

해양구조물의 피로해석시 랜덤응력의 Bandwidth의 영향

Effect of Bandwidth of Random Stresses
on Fatigue Life Estimations of Offshore Structures

柳	程	洙*
Ryu,	Jeong	Soo
尹	楨	邦**
Yun,	Chung	Bang

Abstract

Fatigue life is an important consideration for the design of offshore structures in deep sea and in hostile environments. In this paper, the effect of the bandwidth of random stresses on the fatigue life estimation of fixed offshore structures is investigated. The dynamic analysis is carried out in the frequency domain by using the equivalent linearization technique. Fatigue damages are calculated by two stress cycle counting methods; i.e., the narrow band method and the wide band method using rainflow counting technique. Example studies are carried out for two different structures. Numerical results indicate that the wide band approach, which is more complex but theoretically more appropriate, predicts smaller values of fatigue damages compared with those by the narrow band approach for all seastate conditions. Such trend becomes more apparent for the cases of severe seastates where the bandwidth of random stresses becomes large.

要 旨

심해나 해상조건이 나쁜 지점에서 운영될 해양구조물의 설계시에는 파랑하중에 대한 구조물의 피로수명예측이 매우 중요하다. 본 논문에서는 랜덤파랑하중에 의해 해양구조물에 발생하는 응력의 bandwidth가 구조물의 피로수명예측 결과에 주는 영향에 대하여 연구하였다. 구조물의 동적거동해석은 비선형 점성저항력의 선형화를 통한 주파수영역해법을 사용하여 수행되었으며, 랜덤응력스펙트럼을 구하고 이를 바탕으로 피로해석을 수행하였다. 피로손상의 예측을 위한 랜덤응력 cycle의 산정은 narrow band cycle 산정법과 함께 wide band process에 대하여 더 적절한 rainflow cycle 산정법을 사용하였다. 수심이 다른 지점에 위치한 2개의 구조물을 택하여 예제해석을 수행하였으며, 두 응력 cycle 산정법에 의해 얻은 피로해석 결과들을 비교하고 응력의 bandwidth의 영향을 분석하였다.

1. 서 론

해저 석유자원개발을 위한 노력이 점점 더 심

해와 해상조건이 나쁜 지점으로 확대됨에 따라, 이에 사용되는 해양구조물의 설계시, 피로수명의 예측은 매우 중요한 사항이 되었다. 본 논문에서는 해양구조물의 피로수명예측시 랜덤파랑

* 정희원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 정희원 · 한국과학기술원 부교수, 토목공학과

하중에 의한 응력의 bandwidth의 영향을 연구하였다.

지금까지 해양구조물의 피로해석기법으로는 discrete wave 방법, spectral 방법, 시간-주파수영역혼합법 등이 개발되었다⁽¹⁾. 앞의 두 방법은 규칙파를 이용하여 파고조건과 구조절점에서의 최대응력과의 관계를 구한 후, 이를 바탕으로 피로해석을 수행하는 방법으로 실무에서 많이 사용되고 있는데, 구조물의 동적거동과 파랑하중의 비선형성 및 불규칙성을 충분히 고려하기 어려운 문제점이 있다. 나머지 두 방법은 비교적 최근에 개발된 기법으로 앞의 문제점들을 보완할 수 있는 방법이나, 랜덤파동의 유속 및 가속도의 시계열을 시뮬레이션한 후 구조물의 거동을 시간영역에서 해석하는 기법을 이용하므로 소요되는 계산시간이 너무 큰 단점이 있다.

본 연구에서는 해양구조물의 동적거동을 위의 방법보다 좀 더 적절하고도 효율적으로 해석할 수 있는 방법인 비선형 점성저항력의 선형화를 통한 주파수영역해법을 사용하여 구조해석을 수행하였다^(2,3). 수면에 가까운 응집부에서의 응력 스펙트럼을 여러가지의 랜덤파고조건에 대하여 구했으며, 이에 의한 구조물의 피로손상은 두가지의 응력 cycle 산정방법을 사용하여 계산하였다. 한 방법은 랜덤응력변동성분을 narrow band process 라고 가정한 비교적 간단한 기법⁽⁴⁾이며,

다른 방법은 응력을 실제와 같이 wide band process 로 취급하여 해석하는 기법으로, 응력의 랜덤시계열을 시뮬레이션한 후에 rainflow cycle 산정법을 사용하여 응력 cycle 을 계산하는 방법^(5,6)이다.

예제해석은 동적특성이 다른 2개의 구조물에 대하여 수행되었으며, 두 cycle 산정법에 의한 결과를 비교하고 아울러 응력의 bandwidth가 피로수명에측결과에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 해양구조물의 동적거동 및 응력해석

본 연구에서는 고정해양구조물의 동적 해석을 위하여 그림 1과 같은 집중질량 모형을 사용하였다. 구조물에 가해지는 파동력을 Morison 식⁽⁷⁾으로 산출하고 구조물의 운동방정식을 절점의 수평변위만으로 나타내면, 다음과 같은 운동방정식이 구해진다^(2,3).

$$\begin{aligned}
 [M+M_a]\{\dot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} \\
 = [\rho C_m \nabla]\{\dot{V}\} + \left[\frac{1}{2}\rho C_d A\right] \\
 \{(\dot{V}-\dot{U})|\dot{V}-\dot{U}|\} \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

여기서

- $\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$: 구조물의 수평변위, 속도, 가속도벡터
- $\{V\}, \{\dot{V}\}$: 구조물에 가해지는 유동의 속도 및 가속도 벡터
- $[M], [C], [K]$: 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬
- $[M_a]$: 부가질량(added mass) $= [\rho \nabla (C_m - 1)]$,
- $[A], [\nabla]$: 구조물의 유동방향 투영면적 및 수중의 부피
- C_m, C_d : 유동의 관성 및 점성계수
- ρ : 해수의 밀도

식(1)을 살펴보면 운동방정식은 우변의 점성저항력 때문에 비선형이 됨을 알 수 있다. 랜덤파랑하중에 대한 비선형 거동은 랜덤유동의 시계열을 시뮬레이션한 후 수치적분을 이용하여 시간영역에서 해석하는 방법^(3,8)과 비선형 점성항을 선형화한 후 파동력의 power spectral density 를 바탕으로 한 주파수영역해법^(2,3)으로 해석할 수 있는데, 본 연구에서는 계산상 더 효율적인 후자를 택하였다.

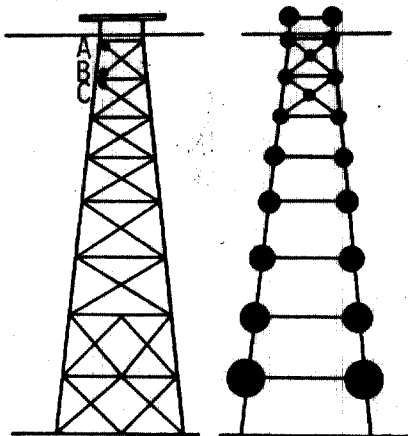


그림 1. Structural Model.

식(1)의 비선형항을 선형화에 따른 오차의 계급의 확률적 기대값을 최소화하는 방법으로 선형화하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$[M+M_c]\{\dot{U}\} + [C+C_c]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = [\rho C_m \nabla]\{\dot{V}\} + [\bar{C}]\{V\} \dots\dots\dots(2)$$

여기서, \bar{C} 는 선형화된 점성계수행렬로서 대각행렬이며 수중에 위치한 절점의 자유도(j)에 대하여 다음과 같다.

$$\bar{C}_{jj} = \frac{1}{2} \rho C_d A_j \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma(\dot{v}_j - \dot{v}_j) \dots\dots\dots(3)$$

식(2)의 우변의 파랑하중에 대한 입력스펙트럼행렬은 선형파를 가정하면 파고스펙트럼 $S_{\eta\eta}(\omega)$ 로 부터 구할 수 있으며, 이에 의한 구조물변위의 응답스펙트럼행렬 $[S_{uu}(\omega)]$ 은 비감쇠자유진동모우드를 이용한 모우드 중첩법을 통하여 구해질 수 있다. 또한 관심있는 절점에서의 응력스펙트럼 $[S_{ss}(\omega)]$ 은 변위와 응력과의 관계행렬 $[D]$ 을 이용하면 아래와 같이 구할 수 있다.

$$[S_{ss}(\omega)] = [D][S_{uu}(\omega)][D]^T \dots\dots\dots(4)$$

응력변동성분 $s_j(t)$ 가 narrow band process이며 평균이 영(zero)이라고 가정할 경우, 피로손상 예측에 필요한 응력변동의 표준편차(σ_{s_j})와 평균주파수(f_j)는 아래와 같이 구할 수 있으며⁽⁴⁾,

$$\sigma_{s_j} = \left(\int_0^\infty S_{s_j s_j}(\omega) d\omega \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(5)$$

$$f_j = \sigma_{s_j} / \sigma_{s_j} = \left(\int_0^\infty \omega^2 S_{s_j s_j}(\omega) d\omega \right)^{\frac{1}{2}} / \sigma_{s_j} \dots\dots\dots(6)$$

응력변동성분을 실제와 같이 wide band process로 취급할 경우, 피로손상예측에 필요한 랜덤응력시계열은 응력스펙트럼 $S_{s_j s_j}(\omega)$ 로부터 아래와 같이 시뮬레이션할 수 있다.^(3,8)

$$s_j(t_i) = \sum_{k=1}^{NPT} \sqrt{2 S_{s_j s_j}(\omega_k)} \cos(\omega_k t_i + \varphi_k) \Delta\omega, \\ l=1, 2, \dots, NPT \dots\dots\dots(7)$$

여기서 $S_{s_j s_j}(\omega)$ 는 양(陽)의 ω 값에 대하여만 정의되는 응력스펙트럼이며, φ_k 는 $0 \sim 2\pi$ 범위에서 등분포를 가지는 랜덤변수이며, NPT 는 응력스펙트럼의 미소주파수구간($\Delta\omega$)의 갯수이며 아울러 구하려는 응력시계열의 미소시간구간(Δt)의 갯수이다.

3. 피로해석의 기본사항 및 피로손상산정

해양구조물의 피로수명예측을 위해서는 수면

근처 절점에서의 최대구부응력(hot spot stress)의 계산이 중요하다. 보통의 경우, 최대구부응력은 그림 1과 같이 각 부재를 보 요소로 단순화한 전체 구조모형을 사용하여 구한 공칭응력(nominal stress)에 용접부의 기하학적 형상을 고려하여 구한 응력집중계수(stress concentration factor)를 곱하여 산정한다. 여기서는 응력집중계수에 관한 여러 실험식 중에서 Kuang의 공식을 사용하였다.⁽⁹⁾

해양구조물의 피로해석은 통상적으로 응력폭(S)과 피로파괴가 일어날 때까지의 응력변동수(N)와의 관계를 나타내는 $S-N$ 곡선을 사용하여 이루어지고 있는데, 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 사용되는 수정된 AWS-X곡선⁽¹⁰⁾을 이용하였으며, 이는 아래와 같은 식으로 나타내진다.

$$N = k S^{-m} \dots\dots\dots(8)$$

여기서 m 과 k 는 상수로서 수정된 AWS-X곡선에서는 응력폭의 범위에 따라 아래와 같은 값을 가지나, 대부분의 경우 해양구조물에서 발생하는 응력폭은 60ksi 이하이므로 이 경우의 값을 사용하여 피로해석을 수행하였다.

S (ksi)	m	k
60 이하	4.38	2.61×10^{11}
60 이상	2.08	1.98×10^7

피로에 의한 구조물의 손상을 계산하는 데는 Palmgren-Miner의 선형피로손상누적모형을 사용하였는데, 이는 어떤 부재에 폭이 S_j 인 응력의 변동이 n_j 번 발생했을 때 피로에 의한 손상률(D)이 다음과 같다는 것이다.

$$D = \sum_j \frac{n_j}{N_j} \dots\dots\dots(9)$$

여기서 N_j 는 $S-N$ 곡선에서 S_j 에 대한 N 값이다.

식(8)과 (9)로부터 파랑하중을 받는 해양구조물의 절점에서 피로손상률은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$D = \frac{1}{k} \sum_i \sum_j \gamma_i S_{ij}^m \dots\dots\dots(10)$$

여기서 γ_i 는 i 번째 파고조건에 대한 발생확률, S_{ij} 는 i 번째 파고조건에 의해 발생된 j 번째 최대구부응력폭이다.

식(10)은 대체로 두가지의 응력 cycle 산정방

표 1. Seastate Statistics

(a) North Sea

H_s (ft)	T_0 (sec)	γ (%)
52.5	17.3	.004
47.5	16.5	.009
42.5	15.8	.037
37.5	14.7	.22
32.5	13.6	.73
27.5	12.7	1.35
22.5	11.6	2.65
17.5	10.3	6.0
12.5	9.1	21.0
7.5	7.7	49.0
2.5	4.4	19.0

(b) Gulf of Mexico

H_s (ft)	T_0 (sec)	γ (%)
32.25	13.2	.002
22.25	11.8	.028
12.25	9.0	2.27
8.25	7.6	4.38
6.25	6.6	12.83
4.25	5.6	28.54
2.25	4.5	51.95

Note : H_s = Significant wave height
 T_0 = Dominant wave period
 γ = Occurrence probability

법에 의해 계산될 수 있다. 하나는 사용의 편리성 때문에 실무에서 많이 사용되는 응력의 narrow band process 가정에 바탕을 둔 방법이며, 다른 하나는 해양구조물의 경우와 같이 응력이 wide band process 인 경우에 더욱 적절한 방법이다. Narrow band 방법에서는, 응력을 평균이 영(零)이고 stationary Gaussian narrow band process 라 가정하면 응력폭이 Rayleigh 분포를 가지게 됨을 이용하여, 피로손상률을 아래와 같이 간단히 산정한다.⁽⁴⁾

$$D_N = \frac{1}{k} (2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \sum_i \gamma_i f_i \sigma_i^m \dots (11)$$

여기서 σ_i 와 f_i 는 식(5)와 (6)으로부터 구해질 수 있으며, $\Gamma(\cdot)$ 는 Gamma 함수이다.

반면, wide band 방법에서는 시뮬레이션 기법을 통하여 랜덤응력시계열을 구한 후, rainflow cycle 산정방법을 사용하여 응력폭과 응력 cycle 수를 직접 세어서 피로손상률(D_w)을 계산한다.

4. 예제 해석 및 검토

본 논문에서는 북해의 수심이 700ft 와 Mexico 만의 수심이 1200ft 되는 두 지점에 위치한 가상의 고정해양구조물(각각 Tower I 과 II)을 예로 하여 랜덤파랑하중에 의한 구조물의 피로해석을 수행하였다. 구조물의 동적해석은 각 구조물에 대해 기본이 되는 4개의 자유진동모우드를 사용하여 수행하였는데, 제 1 고유진동수는 Tower I 과 II 에 대하여 각각 2.02(rad/sec)와 1.35(rad/sec)로 구해졌다. 각 모우드에 대하여 2%의 구조적 감쇠비를 적용하였으며, 제 2절에서 설명한 주파수영역해법으로 거동을 해석하였다. 여기서 사용한 파고조건의 통계적 자료는

표 1에 보였으며, 각 파고조건에 대하여 수정된 Pierson-Moskowitz 파고스펙트럼⁽⁷⁾을 사용하였다.

피로해석은 수면근처에 위치한 3절점(그림 1의 A, B, C)에 대하여 수행하였다. 그림 2에서는 두가지 파고조건에 대해 구한 절점 A에서의 공칭응력스펙트럼을 보였는데, 파랑하중에 의해 발생된 응력의 주파수성분이 구조물의 고유

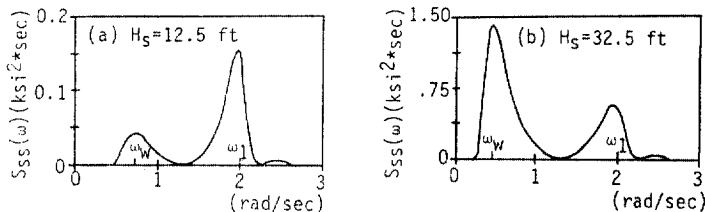


그림 2. Power Spectral Densities of Nominal Stresses at Joint A (Tower I)

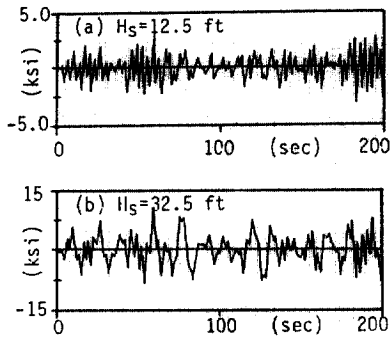


그림 3. Hot Spot Stress Time Histories at Joint A (Tower I)

진동수와 파도의 평균주파수에 걸쳐 분포된 wide band process의 특성을 가짐을 보여주고 있다. 피로손상은 수정된 AWS-X 곡선을 사용하고, 앞에서 설명한 두가지 방법으로 산정하였다. Narrow band 방법에 의한 해석시에는 각 파고 조건에 대하여 식 (11)을 사용하여 피로손상(D_N)을 구하였다. Wide band 방법에 의한 해석시에

는 시뮬레이션의 불확실성을 배제하기 위해서 각 파고조건에 응력스펙트럼으로부터 15개씩의 다른 랜덤응력시계열을 시뮬레이션 하였으며, 각 응력시계열에 대하여 rainflow cycle 산정법을 사용하여 피로손상을 산정한 후 그 결과들을 평균하였다.

그림 3에는 두가지 파고조건에 대하여 구한 절점 A에서의 최대극부응력시계열의 예를 보였으며, 각 파고조건에 대하여 구한 피로손상들을 그림 4에 비교하였다. 그림 4의 결과를 고찰할 때, 전 파고조건에 걸쳐서 wide band 방법으로 구한 피로손상의 평균값(\bar{D}_W)은 narrow band 피로손상(D_N)보다 작았으며, 전자에 표준편차를 더한 값($\bar{D}_W + \sigma_{D_W}$)은 후자(D_N)와 상당히 비슷함을 알 수 있었다.

여러 파고조건에 따른 두 피로해석 결과를 좀 더 효율적으로 비교하기 위하여, 피로손상보정계수(λ)를 wide band 피로손상과 narrow band 피로손상의 비(즉, $\lambda = \bar{D}_W / D_N$)로서 정의하고, 이 값의 경향을 분석하였다. 그림 5는 두 절점에

표 2. Fatigue Life at Each Joint (Years)

Tower Method Joint	Tower I			Tower II		
	Narrow Band	Wide Band	Overall λ	Narrow Band	Wide Band	Overall λ
A	38.4	51.8	0.74	21.6	24.6	0.88
B	131.3	168.4	0.78	141.3	160.5	0.88
C	85.8	113.4	0.76	241.5	276.3	0.87

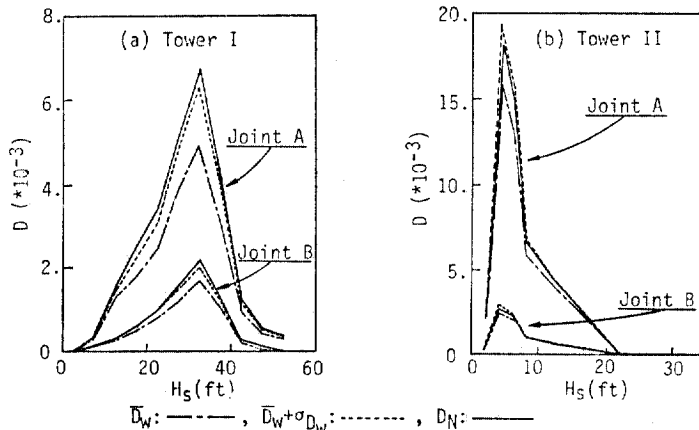


그림 4. Fatigue Damages per Year vs Seastates

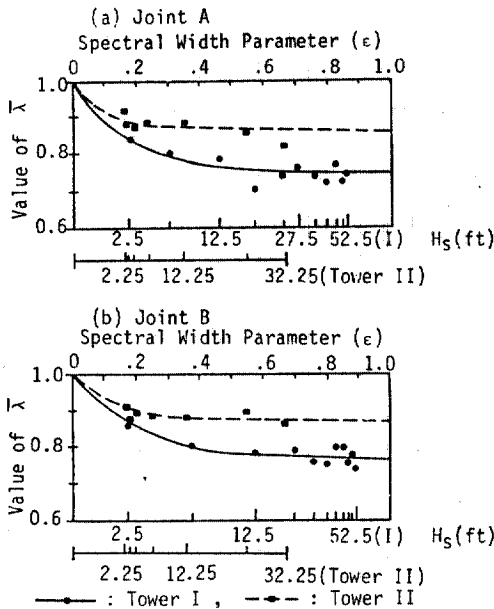


그림 5. Mean Values of Fatigue Damage Correction Factor $\bar{\lambda}$ for $m=4.38$

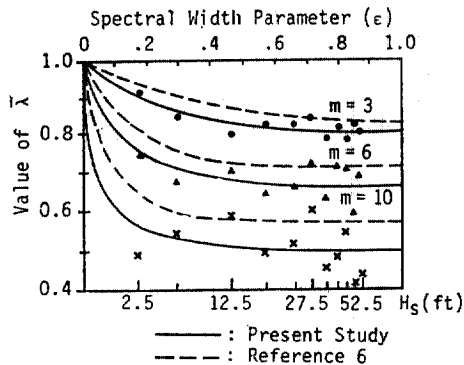


그림 6. Mean Values of Fatigue Damage Correction Factor $\bar{\lambda}$ for $m=3, 6,$ and 10 (Tower I, Joint A)

서 λ 의 평균값($\bar{\lambda}$)을 파고조건과 spectral width 계수(ϵ)에 따라 나타내었는데, λ 의 평균값이 전파고조건에 걸쳐서 1.0 보다 작으며, 파고조건과 spectral width 계수가 증가함에 따라 감소하다가 Tower I 인 경우는 약 0.76, Tower II 인 경우는 약 0.88의 값으로 수렴하는 경향을 보였다. λ 의 분산계수(coefficient of variation)을 고찰한 결과, Tower I 과 II 에 대하여 각각

0.10~0.32와 0.13~0.20 범위의 값을 주고 있어, λ 의 평균치의 신뢰성이 상당히 높음을 알 수 있었다. S-N곡선에서 변수 m 의 다른 값에 대한 λ 의 경향을 좀 더 고찰하면, 그림 6에서 보인 것과 같이 λ 의 평균값은 0.4~0.9 범위의 값을 가지며 m 값이 증가함에 따라 감소함을 보였다. 본 연구에서 구한 λ 의 값은 참고문헌 6의 결과와 비교할 때, 상당히 비슷한 경향을 보이나, 다소 작은 값을 알 수 있었다.

마지막으로 표 2에서는 수정된 AWS-X곡선을 사용했을 때 두 방법으로 해석한 절점의 예상 피로수명과 이로부터 구한 총괄적인 λ 값(overall λ)을 보였는데 총괄적인 λ 값이 Tower I 과 II 에 대하여 대략 0.76과 0.88의 값을 가짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구결과 파고가 커짐에 따라 해양구조물에서 발생하는 랜덤응력의 bandwidth가 증가함을 알았으며, 응력이 wide band process임을 고려하여 피로해석을 수행할 경우 이를 narrow band process라고 가정하여 해석한 결과보다 전반적으로 작은 피로손상에 예측됨을 알았다. 이러한 경향은 bandwidth가 커질수록 증가하며, 또한 S-N곡선의 m 값이 커질수록 증가함을 알 수 있었다. 두 결과의 차이는 피로손상 해석시 사용되는 S-N곡선, 응력집중계수 등의 기본자료의 불확실성을 감안할 때, 그리 큰 것이 아니라고 판단된다. 따라서 실무에서 통상적인 경우에는 간단한 narrow band process 가정에 의한 방법의 활용이 타당하겠으며, 좀 더 자세한 해석이 필요한 경우에는 본 논문에서 제시한 wide band 응력에 대한 피로해석기법을 통하여 그 결과를 보정함이 타당하겠다.

감사의 말

본 연구는 한국과학기술재단의 1985년도 연구과제지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Kan, D., and Petrauskas, C., "Hybrid Time-

- Frequency Domain Fatigue Analysis for Deepwater Platforms", *Proc. of Offshore Technology Conference*, OTC 3965, 1981, pp. 127~143.
2. Malhotra, A. and Penzien, J., "Nondeterministic Analysis of Offshore Structures", *J. of Engineering Mechanics Div.*, ASCE, EM6, Dec., 1970, pp. 985~1003.
 3. 윤정방, 최정호, 류정수, "불규칙파에 대한 고정 해양구조물의 동적해석", 대한토목학회 논문집, 제 5 권 제 2 호, 1985.
 4. Lin, Y.K., "*Probabilistic Theory of Structural Dynamics*", McGraw Hill, 1967.
 5. Fuch, H. and Stephens, R., "*Metal Fatigue in Engineering*", John Wiley, 1980.
 6. Wirsching, P. and Light, M., "Fatigue under Wide Band Random Stress", *J. of Structural Div.*, ASCE, Vol. 106, No. ST7, July 1980, pp. 1593~1607.
 7. Morison, J., O'Brien, M., Johnson, J. and Schaaf, S., "The Force Exerted by Surface Waves on Piles", *Petroleum Transactions*, AIME, Vol. 189, 1950, pp. 149~154.
 8. Shinozuka, M., Yun, C. and Vaicaitis, R., "Dynamic Analysis of Offshore Structures Subjected to Wind Generated Waves", *J. of Structural Mechanics*, 1977, pp. 135~146.
 9. Kuang, J., Potvin, A. and Leick, R., "Stress Concentration in Tubular Joints", *Proc. of Offshore Technology Conference*, OTC 2205, 1975, pp. 593~612.
 10. American Welding Society Structural Welding Code, AWS D1, 1~72, 1972.

(接受 : 1986. 3. 27)