

확률밀도함수를 이용한 멤브레인방식 LNG탱크의 선형누적손상도 평가에 관한 연구

김 종 호†

(원고접수일 : 2004년 5월 12일, 심사완료일 : 2004년 7월 12일)

A Study on the Evaluation of Linear Cumulative Damage Factor of Membrane Type LNG Tank by use of Probability Density Function

Jong-Ho Kim†

Abstract : The estimation of fatigue life at the design stage of membrane type LNG tank is very important in order to arrive at feasible and cost effective solutions considering the total lifetime of the tank.

In this study, the practical procedure of fatigue life prediction by use of cumulative damage factors based on Miner-Palmgren hypothesis and probability density function has been shown with the corner region of Gaz Transport Membrane type LNG tank being used as an example.

In particular the parameters of Weibull distribution that determine the stress spectrum are discussed. The main results obtained from this study are as follows :

1. The recommended value for the shape parameter of Weibull distribution for the LNG tank is 1.1 in case of using the direct calculation method proposed in this study.
2. The calculated fatigue life is influenced by the shape parameter of Weibull distribution and stress block. The safe fatigue design can be achieved by using higher value of shape parameter and the stress blocks divided into more stress blocks.

Key words : Membrane Tank(멤브레인 탱크), Fatigue Life(피로수명), Probability Density Function(확률밀도함수), Cumulative Damage Factor(선형누적손상계수), Weibull Distribution(와이블 분포), Shape Parameter(형상모수), Reliability(신뢰성), Stress Ratio(응력비), Stress Range(응력범위)

1. 서 론

구조물, 기계부품 등의 설계단계에서 선형누적

손상계수⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾(cumulative damage factor)를
계산하여 피로균열의 발생수명을 예측하는 것은
설계수명의 확보, 생산공정에 대한 경제성 확보,

† 책임저자(한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부), E-mail : kjh@mail.hhu.ac.kr, T : 051-410-4251

정기적인 검사 주기의 결정 등의 측면에서 중요하게 취급되고 있다.

특히 지난 몇 년간 국내 조선소에서 건조 중인 MOSS 방식 또는 멤브레인방식 LNG 탱크는 선박의 예상 설계수명(통상 20년을 기준으로 함) 동안 그 모재 및 용접부에서 피로균열이 발생하지 않도록 설계하는 전형적인 대형 구조물이다.

그 중 Gaz Transport 멤브레인방식의 LNG 탱크는 두께 0.7~1.5 mm의 36% 니켈강을 사용하는 1차, 2차 멤브레인과 이를 각각 지지하는 단열상자(Insulation box)로 구성되어 있다.

실제 이 탱크의 1차, 2차 멤브레인은 단열상자에 의해서 지지되고 또 구속되므로 구조강도를 직접적으로 부담하지 않는다. 그러나 이 탱크 모서리부(corner region)의 1차, 2차 멤브레인은 정하중(가스 압력, 열하중, 탱크의 자중 등)과 동하중(선체 운동에 의한 선체의 굽힘력, 슬로싱 하중 등)에 의해서 발생하는 변동응력의 영향을 받게 된다.

따라서 안전이 최우선 시 되는 이 선박의 경우 설계단계에서부터 이 탱크의 모서리부에서의 피로균열 발생 가능성과 심각성을 충분히 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 두께 0.7~1.5 mm의 36% 니켈강⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾으로 제작되는 Gaz Transport 멤브레인방식 LNG 탱크의 모서리부에 대하여 확률밀도함수를 이용한 여러 방법으로 선형누적손상계수를 계산하고 그 결과를 고찰하였다.

또 연구대상인 LNG 탱크에 대한 신뢰성 평가를 위한 데이터 베이스의 일부분을 확보할 목적으로 와이블 분포⁽⁸⁾⁻⁽⁹⁾의 형상모수에 대한 여러 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 이론해석

2.1 확률밀도함수

구조물이나 기계부품에 Fig.1과 같은 변동 응력이 부가되는 경우 시간의 변화에 따라 각 응력범위 $\Delta\sigma_i$ 가 발현하는 빈도를 형상모수 h 와 척도모수 q 로 구성된 2 모수 Weibull 분포로 가정하고 이

를 확률밀도함수 $f(\Delta\sigma)$ 로 정의하면 다음 식(1)과 같다.

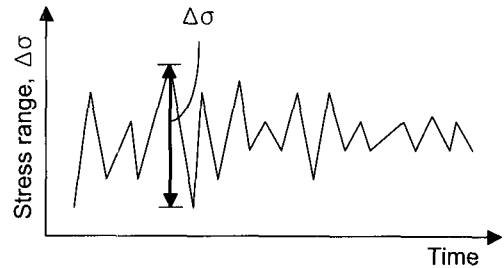


Fig. 1 Random stress history

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

2.2 확률밀도함수로 표현한 응력스펙트럼

예상 설계수명동안 발현하는 변동응력의 사이클 수를 모두 합하여 n_o 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.

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

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

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 $\Delta\sigma$ 를 초과하는 응력범위 $\Delta\sigma$ 가 발현하는 확률 $Q(\Delta\sigma)$ 는 Weibull분포의 형상모수 h 와 척도모수 q 를 사용하여 쓸 수 있게 된다.

이상의 식으로부터 확률밀도함수를 이용하여 피로균열 발생수명을 예측하는 데에 필요한 응력스펙트럼을 작성하는 식을 얻을 수 있다. 즉 응력스펙트럼은 설계대상에 대한 응력해석을 통하여 최대 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 가 구해지면 그 이하의 일정 응력범위 $\Delta\sigma$ 를 초과하여 발현하는 사이클 수는 다음 식 (4) 또는 식 (5)로 구할 수 있게 된다⁽¹⁰⁾.

$$Q(\Delta\sigma) = \frac{n}{n_0} = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{\max}}\right)^h \ln n_0\right] \quad (4)$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{\max} \left(1 - \frac{\log n}{\log n_0}\right)^{1/h} \quad (5)$$

상기 식에서 n_0 는 예상 설계수명동안 발현하는 변동응력의 사이클 수, n 는 일정 응력범위 $\Delta\sigma$ 가 초과하여 발현하는 사이클 수를 각각 의미한다.

2.3 확률밀도함수로 표현한 선형누적손상계수

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 선형누적손상계수 (C_w)는 다음 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$C_w = \int_0^\infty n_0 \frac{f(\Delta\sigma)}{N(\Delta\sigma)} d\Delta\sigma \quad (6)$$

상기 식에서 $N(\Delta\sigma)$ 는 $S-N$ 곡선의 각 응력범위 $\Delta\sigma$ 에서 피로균열이 발생하는 사이클 수이다.

또 $S-N$ 곡선을 식으로 표현하면 다음 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Log}N = \log a - m \log \Delta\sigma, \quad N = a \Delta\sigma^{-m} \quad (7)$$

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

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 정리하면 C_w 는 다음 식 (8)과 같이 $S-N$ 곡선과 확률밀도함수의 인자 및 감마함수 $\Gamma(n)$ 로 표현할 수 있게 된다.

$$C_w = \frac{n_0}{a} \frac{\Delta\sigma_{\max}^m}{(\ln n_0)^{m/h}} \Gamma\left(\frac{1+m}{h}\right) \quad (8)$$

상기 식에서 $\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-t} t^{n-1} dt$ 라고 한다.

3. 선형누적손상계수의 계산 및 고찰

3.1 계산모델

Fig. 2는 확률밀도함수를 이용하여 피로균열의

발생수명을 예측하기 위하여 본 연구에서 계산모델로 채택한 Gaz Transport 멤브레인방식 LNG 탱크의 모서리부(corner region)를 나타내고 있다.

본 연구에서는 이 탱크의 모재, 용접부 등에 대한 연구 결과^{[11]-[13]}를 참고하여 현실적으로 문제가 되는 1.5 mm-1.5 mm Lap 이음부(그림에서 "A"로 표시됨)에 대한 선형누적손상계수(이하 " C_w "라 한다)를 계산하였다.

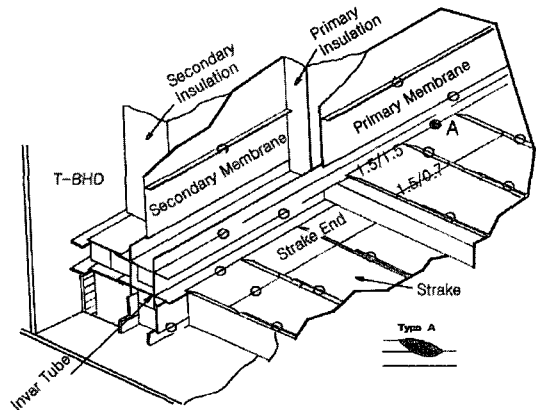


Fig. 2 The typical structure of corner region of GT membrane type LNG tank

계산에 필요한 최대 응력범위 $\Delta\sigma_{\max}$ 와 $S-N$ 곡선은 실적선의 구조해석 결과^[13]와 일본조선연구협회의 시험결과^[12]를 각각 사용하였고, 예상 설계수명동안 발현하는 변동응력의 사이클 수 n_0 는 10^8 개로 가정하였다.

3.2 응력스펙트럼의 작성

계산모델의 1.5 mm-1.5 mm Lap 이음부에 대한 C_w 를 계산하는 데에 필요한 응력스펙트럼은 구조해석을 통하여 얻어진 응력을 기준으로 전술한 식 (5)를 사용하여 Fig. 3과 같이 작성하였다. 여기서 각 응력은 상기 Lap 이음부에 작용하는 정하중(가스 압력, 열하중, 탱크의 자중 등)과 동하중(선체 운동에 의한 선체의 굽힘력, 슬로싱 하중 등)을 고려한 3차원 유한요소해석을 통하여 구한 것이다.

Fig. 3은 본 연구의 계산모델에 대하여 예상 설계수명동안 $104 \pm 59 \text{ MPa}$ (평균응력은 104 MPa , 최대 응력범위는 118 MPa)의 변동응력이 총 10^8 개 부가된다고 가정하고 이때 발현하는 최대 응력범위를 8개의 응력 블록으로 나누어 여러 형상모수 h 에서 응력스펙트럼을 작성한 것이다.

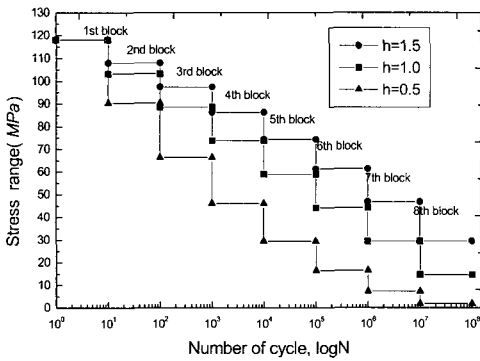


Fig. 3 Stress spectrum at various shape parameters(h)

이 그림에서 알 수 있는바와 같이 형상모수 h 가 1.5인 경우에는 형상모수 h 가 1.0인 경우에 비해서 높은 응력레벨이 발현하는 사이클 수가 증가하고 형상모수 h 가 0.5인 경우에는 그 반대의 현상을 보이고 있다.

설계단계에서 형상모수 h 는 설계대상 또는 사용환경 등에 따라 다른 값을 적용할 수 있으나 본 연구의 계산모델인 LNG 탱크와 같이 정하중과 동하중을 동시에 받는 경우에는 $1.0 < h < 1.3$ 범위의 적절한 값을 채택하는 것이 일반화되어 있다^[14].

3.3 S-N곡선의 작성

계산모델의 1.5 mm-1.5 mm Lap 이음부에 대한 C_w 를 계산하는 데에 필요한 S-N곡선은 일본조선연구협회가 제안한 식 (9)를 본 연구에서 수정하여 사용하였다.

$$N_i = 1.8 \times 10^6 (S_a, o/2.3)^{-6.58} \quad (9)$$

식 (9)는 일본조선연구협회가 LNG 탱크의 국산화를 위하여 일본 국내의 대학 및 연구소에 의

뢰하여 1.5 mm-1.5 mm Lap 이음부의 시험편 채취방향, 응력집중계수, 응력비, 하중형식 등에 따라 상온에서 구한 피로시험의 결과^[15]를 파손확률 1%로 정리한 것이다. 이 식에서 N_i 는 피로균열발생수명, S_a, o 는 응력비 $R=0$ 에서의 응력진폭(kg/mm^2)이다.

본 연구에서는 상기 일본조선연구협회의 제안식을 설계단계에서 손쉽게 사용할 목적으로 식 (9)의 응력진폭과 그 단위를 응력범위와 MPa로 각각 치환하고 또 응력집중으로 인한 피로강도감소, 응력비의 영향 등을 고려하여 식 (10)과 같이 수정하였다.

$$N_i = 5.77 \times 10^{16} (\Delta\sigma_i/2.3 k_f k_r)^{-6.58} \quad (10)$$

상기 식에서 N_i 는 응력비 $R=0$ 의 일정 응력범위 $\Delta\sigma_i$ (MPa)에서 피로균열 발생까지의 사이클 수이고 K_f 는 응력집중(K_t)으로 인한 피로강도감소계수, K_r 은 응력비 R 에 대한 보정계수로써 다음 식 (11) 및 식(12)와 같다.

$$K_f = \frac{1}{2} K_t + 0.5 \quad (11)$$

$$K_r = (1 - \frac{1}{2} R)/(1 - R) \quad (12)$$

3.4 확률밀도함수를 이용한 C_w 의 직접 계산

확률밀도함수와 S-N곡선의 조합된 형태의 식 (8)을 사용하여 C_w 를 직접 계산하는 계산법(이하 "직접계산법"이라 한다)을 이용하여 형상모수 h 를 변경시키면서 본 연구의 계산모델에 대한 C_w 를 계산하면 그 결과는 Table 1 및 Fig.4와 같다.

이 표를 보면 형상모수 h 가 1.1인 경우 C_w 는 0.469로써 본 연구의 계산모델에 대한 다른 연구^[12]의 C_w 값인 0.50과 비슷한 값이다.

또 그림에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 계산모델에 대한 C_w 는 형상모수 h 가 1.0을 초과하는 경우 급격하게 변하게 되고, 형상모수 h 가 1.1인 경우의 C_w 는 h 가 1.0이거나 1.2인 경우의 C_w 의 중간 값에 상당하는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구의 계산모델에 대한 형상모수 h 는 1.1을 취하는 것이 적절하다고 할 수 있다. 왜냐하면 본 연구의 계산모델에 대한 C_w 가 전술한 다른 연구의 C_w 값인 0.50와 비슷한 값을 나타내는 형상모수 h 는 전술한 표 및 그림에서 알 수 있는 바와 같이 1.1에 가까운 값이기 때문이다.

Table 1 C_w versus h at the corner region of GT membrane type LNG tank

h	C_w	h	C_w
0.5	0.004	1.0	0.246
0.6	0.009	1.1	0.469
0.7	0.023	1.2	0.843
0.8	0.055	1.3	1.435
0.9	0.120	1.4	2.332

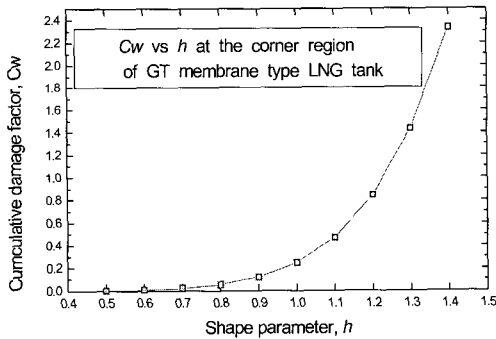


Fig. 4 C_w versus h at the corner region of GT type LNG tank

3.5 확률밀도함수를 이용한 응력 블록화에 의한 C_w 계산

예상 설계수명 동안의 변동응력을 블록으로 나누어 각 블록마다의 손상계수를 선형적으로 합산하는 계산법(이하 “응력블록화 계산법”이라 한다)은 계산의 간편함 때문에 널리 이용되고 있다.

이 계산을 위해 최대 응력범위 $\Delta\sigma_{max}$ 를 기준으로 나누고자 하는 블록수를 정하고 식 (4) 또는 식 (5)를 이용하여 응력스펙트럼을 작성하여 해당 응력범위 $\Delta\sigma$ 가 예상 설계수명 동안 발현하는 사이클 수 n_i 를 구한다. 또 $S-N$ 곡선으로부터 해당 응

력범위 $\Delta\sigma$ 에서 피로균열이 발생하는 사이클 수 N_i 를 구한다.

결국 응력블록화 계산법은 위와 같이 구한 n_i 와 N_i 를 다음 식 (12)에 대입하여 선형적으로 합산하는 방법이다.

$$C_w = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \tag{12}$$

상기 식에서 k 는 나누고자 하는 응력 블록의 개수이다.

Table 2는 응력블록화 계산법을 이용하여 본 연구의 계산모델에 대하여 형상모수 h 를 1.0으로 일정하게 두고 응력 블록의 개수는 8개~24개로 나누어 각각 계산한 결과를 나타낸 것이다.

Table 3 C_w versus numbers of block at the corner region of GT membrane type LNG tank

Numbers of block	C_w	Numbers of block	C_w
8	0.38	16	0.77
9	0.43	17	0.82
10	0.48	18	0.86
11	0.53	19	0.91
12	0.58	20	0.96
13	0.62	21	1.01
14	0.67	22	1.05
15	0.72	23	1.1

이 표에서 보면 응력 블록의 개수가 8개인 경우 C_w 의 계산 결과는 0.38이므로 예상 설계수명 동안 일정한 변동응력이 부가되어도 본 연구의 계산모델에는 피로균열이 발생하지 않는다고 할 수 있다.

그러나 상기와 같은 조건에서 단지 응력 블록의 개수를 21개 이상으로 증가시키면 C_w 는 1.0을 넘게 되므로 본 연구의 계산모델에는 예상 설계수명 동안 피로균열이 발생되는 것을 예상할 수 있다.

또 이 표를 통하여 응력스펙트럼에서 응력 블록 개수가 많으면 많을수록 C_w 는 커지게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 응력블록화 계산법을 이용하여 본 연구의 계산모델에 대하여 C_w 를 계산할 때 형상모수 h 가 C_w 에 미치는 영향을 시뮬레이션한 것이다.

이 시뮬레이션은 형상모수 h 를 1.0, 1.1 및 1.2로 변화시키면서 동시에 응력 블록 개수를 8개에서 24개로 변화시켰을 때 C_w 의 변화에 대한 것이다.

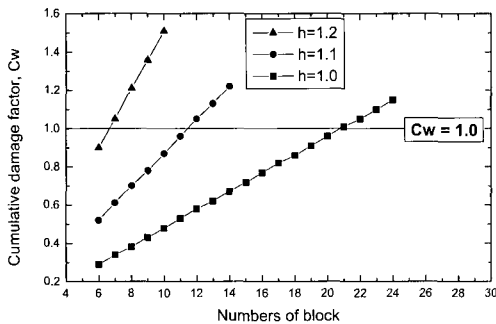


Fig. 5 C_w versus numbers of block at various shape parameters at the corner region of GT membrane type LNG tank

그림에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 계산모델은 응력 블록의 개수가 증가할수록 또 형상모수 h 를 큰 값으로 채택할수록 C_w 가 커지는 것을 알 수 있다.

본 연구의 계산모델은 응력 블록의 개수가 형상모수 $h=1.0$ 인 경우에는 21개 이상, $h=1.1$ 인 경우에는 11개 이상, $h=1.2$ 인 경우에는 6개 이상으로 되면 C_w 는 1.0을 넘게 되므로 본 연구의 계산모델에는 예상 설계수명동안 피로균열이 발생될 것을 예상할 수 있다.

따라서 피로설계에 대한 기준을 제시하거나 또는 선급 규칙^[16]을 제정할 때 널리 사용되는 응력블록화계산법은 그 적용에 대해서는 충분한 고려를 할 필요가 있다. 즉 형상모수 h 와 응력 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.

끝으로 전술한 직접 계산법에서 본 연구의 계산모델에 대한 C_w 는 0.469이고 이때의 형상모수 h 가 1.1인 것을 감안하면 본 연구의 계산모델에 대하여 응력블록화 계산법을 사용하여 C_w 를 계산하고자 할 때에는 응력 블록의 개수를 6개로 하는 것이 타당함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 두께 0.7~1.5 mm의 36%니켈 강으로 제작되는 Gaz Transport 멤브레인방식 LNG 탱크의 모서리부를 계산모델로 채택하여 확률밀도함수를 이용한 여러 방법으로 선형누적손상계수를 계산하고 그 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구의 계산모델에 대하여 확률밀도함수와 $S-N$ 곡선이 조합된 형태의 식을 직접 사용하여 구한 선형누적손상계수는 형상모수 h 값이 1.1인 경우 다른 연구의 계산결과와 비슷한 값을 보이고 있다. 따라서 확률밀도함수를 이용하여 본 연구의 계산모델에 대한 선형누적손상계수를 구하고자 할 때에는 형상모수 h 를 1.1로 하는 것이 적절하다.
2. 확률밀도함수를 이용하여 피로균열 발생수명을 예측할 때 형상모수 h 를 큰 값으로 채택할수록 또 응력 블록의 개수를 많게 할수록 피로균열의 발생수명은 짧게 평가된다.
3. 본 연구의 계산모델에 대하여 응력블록화 계산법을 사용하여 구한 선형누적손상계수는 형상모수 $h=1.0$ 인 경우에는 21개 이상, $h=1.1$ 인 경우에는 11개 이상, $h=1.2$ 인 경우에는 6개 이상으로 되면 1.0을 넘게 된다.
4. 본 연구의 계산모델에 대하여 응력블록화 계산법을 사용하여 선형누적손상계수를 계산하고자 할 때에는 응력 블록의 개수를 6개로 하는 것이 타당함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Charlie R. Brooks and Ashok Choudhury,

- Failure Analysis of Engineering Materials, McGraw-Hill, p. 334, 2002.
- [2] Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens and Henry O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons Inc., pp. 279-311, 2001.
- [3] Almar Naess, Handbook Offshore Steel Structures, Tapir, pp. 176-182, 1985.
- [4] H.T. Corten and T.J. Dolan, "Cumulative Fatigue Damage", Proc. of International Conference on Fatigue of Metals, pp. 235-246, 1986.
- [5] 李時中, 宋智浩, 河在宣, "변동하중하의 피로 수명예측 제2보 피로균열발생수명을 위한 컴퓨터 소프트웨어", 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第6號, pp. 1350-1357, 1988.
- [6] 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. 159-160, 1976.
- [7] Korean Register of Shipping, Rules for Classification-Part 7, Chapter 5, Ships carrying liquefied gases in bulk, Korean Register of Shipping, pp. 55-59, 2003.
- [8] 김혜중, 확률 및 통계학입문, 법문사, 1988
- [9] 日本機械學會, 統計的疲勞強度試驗方法, JSME S-002, 日本機械學會, pp. 7~12, 1981.
- [10] J.H. Kim, "A Study on the Prediction of Fatigue Life by use of Probability Density Function", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 23, No. 4, pp. 453-461, 1997.
- [11] M.S. Han, "A Study of the Faigue Strength and Allowable Stress of INVAR(Fe-36% Ni) Steel Lap Joint applied Cargo containment of LNG Carrier", Journal of KWS, Vol. 12, No. 1, pp. 275-280, 1994.
- [12] 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. 160-172, 1976.
- [13] Masato Zama, "Strength and Heat Transfer Characteristics of Membrane Type LNG Carriers", MITSUBISHI JUKO GIHO, Vol. 21, No. 2, pp. 101-110, 1984.
- [14] Almar Naess, Handbook Offshore Steel Structures, Tapir, pp. 87, 1985
- [15] 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, p. 10, 1976.
- [16] Korean Register of Shipping, Rules for Classification-Part 7, Chapter 5, Ships carrying liquefied gases in bulk, Korean Register of Shipping, pp. 41-43, 2003.

저 자 소 개



김종호 (金宗鎬)

1958년 10월생, 1982년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1995년 동대학원 졸업(박사), 1987년-1996년 3월 한국선급, 1996년 4월-현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부교수.