

## 부분 용입용접부의 피로강도 평가

### A study on the fatigue strength of partially penetrated welded joint

\*김유일, 강종규, 한종만

대우조선공업(주) 선박해양기술연구소 시험평가연구팀

#### 1. 개요

그림1은 본 연구의 대상 용접부인 하중 전달형 십자형 fillet용접부를 나타낸다. T는 plate의 두께, S는 각목, P는 용입깊이를 나타낸다. 하중 전달형 십자형 fillet용접부의 피로특성은 각장 S와 용입깊이 P에 의해 특징지어진다. 일반적으로 각장 S와 용입깊이 P가 커질수록 용접부의 인장강도와 피로강도는 증가하는 것이 보통이다. 그림1에 보인 바와 같은 십자형 fillet용접부를 설계할 때 가장 중요하게 고려하여야 할 점은 적절한 weld size를 결정하는 일이다. Weld size의 결정기준은 주어진 하중하에서 weld root부의 비용입부에서 발생한 균열에 의해 파괴가 발생하는 weld failure보다 toe에서 발생한 균열에 의한 plate failure가 선행되어야 한다는 점이다. 적절한 크기의 각장 및 용입깊이의 결정은 toe부와 root부의 피로강도에 대한 파괴역학적인 분석을 통하여 가능하다. Gurney[1]는 파괴역학을 이용한 이론해석을 통하여 다양한 각목에 대한 임계 용입깊이를 이론적으로 예측하여 많은 실험결과와 비교하였다

#### 2. 십자형 fillet용접부의 잔류응력 특성

우선, Toe부나 root부에 존재하는 용접 잔류응력이 균열의 진전속도에 영향을 미칠 여지가 있으므로 이에 대한 검토를 수행하였다. 열탄소성 유한요소 해석을 통하여 잔류응력의 분포와 크기를 추정하고, 계산된 잔류응력을 바탕으로 잔류응력에 의한 응력세기계수를 구하여 균열의 진전에 미치는 잔류응력의 영향을 파악하였다.

상대적으로 낮은 범위의 잔류응력은 균열의 진전에 크게 영향을 미치지 못할 것으로 예상되므로 균열의 진전을 예측함에 잔류응력의 영향을 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 그러나, 그림2에서 보듯이 가로판의 toe부에는 상대적으로 높은 값의 잔류응력이 존재하므로 이 지점의 균열 진전을 예측하는 경우에는 잔류응력의 효과를 고려하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

#### 3. Root 부의 피로수명 계산

Weld root부의 피로수명은 일반적으로 Paris의 식을 적분하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 균열단합의 효과를 고려한 Newman-Forman-de Koning-Henriksen 에 의해 제안된 균열진전식을 사용하였다. Newman 등에 의해 제시된 균열진전식은 균열 선단에서의 소성거동을 정확히 예측하기 위해 수정된 Dugdale strip yield model을 이용하여 수치적으로 균열단합량을 예측하고 이를 바탕으로 유효 응력세기계수를 계산한 것이다[2].

$$\Delta K_{eff} = \frac{1-f}{1-R} \Delta K = U(R, S_{max}, \alpha) \Delta K \quad \text{Eqn(1)}$$

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) \quad R \geq 0$$

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) \left[ \cos\left(\frac{\pi S_{max}}{2\sigma_0}\right) \right]^{1/\alpha}$$

$$A_1 = (0.415 - 0.07\alpha) \frac{S_{max}}{\sigma_0}$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3, \quad A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

여기서,  $K_{eff}$ 는 유효응력세기계수를, R은 응력비율, U는 crack closure level을 나타내며,  $S_{max}$ 는 최대 응력값을,  $a$ 는 constraint parameter를 나타낸다. 하중 전달형 십자형 fillet 용접부의 root 부 응력세기계

수는 참고문헌 [3]의 결과를 이용하였다. 이는 다양한 개선형상에 대한 2차원 유한요소해석을 통하여 균열선단의 응력장을 구하고 그를 토대로 응력세기계수를 근사화시킨 것이다. Eqn(2)는 계산에 사용한 응력세기계수 추정식을 나타낸다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a_r \sec(\pi a_r / 2W)} \cdot \lambda_R \quad \text{Eqn(2)}$$

$$C_1 = C_3(a_i / T) + C_4$$

$$C_2 = C_5(a_i / T) + C_6$$

$$C_3 = 0.21114(S/T)^2 + 0.24162(S/T) - 0.84173$$

$$C_4 = -0.20887(S/T)^2 + 0.29782(S/T) - 0.10492$$

$$C_5 = 0.84766(S/T)^2 - 2.46019(S/T) + 1.96361$$

$$C_6 = 0.18021(S/T)^2 - 0.56740(S/T) + 0.77292$$

#### 4. Toe부의 피로수명 계산

Toe부의 피로수명은 root부의 경우와 달리 균열의 개시수명과 진전수명을 모두 고려하여야 한다. 균열의 진전수명 계산은 앞서 root부의 경우와 같은 방법으로 계산을 수행하였고, toe부의 균열 개시수명은 미소균열(mechanically short crack)의 진전 법칙을 적용하여 계산하였다[2]. 그림.3은 이러한 미소균열의 진전 거동의 특성을 나타낸다.

#### 5. 임계 개선형상의 결정

그림4는 작용 응력진폭 및 응력비에 따른 임계 개선형상 선도를 나타낸다. 임계선의 위쪽은 toe부에서 발생한 균열에 의한 모재의 파단 영역이며, 아래쪽은 root부에서 발생한 균열에 의한 용접부의 파단 영역을 나타낸다.

그림5는 작성된 임계 개선형상 선도와 참고문헌[1]에 제안된 임계 개선형상을 함께 나타낸 것으로, Gurney[1]에 의해 제안된 임계 개선형상이 본 연구의 결과에 비취 root failure의 영역에 들어감을 알 수 있다. 판 두께에 따라 약간의 차이는 있으나 임계선의 위쪽부분의 어떠한 형상을 선택하여도 강도상의 문제가 없으나, 시공상의 편의를 감안하여 S와 P가 같도록 하는 것이 좋을 것으로 판단되어, 본 연구에서는 S/T=P/T=0.4로 제안한다. 그림25의 1 표시된 것이 제안된 개선형상으로 판 두께 25mm이하인 경우에 적용 가능하다

#### 6. 결론

- 부분 용입 용접부의 피로강도를 평가하여, root부의 파괴가 발생하기 전에 toe부의 파괴가 선행되는 임계 개선형상을 결정하였으며, 제안된 개선형상은 S=P=0.4T이다. (판 두께 25 mm이하인 경우)

- 부분 용입 용접부의 임계 개선형상은 판 두께, 작용응력 진폭, 응력비에 따라 영향을 받으며, 그 중 응력비의 영향이 가장 크게 나타난다. 그러나, 동일한 각장(S)를 가지는 경우 응력비가 0인 경우에 가장 큰 임계 용입깊이를 필요로 하게 되므로 응력비 0에 대한 평가만으로 충분하다. 또한, 작용응력 진폭이 클수록, 판 두께가 클수록 동일 각장에 대해 임계 용입깊이는 커지는데, 그 영향은 크게 나타나지 않는다.

#### 참고문헌

- [1] T.R.Gurney, *Fatigue of Welded Structure*, Cambridge University Press, 1979
- [2] J.C.Newman,Jr., A Review of Modeling Small-Crack Behavior and Fatigue-Life Predictions for Aluminum Alloys, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Scruct.*, Vol.17, No.4, pp.429-439, 1994
- [3] 강성원, Fillet 용접 이음재의 피로강도 해석에 관하여, 대한용접학회, 1998
- [4] 유순영, 김순균, 깊은 용입 십자형 필렛 용접부의피로특성, 대우중공업 기술연구실 재료 기술팀, 1988

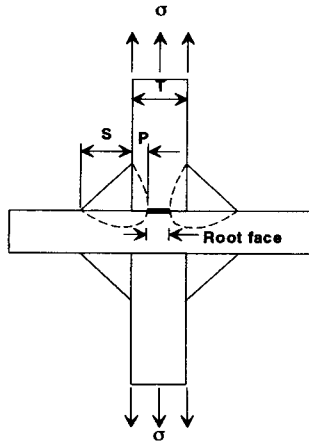


그림1 십자형 용접부의 형상 및  
임계개선형상 선도[1]

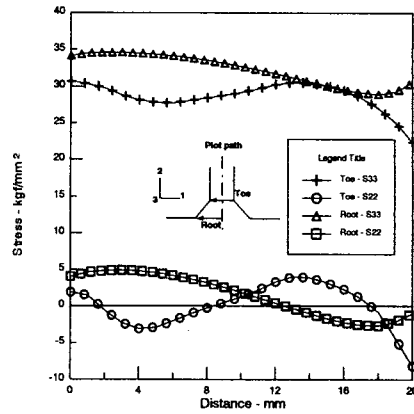


그림2 잔류응력의 분포

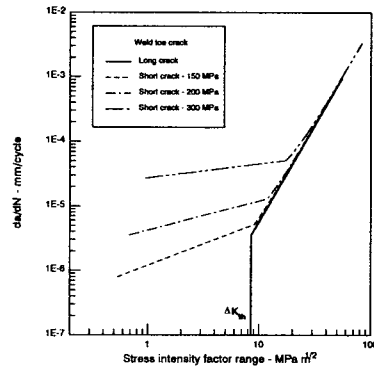
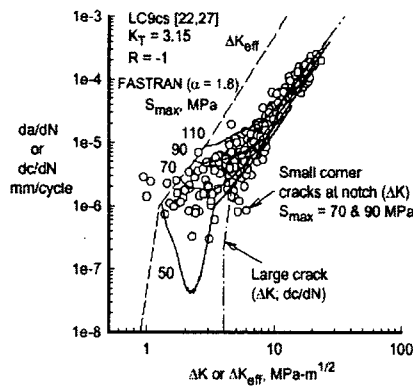


그림3 미소균열의 전전거동

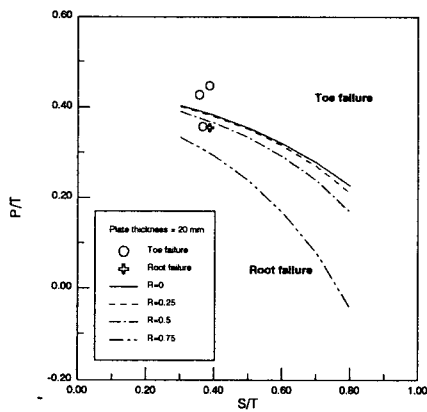


그림4 임계 개선형상  
(Experimental data from [4])

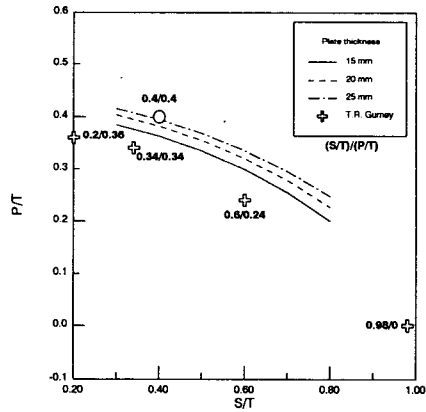


그림5 제안된 임계 개선형상