

Edge Gussets을 가지는 필릿 용접부의 그라인딩에 의한 피로강도 증대효과에 관한연구

An Evaluation for Fatigue Strength Improvement of Fillet Welded With Edge Gussets Using Grinding Technique

최재영*, 강성원*, 김명현*, 안정호*, 김화수**, 백영민**

*부산대학교 조선해양공학과

**현대중공업 조선구조설계부

1. 서 론

구조물의 용접부 및 피로 손상부에 수리 및 보강을 수행할 경우, 용접비드나 스파터를 절삭 혹은 그라인딩 작업을 통해 매끈하게 다듬는 작업은 피로강도를 향상시키는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 이는 그라인딩에 의한 결함제거 효과 및 토우부 형상을 변화시킴에 따라 응력집중을 줄이는 효과 등에 기인한다 [1].

용접토우부에 있어서 균열의 발생·전파에 의한 파손이 일어나는 경우, 특정 범주의 용접부에 있어서 용접토우부 그라인딩을 통해 약 3.4배 정도의 피로수명 향상을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있으나, 이는 용접부의 형상 및 하중모드 등에 따라 현저히 달라진다 [4]. 근래 선박구조 용접부에 있어서 피로수명 향상 기법에 대한 많은 관심을 가져왔으나 용접토우부의 형상수정에 대한 기준이나 피로강도 향상 효과에 대한 정량적 평가 자료는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 시험편 모델에 대하여 필릿 용접토우부를 그라인딩 한 경우에 대한 피로시험을 수행하고, 같은 형상의 모델에 대한 피로시험 결과와의 비교 검토를 통해 토우부 그라인딩에 의한 피로강도 및 피로수명 증대효과를 정량적으로 파악하고, 공칭응력을 바탕으로 한 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편의 피로시험결과와 구조응력방법을 이용하여 예측한 피로수명과의 차이 및 적용 가능성을 검토하고자 한다 [2].

2. 시험절차

2.1 시험편형상

본 연구에 사용된 시험편은 선박구조물에 적용되는 선박구조용 연강 (Grade 'A')으로 여러 가지 용접 이음부 중 피로손상이 많이 발생할 것으

로 추정되는 형태의 시험편 모델에 대하여 필릿 용접토우부를 Burr grinding 하였다.



Fig. 1 Dimension of test specimen

2.2 Burr grind (IIW recommendation)

본 연구에서는 피로강도를 향상시키는 여러 가지 방법 중 용접부 형상을 개선시키는 방법 중 비교적 작업 처리가 용이한 Burr grinding 방법을 사용하였다. Fig. 2에서는 IIW recommendation에서 규정한 Burr grinding 허용치수를 나타내었다 [4].

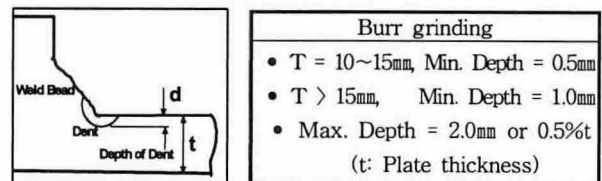


Fig. 2 Specification of depth of dent of base metal (IIW recommendation)

2.3 피로시험 방법

피로시험은 최대용량 ±20 ton인 축인장 압축 유압서보 피로시험기로 수행하였으며, 피로하중의 파형은 정현파로 하였고, 하중반복속도 7Hz에서 실시하였다. 하중제어 방식은 응력비 (R)=-1 이 되도록 완전 양진 하중진폭 피로시험을 수행하였고 하중, 변위 및 스트레인 값을 데이터 메모리 수집 장치를 이용하여 관찰하였다. 피로시험은 시험편이 완전 파단 될 때까지 실시하였고, 파단 되지 않는 시험편에 대해서는 10⁷cycle 하중 반복수에서 중단하였다.

2.4 초기크랙발생

연구에 사용된 시험편에 대하여 피로시험을 실시한 결과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 용접토우부 가공면(응력집중부)에서 초기 크랙이 대부분 나타났으며, 이는 Toe-grinding으로 인하여 단면적이 감소되고, 기하학적 형상이 변하는 부분에서 응력집중현상이 발생하였기 때문으로 판단된다.

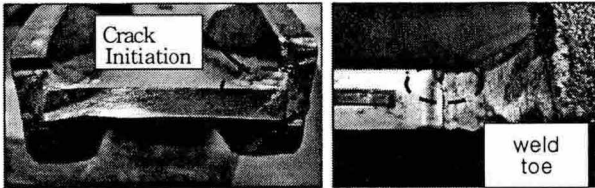


Fig. 3 Picture of failed specimen

피로시험을 수행하는 동안 폭 방향으로 측정된 균열 진전 길이와 초기 균열이 발생한 지점의 용접토우부 가공면에서 5mm 떨어진 지점에 부착한 1축 5mm 스트레인게이지에서 측정된 값을 Fig. 4에 나타내었다.

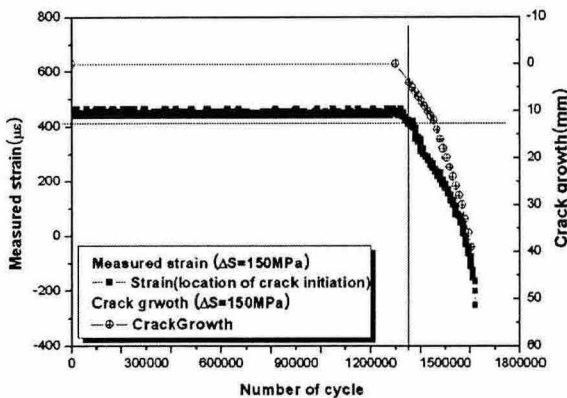


Fig. 4 Strain measurement

균열 진전은 초기 균열이 발견된 시점부터 서서히 증가하다가 시험편의 폭 방향으로 폭의 2/3 이상 피로 균열 진전 후 급격히 파단에 이르렀으며, 초기 균열(약 1mm)을 육안으로 발견한 시점과 변형률 계측장비로 측정된 변형률 범위의 5% 하락 시점이 대부분 일치하여, 이를 통해 초기 균열 발생 시점 예측이 가능할 것으로 판단된다.

3. 피로시험결과

As-welded 및 Toe-grinding 시험편을 비교하여 응력범위 (ΔS), 파단수명 (N_f)사이의 관계를 Fig. 5에 S-N선도로 나타내었다 [5].

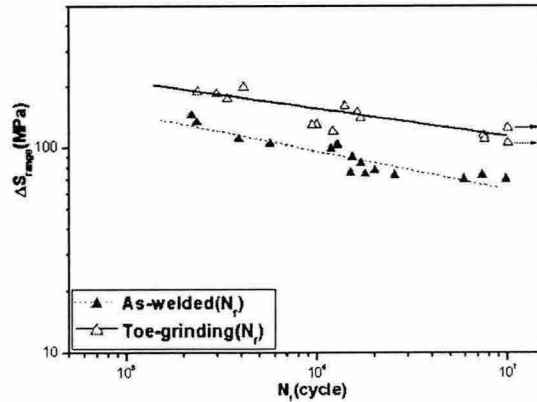


Fig. 5 Comparison of fatigue test results of as-welded and toe-grinding

Fig. 5에 나타난 바와 같이 그라인딩 효과로 인해 피로강도 및 피로수명이 향상되었으며, 피로시험 결과로부터 도출된 피로선도 식은 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$\text{As-welded: } \log N_f = 14.818 - 4.433 \log \Delta S \quad (1)$$

$$\text{Toe-grinding}(N_f): \log N_f = 16.221 - 4.699 \log \Delta S \quad (2)$$

여기서, N_f : 완전파단수명 (cycle)

ΔS : 공칭응력범위 (MPa)

식 (1)과 식 (2)에 의하면 2×10^6 cycle에 대한 Toe-grinding 시험편의 피로강도는 129.1 MPa이며, 이는 As-welded 시험편의 피로강도 83.4 MPa에 비하여 약 1.55배 향상된 것으로 나타났다.

4 구조 응력을 이용한 피로강도 평가

4.1 유한요소 해석

본 연구에 사용된 시험편 형상에 대하여 상용프로그램을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 20-node Solid요소로 감소 적분법 (Reduced integration method)을 사용하였다. Toe-grinding 시험편의 경우 토우그라인딩 효과를 내기위해 토우부 끝단에 0.5mm 깊이로 가공면을 나타내었으며, 해석에 사용된 경계조건 및 유한요소모델은 Fig. 6에 나타난 바와 같다.

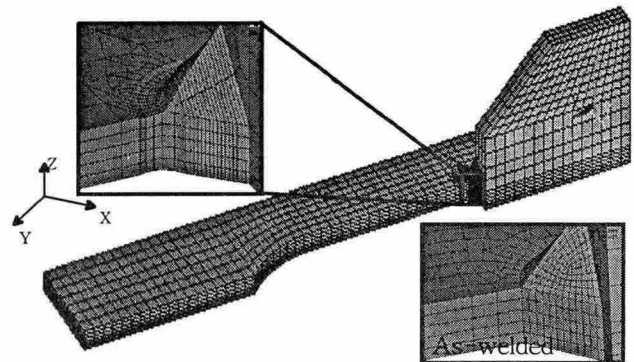


Fig. 6 Finite element model of specimens

4.2 구조응력

구조응력 (Structural stress, σ_s)은 막응력 (Membrane stress, σ_m)과 굽힘응력 (Bending stress, σ_b)으로 구성된다. Fig. 7에서 나타낸 바와 같은 A-A단면에서의 구조응력은 일정거리 (δ)만큼 떨어진 B-B단면에서의 수평응력성분 (σ_x)과 전단응력성분 (τ_{xy})을 유한요소해석을 통해 구하고 이를 식 (3)과 (4)를 통해 두 단면 사이의 구조역학적 평형조건을 바탕으로 A-A단면에서 막응력과 굽힘응력을 계산한다.

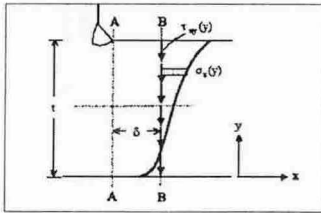


Fig. 7 Structural stress calculation procedure for through thickness fatigue crack

$$\sigma_m^{A-A} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) dy \quad (3)$$

$$\sigma_m^{A-A} \cdot \frac{t^2}{2} + \sigma_b^{A-A} \cdot \frac{t^2}{6} = \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) y dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}^{B-B}(y) dy \quad (4)$$

여기서 식 (3)은 x 방향으로 힘의 평형을 의미하며 식 (4)는 모우멘트의 평형을 의미한다.

4.3 구조응력을 이용한 피로강도 평가

Fig. 8에서는 유한요소해석을 통한 등가구조응력을 바탕으로 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편을 등가구조응력 (ΔS_{eq})와 피로수명 (N_f)의 관계로 나타내었다.

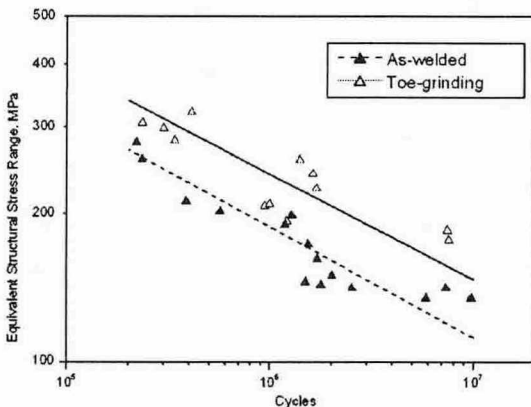


Fig. 8 S-N curve using equivalent structural stress

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 저주기 영역과 고주기 영역에서 피로강도가 유사하게 향상된 것으로 나타났다. 피로강도 및 피로수명 향상을 정량적으로 파악하기 위해 등가구조응력(ΔS)와 피로수명 (N_f)의 관계를 식 (5)과 식 (6)에 나타내었다.

$$\text{As-welded: } \log N_f = 16.080 - 4.433 \log \Delta S \quad (5)$$

$$\text{Toe-grinding: } \log N_f = 17.191 - 4.699 \log \Delta S \quad (6)$$

2×10^6 cycle에서의 피로강도를 비교해 보면, Toe-grinding 시험편이 약 1.29배의 피로강도 향상을 보이는 한편, 등가구조응력 250 MPa에서 피로수명을 비교하였을 때 Toe-grinding 시험편이 As-welded 시험편 대비 약 2.96배의 향상된 피로수명을 가지는 것으로 나타났다.

5. 결 론

- 1) 피로강도의 정량적 향상 효과는 2×10^6 cycle에 대해 Toe-grinding 시험편의 피로강도는 129.1 MPa로 나타나, As-welded 시험편의 피로강도 83.4 MPa에 비하여 약 1.55배 향상된 것으로 나타났다.
- 2) 초기 균열 (1mm)을 육안으로 발견한 시점과 변형률 계측장비로 측정된 변형률 범위의 5% 락 시점이 일치하는 것으로 나타났다.
- 3) 피로강도 향상은 공칭응력을 이용한 방법과 등가구조응력을 이용한 방법 모두 거의 차이가 없는 결과를 보여, 구조응력을 이용한 피로강도 향상을 정량적으로 평가 할 수 있다고 사료되어지며, 따라서 이러한 구조응력 해석방법을 통해 보다 정도 높게 용접구조물의 피로수명을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 현대중공업(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. A. Almar, "FATIGUE HANDBOOK", TAPIR, 1985, pp. 259-285
2. Kirkhope K. J., Bell R., Caron L., Basu R. I., Ma K-T. "Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review", Marine Structures, 12 (1999), pp.447-474.
3. 강성원, 김영욱, 김화수, 김도현, "Padding plate 용접구조의 인장 정하중 이력에 의한 용접 잔류응력 변화 및 피로강도에의 영향", 대한조선학회논문집, 제38권 제4호, 2001, pp.78-82.
4. Haagenen P. J., Maddox S. J., "Specifications for weld toe improvement by burr grinding, tig dressing and hammer peening for transverse welds", IIW Commission XIII-Working Group 2, Collaborative Test Program on Improvement Techniques, 1995.
5. 강성원, 한상혁, 김화수, 백영민, "필릿 용접부의 면외굽힘하중에 대한 피로강도", 대한조선학회논문집, 제40권 제1호, 2003, pp.28-35.