

LNG탱크 겹침용접부의 피로강도에 관한 연구

김 종 호*
(99년 1월 25일 접수)

A Study on the Fatigue Strength of Lap Weld of LNG Tank

Jong-Ho Kim*

Key Words : LNG(액화천연가스), Fatigue Crack(피로균열), Variable Load(변동하중), Membrane(멤브레인), SUS(스테인리스강), Safe Life Design(안전수명설계), Probability Density Function (확률밀도함수), Cumulative Damage Factor (누적손상계수)

Abstract

At the design stage of Mark III membrane type LNG tank, an analytical and experimental approach on the fatigue strengths of membrane and its welds are very important in order to assist designers and surveyors.

In this study, fatigue tests of lap weld of Mark III membrane type LNG tank were carried out and cumulative damage factor was calculated in order to estimate the fatigue life by probability density function and rule methods.

It contained the following tests and reviews :

- 1) The fatigue tests of lap weld of stainless steel according to statistical testing method recommended by JSME,
- 2) Preparation of S-N curve for lap welds considering the statistical properties of the results of fatigue tests,
- 3) Procedure for estimating the initiation life of fatigue crack of lap welds under variable loads by the rule of classification society and probability density function,
- 4) Guideline for inspection of lap welds of membrane type LNG tank.

* 정희원, 한국해양대학교 기관시스템공학부

1. 서 론

변동하중을 받는 구조물에 대한 설계 또는 검사 단계에서 피로균열의 발생수명을 예측하는 것은 설계수명의 확보, 생산공정에 대한 경제성 확보, 정기적인 검사 주기의 결정 등의 측면에서 중요하게 취급되고 있다. 이를 위하여 설계단계에서 설계수명 동안 부가되는 예상 하중에 의한 누적손상을 선형적으로 합산하는 선형누적손상계수(이하 “ C_w ”라 한다)를 계산하고 이 값에 일정한 안전율을 고려하는 기법^{1)~3)}이 일반화되어 있다.

본 연구에서는 Mark III형 멤브레인방식 LNG탱크(이하 “LNG탱크”라 한다)의 대표적인 용접부인 1.2-1.2mm 스테인리스강 겹침용접부에 대한 C_w 를 계산하여 LNG탱크의 예상 설계수명 동안 피로균열의 발생 여부를 예측하는 데에 그 목적이 있다.

이를 위하여 LNG탱크의 대표적인 용접부인 1.2-1.2mm 겹침용접부에 대한 피로시험을 일본기계학회가 규정한 통계적 기법⁴⁾에 따라 수행하고 그 결과를 통계적으로 처리하여 파괴확률 1%의 S-N선도를 작성하였다. 또 파괴확률 1%의 S-N 선도를 기준으로 LNG탱크 겹침용접부에 대한 C_w 를 선급 규칙⁵⁾과 확률밀도함수⁶⁾를 이용하여 계산하고 그 결과를 고찰하였다. 끝으로 하중의 부하순서와 피로한도이하의 응력이 피로균열의 발생수명에 미치는 영향을 고려하기 위하여 S-N선도 수평부의 기울기를 수정했을 때 이것이 C_w 에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다.

2. 피로시험편 및 피로시험 방법

2.1 피로시험편

본 연구에서 시험재로 사용한 스테인레스강의 대표적인 화학성분과 물리적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다.

피로시험편은 Fig. 1과 같은 구조를 가진 Mark III형 LNG탱크의 대표적인 이음부인 스테인레스강 1.2-1.2mm를 자동으로 용접한 시험재에서 채취한 것으로 그 형상 및 치수는 Fig. 2와 같으며 그림에서 “La”는 용접 각장(weld leg)를 의미한다. 또 본

연구에서 사용한 시험재는 LNG탱크에 실제로 적용되는 용접조건으로 제작하였으며 시험재의 용접 각장은 $2\text{mm} \leq La \leq 3.28\text{mm}$, 목두께(weld throat)의 평균치는 0.75mm가 되도록 제작하였다. Table3은 시험재의 용접조건을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical compositions of SUS 304L(wt. %)

	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr
Specified	Max. 0.03	Max. 1.0	Max. 2.5	Max. 0.03	Max. 0.04	9.0~13.0	18.0~20.0
Results	0.02	0.74	0.93	0.014	0.023	10.05	18.40

Table 2 Mechanical properties of SUS 304L

	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	Elongation(%)	Hardness		
				H _B	H _{RB}	H _V
Specified	≥175	≥480	≥40	≤187	≤90	≤200
Results	270	590	60	143	77	145

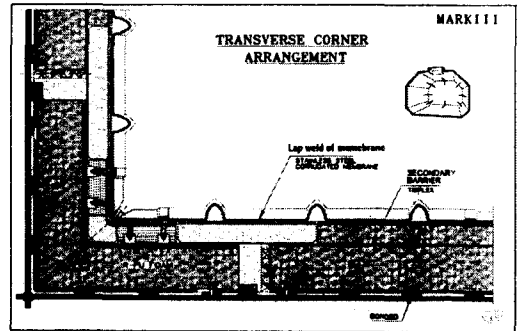


Fig. 1 Construction of Mark III type LNG tank

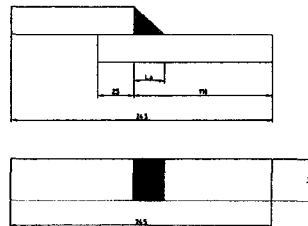


Fig. 2 Fatigue test specimen for Lap weld

Table 3 Welding condition of lap weld of stainless steel

Welding Method	Thickness (mm)	Current(A)	Speed (mm/min)	Pulse Time (sec.)
Automatic TIG	1.5/1.5	70~100	117	0.03/0.03

2.2 피로시험 방법

피로시험은 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) $R=0$ 의 조건으로 실온의 대기 중에서 수행하였으며 시험편의 수, 시험응력범위 등은 일본기계학회에서 규정한 통계적피로시험방법에 따라 결정하였다. 먼저 S-N선도의 경사부에 대한 시험응력을 결정하기 위하여 예비시험을 수행하고 $N_f=5 \times 10^4$ 에 상당하는 응력범위는 230MPa, $N_f=1 \times 10^6$ 에 상당하는 응력범위는 140 MPa 정도될 것을 예상하고 첫 번째 피로시험은 응력범위 230 MPa에서 시작하였다. 이후부터는 응력단계를 30 MPa로 낮추면서 응력범위 140 MPa까지 시험값 4개를 구한 후, 120 MPa에서 10^7 회에서 파단되지 않는 최초의 미파단 시험값을 얻었다. 다시 응력범위를 140 MPa로부터 응력단계를 30 MPa씩 올리면서 230 MPa까지 시험 값 4개를 구함으로써 S-N선도의 경사부에 해당되는 8개의 시험값을 구하였다.

S-N선도의 수평부에 대한 피로시험은 상기 통계적피로시험방법에 규정된 Stair case법을 사용하였다. 상기 8개 시험값에서 시간강도의 변동계수를 구하고 이 값에 최초의 미파단 시험값인 120 MPa를 곱하면 S-N선도의 수평부를 얻기 위한 응력단계인 12 MPa를 얻을 수 있다. 따라서 S-N선도의 수평부를 얻기 위한 첫 번째 응력범위 132 MPa이 된다. 본 연구의 경우 이 응력범위에서 파단이 발생하였으므로 두 번째 응력범위는 다시 120 MPa으로 낮추어 시험한 결과 10^7 회까지 파단되지 않았다. 이후부터는 응력범위 $S(i)=120 \pm 12$ MPa에서 시험을 계속하여 총 6개의 시험값을 구하였다.

피로시험에 사용한 시험장비는 정적하중 250 kN, 동적하중 ± 125 kN의 용량을 가진 유압-서보 제어식 피로시험기였고 부하속도는 25 Hz로 하였다. 또 피로시험편과 실제 LNG탱크의 지지조건의

차이, 피로시험편에 발생하는 굽힘응력 등이 용접부의 응력분포에 미치는 영향을 검토하기 위하여 피로시험편에 대한 탄성유한요소 해석을 수행하였다. 이 해석을 통하여 본 연구에서와 같이 피로시험편의 앞면과 뒷면이 지지되지 않은 상태에서 용접부에 발생하는 최대응력은 실선 LNG탱크의 용접부에서와 같이 용접부가 지지되는 상태에서 발생하는 최대응력보다 크다는 것과 본 연구에 사용된 겹침용접부 피로시험편의 경우 용접부에 발생하는 최대응력은 시험편이 피로시험기의 지그에 물리는 위치에 영향을 받지 않는다는 것도 확인할 수 있었다. 이 해석결과에 대해서는 다른 연구⁷⁾를 통하여 발표한 바가 있으므로 지면을 고려하여 생략한다.

3. 피로시험결과 및 고찰

3.1 겹침용접부에 대한 S-N선도

겹침용접부에 대한 S-N선도를 작성함에 있어 목부에서의 응력범위 또는 파단위치에서의 실단면 응력범위 등에 의하여 정리하면 이음부재의 치수의 영향을 받지 않는 S-N선도를 작성할 수 있다고 보고된 것^{7)~8)}을 참고하여 본 연구에서는 피로시험 결과를 파단위치에서의 실단면 응력범위를 기준으로 정리하였다.

Fig. 3은 겹침용접부에 대한 피로시험결과를 응력범위와 파단수명의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서 화살표를 부기한 실험점은 10^7 사이클에서 파단되지 않은 피로시험편을 의미하며 삼각형으로 표시된 것은 Stair case에 따라 시험한 값을 의미한다.

Fig. 4는 겹침용접부에 대한 C_w 를 계산하기 위해서 본 연구에서 작성한 S-N로써 고사이클 영역에서는 Haibach가설⁹⁾에 따라 S-N선도 수평부의 기울기를 1/2로 수정하였다. 그림에서 실선은 피로시험 결과를 파괴확률 50%으로 나타낸 것이고 파선은 본 연구에서 C_w 를 계산할 때 사용한 1%파괴확률선을 표시하고 있다. 참고로 본 연구의 시험결과를 정리한 식을 표현하면 파괴확률 50%에 해당하는 실선은 식(1)과 같이 되며, 파괴확률 1%에 해당되는 파선은 식(2)와 같이 된다. 본 연구의 피로시험에서 구해진

계수 $\hat{\alpha}_2=17.4974$, $\hat{\beta}_2=-5.4192$, 파단수명의 표
준편차값 $\hat{\sigma}(\text{Log } N_f)=0.2324$ 이었다.

$$\text{Log } N_f = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \text{Log}(\Delta\sigma) \quad (1)$$

$$\text{Log } N_f = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \text{Log}(\Delta\sigma) - 2.33\hat{\sigma}(\text{Log } N_f) \quad (2)$$

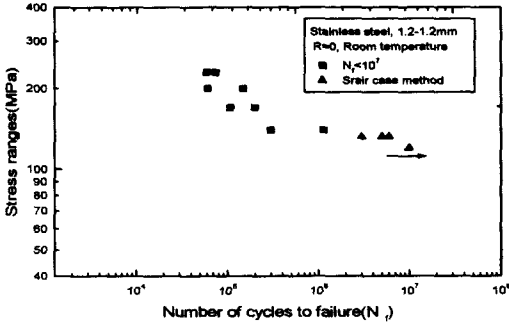


Fig. 3 S-N curve of lap weld

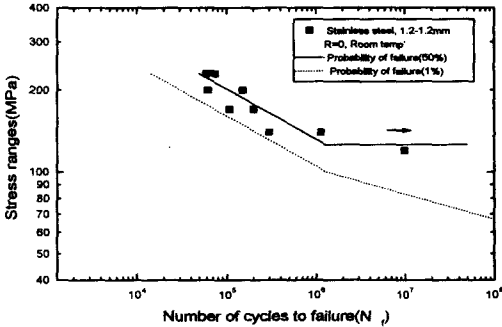


Fig. 4 Design S-N curve of lap weld

3.2 LNG탱크의 피로균열 발생수명 계산

LNG탱크 겹침용접부에 대한 피로균열 발생수명
을 계산하는 데에 사용하는 선급 규칙⁵⁾은 식(3)과
같다.

$$C_w = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 0.5 \quad (3)$$

여기서, n_i 는 선박의 설계수명 동안에 각 응력
레벨에서의 사이클 수를 의미하며 이를 합산하면
 10^8 이 된다. N_i 는 S-N 곡선에 의한 각 응력레벨
에서의 파괴까지의 사이클 수이다.

또 C_w 의 계산에 사용되는 응력블록은 8개로 하
여 σ_i 및 그 반복수 n_i 는 다음 식¹⁰⁾에 따라 계
산한다.

$$\sigma_i = \frac{17-2i}{16} \sigma_{max} \quad (4)$$

$$n_i = 0.9 \times 10^i \quad (5)$$

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

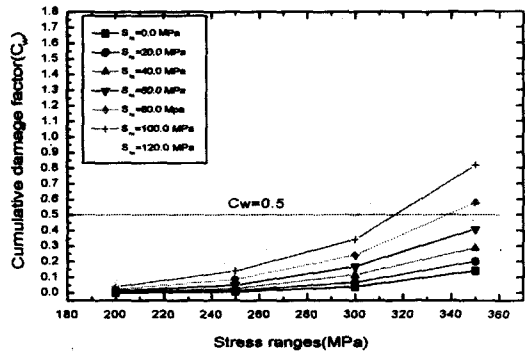


Fig. 5 Cumulative damage factor by Rules

Fig. 5는 겹침용접부에 대한 C_w 를 선급규칙에
따라 계산한 결과와 선급규칙에서 허용하는
 $C_w=0.5$ (그림에서 점선으로 표시됨)를 함께 도시한
것이다.

그림에서는 임의의 응력진폭범위에서 평균응력
의 변화에 따른 C_w 를 일목요연하게 나타내고 있
으므로 설계자 또는 평가자의 입장에서 손쉽게 이
용할 수 있을 것으로 기대된다. 그림에서 본 연구
의 대상인 LNG탱크에는 평균응력이 100MPa으로
일정한 경우(그림에서 “+”으로 표시됨) 선급규칙에
서 허용할 수 있는 응력범위는 315 MPa 정도임을
알 수 있다.

Fig. 6은 응력스펙트럼을 작성할 때 나누는 응력 블록의 개수에 따라 C_w 가 어떻게 변화하는 것을 고찰하기 위해서 작성한 것이다. 그림에서 선급 규칙과 같이 8개의 응력블록으로 나누지 않고 응력블록 개수를 증가시키면 동일한 응력범위에서 C_w 가 커지는 것을 알 수 있다. 또 이러한 경향은 응력범위가 높은 영역에서 응력블록의 개수가 C_w 에 미치는 영향이 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 설계 하중이 높은 구조물에 대한 피로균열 발생수명을 평가할 때에는 선급규칙과 같이 8개의 응력블록으로만 계산하지 않고 응력블록을 여러 개로 나누어 각각의 C_w 를 계산하고 그 결과를 평가할 필요가 있는 것으로 사료된다.

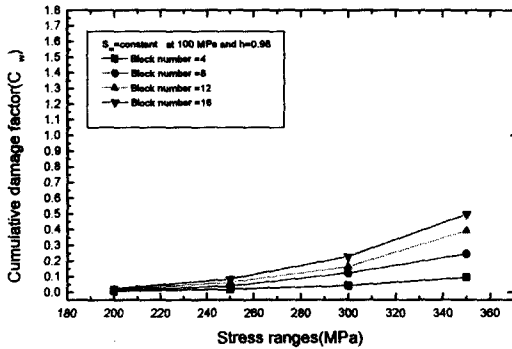


Fig. 6 The effect of stress blocking on cumulative damage factor

Fig. 7은 식(6)으로 표현되는 확률밀도함수¹¹⁾를 이용해서 겹침용접부에 대한 C_w 를 계산한 것으로 확률밀도함수의 형상계수 h 의 변화가 C_w 에 미치는 영향을 도식적으로 나타내고 있다.

$$C_w = \frac{n_o}{a} \cdot \frac{\Delta\sigma_{max}^m}{(\ln n_o)^{m/h}} \cdot \Gamma\left(\frac{1+m}{h}\right) \quad (6)$$

단, n_o : 설계수명동안 발현하는 총 사이클수, $\Delta\sigma_{max}$: 최대응력범위, a : S-N선도의 절편, m : S-N곡선의 기울기, h : 형상계수, Γ : 감마함수

확률밀도함수를 이용한 C_w 계산법을 이용하면

선급규칙을 이용하는 경우에 비해서 계산은 간단해지지만 그림에서 알 수 있는 바와 같이 일정한 평균응력하에서 형상계수 h 에 따라서 C_w 가 적지 않게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 그림에서 '4'으로 표시된 것은 선급 규칙에 따라 계산된 C_w 를 나타낸 것으로 선급 규칙에서는 확률밀도함수의 형상계수 h 를 대략 0.94~0.95 정도로 채택한 것을 알 수 있다.

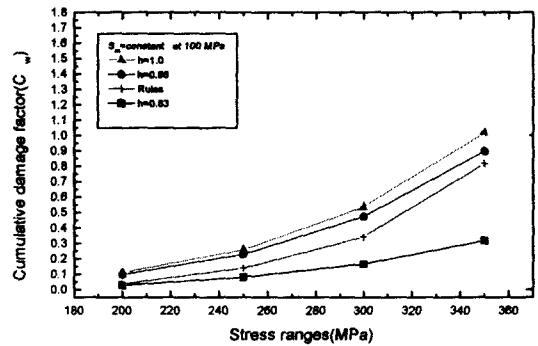


Fig. 7 Cumulative damage factor(C_w) of lap weld by the probability density function

일반적으로 피로균열의 발생 수명을 평가하기 위하여 C_w 를 계산할 때 피로한도이하의 응력범위를 고려하게 되면 그 값이 실제보다 낮아지는 측면으로 계산되는 즉 실제보다 피로균열의 발생수명이 길게 계산되는 경향이 있다. 이를 고려하기 위하여 소위 수정 Miner법칙을 사용하거나 S-N선도 수평부의 기울기를 1/2로 수정하여 사용하게 된다. 본 연구에서는 S-N선도 수평부의 기울기에 대한 수정이 C_w 에 어느 정도 영향을 미치는 가를 검토하기 위하여 본 연구의 피로시험 결과를 Fig.8과 같이 작성하였다.

이 그림은 겹침용접부에 대한 S-N선도의 기울기를 Haibach가설에 따라 피로한도에 해당되는 S-N선도 수평부의 기울기를 1/2로 수정하지 않고 일본기계학회가 규정한 방법에 따라 작성한 것이다. 이 그림에서 실선은 피로시험 결과를 파괴확률 50%으로 나타낸 것이고 파선은 본 연구에서 C_w

계산 시 사용한 1%파괴확률선을 표시하고 있다. Fig. 9는 S-N선도 수평부의 기울기를 1/2로 수정했을 때와 기울기를 1/2로 수정하지 않았을 때 각각의 C_w 를 파괴확률1%선을 사용하여 계산한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 S-N선도 수평부의 기울기를 1/2로 수정했을 때 얻어지는 C_w 는 수정하지 않았을 때에 비해서 그 값이 커지며 특히 높은 응력범위에서는 그 경향이 커짐을 알 수 있다.

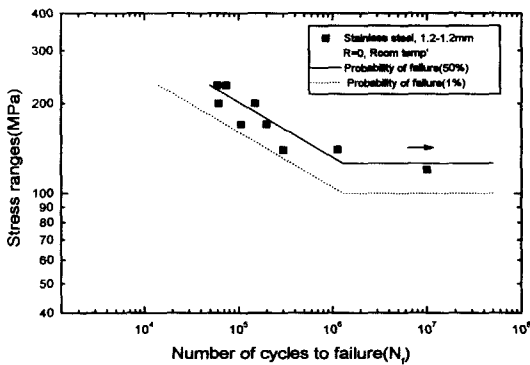


Fig. 8 S-N curve of lap weld plotted without Haibach correction

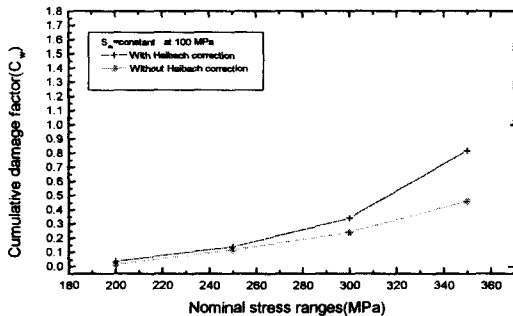


Fig. 9 The effect of Haibach correction on cumulative damage factor calculated by Rules

따라서 S-N선도를 이용하여 C_w 를 계산하고 이것을 기준으로 피로균열이 발생하는 사이클 수를 예측하는 경우 일본기계학회가 규정한 S-N선

도를 이용하는 것보다 S-N선도 수평부의 기울기를 수정한 것을 이용하는 것이 보다 설계자의 입장에서 안전한 측면의 예측이 될 수 있음을 알 수 있다.

한편 본 연구를 통하여 S-N선도의 수평부를 일본기계학회가 규정에 따라 구한다는 것은 이 수평부를 구할 때 소요되는 많은 시간과 노력, 전술한 Haibach수정 등을 고려할 때 향후 이에 대한 세밀한 검토가 필요한 것으로 사료된다. 다만 본 연구와 다른 연구결과¹²⁻¹⁷⁾ 등을 고려할 때 설계단계에서 C_w 를 계산하기 위해서 작성하는 S-N선도는 경사부에 대한 시험개수 20개, S-N선도의 수평부에 대한 시험 개수는 3개로 하고 피로한도는 Haibach수정에 따라 그 경사를 1/2로 수정하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

4. 결 론

Mark III형 멤브레인 방식 LNG탱크의 겹침용접부에 대한 피로시험, 선급규칙과 확률밀도함수를 이용한 선형누적손상계수의 계산, 컴퓨터 시뮬레이션 등을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) Mark III형 LNG탱크에 대한 피로균열 발생수명을 선급 규칙과 확률밀도함수에 따라 계산하고 이를 도식화하는 기법을 제시함으로써 LNG탱크 겹침용접부에 임의의 평균응력이 부가될 때 안전수명설계의 관점에서 허용될 수 있는 변동응력범위를 도식화하여 이를 LNG탱크의 피로설계 또는 검사 시에 이용할 수 있도록 하였다.

2) Mark III형 멤브레인 방식 LNG탱크에 임의의 변동응력이 작용할 때 겹침용접부에 대한 피로균열의 발생수명을 평가하는 데에 사용되는 선급 규칙의 이론적인 배경을 검토함으로써 선급 규칙에서 사용하고 있는 응력스펙트럼의 형상계수는 0.94~0.95 정도임을 알 수 있다. 또한 동일한 응력범위가 부가될 때 피로균열의 발생수명은 응력스펙트럼의 형상계수가 높을수록 또 응력블록의 개수가 많을 수록 짧게 평가된다.

3) S-N선도 수평부의 기울기를 1/2로 수정하여 피로균열의 발생수명을 평가하면 수정하지 않았을

때에 비해서 피로균열의 발생수명은 짧게 평가되고 특히 높은 응력범위에서는 그 영향이 커짐을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) 失川元基, "破壊力學-理論解析から工學の應用まで", 培風館, pp.140~175, 1981
- 2) Almar-Naess, A., "Fatigue Handbook Offshore Steel Structure", Tapir Publishers, pp.179~181, 1985
- 3) 송 지호, "변동하중하의 피로파괴", 대한기계학회지, 제30권 2호, pp.115~130, 1990
- 4) 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
- 5) (사) 한국선급, 선급 및 강선규칙, 제7편 5장 액화가스산적운반선, (사)한국선급, pp.41~45, 1995
- 6) Almar-Naess, A., "Fatigue Handbook Offshore Steel Structure", Tapir Publishers, pp.43~55, 1985
- 7) 김종호, "멤브레인방식 LNG탱크 용접부의 피로강도에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제 21권 제5호, pp.80~86, 1997
- 8) 한명수 외 2인, "LNG선용 36% 니켈강 (Fe-36% Ni강) Lap용접부의 피로강도와 허용응력에 관한 연구", 대한용접학회지, 제12권 제 1호, pp.109~110, 1996
- 9) Haibach, E., "Modifizierte Lineare Schadensakkumulation Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit Fortschreitender Schädigung", LBF Mitteilung TM Nr.50/70, pp.56~59, 1977
- 10) (사)한국선급, 선급 및 강선규칙 제7편 5장 액화가스산적운반선 적용지침, (사)한국선급, p.16, 1996
- 11) Almar-Naess, A., "Fatigue Handbook Offshore Steel Structure", Tapir Publishers, pp.405~415, 1985
- 12) 座間, 外6人, "メンフレソ方式LNG船の強度と傳熱特性", Mitsubishi Juko Giho, Vol. 21, No.2, pp.255~258, 1984
- 13) 김종호 외 2인, "응력비의 영향을 고려한 알루미늄합금 A5083-O의 피로균열전파 특성 예측 모델", 대한용접학회지, 제 12권 제3호, pp. 80-88, 1994
- 14) 김 중호, "극저온용 재료의 피로파괴 평가법에 관한 연구", 한국해양대학교 공학박사 논문, pp.150~155, 1995
- 15) 黃培彦 外 3名, "疲勞龜裂傳播のツミコレーションによる信頼性評價", 日本造船學會論文集, 第 165號, pp.253~264, 1988
- 16) 後川理 外 6名, "アルミニウム合金5083-O板骨溶接構造の疲勞設計法の検討", 日本造船學會論文集, 第 153號, pp.268~363, 1988
- 17) Tenge, P. and O. Solli, "Fracture Mechanics in the Design of Large Spherical Tanks for Ship Transport of LNG", Norwegian Maritime Research, Vol. 1, No. 2, pp.41~45, 1973