

## 잔류응력을 고려한 box 용접부의 피로수명 예측

### Prediction of the fatigue life of a box weldment with residual stress

김 현수, 윤 중근, 김 하근, 박 동환

\* 현대중공업(주) 기술개발본부 산업기술연구소

**ABSTRACT** Fatigue life a box weldment was predicted with the stress concentration and residual stress using the equation reported. In order to change the stress concentration and residual stress of the box weldment, Post treatments such as smooth grinding of weld bead, weld toe grinding and hammer peening were applied. The fatigue life of the weldment after post treatment clearly increased, which is attributed to the reduction of stress concentration and/or introduction of compressive residual stress at the weld toe. The predicted fatigue life was a relatively good agreement with the experiment for a long fatigue life, while it was underestimated for a short fatigue life.

#### 1. 서 론

강 구조물의 조업도중 발생하는 문제점 중 대표적인 것이 반복하중에 의한 피로손상이다. 선박의 경우에는 파도, 엔진이나 프로펠러에서 발생하는 진동 등과 같은 동적 하중으로 인하여 구조적 불연속부 즉, 응력집중이 발생하는 곳에서는 피로 균열이 발생되어 전파된다. 동일한 구조적 불연속부일지라도 용접부에서의 피로수명은 매우 짧다고 알려져 있다. 이는 용접부에는 용접부 세부형상에 따른 추가적 국부 응력집중 현상과 피로균열 개시에 큰 영향을 undercut과 같은 초기 결함 및 인장 잔류응력의 존재에 기인된다고 하겠다. 따라서 구조 용접부의 피로수명을 향상시키기 위해서는 주어진 외부 하중 조건하에서 용접부에서의 국부응력집중을 최소화하는 방법과 용접부 toe부에서의 초기 결함 제거 혹은 용접부에 압축잔류응력의 형성시키는 방법 등을 적용하는 것이 바람직하다 [1,2].

구조적 불연속부에 대한 피로수명은 일반적으로 피로균열 발생 예상부에서의 응력 집중계수를 고려하면 피로수명을 예측할 수 있다. 그러나 용접부에 대해서는 초기 잔류응력의 존재로 인하여 피로수명 예측이 단순하지 않다. 잔류응력을 고

려하는 방법으로는 외부 하중이력 산출시 잔류응력을 평균 응력으로 취하는 방법이 있다 [3,4].

본 연구에서는 SM50 강재 box 용접부에서의 피로 수명을 기존 보고된 예측식을 이용하여 국부 응력집중계수와 잔류응력을 반영하여 예측하고자 하였으며, 이를 피로시험 결과와 비교함으로써 이에 대한 타당성을 검증하고자 하였다. 다양한 국부응력과 잔류응력 분포를 고려하고자 box 용접부에 smooth grinding, weld toe grinding 및 hammer peening 등을 적용하였다. 후처리에 따른 용접부의 국부응력과 잔류응력 변화 거동을 유한요소법으로 평가하였다. Box 용접부의 피로강도는 저자들의 결과를 이용하였다[5].

#### 2. 유한 요소 해석

본 연구의 대상은 두께 10mm SM50A의 box 용접부이었으며, 용접은 FCAW 기법으로 수행하였다. 초층 용접은 rib부 전체를 fillet 용접하였으며, 두 번째 용접은 box 용접부 선단 주위의 일부분만 수행하였다. 용접부에 대한 후처리는 방법은 box 용접부의 피로강도 평가시 적용된 방법과 동일하다 [5]. 피로수명은 피로

균열이 시험편 폭의 1/2이상 진전하였을 때의 수명으로 하였다. 후처리에 따른 용접부의 잔류응력 및 응력 집중을 평가하기 위하여 Fig.1의 (a), (b) 및 (c)와 같이 smooth grinding, hammer peening 및 weld toe grinding을 모델링하여 3차원 열 탄소성 해석을 실시하였다. Smooth grinding의 경우 잔류응력 및 형상에 따른 응력집중 효과만을 고려하였으며, hammer peening과 toe grinding의 경우는 잔류응력 해석 후 후처리 공정인 peening 및 toe grinding 효과를 해석하여 잔류응력의 변화를 평가하였다.

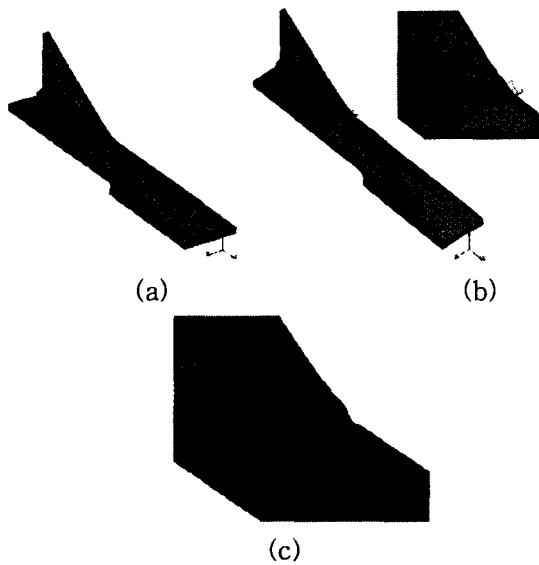


Fig.1 Analysis model for box weldment : (a) Smooth grinding, (b) Hammer peening, (c) Weld toe grinding

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 잔류응력과 응력 분포

Fig. 2는 후처리에 따른 box 용접부의 잔류응력 분포를 weld toe로부터 도시한 것이다. Smooth grinding된 용접부의 경우, 해석을 위한 모델링시 형상만을 고려하였기 때문에 전형적인 용접부의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 그런데 hammer peening을 실시한 경우에는 용접부에 형성된 인장잔류응력이 완전히 재분포되어 압축잔류응력이 크게 형성되었다. Weld toe grinding의 경우, 초기 인장잔류응력이 약간 재분포되어 최대 인장잔류응력이 감소된 것을 알 수 있다. 그러나 peening과 toe grinding의

경우 후처리에 따른 단면 감소로 인하여 Fig. 3과 같이 응력집중이 증가하는 경향을 보이고 있다. 응력집중은 smooth grinding인 경우 가장 적으며 이는 일반 용접부 toe에서 발생하는 응력집중에 비하여 매우 적음을 알 수 있다. 정적 인장하중 하에서 strain gage를 이용하여 응력 측정을 실시한 결과를 Table 1에 나타내었다. 측정결과가 계산 결과에 비하여 다소 높으나 전체적인 경향은 유사하다.

Table 1. 용접부 응력집중 계수

	Distance	Hammer peening	Smooth grinding	Toe-grinding
FEA Kt	2mm	0.80	1.04	1.25
	4mm	0.94	0.99	0.74
Exp.Kt	2mm	0.90	1.20	1.32
	4mm	1.09	1.21	1.23

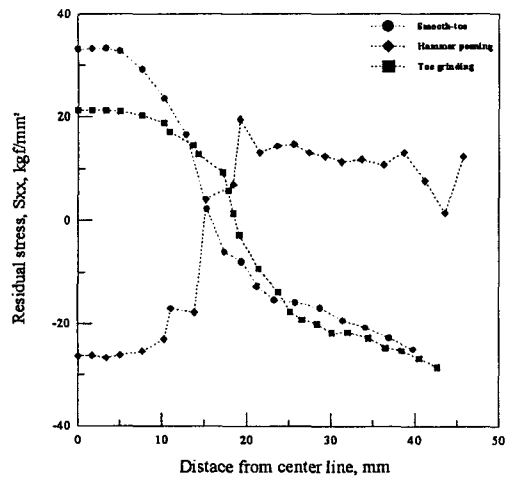


Fig.2 Effect of post treatment on residual stress distribution of the box weldment

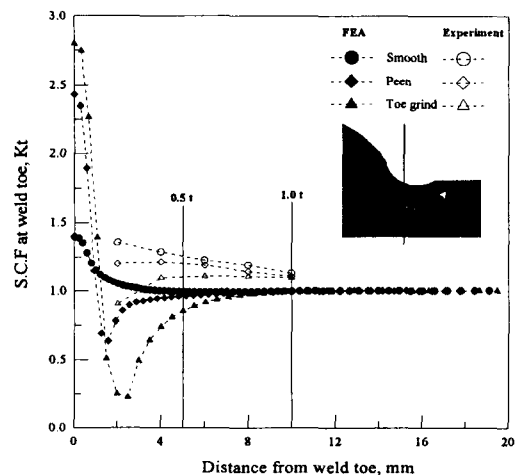


Fig.3 Comparison of stress concentration factor (SCF) between calculation and experiment for the box weldment

3.2 피로수명 예측

Fig. 4는 box 용접부의 피로강도에 미치는 후처리 영향을 도시한 것이다 [5]. As-weld 상태의 용접부에 비하여 후처리를 실시한 용접부는 모두 피로 수명 및 강도가 증가되었다. Smooth grinding 된 용접부의 경우 균열이 용접 root부에서 발생한 반면, hammer peening 및 toe grinding의 경우에는 용접 토우부에서 발생하여 파단 되었다.

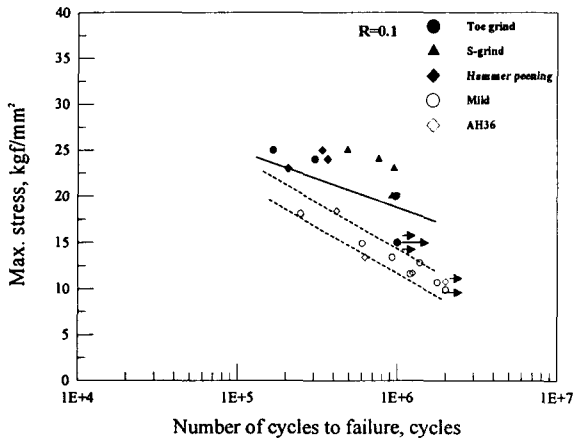


Fig.4 Effect of post treatment on the fatigue strength of box weldment

후처리된 용접부의 피로수명 증가는 토우 형상 개선 및 압축 잔류응력의 생성에 기인되었다고 할 수 있다. 응력집중 및 하중 이력에 따른 잔류응력의 감소를 고려하여 용접부에 대한 피로수명을 아래 식을 이용하여 예측하였다. 계산시 사용된 피로 물성은 SM50A와 유사한 기계적 성질을 지닌 A36 물성을 이용하였다.

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_{os}} = (2N_f - 1)^k$$

$$\sigma_a = (\sigma_f' - \sigma_o)2N_f^b$$

$$\frac{1}{2N_f} = \left[ \left( \frac{\sigma_f'}{\sigma_o} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_f'} \right) \right]^{\frac{1}{b}}$$

$$\int_1^{2N_f} \left[ \left( \frac{\sigma_f'}{\sigma_o} \right) \left( 1 - \frac{\sigma_{os}(2N_f)^k}{\sigma_f'} \right) \right]^{1/b} d(2N_f) = 1$$

Fig.5는 상기 식을 이용하여 평가된 결과와 시험을 통하여 얻은 결과를 상호 비교한 것이다. Fig.5에서 보여주듯이 계산 결과가 시험결과에 비하여 낮은 값을 보이고 있으며, 장수명의 경우에는 비교적 일치됨을 보여 주고 있다. 이는 피로 수명예측식이 피로 균열 발생에 필요한 수명을 예측하는 것이므로 파단이 발생된 경우에는 과소평가 되었다고 판단된다. 또한 보다 정확하

예측을 위해서는 잔류응력의 재분포, 루트부 균열발생 및 계산시 적용된 저주기 피로 물성등에 대한 전반적인 검토가 필요하다.

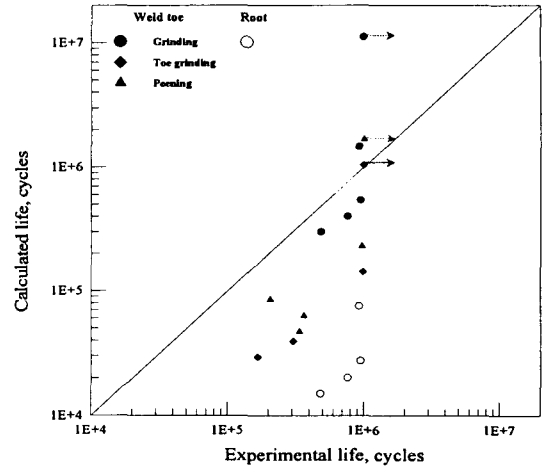


Fig.4 Comparison of fatigue life between calculation and experiment

4. 결 론

후처리된 box 용접부에서의 피로 수명을 국부 응력집중계수와 잔류응력을 고려하여 예측하고자 하였다.

- 1) 후처리에 따른 토우부 형상 개선 및 압축 잔류응력의 영향으로 인하여 후처리된 용접부의 피로수명 및 강도는 증가한다.
- 2) 본 연구에서 적용된 피로수명 예측식은 비교적 장수명 예측시 잘 일치하나, 단수명의 경우에는 과소 평가한다.

참고문헌

1. P.J. Haagensen : Fatigue of high strength steels, 2nd Int. Sym on high strength steel, Stiklestad Apr. 2002
2. I. Huther et. al: IIW document XIII-1601-95
3. F.V. Lawrence et. al : Influence of residual stress on the predicted fatigue life of weldments
4. Tso-Liang Teng et. al : Effect of weld geometry and residual stresses on fatigue in butt-welded joints, Int. J. of pressure vessels and piping, 2002, pp. 467-482
5. 윤중근, 김현수, 황주환, 박동환 : 용접부 피로강도에 미치는 후처리의 영향, 2004 춘계용접학회, 제주대