

LNG선 화물격납용기 Invar strake edge 이음부 형상 개선에 관한 연구

한 종 만*†

*대우조선해양 산업기술연구소

A Study on Application of Corrugated Invar Strake Edge in the Membrane Cargo Containment of LNG Carriers

Jong-Man Han*†

*Industrial R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., Geoje 656-714, Korea

†Corresponding author : jmhan@dsme.co.kr

(Received June 26, 2009 ; Revised August 31, 2009 ; Accepted September 14, 2009)

Abstract

The membrane of the LNG carriers consists of thin strips of INVAR(Fe-36%Ni) steel plates, and the junction between INVAR strips is fabricated by welding. Thousands of the raised edge joints, regularly spaced, are located around all the side of the tank corner near the transverse bulkhead, and TIG welding is manually made on the top of the raised edges. Since the thickness of all the laminated edge plies is extremely thin and the weld position is under a bad accessibility, highly skilled workers are required to perform welding relatively for a long welding time. An alternative scheme for the corner membrane fabrication is proposed in the study to improve the installation workability and thus productivity. The scheme replaces the welded edges with the preformed corrugation ones. A panel strip with regularly-spaced corrugations is installed at the corner instead of the individual flat strip of which edge is vertically raised to be welded with the adjacent strip. In the study, a series of the evaluation on the corrugated edge members was performed to assess the applicability to the real LNG carrier fabrication. Opening displacement at the raised edge was experimentally examined. Elastic stiffness regressed from the displacement was nearly same in both edge types. Edge displacement and local stresses were calculated under hydrostatic pressure and temperature change due to liquefied cargo. Fatigue test was performed on both corrugated and welded edge specimens consisting of two or five plies of invar strips. Fatigue strength of the corrugated specimens was not less than that of the welded specimens.

Key Words : Fatigue strength, Corrugated edge, Welded edge, LNGC, Membrane, Edge opening, Cargo containment system

1. 서 론

LNG선의 대표적인 화물격납용기 (Cargo containment system, 이하 CCS로 표기)의 하나인 NO96형 멤브레인(membrane)은 1.5mm 이하의 두께를 갖는 Fe-36%Ni의 INVAR강을 용접하여 제작하기 때문에 용접

시공으로 결함이 발생하지 않도록 건전한 이음부를 만드는 것이 CCS의 안전성 확보 측면에서 매우 중요하다. NO96형 멤브레인형 CCS의 형상적 특징으로 인해 선수 선미 방향 부재가 횡 부재와 직각으로 만나게 되는 모서리에는 end strake라 불리는 멤브레인 부재가 배치된다. 이러한 end strake를 용접하기 위해서는 우선 모든 end strake의 종방향 변을 냉간 가공으로 직

각으로 말아 올려 raised edge를 만들고 인접한 raised edge끼리 결합한 특이한 이음부 형상을 만들어 주어야 한다. CCS 용접 이음부의 대부분에 자동 용접법이 적용되는데 반해 end strake 부재의 raised edge 이음부는 수동 TIG 용접법이 사용되고 있다¹⁾. 수동 TIG 용접이 적용되는 용접부의 길이는 매 edge마다 약 600mm이지만 용접 자세는 edge의 위치에 따라 아래 보기부터 위 보기까지 다양하게 변한다. 또한 용접되는 판의 겹침 수도 용접 진행 방향을 따라 2겹, 5겹, 3겹으로 변하고 용접되는 개별 판의 두께도 위치에 따라 각기 다르기 때문에 용접 시공 품질 확보를 위해서는 고 기량의 용접사가 필요하게 된다. 또한 CCS의 전체 모서리에 걸쳐 수동 용접이 행해지므로 용접 생산성이 낮을 뿐만 아니라 수동 용접 작업에 맞도록 작업용 발판 설치 및 안전 관련 시설 등이 필요하므로 이에 따른 비용과 시간의 손실이 크다고 할 수 있다.

이러한 end strake 조립 방법의 불편 해소에 착안하여 수동 TIG 용접으로 raised edge 용접 이음부를 제작하는 기존 방법 대신 주름 성형된 end strake를 대체 사용함으로써 수동 TIG 용접되는 대부분의 raised edge를 없애는 개선 방안이 특허로 제안되었다²⁾. 이러한 개선 방안을 실제 선박의 제조에 적용하기 위해서는 이음부의 성능과 관련하여 주름 성형부의 탄성 유연도(개구량), 주름 성형부 최대 전달 하중(load carrying capacity), 주름 성형부의 피로 강도 등 기존 용접 이음재의 성능과 비교할 수 있는 충분한 신뢰성 평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 raised edge 용접 이음으로 제작되는 기존의 end strake 대신 주름 성형된 end strake를 액화가스운반선의 CCS에 적용하기 위하여 주름 성형된 end strake 시험 제품에 대한 실험과 함께 성능 평가에 필요한 해석을 행하고 그 결과를 기존 용접 시공 방법의 결과와 비교함으로써 주름 성형된 end strake 부재의 실선 적용 타당성을 평가하였다.

2. 기존의 시공방법과 개선된 시공방법의 도해적 비교

Fig. 1은 직각의 raised edge를 갖는 end strake에 대한 기존 용접 시공방법(a)과 주름 성형부를 갖는 end strake에 대한 개선된 시공방법(b)을 도해적으로 비교하고 있다. 이러한 개선 방안을 적용하는 경우에는 기존 조립 방법과 비교하여 용접량을 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 용접부의 결합 발생 가능성 및 이에 따른 수정 용접 등의 추가 작업 감소와 더불어 작업자의

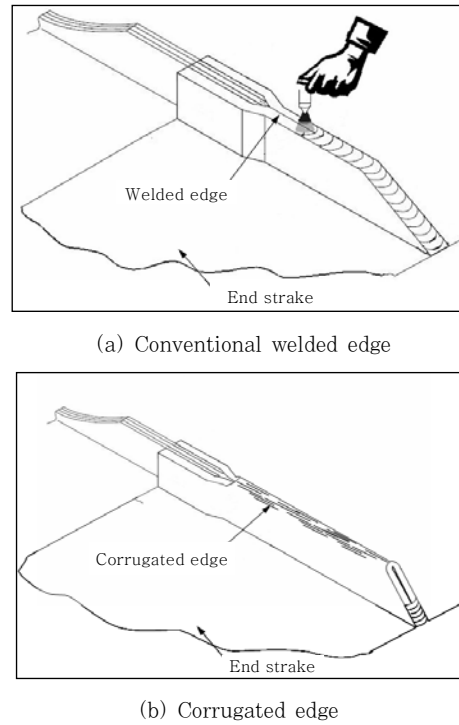


Fig. 1 Comparison of joint configuration between end strakes

작업 부담 경감에도 기여할 수 있을 것이 기대된다.

3. Edge 변위 시험 및 유연도 계산

용접으로 제작되는 기존의 raised edge와 주름 가공된 corrugated edge의 2겹(2-ply) 겹침 이음부의 대표적 단면 형상과 치수를 Fig. 2에 나타내었다.

3.1 상온에서의 raised edge 유연도 계산

Raised edge의 개방변위(opening displacement)

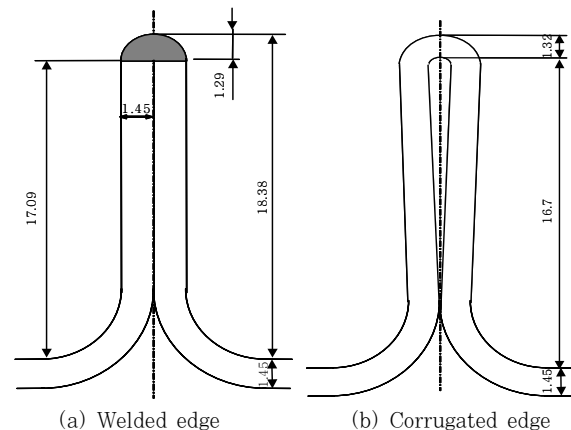


Fig. 2 Typical dimension and configuration of the cross section

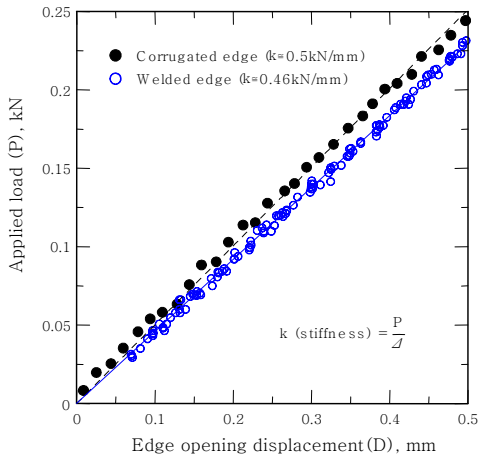


Fig. 3 Load-opening displacement diagram

를 사용한 탄성 유연도를 평가하기 위해 인장 실험을 수행하였다. 개방변위는 edge의 대칭 지점을 중심으로 표점거리가 12.5mm인 외팔보형 신장계(extensometer)를 부착하여 얻었다. Raised edge의 하중 전달 중심과 시편 회전 중심의 불일치로 인장 중 발생하는 시편 회전은 구속하지 않고 자유로운 상태에서 인장하였다. Fig. 3은 welded edge 및 corrugated edge 시편을 인장 시험하여 얻은 탄성 개방변위와 축 하중과의 관계를 나타내고 있다. 하중-변위 선도의 기울기로 계산되는 이음부 강성은 corrugated edge가 약 0.50 kN/mm이었고 welded edge는 약 0.46 kN/mm로서 비슷하였다. 따라서 기존의 welded edge를 corrugated edge로 대체하더라도 열 수축 흡수를 위한 edge의 유연도에는 큰 차이가 없을 것이라는 것을 추론할 수 있다.

Fig. 4는 각 edge 형상의 2차원 단면 유한 요소 해석 모델로서 좌우 대칭을 가정한 요소 망을 생성하였다. 액화천연가스(LNG)를 적재한 상태에서의 이음부 유연도를 계산하기 위해 화물 적재에 따른 정수압(0.137N/mm²)과 LNG의 대기압 하 액화온도(-162℃)를 해석에 고려하였다.

Fig. 5는 화물 적재 상태의 edge 종류별 변형 형상을 나타내고 있다. 저온 및 정수압을 적용한 edge 개방변위는 welded edge가 0.13mm, corrugated edge가 0.14mm로서 상온 실험 결과와 마찬가지로 저온의 화물 적재 상태에서도 유사한 edge 개방변위를 보임으로써 저온 상태에서도 기존의 welded edge와 corrugated edge는 거의 같은 edge 유연도를 나타낼 것이라는 것을 추론할 수 있다.

3.2 Edge 높이와 열 응력 관계

저온 화물 적재로 인해 CCS에서 온도 강하가 발생하

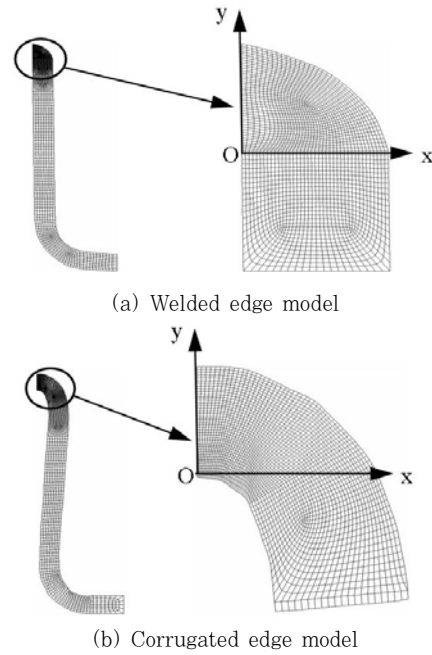


Fig. 4 Two-dimensional finite element mesh models

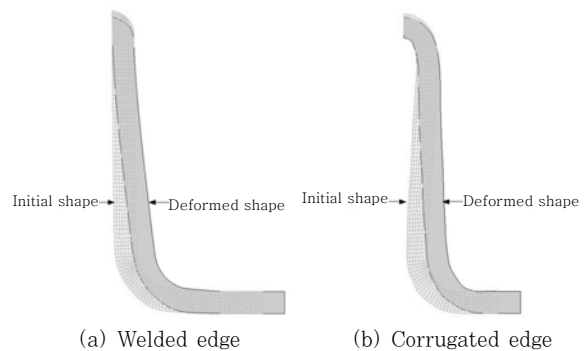


Fig. 5 Comparison of edge opening displacement under service load and temperature

면 온도 차에 따른 멤브레인의 수축이 발생하고 이러한 수축 변위에 대응하여 raised edge는 열 수축을 흡수하는 일종의 스프링 역할을 하게 된다.

Fig. 6에 보인 것과 같이 raised edge 단면을 외팔보로 단순화하고 보 이론을 적용하여 온도 차(Δt)로 인해 발생하는 멤브레인의 수축으로 대칭면에 작용하는 막 응력(membrane stress)을 계산하면

$$\sigma_m = \frac{1}{t_w} \left(\frac{t^3 L}{4h^3 + t^2 L} \right) \cdot (\alpha \cdot \Delta T \cdot E) \tag{1}$$

로 된다. 식 (1)에서 h는 하중 전달 중심과 용접 nugget root 까지의 유효 높이로 정의하며 t는 membrane 두께, t_w는 대칭면에서의 용접 nugget 두께, α는 열팽창

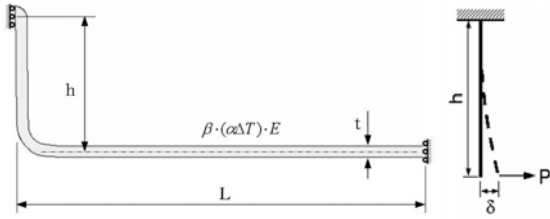


Fig. 6 Simplified model of the raised edge joint

계수, E는 탄성계수이다. 한편 이음부에서의 축 하중에 대해 하중 전달 중심과 이음부 중립 축의 불일치로 인한 굽힘 모멘트로 nugget에서 발생하는 2차 굽힘 응력은

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{\sigma h}{Z} = \frac{6t^3 \cdot L \cdot h}{t_w^2(4h^3 + t^2L)} \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (2)$$

로 되고 식 (1)과 식 (2)로부터 nugget에 작용하는 국부응력, $\sigma_m + \sigma_b$ 를 구하면

$$\sigma_m + \sigma_b = \frac{t^3 L}{t_w^2} \left(\frac{t_w + 6h}{4h^3 + t^2 L} \right) \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (3)$$

로 된다.

Fig. 7은 저온 화물 적재 상태에서 raised edge 높이에 따른 목 단면에서의 국부 응력(local stress), $\sigma_m + \sigma_b$, 변화를 식 (3)으로 계산한 것이다. 목 두께에 따른 국부 응력 변화도 보이기 위해 3가지의 대표 값에 대해 edge 높이에 따른 각각의 응력변화를 계산하였다. Edge 높이가 5mm~10mm에서는 목 두께가 응력에 큰 영향이 있지만 edge 높이가 커짐에 따라 목 두께에 따른 응력 차가 점차적으로 줄어들고 있다. 또한 전반적으로 edge 높이가 약 5mm 이상에서는 높이 증가에 따라 응력은 지수적으로 감소하게 된다. 현재 멤브레인

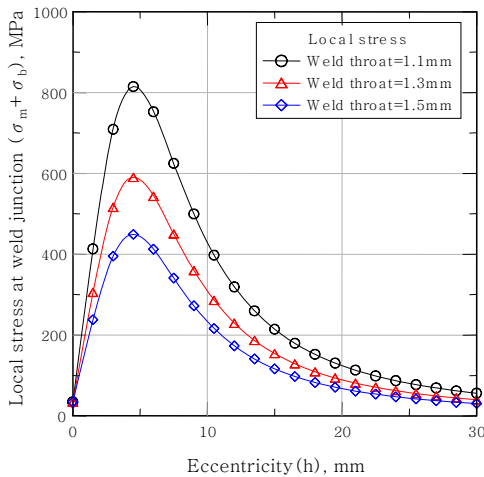


Fig. 7 Local stresses versus edge heights(eccentricity)

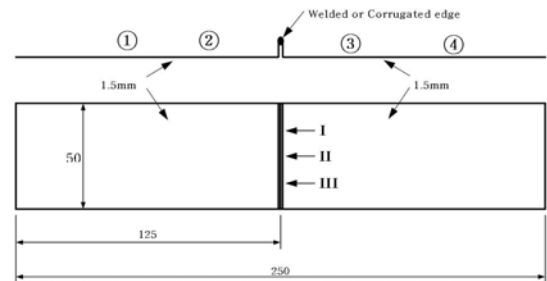
설계에 적용되는 raised edge의 표준 높이는 20mm로서 상기 계산 결과에 따르면 목 두께의 변화에 따라 응력 변화가 그다지 크지 않은 조건임을 알 수 있다. 용접을 적용하는 기존 공법에 비해 주름 가공된 raised edge의 목 두께는 기본 소재의 두께인 1.5mm에서 크게 벗어나지 않기 때문에 주름 가공된 raised edge의 높이만 허용 치수 내로 가공하게 되면 열 수축을 흡수하기 위한 edge부에서의 변형 하에서도 충분히 낮은 응력을 유지할 수 있다고 판단된다.

4. Raised edge 피로 시험

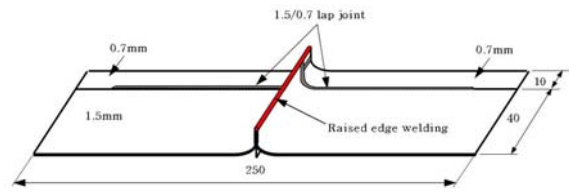
4.1 시편

피로시험에 사용된 시편 형상 및 치수를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)는 2겹 edge의 피로 강도 평가를 위해 사용한 것으로서 1쌍의 돌출 edge가 기존 공법에 따라 용접되거나 또는 주름 성형된 것이다. 피로 시험된 모든 시편에 대해 edge 저부에서의 틈과 두께를 측정하였다.

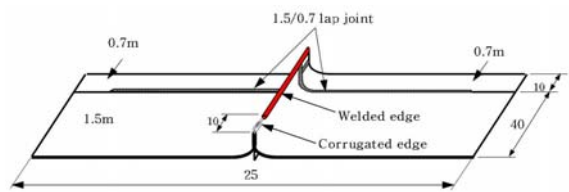
Fig. 8 (b)와 (c)는 각각 5겹 edge의 피로 강도 평가를 위해 사용한 시편 형상 및 치수를 나타낸 것으로서 C5 시편은 한쪽 단으로부터 약 10mm 길이에 걸쳐



(a) 2-ply edge specimen (W2, C2)



(b) Welded 5-ply edge specimen (W5)



(c) Corrugated 5-ply edge specimen (C5)

Fig. 8 Fatigue specimens (W2, C2, W5, C5)

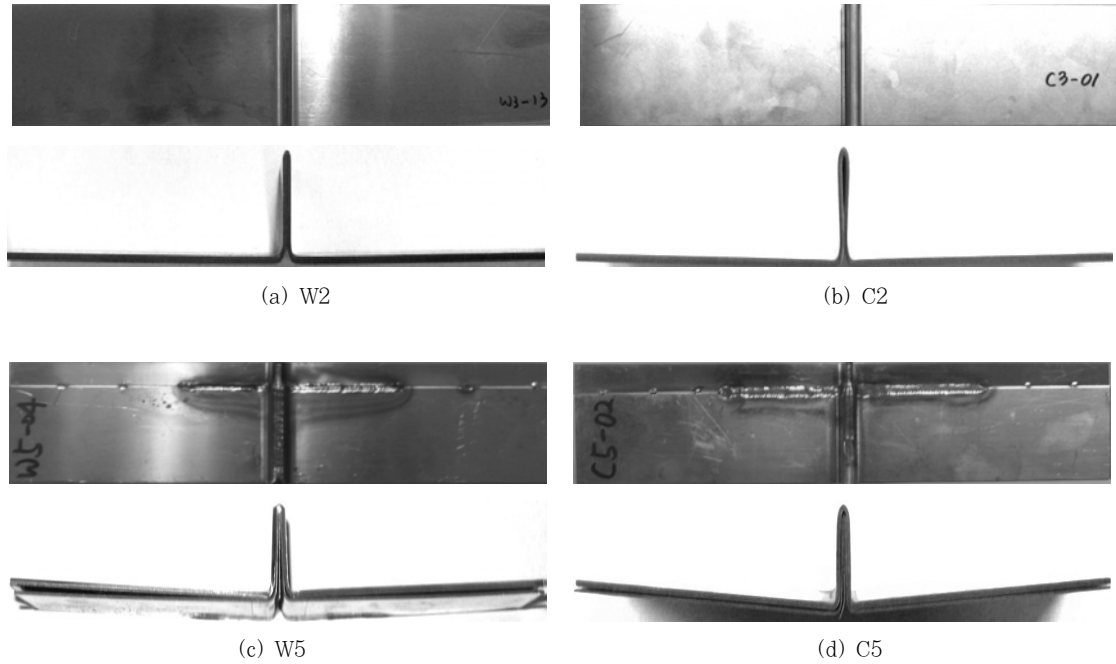


Fig. 9 View of fatigue specimens

주름 성형부가 있으나 W5는 전체 edge를 용접한 것이다.

Fig. 9(a)~(d)는 피로 시험의 대표적 형상을 촬영한 사진이다. W2 및 C2 시험편에서는 각 변형 및 단차가 거의 발생하지 않았다. 두께 0.7mm의 하부 판과 1.5mm의 상부판의 결합을 위해 lap 용접 이음부가 설치되는 W5 및 C5 시험편에서는 lap 용접 이음으로 인한 각변형이 심하게 나타났으며 edge를 중심으로 좌우 부재간의 높이 정렬 불량도 일부 관찰되었다. 그러나 본 논문에서는 시험편에 발생한 각변형 및 높이 차를 인위적으로 수정하지 않고 시험편이 제작된 상태 그대로 피로 시험에 사용하였다.

4.2 피로 시험 방법

LNG선 내에서 멤브레인의 면외 방향 변형 구속 현상을 재현하기 위해 피로 시험기의 표준 grip 이외에 두께 5mm의 구속 판을 시험편의 양면에 덧붙여 피로 시험 중 시험편에서 발생하는 면외 변형을 구속하였다. 피로 시험에 사용한 시험 장비는 동적 하중 ±100kN 용량의 유압식 피로 시험기였다. 실선의 raised edge에서 발생할 수 있는 개방 변위 범위를 고려하여 최대 개방 변위가 0.3~0.6mm인 범위에서 실험하였으며 부하 속도(loading rate)는 20Hz였다. 피로 시험을 통해 주로 10⁵~10⁷ 사이의 피로 수명 데이터를 얻었으며 하나의 edge 개방 변위에 대해 적어도 2개 이상의 피로 수명 데이터를 얻었다. 피로 시험 결과를 이용하여 파단 확률에 근거한 설계피로선도를 작성하기 위하

여 JSME S002-1981³⁾에 따라 피로 시험하였다. 피로 수명은 시험편 파단까지의 반복수로서 정의하였다.

4.3 피로시험 결과

Fig. 10은 2겹 edge 시험편의 피로 시험 결과를 나타내고 있다. Corrugated edge 시험편의 피로 강도는 welded edge 시험편의 피로 강도에 비해 전반적으로 약간 상부에 위치하고 있으나 장 수명 영역에서는 서로 비슷한 수명을 보였다. Corrugated edge 시험편은 절곡부의 대칭면을 따라 파단이 발생하였으며 welded edge 시험편은 용접부에서 파단이 발생하였다. 단 수명 영역에서는 주로 피로 영역의 막 응력 범위 (membrane stress range)에 따라 수명이 좌우되기 때문에 welded edge의 용접 시공에서 허용하는 최소 nugget 두께인

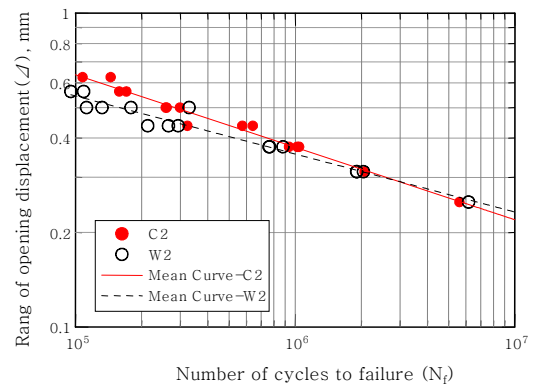


Fig. 10 Mean fatigue curves resulting from C2 and W2 specimens

1.1mm보다 상대적으로 더 큰 nugget 치수를 갖는 corrugated edge 시편의 수명이 상대적으로 더 긴 것으로 판단된다.

Fig. 11은 5겹 edge 시편의 피로 시험 결과를 나타내고 있다. 개선 공법에 의한 corrugated edge 시험편의 피로 강도는 기존 공법의 welded edge 시험편의 피로 강도에 비해 상대적으로 우수한 피로 강도를 나타내었다.

Fig. 12는 Fig. 10과 Fig. 11에서 설명한 2겹 및 5겹 시편의 결과를 edge 종류에 따라 welded edge와 corrugated edge로 대별하여 나타낸 것이다. 시험 데이터의 분산을 고려하더라도 corrugated edge 시편의 결과가 welded edge 시편 결과보다 약간 위쪽에 놓이는 것을 볼 수 있으며 이로부터 피로 강도 측면에서 welded edge보다 corrugated edge가 상대적으로 유리하다고 볼 수 있다. 회귀 분석으로 구한 평균 피로 선도 역시 corrugated edge가 welded edge보다 우수한 피로 강도를 나타냄을 보이고 있다.

Edge 형식별 피로시험 데이터를 통계 분석하면 각

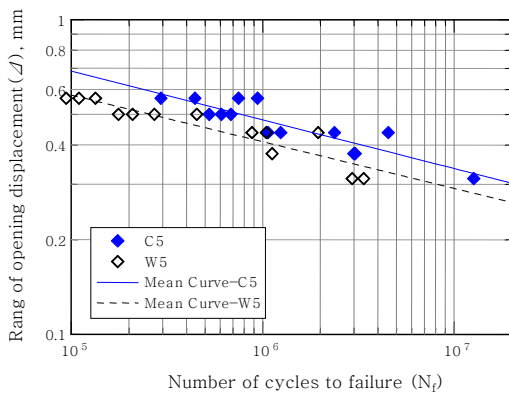


Fig. 11 Mean fatigue curves resulting from C5 and W5 specimens

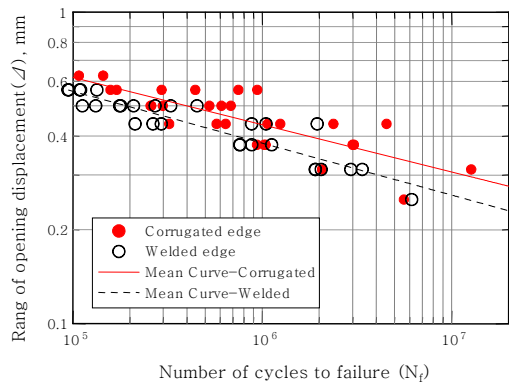


Fig. 12 Comparison of fatigue strength between corrugated (C2, C5) and welded edge (W2, W5)

형식에 대한 피로설계선도는 다음의 식으로 주어진다⁴⁾.

$$\log(N_{design}) = \log(A_{mean}) - m \cdot \log(\Delta) - k \cdot s \quad (4)$$

식 (4)에서 s는 피로 수명 지수 값 (log N)의 표준 편차 (standard deviation) 이고 k는 시편의 수와 신뢰도에 따라 주어지는 단편 허용 한계 (one-sided tolerance limit)이다. 각 edge 형식에 대한 피로 시험 결과를 통계 분석하여 설계피로선도로서 사용되는 파단 확률 2.5% 선도를 식 (4)를 이용하여 구하면 식 (5a) 및 식 (5b)로 주어진다. 통계 분석 결과 corrugated edge의 표준 편차가 welded edge의 표준 편차보다 크게 나타났는데 이것은 용접 각 변형 및 misalignment 가 C5 시편에서 상대적으로 크게 발생한 때문으로 판단된다. Corrugated edge로 만들기 위한 주름 성형 방법을 자동화하고 성형 공정을 개발하여 정밀 형상을 제조하면 상대적으로 큰 피로 수명의 분산은 해결될 수 있다고 판단된다.

Welded edge:

$$\Delta^{5.996} \cdot N_{design} = 9.168 \times 10^2 \quad (5a)$$

Corrugated edge:

$$\Delta^{6.594} \cdot N_{design} = 7.591 \times 10^2 \quad (5b)$$

5. 결 론

본 연구에서는 Invar 강을 사용하는 LNG선 CCS의 end strake 조립에 raised edge 용접 시공법 대신 주름 성형 부재로 대체한 개선 시공법을 적용하기 위해 주름 성형 edge에 대한 일련의 강도 평가를 수행하여 수동 TIG 용접으로 제작된 edge의 강도와 상호 비교함으로써 개선 시공법의 적용 타당성을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) CCS의 온도 변화로 발생하는 멤브레인의 열 수축을 흡수하기 위한 edge 유연도를 평가한 결과 기존의 welded edge와 제안된 corrugated edge는 서로 거의 같은 변형 유연도를 보였다.

2) 유한요소해석 결과 동일한 edge 개방 변위 조건에서 발생하는 edge 저부에서의 최대 극부 응력은 corrugated edge의 경우가 약간 낮게 나타났다. 이러한 결과로부터 corrugated edge가 피로 강도 측면에서 상대적으로 유리할 것이라는 결론을 추론할 수 있다.

3) Corrugated edge 부재의 피로 수명은 low cycle 영역에서는 약 2배, high cycle 영역에서는 약

3배 이상 welded edge의 피로 수명보다 길게 나타났다.

참 고 문 헌

1. Jong Man Han, Yong Sup Han: Review on Welding Technology and Welded Joint Strength of GT Membrane Type LNG Carrier, Journal of KWS, **11-4** (1993), 24-35 (in Korean)
2. 대한민국특허청: 엘엔지선의 화물창 설치용 엔드스트레이크, 등록특허 제 10-0647925, 2006 (in Korean)
3. JSME : Standard Method of Statistical Fatigue Testing, JSME S002-1981 (in Japanese)
4. Myoung Soo Han, Jong Man Han, Yong Sup Han: A Study on the Fatigue Strength and Allowable Stress of INVAR(Fe-36%Ni) Steel Lap Joint Applied to Cargo Containment of LNG Carrier, Journal of KWS, **12-1** (1994), 102-115 (in Korean)