



## 잔류응력장을 전파하는 용접 토우부 균열의 전파해석

김유일\* · 전유철\* · 강중규\* · 한종만\* · 한민구\*\*

\* 대우중공업 선박해양기술연구소

\*\* 거제대학 기계과

### Analysis on the Fatigue Crack Propagation of Weld Toe Crack through Residual Stress Field

Yoo-II Kim\*, Yoo-Cheol Jeon\*, Joong-Gyou Kang\*, Jong-Man Han\* and Min-Koo Han\*\*

\* Daewoo Heavy Industries Ltd., Ship & Ocean R&D Institute, Keo-je 656-714, Korea

\*\* Dept. of Mechanical Engineering Koje College, Koje 656-701, Korea

#### Abstract

Fatigue crack propagation life of weld toe crack through residual stress field was estimated with Elber's crack closure concept. Propagation of weld toe crack is heavily influenced by residual stress caused by welding process, so it is essential to take into account the effect of residual stress on the propagation life of weld toe crack. Fatigue crack at transverse and longitudinal weld toe was studied respectively, which represent typical weld joint in ship structure. Numerical and experimental studies are performed for both cases.

Residual stress near weldment was estimated through nonlinear thermo-elasto-plastic finite element method, and residual stress intensity factor with Glinka's weight function method. Effective stress intensity factor was calculated with Newman-Forman-de Koning-Henriksen equation which is based on Dugdale strip yield model in estimating crack closure level  $U$  at different stress ratio. Calculated crack propagation life coincided well with experimental results.

(Received March 20, 2000)

Key Words : Fatigue crack propagation, Residual stress, Crack closure, Weight function, Stress intensity factor, T-joint, Hopper knuckle

#### 1. 서 론

반복하중을 받는 구조물의 피로수명은 크게 피로균열의 개시수명과 개시된 균열이 구조물의 안전성에 영향을 줄 수 있는 크기까지 성장하는데 걸리는 전파수명으로 나눌 수 있다. 일반적으로 피로균열의 개시수명은 미소균열(micro crack)의 개시와 미소균열의 성장에 소모되는 기간을 말하며, 균열의 전파수명은 긴균열(macro crack)의 성장에 소모되는 기간을 말한다<sup>1)</sup>. 피로수명을 지배하는 파라미터는 Fig.1에 보

인바와 같이 균열의 개시 및 성장 양상에 따라 다르며, 크게 응력집중계수(stress concentration factor)와 응력세기계수(stress intensity factor)로 대표된다.

본 연구에서는 응력세기계수(stress intensity factor)를 이용하여 선박에 적용되는 전형적인 용접 연결부인 T-이음 및 호퍼너클의 용접부 토우끝단에서 발생한 긴균열의 성장을 이론적으로 예측하는 것을 목표로 한다. 용접부에 발생하여 전파하는 표면 균열은 용접 시에 발생한 잔류응력의 영향을 많이 받으므로 이러한 잔류응력의 영향을 고려하여 균열 전파해석을

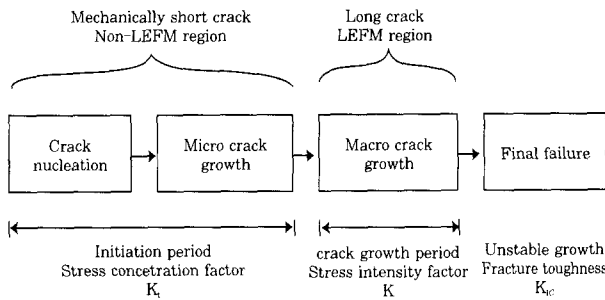


Fig.1 Classification of fatigue life and its relevant parameter<sup>1)</sup>

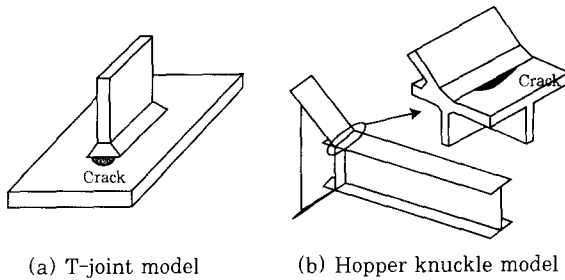


Fig. 2 Schematic view of analysis model

수행하였으며, 실험 데이터와 비교 검토하였다. Fig.2는 해석 및 실험 모델의 개략적인 형상을 나타낸다.

## 2. 용접부 균열전파

### 2.1 균열닫힘(Crack closure)

Elber에 의해 소성유기 균열닫힘의 개념(plasticity induced crack closure concept)이 최초로 제시되었으며, 이러한 균열닫힘 현상은 변동하중 하에서의 균열전파, 응력비의 영향, 과하중에 의한 균열지연 및 균열가속화 등에 대한 이론적인 예측을 가능하게 하였다<sup>2)</sup>. 균열닫힘 현상은 균열 선단의 소성변형으로 인해 재료가 인장하중을 받는 상태에서도 균열 면의 접촉이 발생하는 현상을 말한다. Fig.3은 균열닫힘 현상과 유효 응력세기계수의 개념에 대한 개략도를 나타낸다. 실제 작용하는 외부 하중이 0~S<sub>max</sub>인 경우, 균열의 전파에 영향을 미치는 유효 응력세기계수 범위는 ΔK<sub>eff</sub> 영역이며, 나머지 영역에서는 균열닫힘이 발생하여 균열의 전파에 기여하지 못한다.

Elber는 식(1)과 같이 유효 응력세기계수(effective stress intensity factor)를 정의하였다.

$$\Delta K_{eff} = \beta \Delta S_{eff} \sqrt{\pi a} = U(R) \Delta K \quad (1)$$

$$\Delta S_{eff} = S_{max} - S_{op}$$

여기서, β는 형상 수정계수(geometry correction factor)를, S<sub>op</sub>는 균열이 열리기 시작할 때의 응력을 나타낸다. 균열 열림비(Crack opening ratio)를 나타내는 U는 응력비 R의 함수로 표시되며, U(R)에 대한 실험식 및 이론식이 여러 연구 결과를 통해 제시되었다. U가 1인 경우에는 균열닫힘이 발생하지 않는 경우이고, 0이면 완전 닫힘만이 발생하는 경우가 된다.

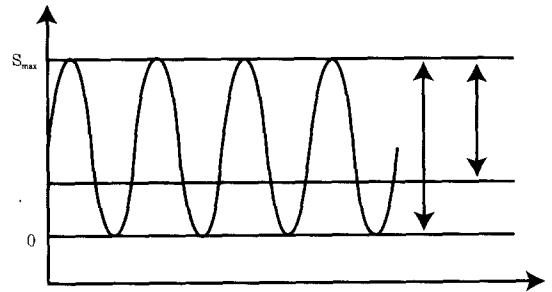


Fig. 3 Crack closure and effective stress intensity factor range

식(2)는 U(R)에 대한 여러 가지 추정식 중 Newman, Forman, de Koning, Henriksen에 의해 제시된 식을 나타낸다. Newman 등에 의해 제시된 U(R)은 균열 선단에서의 소성거동을 정확히 예측하기 위해 수정된 Dugdale의 스트립 항복 모델(strip yield model)을 이용하여 수치적으로 균열닫힘 량을 예측하고 이를 바탕으로 유효 응력세기계수를 계산한 것이다<sup>3)</sup>.

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

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1 R & -2 \leq R < 0 \\ A_0 - 2A_1 & R \leq -2 \end{cases} \quad (2)$$

여기서,

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) \left[ \cos\left(\frac{\pi S_{max}}{2\alpha_0}\right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) \frac{S_{max}}{\alpha_0}$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

Newman 등에 의하면 균열 열림비 U는 응력비 R 외에도 최대 응력값  $S_{max}$  및 소성구속도(constraint parameter)  $\alpha$ 의 함수로 나타내어진다.  $\alpha$ 는 재료의 3차원적인 응력상태를 고려하기 위해 도입된 계수로서 균열선단의 삼축 응력상태(triaxiality)에 따른 항복 기준의 변화를 반영하는 계수이다. 평면 변형 상태에서는 3, 평면 응력 상태에서는 1의 값을 가진다.  $S_{max}$ 는 최대 작용 응력, 0은 항복응력과 파단응력의 평균값으로 정의되어 있다.

용접부와 같이 잔류응력이 존재하는 경우에는 외부 하중에 의한 응력세기계수와 잔류응력의 존재로 인한 응력세기계수가 동시에 균열의 전파에 기여하므로 잔류 응력세기계수의 영향을 고려하여 해석을 수행하여야 한다. 잔류응력의 효과는 식(3)에 보인 바와 같이 외부하중에 의한 응력세기계수와 잔류 응력세기계수를 선형 중첩하여 적용하는 방법이 일반적으로 적용된다.

$$\begin{aligned} \Delta K' &= (\Delta K_{max} + \Delta K_{res}) - (\Delta K_{min} + \Delta K_{res}) \\ &= \Delta K_{max} - \Delta K_{min} = \Delta K \quad (3) \\ R' &= \frac{\Delta K_{min} + \Delta K_{res}}{\Delta K_{max} + \Delta K_{res}} \end{aligned}$$

2.2 용접 toe 균열의 응력세기계수의 계산

Fig.4는 용접부 끝단 toe부 균열의 형상을 나타낸다. 유한한 평판의 표면에 존재하는 반타원형 균열선단의 응력세기계수는 Newman과 Raju에 의해 그 해가 주어져 있으며, 용접부 toe균열에 대한 응력세기계수 값들도 최근 들어 방대한 양의 3차원 유한 요소해석을 통해 많은 연구가 이루어져 있는 상태이다.

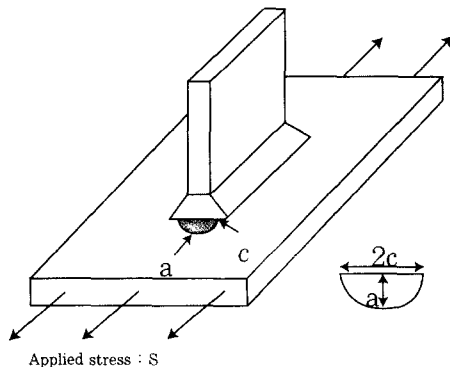


Fig. 4 Semi-elliptical surface crack at weld toe of T-joint

유한한 평판에 존재하는 반타원형 표면 균열에 인장 및 굽힘하중이 작용하는 경우의 응력세기계수는 식(4)에 의해 얻어진다<sup>4)</sup>.

$$K_c = (\sigma_m F_m + \sigma_b F_b) \sqrt{\pi c} \quad \text{at surface point} \quad (4)$$

$$K_a = (\sigma_m F_m + \sigma_b F_b) \sqrt{\pi a} \quad \text{at deepest point}$$

$\sigma_m$ 과  $\sigma_b$ 는 각각 막응력과 굽힘응력을 나타내며,  $F_m$ 과  $F_b$ 는 막응력과 굽힘응력에 대한 경계보정계수(boundary correction factor)를 나타낸다.

용접부 toe끝단에 존재하는 균열 선단의 응력세기계수는 식(5)에 보인 바와 같이 평판의 응력세기계수 값에  $M_k$ 를 곱하여 구한다<sup>5)</sup>.

$$K_{weld} = M_k K_{plate} \quad (5)$$

Fig.2의 (a)에 보인 용접부 끝단의 균열에 대한 응력세기계수 값은 식(6)에 따라 계산하였다. 균열 선단의 응력세기계수  $K_{ga}$ 와  $K_{gc}$ 는 다음과 같다<sup>6)</sup>.

$$\begin{aligned} K_{ga} &= M_{ka} M_{kc} K_a \\ K_{gc} &= M_{kc} M_{ka} K_c \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{kc} &= M_{ka} = K_s & c \leq a \\ &= \frac{2}{\pi} (K_s - 1) \sin^{-1} \left( \frac{a}{c} \right) + 1 & c > a \end{aligned}$$

여기서,  $K_s$ 는 1.15이며,  $M_{ka}$ 와  $M_{kc}$ 는 용접부 측면 균열에 대한 수정계수를 나타내는 것으로 Bowness<sup>5)</sup> 등의 결과를 이용하였다.

이상의 과정에 따라 구해진 응력세기계수는 외부하중에 의해 T-이음의 균열선단에 생성되는 응력세기계수 산정에 적용하였으며, 잔류 응력세기계수 및 호퍼너클의 응력세기계수는 가중함수법을 이용하였다.

가중함수법은 균열이 없는 구조의 응력분포를 통하여 균열이 존재하는 경우의 균열선단에서의 응력세기계수를 구하는 방법이다. 균열이 없는 구조의 응력분포는 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 가중함수는 균열의 크기와 형상에 따라 결정되는 함수로 식(7)에 보인 것은 반타원형 표면균열의 가중함수이다<sup>7)</sup>. 잔류 응력하에서의 응력세기계수의 계산이나, 유한요소법에 의한 해가 없는 경우에는 가중함수법을 이용하여 응력세기계수를 구하였다. 반타원형 표면 균열에 대한

가중함수는 응력의 변화가 균열의 깊이방향으로만 존재하는 경우에 적용이 가능하므로, 균열 길이방향의 응력변화가 심한 T-이음의 경우에는 Lu<sup>(8)</sup>의 방법에 따라 균열 길이방향의 응력변화를 고려한 표면점에서의 잔류 응력세기계수를 구하였다.

$$K(a) = \int_0^a \sigma(x)m(a, x)dx$$

$$m(a, x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left[ 1 + M_{1A} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{1/2} + M_{2A} \left(1 - \frac{x}{a}\right) + M_{3A} \left(1 - \frac{x}{a}\right)^{3/2} \right] \quad (7)$$

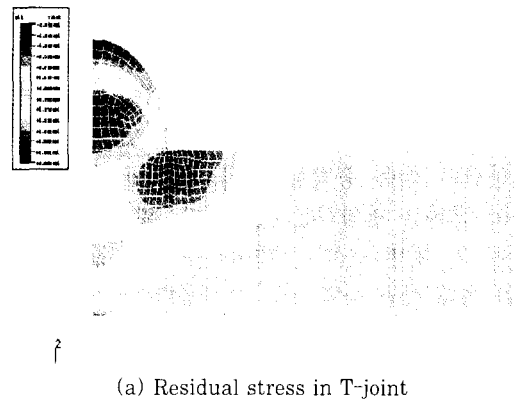
$$M = M\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}\right)$$

$\sigma$  : 잔류응력

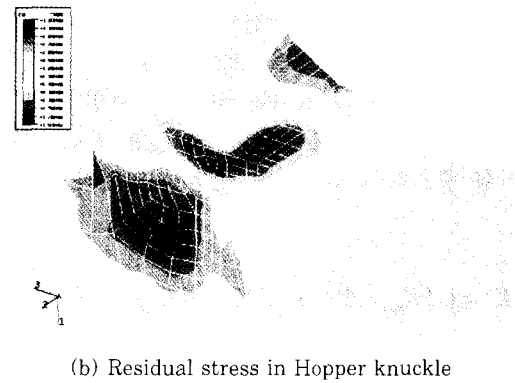
### 3. 용접부 잔류응력

용접부 toe 균열의 전파는 용접부에 존재하는 잔류 응력의 영향을 크게 받는다. 따라서, 용접부에 존재하는 잔류응력의 크기에 대한 예측과 잔류응력에 의한 균열선단의 응력세기계수에 대한 계산이 필요하다. 용접 토우부 근방에 분포하는 잔류응력의 값은 비선형 열탄소성 해석을 통하여 계산하였다. 열전달 현상과 열응력 현상의 연관성이 없다는 가정 하에서 순차적으로 해석을 수행하였다. Fig.5는 T-이음 및 호퍼너클 모델의 잔류응력 해석결과를 나타낸다. T-이음의 경우는 등가의 축대칭 모델에 대해 2차원 해석을 수행하였으며, 호퍼너클의 경우는 3차원 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 두 경우 모두 용접 토우부에 높은 인장 잔류응력이 존재함을 알 수 있다. 잔류응력의 최대치는 T-이음의 경우가 300 MPa근방의 값으로 호퍼너클 모델에 비해 상대적으로 높음을 알 수 있는데, 이는 돌림 용접부가 용접 수축에 대한 구속이 더 강하기 때문이다.

Fig.6은 T-이음에 대해 계산된 잔류응력의 분포와 잔류응력에 의한 응력세기계수값의 분포를 나타낸다. 균열 길이 방향으로 인장-압축응력이 분포하고, 깊이방향으로는 전체적으로 인장응력이 분포함을 알 수 있다. 잔류 응력세기계수의 최대치는 표면점(point c)에서는 15MPam<sup>1/2</sup>정도의 값을 보였으며, 최심점(point a)에서는 25MPam<sup>1/2</sup>정도의 값을 보였다. 실제로는 반복하중을 겪는 용접부의 잔류응력은 여러요인으로 인해 그 분포가 변해나가지만, 본 연구에서는 용접부의 잔류응력에 의한 응력비 변화가 균열단합 및 피로수명에 미치는 효과에 주목하여, 초기 잔류응력의 분포가 균열이 전파하는 동안 일정하다는 가정을 하였다.



(a) Residual stress in T-joint



(b) Residual stress in Hopper knuckle

Fig. 5 Residual stress distribution

### 4. 피로실험

피로균열의 개시수명 및 전파수명을 구하기 위하여 Photo.1과 2에 보인 바와 같이 피로실험을 수행하여 해석결과와 비교 검토하였다. T-이음과 호퍼너클의 피로실험은 각각 630kN급 피로시험기와 구조물용 피로시험기를 이용하였으며, 하중제어 방식으로 응력비 0인 조건에서 수행하였다. 피로하중의 주파수는 T-이음의 경우 10-15Hz 이었고, 호퍼너클의 경우 구조물의 강성의 부족으로 인해 5-7Hz로 하였다. T-이음의 경우 Photo.1 (a)에 보인 바와 같이 인장하중을 가하였으며, 호퍼너클의 경우 Photo.2 (a)와 같이 굽힘하중을 가하였다.

Photo.1(a)와 Photo.2(a)는 각각 T-이음과 호퍼너클의 피로실험 전경을 나타낸다. T-이음의 경우 이동식 광학현미경을 설치하여 일정 주기마다 균열의 길이를 관찰하였으며, 호퍼너클의 경우는 확대경을 이용하였다. Photo.1과 2의 (b)는 용접부 토우부근방에 변형을 게이지(strain gage)를 부착한 사진을 나타낸다. 용접 토우부에서 7.5mm와 22.5mm떨어진 지점에 게이지를 부착하였는데, 이는 추후에 연구될 통합된 선도에 쓰일 핫 스폿 응력을 구하기 위해서이다.

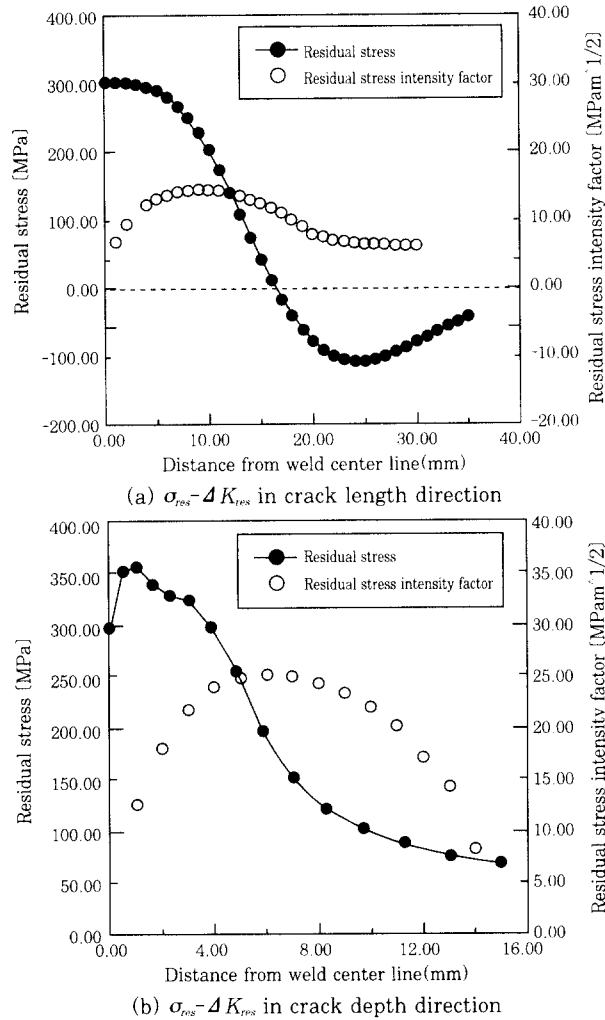


Fig. 6 Residual stress and residual stress intensity factor (T-joint)



(a) Test setup (b) Strain gage position  
Photo 1 Fatigue test of T-joint

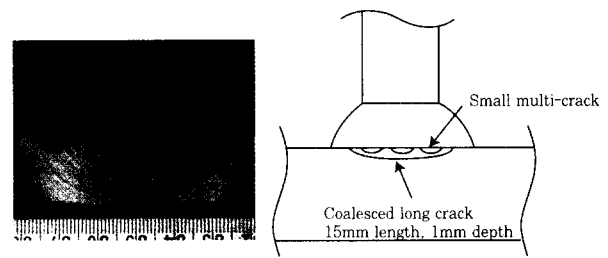


(a) Test setup (b) Strain gage position  
Photo 2 Fatigue test of Hopper knuckle

## 5. 해석결과

### 5.1 T-이음

선형탄성 파괴역학의 이론으로 균열의 전파를 예측하기 위해서는 초기균열의 크기에 대한 결정이 선행되어야 한다. Fig.1에 보인 바와 같이 크기가 매우 작은 미소균열은 그 전파거동이 선형탄성 파괴역학의 법칙을 따르지 않으므로, 상대적으로 크기가 큰 균열을 초기균열의 크기로 결정하여야 한다<sup>9)</sup>. 또한, 용접부의 경우 균열의 개시 단계에서는 다중균열(multi-crack)이 생성되어 전파하므로 미소균열의 크기를 정량화하는데는 어려움이 있다. 본 연구에서는 초기균열의 크기를 일반적인 개시수명의 정의 기준인 균열길이 1mm로 결정하였다. 균열 길이 1mm에 해당되는 균열의 길이는 실험결과를 바탕으로 추정하였다. Fig.7은 T-joint시편의 파단면을 나타내는 그림이다. 초기에 용접 토우부로부터 다중균열이 생성되어 전파하다 하나의 균열로 합체되어 전파하는 과정을 보여준다. 파단면 관찰 결과 정의된 균열길이 1mm에 해당하는 균열의 길이는 전 하중범위에 걸쳐 15mm 정도인 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 해석에 사용한 초기 균열은 길이 1mm, 길이 15mm로 하였다.



(a) Fractured surface (b) Schematic view of crack including beach propagation mark

Fig. 7 Propagation of toe crack in T-joint

Fig.8은 T-이음 시편에 대한 개략도와 상세치수를 나타낸다. 해석과 실험에 사용된 재료는 선급 강재 규격 AH32이었으며, Paris계수  $C=5.74E-12$ ,  $n=3$ ( $\Delta K$ 기준)을 사용하였다. 재료의 항복응력은 330MPa이며, 탄성계수는 206GPa이다.

Fig.9는 균열의 길이와 깊이에 따른 응력비의 변화와 균열 열림비  $U$ 의 변화를 나타낸다. 초기에 균열의 크기가 작은 경우에는 높은 인장 잔류응력으로 인해 응력비가 최대값을 보이다가 균열이 성장하면서 점점 작아지는 것을 확인할 수 있다. 응력비가 어느 정도 이

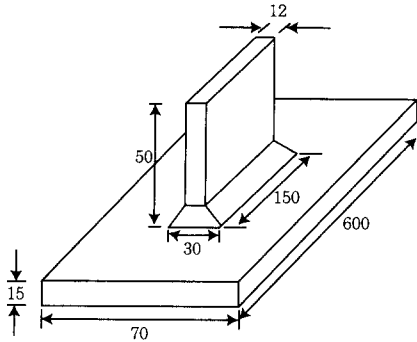


Fig. 8 Detail dimension of T-joint specimen(mm)

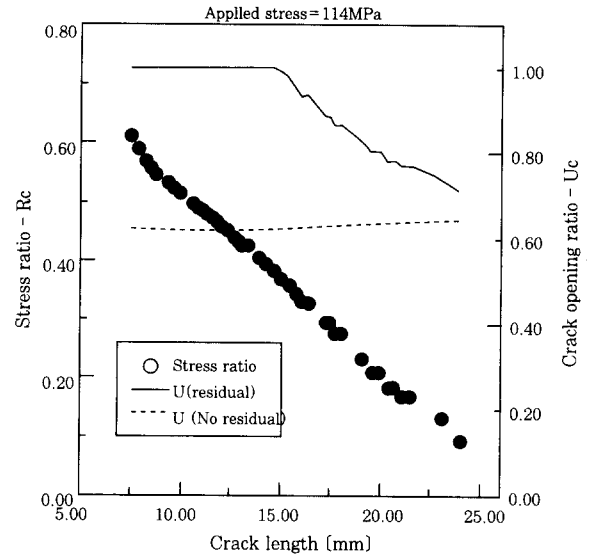
하로 떨어지기 이전까지 U가 1의 값을 가져 균열단합 현상이 일어나지 않음을 알 수 있다. 이에 반해 인장 잔류응력이 없는 경우에는 전 영역에 걸쳐 U의 값이 0.6~0.7사이의 값을 가져 어느 정도의 균열 단합 현상이 발생함을 알 수 있다. 소성구속도의 값은 2.5를 사용하였는데, 인장 잔류응력이 높은 경우 2.5~3 사이에서 피로수명에 미치는 영향이 크지 않았다.

Fig.10은 작용 공칭응력 100, 114MPa인 경우의 균열 전파 해석 결과와 실험 데이터를 나타낸 것이며, Fig.11은 균열의 길이와 깊이의 비의 변화 양상을 나타낸 그림이다. 균열 전파 데이터는 피로실험을 수행하는 동안에 광학 현미경을 이용하여 표면 균열의 길이를 측정된 결과이며, 균열의 형상비(a/c)는 비치마크법을 이용하여 균열의 깊이와 길이를 계측한 결과이다. 해석을 통한 균열 길이의 예측이 실제 실험의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 형상비의 경우에도 비교적 정확한 예측이 가능함을 알 수 있다.

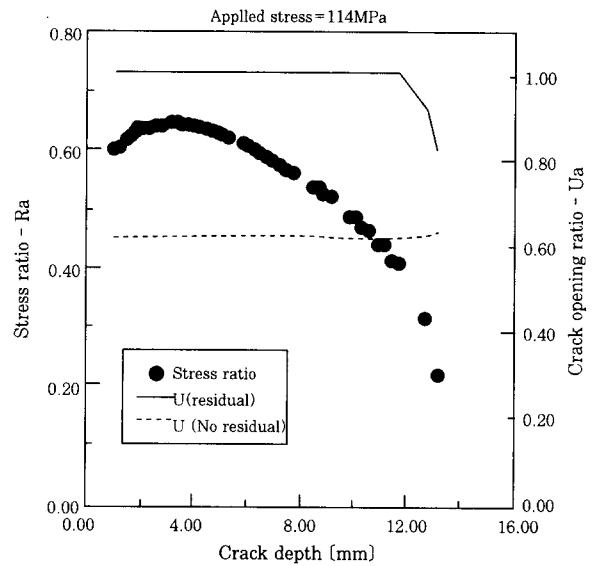
Fig.12는 잔류응력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 전파수명의 차이를 나타낸다. 잔류응력이 피로 균열의 전파에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있었으며, 특히 낮은 응력범위에서의 영향이 더욱 크게 나타났다. 또한, 해석을 통해 예측된 전파수명과 실험을 통해 얻어진 전파수명이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 5.2 호퍼너클

호퍼너클의 용접 토우부에서 발생 전파하는 균열은 T-이음의 경우에 비해 균열이 상대적으로 매우 얇은 형태를 나타내었다. 초기균열의 깊이는 T-이음과 같이 1mm로 가정하였으며, 깊이 1mm에 해당되는 균열의 길이는 하중범위에 따라 50~90mm로 다양하게 나타났다. Fig.13은 호퍼너클모델의 상세치수와 균열의 전파양상을 나타낸 그림이다.



(a) Change of R & U in crack length direction



(b) Change of R & U in crack depth direction

Fig. 9 Change of R & U

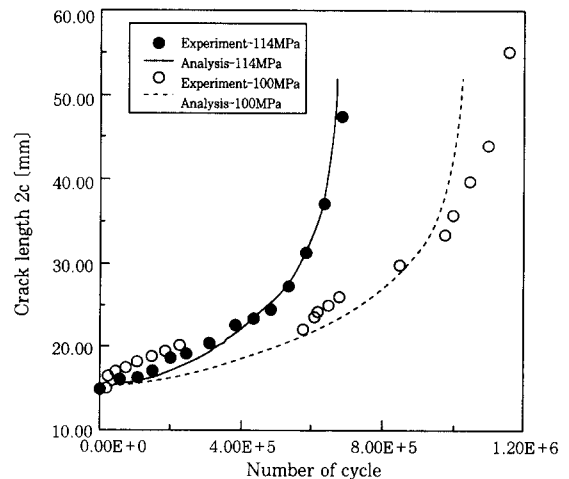


Fig. 10 Change of crack length

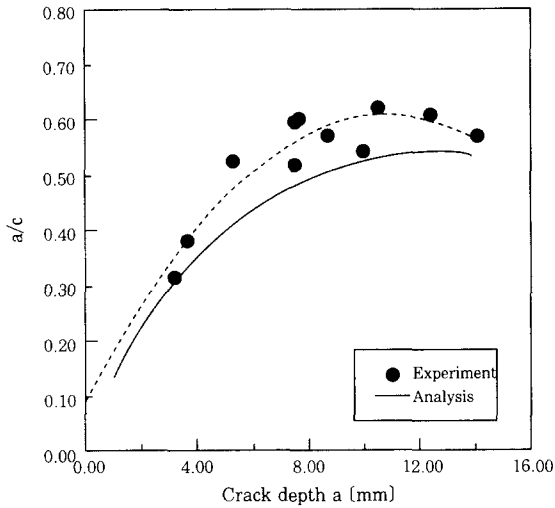


Fig. 11 Change of aspect ratio

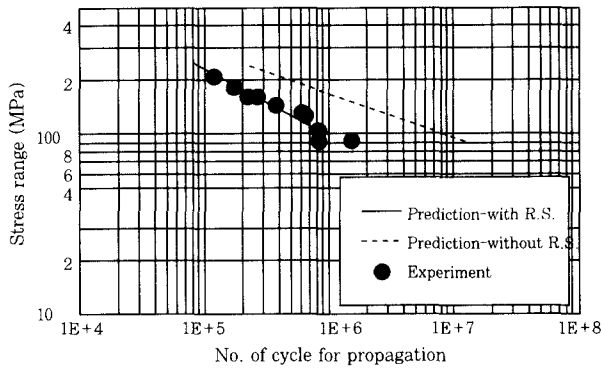


Fig. 12 Effect of residual stress on propagation life

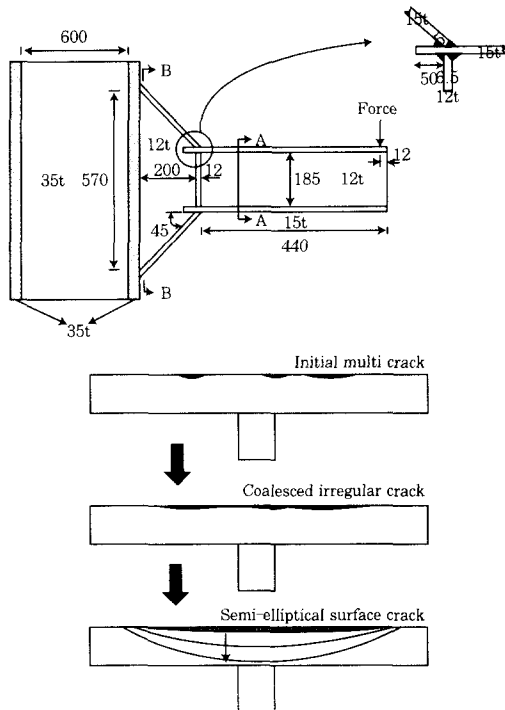


Fig. 13 Detail dimension of hopper knuckle and schematic view of crack propagation

Fig.14는 가중함수법을 이용하여 응력세기계수를 구하기 위해 수행한 응력해석의 유한요소 모델과 해석 결과를 나타낸다. 용접부 근방의 상세한 응력분포를 얻기 위해 서브모델링기법을 이용하여 모델링하였으며, 서브모델은 용접비드의 형상을 고려하기 위해 솔리드요소를 이용하여 모델링하였다.

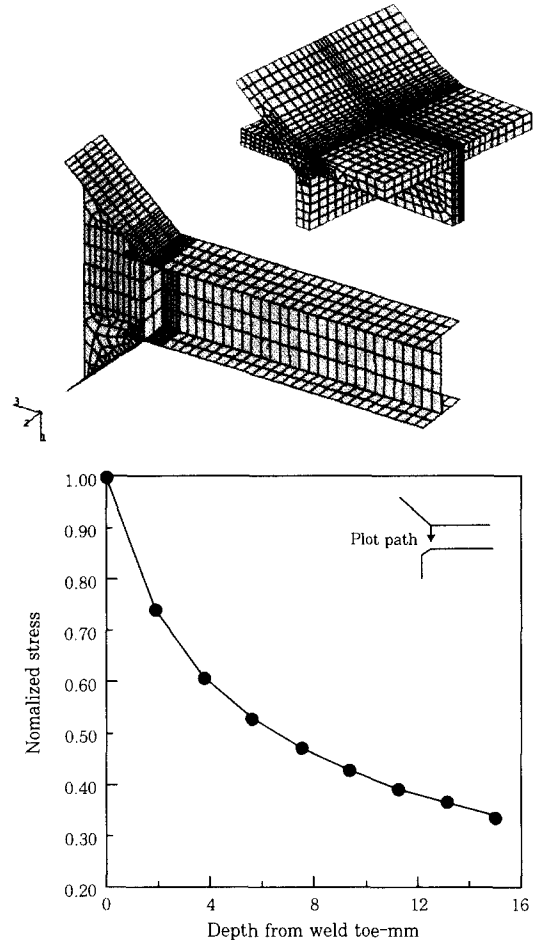


Fig. 14 FE model and stress distribution

Fig.15는 해석을 통해 예측된 균열 전파수명과 실험을 통해 얻어진 전파 및 파단수명을 나타낸 그림이다. 개시에 소요된 수명은 실험 결과를 바탕으로 한 값이며, 전파수명은 해석을 통해 예측한 값이다. 예측된 수명이 실험 값에 비해 약간 낮은 피로수명을 보임을 알 수 있는데, 이는 균열 전파해석시에 균열 깊이 방향으로의 응력변화만 고려하여 응력세기계수를 구하여 실제보다 높은 수준의 응력세기계수값이 구해졌기 때문이라 판단된다.

## 6. 결 론

이상의 피로실험 및 균열전파 해석 결과 선형탄성 과

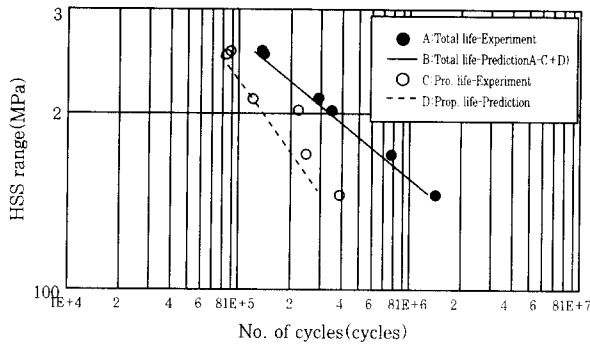


Fig. 15 Propagation and fracture life of hopper knuckle

피역학을 적용하여 용접부에 발생하여 잔류응력장을 전파하는 균열의 전파수명에 대한 이론적 예측이 가능함을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 잔류응력을 고려한 균열전파 해석 시에는 균열단합 개념을 이용한 균열전파식의 적용이 합리적이며, Newman 등에 의해 제시된 균열전파식으로 용접부 균열전파를 매우 정확히 예측할 수 있었다.
- 2) 용접부의 높은 인장 잔류응력으로 인하여 균열의 성장초기에는 균열단합 현상이 거의 발생하지 않았으며, 어느 정도 균열이 성장한 후 균열단합이 발생하였다.
- 3) 잔류응력이 균열의 전파수명에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났으며, T-이음의 경우 인장 잔류응력이 존재하는 경우의 피로수명은 인장 잔류응력이 존재하지 않는 경우의 20~40% 정도의 피로 수명을 보였다.

### 후 기

본 연구는 1999년도 대우중공업(주)과 거제대학의

공동연구에 의하여 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. J.Schijve, Predictions on fatigue life and crack growth as an engineering problem. A state of the art survey, FATIGUE, (1996) pp.1149-1164
2. W.Elber, Fatigue crack closure under cyclic tension, Engineering Fracture Mechanics, Vol.2(1970), pp.37-45
3. J.C.Newman, A crack opening stress equation for fatigue crack growth, International Journal of Fracture, Vol.24(1984), pp.131-135
4. J.C.Newman, I.S.Raju, Analysis of surface cracks in finite plate under tension or bending loads, NASA Technical Paper 1578,(1979)
5. D.Bowness, M.M.K.Lee, Stress intensity factor solutions for semi-elliptical weld toe cracks in T-butt geometries, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.19, No.6(1996), pp.787-797
6. 第219研究部會, き裂播析手法の實用化に關する研究(1), 日本造船研究協會, 平成 8年
7. X.Wang, S.B.Lambert, Weight functions and stress intensity factors for semi-elliptical cracks in T-plate welded joints, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.21(1998), pp.99-117
8. Y.L.Lu, A practical procedure for evaluating SIFs along fronts of semi-elliptical surface cracks at weld toes in complex stress fields, Int. J. Fatigue, Vol.18, No.2(1995), pp.127-135
9. Y. Verreman, J.P. Bailon, J. Masounave, Fatigue Life Prediction of Welded Joints A Re-assessment, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.10, No.1(1989), pp.17-36