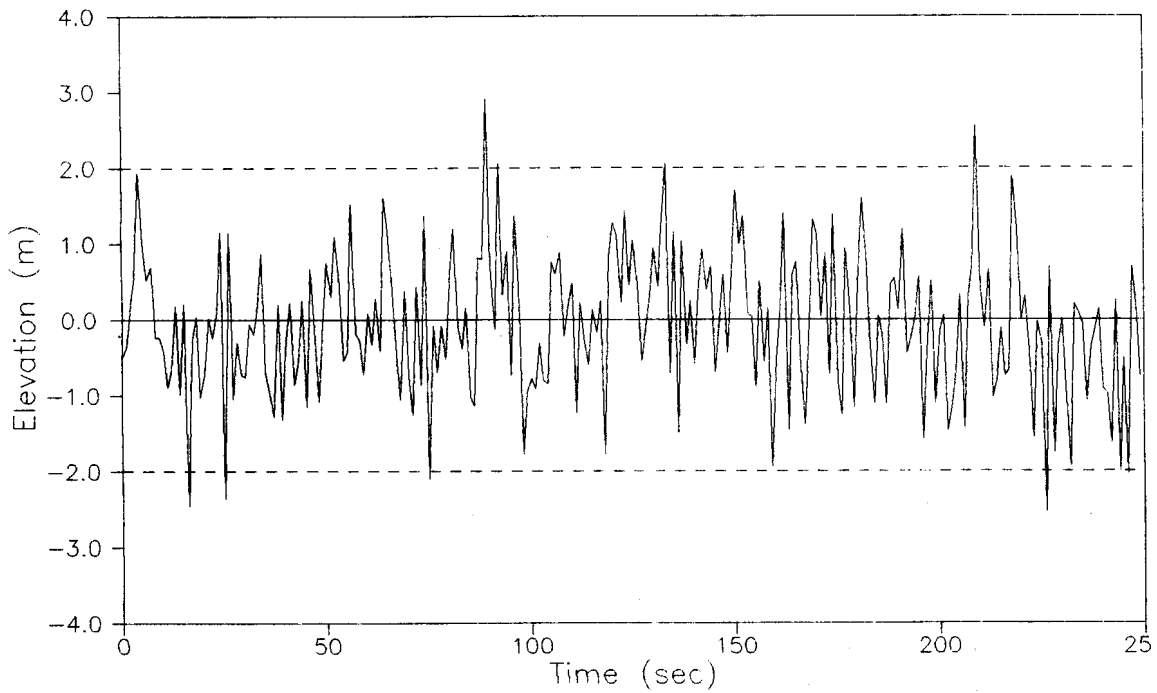


Fig. 4. Time History of Wave Elevation

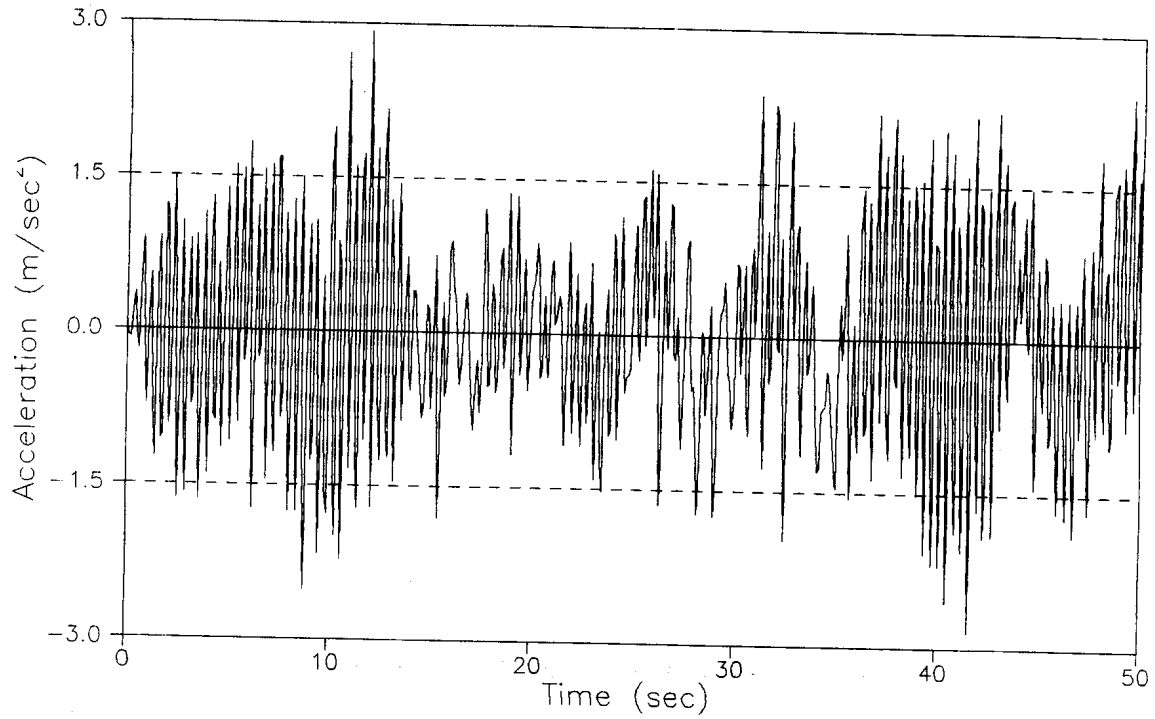


Fig. 5. Time History of Upper Structure Acceleration

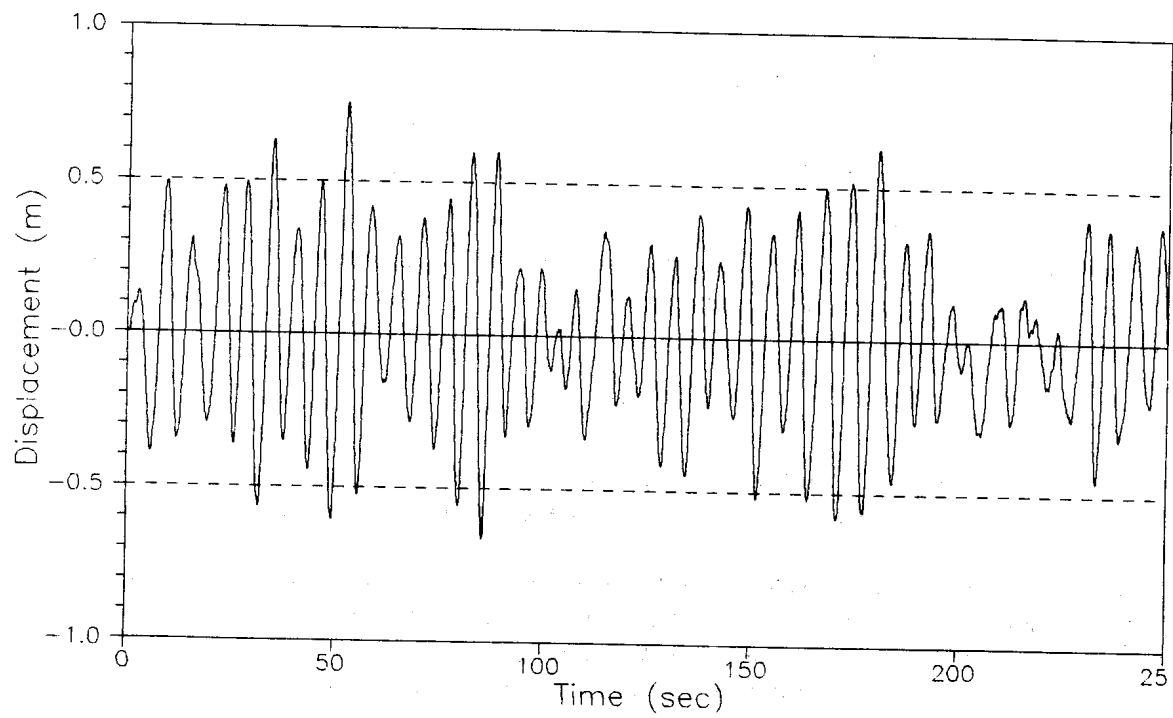


Fig. 6. Time History of Upper Structure Displacement

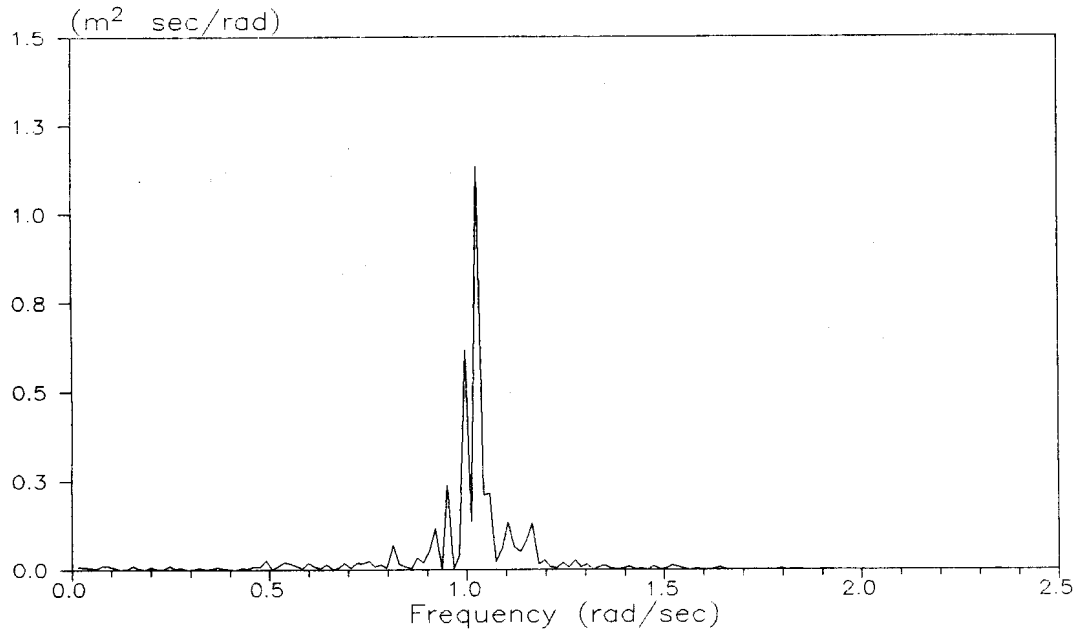


Fig. 7. DFT's Spectrum of Upper Structure Displacement

IV. 결 론

본 연구에서는 랜덤 파하중에 대한 고정식 해양구조물의 동적응답 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 전체 구조물은 집중질량화 기법을 사용하여 다자유도의 동적운동계로 치환하였고, 이때 운동방정식에서 나타나는 비선형항을 고려하기 위해서 시간영역 해석법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 집중질량화 기법은 고정식 해양구조물의 예비설계 단계에서 구조물의 동적응답 특성을 해석하는데, 간단하면서도 매우 효과적인 방법이라 여겨진다. 아울러, 본 연구결과를 검증하기 위한 실험실에서의 모형실험과 지반 효과를 고려하는 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Yang, C. Y., 1986, Random Vibration of Structures, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 2) Bartrop, N. D. P. and Adams, A. J., 1991, Dynamics of Fixed Marine Structures, Butterworth - Heinemann Ltd, Oxford.
- 3) Karadeniz, H., 1994, "Linear and Nonlinear Response Analyses of Offshore Structures Under Random Wave and Current Loading", Int J. Offshore and Polar Eng, ISOPE, Vol. 3, pp. 328 - 333.
- 4) Craig, R. R., 1981, Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 5) Patel, M. H., 1989, Dynamics of Offshore Structures, Butterworths & Co. Ltd, London.