

불규칙파에 대한 고정해양구조물의 동적해석

Dynamic Analysis of Fixed Offshore Structures Subjected to Random Waves

尹	楨	邦*
Yun,	Chung	Bang
崔	丁	鎬**
Choi,	Jung	Ho
柳	程	洙***
Ryu,	Jeong	Soo

Abstract

Two methods for the dynamic analysis of fixed offshore structures subjected to random waves are studied. They are the frequency domain method using the equivalent linearization of the nonlinear drag force, and the time domain method utilizing the Monte Carlo simulation technique for time series of random wave particle velocities and accelerations. Example analyses are carried out for two structures with different structural characteristics and for various wave conditions. A comparison has been made between the results obtained by two methods.

要 旨

본 논문에서는 해저석유개발에 사용되는 고정해양구조물의 불규칙파랑하중에 대한 해석기법으로 주파수영역해법과 시간영역해법에 대하여 연구하였다. 주파수영역해법에서는 파동의 비선형 점성저항력을 선형화한 후 파고스펙트럼으로부터 구조물의 응답스펙트럼을 구하였으며, 시간영역해법에서는 불규칙파의 유동속도와 가속도의 시계열을 파고스펙트럼으로부터 Monte Carlo 기법으로 시물레이션한 후 이를 이용하여 구조물의 거동을 해석하였다. 수심이 다른 지점에 설치된 2개의 구조물을 예로 택하여, 여러 가지 파고조건에 대한 구조물의 예상최대변위를 구한 후, 두 해법에 의한 결과를 비교분석하였다.

1. 서 론

해저석유자원의 개발이 전세계적으로 매우 활발해짐에 따라 국내의 건설업계와 중공업계에서

는 해외수주에 의한 각종 해양구조물의 건조사업에 힘써 그 성과가 날로 증가하고 있다. 현재 이 분야의 국내기술수준은 구조물의 제작기술에 관해서는 높은 수준에 달하고 있으나, 설계 및 해석기술은 매우 낮아서 이에 필요한 기술개발

* 정회원 · 한국과학기술원 부교수, 토목공학과

** 한국과학기술원 석사과정, 원 현대중공업주식회사

*** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

이 시급히 요망된다.

본 논문에서는 해저석유의 생산과정에서 주로 사용되는 고정해양구조물의 불규칙 파랑하중에 대한 동력학적해법에 대하여 연구하였다. 지금까지 해양구조물의 해석 및 설계에는 파도의 형태를 규칙파 또는 스토크스(Stokes)의 비선형파에 의한 주기파로 가정하고, 정력학적인 구조해법을 이용하는 간단한 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근에 석유개발이 수심이 더 깊고 파랑조건이 더 나쁜지역으로 확대됨에 따라 구조물의 거동을 좀 더 정확히 해석할 필요성이 대두되어, 실제의 파도형태와 유사한 불규칙파에 대한 유동 및 파랑하중의 해석과 이에 따른 구조물의 거동을 해석하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^(1,2,3).

여기서는 불규칙파랑하중에 대한 해양구조물의 동력학적해법 중, 파동력의 비선형 점성저항력을 선형화한 후 파고스펙트럼(wave height spectrum)으로부터 구조물의 응답스펙트럼을 구하여 거동을 해석하는 주파수영역해법^(1,4)과 불규칙파의 유동속도 및 가속도의 시계열(time series)을 Monte Carlo 기법으로 시뮬레이션한 후 이를 이용하여 구조물의 거동을 구하는 시간영역해법^(2,3,5)에 대하여 연구하였다. 예제해석은 수심이 600 ft와 1000 ft 되는 지점에 설치된 2개의 구조물에 대하여 수행하였으며, 여러 가지 파고조건에 따른 구조물의 동적거동을 구한 후 그 결과를 비교분석하였다.

2. 구조물의 모형화 및 운동방정식

2.1 구조물의 모형화

본 논문에서 연구한 고정해양구조물은 그림 1에서 보는 바와 같이 수면위에 위치한 갑판구조(deck), 갑판의 하부 수중에 설치된 자켓구조(jacket), 그리고 자켓의 주각(main legs) 내부를 지나 해저면 아래로 타설된 말뚝구조(piles)로 되어 있다.

구조물에 작용하는 주요의력으로는 구조물자체와 갑판설비의 자중, 갑판에 작용되는 풍하중, 자켓에 가해지는 파랑하중, 지진하중 및 말뚝에 작용되는 지반의 지지력이 있는데 본 논문에서

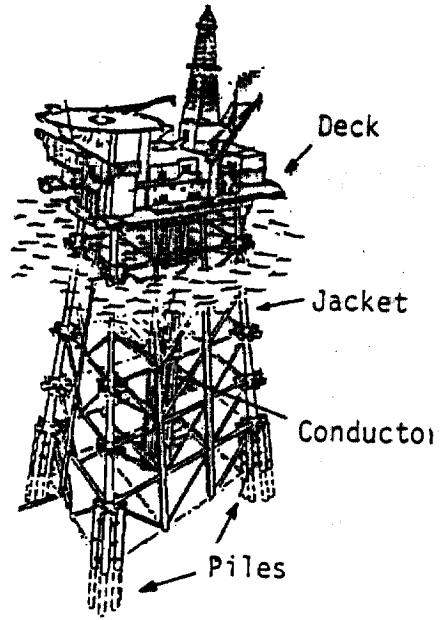


그림 1. 고정해양 구조물

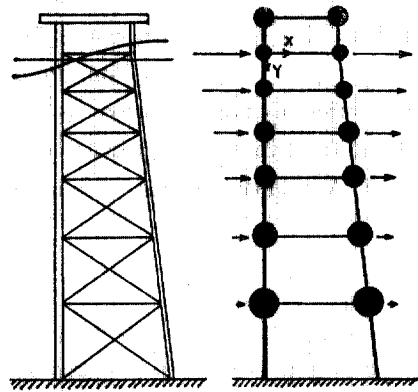


그림 2. 2차원 평면구조물과 모형

는 이 중에 가장 중요한 하중인 파랑하중의 영향에 대하여 중점적으로 연구하였다.

실제의 고정해양구조물은 그림 1에서와 같이 수많은 부재로 이루어진 3차원 구조물이지만, 본 연구에서는 동력학적 해석시 소요되는 방대한 계산량을 줄이기 위하여 그림 2에서와 같은 2차원 구조모형으로 단순화 하였다. 각 절점의 수평운동만을 고려하였으며, 같은 높이에 있는 두 점은 평면격자(frame)로 연결되어 있으므로 두 점의 수평변위는 같다고 가정하였다. 반면 두 점에서의 파동력은 수평좌표에 따라 각각 산정하였다.

2.2 구조물의 운동방정식

그림 2에서 보인 구조조형에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (1)$$

여기서,

$\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$: 구조물의 수평변위, 속도, 가속도벡터

$\{F\}$: 구조물에 가해지는 파동력벡터

$[M], [C], [K]$: 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬

식(1)의 파동력벡터 $\{F\}$ 는, 해양구조물이 원통형부재들로 구성되어 있고 이들의 직경이 파도의 파장에 비하여 매우 작으므로, 모리슨(Morrison)의 방정식을 사용하여 다음과 같이 구하였다^(6,7).

$$\{F\} = [\rho(C_M - 1)\nabla] \{ \dot{V} - \dot{U} \} + [\rho\nabla] \{ \ddot{V} \} + \left[\frac{1}{2}\rho C_D A \right] \{ (\dot{V} - \dot{U}) | \dot{V} - \dot{U} \} \quad (2)$$

여기서,

$\{V\}, \{\ddot{V}\}$: 구조물에 가해지는 유동의 속도 및 가속도벡터

A, ∇ : 구조물의 유동방향 투영면적 및 수중의 부피

C_M, C_D : 유동의 관성 및 점성계수

ρ : 해수의 밀도

식(2)에서 $[\rho(C_M - 1)\nabla] \{ \dot{V} - \dot{U} \}$ 는 유동의 부가질량(added mass)이 $\{ \dot{V} - \dot{U} \}$ 만큼의 상대가속도를 가질 때의 관성력을 표하는 항이고, $[\rho\nabla] \{ \ddot{V} \}$ 는 구조물에 의해서 밀려난 유체가 $\{ \ddot{V} \}$ 만큼 가속도를 가질 때의 관성력을 나타내는 항이며, $\left[\frac{1}{2}\rho C_D A \right] \{ (\dot{V} - \dot{U}) | \dot{V} - \dot{U} \}$ 는 유동의 구조물에 대한 상대속도의 제곱에 비례하는 점성저항력을 나타내며 이 항에 의해서 구조물의 운동방정식이 비선형이 됨을 알 수 있다.

식(2)로 나타내어지는 파동력을 식(1)에 대입한 후, 항들을 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[M + \rho\nabla(C_M - 1)]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = [\rho C_M \nabla] \{ \ddot{V} \} + \left[\frac{1}{2}\rho C_D A \right] \{ (\dot{V} - \dot{U}) | \dot{V} - \dot{U} \} \quad (3)$$

3. 불규칙파동에 대한 고찰

3.1 파고스펙트럼

불규칙파고의 통계 및 확률적 성질은 파고의 제곱에 대한 확률적 기대치를 주파수영역에서의 분포로 표현하는 파고스펙트럼으로 간단히 나타낼 수 있으며, 이는 구조물이 설치될 지점의 파고자료에 대한 통계학적 분석을 통하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 아래와 같이 바람에 의하여 생성된 파도의 경우인 Pierson-Moskowitz의 파고스펙트럼을 사용하였다⁽⁸⁾.

$$S_A(\omega) = \frac{124 H_s^2}{T_s^4 \omega^5} \exp\left(-\frac{498}{T_s^4 \omega^4}\right) \quad (4)$$

여기서,

$S_A(\omega)$: 파고스펙트럼

H_s : 유의파고(significant wave height)

T_s : 평균파주기(mean wave period)

예로서 그림 3은 H_s 가 15ft와 60ft인 경우의 $S_A(\omega)$ 를 보인 것으로, 각 조건에서 파고에너지가 각각 0.3~2.0 rad/sec 및 0.2~1.2 rad/sec의 주파수 범위에 집중 분포되어 있음을 나타내고 있다.

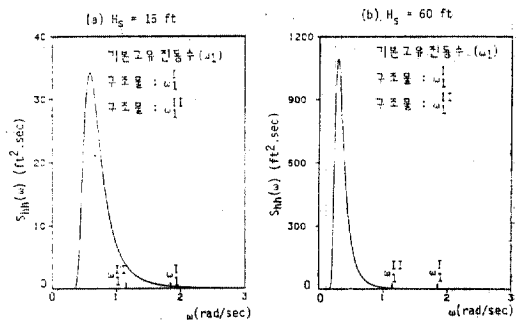


그림 3. 파고스펙트럼

3.2 유동속도와 가속도 스펙트럼

불규칙파에 의해 구조물에 작용되는 파동력의 특성은 파동력스펙트럼으로 간략하게 나타낼 수 있으며, 이는 유동의 속도와 가속도의 스펙트럼으로부터 구할 수 있다. 선형파(Airy wave) 이론을 이용하면 심해의 두 점에서 유동의 수평속도와 가속도의 크로스-스펙트럼(cross-spectrum)은 파고스펙트럼으로부터 다음과 같이 유도될 수 있다⁽¹¹⁾.

$$S_{\dot{y}_j \dot{y}_k}(\omega) = \omega^2 S_h(\omega) \exp \left[-\frac{\omega^2}{g} (y_j + y_k) + i k (x_j - x_k) \right] \quad (5a)$$

$$S_{\ddot{y}_j \ddot{y}_k}(\omega) = \omega^3 S_{\dot{y}_j \dot{y}_k}(\omega) \quad (5b)$$

$$S_{\dot{y}_j \ddot{y}_k}(\omega) = i \omega S_{\dot{y}_j \dot{y}_k}(\omega) \quad (5c)$$

$$S_{\ddot{y}_j \dot{y}_k}(\omega) = -i \omega S_{\dot{y}_j \dot{y}_k}(\omega) \quad (5d)$$

여기서,

x_j, x_k, y_j, y_k : 절점의 수평 및 수직좌표(그림 2)

k : wave number

g : 중력가속도

: $\sqrt{-1}$

3.3 유동속도와 가속도의 시물레이션

불규칙파의 특성은 전절에서 기술한 파고스펙트럼으로 간편히 나타낼 수 있으며, 구조계가 선형인 경우에는 구조해석을 주파수영역해법을 통하여 쉽게 수행할 수 있다. 그러나 해양구조물과 같이 운동방정식이 비선형일 경우에는 재래의 주파수영역해법을 사용할 수 없으므로, 이 경우에는 불규칙파동의 시계열을 시물레이션하여 이를 사용하여 구조물의 거동을 시간영역에서 해석함이 매우 편리하다^(2,3,9).

불규칙파의 파고의 시계열은 파고와 주파수가 다른 여러 개의 규칙파가 불규칙한 위상각(random phase angle)을 가지고 합성된 형태로 아래와 같이 나타낼 수 있다^(2,5).

$$\eta(x, t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N (S_h(\omega_i) \Delta \omega)^{1/2} \cos(k_i x + \omega_i t + \phi_i) \quad (6a)$$

여기서,

$S_h(\omega_i)$: 파고스펙트럼

ω_i : $i \times \Delta \omega$

ϕ_i : $0 \sim 2\pi$ 사이의 균일한 분포를 가진 랜덤위상각

k_i : wave number ($= \omega_i^2 / g$)

N : 시물레이션에 사용한 데이터수

아울러 불규칙파동에 의한 유동속도와 가속도의 시계열은 아래와 같이 시물레이션할 수 있다.

$$\dot{V}(x, y, t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N (S_h(\omega_i) \Delta \omega)^{1/2} \omega_i e^{-\omega_i^2 y / g} \cos(k_i x + \omega_i t + \phi_i) \quad (6b)$$

$$\ddot{V}(x, y, t) = -\sqrt{2} \sum_{i=1}^N (S_h(\omega_i) \Delta \omega)^{1/2} \omega_i^2 e^{-\omega_i^2 y / g} \sin(k_i x + \omega_i t + \phi_i) \quad (6c)$$

식 (6a)~(6c)의 계산은 FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 사용하면, 소요되는 계산량을 줄여 효과적으로 수행할 수 있다.

4. 구조물의 동력학적해석

4.1 비감쇠 자유진동해석

앞에서 기술한 바와 같이 해양구조물의 운동방정식은 파동의 점성저항력 때문에 비선형이 되어서, 구조해석을 위하여는 방대한 계산량을 요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 선형계를 해석할 때와 같이 비감쇠 자유진동모우드(undamped free vibration modes)를 구한 후, 제한된 숫자의 기본모우드들(fundamental modes)을 사용하여 구조물의 거동을 근사적으로 해석하였다.

자유진동모우드는 구조물이 수중에서 비감쇠 자유진동시 어떤 형태, 즉 모우드 $\{\phi\}$ 를 유지하며 조화운동을 한다고 가정하여 얻은 아래와 같은 연립제차선형방정식(simultaneous homogeneous linear equation)의 해로서 구할 수 있다.

$$[-\omega^2(M + (C_M - 1)\rho V) + K]\{\phi\} = \{0\} \quad (7)$$

일반적으로, 식(7)로부터 구조물의 자유도(n)만큼의 자유진동수 $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$ 과 각각에 따른 자유진동 모우드 $\{\phi\}_1, \{\phi\}_2, \dots, \{\phi\}_n$ 을 구할 수 있으며, 각 모우드를 열벡터로 갖는 행렬을 모우드행렬 $[\Phi]$ 이라 한다.

4.2 주파수영역해석

랜덤하중에 대한 구조물의 주파수영역해법이란 하중의 입력스펙트럼을 이용하여 이에 의한 구조물의 응답스펙트럼을 구한 후 이로부터 구조물거동의 확률적 특성을 해석하는 것으로, 구조계가 선형일 경우에는 하중과 응답스펙트럼과의 관계는 아래와 같이 간단히 주어진다.

$$S_u(\omega) = |H(\omega)|^2 S_f(\omega) \quad (8)$$

여기서 $S_u(\omega)$ 와 $S_f(\omega)$ 는 응답 및 하중의 스펙트럼이며, $H(\omega)$ 는 구조계의 주파수응답함수

(frequency response function)이다.

그러나 본 연구에서와 같이 운동방정식이 비선형이 되면 하중과 응답스펙트럼간의 관계가 식(8)과 같이 간단히 주어질 수 없으므로, 비선형항의 선형화가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 식(3)의 비선형 점성항을 선형화함에 있어, 이에 따른 오차항의 계수의 확률적 기대치를 최소로 하는 방법^(1,4)을 사용하여 아래와 같이 선형화하였다.

$$\left[\frac{1}{2} \rho C_D A \right] \{(\dot{V}-\dot{U})|\dot{V}-\dot{U}\} = [\bar{C}] \{\dot{V}-\dot{U}\} + \{e\} \quad (9a)$$

$$\bar{C}_{jj} = \frac{1}{2} \rho C_{Dj} A_j \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{(v_i-u_j)}, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (9b)$$

여기서,

- $[\bar{C}]$: 선형화 점성계수(대각행렬)
- $\{e\}$: 선형화에 따른 오차
- $\sigma_{(v_i-u_j)}$: 유동의 상대속도의 표준편차

식(3)에 식(9a)를 대입한 후, 항들을 정리하면 다음과 같은 선형방정식을 얻게 된다.

$$[M + (C_M - 1)\rho \nabla] \{\dot{U}\} + [C + \bar{C}] \{\dot{U}\} + [K] \{U\} = [\rho C_M \nabla] \{\dot{V}\} + [\bar{C}] \{\dot{V}\} \quad (10)$$

식(10)을 비감쇠 자유진동해석에서 구한 자유진동모우드 $[\Phi]$ 를 이용하여 좌표변환을 하면, 즉 $\{U\} = [\Phi] \{Y\}$ (11)

아래와 같은 식을 얻게 된다.

$$[\mu] \{\ddot{Y}\} + [\hat{C}] \{\dot{Y}\} + [k] \{Y\} = \{P\} \quad (12)$$

$$[\mu] = [\Phi]^T [M + (C_M - 1)\rho \nabla] [\Phi]$$

$$[\hat{C}] = [\Phi]^T [C + \bar{C}] [\Phi]$$

$$[k] = [\Phi]^T [K] [\Phi]$$

$$\{P\} = [\Phi]^T ([\rho C_M \nabla] \{\dot{V}\} + [\bar{C}] \{\dot{V}\})$$

여기서 $\{Y\}$ 는 일반좌표계(generalized coordinates)이고, $[\mu]$ 와 $[k]$ 는 일반질량 및 강성행렬(generalized mass and stiffness matrices)로서 대각행렬이 되나, $[\hat{C}]$ 는 일반감쇠행렬(generalized damping matrix)로서 대각행렬이 아니며, $\{P\}$ 는 일반하중벡터(generalized force vector)이다.

식(12)는 일반감쇠행렬 $[\hat{C}]$ 가 선형화된 점성항 $[\bar{C}]$ 를 포함하고 있어 일반적으로 대각행렬이 될

수 없어서 일반좌표 $\{Y\}$ 에 대하여 행(모우드) 별로 독립된(uncoupled)식이 되지 않으므로 계산의 효율을 높이기 위하여는 대각화가 필요하게 된다. 앞의 선형화와 유사한 방법으로 대각화에 따른 오차의 계수의 기대치를 최소화하는 방법을 따르면 아래와 같은 대각화된 일반감쇠계수를 얻을 수 있다⁽¹⁾.

$$C_{ij}^0 = \sum_{k=1}^l \hat{C}_{jk} \frac{E[\dot{Y}_k \dot{Y}_j]}{E[\dot{Y}_i \dot{Y}_i]} \quad (13)$$

여기서, l 은 사용한 모우드의 수이며, $E[\cdot]$ 는 확률적 기대치를 의미한다.

식(13)을 식(12)에 대입하면 각 모우드 별로 독립된 식을 얻게 된다.

$$\mu_i \ddot{Y}_i + C_{ii}^0 \dot{Y}_i + \mu_i \omega_i^2 Y_i = P_i, \quad j=1, 2, \dots, l \quad (14)$$

식(14)의 일반하중 $\{P\}$ 에 대한 크로스-스펙트럼행렬 $[S_{pp}(\omega)]$ 는 유동속도와 가속도의 스펙트럼으로부터 아래와 같이 구할 수 있으며

$$[S_{pp}(\omega)] = [\Phi]^T \{[\rho C_M \nabla] [S_{vv}(\omega)] [\rho C_M \nabla] + [\rho C_M \nabla] [S_{vv}(\omega)] [\bar{C}] + [\bar{C}] [S_{vv}(\omega)] [\rho C_M \nabla] + [\bar{C}] [S_{vv}(\omega)] [\bar{C}] [\Phi]\} \quad (15)$$

이로부터 일반좌표 $\{Y\}$ 의 응답크로스-스펙트럼행렬 $[S_{yy}(\omega)]$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[S_{yy}(\omega)] = [H(\omega)]^* [S_{pp}(\omega)] [H(\omega)] \quad (16)$$

여기서, $[H(\omega)]$ 는 각 모우드에 대한 주파수 응답함수로 구성된 대각행렬이며, 그 요소 $H_j(\omega)$ 는 아래와 같다.

$$H_j(\omega) = \frac{1}{\mu_j(\omega_j^2 - \omega^2) + i C_{jj}^0 \omega} \quad (17)$$

식(16)과 (17)에서 i 는 $\sqrt{-1}$ 이며, $H(\omega)^*$ 는 $H(\omega)$ 의 공액복소수이다.

구조물의 변위에 대한 스펙트럼은 식(11)과 식(16)으로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$[S_{uu}(\omega)] = \Phi [S_{yy}(\omega)] \Phi^T \quad (18a)$$

$$[S_{uu}(\omega)] = \omega^2 [S_{uu}(\omega)] \quad (18b)$$

조류의 영향을 포함시키지 않을 경우, 구조물의 변위 $\{u\}$ 의 평균치는 영(zero)이므로, 이들에 대한 공분산(covariance)은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\text{Cov}\{U_i U_k\} = \int_0^{\omega_c} \text{Re}\{S_{ij,kl}(\omega)\} d\omega \quad (19a)$$

$$\text{Cov}\{\dot{U}_i \dot{U}_k\} = \int_0^{\omega_c} \text{Re}\{S_{ij,kl}(\omega)\} d\omega \quad (19b)$$

여기서, $\text{Re}\{\}$ 는 복소수의 실수부를 의미하며, ω_c 는 해석에 포함할 ω 의 최대값이다.

본 절에서 기술한 주파수영역해법은 식(9b)와 (13)을 고찰할 때 선형화계수와 대각화계수가 구조물의 동적변위의 함수로 주어져 있으므로, 축차대입법(iterative method)으로 수행되어야 한다.

4.3 시간영역해석

앞 절에서 기술한 해양구조물의 주파수영역해법은 비선형항의 선형화를 필요로 하며, 이것은 시행반복적인 과정이므로 계산이 많이 요하게 될 뿐만 아니라, 구조계의 비선형성이 클 경우 선형화는 큰 오차를 초래할 우려가 있다. 이러한 어려움을 피하기 위하여는 제 3-3절에 기술한 방법으로 파동의 속도 및 가속도의 시계열을 시뮬레이션한 후, 이 결과를 사용하여 비선형운동방정식을 시간영역에서 수치해법으로 구조물의 거동을 구하고 이로부터 구조물의 확률적 특성을 해석하는 것이 편리하다.

본 논문에서는 시간영역해석을 수행함에 있어서 전절의 주파수영역해석에서와 같이 비감쇠 자유진동모우드를 사용한 모우드해석법을 사용하였으며, 이때 식(3)은 아래와 같이 변환된다.

$$\begin{aligned} [\mu_c]\{\ddot{Y}\} + [c_c]\{\dot{Y}\} + [k_c]\{Y\} \\ = [\Phi]^T [\rho C_M \nabla] \{\ddot{V}\} \\ + [\Phi]^T \left[\frac{1}{2} \rho C_D A \right] \{(\dot{V} - \Phi \dot{Y})\} \|\dot{V} - \Phi \dot{Y}\| \end{aligned} \quad (20)$$

여기서, $[c_c]$ 는 일반구조감쇠계수($=[\Phi]^T [C] [\Phi]$)로서 대각행렬이 된다고 가정하였다.

식(20)은 우변의 비선형항성함 때문에 일반좌표계 $\{Y\}$ 에 관하여 행(모우드)별로 독립된 식으로 나누어지지 않지만, 몇개의 기본모우드만을 사용하여 해석하면 계산량을 크게 줄일 수 있다. 식(20)으로부터 Runge Kutta 등의 수치적분기법을 사용하여 $\{Y\}$ 를 구한 후, 구조물의 변위 $\{U\}$ 는 식(11)을 사용하여 $\{Y\}$ 로부터 구할 수 있다.

4.4 구조물의 최대변위의 예측

파랑하중에 의한 해양구조물의 예상 최대변위는 구조물의 동적변위 $U(t)$ 가 Gaussian process 이고 이의 평균값이 영이라는 가정하에서, 다음과 같이 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$E[U(t)_{max}] = \sigma_u \left(\sqrt{2 \ln \nu_0 T} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln \nu_0 T}} \right) \quad (21)$$

여기서,

σ_u : 구조물의 변위의 표준편차

T : $U(t)$ 의 예상지속시간

ν_0 : $U(t)$ 의 지배적인 주파수 ($= \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_u}{\sigma_{\dot{u}}}$)

$\sigma_{\dot{u}}$: 구조물의 변위속도의 표준편차

본 논문에서는 σ_u 와 $\sigma_{\dot{u}}$ 를, 주파수영역해법에서는 식(19)를 사용하여 응답스펙트럼으로부터 구하였고, 시간영역해법에서는 $U(t)$ 와 $\dot{U}(t)$ 의 시계열로부터 통계적으로 구하였다.

조류의 영향을 포함하여 구조물의 평균변위가 영이 아닐 때는, 평균변위로부터의 변동량의 예상최대값을 식(21)로 구한 후 이에 평균변위를 합함으로써 구조물의 최대변위를 산정할 수 있다.

5. 예제해석 및 검토

수심이 각각 600 ft(구조물 I)와 1000 ft(구조물 II)되는 지점에 설치된 2개의 고정해양구조물⁽¹¹⁾을 예로 택하여, 여러 개의 파고조건에 따른 구조물의 동적거동을 해석하고 그 결과를 분석하였다. 구조물의 모형은 그림 2와 같으며 각 구조모형의 크기, 유동계수 및 구조물의 flexibility 행렬은 표 1에 주었다. 구조물의 동적해석은 기본이 되는 3개의 자유진동모우드를 사용하여 수행하였으며, 각 모우드에 대하여 5%의 구조적 감쇠비율 적용하였다. 각 구조물의 최초 3개의 고유진동수는 구조물 I의 경우 1.85, 3.95와 7.27 rad/sec이며, 구조물 II의 경우는 1.15, 2.20과 3.66 rad/sec이다.

그림 3은 H_s 가 15 ft와 60 ft인 경우의 파고스펙트럼을 보인 것으로, 작은 파고조건에서는 파고에너지가 구조물(특히 구조물 II)의 기본고유진동수에 가까운 주파수 영역에도 분포되어 있으나, 큰 파고조건에서는 파고에너지가 구조

표 1. 구조물의 크기 및 유동계수

구조물 I (높이=675 ft, 수심=600 ft)

Level	Y	M	Node	X	$\rho \Delta C_M$	$\frac{1}{2} \rho \Delta C_D$	Node	X	$\rho \Delta C_M$	$\frac{1}{2} \rho \Delta C_D$
1	-75	330	1	0	0	0	8	80	0	0
2	10	101	2	0	79	12.5	9	88	41	4.2
3	75	89	3	0	74	10.7	10	98	41	3.4
4	140	165	4	0	144	17.0	11	107	94	6.1
5	270	292	5	0	241	24.1	12	126	172	9.5
6	400	389	6	0	303	25.5	13	145	238	10.9
7	530	417	7	0	360	29.5	14	163	292	14.3

Flexibility (10^{-6} ft/kip)

456	346	274	211	111	49.2	9.4
	314	253	199	112	52.0	10.6
	SYM.	240	191	112	54.1	11.4
		186	112	56.2	12.3	
		115	60.2	14.1		
		65.2	15.8			
					16.6	

구조물 II (높이=1075 ft, 수심=1000 ft)

Level	Y	M	Node	X	$\rho \Delta C_M$	$\frac{1}{2} \rho \Delta C_D$	Node	X	$\rho \Delta C_M$	$\frac{1}{2} \rho \Delta C_D$
1	-75	330	1	0	0	0	8	80	0	0
2	10	101	2	0	80	17.4	9	88	35	3.1
3	75	146	3	0	123	22.9	10	98	65	4.3
4	205	383	4	0	284	37.6	11	116	167	9.3
5	400	537	5	0	437	51.3	12	145	320	13.5
6	600	665	6	0	550	54.0	13	174	431	15.8
7	800	1191	7	0	957	63.8	14	203	838	24.5

Flexibility (10^{-6} ft/kip)

756	622	531	374	210	98	30.8
	568	491	357	209	102	33.6
	SYM.	464	344	207	105	35.8
		321	205	110	40.1	
		203	118	46.5		
					126	53.2
						58.8

참고 : (1) Units are in kips, ft and sec.

(2) $C_M=2.0$, $C_D=1.4$

물의 고유진동수들보다 상당히 작은 주파수영역에 편중되어 있음을 알 수 있다.

시간영역해석에서 사용한 유동의 시계열은 다음과 같은 조건을 사용하여 구하였다($N=1024$,

$\Delta\omega=0.0234$ rad/sec, $\Delta t=0.262$ sec). 시뮬레이션한 결과의 타당성을 검토하기 위하여, 각 파고조건에 대하여 5개의 다른 랜덤위상각시계열(ψ_i , $i=1, 2, \dots, N$)을 사용하여 유동을 구한 후

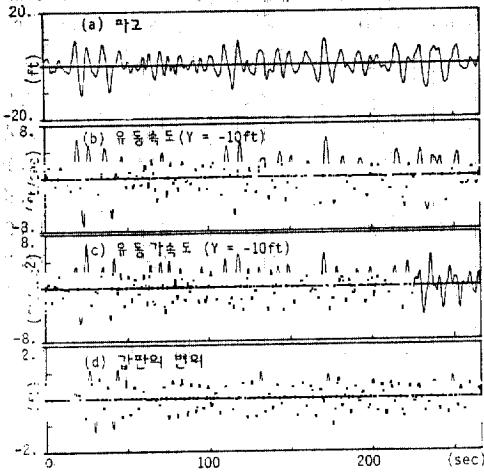


그림 4. 불규칙파고, 유동 및 갑판변위 ($H_s = 15$ ft, 구조물 II)

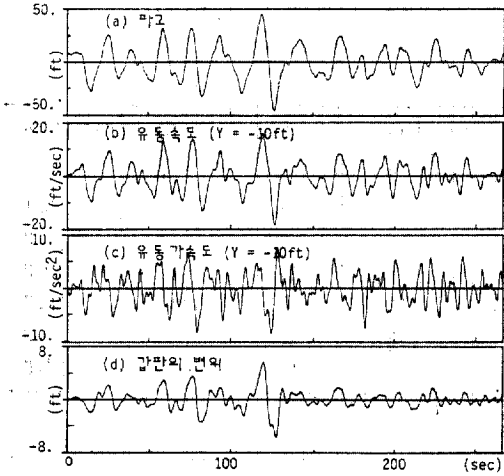


그림 5. 불규칙파고, 유동 및 갑판변위 ($H_s = 60$ ft, 구조물 II)

이들의 표준편차를 비교한 결과 일치함을 알았다. 그림 4와 5는 H_s 가 15 ft와 60 ft일 때, 불규칙파의 파고, 유동속도 및 가속도(수면이하 10 ft 지점)의 시계열과 구조물 II의 갑판변위를 보인 것으로, 파고의 형태와 갑판의 거동이 실제와 매우 흡사하게 시뮬레이션되었음을 보여주고 있다.

그림 6은 두 파고조건에 대하여, 시간영역해법과 주파수영역해법으로 구한 갑판변위의 응답스펙트럼을 비교한 것으로, 시간영역에서의 응

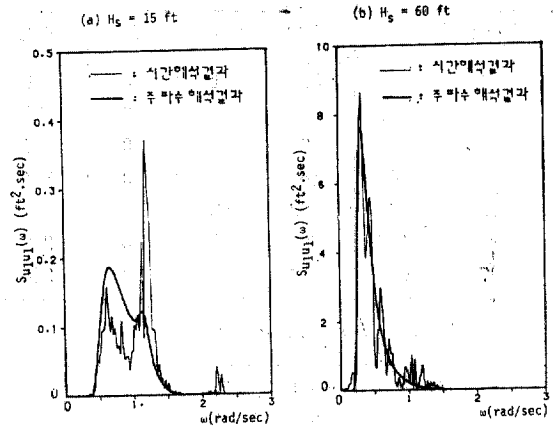


그림 6. 갑판변위 응답스펙트럼(구조물 II)

답스펙트럼은 근사적인 방법으로 아래와 같이 구하였다.

$$S_{u_1 u_1}(\omega) = |U_1(\omega)|^2 / (2\pi T_0)$$

여기서, $U_1(\omega)$ 는 $u_1(t)$ 의 Fourier Transform 이며, T_0 는 $u_1(t)$ 의 시계열의 길이이다.

그림 6을 고찰하면, 선형화기법을 통한 주파수영역해석결과는 대체로 시간영역해석결과를 smoothing 한 것과 유사함을 보이나, 구조물의

표 2. 갑판변위의 비교
구조물 I (수심=600 ft)

유 의 파 고 (H_s : ft)	σ_u (ft)		σ_a (ft/sec)		$E\{U_{max}\}$ (ft)	
	T.D.	F.D.	T.D.	F.D.	T.D.	F.D.
5	0.094	0.098	0.155	0.163	0.40	0.41
15	0.138	0.143	0.186	0.185	0.57	0.59
35	0.282	0.288	0.254	0.223	1.14	1.16
60	0.529	0.537	0.331	0.288	2.10	2.11

구조물 II (수심=1,000 ft)

유 의 파 고 (H_s : ft)	σ_u (ft)		σ_a (ft/sec)		$E\{U_{max}\}$ (ft)	
	T.D.	F.D.	T.D.	F.D.	T.D.	F.D.
5	0.161	0.145	0.192	0.174	0.66	0.60
15	0.311	0.338	0.306	0.301	1.27	1.37
35	0.692	0.769	0.470	0.481	2.76	3.05
60	1.352	1.432	0.706	0.683	5.30	5.58

참고: T.D.=시간영역해석 결과
F.D.=주파수영역해석 결과

자유진동수부근에서의 동적증폭현상이 후자에 비하여 상당히 작게 나타남을 보여 주었다.

표 2는 두 가지의 해석방법에 의한 갑판의 거동을 비교한 것으로, 갑판변위 및 속도의 표준편차와 파랑지속시간을 4시간으로 가정했을 때의 예상최대변위를 보였다. 예상최대변위를 비교할 때 두 해법결과의 차이가 전체적으로 10% 이내이며, 비선형성이 커지는 큰 파고조건에서도 5% 정도의 차이를 보임으로써, 비선형접성항의 선형화를 통한 주파수영역해법이 타당한 결과를 줌을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 고정해양구조물의 동적거동해석시, 불규칙파동의 시계열의 시뮬레이션을 통한 시간영역해법이 비선형 접성항을 그대로 유지하고 해석을 수행할 수 있는 편리하고 정확한 방법임을 보였으며, 선형화를 통한 주파수영역해법도 여러 파고조건에서 시간영역 해석결과와 매우 양호하게 일치한 결과를 줌으로써 타당한 방법임을 알았다.

감사의 말

본 연구는 1984년도 한국과학재단연구비의 지원으로 수행된 것이며, 이에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. Malhotra, A. and Penzien, J., "Nondeterministic Analysis of Offshore Structures", *J. Engineering Mechanics Div., ASCE*, Dec. 1970.
2. Shinozuka, M. and Wen, Y.D., "Nonlinear Dynamic Analysis of Offshore Structures-A Monte Carlo Approach", *Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics*, Pittsburgh, May 1971.
3. Shinozuka, M. and Yun, C., "Dynamic Analysis of Offshore Structures Subjected to Wind Generated Waves", *J. of Structural Mechanics*, 1977.
4. Borgman, L.E., "Random Hydrodynamic Forces on Objects", *Annals of Mathematics*, 1966.
5. Borgman, L.E., "Ocean Wave Simulation for Engineering Design", *J. of Waterways, Harbors Div., ASCE, WW4*, Nov. 1969.
6. Morison, J.R., et al., "The Force Exerted by Surface Waves on Piles", *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 189, 1950.
7. Chakrabarti, S.K., "Discussion-Nondeterministic Analysis of Offshore Structures", *J. Engineering Mechanics Div., ASCE*, Dec., 1970.
8. Pierson, W.J. and Moskowitz, L.A., "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii", *J. of Geophysical Research*, 69 (24), 1964.
9. 한남수·윤정방, "해저자원개발을 위한 Riser의 동력학적 연구", *대한토목학회논문집*, 1984.
10. Davenport, A.G., "Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading", *Proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 28*, 1964.
11. Penzien, J., Kaul, M.K. and Bergs, B., "Stochastic Response of Offshore Towers to Random Waves and Strong Motion Earthquakes", *Computer and Structures, Vol. 2*, 1972, pp.733~756.

(接受 : 1984. 9. 11)