

지진과 파랑하중을 동시에 받는 해양 가이드 타워의 비정상 동적 응답해석

Dynamic Response Analysis of Offshore Guyed Tower Subjected to Strong Earthquake under Moderate Random Waves

류정선* · 윤정방**

Ryu, Chung Son · Yun, Chung Bang

Abstract

Presented is a method for nonstationary response analysis of an offshore guyed tower subjected to strong earthquake motions under moderate random waves and current loadings. By taking the time varying envelope function and the auto-correlation function of the ground acceleration in terms of complex exponential functions, an analytical procedure is developed for computing time varying variances of the tower response. The stationary responses due to small random waves are obtained by using frequency domain method, and the results are combined with the nonstationary results due to earthquakes. Finally, the expected maximum responses are estimated. Through the example analyses, the nonstationary method developed in this study is verified, and the contributions of the earthquake, wave and current loadings to the total maximum response are investigated.

요 지

본 연구는 규모가 큰 지진하중에 대한 해양 가이드 타워의 비정상과정 거동해법에 주안점을 두었으며, 아울러 작은 파랑이나 조류하중이 동시에 작용할 수 있는 경우도 고려하였다. 지진에 의한 지반운동의 비정상특성은 정상과정 성분에 지수함수의 시간포락함수를 곱하는 형태로 모형화하였다. 동적거동의 비정상과정 분산값을 해석적인 방법으로 산출하였다. 운동방정식에서 계류장치의 비선형 복원력과 파동에 의한 비선형 점성저항력을 추계론적 최적화기법으로 선형화하여 동적해석을 수행하였다. 지진의 발생기간동안 예상되는 중급의 파랑하중에 의한 영향을 최대거동 산정시 고려하였다. 중급 파고조건에 대한 파랑하중은 지속기간이 상당히 길어서 정상과정으로 취급할 수 있으므로 이에 대해서는 주파수 영역해석을 사용하여 동적거동을 산출하고 이 결과를 지진에 의한 비정상과정거동에 반영하였다. 예제해석으로부터 비정상과정 해석방법을 검증하고, 지진과 파랑 및 조류하중의 각 성분이 전체응답에 미치는 영향을 분석하였다.

* 동신대학교 공과대학 토목공학과 조교수

** 한국과학기술원 토목공학과 교수

1. 서 론

가이드 타워(Guyed Tower)는⁽¹⁾ 심해에서의 석유 생산을 위하여 개발된 해양구조물로서, 재래의 고정식해양구조물에 비하여 파동에 의한 구조물의 응답을 다소 허용하는 일종의 compliant 구조물이다. 이 구조물은 Fig. 1에 보인 바와 같이 높이에 비하여 수평단면적이 작은 타워와 계류장치를 주요 구조로 하고있다. 계류장치는 타워를 중심으로 하여 방사상으로 배치된 일련의 계류선들로서 타워를 횡지한다. 이 구조물의 지진에 대한 거동해석에 있어서 비정상과정 (nonstationary process)의 특성을 고려함이 중요하다. 비정상과정의 특성은 직접적으로는 지진의 비정상적 성질과 관련되며, 다른 한편으로는 가이드 타워의 고유진동주기가 상당히 긴 특성파도 관련이 있다.

해양구조물에 대한 지진해석에 관하여 문헌들이 주로 사용한 지진해석법으로는 지진을 정상과정으로 가정하고 해석을 수행하는 주파수영역해석법,^(2,4) 지진기록이나 인위적으로 시뮬레이션한 지반운동의 시계열들을 사용하는 시간이력해석법^(3,4) 등이 있다. 지진에 대한 구조물의 동적해석에서 비정상과정 해석을 시도한 연구는 문헌[5],[6] 등이 있다. 문헌[5]는 지진의 비정상과정을 일련의 순간적 불규칙작용들 이라고 가정하여 비정상거동을 산정하는 방법을 보였고, 문헌[6]은 지진의 작용을 filtered Poisson process로 나타내므로써 구조거동의 시간에 따른 분산함수(variance function)를 구하는 방법을 개발하였다. 문헌[7]과 [8]에서는 최근에 문헌[6]의 방법을 적용하여 각각 지진에 대한 현수교와 가이드

타워의 비정상과정해석법을 개발한 바 있다.

본 논문에서는 문헌[8]에서와 같이 비교적 규모가 큰 지진이 작용할 때 해양 가이드 타워의 비정상 거동 해석법에 대한 연구를 하되 중급수준의 파랑 및 조류하중의 영향을 함께 고려하였다. 재현주기가 긴 강진을 대상으로 해석할 경우 폭풍으로 인한 파랑하중이 함께 작용될 확률은 극히 작은 반면, 비교적 작은 파랑조건에서 지진이 발생할 가능성은 상당히 크다. 파랑 및 조류하중과 지진하중이 동시에 작용할 때 파랑과 조류의 구조물에 대한 상대속도의 제곱에 비례하는 비선형 점성저항력 항을 선형화한 후, 각 하중성분별로 운동방정식을 분리하여 해석하였다. 즉, 파랑하중에 대해서는 정상과정이므로 주파수영역 해석방법을 사용하고,⁽⁹⁾ 지진하중에 대해서는 비정상과정 해석법을 적용하는 방법으로 구조물의 거동을 해석하였다.⁽⁸⁾ 운동방정식은 다자유도 모델에 대한 condensing기법을 이용하여 구조물의 수평방향 운동만으로 나타내었다. 지진이 작용하는 동안 지반운동으로 인해서 파랑이 추가적으로 발생하지는 않는다고 가정하였다. 그러나 지반운동으로 인한 구조물에 대한 유체의 점성저항력은 일종의 감쇠효과로서 운동식에 포함시켰다. 비정상과정의 지반운동은 정상과정성분(stationary process)에 시간변화의 포락함수(deterministic envelope function)를 곱하여 나타내었는데, 지진의 정상과정 성분은 filtered Kanai-Tajimi 스펙트럼으로부터^(10,11) 유도한 자기상관함수를 사용하였다. 본 연구는 지진의 자기상관함수와 시간포락함수를 모두 복소지수함수로 나타내므로써 구조물거동의 시간변화 분산값을 해석적으로 계산하는 방법을 개발하고, 이 방법에 의한 결과를 정상과정의 가정에 입각한 주파수영역해석법에 의한 결과와 비교하여 본 연구의 방법을 검증하였다. 이후, 지진과 파랑 및 조류하중이 함께 작용할 때 하중조건을 변화시켜 구한 결과로부터 각 하중성분이 전체응답에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지진과 파랑하중에 대한 운동방정식

본 연구에서 사용한 가이드 타워의 재원은 문헌 [9]의 내용과 동일하며, 동적해석을 위해서 Fig. 1(b)

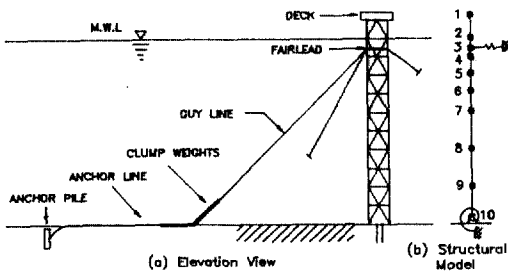


Fig. 1. Structural configuration of an offshore guyed tower

와 같이 구조물을 단순화했다. 타워는 적당한 간격으로 질량이 집중된 직선형 보(beam) 요소들의 조합으로 모형화하고, 계류장치(mooring system)는 하나의 비선형 스프링이 수평방향으로 계류점(fair-lead position)에 장착된 것으로 이상화하였다. 비선형 스프링의 복원력에 있어서 계류선 및 clumpweight의 동적 영향은 본 연구에서는 고려되지 않았다. 타워의 자중을 지지하는 말뚝기초는 문헌[9],[14]에서와 같이 타워단면의 중앙에 집중된 group piles로 이루어졌다고 가정하였으며, 이를 회전방향의 스프링 요소로 나타내었다.

지진과 파랑하중에 대한 구조모형의 운동방정식은 다음과 같이 수식화할 수 있다.^(2,9)

$$\begin{aligned}
 & [\bar{M}]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} + \{1_m\}R(u_m) = \\
 & -[\bar{M}]\{1\}\ddot{U}_g + [C_M]\{\dot{V}\} + [C_D]\{(V + V_c - \dot{U} - \dot{U}_g) \\
 & | V + V_c - \dot{U} - \dot{U}_g | \} \\
 & [\bar{M}] = [M + \rho(C_m - 1)\nabla] \\
 & [C_M] = [\rho C_m \nabla], [C_D] = [0.5\rho C_d A]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\{U\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{\ddot{U}\}$ 는 타워의 수평 상대변위, 속도 그리고 가속도 벡터; u_m 는 계류점의 수평변위; $[M]$ 은 구조 질량행렬; $[C]$ 은 구조 감쇠행렬; $[K]$ 은 타워 및 기초의 강성행렬(자중으로 인한 P- Δ 영향 포함); $R(u_m)$ 은 계류장치의 비선형 복원력; $\{1_m\}$ 은 계류점 운동에 대해서는 1, 나머지는 모두 0인 요소들로 구성된 상수벡터; \dot{U}_g , \ddot{U}_g 는 각각 지반의 수평속도와 가속도; $\{V\}$, $\{\dot{V}\}$ 는 각각 물입자의 속도와 가속도 벡터; $\{V_c\}$ 는 조류의 속도벡터; ρ 는 바닷물의 밀도; $[\nabla]$, $[A]$ 는 각각 타워에 의해 밀려난 물의 부피와 유동 방향으로 타워의 사영면적을 나타내는 대각행렬; C_m , C_d 는 각각 유체의 관성계수와 점성저항계수를 나타낸다.

3. 지진에 의한 지반운동

지진의 지속기간은 보편적으로 10-30초 정도로 짧기 때문에, 본 논문의 가이드 타워처럼 고유진동 주기가 비교적 긴 구조물은($T_1=26$ 초) 동적거동이 steady state에 도달하기 이전에 지진의 가진이 끝나게 된다. 이러한 구조물에 대한 지진해석에 있어서는 지반운동 및 구조물 거동의 비정상과정 특성을

적절히 고려하여야 한다.

본 연구에서는 지진의 비정상과정 수평가속도, $\ddot{U}_g(t)$ 를 다음과 같이 모형화 했다.

$$\ddot{U}_g(t) = \varphi(t)r(t) \tag{2}$$

여기서 $\varphi(t)$ 는 지반운동의 비정상특성을 나타내는 시간포락함수이고, $r(t)$ 는 정상과정 성분이다. 본 연구에서 정상과정 성분의 추계론적 특성을 자기상관함수(auto-correlation function), $R_{rr}(\tau)$ 로 나타내어 해석을 수행하였는데 이는 다음식의 지반가속도에 대한 filtered Kanai-Tajimi 스펙트럼,(Fig. 3)^(10,11) $S_{rr}(\omega)$ 으로부터 유도하였다.

$$\begin{aligned}
 S_{rr}(\omega) = & \frac{S_0 \omega^4 (\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2)}{[(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2][(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2]} \\
 & -\infty < \omega < +\infty
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 S_0 =constant power spectral density; ω_g , ξ_g =각각 지반의 고유진동수와 지반진동의 감쇠율을 나타낸다. ω_f 와 ξ_f 는 filter의 특징을 나타내는 상수 들인데, 이로 인해서 주파수가 0인 근처에서 지반 속도와 지반변위의 스펙트럼이 유한하게 됨을 알 수 있다. 식 (3)에 대해서 inverse Wiener-Khinchine 변환을 하면 자기상관함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.(Fig. 4)⁽⁶⁾

$$\begin{aligned}
 R_{rr}(\tau) = & e^{-\omega_g^2 \xi_g |\tau|} \{ a_g \cos(\omega_{Dg} |\tau|) + b_g \sin(\omega_{Dg} |\tau|) \} + \\
 & e^{-\omega_f^2 \xi_f |\tau|} \{ a_f \cos(\omega_{Df} |\tau|) + b_f \sin(\omega_{Df} |\tau|) \} \\
 \omega_{Dg} = & \omega_g \sqrt{1 - \xi_g^2} \\
 \omega_{Df} = & \omega_f \sqrt{1 - \xi_f^2}
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 a_g , b_g , a_f 와 b_f 는 상수로서, 문헌[8]에 보인 바와 같이 주어진 상수들(S_0 , ω_g , ξ_g , ω_f 와 ξ_f)로부터 산정된다.

4. 비선형 항의 선형화

식 (1)은 두가지 비선형 항을 포함한다. 하나는 계류장치의 비선형 복원력이고, 다른 하나는 유동과 구조물의 속도와 관련된 비선형 점성저항력이다. 비선형 복원력의 선형화과정에서는, 복원력곡선을

식 (5)와 같이 계류점변위(u_m)의 5차 다항식으로 근사화하고 거동을 Gaussian 과정으로 가정한 후, 등가선형화 기법으로⁽⁹⁾ 식 (6)과 같이 선형화 했다.

$$R(u_m) = k_0 u_m + d_1 u_m^3 + d_2 u_m^5 \quad (5)$$

$$R(u_m) \approx k_{eq} u_m + R_0 \quad (6)$$

$$k_{eq} = k_0 + 3d_1(\bar{u}_m^2 + \langle \sigma_{um}^2 \rangle) + 5d_2(\bar{u}_m^4 + 6\bar{u}_m^2 \langle \sigma_{um}^2 \rangle + 3\langle \sigma_{um}^4 \rangle) \quad (7)$$

$$R_0 = -2d_1 \bar{u}_m^3 - 4d_2(\bar{u}_m^5 + 5\bar{u}_m^3 \langle \sigma_{um}^2 \rangle) \quad (8)$$

여기서 k_{eq} 는 선형화 강성이다. \bar{u}_m 는 u_m 의 평균 값이고, $\langle \sigma_{um}^2 \rangle$ 은 u_m 의 분산값에 대한 temporal average(기호 $\langle \cdot \rangle$ 로 표시함)를 나타낸다.

위와 같은 등가선형화 기법으로, 식 (1)에 나타난 비선형 점성저항력도 다음과 같이 선형화할 수 있다.⁽⁹⁾

$$[C_D]\{V - \dot{U} - \dot{U}_g + V_c\} | V - \dot{U} - \dot{U}_g + V_c | \approx [C_1]\{Z\} + \{C_2\} \quad (9)$$

$$\{Z\} = \{V - \dot{U} - \dot{U}_g\} \quad (10)$$

$$C_{1i} = C_{Di} [\sqrt{8/\pi} \langle \sigma_z \rangle \exp(-0.5p^2) + 4V_c \text{erf}(p)]_i \quad (11)$$

$$C_{2i} = C_{Di} [\sqrt{2/\pi} \langle \sigma_z \rangle V_c \exp(-0.5p^2) + 2\langle \sigma_z^2 \rangle + V_c^2] \text{erf}(p)_i \quad (12)$$

여기서 Z_i 는 절점 i 에서 조류의 영향을 제외한 물입자의 구조물에 대한 상대속도로서 비정상 zero-mean Gaussian 과정이라 가정하였다. $\langle \sigma_{zi} \rangle$ 는 Z_i 의 표준편차에 관한 temporal average이며 $p_i = V_c / \langle \sigma_{zi} \rangle$; $\text{erf}(\cdot)$ 는 error function이다. 식 (5) - (12)의 선형화 과정에서 σ_{um} 와 σ_{zi} 가 각각 시간종속이기 때문에, 선형화 계수들(k_{eq} , R_0 , $[C_1]$, $[C_2]$)도 시간종속인 값을 가지게 된다. 본 연구에서는 계산상의 편의성을 도모하기 위하여 시간종속인 선형화계수들을 지진의 유효지속기간 내에서 temporal average를 취한 시간불변의 값으로 사용하였다. Fig. 5에 보인 지진의 시간포락함수에서(Case 1과 Case 2) 지진의 유효지속기간을 15초로 택하였다. 선형화계수들은 구조물 거동의 함수이므로 반복적인 계산과정을 통하여 더 적절한 값으로 수정되게 된다.

식 (6)과 식 (9)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 선형화된 운동방정식을 얻는다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{1\}\ddot{U}_g + [C_M]\{\dot{V}\} + [C_1]\{V\} + \{C_2\} - \{1_m\}R_0 \quad (13)$$

여기서 $[C] = [C + C_1]$, 그리고 $[K]$ 는 강성행렬에 계류장치의 등가선형강성(k_{eq})이 포함된 것이다. 이 식에서 지반의 속도와 관련된 하중항인 $[C_1]\{\dot{U}_g\}$ 항은 무시하였는데, 이는 지반가속도에 의한 하중($[M]\{1\}\{\ddot{U}_g\}$)에 비하여 거동에 대한 영향력이 매우 적을 것으로 판단된 때문이다.⁽⁸⁾

식 (13)은 선형식이므로 이의 해는 전체응답을 다음과 같이 지진하중과 파랑하중에 대한 동적거동들과 조류하중으로 인한 정적거동으로 나누어 구할 수 있다.

$$\{U\} = \{X_w\} + \{X_E\} + \{X_S\} \quad (14)$$

여기서 $\{X_w\}$ 는 파랑에 의한 정상거동; $\{X_E\}$ 는 지진에 의한 비정상거동; 그리고 $\{X_S\}$ 는 조류에 의한 정적거동을 각각 나타낸다. 본 연구에서 파랑하중에 대한 동적응답은 문헌[9]에서와 같이 파고스펙트럼을 사용한 주파수영역의 정상거동해석을 수행하여 구하였다. 지진에 대한 시간영역의 비정상해석법은 문헌[8] 및 다음 절에 기술한 바와 같다.

한편 식 (5)-(12)의 선형화 과정에서 사용되는 구조물의 응답을 식(14)의 관계식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{u}_m = X_{Sm} \quad (15)$$

$$\sigma_{um}^2 = E\{X_{wm}^2(t)\} + E\{X_{Em}^2(t)\} \quad (16)$$

$$\sigma_{zi}^2 = E\{V_i^2\} - 2E\{V_i \dot{X}_{wi}\} + E\{\dot{X}_{wi}^2\} + E\{\dot{U}_g^2\} + 2E\{\dot{U}_g \dot{X}_{Ei}\} + E\{\dot{X}_{Ei}^2\} \quad (17)$$

여기서 X_{Sm} 은 계류점의 정적변위; X_{wm} , X_{Em} 은 각각 파랑과 지진에 의한 계류점의 동적변위; \dot{X}_{wi} , \dot{X}_{Ei} 는 각각 파랑과 지진에 의한 절점 i 의 속도변위; V_i , \dot{U}_g 는 각각 절점 i 에서 물입자 속도와, 지진에 의한 지반의 속도를 나타내고; $E\{\cdot\}$ 는 기대값(expected value)를 의미한다. 식(17)의 산정에 있어서 처음 3항은 문헌[2],[9]의 파랑에 대한 주파수해석방법에 나타난 바와 같고, 나머지 3항은 문헌[8]의 지진만을 고려한 경우에 대한 비정상해석방법에서 제시한 바와 같다.

5. 지진에 대한 비정상과정 거동해석

식 (13)에서 지진하중에 대한 운동방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$[\bar{M}]\{\ddot{X}_E\} + [\bar{C}]\{\dot{X}_E\} + [\bar{K}]\{X_E\} = -[\bar{M}]\{1\}\ddot{U}_g \quad (18)$$

식 (18)의 해는 서로 직각인 모드드를 중첩하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{X_E\} = [\Phi]\{Y\} \quad (19)$$

여기서 $[\Phi]$ 는 비감쇠 자유진동모우드 행렬이고, $\{Y\}$ 는 모드드좌표 벡터이다. 식(18)에서 강성행렬 $[\bar{K}]$ 가 계류장치의 비선형복원력에 대한 등가선형 강성(k_{eq})을 포함하므로 식 (19)에서 사용한 모드드 행렬은 반복과정으로 구해야 한다. 본 연구의 예제 해석 결과에 의하면 이 반복과정은 k_{eq} 에 대한 허용 상대오차 0.001를 기준하여 3회 이하로 수행되었다. 식(18)을 모드드좌표 $\{Y\}$ 에 대한 독립 운동방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\ddot{Y}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{Y}_n + \omega_n^2Y_n = -\Gamma_n\ddot{U}_g(t) \quad (20)$$

$$\Gamma_n = \langle \Phi \rangle_n^T [\bar{M}] \{1\} / M_n^*$$

여기서 ω_n , ξ_n 은 각각 n 번째 모드드의 주파수와 그 감쇠율이고 Γ_n 는 모드드 참여계수; M_n^* 는 모드드 질량이다.

비정상과정의 거동은 시간중속 분산(variance)으로써 나타낼 수 있다. Convolution integral 기법으로 식 (20)의 모드드좌표들을 구한 후, 이들에 대한 시간중속 분산값을 다음 식과 같이 산정하였다.

$$E[Y_m(t)Y_n(t)] = \Gamma_m\Gamma_n \int_0^t \int_0^t h_m(t-\tau_1)h_n(t-\tau_2) \varphi(\tau_1)\varphi(\tau_2) \times R_{rr}(\tau_1-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 \quad (21)$$

$$E[\dot{Y}_m(t)\dot{Y}_n(t)] = \Gamma_m\Gamma_n \int_0^t \int_0^t \dot{h}_m(t-\tau_1)\dot{h}_n(t-\tau_2) \varphi(\tau_1)\varphi(\tau_2) \times R_{rr}(\tau_1-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 \quad (22)$$

여기서 $h_n(t)$ 는 n 번째 모드드의 impulse response function이고 $\dot{h}_n(t)$ 는 $h_n(t)$ 의 시간미분을 나타낸다. 즉,

$$h_n(t) = \begin{cases} \frac{1}{\omega_{Dn}} e^{-\xi_n\omega_n t} \sin\omega_{Dn} t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (23)$$

식 (21), (22)등의 이중적분식은 $h(t)$ 와 $R_{rr}(\tau)$ 가 시간에 대한 복소지수함수이므로 $\varphi(\tau)$ 를 지수함수로 나타낸다면 해석적인 방법으로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 시간포락함수, $\varphi(\tau)$ 를 문헌[6]과 [8]에서 처럼 다음의 지수함수 꼴로 나타내었다.

$$\varphi(t) = \frac{e^{-at} - e^{-bt}}{c}, \quad (b > a > 0) \quad (24)$$

여기서 a , b 는 지진기록으로부터 결정할 수 있는 상수들이며 c 는 시간포락함수의 최대치를 1로 하도록 하는 상수이다. 문헌[8]에 식 (21),(22) 등의 이중적분을 해석적으로 수행하는 과정이 제시되었다.

6. 동적 예상 최대응답

식 (13)의 해를 식 (14)와 같이 3가지 응답성분으로 나누어 해석하였으므로, 파랑과 지진하중에 대한 동적해석을 각각 따로 수행하여 다음과 같이 각 응답의 최대값을 구하였다.

파랑하중에 대한 주파수영역해석의 정상과정 문제에서는, 문헌[12]에서 제시한 바와 같이, 타워의 거동이 Gaussian과정이라는 가정을 기초로 하여 다음 식으로부터 응답의 예상최대치를 산정하였다.

$$E\{|X_{W,max}|\} = \sigma_{XW}(\sqrt{2\ln(2\nu_0^+T_W)} + 0.5772/\sqrt{2\ln(2\nu_0^+T_W)}) \quad (25)$$

여기서 $|X_{W,max}|$ = 동적 최대응답의 절대값; σ_{XW} = 응답의 표준편차; ν_0^+ = 응답이 양의 방향으로 0(zero)를 통과하는 비율; 그리고 T_W 는 파랑의 지속기간이다.

지진하중에 대한 비정상과정 문제에서는 문헌 [13]에 제시된 방법을 이용하여 다음과 같이 동적 응답의 예상최대값을 산정하였다.

$$E\{|X_{E,max}|\} = \sigma^*(Q + 0.5772Q^{1-a}) \quad (26)$$

$$Q = (a\ln\bar{N})^{1/a}$$

$$\bar{N} = 2 \int_0^T \nu^+(0,t) dt$$

$$\nu^+(0,t) = \frac{\sigma_{X_E}(t)}{2\pi\sigma_{X_E}(t)} (1 - \rho^2(t))^{1/2}$$

여기서 $\nu^+(0,t)$ = 시간 t 에서 응답의 평균 zero up-

crossing rate; T_E = 지진의 가진기간; $\rho(t) = X_E(t)$ 와 $\dot{X}_E(t)$ 사이의 상관관계수; 그리고 α 와 σ^* 는 응답의 극값분포를 Weibull분포로 나타낼 때 결정되는 상수들인데, 여기서 Weibull분포함수는 다음과 같다.

$$F_{X_{E\max}}(x; T_E) = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{x}{\sigma^*}\right)^\alpha\right\} \quad (27)$$

응답의 극값분포는 $X_E(t)$ 를 narrow band process라고 하면 시간구간 $[0, T_E]$ 에서 다음식으로 구할 수 있다.

$$F_{X_{E\max}}(x; T_E) = 1 - \frac{\int_0^{T_E} v^+(x, t) dt}{\int_0^{T_E} v^+(0, t) dt} \quad (28)$$

여기서 $v^+(x, t)$ 는 시각 t 에서 거동이 양의 방향으로 level x 를 통과하는 비율인데, 문헌[13]의 방법을 이용하여 $X_E(t)$ 와 $\dot{X}_E(t)$ 의 분산 및 공분산(covariance)으로부터 다음과 같이 계산하여 적용하였다.

$$v^+(x, t) = \exp\left(-\frac{A_{11}x^2}{2}\right) \left[1 - (A_{12}\sqrt{2\pi}/A_{22})x \exp\left(-\frac{A_{12}^2x^2}{2A_{22}}\right) \times \left\{1 - \Psi\left(\frac{A_{12}x}{\sqrt{A_{22}}}\right)\right\}\right] / (2\pi A_{22}\sqrt{B}) \quad (29)$$

여기서 $\Psi(\cdot)$ = 표준분포함수

$$\rho = \rho(t) = E\{X_E(t) \cdot \dot{X}_E(t)\} / (\sigma_{X_E}(t)\sigma_{\dot{X}_E}(t))$$

$$B = B(t) = \sigma_{\dot{X}_E}^2(t)\sigma_{X_E}^2(t)(1 - \rho^2)$$

$$A_{11} = A_{11}(t) = \sigma_{\dot{X}_E}^2(t)/B$$

$$A_{12} = A_{12}(t) = -\rho\sigma_{X_E}(t)\sigma_{\dot{X}_E}(t)/B$$

$$A_{22} = A_{22}(t) = \sigma_{X_E}^2(t)/B$$

7. 예제해석 및 검토

본 연구에서 예제해석을 위하여 선정된 가이드 타워의 구조는 문헌[9]에서 사용한 자료와 동일하다. 실제 구조물은 3차원구조이나 Fig. 1(b)와 같이 9개의 수평방향 자유도를 가진 단순한 구조모형으로 이상화하였다. 구조물의 질량은 집중질량으로 환산하여 해당 절점에 적용하였으며, 구조물의 유동방향 사영면적도 각 절점에서 산정하였다. 파동력 산정시 관성계수 및 점성계수는 각각 2.0 및 1.4를, 해수의 밀도는 $0.002(\text{kips} \cdot \text{sec}^2/\text{ft}^4)$ 을 사용하였다. 수심 1000

ft에 설치된 구조물의 전체 높이는 1100 ft이며, 수면 아래 50 ft 지점의 타워구조에 방사상으로 부착된 20개의 계류선들에 의한 계류장치의 수평방향 복원력은 계류점의 수평변위에 따라서 Fig. 2와 같이 비선형이다. 계류장치의 초기강성은 200 kips/ft이나 계류점의 변위가 15 ft 이상에서는 강성이 점점 약화되도록 기하적비선형으로 설계된 경우이다. 타워 기초부의 회전강성은 타워의 강성에 비하여 매우 작은 값이며 이를 등가 회전스프링으로 모형화하였고, (14) 기초부의 수평, 수직방향은 구속하였다. 따라서 이 구조물은 강제회전운동에 대하여 상당히 유연한 특징이 있다.

식 (3)의 지진가속도 스펙트럼에 사용한 상수들은 문헌[4]와 [10]에서와 같이 견고한 지반조건을 가

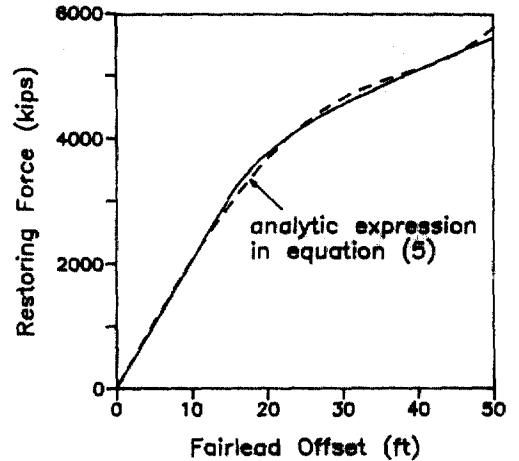


Fig. 2. Restoring force of the guyline system

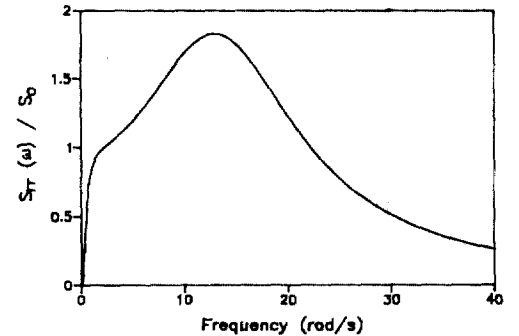


Fig. 3. Filtered Kanai-Tajimi spectrum of earthquake

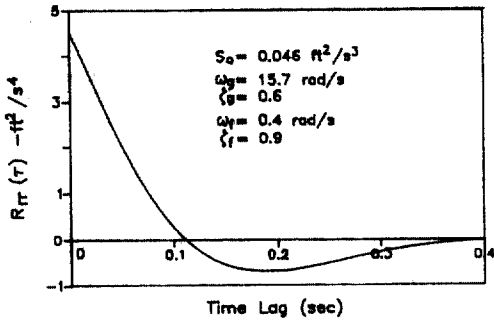


Fig. 4. Auto-correlation function of ground acceleration

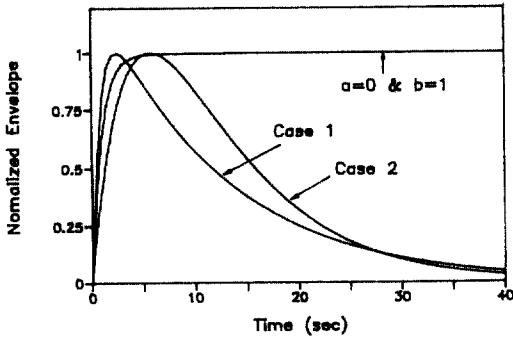


Fig. 5. Envelope functions

정하여 $\omega_g = 15.7 \text{ rad/s}$, $\xi_g = 0.6$ 그리고 $\omega_r = 0.4 \text{ rad/s}$, $\xi_r = 0.9$ 이다. S_0 의 값은 $0.046 \text{ ft}^2/\text{s}^3$ 을 주로 적용하였는데, 이 수치는 1940년에 발생한 El-Centro 지진의⁽¹⁵⁾ 남북방향성분과 유사한 강도에 해당한다. 이외에 지진강도를 50% 증가시킨 $S_0 = 0.046 \times (1.5)^2 = 0.103 \text{ ft}^2/\text{s}^3$ 의 경우도 아울러 적용하였다. Fig. 3은 지진가속도 스펙트럼의 모양을 나타내고, 이의 자기상관함수를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3에 보인 지진가속도의 지배적인 주파수 범위를 고려하여 본 연구에서는 처음 6개의 자유진동 모우드를 써서 동적해석을 수행하였는데, 이들의 고유진동수(고유주기)는 각각 0.244 rad/s (26초), 2.04 rad/s (3.1초), 6.28 rad/s (1초), 13.7 rad/s (0.46초), 21.4 rad/s (0.29초), 그리고 36.2 rad/s (0.17초)로 나타났다. 각 모우드의 구조감쇠율(structural damping ratio to critical)은 5%로 가정하였다.

지진가속도의 분산(variance)이 시간변화함에 따라서 변하는 포락함수는 두개의 지진기록으로부터

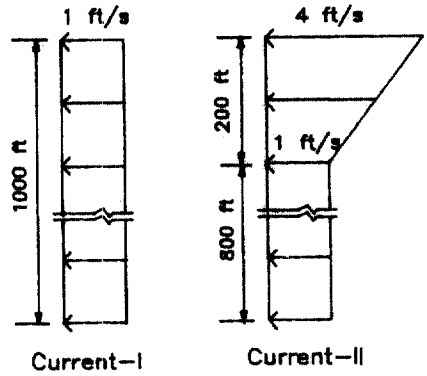


Fig. 6. Current velocity profiles in water depth

개략적으로 산정하였다. 하나는 1940년 El-Centro 지진의 N-S성분의 시간이력곡선으로부터 식(24)의 계수들을 $a = 0.083$, $b = 1.166$ 로 산정하였고, 다른 하나는 1971년 San Fernando 지진의 S16E 성분으로부터 $a = 0.126$, $b = 0.234$ 로 산정하였다. 이들은 각각 식(24)에 적용되어 시간포락함수를 결정하며 Fig. 5에 Case 1과 Case 2의 곡선으로 보인 바와 같다. 특히 $a = 0$ 로 한 경우는 시간의 증가로 식(2)의 $\phi(t)$ 가 1로 수렴하여 지진가속도가 정상과정으로 근사되므로 비정상과정해석 방법을 이용한 결과를 주파수해석의 결과와 비교하여 검증할 수 있다.

문헌[15]에 의하면 지진의 강도가 클수록 작용기간이 길어지는데 본 연구에서는 El-Centro 지진(1940년, 규모 7.1)의 경우를 참고로 하여 지진의 가진기간을 25초로 가정하였다. 식(5)-(12)의 선형화과정에서 사용한 지진의 유효지속기간은 포락함수 극대값의 40% 수준을 취하여 15초로 가정하였다. 폭풍의 파고조건에서 파랑의 지속기간은 수시간이지만 지속기간에 따른 거동의 최대값의 증가율은 1시간 이상에서는 완만한 것으로 발표된 바 있다.⁽²⁾ 본 연구에서 파랑하중은 중급의 파고조건에 대한 것인데 이를 감안하여 파랑의 지속기간을 1시간으로 가정하였다.

Table 1은 지진하중만 작용하는 경우에 주파수영역해석의 결과와 비정상과정해석의 결과를 비교한 것인데, 갑판의 변위(절점1), 기초면에서의 전단력 그리고 절점8의 휨모멘트에 대한 예상최대값들을 보인 것이다. 문헌[2],[4]의 주파수영역해석에서는 최대응답을 개략적으로 표준편차의 3곱을 사용하였

Table 1. The maximum responses to earthquake by different methods; units, ft-kips; $S_0=0.046$; $T_e=25$ sec

Methods	Env. Cases	Deck Displacement	Base Shear Force	Bending Moment at 8
Freq. Domain		4.824 (2.530)*	3.23 E3 (1.10 E3)*	8.38 E5 (3.01 E5)*
Nonstationary	1	2.907	2.10 E3	5.27 E5
	2	3.186	2.36 E3	5.98 E5

*the value in parenthesis is the standard deviation.

다. 식(25)와 같은 형태의 Davenport방법으로⁽¹²⁾ 산정한 Table 1의 결과에서도 전단력, 휨모멘트 등이 문헌들과 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 가이드 타워는 첫번째 고유주기가 매우 큰 때문에 최대변위의 표준편차에 대한 비율은 약 2로 작게 나타났다. 비정상과정해석에서는 지진의 강도가 같더라도 Case 1과 Case 2처럼 포락함수가 다를 경우 응답의 최대값은 다소 차이를 보인다. 비정상과정해석과 주파수영역해석의 결과를 비교하면 변위, 부재력등 전반적으로 비정상과정해석에 의한 응답의 최대값이 주파수해석방법에 의한 것보다 약 30-35% 더 작게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 지진만 작용하는 경우에 비정상과정 방법으로 구한 거동들의 시간중속 분산값들을 보인 것이다. 시간포락함수의 증감에 따라 거동의 분산값도 전반적으로 증감함을 볼 수 있는데, 주로 5-10초에서 큰 값이 분포한다. Fig. 5와 연관시켜 보면 Case 1, Case 2 등의 포락함수에 따라서 거동의 비정상특성이 주로 결정됨을 알 수 있다. 또한, 인위적으로 계수들을 $a=0$ & $b=1$ 로 한 경우는, 포락함수가 1로 접근하여 시간이 증가함에 따라 일정한 값(즉, Table 1의 표준편차 제곱)에 수렴하므로써 본 연구의 비정상과정 해석방법이 검증되었다.

본 연구는 지반가속도가 중력가속도단위로 0.33 정도되는 강진(1940년 El-Centro지진) 적용하는데, 이와 더불어 고려될 수 있는 중급의 파고조건은 문헌[16]에 발표된 바를 참조하였다. 즉, 멕시코만의 폭풍(severe storm)에 대한 파고조건을 통계적 하한치인 $H_s=30$ ft를 상한값으로 하여 중급의 파고조건을 유의파고(H_s) 20 ft - 30 ft로 정하였다. 파랑

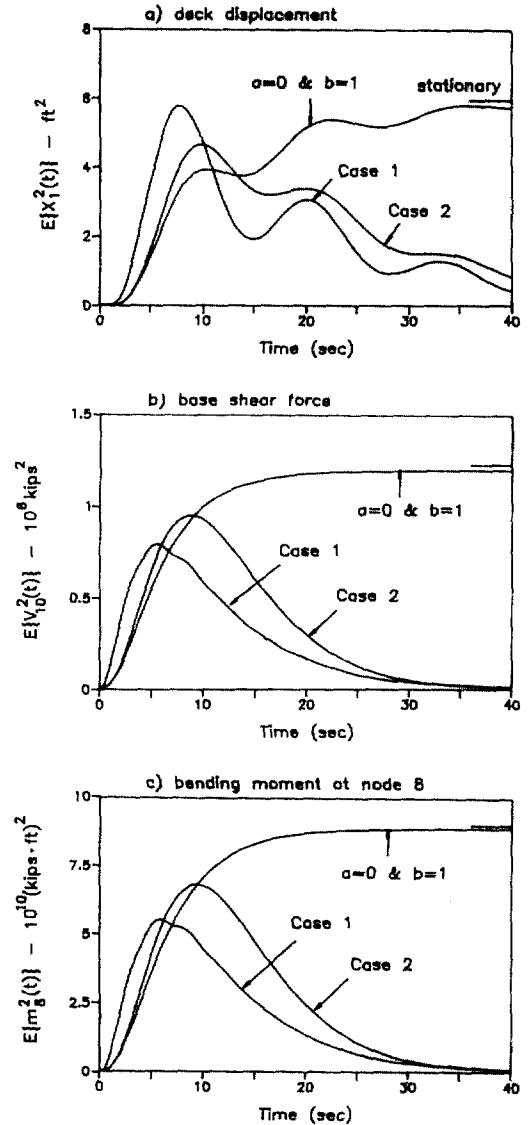


Fig. 7. Nonstationary variances of earthquake response(no wave; no current)

은 폭풍에 의하여 생성된 파로 가정하였으며 파고의 불규칙 특성은 Pierson-Moskowitz 파고스펙트럼⁽¹⁷⁾을 사용하여 구하였다. 그러나 더 큰 강진($S_0=0.103$ ft^2/s^3)과 큰 파랑($H_s=30$ ft)이 동시에 발생할 확률은 매우 낮을 것으로 판단된다. 한편 지진과 동시에 고려될 수 있는 조류조건은 문헌[9]를 참고로 하여 Fig. 6과 같이 속도 1ft/s의 tidal current만이 전수심에 분포한 경우(Current-I)와, 위의 조건에 바

Table 2. Hydrodynamic damping ratios for each mode due to earthquake, wave and current

S_0 (ft ² /s ³)	H_s (ft)	V_c (ft/s)	ξ_{h1} (%)	ξ_{h2} (%)	ξ_{h3} (%)
0.046	0	0	10.5	1.1	0.4
	20.	0	16.8	1.6	0.4
	30.	0	19.5	1.9	0.5
	0	1.0	24.6	2.9	1.0
	0	2.0	48.6	6.0	1.9

* V_c =tidal current velocity

Table 3. The response contributions of current, wave and earthquake loadings; units, ft-kips

Responses	Env. Cases	X_s	$ X_w _{max}$	$ X_e _{max}$	U_{max}
Deck Displacement	1	6.830	5.805	2.053	14.688
	2	6.736	5.807	2.147	14.690
Base Shear Force	1	0.37E3	1.80E3	1.90E3	4.07E3
	2	0.36E3	1.80E3	2.12E3	4.28E3
Bending Moment at Node 8	1	0.62E5	5.33E5	4.67E5	10.62E5
	2	0.59E5	5.34E5	5.23E5	11.16E5

*Note: $S_0=0.046$ ft²/s³ and $H_s=20$ ft with Current-II

Table 4. Total expected maximum responses to earthquake, wave and current loadings; units, ft-kips

S_0	H_s	Current Profile	Deck Displacement	Base Shear Force	Bending Moment at 8
0.046	0	I	4.343	2.18E3	5.36E5
	20	II	14.688	4.07E3	10.62E5
	30	II	22.272	4.57E3	11.74E5
0.103	0	I	5.914	3.17E3	7.81E5
	20	II	16.075	5.04E3	12.96E5
	30	II	23.603	5.53E3	14.06E5

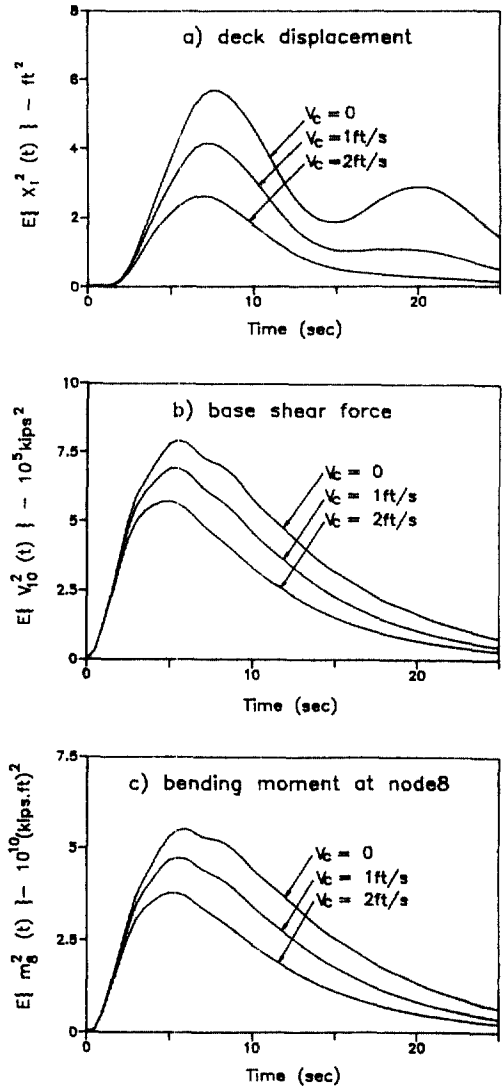


Fig. 8. Nonstationary variances of earthquake response under various tidal current conditions(no wave).

람에 의해 생성된 해류가 합해진 경우(Current-II)에 대하여 해석하였다.

Table 2는 지진과 파랑하중 또는 조류하중의 조합이 작용하는 경우에 구조물 응답에 대한 유체동력학적 감쇠율(hydrodynamic damping ratio)을 보인 것이다. 이것은 구조물의 유체에 대한 상대운동에 기인하는데, 모우드방정식의 구조적 감쇠율(5%)에 더해진다. 첫번째 진동모우드에 대한 유체동력학적

감쇠율은 파고조건에 따라 10%-20%로, 조류조건에 따라서는 25%-50%로 나타났다. 파고조건보다는 조류조건에 따라 감쇠작용이 크게 발생하는데, 전단력이나 휨모멘트와 관련된 두번째 진동모우드에서도 3%-6%가 나타났다. 문헌[18]은 주파수해석법을 사용하여 지진응답에 대한 조류의 영향을 분석하였는데, 이 문헌의 결과도 본 연구와 유사한 경향을 보였다. 그러나 파고조건에 따라서는 두번째 모우드 이상에서 유체동력학적 감쇠율의 영향은 크지 않다. Fig. 8은 지진과 조류하중이 작용할 경우에, 조류속도(tidal current)의 크기에 따른($V_c=0, 1, 2$ ft/sec) 지진응답들의 시간변화 분산을 보인 것이다. 조류조건이 증가함에 따라 변위 및 부재력에서 전반적으로 감쇠효과가 크게 나타나서 지진응답이 감소됨을 알 수 있다.

Table 3은 지진과 파랑 및 조류하중이 함께 작용할 때 각각의 하중성분에 의한 거동의 최대응답들을 비교한 것이다. 가이드 타워는 변위에 대해서 유연한 구조적 특징 때문에 조류하중에 의한 갑판변위가 크게 나타나고 있으나 전단력과 휨모멘트는 약 5-10%로 상당히 작다. 파랑은 정상과정이므로 최대응답을 식(25)로써 산정하였는데 변위, 부재력 등 전반적으로 전체응답의 40-50%를 차지하여 영향이 크다. 본 연구의 비정상과정 해법으로 구한 지진하중에 대한 최대응답은 변위에 있어서는 전체응답의 약 15%로 그 영향이 크지 않으나, 전단력, 휨모멘트 등에 대해서는 약 45-50%로 파랑의 영향과 거의 동등하며 특히 기초부 전단력에서는 지진은 가장 큰 하중성분임을 알 수 있다.

Table 4는 지진, 파랑 및 조류하중이 작용할 때 지진의 강도변화에 따른 거동들의 전체응답을 나타낸 것이다. 지진강도가 50% 증가하면($S_0=0.103$ ft^2/s^3), 지진하중만 작용한 경우는 변위는 약 40%, 부재력은 50% 증가하지만, 지진, 파랑 및 조류하중이 함께 작용한 경우는 변위는 약 10%, 부재력은 25% 증가함을 보였다. 따라서 지진과 파랑 및 조류하중을 함께 고려하면 지진의 강도변화에 따른 전체응답의 차이는 크지 않다.

8. 결 론

중급의 파랑하중과 조류하중의 작용 중에 강한

지진이 발생했을 때에 대한 해양 가이드 타워의 비선형 동적거동해석방법을 개발하였다. 선형화 운동방정식을 바탕으로 파랑하중에 대해서는 정상과정의 주파수영역 해석을 수행하였으며, 지진하중에 대한 응답은 본 연구에서 증점적으로 연구한 비정상과정 해석방법을 적용하여 구하였다. 예제해석 결과, 지진에 대한 비정상과정해석의 최대응답이 정상과정해석에 비하여 상당히 작은 값으로 나타났다. 파랑 및 조류로 인해서 구조응답의 유체동력학적 감쇠율이 크게 증가하는데, 특히 조류의 영향이 지배적이다. 파랑과 지진은 부재력에 있어서 주하중으로 나타났으며 특히 기초부 전단력은 지진의 영향이 크다. 지진해석에 있어서 파랑과 조류하중을 함께 고려하면 전체거동에 지진강도변화의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비지원(과제번호: 923-1300-001-1)에 의한 결과이며, 이 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Mous, L.D., Finn, L.D. and Turner, J.W., "Development of the guyed tower", *J. Petroleum Technology*, APR 1985, pp. 647-654.
2. Penzien, J., Kaul, M.K. and Berge, B., "Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquake", *Computer and Structures*, Vol. 2, 1972, pp. 733-756.
3. Nair, D. et al., "Comparison of spectrum and time history techniques in seismic design of platforms", *Proc. Offshore Tech. Conf.*, Houston, 1980, OTC3823.
4. Brynjolfsson, B. and Leonard, J.W., "Response of guyed offshore towers to stochastic loads: time domain vs frequency domain", *Engineering Structures*, Vol. 10, 1988, pp. 106-116.
5. Lin, Y.K., "Nonstationary excitation and response in linear systems treated as sequences of random pulses", *J. Acoustic Soc. of America*, Vol. 38, No. 3, 1965, pp. 453-460.
6. Shinozuka, M., Itagaki, H. and Hakuno, M., "Dynamic safety analysis of multi-story buildings",

- J. Struc. Div.*, Vol. 94, No. 1, ASCE, 1968, pp. 303-330.
7. Hyun, C.H., Yun, C.B., Lee, D.G. and Shinozuka, M., "Nonstationary response analysis of suspension bridges for multiple support excitations", *Probabilistic Eng. Mechanics*, Vol. 7, 1992, pp. 27-35.
 8. 류정선, "비정상과정의 강한 지진에 대한 해양 가이드 타워의 동력학적 응답해석", *전산구조공학*, 제5권, 제3호, 1992, pp. 127-137.
 9. 류정선, 윤정방, "랜덤 파랑하중에 대한 Guyed Tower의 동적 거동해석", *한국해양공학회지*, 제1권, 제1호, 1987, pp. 57-64.
 10. Kanai, K., "Semi-empirical formula for seismic characteristics of the ground", *Univ. Tokyo Bulletin Earthquake Res. Instit.*, Vol. 35, 1957, pp. 303-325.
 11. Clough, R.W. and Penzien, J., *Dynamics of structures*, McGraw-Hill, New York, 1975, pp. 613-616.
 12. Davenport, A.G., "The distribution of the largest value of a random function with application to gust loading", *Proc. Inst. Civ. Eng.* Vol. 28, 1964, pp. 187-196.
 13. Shinozuka, M. and Yang, J-N., "Peak structural response to nonstationary random excitations", *J. Sound Vibration*, Vol. 16, No. 4, 1971, pp. 505-517.
 14. 류정선, 윤정방, "파랑하중에 대한 Guyed Tower의 동적해석", *대한토목학회논문집*, 제5권, 제4호, 1985, pp. 87-94.
 15. Wiegel, R.L. and Housner, G.W., *Earthquake engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1970, pp. 78-80.
 16. Haring, R.E. and Heideman, J.C., "Gulf of Mexico rare wave return periods", *Proc. Offshore Tech. Conference*, Houston, 1987, OTC3230.
 17. Pierson, W.J. and Moskowitz, L.A., "A proposed spectral form for fully developed wind sea based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii", *J. Geophys. Res.*, Vol. 69, No. 24, 1964, pp. 5181-5190.
 18. Brynjolfsson, S. and Leonard, J.W., "Effect of currents on the stochastic response to earthquakes of multiple degree of freedom models of guyed offshore towers", *Engineering Structures*, Vol. 10, 1988, pp. 194-203.

(接受 : 1993. 6. 7)