

멤브레인 방식 LNG탱크 용접부의 피로강도에 관한 연구

김 중 호*

A Study on the Fatigue Strength of the Welds of Membrane Type LNG Tank

J. H. Kim

Key words : LNG(액화천연가스), Membrane(멤브레인), Fatigue fracture(피로파괴)
INVAR(인바, 36% 니켈강), Safe life design(안전수명설계), Cumulative damage
factor(누적손상계수)

Abstract

In this study an evaluation method of fatigue strength of membrane type LNG tank is presented with FEM analysis and experimental approach of seam and raised edge welds. The study contains the following :

- 1)FEM analysis of test specimens
- 2)Fatigue tests of seam and raised edge welds
- 3)Estimation of cumulative damage factor of the welds on the basis of safe life design concept complying with the rules of classification society
- 4)Review of the effect of mean stress on the fatigue strength
- 5)Modelling of fatigue life of the welds which is changeable by weld heights

With the results obtained in this study, a model $\Delta\delta/h^2=0.13553 N_f^{-0.3151}$ for seam and raised edge welds having a given weld height is proposed to be useful for designers and inspectors.

1. 서론

진보(前報)¹⁾에 이어 본 연구에서는 Gaz Transport사(이하 GT)의 멤브레인 방식 LNG탱크의 전체 용접부의 대부분을 차지하는 시임용접부(seam weld) 및 레이즈드 엣지용접부(raised edge weld)의 피로강도를 안전수명설계^{2)~3)}의 관점에서 평가

하고자 한다.

이들 용접부를 안전수명설계의 관점에서 평가하고자 할 때 우선적으로 고려해야 될 것은 LNG탱크의 cooling down, 파랑에 의한 선체구조의 변형, 슬로싱 등에 의해서 LNG탱크에 발생하는 수축 팽창에 대한 용접부의 피로강도이다. 이들 용접부에 대한 피로강도를 평가한 자료³⁾는 일부 알려

* 한국해양대학교 기관공학부 (원고접수일 : 97년 4월)

져 있으나 설계단계에서 직접적으로 이용할 수 있는 자료 예를 들어 용접부의 개구량과 선형누적손상계수(cumulative damage factor, 이하 CW)의 관계를 수식화한 것 또는 평균응력을 고려하여 Cw를 계산한 것 등은 알려져 있지 않다.

다음으로 고려해야 될 것은 용접 작업기준이 용접부의 건전성을 보장할 수 있도록 제정되어 있는가를 검토하는 것이다. 멤브레인 방식 LNG탱크와 같이 용접선이 길고 또 장기간에 걸쳐 이루어지는 용접작업에 대한 기준을 제정할 때에는 작업성, 생산성, 품질유지 방안 등을 다각적으로 검토할 필요가 있고 또 본 연구의 대상인 시임용접부와 레이즈드 엣지용접부에 대해서는 자동용접기의 오동작 또는 용접사의 실수에 의해서 용접부의 높이가 용접작업 기준"을 벗어나는 경우 이것이 피로강도에 미치는 영향도 고려할 필요가 있다.

이상의 관점에서 본 연구에서는 멤브레인 방식 LNG탱크의 시임용접부와 레이즈드 엣지용접부에 대한 피로시험, 탄성 유한요소해석 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 LNG탱크의 피로강도를 평가하였다. 또 용접 작업기준에 대한 검토를 통하여 용접부의 설계단계 또는 검사단계에서 유용하게 이용할 수 있는 자료를 제시하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에서 사용한 시험편은 GT사의 멤브레인 방식 LNG탱크의 대표적인 용접부인 시임용접부 0.7/0.5/0.7mm, 1.0/0.5/0.7mm 및 레이즈드 엣지용접부 0.7/0.5/0.7mm에 대하여 자동과 수동으로 각각 용접한 시험재에서 채취한 것으로 그 형상은 Fig. 1과 같고 시험편의 폭은 40mm로 하였다. 용

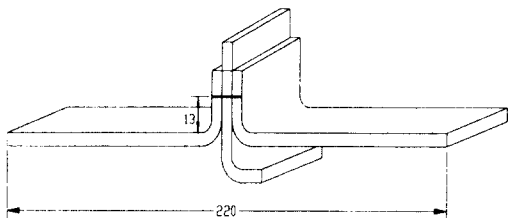


Fig. 1(a) Test specimen for seam weld (weld height=13mm)

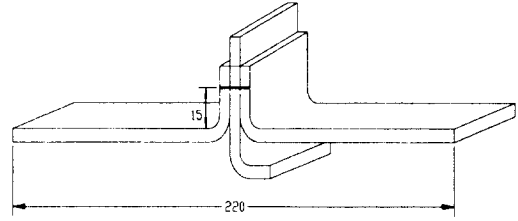


Fig. 1(b) Test specimen for seam weld (weld height=15mm)

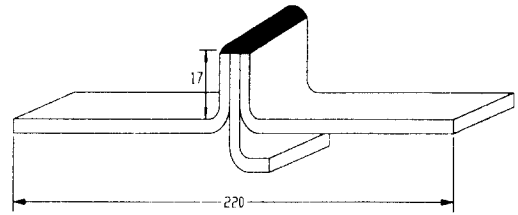


Fig. 1(c) Test specimen for raised edge (weld height=17mm)

접부높이(h) 13mm는 GT사가 정한 용접작업 기준에 따라 결정하였고, 용접부높이(h) 15mm 및 17mm는 자동 용접시 용접기의 오동작 또는 용접사의 실수에 따라 발생할 가능성이 있는 용접부높이(h)를 상정한 것이다.

Table 1은 용접 조건을 나타내고 있으며 Photo 1 및 Photo 2는 피로시험 전후의 시험편 모습을 보이고 있다. 피로시험은 개구량($\Delta\delta = \delta_{max} - \delta_{min}$) 제어 조건으로 실온의 대기 중에서 수행하였다. 또 피로시험편의 수, 시험 개구량($\Delta\delta$), 파단수명(N_f) 등은 일본기계학회가 정한 통계적피로시험방법⁵⁾에 따라 결정하였다.

피로시험시 피로하중은 용접선에 직각 방향으로 부가하였다. 이것은 용접선 길이방향의 피로강도는 2×10^6 사이클에서 10kg/mm^2 정도, 용접선 직각방향에서의 피로한도는 1kg/mm^2 정도로 보고³⁾된 것과 실선 LNG탱크의 하중조건 등을 고려하여 결정한 것이다. 피로시험에 사용한 시험장비는 정적하중 250 kN, 동적 하중 ± 125 kN의 용량을 가진 유압-서보제어식 피로시험기였고 부하속도는 8 - 15 Hz로 하였다.

Table. 1 Welding condition of test specimen for seam and raised edge welds

Joint type	Welding method	Thickness(mm)	Current(A)	Speed (mm/min)
Seam	Electric resistance weld	0.7/0.5/0.7	2100~2200	1620
		0.7/0.5/1.0	2200~2300	1660
Raised edge	Manual Tig	0.7/0.5/0.7	14~17	100~120

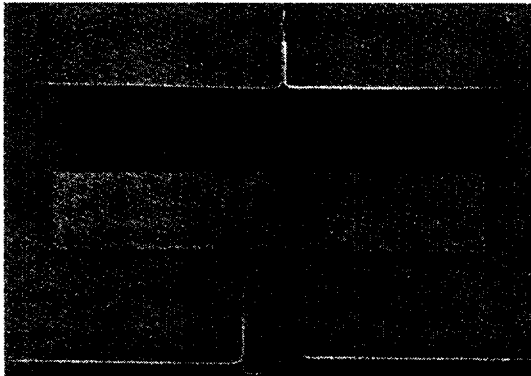


Photo 1 Test specimen for seam weld

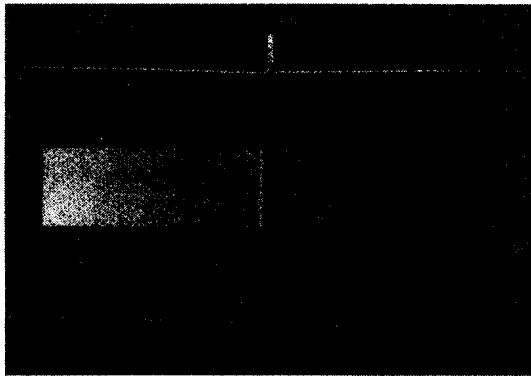


Photo 2 Test specimen for raised edge weld

3. 탄성유한요소해석

전보¹⁾에서 언급한 바와 같이 피로시험편의 지지조건과 실선 LNG탱크 용접부의 지지조건이 다를 때 이것이 피로강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 피로시험편에 대한 탄성 유한요소해석(이하 FEM해석)을 ANSYS 5.0을 사용하여 행하였다.

FEM해석은 시임용접부 0.7/0.5/0.7mm 및 0.7/0.5/1.0mm에 대하여 행하였고 용접부높이(h)는 13mm 및 15mm의 2종류로 하였다. 모델의 치

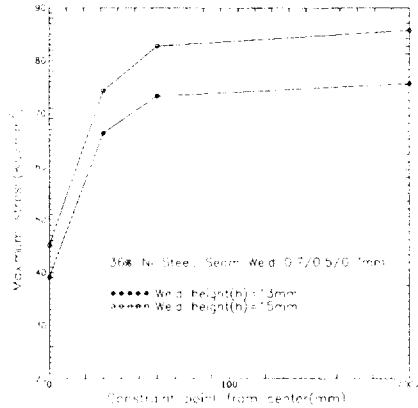


Fig. 2 Maximum stress and constraint point of test specimen(seam weld, 0.7/0.5/0.7mm)

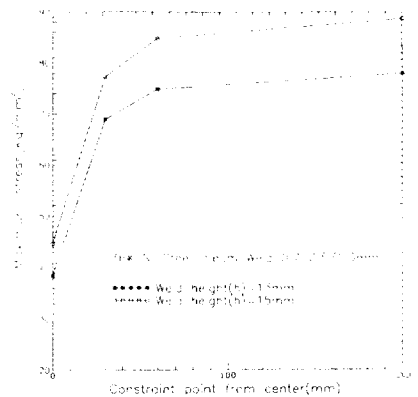


Fig. 3 Maximum stress and constraint point of test specimen(seam weld, 0.7/0.5/1.0mm)

수 및 형상은 시험편의 그것과 동일하게 하였으며 8절점 Plane 82요소를 사용하여 0.03mm로 분할하였다.

Fig. 2 및 Fig. 3은 시임용접부 0.7/0.5/0.7mm 및 0.7/0.5/1.0mm에 10kg/mm²에相当하는 하중을 부가했을 때 시임용접부에 발생하는 최대응력을 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 시험편이 시험편의 중심으로부터 지지되는 위치를 나타낸 것으로 0mm는 완전 지지를 의미하고 ∞는 자유변형상태를 의미한다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 피로 시험시의 지지조건(60mm)에서 시임용접부에 발생하는 최대응력은 실선 LNG탱크의 지지조건(0mm)에서 용접부에 발생하는 최대응력에 비해

서 커짐을 알 수 있다. 따라서 실험실에서 구한 피로시험 결과를 이용하여 피로강도를 평가하는 것은 실선 조건에 비해서 보다 안전한 측면임을 확인할 수 있었다. 또 시험편이 지그에 물리는 위치를 시험편의 중심으로부터 30mm, 60mm으로 변화시켜도 응력집중의 변화는 거의 무시해도 좋을 수 있었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시임용접부 및 레이즈드

엣지용접부의 피로강도

Fig. 4는 시임용접부 0.7/0.5/0.7mm 및 레이즈드 엣지용접부 0.7/0.5/0.7mm에 대한 피로시험의 결과를 각각의 용접부높이(h)에 대하여 함께 나타낸 것으로 용접부높이(h)가 높을 수록 파단수명(N_f)은 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구의 피로시험과 같이 시험편의 개구량($\Delta\delta$)을 일정한 상태로 두면 용접부높이(h)가 높을 수록 시임용접부에서 발생하는 응력이 낮아지기 때문으로 판단된다.

따라서 설계단계에서는 용접부높이(h)를 높게 하여 용접 작업기준을 정하는 것이 바람직하며 또 용접작업 또는 검사단계에서는 용접부높이(h)가 용접작업기준에 미달되지 않도록 유의할 필요가 있다.

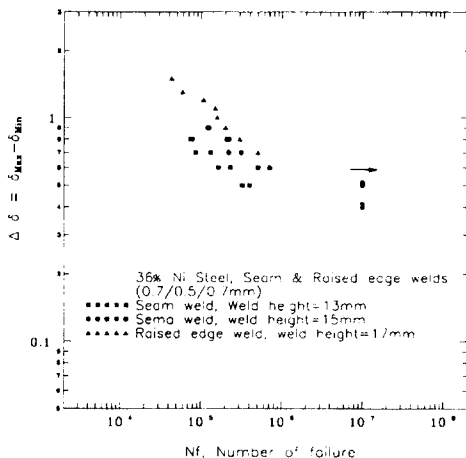


Fig. 4 $\Delta\delta - N_f$ for seam welds and raised edge weld(0.7/0.5/0.7mm)

Fig. 5 및 Fig. 6은 시임용접부 0.7/0.5/0.7mm, 용접부높이(h) 13mm, 15mm에 대한 피로 시험결과를 시험편의 개구량($\Delta\delta$)과 판단 수명(N_f)의 관계로 나타낸 것으로 그림에서 화살표를 부기한 실험점은 10^7 cycle에서 판단되지 않은 시험편을 의미한다. 이 그림에서 파선은 피로시험 결과를 파괴확률 50%로 나타낸 것이고, 실선은 시험결과를 99% 신뢰도(confidence limit) 값으로 정리한 것으로 1%파괴확률선을 표시하고 있다. 또, 고사이클영역에서는 Haibach수정⁶⁾에 따라 피로선도의 기울기를 1/2로 수정하였다.

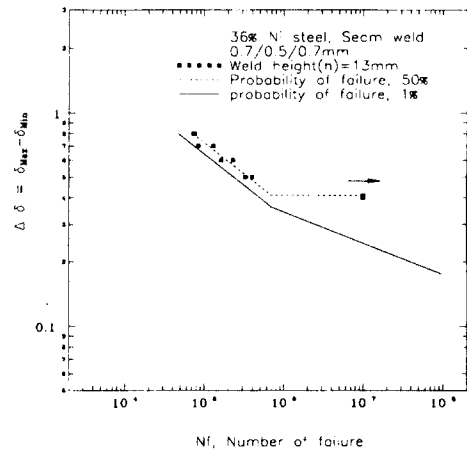


Fig. 5 Design $\Delta\delta - N_f$ for seam welds (0.7/0.5/0.7mm, weld height=13mm)

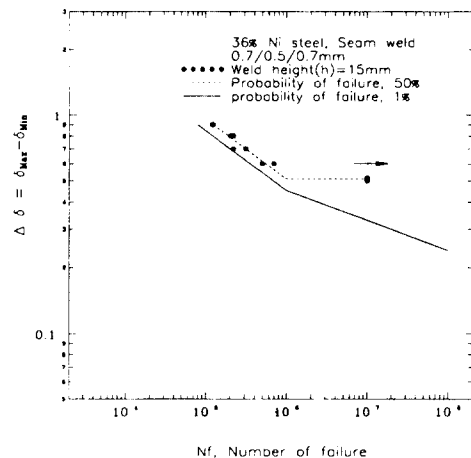


Fig. 6 Design $\Delta\delta - N_f$ for seam welds (0.7/0.5/0.7mm, weld height=15mm)

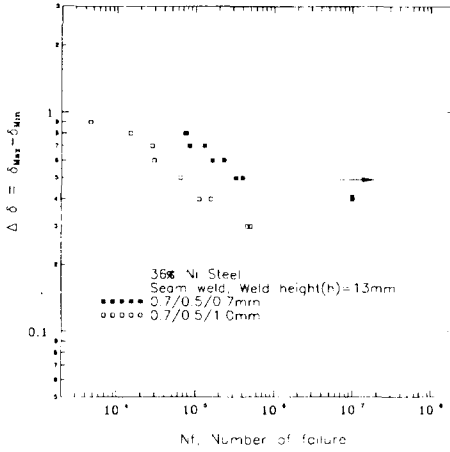


Fig. 7 $\Delta\delta - N_f$ curve for seam welds(0.7/0.5/0.7mm and 0.7/0.5/1.0mm, weld height=13mm)

Fig. 7은 시임 용접부 0.7/0.5/0.7mm 및 0.7/0.5/1.0mm에 대한 피로시험의 결과를 용접부 높이(h)=13mm에 대하여 함께 나타낸 것으로 중심부재의 두께는 0.5mm로 같지만 좌우부재의 두께가 다른 0.7/0.5/1.0mm의 파 단 수 명은 0.7/0.5/0.7mm의 그것에 비해서 짧아지는 것을 알 수 있다. 이것은 일정한 개구량($\Delta\delta$)을 유지하는 상태에서 0.7/0.5/1.0mm 용접부의 최대응력은 0.7/0.5/0.7mm의 그것에 비해서 높은 것에 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

4.2 선형누적손상계수(Cw)의 계산

안전수명설계(safe life design)의 관점에서 용접부의 피로강도를 평가하기 위하여 아래의 Miner 법칙⁷⁾에 따라 용접부의 Cw를 계산하였다.

$$Cw = \sum (ni/Ni) = 1 \tag{1}$$

여기서 피로시험편의 파단수명(Ni)에 해당하는 용접부의 개구량(i) 및 개구 회수(ni)는 선급 규칙⁹⁾에 따라 아래의 식(2) 및 식(3)을 사용하였다.

$$\delta_i = (17 - 2 \cdot i) \delta_{max} / 16 \tag{2}$$

$$ni = 0.9 \times 10^i \tag{3}$$

단, i=1, 2, 3, ..., 8, δ_{max} : 하중의 최대기대치에 의하여 발생하는 용접부의 개구량

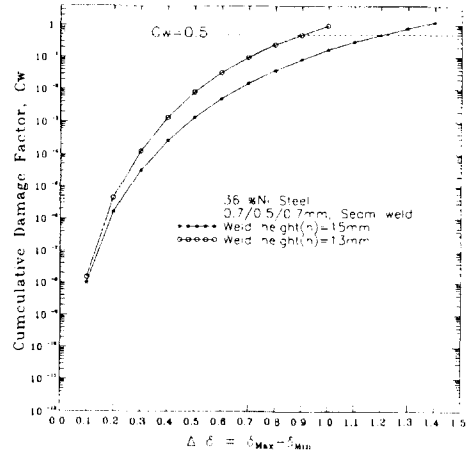


Fig. 8 Cumulative damage factor(Cw) of seam welds simulated at weld heights of 13mm and 15mm

Fig. 8은 시임용접부 용접부높이(h) 13mm 및 15mm에 대하여 Cw를 계산하여 나타낸 것으로 용접부높이(h)가 높을 수록 허용될 수 있는 개구량($\Delta\delta$)은 커짐을 알 수 있다. 그림에서 점선(Cw=0.5)은 한국선급의 규칙에 정해진 Cw값을 설계자의 편의를 위하여 도시한 것이다.

Fig. 9는 시임용접부 용접부높이(h) 13mm 및 15mm에 대하여 평균응력의 개념으로 평균 개구량($\Delta\delta$)이 가해진 상태에서의 임의의 개구량($\Delta\delta$)과 Cw값을 나타낸 것이다. 이 그림에서 0mm, 3mm,

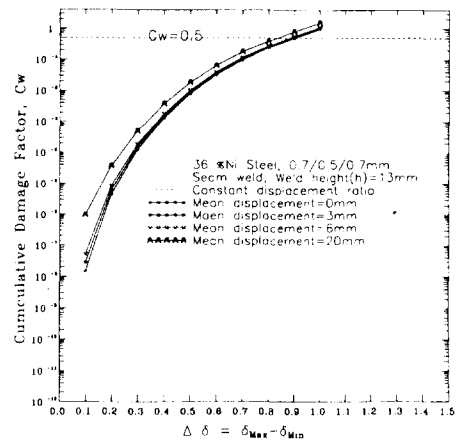


Fig. 9 Cumulative damage factor(Cw) of seam weld simulated at various mean displacement

6mm, 20mm 등으로 평균 개구량($\Delta\delta$)을 가한 상태에서 임의의 개구량($\Delta\delta$)에 대한 C_w 값은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 이들 용접부의 경우 임의의 개구량($\Delta\delta$)에 대한 C_w 값을 계산할 때 평균 개구량($\Delta\delta$)은 고려하지 않아도 좋을 수 있다.

4.3 피로강도의 모델화

한편 설계단계에서 용접 작업기준에 정해진 용접부의 높이를 변경시키고자 할 경우 또는 검사단계에서 용접작업 기준을 적용할 때 개구량($\Delta\delta$)과 용접부의 높이(h)가 C_w 에 미치는 영향을 수식으로 표현한 모델이 제공된다면 이는 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 시임용접부 및 레이즈드 엣지용접부에 대한 피로시험결과를 개구량($\Delta\delta$)와 용접부의 높이(h)의 관계식으로 다음과 같이 모델화하였다.

$$\Delta\delta/h^2 = 0.13553 N_f^{0.3151} \quad (4)$$

즉 시임용접부($h=13\text{mm}, 15\text{mm}$)와 레이즈드 엣지용접부($h=17\text{mm}$)에 대한 피로시험 결과에서를 각 용접부높이(h)로 나누어 $\Delta\delta/h^2$ 와 파단수명(N_f)과의 관계를 먼저 구한다. 다음으로 일본기계학회가 정한 통계적피로시험방법에 규정된 아래 식(5)에 계수 $\hat{\alpha}_2$ 와 $\hat{\beta}_2$, 파단수명의 평균값 $\overline{\text{Log}N_f}$, 파단수명의 표준편차값인 ($\hat{\sigma} \text{Log}N_f$)등을 대입하여 정리하면 상기 식(4)가 구해지고 이 식은 $\Delta\delta/h^2$ 와 파단수명(N_f)의 경사부에 대한 1%과피확률선이 된다. 본 연구의 피로시험에서 구해진 계수 $\hat{\alpha}_2 = -2.5332$, $\hat{\beta}_2 = -3.1739$, 파단수명의 표준편차값 $\hat{\sigma}(\text{Log}N_f) = 0.0951$ 이었다.

$$\text{Log} N_f = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \text{Log}\left(\frac{\Delta\delta}{h^2}\right) - 2.33\hat{\sigma}(\text{Log}N_f) \quad (5)$$

$$\text{단, } \hat{\alpha}_2 = \overline{\text{Log}N_f} - \hat{\beta}_2 \overline{\text{Log}\left(\frac{\Delta\delta}{h^2}\right)}$$

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^8 \left\{ \text{Log}\left(\frac{\Delta\delta}{h^2}\right)_i - \overline{\text{Log}\left(\frac{\Delta\delta}{h^2}\right)} \right\} (\text{Log}(N_f)_i - \overline{\text{Log}N_f})}{\sum_{i=1}^8 \left\{ \text{Log}\left(\frac{\Delta\delta}{h^2}\right)_i - \overline{\text{Log}\left(\frac{\Delta\delta}{h^2}\right)} \right\}^2}$$

$$\overline{\text{Log}N_f} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \text{Log}(N_f)_i$$

$$\hat{\sigma}(\text{Log}N_f) = \frac{1}{6} \sqrt{\sum_{i=1}^8 \left\{ \text{Log}(N_f)_i - (\hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \text{Log}\left(\frac{\Delta\delta}{h^2}\right)_i) \right\}^2}$$

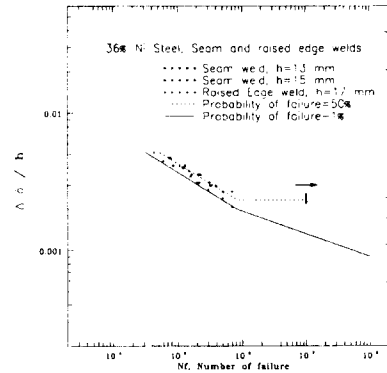


Fig.10 $\Delta\delta/h^2$ and N_f of seam and raised edge welds(0.7/0.5/0.7mm)

Fig. 10은 상기 식(4)에 따라 시임용접부 및 레이즈드 엣지용접부에 대한 피로시험의 결과를 $\Delta\delta/h^2$ 와 파단수명(N_f)으로 정리한 것이다. 그림에서 화살표를 부기한 실험점은 10^7 cycle에서 판단되지 않은 시험편을 의미하며 파선은 피로시험 결과를 과피확률 50%으로 나타낸 것이다. 실선은 C_w 를 계산할 때 사용한 설계피로선도로서 1%과피확률선을 표시하고 있으며 고사이클영역에서는 기울기를 1/2로 수정하였다.

Fig. 11은 상기의 설계피로선도를 이용하여 시임용접부, 레이즈드 엣지용접부에 대해서 임의의 용접부높이(h)에서 C_w 값을 나타낸 것이다. 각각의 용접부높이(h)에 대하여 허용할 수 있는 개구량($\Delta\delta$) 차이를 일목요연하게 표현하고 있으므로 설계 또는 이에 대한 검토시 쉽게 활용할 수 있을

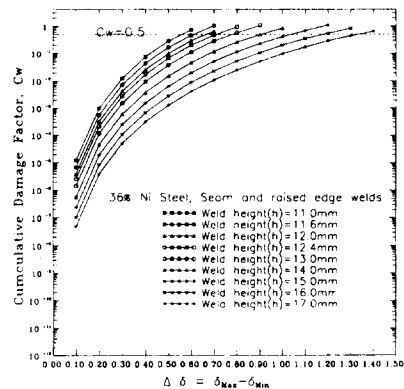


Fig.11 Cumulative damage factor (C_w) of seam and raised edge welds(0.7/0.5/0.7mm) simulated at various weld heights

것으로 기대된다. 이 그림에서 용접부높이 (h)=13mm는 GT의 용접 작업기준에 규정된 용접부의 높이이다.

또 용접 작업기준에 규정된 용접높이를 벗어 나는 용접부일지라도 선형누적손상계수는 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있기 때문에 GT사의 멤브레인 방식 LNG탱크의 용접 작업기준은 작업오차를 충분히 고려하여 제정되었다는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

멤브레인 방식 LNG탱크의 재료로 사용되는 36% 니켈강의 시임용접부 및 레이즈드 엣지용접부에 대한 피로시험, 탄성 유한요소해석 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) LNG탱크의 시임용접부를 모델링한 피로시험편의 용접부에 발생하는 최대응력은 실선 LNG탱크의 용접부에서 발생하는 최대응력에 비하여 크다. 따라서 실험실에서 구한 피로시험 결과를 이용하여 피로강도를 평가하는 것은 실선 조건에 비해서 보다 안전적인 측면임을 알 수 있다.

2) 시임용접부 및 레이즈드 엣지용접부의 피로강도는 용접부의 높이에 영향을 받으며 용접부높이가 높을수록 피로강도는 높게 된다. 따라서 용접 작업 또는 검사단계에서 용접부높이가 용접 작업기준에 미달되지 않도록 유의할 필요가 있다.

3) LNG탱크 시임용접부 및 레이즈드 엣지용접부에 부가되는 평균응력이 피로강도에 미치는 영향은 특별히 고려하지 않을 수 있다.

4) 특정한 용접부높이에 대한 피로시험결과를

이용하여 임의의 용접부높이를 갖는 시임 용접부 및 레이즈드 엣지용접부에 대한 Cw를 계산할 수 있는 $\Delta\delta/h^2=0.13553 N_f^{-0.3151}$ 과 같은 형태의 모델을 제안하였다. 이 모델은 용접부에 대한 설계단계 또는 검사단계에서 유용한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) 김 종호 : 멤브레인방식 LNG탱크의 피로파괴강도 평가법에 관한 연구(I), 한국박용기 관학지회지, 제 21권 제1호, pp. 49~58(1997)
- 2) David Broek : Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, pp. 328~335(1986)
- 3) 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, L-3, 일본조선연구협회, pp. 160~173(1976)
- 4) Gaz Transport : Technical Instructions for Welding the Membranes and Accessories of Tanks Built According to "GAZ TRANSPORT" Membrane System, Gaz Transport External Document No.435, Gaz Transport, pp. 133~134(1993)
- 5) 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(1981)
- 6) E.Haibach : Modifizierte Lineare Schadensakkumulation Hypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit Fortschreitender Schädigung, LBF Mitteilung TM Nr.50/70(1977)
- 7) 失川元基 : 破壊力學-理論·解析から工學的應用まで, 培風館, pp. 140~175(1988)
- 8) 한국선급 : 선급 및 강선규칙 제 7편 5장 액화가스 산적운반선, 한국선급, pp. 41~42(1995)