

확률밀도함수를 이용한 피로균열 발생수명 예측에 관한 연구

김 종 호*

A Study on the Prediction of Fatigue Life by use of Probability Density Function

J. H. Kim*

Key words : LNG(액화천연가스), Fatigue Life(피로수명), Probability Density function(확률 밀도함수), Shape Parameter(형상계수), Cumulative Damage Factor(선형누적 손상계수), Stress Concentration Factor(응력집중계수), Stress Ratio (응력비), Stress Range(응력범위)

Abstract

The estimation of fatigue life at the design stage is very important in order to arrive at feasible and cost effective solutions considering the total lifetime of the structure and machinery components.

In this study the practical procedure of prediction of fatigue life by use of cumulative damage factors based on Miner-Palmgren hypothesis and probability density function is shown with a 135,000 m³ LNG tank being used as an example.

In particular the parameters of Weibull distribution that determine the stress spectrum are discussed. At the end some of uncertainties associated with fatigue life prediction are discussed. The main results obtained from this study are as follows :

1. The practical procedure of prediction of fatigue life by use of cumulative damage factors expressed in combination of probability density function and S-N data is proposed.
2. The calculated fatigue life is influenced by the shape parameter and stress block. The conservative fatigue design can be achieved when using higher value of shape parameter and the stress blocks divided into more stress blocks.

* 정희원, 한국해양대학교 기관시스템공학부(원고접수일 : 99년 1월)

1. 서 론

구조물, 기계부품 등의 설계단계에서 선형누적손상계수(cumulative damage factor)를 계산하여 피로균열의 발생수명을 예측하는 것은 설계수명의 확보, 생산공정에 대한 경제성 확보, 정기적인 검사 주기의 결정 등의 측면에서 중요하게 취급되고 있다^{1)~4)}.

선형누적손상계수를 수식으로 표현한 것 또는 전용 전산프로그램은 그 사용상의 편리함 때문에 널리 이용되고 있지만, 설계단계에서 실제적으로 이를 계산할 때 그 값에 직접적인 영향을 미치는 응력스펙트럼과 S-N곡선을 작성하거나 적용하는 것이 쉽지 않는 경우가 대부분이다.

응력스펙트럼은 해당 구조물이나 기계부품의 예상 설계수명동안 발생하는 변동응력의 분포를 나타내는 것으로 이것은 하중이력을 계측하거나 실적을 참조하여 여러 기준⁵⁾에 따라 작성할 수 있다. 그러나 이러한 방법으로 작성된 응력스펙트럼을 사용하여 선형누적손상계수를 계산하는 것은 너무 소모적이고 또한 실용적이지 못한 것으로 평가된다.

사용재료에 대한 S-N곡선을 얻기 위하여 수행하는 피로시험은 실험조건, 시험편의 관리 등을 엄격하게 하여도 그 어떤 물리적인 시험보다 시험결과와의 분산이 크며 또 응력집중계수, 응력비 등이 미치는 영향을 고려하지 않고 작성된 S-N곡선을 사용하여 선형누적손상계수를 계산하는 것은 큰 오차를 발생시킬 소지가 많다.

본 연구에서는 확률밀도함수를 이용하여 응력스펙트럼과 S-N곡선이 조합된 형태의 선형누적손상계수 계산식을 유도하여 선형누적손상계수를 계산하고 이 값을 기준으로 설계단계에서 피로균열의 발생수명을 예측하는 실제적인 기법을 제시하는 데에 그 목적이 있다. 또 선급에서 피로균열 발생수명을 평가할 때 사용하는 규칙⁶⁾에 대한 이론적인 배경을 조사하는 것에도 그 목적을 두었다.

이를 위하여 선형누적손상계수, 확률밀도함수에 대한 이론적인 해석과 정리를 수행하고 이것을 응력스펙트럼의 작성과 선형누적손상계수의 계산 등에 직접 적용하였고, 피로시험 결과의 분산성,

응력집중계수, 응력비 등이 S-N곡선에 미치는 영향을 고려하여 선형누적손상계수의 계산에 필요한 S-N곡선을 작성하는 기법도 검토하였다.

또 이를 바탕으로 135,000 m³ LNG탱크를 계산 모델로 채택하여 여러 방법으로 선형누적손상계수를 계산하여 피로균열의 발생여부를 예측하였다.

2. 이론해석

2.1 선형누적손상계수

구조물이나 기계부품의 예상 설계수명동안 가해진 변동응력에 의한 누적손상을 선형적으로 합산한 것을 선형누적손상계수(cumulative damage factor, 이하 "C_w"라 한다)라 하고 다음 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$C_w = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

여기서, N_i는 각 응력범위 Δσ_i가 단독으로 부가되어 피로파괴가 발생했을 때까지의 사이클 수를 의미하며 S-N곡선에서 구한다. n_i는 예상 설계수명 동안 각 응력범위 Δσ_i가 부가된 사이클 수이다.

이 식은 통상 Miner-Palmgren의 가설⁷⁾이라고 알려져 있으며 C_w=1.0이 되었을 때

피로균열이 발생한다고 가정하며 그 때까지 반복된 사이클 수를 피로균열의 발생수명으로 정의한다.

2.2. 확률밀도함수

구조물이나 기계부품에 Fig.1과 같은 변동 응력이 부가되는 경우 각 응력범위 Δσ에 대한 반복수

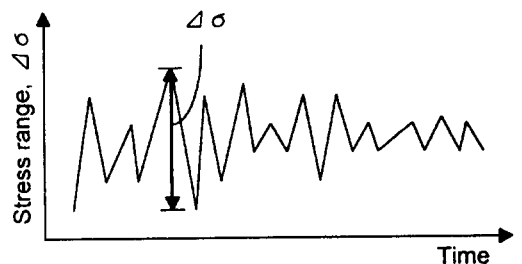


Fig. 1 Random stress history

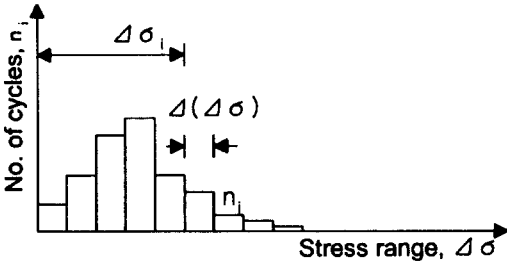


Fig. 2 Histogram of stress ranges

n_i 를 히스토그램으로 나타내면 Fig.2와 같이 된다. 이 그림에서 일정 시간(T) 동안 각 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 가 발현하는 빈도를 형상계수 h 와 척도계수 q 로 구성된 2계수 Weibull분포⁷⁾로 가정하고 이를 확률밀도 함수 $f(\Delta\sigma)$ 로 정의하면 다음 식(1)과 같다.

$$f(\Delta\sigma) = \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^{h-1} \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad (1)$$

2.3 확률밀도함수로 표현한 응력스펙트럼

예상 설계수명동안 발현하는 변동응력의 사이클 수를 모두 합하여 n_0 라고 하면 최대 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 가 발현하는 확률 $Q(\Delta\sigma_{max})$ 와 일정한 응력범위 $\Delta\sigma$ 를 초과하는 응력범위가 발현하는 확률 $Q(\Delta\sigma)$ 는 다음 식(2)와 식(3)과 같이 각각 쓸 수 있다.

$$Q(\Delta\sigma_{max}) = \frac{1}{n_0} \quad (2)$$

$$Q(\Delta\sigma) = 1 - \int_0^{\Delta\sigma} f(\Delta\sigma) d\Delta\sigma \quad (3)$$

식(3)에 식(1)의 $f(\Delta\sigma)$ 를 대입하여 적분하면 최대 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 가 발현하는 확률 $Q(\Delta\sigma_{max})$ 와 일정한 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 를 초과하는 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 가 발현하는 확률 $Q(\Delta\sigma)$ 는 다음 식(4)와 식(5)와 같이 Weibull분포의 형상계수 h 와 척도계수 q 를 사용하여 쓸 수 있게 된다.

$$Q(\Delta\sigma_{max}) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma_{max}}{q}\right)^h\right] \quad (4)$$

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma_{max}}{q}\right)^h\right] \quad (5)$$

식(4)에 식(2)의 $Q(\Delta\sigma_{max})$ 를 대입하고 이를 정리하면 척도계수 q 는 다음 식(6)과 같이 된다.

$$q = \Delta\sigma_{max} / (\ln n_0)^{1/h} \quad (6)$$

식(6)을 식(5)에 대입하여 정리하면 예상 설계수명동안 일정한 응력범위 $\Delta\sigma$ 를 초과하는 응력범위 $\Delta\sigma$ 의 발현확률은 다음 식(7)과 같이 된다.

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{max}}\right)^h \ln n_0\right] \quad (7)$$

이상의 식으로부터 확률밀도함수를 이용하여 피로균열 발생수명을 예측하는 데에 필요한 응력스펙트럼을 작성하는 식을 얻을 수 있다. 즉 응력스펙트럼은 설계대상에 대한 응력해석을 통하여 최고 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 가 구해지면 그 이하의 일정 응력범위 $\Delta\sigma$ 를 초과하여 발현하는 사이클 수는 다음 식(8) 또는 식(9)로 구할 수 있게 된다.

$$Q(\Delta\sigma) = \frac{n}{n_0} = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{max}}\right)^h \ln n_0\right] \quad (8)$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{max} \left(1 - \frac{\log n}{\log n_0}\right)^{1/h} \quad (9)$$

여기서 n_0 과 n 는 예상 설계수명동안 발현하는 변동응력의 사이클 수를 모두 합한 것과 일정 응력범위 $\Delta\sigma$ 가 초과하여 발현하는 사이클 수를 각각 의미한다.

2.2 확률밀도함수로 표현한 선형누적 손상계수

구조물이나 기계부품에 예상 설계수명동안 발현하는 변동응력의 사이클 수를 모두 합하여 n_0 라고 하면 응력범위 $\Delta\sigma$ 와 $\Delta\sigma + d\Delta\sigma$ 에서의 사이클 수는 $n_0 f(\Delta\sigma) d\Delta\sigma$ 로 되고 C_w 는 다음 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

$$C_w = \int_0^{\infty} n_0 \frac{f(\Delta\sigma)}{N(\Delta\sigma)} d\Delta\sigma \quad (10)$$

이 식에서 $N(\Delta\sigma)$ 는 S-N곡선에서 각 응력범위 $\Delta\sigma$ 에 해당하는 파단까지의 사이클 수이다. 또 S-N곡선을 식으로 표현하면 다음 식(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$\log N = \log a - m \log \Delta\sigma, \quad N = a \Delta\sigma^{-m} \quad (11)$$

상기 식에서 m 은 $S-N$ 곡선의 기울기이며 a 는 $S-N$ 곡선의 절편이다.

식(11)을 식(10)에 대입하면 C_w 는 다음 식(12)와 같이 된다.

$$C_w = \frac{n_0}{a} \int_0^\infty \Delta\sigma^m f(\Delta\sigma) d\Delta\sigma \quad (12)$$

식(12)에 확률밀도함수식, $f(\Delta\sigma) = \frac{h}{q} \left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^{h-1} \exp\left\{-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right\}$ 을 대입하면 C_w 는 다음 식(13)과 같이 $S-N$ 곡선과 발현확률의 인자가 조합된 형태로 표현할 수 있다.

$$C_w = \frac{n_0}{a} \int_0^\infty \Delta\sigma^m \left(\frac{h}{q}\right) \left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^{h-1} \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] d\Delta\sigma \quad (13)$$

또한, $t = \left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h$ 로 정의하면 식(13)은 다음 식(14)과 같이 된다.

$$C_w = \frac{n_0}{a} q^m \int_0^\infty t^{\frac{m}{h} + \frac{m}{h} - 1} e^{-t} dt \quad (14)$$

식(14)에 감마함수 $\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-t} t^{n-1} dt$ 와 식(6)의 척도계수를 대입하여 정리하면 C_w 는 다음 식(15)와 같이 $S-N$ 곡선과 확률밀도함수의 인자 및 감마함수로 표현할 수 있게 된다.

$$C_w = \frac{n_0}{a} \frac{\Delta\sigma_{\max}^m}{(\ln n_0)^{m/h}} \Gamma\left(\frac{1+m}{h}\right) \quad (15)$$

상기 식(15)는 설계단계에서 C_w 를 직접 계산하고 계산 결과를 기준으로 피로균열 발생수명을 예측하는 데에 사용될 수 있고 또 이를 전산프로그램화 하면 $S-N$ 곡선의 인자와 형상계수 h 가 C_w 에 미치는 영향을 시뮬레이션할 때 유용하게 사용될 수 있다.

3. 피로균열의 발생수명 예측을 위한 계산 및 고찰

Fig.3은 확률밀도함수를 이용하여 피로균열의 발생수명을 예측하기 위하여 본 연구에서 계산모

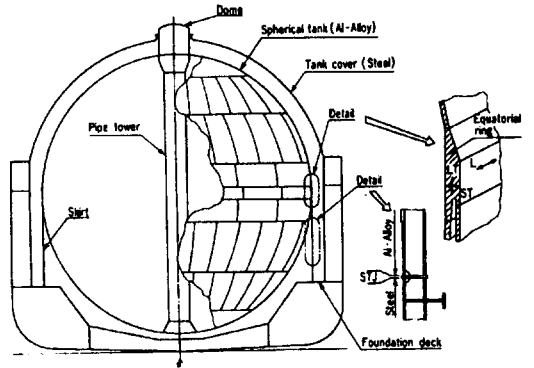


Fig. 3 The structure of LNG tank

델로 채택한 135,000 m³ 구형 LNG탱크(spherical LNG tank)를 나타내고 있다. 이 구형 LNG탱크는 탱크의 적도부(equatorial ring)가 스커트(skirt)를 통하여 선체구조(foundation deck)에 지지되는 구조를 가지고 있다. 이 탱크의 직경은 약 3,700 mm, 적도부의 두께는 166 mm로써 알루미늄합금 A5083-O를 사용하여 용접으로 제작하고 있다.

계산에 필요한 최대 응력범위 $\Delta\sigma$ 와 $S-N$ 곡선은 실적선의 구조해석 결과⁸⁾와 일본조선연구협회의 시험결과⁹⁾를 각각 사용하였고, 예상 설계수명동안 발현하는 변동응력의 사이클 수 n_0 는 10⁸개로 가정하였다.

3.1 응력스펙트럼의 작성

계산모델의 적도부와 스커트에 대한 3차원 구조 해석을 통하여 얻어진 응력해석 결과⁸⁾인 47.1 ± 20.6 MPa(최대응력 σ_{\max} 는 67.7MPa, 평균응력은 47.1 MPa, 최대 응력범위는 41.2 MPa)를 기준으로 전술한 이론해석의 식(9)를 사용하여 응력스펙트럼을 작성하였다.

Fig.4는 예상 설계수명동안 총 10⁸개의 변동응력이 부가되는 경우 형상계수 h 를 1.0로 가정하고 최대 응력을 기준으로 8개의 블록으로 나누어 응력스펙트럼을 작성한 것이다. 그림에서 최대 응력이 발현하는 사이클 수는 1개이며 가장 낮은 응력을 초과하여 발현하는 사이클 수는 9 × 10⁷개가 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 형상계수 h 가 응력스펙트럼에 미치는 영향을 조사하기 위하여 형상계수 h 를 0.5, 1.0,

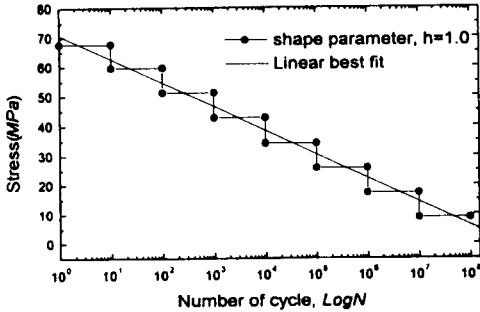


Fig. 4 Stress spectrum divided into eight stress blocks

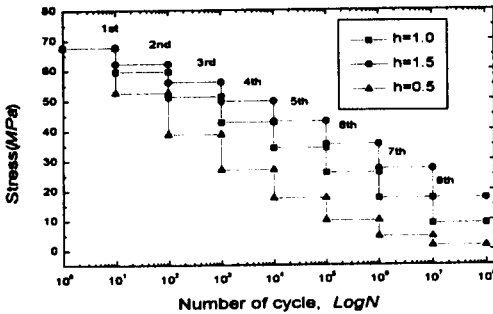


Fig. 5 Stress spectrum at various shape parameter

1.5로 변화시키면서 각각의 응력 스펙트럼을 작성한 것이다. 그림에서 최대응력이 발현하는 사이클 수는 형상계수 h 에 관계없이 1개로서 동일하나 그 이하의 응력

에서는 형상계수 h 에 따라 각 블록의 응력레벨이 발현하는 사이클 수가 다르게 나타난다. 즉, 형상계수 h 가 1.5인 경우에는 형상계수 h 가 1인 경우에 비해서 높은 응력레벨이 발현하는 사이클 수가 증가하고 형상계수 h 가 0.5인 경우에는 그 반대의 현상을 보이고 있다.

따라서 설계단계에서 식(15)를 사용하여 C_w 를 계산하고 이 값을 기준으로 피로균열 발생수명을 예측할 때 형상계수 h 를 큰 값으로 채택하게 되면 예상 설계수명동안 높은 응력이 발현하는 사이클 수가 많은 응력스펙트럼을 사용하여 C_w 를 계산하게 되므로 이때의 C_w 는 커지게 된다. 결국 설계자의 입장에서는 형상계수 h 를 큰 값으로 채택하면 할수록 안전쪽(conservative)의 설계를 수행하는 것이지만 동시에 치수의 증가 또는 설계하중의 감

소 등에 따른 경제적인 문제에 대해서도 고려하여야 한다.

한편 설계단계에서 형상계수 h 는 설계대상물 또는 주위 환경 등에 따라 다른 값을 적용할 수 있으나 선박의 경우에는 $1.0 < h < 1.3$ 범위의 값을 중에서 적절한 값을 채택하고 있고 1.0을 채택하는 것이 일반화되어 있다^{(10)~(11)}.

3.2 C_w 의 계산을 위한 S-N곡선의 작성

일본조선연구협회가 LNG탱크의 국산화를 위하여 일본 국내의 대학 및 연구소에 의뢰하여 알루미늄 합금 A5083-O에 대하여 하중형식, 시험편 채취방향, 응력집중계수, 응력비 등에 얻어진 200개 정도의 피로시험 결과⁹⁾를 통계 처리하면 식(16) 및 식(17)과 같다.

$$N_i = C' (K_f K_r \Delta\sigma_i)^{-6.845}, N_c \leq 2 \times 10^6 \quad (16)$$

$$N_i = C'_a (K_f K_r \Delta\sigma_i)^{-13.69}, N_c > 2 \times 10^6 \quad (17)$$

여기서, N_i 는 일정 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 에서 피로균열 발생까지의 사이클 수이고 C' 와 C'_a 는 파손확률에 따른 계수를 의미하며 그 값은 Table 1과 같다. 또한 K_f 는 응력집중으로 인한 피로강도감소계수로써 식(18) 및 식(19)와 같다.

$$K_f = \frac{1}{2} K_t + 0.5, N_i \leq 10^5 \quad (18)$$

$$K_f = \frac{5}{8} K_t + 0.375, N_i > 10^6 \quad (19)$$

식(18) 및 식(19)에서 K_r 은 응력비 R 에 대한 보정계수로써 다음과 같다.

$$K_r = (1 - \frac{1}{3} R) / (1 - R) \quad (20)$$

Table 1 The factors of fracture probability relating cycle bend

Cycle bend	Fracture probability			
	0.1(%)	1(%)	5(%)	50(%)
$C' \times 10^6$	33.6	68.7	131.0	619.0
$C'_a \times 10^{13}$	0.564	2.36	8.61	191.0

3.3 선급규칙에 따른 C_w 의 계산

계산모델에 대한 C_w 를 계산하는 데에 사용되는 선급규칙⁶⁾은 식(21)과 같다. 이 식은 선급이 안전적인 측면을 중시하여 Miner-Palmgren의 가설에 따라 구해진 C_w 에 안전율, 2를 곱한 것으로 선급에서는 이 값을 기준으로 피로균열의 발생수명을 평가하고 있다.

$$C_w = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 0.5 \quad (21)$$

여기서 n_i 는 예상 설계수명 동안에 일정한 응력 범위 $\Delta\sigma_i$ 가 발현하는 사이클 수로써 이를 모두 합하면 108이 되며 N_i 는 일정한 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 에서 피로균열이 발생할 때까지의 사이클 수로써 S-N 곡선에서 구한다.

또 선급에서는 C_w 를 계산할 때 필요한 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 과 이 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 에서 발현하는 사이클 수 n_i 는 다음 식(22)와 식(23)을 적용하고 있다¹²⁾. 즉 이 식들은 선급에서 계산모델에 대한 응력스펙트럼을 작성할 때 사용하는 기준이라고 할 수 있다.

$$\Delta\sigma_i = \frac{17-2i}{16} \Delta\sigma_{max} \quad (22)$$

$$n_i = 0.9 \times 10^i \quad (23)$$

단, $i=1, 2, 3, \dots, 8$ 이고 $\Delta\sigma_{max}$ 는 구조해석을 통하여 얻어지는 최대 응력범위이다.

상기 식과 전술한 S-N 곡선을 이용하여 선급규칙에 따라 계산모델에 대한 C_w 를 구한 결과 그 값은 0.0455을 얻었다. 따라서 계산모델은 선급규칙에 따라 2배의 안전율을 고려하더라도 예상 설계수명동안에는 피로균열이 발생하지 않는다는 것을 예측할 수 있다.

3.3 확률밀도함수의 직접계산법에 의한 C_w 의 계산

확률밀도함수와 S-N곡선을 사용하여 C_w 를 직접 계산할 수 있도록 정리된 식(15)를 사용하여 C_w 를 계산하는 계산법(이하 "직접계산법"이라 한다)을 이용하여 계산모델에 대하여 형상계수 h 를 변경시키면서 C_w 를 계산하면 그 결과는 Table 2 및

Table 2 The Cumulative damage factors at various h parameter

h	Cumulative damage factor(C_w)
0.50	0.00146
0.60	0.00322
0.70	0.00736
0.80	0.01618
0.90	0.03346
1.00	0.06477
1.10	0.11788
1.20	0.20283
1.30	0.33204
1.40	0.52018

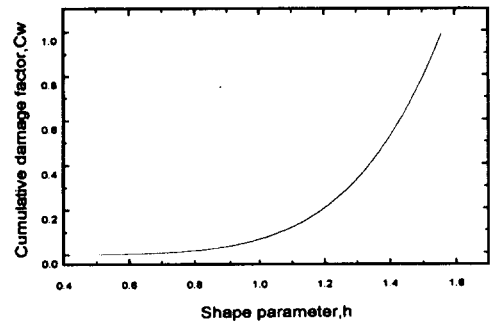


Fig. 6 The cumulative damage factor at various numbers of block

Fig.6과 같다. 이 도표를 보면 3.1에서 전술한 바와 같이 형상계수 h 를 1.0으로 한 경우 C_w 는 0.06477로써 문헌^{13~14)}의 계산결과와 일치하고 있다. 그러나 형상계수 h 가 커지면 C_w 는 증가하고 형상계수 h 가 1.2 이상에서 C_w 는 급격한 증가를 보이는 것을 알 수 있다.

이 계산모델의 경우 설계단계에서 설계자의 판단에 따라서 또는 선급규칙에 따라서 C_w 에 대해서 2배의 안전율을 고려하고 또 형상계수 h 를 1.3으로 채택하게 되면 C_w 는 1.0을 초과하게 되어 예상 설계수명동안 피로균열이 발생하는 것으로 예측되므로 설계자는 이 모델의 설계하중을 줄이거나 피로강도가 보다 높은 재료를 사용하거나 또는 응력집중을 완화시키는 등의 조치를 고려하여야 한다.

이와 같이 구조해석을 통하여 얻어진 최대 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 를 기준으로 응력스펙트럼을 작성할 때 예상 설계수명동안 변동응력의 분포를 결정하는 형상계수 h 의 크기에 따라 피로균열 발생수명은

서로 다르게 예측될 수 있으므로 설계단계에서 또는 관련 규칙을 제정할 때에 이를 충분하게 고려하여야 한다.

3.4 확률밀도함수의 블록화 계산법에 의한 C_w 의 계산

예상 설계수명 동안의 변동응력을 블록으로 나누어 각 블록마다의 손상계수를 선형적으로 합산하는 계산법(이하 “블록화 계산법”이라 한다)은 최대 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 를 기준으로 나누고자 하는 블록수를 정하고 식(8) 또는 식(9)를 이용하여 응력스펙트럼을 작성하여 해당 응력범위 $\Delta\sigma$ 가 예상 설계수명 동안 발현하는 사이클 수 n_i 를 구한다. 또 $S-N$ 곡선으로부터 해당 응력범위 $\Delta\sigma$ 에서 피로균열이 발생하는 사이클 수 N_i 를 구하여 이것들을 다음 식(24)에 대입하여 선형적으로 합산하는 방법이다.

$$C_w = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \tag{24}$$

여기서, k 는 나누고자 하는 블록의 개수이다.

Table 3과 Fig.7은 블록화계산법을 이용하여 계산모델에 대하여 형상계수 h 를 1.0으로 일정하게 두고 블록의 개수는 8개~30개로 나누어 각각 계산한 결과를 나타낸 것이다.

이 도표에서 블록의 개수가 8개인 경우 C_w 의 계산 결과는 0.01609에 불과하지만 블록의 개수를

Table 3 The Cumulative damage factors(C_w) as various numbers of block with constant shape parameter $h=1.0$

Numbers of block	C_w	Numbers of block	C_w
8	0.01609	19	0.32919
9	0.03436	20	0.36959
10	0.05434	21	0.41225
11	0.07697	22	0.4568
12	0.10094	23	0.5034
13	0.12787	24	0.55213
14	0.1559	25	0.60271
15	0.18711	26	0.65561
16	0.21924	27	0.71022
17	0.25418	28	0.76729
18	0.29043	29	0.82595
19	0.32919	30	0.8872

23개로 증가시킨 경우 C_w 는 크게 증가하여 0.5034가 되는 것을 알 수 있다. 그림에서는 응력스펙트럼의 블록 개수가 많으면 많을 수록 C_w 는 커지게 된다는 것을 알 수 있다.

따라서 설계단계에서 식(24)를 사용하여 C_w 를 계산하고 이 값을 기준으로 피로균열 발생수명을 예측할 때에는 블록의 개수를 많게 하는 것이 설계자의 입장에서는 안전쪽(conservative)의 설계가 될 수 있다.

Fig.8은 블록화 계산법을 이용하여 C_w 를 계산할 때 형상계수 h 가 C_w 에 미치는 영향을 시뮬레이션한 것이다. 이 시뮬레이션은 형상계수 h 를 0.5, 0.8, 1.0 및 1.2로 변화시키면서 동시에 블록 개수를 8개에서 20개로 변화시켰을 때 C_w 의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 블록의 개수가 증가하면 C_w 는 커지게 되고, 형상계수 h 를 큰 값으로 채택할 수록 블록 개수의 증가가 C_w 에 미치는 영향이 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

계산모델의 경우 형상계수 $h < 1$ 인 경우 블록의

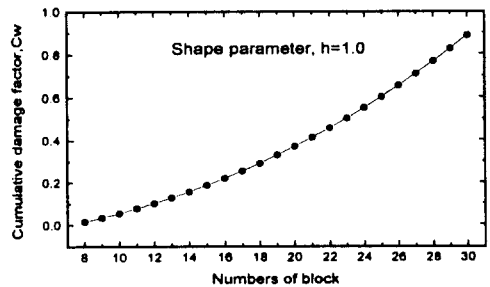


Fig. 7 The cumulative damage factor at various numbers of block

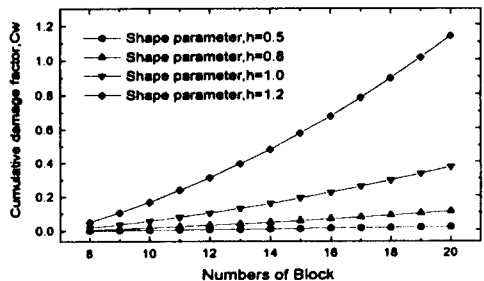


Fig. 8 The cumulative damage factor at various shape parameter and numbers of block

개수가 C_w 에 미치는 영향은 거의 미미하고, 형상계수 $h=1.0$ 인 경우에는 블록의 개수가 12개 이상으로 되면 C_w 에 점진적으로 영향을 미치게 되고, 형상계수 $h > 1.0$ 인 경우에는 블록의 개수가 C_w 에 미치는 영향이 더욱 커지게 되는 것을 이 그림과 Table 3 등을 통하여 알 수 있다.

따라서 설계에 대한 기준을 제시하거나 또는 간이화된 규칙을 제정할 때 널리 사용되는 블록화계산법은 그 적용에 대해서는 충분한 고려를 할 필요가 있다. 즉 형상계수 h 와 블록 개수를 변화시키면서 각각 C_w 를 계산하고 이것을 기준으로 설계하중의 증감, 응력집중을 완화시킬 수 있는 공작법의 선택, 구조부재의 치수 증감, 다른 재료의 선택 등을 시뮬레이션함으로써 안전성과 경제성을 동시에 확보할 수 있게 된다.

Fig.9는 선급규칙에서 응력스펙트럼을 작성할 때 사용하는 식(22)에 대한 이론적인 배경을 조사하기 위하여 선급규칙인 식(22)에 따라 응력블록을 8개로 일정하게 두고 형상계수 h 를 0.90부터 0.01씩 0.98까지 변화시키면서 C_w 의 변화를 시뮬레이션한 것이다.

그림에서 “▼”는 선급규칙인 식(21)를 사용하여 계산된 $C_w=0.0455$ 를 나타내고 있으며 “●”는 블록화계산법인 식(24)로 계산된 C_w 를 나타내고 있다.

따라서 이 그림을 통하여 응력블록을 8개로 일정하게 규정한 선급규칙인 식(22)는 그 이론적인 배경으로써 형상계수 h 를 0.94~0.95 정도 채택하고 있다는 것을 알 수 있다.

또 전술한 Table 3을 참고하면 만약 선급규칙에서 형상계수 h 를 1.0으로 일정하게 채택하고자 하

는 경우에는 응력블록의 개수는 9~10개 정도 나누게 되면 그때의 C_w 값은 선급규칙인 식(21)를 사용하여 계산된 $C_w=0.0455$ 와 비슷하게 된다는 것도 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 선형누적손상계수, 확률밀도함수에 대한 이론적인 해석과 정리를 통하여 응력스펙트럼과 S-N곡선이 조합된 형태의 선형누적손상계수 계산식을 유도하고, 또 이를 바탕으로 135,000m³ LNG탱크를 계산모델로 채택하여 여러 방법으로 선형누적손상계수를 계산하여 피로균열의 발생수명을 예측하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 응력스펙트럼과 S-N곡선으로 표현된 선형누적손상계수 계산식을 유도하였다. 이 식은 응력스펙트럼과 S-N곡선의 인자 등이 선형누적손상계수를 미치는 영향을 시뮬레이션하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.
2. 확률밀도함수를 이용하여 피로균열 발생수명을 예측할 때 확률밀도함수의 형상계수를 큰 값으로 채택할 수록 또 응력블록의 개수를 많게 할 수록 피로균열의 발생수명은 짧게 평가된다.
3. 선급에서 LNG탱크에 대한 피로균열 발생수명을 계산할 때 사용하는 응력스펙트럼은 그 이론적인 배경으로써 응력블록을 8개인 경우 0.94~0.95 정도의 확률밀도함수 형상계수를 채택하고 있다.
4. 확률밀도함수를 이용하여 135,000m³ LNG탱크의 적도부와 스커트의 연결부에 대하여 선형누적손상계수를 계산한 결과 그 값은 0.045로서 이 연결부에는 예상 설계수명동안 피로균열이 발생하지 않는 것으로 예측된다.

참고문헌

1) Almar Naess, Handbook Offshore Steel Structures, Tapir, pp.176~182, 1985

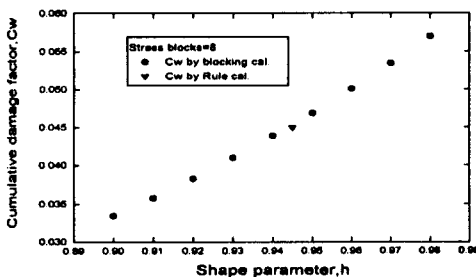


Fig. 9 The cumulative damage factor by blocking calculation and Rule calculation

- 2) H.T.Corten and T.J.Dolan, "Cumulative Fatigue Damage", Proc. of International Conference on Fatigue of Metals, pp.235~246, 1986.
- 3) 菊川眞, 城野政弘, 宋智浩, "繰返し塑性ひずみと累積疲労損傷(疲労限度以下の応力による疲労損傷)", 材料, Vol.21, pp.753~758, 1972.
- 4) 李時中, 宋智浩, 河在宣, "면동하중하의 피로수명예측 제2보 피로균열발생수명을 위한 컴퓨터 소프트웨어", 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第6號, pp.1350~1357, 1988
- 5) ASTM, Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis(E1049), ASTM, pp.707~715, 1980.
- 6) (사)한국선급, 선급 및 강선규칙 제7편 5장 액화가스산적운반선, (사)한국선급, p.41, 1995.
- 7) Almar Naess, Fatigue Handbook Offshore Steel Structures, Tapir, pp.42~70, 1985
- 8) 永元隆一, 牛島正夫, 黒川正文, 矢島浩, 川野始, "球形タンク方式 LNG船のタンク, 船材料と信頼性", MITSUBISHI 重工技報, Vol. 21, No.2, p.203, 1984.
- 9) 日本造船研究協會, LNG運搬船の安全基準に關する調査研究報告書, 日本造船研究協會, pp.120 ~ 122, 1976.
- 10) Almar Naess, Fatigue Handbook Offshore Steel Structures, Tapir, pp.87~88, 1985
- 11) IACS(International Association of Classification society), Working Party on Strength of Ships, Ad Hoc Group on Fatigue, IACS, pp.26~29, 1996.
- 12) (사)한국선급, 선급 및 강선규칙 제7편 5장 액화가스산적운반선 적용지침, (사)한국선급, p.16, 1996.
- 13) Lloyd register of shipping, MOSS Rosenberg LNG containment system, Lloyd register of shipping, pp.46~55, 1990.
- 14) R. Nagamoto, M. Matoba, D. Sakai and K. Hashimoto, "A Review of Japanese Research into the Fatigue of A5083-O Alloy Construction for LNG Spherical Tanks", IIW Technical report, Vol. XIII-1235-87, pp.1~38, 1987.

저 자 소 개



김종호(金宗鎭)

1958년 10월생, 1982년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1990년 동대학원 졸업(석사), 1995년 동대학원 졸업(박사), 1987년-1996년 3월 한국선급, 1996년 4월~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수 당학회 회원