

해양구조물의 피로수명 해석의 불확실성과 민감도

Sensitivity and Uncertainty Analysis of Fatigue Life of Offshore Structures

김도영 <홍익대학교 조선해양공학과 조교수>

1. 서 언

해양구조물의 피로해석이 요구되고 있는 것은 파도와 바람에 의해서 해양구조물에 발생하는 응력은 주기적인 변화를 가지게 되므로 항복응력에 의한 구조물의 파괴뿐만 아니라 항복응력 이하의 응력에 의한 피로파괴가 문제가 되기 때문이다. 실제로 피로파괴에 의한 해양구조물의 사고 발생이 여러 차례 보고되고 있다. 그러므로 해양구조물 설계 시 ultimate strength criterion check과 뿐만 아니라 fatigue check이 필요하게 된다. 더욱이 대부분의 해양구조물은 철 구조물이며 이러한 구조물은 많은 용접 부위를 포함하고 있다. 이러한 용접 부위는 항상 잔류응력이 존재하게되고 이런 경우 crack이 빨리 전파되므로 피로파괴가 더욱 문제가 된다. 또한 용접 부위는 항상 용접 결함부가 존재하게 되며 용접구조물에서는 fatigue crack은 항상 용접 결함부에서 시작되고있다. 이러한 까닭에 피로해석은 해양구조물의 설계에 중요한 부분을 차지하고 있다.

그러나 피로파괴에 대해서는 아직 그 현상이 확실하게 이해되지 못한 실정이어서 현재 사용하고 있는 피로설계 방법에 불확실한 요소가 많이 있는 실정이다. 이러한 까닭으로 현재 해양구조물에 대한 피로해석은 일관성 있는 결과를 주고 있지는 않다. 예를 들자면 해석 방법 또는 자료가 다른 것을 사용하는 경우 그 결과가 상당한 차이를 보이는 경우도 많이 발생한다.

본 고에서는 해양구조물의 피로수명 해석의 불확실성의 요인들을 살펴보고, 간단한 모델을 사용하여 각 요인들이 피로수명 해석에 미치는 영향을 살펴보

고자한다. 피로수명해석에는 일반적으로 SN곡선을 이용하는 방법과 파괴역학을 이용하는 방법이 사용되고 있지만 여기서는 SN곡선을 이용하는 방법에 관해서만 논하기로 한다.

2. 불확실성 요인

피로해석에서의 불확실성 요인은 여러 가지가 있지만 크게 다음과 같은 5가지 유형으로 분리하고, 각 유형 별로 주요한 인자들을 나열해 보았다[1][2][3][4].

- (1) 하중계산 (Load Calculation)
 - Wave Height
 - Wave Period
 - Distribution of Waves (direction)
 - Wave Theories
 - Hydrodynamic Coefficients
- (2) 응력 계산 (Stress Calculation)
 - Structural Analysis
 - Stress Concentration Factor
- (3) 피로수명의 추정 방법
 - Definition of Failure
 - SN Data
 - Natural Scatter
 - Selection of SN-curve (Joint Classification)
 - Thickness effect

(4) 공정오차 여유 (Fabrication Tolerances)

(5) Cumulative Damage Hypothesis
(Variable amplitude loading)

3. 피로해석의 민감도

각 인자 별로 피로수명에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 다음과 같은 가정을 도입한 간단한 피로해석 모델을 생각해보기로 한다.

- (1) Stress Range를 2-parameter Weibull Distribution으로 표시
- (2) Miner-Palmgren rule
- (3) SN-curve with no cut-off level

위와 같은 가정과 damage ratio를 1.0으로 택하면 피로수명을 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 [4].

$$L = \frac{L_o \bar{\alpha} (\log n_o)^{m/h}}{n_o \Delta\sigma_o^m \Gamma(1+m/h)} \quad (1)$$

여기서

- L_o = Fatigue life in years as required during design
- $\Delta\sigma_o$ = Maximum stress range of total of n_o cycles
- n_o = Total number of stress cycles in L_o years
- m = Negative inverse slope of the SN-curve
- $\bar{\alpha}$ = The cut of the N-axis by the design SN-curve
- h = Weibull parameter of the long term stress range distribution

- Maximum Stress Range의 오차에 의한 영향

Maximum stress range와 피로수명은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{L^*}{L} = \left[\frac{\Delta\sigma_o}{\Delta\sigma_o^*} \right]^m$$

만약 $m=3.0$ 으로 취하면,

$$\Delta\sigma_o^* = 1.1 \Delta\sigma \quad (+10\% \text{ 오차})$$

$$L^* = 0.75L \quad (-25\% \text{ 오차})$$

$$\Delta\sigma_o^* = 0.9 \Delta\sigma \quad (-10\% \text{ 오차})$$

$$L^* = 1.33L \quad (+33\% \text{ 오차})$$

여기서 $\Delta\sigma_o$ 는 파도의 파고와 주기 그리고 stress 계산에 의해 영향을 받는다. 특별히 응력집중계수 (stress concentration factor)의 계산은 maximum stress range의 결과에 직접적인 영향을 미친다.

- Wave period 오차에 의한 영향

Wave period는 n_o 에 직접적인 영향을 준다. n_o 와 피로 수명의 상대 오차는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{L^*}{L} = \frac{n_o}{n_o^*} \left[\frac{\log n_o^*}{\log n_o} \right]^{(m/h)} \quad (2)$$

$$n_o^* = n_o + \Delta n_o \quad (3)$$

만약 $m=3.0$, $h=1.0$ 으로 하고 주기가 6초인 파도를 생각하면 20년 동안 $n_o=1.05 \times 10^8$ 이 된다. 이 경우 $\Delta n_o=0.1 n_o$ (+10% 오차)인 경우 L^* 는 -8% 오차를 보이고, $\Delta n_o=-0.1 n_o$ 인 경우 L^* 는 +9% 오차를 보인다.

- 하중계산과 파고와 주기와의 관계

하중계산과 파고 및 주기와의 정성적인 관계를 파악하기 위해서, 하중 계산의 한 방법으로 쓰이는 Morrison식을 생각해 보기로 한다. 구조물에 작용하는 하중은 관성력과 점성력으로 나누어 생각할 수 있다.

$$F = F_I + F_D \quad (4)$$

F_I 는 관성력을 나타내며 가속도에 비례한다 그리고 F_D 는 점성력을 나타내며 속도의 제곱에 비례한다.

선형과 이론에 의하면 유체 입자의 속도와 가속도는 다음과 같다.

$$\text{가속도} \sim \frac{H}{T^2} \quad \text{속도} \sim \frac{H}{T} \quad (5)$$

여기서 파고의 영향을 생각해 보면 관성력이 지배적인 구조물은 파고에 비례하고 점성력이 지배적인 구조물은 파고의 제곱에 비례한다. 피로파괴에 영향을 가장 많이 주는 파고가 작은 파도인 경우에는 관성력이 지배적인 경우가 많다. 또 구조물이 대형인 경우도 이에 해당한다. 따라서 파고 및 주기와 하중과의 관계는 다음과 같은 관계가 성립한다. 만약 하중과 구조물의 응력과의 관계가 선형적이라고 생각한다면 stress range와 H와 T와의 관계는 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\Delta\sigma \sim H^k \quad (6)$$

$$\Delta\sigma \sim \frac{1}{T^2} \quad (7)$$

이상을 종합해서 각 인자가 10%의 오차가 생길 때 피로수명 계산에 미치는 영향을 아래 표1에 정리하여 나타내었다. 오차가 없을 때의 피로수명을 100으로 여기서 $m=3.0$, $h=1.0$, $n_0=1.05 \times 10^8$ 을 사용하였다. 이것은 Harby [5]의 결과와 비슷한 수치를 보인다.

〈표1〉 각 인자의 10% 변화에 따른 피로 수명의 변화

parameter	증감(%)	life
기준	-	100
wave height(H)	-10	133
wave height	+10	75
wave period(T)	+10	193
wave period	-10	49
Nominal stress/H	-10	133
Nominal stress/H	+10	75
SCF(응력집중계수)	-10	133
SCF	+10	75
모두 증가 방향 +10%		454
모두 감소 방향 -10%		21

- Weibull parameter h에 따른 영향

Weibull parameter h는 다음의 함수이다.

- 파도의 분포
- 수심
- 구조물의 종류와 응답특성
- 구조물에서의 접합부의 위치

Weibull parameter h와 피로 수명과의 관계는 다음과 같은 식으로 나타내어 진다.

$$\frac{L^*}{L} = (\log n_0)^{m/h^* - m/h} \frac{\Gamma(1+m/h)}{\Gamma(1+m/h^*)} \quad (8)$$

h의 값은 0.5 - 1.5사이의 값을 가진다[6]. 반잠수식 구조물인 경우 $1.0 < h < 1.2$ 정도의 값을 가진다. 여기서 $m=3.0$, $n_0=1.05 \times 10^8$ 을 취하고 $h=1$ 을 기준으로 해서 0.6과 1.4 에서 h가 변화할 때 피로 수명의 변화를 표2에 나타내었다. 이 표에서 Weibull parameter h가 피로수명계산에 매우 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

〈표2〉 Weibull parameter h의 변화에 따른 피로수명의 변화

h*	L*/L
0.6	17.06
0.7	6.84
0.8	3.22
0.9	1.71
1.0	1.0
1.1	0.63
1.2	0.42
1.3	0.29
1.4	0.22

- SN-data

SN data에 기인하는 불확실성은 우선 실험 결과의 산란을 들 수 있고, $N=10^7$ 이상인 경우 SN-curve를 extrapolate할 경우의 불확실성을 들 수 있다. 또한 Joint classification과 이에 따른 SN-

curve 선택에 따라 피로 수명이 1 - 5배 정도 차이가 난다 [7][8][9].

- Fabrication tolerances

용접부위의 misalignment는 응력집중계수의 증가를 가져온다. butt weld인 경우 다음과 같은 식으로 응력집중계수가 추정된다.

$$SCF = 1 + 3 e/t \quad (9)$$

일반적인 오차허용 범위는 $e/t = 0.15$ 이고 이 경우 SCF는 1.45배 증가하고 butt weld 일 경우 $m=3.5$ 이므로 피로 수명은 3.7배 정도 감소.

- Cumulative damage hypothesis

실험에서 variable amplitude loading인 경우 damage ratio가 1.0 이하에서 파괴가 일어나는 경향을 보임. 일반적으로 $0.4 < D < 0.8$ 사이에서 파괴가 일어난다. 그러므로 $D = 1.0$ 을 쓰는 것은 피로 수명을 1.25 - 2.5 배 확대 해석하는 결과를 준다.

4. 결 론

이상을 종합해서 볼 때 피로 수명의 계산은 각 인자들의 작은 변화에 따라 계산 결과에 상당한 차이를 줄 수 있다는 것을 볼 수 있다. 따라서 해양구조물의 피로해석의 결과의 해석과 이것을 이용한 구조물의 안정성을 평가하는 것과 해석에는 세심한 주의가 필요하다고 생각한다. 여러 가지 불확실성 요인 중 하중계산에서는 파도의 주기, 응력계산에서는 응력집

중계수, 적절한 SN-data의 이용 그리고 Weibull parameter의 선택이 피로수명 계산에 많은 영향을 주는 것을 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Wirshing, P.H. Probability-Based Design Criteria for Offshore Structures, API-PRAC Project 81-15, 1983
- [2] Gran, S. Fatigue and Crack Failure Prediction Methods in Marine Structures, Veritas Report No. 80-0688, May 1980
- [3] Lotsberg, I. Fines, S. and Foss, G. Reliability of Calculated Fatigue Lives of Offshore Structures. Fatigue 84, Birmingham, 1984
- [4] Alma-Nass, Fatigue Handbook, TAPIR Publishers 1985
- [5] Hambly, E.C., et. al. Fatigue Consideration for Ocean Towage OTC-4163, 1981
- [6] Marshall, P.W. and Luyties, W.H. Allowable Stress for Fatigue Design, BOSS 82, Boston, Aug. 1982
- [7] Rules for the Design, Construction and Installation of Offshore Structures, Det norske, Veritas, 1977
- [8] NS-3472 Design rules for steel structures, Norges Standardiseringsforbund, 1984
- [9] AWS D1.1 Structural Welding Code, American Welding Society, 1983