

인바(Invar) 용접부의 피로강도 특성

The Fatigue Strength of Invar Welds

김 중호*, 김 영식**, 조 상명***

* 사단법인 한국선급

** 한국해양대학교

*** 부산공업대학교

1. 서론

대형 용접구조물인 선박에 피로설계의 개념이 도입된 것은 비교적 최근의 일이고 특히 선급의 규칙¹⁾에서 피로설계의 개념을 적극적으로 수용한 전형적인 예는 LNG선박의 화물탱크라고 할 수 있다. 현재 국내 조선소에서 건조 중인 Gaz Transport사(이하 GT)의 Membrane Type LNG선박은 1차 Membrane, 2차 Membrane으로 구성된 화물탱크를 갖는 선박으로서 화물탱크는 안전수명설계(Safe Life Design)의 개념으로 설계되어 있다. 즉 선박의 예상설계수명 동안 피로균열이 화물탱크에 발생하지 않도록 설계하는 것이다. Membrane은 구조강도를 부담하는 강도부재가 아니지만 선체로부터 전달되는 하중에 의해 선박의 예상 설계수명동안 피로균열이 Membrane 또는 그 용접부에 발생하지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 특히 Membrane은 박판이기때문에 용접시공상의 관리와 검사를 통하여 건전한 용접부를 보장함으로써 LNG선박 전체의 안전성을 확보할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 Invar로 제작되는 GT방식 LNG화물탱크의 대표적인 용접부인 Seam용접부 및 Raised edge용접부에 대한 피로강도 평가 및 용접작업표준에 대한 검토를 수행하였다.

2. 시험편 및 실험방법

Invar의 대표적인 화학성분과 물리적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같고 금속조직은 Austenite계열의 Stainless Steel, Aluminium합금 등과 같이 면심입방격자(Faced Centered Cubic)로 구성되어 있다. 연강에 비해서 열팽창계수(Thermal expansion modulus), 용융온도(Melting point), 평균비열(Mean specific heat) 등이 낮기 때문에 용접 시 용접부에 쉽게 열이 집중하므로 낮은 입열량으로 용접이 가능하게 된다. 본 연구에서 사용한 시험편은 GT방식 LNG선박의 화물탱크에 사용되는 Invar의 대표적인 Seam용접이음부인 0.7/0.5/0.7mm 및 Raised edge 0.7/0.5/0.7mm에 대하여 자동과 수동으로 각각 용접한 시험재에서 채취한 것으로서 그 형상 및 치수는 Fig.1과 같다. 용접부높이(h) 13 mm는 Gas Transport사의 표준용접부(이하 GT 표준용접부)에 대한 것이고 용접부높이(h) 15mm 및 17mm는 용접작업시 용접기의 오동작 또는 용접사의 실수에 따라 발생할 가능성이 있는 용접부높이(h)를 상정한 것이다. 피로시험은 개구량($\Delta\delta = \delta_{max} - \delta_{min}$)제어 조건으로 실온의 대기 중에서 수행하였으며 시험편의 수, 시험 개구량($\Delta\delta$)범위 등은 일본기계화회가 정한 통계적피로시험방법²⁾에 따라 수행하였다. 피로시험에 사용한 시험장비는 정적하중 250 KN, 동적하중 $\pm 125KN$ 의 용량을 가진 유압-서보제어식 피로시험기였고 부하속도는 8-15Hz로 하였다.

Table 1 Nominal Chemical Compositions of Invar(wt. %)

| C | Si | Mn | S | P | Ni | Fe |
|--------------|--------------|---------|---------------|---------------|---------|------|
| Max. 0.04 | Max. 0.25 | 0.2~0.4 | Max. 0.012 | Max. 0.012 | 35~36.5 | Res. |

Table 2 Specified Mechanical Properties of Invar

| Temp' | Y. S. | T. S. | ϵ (%) | E(MPa) | Charpy V Notch |
|---------|----------------------|----------------------|----------------|---------|------------------------------------|
| R.T | $\geq 320\text{MPa}$ | $\geq 510\text{MPa}$ | ≥ 30 | 140,000 | ≥ 200 (N. m/cm ²) |
| -196 °C | $\geq 680\text{MPa}$ | $\geq 980\text{MPa}$ | ≥ 30 | 138,000 | ≥ 120 (N. m/cm ²) |

3. 탄성유한요소해석

본 연구에서 피로시험은 실험의 편리를 위하여 시험편의 앞면과 뒷면을 구속하지 않고 수행하였다. 이와 같이 시험편을 구속하지 않은 상태에서의 피로시험은 실선의 용접부와 같이 구속되어 있는 상태의 용접부의 응력분포를 재현하기 어렵고 또 시험편이 피로시험기의 상하 지그에 장착되는 위치에 따라서도 용접부의 응력분포가 다를 수도 있을 것이 예상되었다. 따라서 본 연구에서는 이와같은 영향을 고려하여 피로강도를 평가하기 위하여 대표적인 Seam용접부 0.7/0.5/0.7mm에 대한 탄성 유한요소해석(이하 FEM해석)을 ANSYS 5.0을 사용하여 행하였다. 모델의 치수 및 형상은 시험편의 그것과 동일하게 하였으며 Mesh size는 0.03mm로 하였으며 Element는 8절점 Isoparametic을 사용하였다.

Fig.2는 Seam용접부 0.7/0.5/0.7mm에 단위하중[10k/mm]을 부가했을 경우 Seam용접부에 발생하는 최대응력을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 실험실의 구속조건(60mm)에서 Seam용접부에 발생하는 최대응력은 실선의 구속조건(0mm)에서의 최대응력에 비해서 커짐을 알 수 있다. 따라서 실험실에서 구한 피로시험 결과를 이용하여 피로강도를 평가하는 것은 실선 조건에 비해서 보다 안전적인 측면임을 확인할 수 있었다. 또 시험편이 지그에 물리는 위치를 시험편의 중심으로부터 30mm, 60mm으로 변화시켜도 응력집중의 변화는 거의 무시해도 좋을 수 있었다.

4. Seam 용접부의 피로강도

Seam용접부에 대하여 용접선의 길이방향으로 피로시험을 행한 결과를 보면 2 x 10⁶사이 클에서 10k/mm정도의 피로한도를 보이지만 용접선과 직각방향에서의 피로강도는 1k/mm정도로서 아주 취약한 용접이음부이다. 따라서 본 연구에서는 취약한 이음부인 용접선과 직각 방향의 피로강도를 평가하기 위한 피로시험을 변위제어조건으로 행하였다.

Fig.3은 Seam용접부 0.7/0.5/0.7mm 및 Raised edge용접부 0.7/0.5/0.7mm에 대한 피로시험의 결과를 각각의 용접부높이(h)에 대하여 함께 나타낸 것으로 화살표를 부기한 실험점은 10⁷ cycle에서 판단되지 않은 시험편을 의미한다. 그림에서 용접부높이(h)가 높을 수록 피로수명은 높게 나타나는 것을 알 수 있고 이는 본 연구의 피로시험과 같이 시험편의 개구량($\Delta\delta$)을 일정한 상태로 두면 용접부높이(h)가 높을 수록 Seam용접부에서 발생하는 응력이 낮아지기 때문으로 판단된다.

5. 선형누적손상계수(Cw)의 계산 및 용접작업 표준에 대한 검토

Seam용접부에 대한 표준³⁾을 나타낸 Fig.4에서 알 수 있는 바와 같이 임의의 용접부 높이(h)를 가진 Seam용접부를 만들 때 용접부높이(h)는 용접부 Core의 길이(Lt)에 따라 달라질 수 있다. 즉 0.7/0.5/0.7mm Seam용접부에 대한 GT표준을 보면 용접부 Core의 길이는 1.2mm이상으로 규정하고 있기때문에 용접부높이(h)는 용접부 Core의 크기가 커지면 낮아지게 된다. 따라서 설계자의 입장에서는 용접부 Core의 길이(Lt)가 고려된 임의의 용접부높이(h)에서의 Cw값을 계산할 필요가 있다. 즉 임의의 용접부 높이(h)와 용접부 Core길이(Lt)를 알면 이에 해당하는 Cw값을 구할 수 있도록 개구량($\Delta\delta$)($\Delta\delta = \delta_{\max} - \delta_{\min}$)과 용접부의 높이(h)의 관계를 일반식으로 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 Seam용접부 0.7/0.5/0.7mm

및 Raised edge 용접부 0.7/0.5/0.7mm에 대한 피로시험결과를 개구량($\Delta\delta$)($\Delta\delta=\delta_{max}-\delta_{min}$)과 용접부의 높이(h)의 관계식으로 다음과 같이 정리하였다.

$$\Delta\delta/h^2 = 0.13553 \cdot Nf^{0.3151} \dots\dots\dots(1)$$

Fig.5는 상기 식(1)에 따라 Seam용접부, Raised edge용접부에 대한 설계 피로선도를 작성한 것이다. 그림에서 파선은 피로시험 결과를 파괴확률 50%으로 나타낸 것이고 실선은 설계 피로선도로서 1%파괴확률선을 표시하고 있다.

Fig.6은 상기의 설계피로선도를 이용하여 Seam용접부, Raised edge용접부에 대해서 임의의 용접부높이(h)에서 Cw값을 나타낸 것이다. 각각의 용접부높이(h)에 대하여 허용할 수 있는 개구량($\Delta\delta$)(Opening displacement)차이를 일목요연하게 표현하고 있으므로 설계 또는 이에 대한 검토 시 쉽게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

- 1.본 연구에 사용된 시험편에 대한 탄성 FEM해석을 통하여 시험편이 피로시험기의 지그에 물리는 위치가 30mm, 60mm으로 변해도 Seam용접부에 발생하는 최대응력에는 그다지 변화가 없었다.
- 2.Seam용접부의 피로강도는 용접부의 높이에 영향을 받으며 용접부의 높이가 높을 수록 피로강도는 높게 된다.
3. 특정한 용접부높이(h)에 대한 피로시험결과를 이용하여 임의의 용접부높이를 갖는 Seam용접부 및 Raised Edge용접부에 대한 Cw값을 추정하는 기법을 개발하였다.

參考文獻

- 1) 한국선급 : 선급 및 강선규칙 제 7편 5장 액화가스산적운반선, 한국선급(1995), pp. 32~43
- 2) 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)
- 3) Gaz Transport : Technical Instructions for Welding the Membrane s and accessories of Tanks Built According to "GAZ TRANSPORT" Membrane System, Gaz Transport External Document No.435, Gaz Transport(1993), pp. 12~13



Fig.1 Test specimens of Seam Weld & Raised Edge Weld

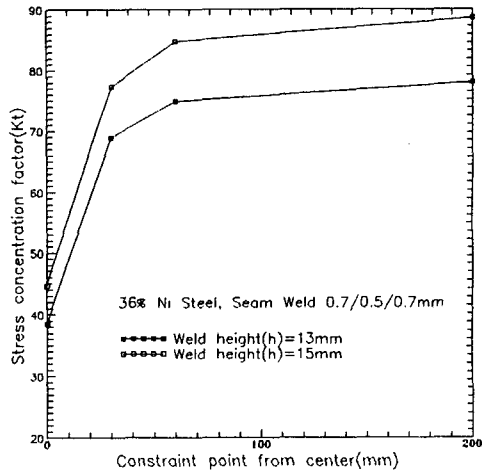


Fig.2 Stress Concentration(Kt) & constraint point of test specimen

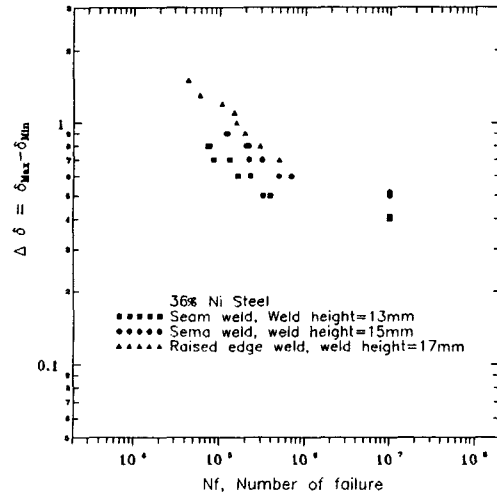


Fig.3 $\Delta\delta-N_f$ for Seam weld and Raised edge weld

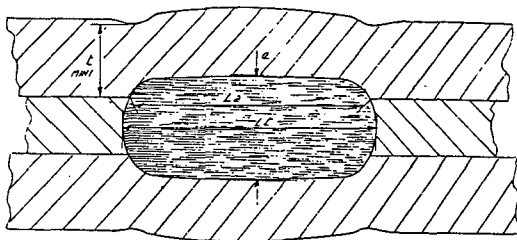


Fig.4 GT Standard for Seam weld

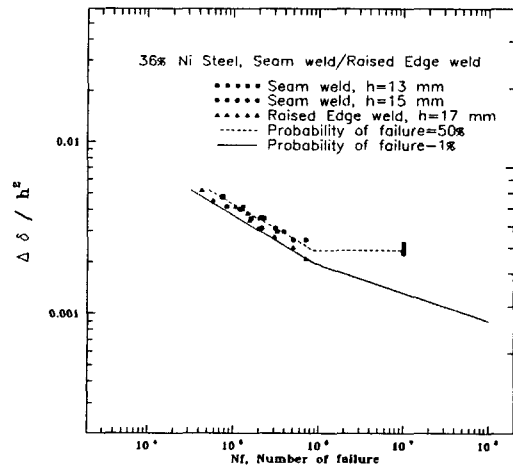


Fig.5 Relationship of $\Delta\delta/h^2$ and N_f

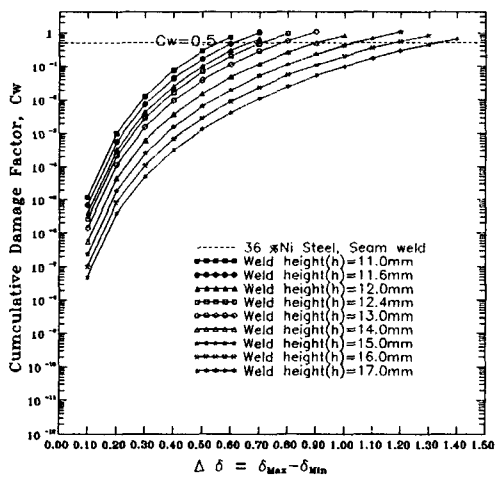


Fig.6 Cumulative Damage Factor(Cw) simulated at varying Weld height(h)