
 論 文

大韓造船學會論文集
 第35卷第2號 1998年5月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 2, May 1998

고정식 해양구조물의 피로수명예측에 대한 신뢰성해석

이재옥*, 이현엽**, 서용석***, 윤장호***

Reliability of Fatigue Life Predictions for Fixed Offshore Structures

by

LEE, Jae-Ohk*, LEE, Hyun-Yup**, SUH, Yong-Suk*** and YOON, Jang-Ho***

요 약

해양구조물의 피로에 대해 확률론적으로 안전성을 평가하는 기법을 개발하기 위하여, 피로해석 과정에서 유입되는 불확실한 요소들을 검토하여 이들의 확률분포를 현재까지의 자료를 이용하여 최선으로 추정하였으며, 피로해석기법으로는 Simplified Method를 이용하여 피로신뢰성해석 모델을 개발하였다. 또한 실제의 자켓형 해양구조물을 대상으로 피로신뢰성 해석을 수행하였으며, 각 불확실성 요소가 피로수명에 미치는 영향을 파악하여 각 요소들의 상대적 중요성을 검토하였다.

Abstract

To evaluate the reliability against fatigue failure of offshore structures, a fatigue reliability analysis model based on the probabilistic approach has been developed. In this model, the simplified method is adopted as a fatigue analysis method. The uncertainties included in the fatigue analysis are considered as random variables and their statistical properties are evaluated as quantitatively as possible using existing data.

As an example, the developed fatigue reliability model is applied to the jacket. And then the relative significance of each uncertainty on the probability of fatigue failure is surveyed.

발 표 : 1997년도 대한조선학회 추계연구발표회 ('97. 11. 13)

접수일자 : 1997년 12월 12일, 재접수일자: 1998년 4월 8일

* 학생회원, 서울대학교 조선해양공학과

** 정회원, 충남대학교 선박해양공학과

*** 정회원, 삼성거제조선소 선박해양연구소

1. 서 론

조선이나 해양공학 분야에서는 수년 전부터 피로파괴에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 이는 해석기법의 발전에 따른 최적화 설계와 최종강도가 높은 고장력강의 사용으로 부재치수가 줄어들어 따라 최근의 선박이나 해양구조물은 종전보다 피로파괴에 대해 취약해졌기 때문이다.

그러나, 피로파괴에 대해서는 아직 그 물리적 현상을 명확하게 설명할 수 있는 이론이 제시되지 못하고 있으며, 해양구조물의 경우에는 피로파괴를 유발하는 하중이 파도와 같은 환경에 의한 것이어서 해양구조물의 피로해석에 있어서는 더욱 불확실한 요소가 많이 존재하게 된다. 현재까지는 이러한 불확실한 요소들에 대해 최선의 추정값을 사용하여 결정론적으로 피로해석을 수행한 후 경험에 의한 안전계수를 사용하는 기법을 사용하여 왔다. 그러나, 동일한 대상에 대해서도 피로수명이 30배 이상까지 차이가 날 정도로 피로해석에 있어서의 불확실성 요소의 영향은 크다[1].

따라서 신뢰성해석을 통해 피로파괴확률을 구하여 확률론적으로 안전성을 평가하는 방법이 대안으로 제시되고 있다[2]. 현실적으로는 불확실성에 대한 확률적 분포를 추정하여야 하는 어려움 때문에 아직 설계에 직접 활용되고 있지는 못 하나, 안전계수의 개념보다는 파괴확률이 더욱 합리적이며 또한 신뢰성해석을 통하여 여러 불확실성 요소들의 상대적 중요성을 파악할 수 있다는 점에서 대안으로서 받아지고 있으며, 최근 들어 많은 선급에서 확률론적 관점에 근거하여 규정을 개정하려는 움직임이 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 해양구조물의 피로에 대해 확률론적으로 안전성을 평가하는 기법을 개발하기 위하여, 피로해석에 있어서 유입되는 불확실한 요소들을 검토하여 이들의 확률분포를 현재까지의 자료를 이용하여 최선으로 추정하였다. 그리고, 대상구조물이 고정식 해양구조물인 점과 각 불확실성 요소의 영향 평가의 용이성을 고려하여 피로해석기법으로는 Simplified Method를 이용하여 피로신뢰성해석 모델을 개발하였다.

또한 실제의 자켓형 해양구조물을 대상으로 피로신뢰성 해석을 수행하였으며, 각 불확실성 요소가 피로수명에 미치는 영향을 파악하여 각 요소들의 상대적 중요성을 검토하였다.

2. 불확실성 요소

해양구조물의 피로해석은 일반적으로 수명동안의 파도에 대한 통계적 표현, 주어진 파도에 의한 피로응력의 산정, 피로강도해석의 과정을 거쳐 수행하게 된다. 본 장에서는 피로파괴에 대한 확률론적 평가를 하기 위해 고려하여야 할 불확실성 요소를 각 과정별로 검토하였다.

2.1 파도의 통계적 표현

(1) 유의파고와 평균주기

현재 파도자료를 계측 수집하는 일반적인 방법에서는 보통 3~6시간 간격으로 수십분간 자유수면의 상하변위에 대한 시계열 자료를 초당 2개 내지는 10개씩 계측하여 이로부터 유의파고, 평균주기와 스펙트럼폭을 산정한 후 이들만 저장하고 계측된 시계열 자료는 버려왔다.

그러나, 유의파고는 동일한 시계열자료로 계산하더라도 방법에 따라 차이가 나며, 예로 1995년 1년간 홍도에서 관측한 파랑자료[3]에서 스펙트럼으로부터 얻은 유의파고(H_S)와 시계열에서 직접 상위 1/3 파고의 평균으로 구한 유의파고($H_{1/3}$)는 21%까지 차이가 난다[4]. 그리고, 평균주기도 역시 계산방법이나 시계열의 샘플링속도에 따라 차이가 나며, Feld 등[5]은 파스펙트럼으로부터 산정한 평균주기와 시계열자료로부터 직접 구한 평균주기가 약 20% 까지 차이가 남을 확인하였다.

(2) 파주기

정확한 피로손상평가를 위해서는 파고와 파주기, 파방향 등의 결합확률분포를 이용할 수 있어야 하나, 대부분의 파자료가 유의파고와 평균주기만으로 정리되어 있어 개별 파의 파고와 파주기, 파방향을 결정하고 그들의 분포를 추정하기가 용

이하지 않다. 파주기의 단기확률분포함수는 Longuet-Higgins[6]에서와 같이 파고와 파주기의 조건부 내지는 결합확률밀도가 연구된 바 있으나, 이러한 방법들은 아직 신뢰할 만하지 못하며[5] 피로해석시에 계산량이 너무 많아지기 때문에 대신 하나의 파고에 대해 하나의 대응주기를 추정하여 사용하고 있다.

(3) 다방향성

실제 해상 파도는 3차원파인데, 해양구조물의 피로해석에서는 2차원파를 가정하는 것이 보편적이다. 일반적으로 3차원파에 의한 하중이 2차원파에 의한 하중보다 작는데, 다방향파 스펙트럼으로 많이 쓰이고 있는 cosine-square spreading function을 사용할 경우 관성력과 점성력이 줄어드는 정도가 각각 0.87, 그리고 0.75인 것으로 알려져 있다[7].

2.2 피로응력의 산정

(1) Morison 공식

대부분의 해양구조물은 원형단면부재에 의해 구성되어 있는데, 외경 D 와 파도의 파장 λ 의 비인 D/λ 의 값이 0.2 미만이면 파일이 파의 흐름에 미치는 영향이 미미하므로 Morison 공식을 이용하여 유체력을 산정한다. Morison 공식에서 관성력계수(C_I)와 점성력계수(C_D)는 Reynolds 수, Keulegan-Carpenter 수 등과 관계가 있으며 비교적 많은 실험자료를 토대로 변동성에 대한 정량적인 평가가 연구되고 있다.

참고문헌 [8]에서는 자켓형 해양구조물에 대하여 C_I 와 C_D 의 평균으로 각각 1.80과 0.75를, 변동계수로 0.35와 0.25를 이용하고 분포함수로는 정규분포를 가정하였고, 참고문헌 [2]에 의하면 C_I 와 C_D 의 분포로 각각 변동계수의 값이 0.15와 0.25인 대수분포를 제안하고 있다. 그리고, Hansen[9]은 이들 유체력 계수의 변동성에 대한 평가와 관련하여 3차원 파의 영향과 구조부재들 사이의 상호작용에 의한 파의 교란, 자유수면 위쪽에서 작용하는 하중 등을 고려하여 파도에 의한

하중 산정에 대해서는 50% 정도까지의 변동계수를 사용하는 것이 현실성이 있다고 주장하였다.

(2) 응력집중계수

해양구조물에서 피로손상이 집중되는 부위는 주로 부재간 결합부에서의 용접부위이다. 파도에 의해 구조물이 받게 되는 유체력을 산정하여 적절한 구조해석을 거치면 대상부위에서의 공칭응력을 얻을 수 있는데, S-N 곡선에서의 피로응력은 결합부에서의 응력집중현상은 고려하되 notch의 영향은 제외된 Hot Spot Stress로서 공칭응력에 응력집중계수를 곱하여 얻는다.

응력집중계수는 실험이나 유한요소해석으로 구하거나, 기존의 실험식[10,11]을 이용할 수도 있다. ECOR[2]에서는 응력집중계수로 변동계수의 값이 10%인 대수분포 확률변수를 추천하고 있다.

(3) 기타

이외에도 피로응력의 산정과 관련하여 구조해석 모델의 질량분포나 탄성계수와 같은 재료의 역학적 물성치, 각 부재의 직경과 두께, 제작상의 오차나 결함, 해석방법론에 있어서의 수학적 모델링 및 단순화 등에 의한 모델링 불확실성이 있으나 이러한 영향은 다른 불확실성과 비교할 때 일반적으로 무시할 수 있다고 인정되고 있다[8]. 또한 피로파괴가 오랜 시간에 걸쳐 누적된 손상에 의해 발생하므로 대상구조물의 설치 이후 점진적인 부식과 노후 및 관리에 따른 피로강도의 변화, 경계 조건의 변화, marine growth에 의한 질량 및 파랑 하중의 증가도 피로손상과 피로수명에 있어서의 불확실성을 유발하는 요인이 되는데, 현재는 이와 같은 인자의 영향에 대한 자료가 빈약한 실정이다.

2.3 피로강도

(1) S-N 곡선

S-N 곡선은 피로강도시험을 통해 일정한 진폭 $\Delta\sigma$ (peak-to-peak)를 갖는 정현파형의 피로응력을 작용시켰을 때 피로파괴에 이르기까지의 피로응력의 횟수 N 을 log-log scale에서 선형회귀분석을 통하여 얻은 최적직선이며 다음과 같이 표현된다.

$$\log N = \log a - m \cdot \log \Delta\sigma \quad (1)$$

Table 1에 DnV에서 제안한 cathodic protection 처리가 된 해수중의 tubular joint에 대한 S-N 곡선상수를 정리하였는데, 만일 두께가 32mm보다 두꺼우면 보정이 필요하다[12].

Table 1 Details of S-N curves for tubular joints in sea water with cathodic protection by DnV[13]

log a	s _{log N}	m	S ₀ [MPa]
12.6606	0.2484	3.0	9

S₀cut-off level at N=2x10⁸ cycles

여기서, s_{log N}은 최적직선에 대한 log N의 표준편차이다. S-N자료의 산란성은 일반적으로 S-N 곡선의 절편인 a를 대수분포 확률변수로 고려한다. 따라서 Table 1에서 log a와 s_{log N}은 각각 log a의 평균 μ_{log a}와 표준편차 σ_{log a}로 생각할 수 있으므로, 정규분포와 대수분포 사이의 평균 및 표준편차의 관계를 이용하여 대수분포 확률변수 a의 평균과 표준편차를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_a &= \exp \{ \ln 10 \cdot \mu_{\log a} \\ &\quad + 0.5 (\ln 10)^2 \cdot \sigma_{\log a}^2 \} \\ \sigma_a &= \mu_a \sqrt{\exp \{ (\ln 10)^2 \cdot \sigma_{\log a}^2 \} - 1} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 기타

아직까지는 S-N곡선과 선형손상법칙을 이용하여 피로해석을 수행하므로, load history, 평균응력, 주응력방향의 변화 등의 영향이 무시되고 있다. 이는 현재까지 이러한 영향을 고려할 수 있는 합리적인 대안이 제시되지 못하고 있기 때문으로, 이들에 의해서도 피로강도는 불확실성을 갖게 되나 현재는 이와 같은 인자의 영향에 대한 자료가 별로 없는 실정이다.

3. Simplified Method를 이용한 피로 신뢰성해석모델

Simplified Method에서는 파도의 장기확률분포를 다음과 같이 Weibull 분포로 가정하고

$$f_H(h) = \ln N_t \frac{\epsilon}{H_d} \left(\frac{h}{H_d} \right)^{\epsilon-1} \times \exp \left\{ - \left(\frac{h}{H_d} \right)^\epsilon \ln N_t \right\} \quad (3)$$

N_t : 파도의 총수, H_d : 설계최대파고
ε : Weibull shape parameter

파고와 공칭피로응력범위 사이의 관계를 다음과 같은 지수함수로 가정하는데,

$$\Delta\sigma = C \cdot H^a \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 이용하면 공칭피로응력범위의 확률분포함수는 아래와 같은 Weibull 분포로 된다.

$$\begin{aligned} f_{\Delta\sigma}(\Delta\sigma) &= \frac{\gamma}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^{\gamma-1} \exp \left\{ - \left(\frac{\Delta\sigma}{q} \right)^\gamma \right\} \\ \gamma &= \epsilon / a, \quad q = \Delta\sigma_d / (\ln N_t)^{1/\gamma} \\ \Delta\sigma_d &= C \cdot H_d^a \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 선형누적 손상법칙을 이용한 누적피로손상률은 식 (1)과 식 (5)를 이용하고 cut-off level을 무시하면 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} D &= \int_0^\infty \frac{N_t f_{\Delta\sigma}(\Delta\sigma)}{N(SCF \cdot \Delta\sigma)} d\Delta\sigma \\ &= \frac{N_t}{a} \frac{(SCF \cdot \Delta\sigma_d)^m}{(\ln N_t)^{m/\gamma}} \Gamma \left(1 + \frac{m}{\gamma} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

N(Δσ): 피로응력범위 Δσ에 의해 파피에 이르는 사이클 수
SCF : 응력집중계수

전체손상률은 각 파도방향에 따른 누적피로손상률을 식 (6)으로 구하여 이들의 선형합으로 전체

누적손상률을 구하게 된다.

대상해역의 Wave Exceedance Diagram으로부터 파고와 파 발현횟수가 semi-log plot에서 보이는 근사적인 선형관계를 이용하면 식 (3)과 식 (5)에서 $\epsilon=1, \gamma=1/\alpha$ 이 되며, 이 때 i 번째 파방향에 대한 누적피로손상률은 다음과 같이된다.

$$D_i = \frac{N_{t_i}}{a} \{ SCF_i \cdot C_i \left(\frac{H_{d_i}}{\ln N_{t_i}} \right)^{\alpha_i} \}^m \Gamma(1 + \alpha_i m) \quad (7)$$

일반적인 고정식 해양구조물에서는 파도에 의한 유체력이 관성력에 의해 크게 지배된다고 판단되므로, 점성력계수 C_D 의 변동성보다는 관성력계수 C_I 의 변동성이 피로손상에 더욱 큰 영향으로 작용할 것으로 예상할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 구조해석에서 얻은 파고와 그에 의한 피로응력자료를 회귀분석하여 얻은 C_i 를

$$C_i = C_I \cdot C_{r_i} \quad (8)$$

로 표현하여 관성력계수 C_I 의 변동성 반영이 용이하도록 하였고, 피로응력의 산정과정에서 유발되는 여러 요인에 의한 불확실성과 또한 파고와 응력의 관계를 식(4)로 표현하는데 따른 산란성은 회귀비례계수라 이름붙인 C_{r_i} 의 변동성에 의해 반영되도록 하였다.

따라서 최종적으로 제시된 피로신뢰성해석 모델에서의 피로손상률은 다음과 같다.

$$D_i = \frac{N_{t_i}}{a} \{ SCF_i \cdot C_I \cdot C_{r_i} \left(\frac{H_{d_i}}{\ln N_{t_i}} \right)^{\alpha_i} \}^m \Gamma(1 + \alpha_i m) \quad (9)$$

모든 파방향에 대한 전체피로손상률은 식 (9)의 각 파방향에서의 피로손상률의 합과 같으며,

$$D = \sum_i D_i \quad (10)$$

임의의 기간 L_1 동안 누적된 피로손상률이 D_1 이라면 피로수명 L 은 다음과 같다.

$$L = L_1 / D_1 \quad (11)$$

따라서 대상구조물이 피로손상에 의해 파괴될 확률은 식(11)에서 산정된 피로수명이 설계피로수명 L_{design} 보다 작을 확률이므로, 피로파괴확률은

$$P_f = P[L < L_{design}] \quad (12)$$

과 같으며 피로신뢰성해석을 위한 한계상태방정식은 다음과 같다.

$$g = L - L_{design} = \frac{L_1}{\sum_i D_{1i}} - L_{design} \quad (13)$$

식 (13)의 한계상태방정식을 이용한 피로신뢰성 해석에서는 피로손상률로 식 (9)로 정의된 피로신뢰성해석 모델을 이용하므로, S-N 곡선상수 (a), 관성력계수 (C_I), 각 파 방향마다의 회귀비례계수 (C_{r_i}), 응력집중계수 (SCF_i), 설계파고 (H_{d_i}), 파 발현횟수 (N_{t_i})의 모두 6가지의 확률변수가 이용된다.

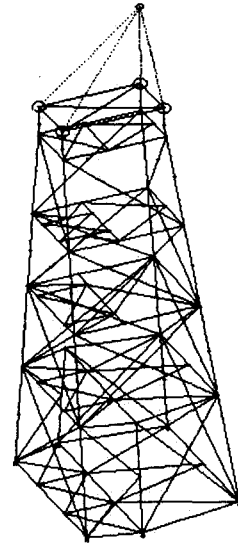


Fig. 1 Structural model

4. 피로신뢰성해석 예

본 장에서는 수심 60.00m인 인도 서부해안에 설치된 자켓형 BE-Well platform에 대해 3장에서 설명한 방법으로 피로신뢰성해석을 수행하였으며 여러가지 불확실성 요소의 영향에 대해 살펴보았다.

피로응력산정은 MSC/Nastran(v.68)을 이용하여 수행하였으며, 모두 109개의 GRID에 의해 231개의 CBEAM 요소와 4개의 CONM2 요소로 구성된 개략적인 구조모델은 Fig.1과 같다.

4.1 파입력자료

본 구조물이 설치될 해역에서의 각 파방향에 대한 Wave Exceedance Data로부터 설계파고(H_d)의 회귀분석 결과와 파도의 수는 Table 2와 같고, 각 파방향의 파고에 대한 파주기 자료는 Table 3과 같이 주어졌다.

Table 2 Design wave height (1 year return period)

	North West	West	South West	South
N_t	1,220,511	1,015,713	770,535	1,276,045
H_d [m]	7.19855	10.70790	11.49056	7.28489

Table 3 Wave height and period data

Wave Height [m]	Period [sec]			
	North West	West	South West	South
0 - 1.52	6.6	8.3	9.6	8.7
1.52 - 3.05	7.4	8.7	10.1	9.2
3.05 - 4.57	7.9	9.2	10.3	9.5
4.57 - 6.10	8.4	9.6	10.4	9.7
6.10 - 7.62	8.9	10.0	10.5	9.9
7.62 - 9.14		10.3	10.6	
9.14 - 10.67		10.6	10.8	
10.67-12.19		10.9	11.0	

4.2 파고와 피로응력범위와의 관계

피로강도평가를 위하여 자유수면 아래 9m 깊이 수평부재가 주각에 연결되는 접합부를 선택하고, 선택된 접합부에서 둘레를 따라 서로 수직인 위치에 있는 4 지점에서 피로손상을 검토하였다. Table 3의 파고와 주기사이의 관계를 이용하여 5차 중력파이론으로부터 유체력을 산정하였으며, 응력해석은 MSC/Nastran의 solution #112를 이용하였다.

Table 4는 각 파방향에 대해 파고를 달리 하며 수행된 응력해석결과로부터 파고와 피로응력범위사이의 관계를 식 (4)와 같이 회귀분석한 결과를 정리한 것으로, 앞에서 언급한 4 지점 중 피로손상이 가장 큰 지점에서의 결과만을 보였다. 응력 집중계수는 Marshall의 공식[11]을 이용하여 얻은 5.34를 이용하였다.

Table 4 Results of regression to

$$\Delta \sigma_{nominal} = C \cdot H^{\alpha}$$

position	North West	West	South West	South
C	3.228531	2.784238	2.667693	3.041593
α	1.097243	1.141976	1.099705	1.030809

4.3 불확실성 요소의 변동계수

3장에서 제시한 피로신뢰성해석 모델에서는 모두 6가지의 확률변수에 의해 여러 불확실성 요소의 변동성이 반영된다.

설계파고의 변동성은 파고의 분포함수의 변동성을 반영하는 성분이다. 2.1절에서 언급한 유의파고의 변동성이 바로 설계파고의 변동성과 동일할 수는 없으나 현재는 별다른 대안을 제시할 수 없으므로, 본 계산예에서는 유의파고의 평균적인 변동성을 약 10%라고 가정하고[2] 이로부터 설계파고를 변동계수 0.10인 Gumbel 분포로 가정하였다.

파주기의 변동성은 파 발현횟수에 직접적으로 반영되는데, 본 계산예에서는 참고문헌[2]에서 제시한 바와 같이 변동계수가 0.10인 대수분포 확률

변수로 가정하였다.

관성력계수는 평균이 1.80인 대수분포를 가정하였는데[8], 특히 관성력계수의 변동계수는 2.2절에서 기술한 바와 같이 참고문헌마다 추천되는 값이 다르므로 0.15[2], 0.35[8], 0.50[9]의 세 경우에 대하여 피로신뢰성해석결과를 비교하였다.

관성력계수의 평균을 1.80으로 가정하면 회귀비례계수 C_r 의 평균은 Table 4에 정리된 C 값을 1.80으로 나누어 얻을 수 있으며 Table 5에 정리하였다.

Table 5 Mean values of C_r

North-West	West	South-West	South
1.793628	1.546799	1.482052	1.689774

그리고, C_r 의 변동성은 피로응력 산정과정의 많은 불확실성 요소의 변동성을 포괄적으로 반영하며, 본 계산예에서는 파도의 평균주기의 변동성과 회귀분석결과 얻은 최적직선과 실제 자료사이의 오차만을 정량적으로 고려하였다. 즉 식 (4)와 같이 파고와 피로응력범위 사이의 관계를 가정하면 파고에 대응하는 파주기의 변동성은 회귀비례계수 C_r 에 반영된다. 파주기의 변동계수를 0.10로 가정할 때, 파도에 의한 관성력은 파주기의 제곱에 반비례한다는 사실로부터 C_r 의 변동계수로 0.20을 얻게 된다. Table 6에 파주기의 변동성만에 의한 C_r 의 변동계수, C 의 회귀오차에 의한 C_r 의 변동계수, 그리고 두 경우 모두를 고려한 경우의 변동계수를 정리하였다.

Table 6 Coefficient of variation of C_r (in %)

Source of Variation	North West	West	South West	South
wave period	20.00			
regression error	4.21	11.20	7.14	1.90
Total	20.64	23.22	21.47	20.27

S-N 곡선상수 a 와 응력집중계수의 통계특성은 2장에서 기술한 자료를 이용하였으며, 전체 확률변수들의 통계적 특성을 Table 7에 정리하였다.

Table 7 Statistical properties of random variables

R.V.	distribution	mean	CoV [%]
a	Log-Normal	5.39E+12	62.21
SCF	Log-Normal	5.34	10
C_I	Log-Normal	1.80	15, 35, 50
C_r	Log-Normal	Table 5	Table 6
H_d	Gumbel	Table 2	10
N_i	Log-Normal	Table 2	10

4.4 피로신뢰성 해석

신뢰성해석기법으로는 식 (13)의 한계상태방정식을 이용하여 추출횟수 100,000번의 Crude Monte-Carlo 추출법을 이용하였다.

Fig.2는 관성력계수 C_I 의 변동계수를 15%, 35%, 50%로 변화시키며 500년까지 피로파괴확률을 계산한 결과이다.

그리고, Table 8은 각 설계코드마다 제안하는 허용피로손상률인 1/10, 1/3, 1/2, 1.0에 설계용 S-N 곡선을 사용하여 결정론적으로 산정된 피로수명에 대한 피로파괴확률을 정리한 것이다. 허용피로손상률이 1.0인 경우에는 C_I 의 변동계수가 15%와 50%일 때의 피로파괴확률이 약 2배의 차이를 보이지만, 허용피로손상률이 작을수록 피로파괴확률의 차이가 증가하여 허용손상률이 0.1일 때는 약 100배의 차이를 보임을 확인할 수 있다. 즉, 일반적인 파괴모드에 대한 목표신뢰도지수는 약 4정도이며[14] 이는 파괴확률 10^{-4} 에 해당하

는데, 이 부근에서의 피로파괴확률은 C_I 의 변동성 크기에 매우 민감하다는 것이다.

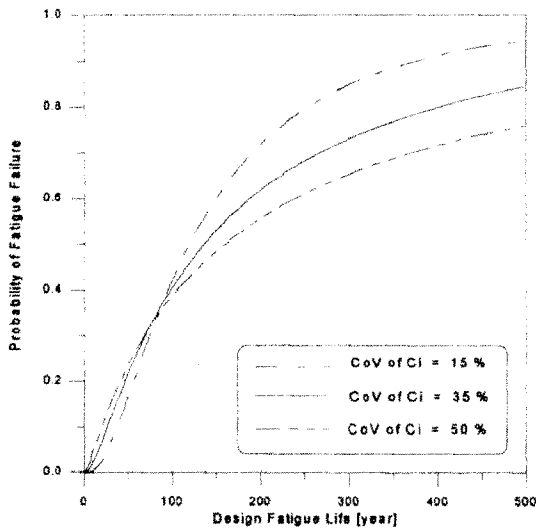


Fig. 2 Probability of fatigue failure for various CoV of C_I

Table 8 Probability of fatigue failure for various D_{design}

D_{design}	Fatigue Life [year]	CoV of C_I		
		15%	35%	50%
1/10	3.91	0.00012	0.00295	0.01137
1/3	13.04	0.00729	0.03321	0.06008
1/2	19.56	0.02223	0.06412	0.09574
1.00	39.12	0.10667	0.16335	0.19095

한편 Fig.3은 C_I 의 변동계수가 35%일 때 설계 피로수명 500년까지 모든 확률변수의 변동성을 고려한 경우와 차례로 하나씩만의 확률변수의 변동성만을 고려한 경우의 피로파괴확률을 보인 그림이다. Table 8에서 알 수 있듯이 허용손상률을 1.0으로 하고 생존확률이 97.7%인 설계용 S-N 곡선을 이용할 경우 피로수명은 약 39년이였다. 이 결과는 Fig.3에서 S-N 곡선자료의 산란성을 반영하는 S-N 곡선 상수 a 의 변동성만을 고려한 피

로파괴확률곡선에서 피로수명 39년에서의 파괴확률이 약 2.3%로 확인되어 예상과 일치한다.

Fig.3에서는 모든 확률변수의 변동성을 고려한 피로파괴확률곡선에 가까운 곡선일수록 해당 확률변수의 변동성이 피로파괴확률에 미치는 영향이 크다. 따라서 관성력 계수 C_I 의 변동성이 피로파괴확률에 가장 지배적인 영향을 미치며 다음으로 S-N 곡선상수 a , 회귀비례계수 C_r , 응력집중계수 SCF, 설계과도 H_d 의 변동성의 차례인 것으로 확인되었다. 그리고, 파의 발현횟수의 변동성은 그다지 영향을 미치지 못하고 있음을 볼 수 있다.

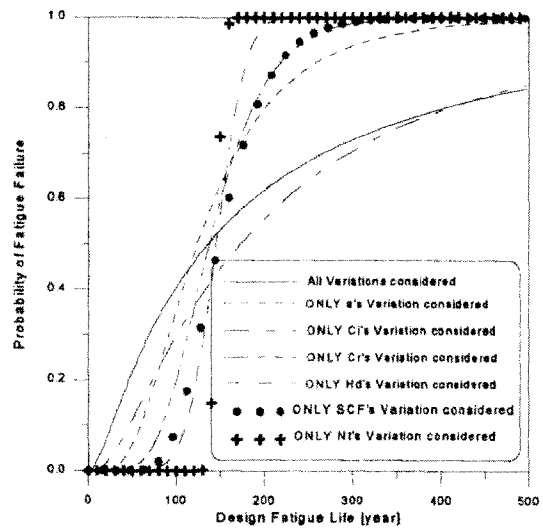


Fig.3 Probability of fatigue failure including only one random variable in turn

5. 결론

본 연구에서는 고정식 해양구조물에 대하여 확률론적 피로안전성 평가방법을 정립하기 위하여 피로해석기법으로 Simplified Method를 이용한 피로신뢰성해석 모델을 개발하였다. 본 모델에서는 불확실성 요소의 변동성을 S-N 곡선상수, 응력집중계수, 관성력계수, 회귀비례계수, 설계과도, 파도

의 발현횟수의 6가지 확률변수로 반영한다.

이들 6가지의 확률변수의 통계적 특성을 주어진 자료로부터 최선으로 정량화하여 실제의 고정식 해양구조물을 대상으로 피로신뢰성해석을 수행하였다. 그 결과 파도의 발현횟수의 산란성은 무시할 정도였고 관성력계수의 변동성이 피로파괴확률에 가장 큰 영향을 미치고 S-N 곡선자료의 산란성, 회귀비례계수, 응력집중계수, 설계파고의 변동성의 차례로 영향력이 있음을 확인하였다.

한편 설계목적으로 관심이 집중되는 영역은 파괴확률이 약 10^{-4} 정도인데, 이 범위에서는 확률변수가 갖는 변동계수의 값에 따라 피로파괴확률이 매우 민감한 것을 Table 8에서 확인할 수 있다. 따라서 향후과제로는, 설계목적으로 관심이 있는 피로파괴확률의 영역에서의 불확실성 요소에 대한 자료조사와 추정기법의 개발과 함께 robust한 피로수명을 얻기 위한 방법의 모색이 필요하다. 그리고, 피로해석기법으로는 Simplified Method 보다 합리적인 것으로 평가되는 Spectral Method를 이용한 피로신뢰성해석 모델을 연구개발할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 삼성중공업의 산학협동연구과제인 "선체 및 Jacket Type 구조물의 확률론적 안전성 평가방법의 정립"의 일부로 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] P. W. Marshall & W. H. Luyties, "Allowable Stress for Fatigue Design", BOSS '82, Boston, Mass., Aug. 1982
- [2] 國際海洋科學技術協會 ECOR日本委員會, 海洋構造物に對する信頼性分析法, ECOR國際共同研究報告, 1991
- [3] 해운항만청, 1995년도 파랑관측자료 보고서, 1996년 5월
- [4] 서울대학교 해양시스템공학연구소, 선체 및 Jacket Type 구조물의 확률론적 안전성 평가방법의 정립, 삼성중공업 산학협동연구보고서, 1997
- [5] Graham Feld & Julian Wolfram, "Bivariate Modeling of Wave Height and Period," OMAE, vol.2, Safety and Reliability, ASME, 1996
- [6] M. S. Longuet-Higgins, "On the Joint Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field," Proc. Royal Society of London, vol.389(A), 1983, pp.241-258
- [7] R. G. Dean, "Hybrid Method of Computing Wave Loading," OTC 1977, Paper No. OTC3029, 1977, pp.483-492
- [8] P. Thoft-Christensen & M. J. Baker, Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, 1982
- [9] N. E. O. Hansen, "Uncertainties in the Determination of Structural Loads from Waves and Current," Proceedings, Seminar on Uncertainties Related to the Design and Construction of Offshore Jacket Structures, Copenhagen, May 1986
- [10] J. G. Kuang, A. B. Potvin & R. D. Leick, "Stress Concentration in Tubular Joints", OTC Paper 2205, Texas, 1975
- [11] P. W. Marshall, "A Review of Stress Concentration Factors in Tubular Connections", Report CE-32, Shell Houston, April 1978
- [12] T. R. Gurney, The Influence of Thickness on the Fatigue Strength of Welded Joints : Behavior of Offshore Structures, London, 1979
- [13] Det Norske Veritas, Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units, Classification Note No.30.2, 1984
- [14] DnV, Structural Reliability Analysis of Marine Structures, Classification Notes No.30.6, July 1992