

## 구조응력기법을 적용한 용접부 그라인딩 피로강도 증대효과에 관한 연구

### A Study of Fatigue Strength Improvement Evaluation of Weld Toe Grinding Technique using Structural Stress

장용원\*, 강성원\*, 김명현\*, 김화수\*\*, 백영민\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과

\*\*현대중공업 조선구조설계부

#### 1. 서 론

일반적으로 용접구조물의 피로해석을 수행할 때 IIW (International Institute of Welding) 혹은 선급들의 규정을 통해 부재의 두께를 기본으로 작성된 구조모델에서 핫스팟응력 (Hot spot stress)은 외삽 절차를 통해 외삽법으로 구한 응력을 이용하여 피로수명을 산정하고 있다. 그러나 이 방법은 모델링이나 변위전달 등에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 유한요소 모델의 요소크기에 민감하기 때문에 새로운 구조응력 (Structural stress)개념을 도입한 범용적인 구조응력 해석절차가 최근 제안되었다 [1]. 한편, 구조응력 방법을 이용하여 용접연결부의 피로 거동에 미치는 응력집중효과를 효과적으로 고려할 수 있으나, 용접부 그라인딩과 같은 용접부 피로수명 향상방법들에 대한 고려는 이루어진 적이 없다 [2].

따라서 본 연구에서는 제안된 시험편 모델에 대한 공칭응력을 바탕으로 한 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편의 피로시험결과 (Fig. 1)과 구조응력방법을 이용하여 예측한 피로수명과의 차이 및 적용 가능성을 검토하였다 [3][4].

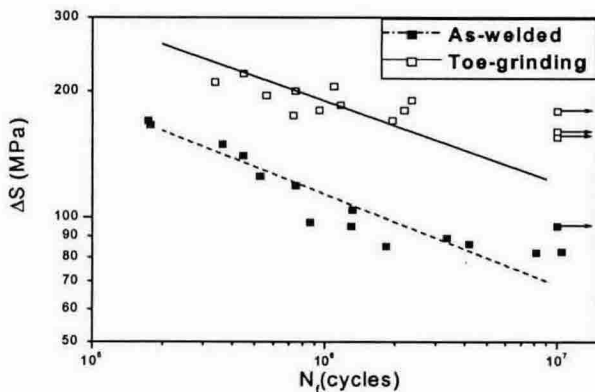
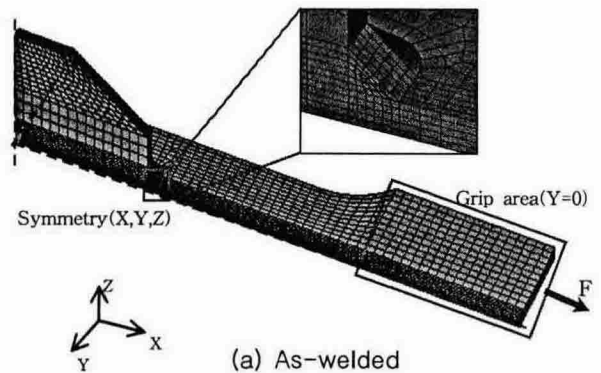


Fig. 1 Comparison of fatigue test results of as-welded and toe-grinding

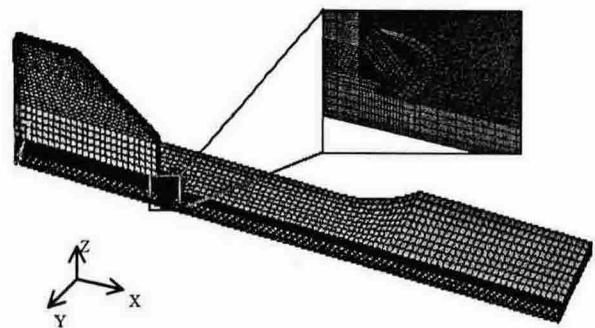
#### 2. 유한요소해석

##### 2.1 모델링

본 연구에 사용된 시험편 형상에 대하여 상용 프로그램인 Ansys를 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. 2에 나타낸 바와 같다.



(a) As-welded



(b) Toe-grinding

Fig. 2 Finite element model of specimens

2.2 핫스팟응력

먼저 유한요소해석을 통하여 0.5t 및 1.5t (t:부재두께)에서의 응력을 외삽한 값으로 핫스팟응력을 구하였다. Fig. 3에서는 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편의 핫스팟응력 기준 응력집중계수 (Stress concentration factor, SCF)를 비교하여 나타내었다. Toe-grinding 시험편이 As-welded 시험편보다 약 18% 정도 핫스팟응력이 낮은 것으로 나타났으며, 이는 그라인딩 효과에 의한 형상변화 등에 의해 응력 값이 낮아진 것으로 사료되어진다.

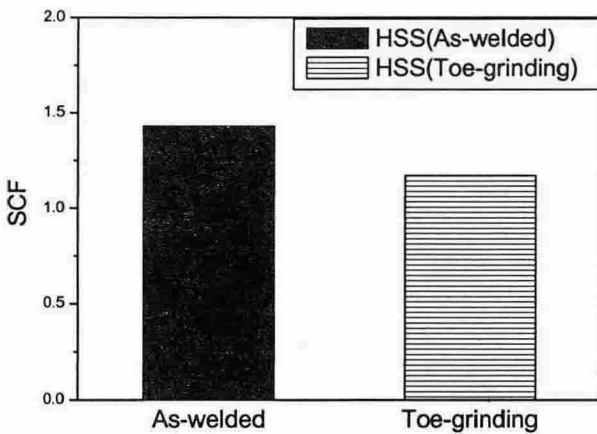


Fig. 3 Comparison of HSS

2.3 구조응력

구조응력 (Structural stress,  $\sigma_s$ )은 막응력 (Membrane stress,  $\sigma_m$ )과 굽힘응력 (Bending stress,  $\sigma_b$ )으로 구성된다. Fig. 4에서 보인 바와 같은 A-A단면에서의 구조응력은 일정거리 ( $\delta$ )만큼 떨어진 B-B단면에서의 수평응력성분 ( $\sigma_x$ )과 전단응력성분 ( $\tau_{xy}$ )을 유한요소해석을 통해 구하고 이를 식 (1)과 (2)를 통해 두 단면 사이의 구조역학적 평형조건을 바탕으로 A-A단면에서 막응력과 굽힘응력을 계산한다.

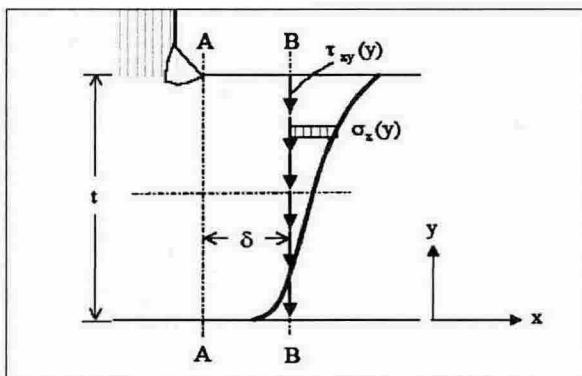


Fig. 4 Structural stress calculation procedure for through thickness fatigue crack

$$\sigma_0^{A-A} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_0^{B-B}(y) dy \quad (1)$$

$$\sigma_0^{A-A} \frac{t^2}{2} + \sigma_0^{A-A} \frac{t^2}{6} = \int_0^t \sigma_0^{B-B}(y) y dy + \delta \int_0^t \tau_{00}^{B-B}(y) dy \quad (2)$$

여기서 식 (1)은 x 방향으로 힘의 평형을 의미하며 식 (2)는 모우멘트의 평형을 의미한다.

Fig. 5에서는 유한요소해석결과를 바탕으로 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편에 대하여 핫스팟응력과 구조응력을 비교하여 응력집중계수를 나타내었다. Toe-grinding 시험편이 As-welded 시험편보다 응력집중계수가 낮은 경향을 보였으며, 특히 핫스팟응력이 구조응력에 비하여 상대적으로 높은 값을 갖는 것으로 나타났다.

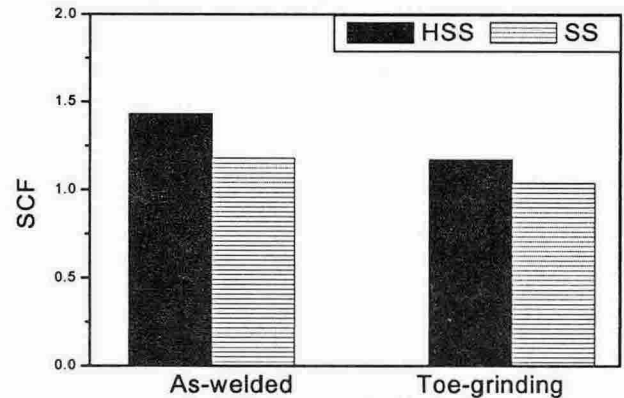


Fig. 5 Comparisons of HSS and SS

3. 구조응력을 이용한 피로강도평가

3.1 통합피로선도

서로 다른 하중 조건하에서 다양한 연결부 형상, 용접 형상, 두께에 대하여 구해진 다수의 S-N 데이터를 바탕으로 구조응력 해석절차를 이용하여 통합선도가 최근 Dong 등에 의하여 발표되었다 [1]. Fig. 6에서는 통합선도에 본 시험편 형상에 대하여 유한요소 해석을 통하여 구한 구조응력 결과를 식 (3)을 따라 구한 등가구조응력을 이용하여 통합피로선도에 나타내었다. 식 (3)은 용접부 형상, 두께 및 하중조건 등을 고려하여 통합피로선도를 도출하기 위한 식이다.

$$\Delta S_{00} = \frac{SCF_{00} \Delta \sigma_0}{\frac{2-m}{t^{20}} I(t)^{\frac{1}{m}}} \quad (3)$$

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

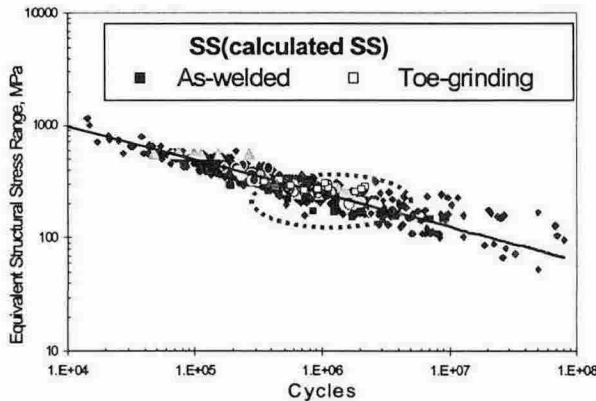


Fig. 6 Correlation of all edge details with other small details using the equivalent structural stress range parameter

Fig. 6에 나타난 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 용접토우부 라인딩에 의한 기하학적 형상 변화에 의한 피로수명 향상효과를 정량적으로 예측할 수 있을 것으로 사료되어진다.

### 3.2 피로강도 평가

Fig. 7에서는 유한요소해석을 통한 등가구조응력을 바탕으로 As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편을 등가구조응력 ( $\Delta S_{eq}$ )와 피로수명 ( $N_f$ )의 관계로 나타내었다.

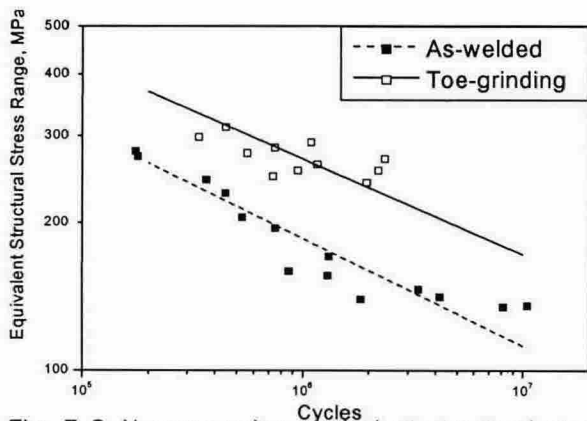


Fig. 7 S-N curve using equivalent structural stress

Fig. 7에 나타난 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 (4)와 식 (5)에 나타내었다.

$$\text{As-welded: } \log N_f = 16.345 - 4.561 \log \Delta S \quad (4)$$

$$\text{Toe-grinding: } \log N_f = 18.485 - 5.139 \log \Delta S \quad (5)$$

여기서  $N_f$  : 완전파단수명 (Cycles)  
 $\Delta S$  : 등가구조응력 (MPa)

식 (4)와 식 (5)를 이용하여  $2 \times 10^6$  사이클 기준으로 피로강도를 비교해 보면, Toe-grind 된 시험편이 1.47배의 피로강도 향상을 보인다. 또한 등가구조응력 250 MPa 기준으로 피로수명을 비교해 보면 Toe-grind 된 시험편이 5.67배의 피로수명이 향상된 것으로 나타났다. 이는 공칭응력을 이용한 방법에서 피로강도는  $2 \times 10^6$  사이클 기준으로 Toe-grind 된 시험편이 1.70배 향상을 보이는 것과 일관성 있는 결과를 보였으나, 피로수명은 공칭응력 180 MPa (구조응력 환산 250 MPa) 기준으로 Toe-grind 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 사료 되어진다.

## 4. 결 론

- (1) 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 하는 데 있어 다소 어려움이 있을 것으로 사료 되어진다.
- (2) As-welded 시험편과 Toe-grinding 시험편에 대하여 계산된 구조응력을 이용하여 통합피로선도를 작성하였을 때 하나의 좁은 밴드를 형성하였으며 이러한 구조응력 해석방법을 통해 보다 정도 높게 용접 구조물의 피로수명을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후기

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

## 참고문헌

- [1] Dong. P., Battelle Structural stress JIP Final Report, No. N004431-01, 2003
- [2] 윤중근, 김현수, 황주환, 박동환, "용접부 피로강도에 미치는 후처리의 영향", 대한용접학회 춘계학술발표논문, pp.240-242, 2004
- [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] 강성원, 김명현, 안정호, 김화수, 백영민, "용접토우부의 그라인딩에 의한 피로강도 증대효과에 대한 실험적 연구", 대한용접학회 춘계학술발표논문, 2005