

용접토우부의 그라인딩에 의한 피로강도 증대효과에 대한 연구

강성원* · 김명현* · 최재영* · 김화수** · 백영민**

*부산대학교 조선해양공학과

**현대중공업 조선구조설계부

A Study on the Fatigue Strength Improvement using Weld Toe Burr Grinding

Sung-Won Kang*, Myung-Hyun Kim*, Jae-Young Choi*, Wha-Soo Kim** and Young-Min Paik**

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Hull Initial Design Department, Shipbuilding Division, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd, Ulsan 682-060, Korea

Abstract

While it is known that the weld toe grinding method may give 3.4 times of fatigue strength improvement, this improvement may significantly vary according to weld bead shapes and loading modes. Although tremendous interest have been given in improving fatigue strength improvement for ship structures, quantitative results are yet in need. In this context, a series of fatigue tests is carried out for a type of test specimen that are typically found in ship structures. Weld burr grinding is carried out using a electric grinder in order to remove surface defects and improve the weld bead profile. The test results are compared with the same type of test specimen without applying the fatigue improvement technique in order to obtain a quantitative measure of the fatigue strength improvement. On the other hand, both hot spot stress and structural stress methods are employed to compare the effectiveness of the two methods in evaluating the fatigue strength improvement of welded structures.

*Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received September 16, 2005)

Key Words : Toe grinding, Fatigue strength, Fatigue test, Burr grinding, Hot spot stress, Structural stress

1. 서 론

구조물의 용접부 및 피로 손상이 예상되는 부위의 피로 수명을 향상시키기 위하여서는 그라인딩, 샷피닝, 햄머 피닝 등 다양한 표면처리 방법 등이 사용되고 있으며, 이들 중 용접비드나 스파터를 절삭 혹은 그라인딩 작업을 통해 매끈하게 다듬는 작업은 피로강도를 향상시키는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 이는 그라인딩에 의한 용접부 결함제거 효과 및 토우부 형상을 변화시킴에 따라 응력집중을 줄이는 효과¹⁾ 등에 기인한다.

일반적으로 용접토우부에 있어서 균열의 발생·전파에 의해 파손이 일어나는 경우, 특정 범주의 용접부에

있어서 용접토우부 그라인딩을 통해 약 3.4배 정도의 피로수명 향상을 기대할 수 있는 것으로 알려져 있으나²⁾, 이는 용접부의 형상 및 하중모드 등에 따라 현저히 달라진다. 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 형상에 대하여 필릿 용접토우부를 그라인딩 한 경우에 대한 피로시험을 수행하고, 같은 형상의 그라인딩을 하지 않은 시험편에 대한 피로시험 결과와의 비교 검토를 통해 토우부 그라인딩에 의한 피로강도 및 피로수명 증대효과를 정량적으로 파악하고자 한다.

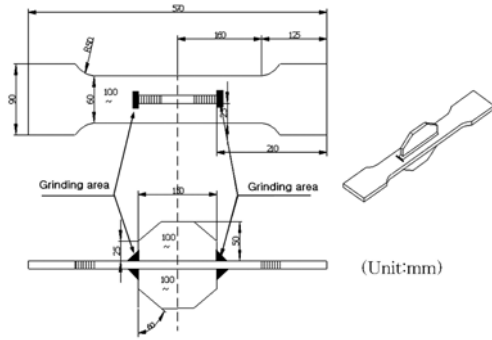


Fig. 1 Dimension of test specimen

제안된 시험편 형상에 대한 공칭응력을 바탕으로 한 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편의 피로시험결과를 바탕으로 구조응력방법을 이용하여 예측한 피로수명 향상 효과에 대한 정량적 비교³⁾ 및 선박 및 해양구조물에 대한 피로설계에서의 적용 가능성⁴⁾을 검토하였다.

2. 시험절차

2.1 시험편형상

본 연구에 사용된 시험편은 선박구조물에 적용되는 선박구조용 연강 (Grade 'A')으로 여러 가지 용접 이음부 중 피로손상이 많이 발생할 것으로 추정되는 형태의 시험편에 대하여 필릿 용접토우부에 Burr grinding 작업을 수행하였다. 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질⁵⁾은 Table 1과 같고 시험편의 용접조건은 Table 2와 같다.

2.2 Burr grinding (IIW recommendation)

본 연구에서는 피로강도를 향상시키는 여러 가지 방

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

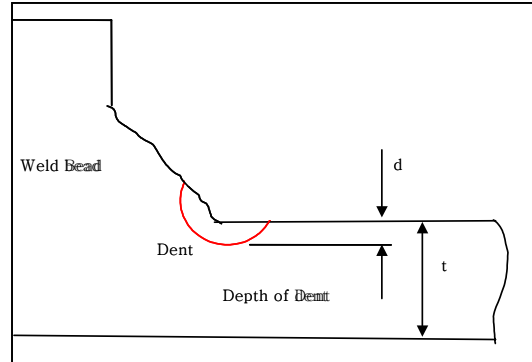
C (%)	Si (%)	Mn (%)
0.13~0.17	0.15~0.18	0.46~0.65
	Yield stress (MPa)	Ultimate strength (MPa)
From mill sheet	299~336	441~468
From tensile test	290~299	427~457

Table 2 Welding condition

	Current	Voltage	Speed	Method
Welding	250A	26V	30cm/min	FCAW

Table 3 Condition of improvement method

Thickness of Plate	Diameter of Tip	Speed	Air pressure	Travel speed
10~50 mm	10~25 mm	15000~40000 rpm	5~7 bar	15~20 mm/sec



Burr grinding
<ul style="list-style-type: none"> • t = 10~15mm, Min. Depth = 0.5mm • t > 15mm, Min. Depth = 1.0mm • Max. Depth = 2.0mm or 0.5%t (t: Plate thickness)

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

법 중 용접부 형상을 개선시키는 방법 중에서 비교적 작업 처리가 용이한 Burr grinding 방법을 사용하였다. Table 3과 Fig. 2에서는 IIW recommendation에서 규정한 Burr grinding 방법과 허용치수²⁾를 각각 나타내었다.

3. 피로시험

3.1 피로시험 방법

본 연구에 사용된 피로시험기는 최대용량 ±20 ton인 축 인장 압축 유압서브 피로시험기이며, 피로시험은 하중제어 방식으로 수행하였다. 피로하중의 파형은 정현파로 하였고, 하중반복속도는 7Hz에서 실시하였다. 하중부하조건은 완전양진하중진폭 즉 R=-1 로 실시하였다. 시험 중 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.

3.2 초기크랙발생

피로시험 실시 결과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 용접

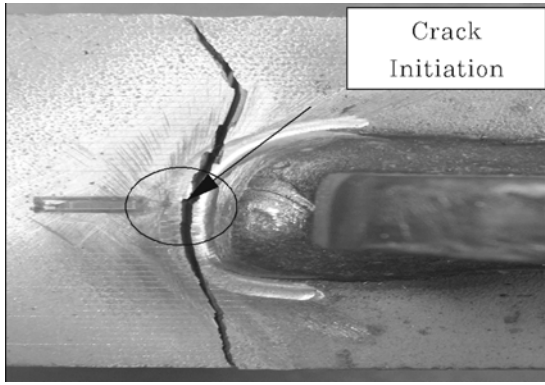


Fig. 3 Picture of the failed specimen

토우부 가공면에서 대부분의 초기 크랙이 발생하였다. 용접토우부 가공면에서 초기 크랙이 일어나는 현상은 Toe-grinding으로 인하여 단면적이 감소되고, 기하학적 형상이 변하는 부분에서 응력집중현상이 발생하여 초기 크랙이 발생한 것으로 사료된다.

4. 피로시험결과

As-welded 시험편 15개와 용접토우부 Burr grinding 을 실시한 14개의 시험편에 대하여 피로시험을 실시하였고, Fig. 4에 As-welded와 Toe-grinding 시험편을 비교하여 공칭응력 기준 응력범위 (ΔS), 파단수명 (N_f) 사이의 관계를 S-N선도⁵⁾로 나타내었다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 그라인딩 효과로 인해 피로강도 및 피로수명이 현저히 향상된 것으로 나타났으며, 피로시험 결과로부터 도출된 피로선도 식은 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$\text{As-welded} : \log N_f = 15.365 - 4.561 \log \Delta S \quad (1)$$

$$\text{Toe-grinding}(N_f) : \log N_f = 17.703 - 5.139 \log \Delta S \quad (2)$$

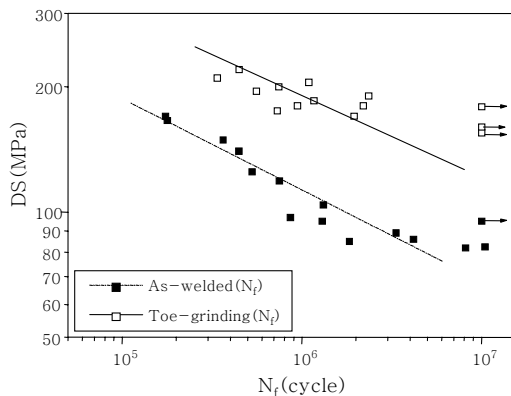


Fig. 4 Comparison of fatigue test results of as-welded and toe-grinding

여기서, N_f : 완전파단수명 (cycle)

ΔS : 공칭응력범위 (MPa)

식 (1)과 식 (2)에 의하면 2×10^6 cycle을 기준으로 한 Toe-grinding 시험편의 피로강도는 165.5 MPa이며, 이는 As-welded 시험편의 피로강도 97.1 MPa에 비하여 약 1.7배 향상된 것으로 나타났다.

5. 유한요소해석

5.1 모델링

본 연구에 사용된 시험편 형상에 대하여 상용유한요소 해석 프로그램인 MSC Patran/Nastran을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 20-node solid 요소로 감소 적분법을 사용하였다. Toe-grinding 시험편의 경우 토우그라인딩 효과를 고려하기 위해 토우부 끝단에 0.5 mm 깊이로 가공면을 모델링 하였으며, 해석에 사용된 경계조건 및 유한요소모델은 Fig. 5에 나타낸 바와 같다.

5.2 구조응력

구조응력은 용접토우부 선단에서의 표면응력을 외삽하여 구하는 핫스팟응력과는 달리, 기본적인 구조역학의 평형조건을 바탕으로 용접부에서 일정 거리가 떨어진 부분에서의 응력을 구한 후 이를 이용하여 용접부 선단에서의 응력을 추정하는 방법이다⁶⁾.

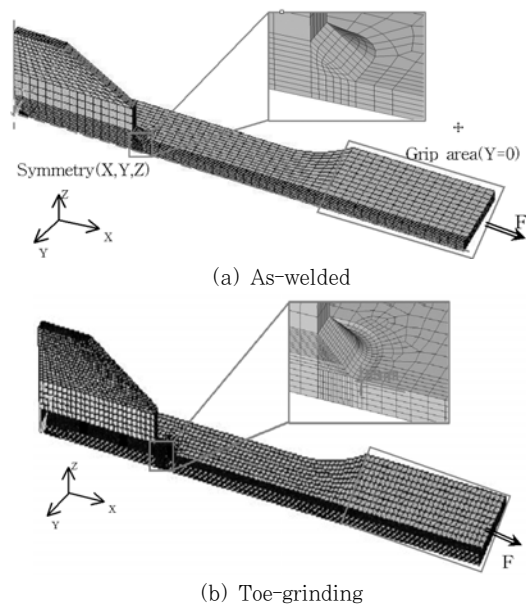


Fig. 5 Finite element model of specimens

5.2.1 이론적 추정방법

Fig. 6에서 보는 바와 같이 T형 필릿 용접토우부에서 응력분포는 용접토우부 끝단에서 최대이며 두께 방향으로 단순 감소하는 분포를 보인다⁶⁾. 기존의 유한요소해석절차에 의하면 토우부 근처에서의 응력분포는 유한요소 망 크기에 따라 급격히 변화될 수 있다⁶⁾. Fig. 6은 구조응력의 정적 평형 분포를 나타낸 것으로 식 (3)과 같이 용접토우부 A-A단면의 구조응력은 막응력 (membrane stress, σ_m)과 굽힘응력 (bending stress, σ_b)으로 구성된다. 이때 횡단응력 (transverse shear stress, τ_m)은 고려하지 않았으며, 원격 하중에 의해 매우 큰 횡단응력이 용접토우부에 발생하는 경우에는 횡단응력은 균열전과 경로를 결정하는데 매우 중요한 역할을 수행할 것이다.

$$\sigma_s^{A-A} = \sigma_m^{A-A} + \sigma_b^{A-A} \tag{3}$$

또한 Fig. 6에서와 같이 A-A단면에서 δ 만큼 떨어진 B-B단면에서의 수평응력성분 (σ_x)과 전단응력성분 (τ_{xy})은 유한요소해석을 통해 직접 계산할 수 있다. 이를 이용하여 식 (4)와 (5)를 통해 A-A단면과 B-B단면 사이의 구조역학적 평형조건을 바탕으로 A-A단면의 막응력과 굽힘응력을 계산하여 구할 수 있다.

$$\sigma_m^{A-A} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) dy \tag{4}$$

$$\sigma_m^{A-A} \cdot \frac{t^2}{2} + \sigma_b^{A-A} \cdot \frac{t^2}{6} = \int_0^t \sigma_x^{B-B}(y) y dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}^{B-B}(y) dy \tag{5}$$

여기서 식 (4)는 x 방향으로 힘의 평형을 의미하며 식 (5)는 모멘트의 평형을 의미한다.

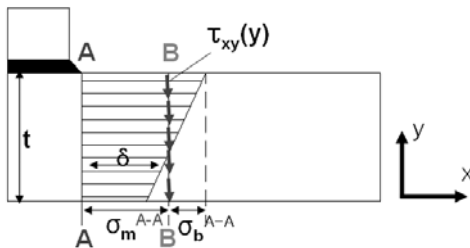


Fig. 6 Structural stress calculation procedure for through thickness fatigue crack

5.2.2 실험적 추정방법

각 시험편에 부착한 스트레인 게이지를 통해 측정된 응력값을 바탕으로 구조응력을 구할 수 있다. Fig. 7에서 용접토우부 끝단 (A-A)의 구조응력은 스트레인 게이지가 부착된 단면 (B-B, C-C)의 측정값을 이용하여 식 (6)~(9)를 통해서 B-B단면 및 C-C단면의 막응력과 굽힘응력을 각각 계산하여 구할 수 있다⁶⁾.

$$\sigma_m^{B-B} = \frac{1}{2} (\sigma_{Top}^{B-B} + \sigma_{Bot}^{B-B}) \tag{6}$$

$$\sigma_m^{C-C} = \frac{1}{2} (\sigma_{Top}^{C-C} + \sigma_{Bot}^{C-C}) \tag{7}$$

$$\sigma_b^{B-B} = \frac{1}{2} (\sigma_{Top}^{B-B} - \sigma_{Bot}^{B-B}) \tag{8}$$

$$\sigma_b^{C-C} = \frac{1}{2} (\sigma_{Top}^{C-C} - \sigma_{Bot}^{C-C}) \tag{9}$$

여기서, $\sigma_{Top}^{B-B}, \sigma_{Top}^{C-C}, \sigma_{Bot}^{B-B}, \sigma_{Bot}^{C-C}$ 는 각각 B-B, C-C단면에서의 상·하 표면에서의 응력 측정값을 나타낸다.

각각의 단면에서 계산된 막응력 및 굽힘응력과 용접토우부 끝단에서의 거리를 바탕으로 비례식을 적용하여 용접부 끝단 (A-A)의 막응력 및 굽힘응력을 식 (10) 및 (11)을 통하여 구할 수 있다⁶⁾.

$$\sigma_m^{A-A} = \sigma_m^{B-B} + \frac{L}{l} (\sigma_m^{C-C} + \sigma_m^{B-B}) \tag{10}$$

$$\sigma_b^{A-A} = \sigma_b^{B-B} + \frac{L}{l} (\sigma_b^{C-C} + \sigma_b^{B-B}) \tag{11}$$

Fig. 8에서는 유한요소해석결과를 바탕으로 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편에 대하여 핫스팟응력과 구조응력을 바탕으로 구한 응력집중계수를 비교하여 나

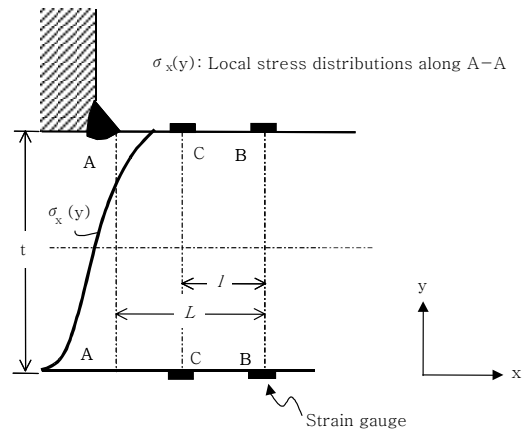


Fig. 7 Illustration of structural stress measurement

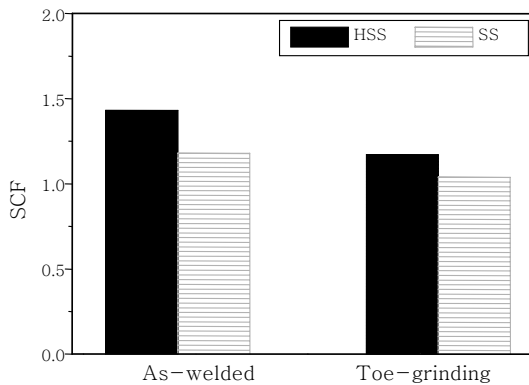


Fig. 8 Comparisons of HSS and SS

타내었다. Toe-grinding 시험편이 As-welded 시험편 보다 응력집중계수가 낮은 경향을 보였으며, 특히 핫스팟 응력이 구조응력에 비하여 상대적으로 높은 값을 가지는 것으로 나타났다.

6. 구조응력을 이용한 피로강도평가

6.1 통합피로선도

서로 다른 하중 조건하에서 다양한 연결부 형상, 용접 형상, 두께에 대하여 구해진 다수의 S-N 데이터를 바탕으로 구조응력 해석절차를 이용하여 통합선도가 최근 Dong⁶⁾ 등에 의하여 발표되었다. Fig. 9에서는 통합선도에 본 시험편 형상에 대하여 유한요소 해석을 통하여 구한 구조응력 결과를 식 (12)를 따라 구한 등가구조응력을 이용하여 통합피로선도에 나타내었다. 식 (12)는 용접부 형상, 두께 및 하중조건 등을 고려하여 통합피로선도를 도출하기 위한 식이다⁶⁾.

$$\Delta S_{eq} = \frac{SCF_{ss} \Delta \sigma_n}{t^{\frac{2-m}{2m}} I(r)^{\frac{1}{m}}} \quad (12)$$

여기서 t=부재두께, m=3.6, I(r)= $\Delta \sigma_b / \Delta \sigma_s$ (구조응력 진폭에 대한 굽힘응력 진폭의 비), $\Delta \sigma_n$ 은 공칭응력 진폭, SCF_{ss}는 구조응력에 근거한 응력집중계수이다.

Fig. 9에 나타낸 바와 같이 통합피로선도에서 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편 모두 하나의 좁은 밴드를 형성하였으며, 예상한 바와 같이 Toe-grinding 시험편의 피로시험 결과가 As-welded 시험편의 피로시험 결과보다 향상된 피로수명을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 구조응력해석 기법을 통해 용접 토우부 그라인딩에 의한 기하학적 형상 변화에 의한 피로수명 향상효과를 정량적으로 예측할 수 있을 것으로 사료되어진다.

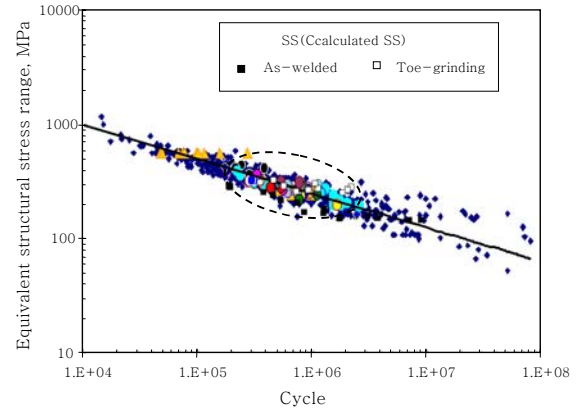


Fig. 9 Correlation of all edge details with other small details using the equivalent structural stress range parameter

6.2 피로강도 평가

Fig. 10에서는 유한요소해석을 통한 등가구조응력을 바탕으로 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편을 등가구조응력 (ΔS_{eq})와 피로수명 (N_f)의 관계로 나타내었다.

Fig. 10에 나타낸 바와 같이 그라인딩 효과로 인해 As-welded 시험편보다 Toe-grinding 시험편이 피로강도 및 피로수명 향상을 보이고 있다. 정량적인 피로강도 및 피로수명 향상 효과를 구하기 위해 다음과 같이 식 (13)과 식 (14)에 나타내었다.

$$\text{As-welded: } \log N_f = 16.345 - 4.561 \log \Delta S \quad (13)$$

$$\text{Toe-grinding: } \log N_f = 18.485 - 5.139 \log \Delta S \quad (14)$$

여기서 N_f : 완전파단수명 (Cycle)

ΔS : 등가구조응력 (MPa)

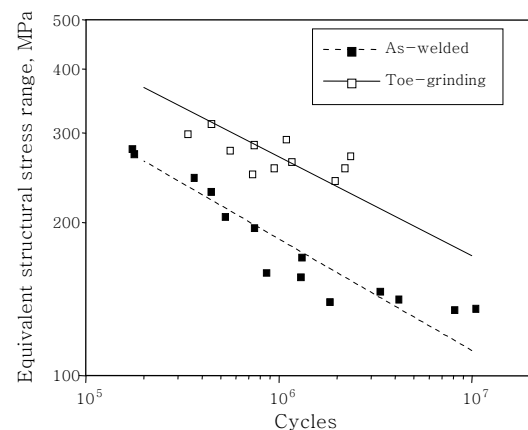


Fig. 10 S-N curve using equivalent structural stress

식 (13)과 식 (14)를 이용하여 2×10^6 cycle 기준으로 피로강도를 비교해 보면, Toe-grinding 된 시험편이 1.47배의 피로강도 향상을 보인다. 또한 등가구조응력 250 MPa 기준으로 피로수명을 비교해 보면 Toe-grinding 된 시험편이 5.67배의 피로수명이 향상된 것으로 나타났다. 이는 공칭응력을 이용한 방법에서 피로강도는 2×10^6 cycle 기준으로 Toe-grinding 된 시험편이 1.70배 향상을 보이는 것과 일관성 있는 결과를 보였으나, 피로수명은 공칭응력 180 MPa (구조응력 환산 250 MPa) 기준으로 Toe-grinding 된 시험편이 10.82배의 향상을 보이는 것과 다소 차이를 나타내었다. 따라서 구조응력으로 피로강도 향상 평가를 할 수 있다고 사료되어지지만, 피로수명의 정량적 평가하는 데 있어서는 다소 차이를 보여 어려움이 있을 것으로 사료되어진다.

7. 결 론

1) 본 연구에 사용된 시험편에 대하여 실시한 피로시험을 통해 구한 피로선도 식을 바탕으로 피로강도 및 피로수명의 정량적 향상 효과를 살펴보았을 때 피로강도는 2×10^6 cycle 기준으로 하였을 경우 Toe-grinding 된 시험편이 1.70배 향상된 결과를 보였으며, 피로수명은 공칭응력 180 MPa를 기준으로 하였을 경우 Toe-grinding 된 시험편이 10.82배의 향상을 보이는 결과를 나타내었다.

2) 초기 균열 (1mm)을 육안으로 발견한 지점과 변형률 계측장비로 측정한 변형률 범위의 5% 하락 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 사료되어 지지만, 피로수명 향상은 공칭응력을 기준으로 한 방법과 다소 차이를 보여, 구조응력을 이용한 피로수명 향상을 정량적으로 평가 하는데 있어 다소 어려움이 있을 것으로 사료되어진다.

4) As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편에 대하여 계산된 구조응력을 이용하여 통합피로선도를 작성하였을 때 하나의 좁은 밴드를 형성하였으며 이러한 구조응력 해석방법을 통해 보다 정도 높게 용접구조물의 피로수명을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. A. Almar, "FATIGUE HANDBOOK", TAPIR, 1985, 259-285
2. Haagensen 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
3. Lotsberg. I., "Overview of the FPSO-Fatigue Capacity JIP", Proceeding of the 18th international Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, MAE01/Mat-3010, Rio de Janeiro Brazil, June 3-8, 2001
4. S. W. Kang, M. H. Kim, J. H. An, W. S. Kim and Y. M. Paik, "A study on the fatigue strength improvement using weld toe burr grinding", Proceedings of KWS, 2005, 256-258 (in Korean)
5. S. W. Kang, Y. W. Kim, W. S. Kim and D. H. Kim, "Re-distribution of welding residual stress due to tensile pre-load and its effect on fatigue strength in padding plate weldment", Journal of SNAK, 38-4 2001, 75-82 (in Korean)
6. Dong. P., Battelle Structural stress JIP Final Report, No. N004431-01, 2003
7. Chitoshi MIKI, Kengo ANAMI, Hideki TANI and Ichiro SUGIMOTO, "Fatigue strength improvement methods by Treating the weld toe". Journal of JWS, 17-1, 1999, 111-119 (in Japanese)