

## 응력확대계수를 이용한 하중 전달형 필릿 용접부의 피로강도 평가에 관한 연구

김 명 현\* · 강 성 원\* · 김 형 래\*

\*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

### A Study on the Fatigue Life Assessment for Load-carrying Fillet Welded Joints using Stress Intensity Factor

Myung-Hyun Kim\*, Sung-Won Kang\* and Hyoung-Rae Kim\*

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

\*Corresponding author : swkang@pusan.ac.kr

(Received November 28, 2008 ; Revised December 8, 2008 ; Accepted December 10, 2008)

#### Abstract

It is well known that there exist two typical fatigue crack initiation locations in ship structures: one is the weld toe and the other is the weld root where partial penetration weld is performed. In particular, it is important for fillet weldments to avoid weld root cracking in order to prevent catastrophic failure particularly in ship structures. Therefore detail considerations are required for cruciform joints with partial penetration when there is a possibility of weld root crack initiation. For these reasons, fatigue tests on welded joints were performed in this study. Concept of stress intensity factor(SIF) by means of fracture mechanics is applied for predicting fatigue life of fillet welded joints.

Key Words : Fatigue, Fillet joints, Weld toe, Weld root, Stress intensity factor

#### 1. 서 론

일반적으로 선박 구조물은 운항중에 파도와 바람에 의해 발생하는 반복적인 피로하중에 노출되어 있다. 전형적으로 용접 이음부와 같은 구조적 불연속부는 이러한 피로하중에 취약한 부분으로 알려져 있다. 특히, 선박 구조물에서는 다양한 형태의 종횡부재들이 용접으로 서로 연결되어 있다. 작업 공정상의 이유로 필릿 용접이 많이 사용되고 있는데 하중 전달형 필릿 용접이음부의 경우 반복 하중을 받을 시 용접 토우부 뿐만 아니라 용입 부족부 선단에서도 응력집중이 발생하여 피로균열이 발생·전파하는 경우가 있다. 이곳에서 발생한 균열은 육안관찰이 불가능하고 초음파 탐상 등에 의한 비파괴 검사에 의해서도 검출이 곤란한 경우가 많으며, 심각한 손상을 일으킬 때 까지 방치될 위험성이 있다<sup>1)</sup>.

그러나 최근 조선소 생산현장에서는 선박 구조물의 대형화, 복잡화 추세에 따라 생산성 향상을 위한 목적으로 불완전 용입부를 포함한 용접기법의 사용이 증가하고 있다. 이러한 이유로 불완전 용입부를 포함한 용접부에 적합한 피로강도평가기법의 개발 필요성이 증가하고 있다.

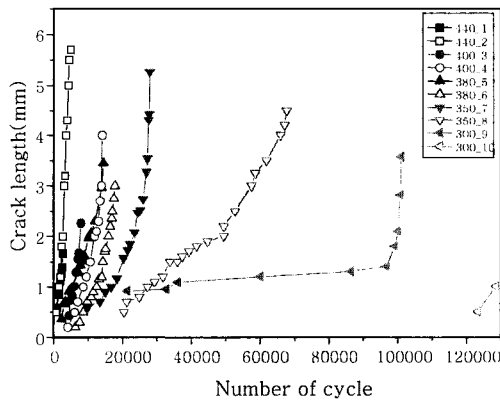
파괴역학적 접근 방법에 따라 균열재 및 초기균열을 가지는 금속구조물의 파괴특성은 일반적으로 응력확대계수(Stress Intensity Factor)에 의해서 규정할 수 있다. 이러한 응력확대계수는 작용응력의 크기와 방향, 균열의 길이 및 방향 등의 조건에 따라서 달라진다. 평면응력상태에서 금속구조물에 작용하는 응력의 형태에 따라 응력확대계수는 일반적으로 인장형태인 모드 I과 면내 전단형태인 모드 II 두 가지 모드의 조합인 혼합모드로 나타난다. 이러한 혼합모드 상태에서 응력확대계수는 구조물의 형상과 균열의 발생 및 진전방향 등에



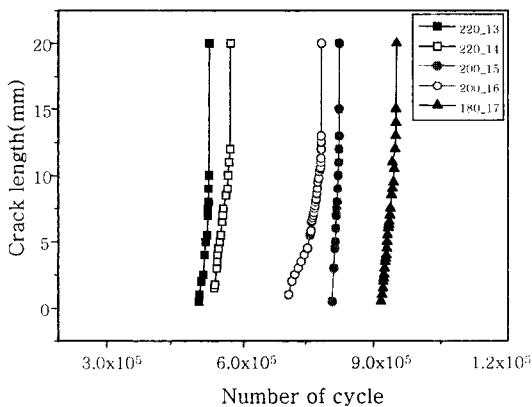
( $S_N$ )을 기준으로 고응력에 해당하는 380~440MPa 범위에서는 루트파괴, 중간영역인 280~350MPa 에서는 혼합파괴, 저하중 영역에 해당하는 220MPa 이하의 영역에서는 토우파괴양상을 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 루트파괴 및 토우파괴가 발생한 시험편에서 루트부의 피로균열 진전상태와 토우부의 피로균열 진전 상태를 각각 나타낸 것이다. 루트부의 경우에는 불완전 용입부에서 진전한 균열이 비교적 동시에 양쪽 측면으로 진전하여 일정 피로하중 반복수가 지나면 한쪽으로 진전한 후 파단하는 경향을 보였다. 토우부 파괴의 경우에는 시험편의 폭방향으로 진전이 완료된 후, 판두께 방향으로 피로균열이 전파하였다. 따라서 두께방향 진전상태를 기준으로 하는 균열전파 데이터를 기준으로 하였다.

본 연구에서는 파단수명을 기준으로 피로시험 데이터와 유한요소해석을 통해 얻어진 예상 피로수명의 비교를 위해 파단수명을 기준으로 피로시험을 수행하였다. Fig. 4는 본 시험에 사용된 하중 전달형 십자형 필릿 시험편의 주판에 대한 공칭응력과 파단수명  $N_f$ 에 대한 피로시험 결과를 나타내고 있다.



(a) Root crack propagation data



(b) Toe crack propagation data

Fig. 3 Fatigue test data(crack propagation data)

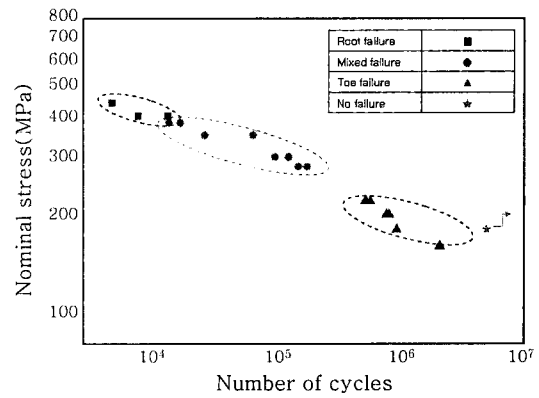


Fig. 4 Fatigue test result ( $N_f$  data)

### 3. 응력확대계수 계산

#### 3.1 혼합모드상태에서의 응력확대계수 계산

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ &\quad - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} (-\sin \frac{\theta}{2} (2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2})) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} (\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} (\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}) \\ &\quad + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}) \end{aligned} \quad (1)$$

균열을 포함하는 탄성재료에 응력이 작용하면 균열이 위치한 방향에 따라 균열선단부근 영역의 응력과 변위는 변화하며, 이는 응력확대계수와 관련하여 표현이 가능하다. 혼합모드 형태의 균열에 대한 응력확대계수는 일반적으로 응력법, 변위법, J 적분법을 사용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 이들 방법 중에서 응력법을 사용하여 하중전달형 십자형 필릿 시험편에 대한 응력확대계수를 구하고자 하였다.

일반적으로 균열선단부의 응력분포를 나타내는 식 (1)의 고차항을 제외하고 단순화 과정을 거쳐서 작용하중의 방향에 수직으로 전파하는 균열( $\theta = 0$ )에 대한 균열선단부의 수직 및 전단응력성분은 식 (2) 및 (3)와 같이 나타낼 수 있다. 응력확대계수의 일반적인 형태는 식 (4)과 같이 표현 가능하다<sup>3)</sup>.

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \tag{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \tag{3}$$

$$K = \sigma_o \sqrt{\pi a} \cdot F(a/W) \tag{4}$$

여기서,  $K_I$ ,  $K_{II}$ 는 모드 I과 II에 대한 응력확대계수,  $F(a/W)$ 는 형상계수,  $r$ 은 균열선단에서 절점까지의 거리,  $a$ 는 균열길이,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 와  $\tau_{xy}$ 는 균열선단 부근의 응력성분,  $\sigma_o$ 는 시험편에 작용하는 공칭응력이다. 해당 모델의 유한요소해석을 통해서 얻어진 값들을 활용하여 식 (2)-(3)에 대입하면 모델의 응력확대계수를 구할 수 있으며, 응력확대계수를 대변하는 무차원 응력확대계수는 식 (2)-(3)의 결과값을 식 (4)에 대입하여 구하면 얻을 수 있다<sup>4-5)</sup>.

일반적으로 유한요소해석을 통해서 얻어진 응력이나 변위의 정밀도는 분할된 요소의 크기가 조밀할수록 높은 정도를 보이는 것으로 알려져 있다. 그러나 요소의 크기가 과도하게 조밀할 경우, 요소의 형태가 일그러져 유한요소법의 원리에 위배된다. 따라서 정확도 높은 응력확대계수를 얻기 위해서는 적절한 요소의 크기를 찾는 작업이 사전에 필수적으로 요구된다<sup>6)</sup>.

### 3.2 유한요소해석 및 결과

불완전 용입부를 포함하는 구조물의 용접부 응력확대계수를 계산하기 위해서 모델의 요소는 통상적으로 삼각형 또는 사각형 요소로 분할이 가능하다. 유한요소법을 활용하여 정확도 높은 응력확대계수를 구하기 위해 Isida는 균열을 포함한 구조물의 전체영역을 일정한 크기의 요소로 조밀화해 나가는 방법을 반복하여 정확도 높은 응력확대계수를 구하고자 하였다. Nisitani는 균열선단 부근의 요소만을 미세분할하는 방법을 반복하여 정확도 높은 응력확대계수를 구하고자 하였다<sup>2)</sup>.

본 연구에서는 하중전달형 십자형 필릿 시험편의 모델에 대해 요소의 크기에 따른 응력확대계수의 차이를 알아보기 위해서 응력법을 적용하여 균열선단 부근의 사각형요소크기를 조절해가면서 균열비 증가에 따른 루트균열과 토우균열 진전에 대한 계산을 수행하였다. 분할된 요소의 크기는 0.25mm, 0.50mm, 1.00mm 세 가지 경우로 나누어 각각의 균열비 증가에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 루트부와 토우부 균열의 진전에 따라 수행된 유한요소해석의 대표적인 예는 Fig. 5와 같다<sup>4-5)</sup>.

유한요소해석으로 계산된 요소의 크기에 따른 루트부

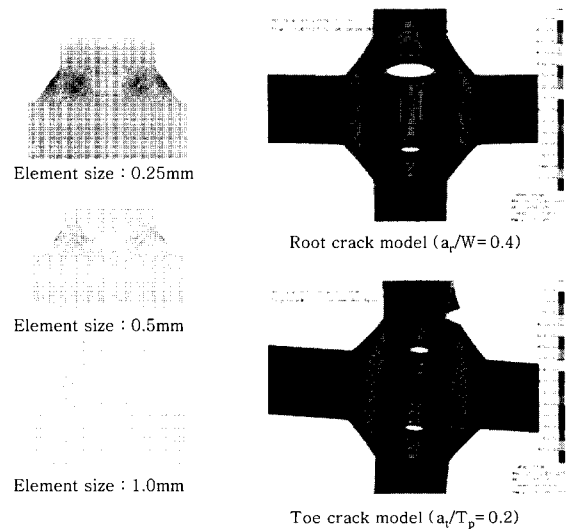


Fig. 5 Representative analyzed model for root / toe crack propagation

와 토우부 균열진전에 대한 응력확대계수의 각 성분별 차이는 Table 2에 나타내었다.

여기서,  $a_r$ 은 루트부 균열길이,  $W$ 는 주판과 좌/우측 다리길이의 합,  $a_t$ 는 토우부 균열길이,  $T_p$ 는 주판의 두께이다. 유한요소해석을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 루트와 토우균열 진전에 따른 형상계수를 구한 결과 모드 I의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 또한 요소 크기에 따른 응력확대계수의 형상계수 값의 차이는

Table 2 Comparison for SIF form Factor

$a_r/W$	$F_{I,0.25}$	$F_{I,0.5}$	$F_{I,1.0}$	$F_{II,0.25}$	$F_{II,0.5}$	$F_{II,1.0}$
0.2	.	0.475	.	.	0.207	.
0.3	0.494	0.506	0.478	0.171	0.197	0.210
0.4	.	0.534	.	.	0.204	.
0.5	0.573	0.576	0.555	0.200	0.222	0.244
0.6	.	0.632	.	.	0.250	.
0.7	0.725	0.712	0.680	0.268	0.290	0.319

(a) Root crack propagation

$a_t/T_p$	$F_{I,0.25}$	$F_{I,0.5}$	$F_{I,1.0}$	$F_{II,0.25}$	$F_{II,0.5}$	$F_{II,1.0}$
0.1	1.224	1.231	1.259	0.343	0.381	0.427
0.2	.	1.215	.	.	0.374	.
0.3	1.325	1.305	1.271	0.395	0.407	0.418
0.4	.	1.439	.	.	0.438	.
0.5	1.687	1.647	1.575	0.489	0.491	0.500
0.6	.	1.959	.	.	0.593	.

(b) Toe crack propagation

10% 미만으로 수렴함을 Table 2에 나타는 결과값을 통해 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 세가지 타입의 요소크기 중에 해석의 효율성을 높이기 위해 중간값인 0.5mm의 요소크기로 전체 균열비에 대한 유한요소해석을 실시하였고, 그 결과 얻어진 루트부와 토우부 균열진전에 대한 응력확대계수 추정식은 식 (5)-(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \sigma_o \sqrt{\pi a_r} \lambda_R$$

$$\lambda_R = 0.468 (a_r/W)^4 + 0.162 (a_r/W)^3 + 0.413 (a_r/W)^2 - 0.063 (a_r/W) + 0.677$$
(5)

$$K = \sigma_o \sqrt{\pi a_t} \lambda_T$$

$$\lambda_T = 14.01 (a_t/T_p)^4 - 18.65 (a_t/T_p)^3 + 13.18 (a_t/T_p)^2 - 2.96 (a_t/T_p) + 1.79$$
(6)

여기서 루트부 균열진전의 경우에는 토우부 균열의 값은 0mm로 가정하였고, 토우부 균열진전의 경우에는 루트부의 초기균열 길이를 본 시험편의 불완전 용입부 길이인 6mm로 하여 순수 루트균열전파와 순수 토우균열전파에 대한 경우로 한정하였다.  $\lambda$ 는 형상계수인 무차원 응력확대계수이다.

#### 4. 예상피로수명 추정

피로시험결과 얻어진 루트부와 토우부 균열진전데이터와 유한요소해석을 통해 얻어진 루트부와 토우부의 응력확대계수식을 Paris 법칙에 적용하여 계산된 루트부와 토우부 균열전파특성을 나타내는 재료물성치인 C와 m은 Table 3과 같다.

본 연구에 사용된 시험편과 같이 불완전 용입부를 가지는 시험편의 경우, 피로수명 추정에는 균열전파수명만이 고려되는 점을 감안하면 루트균열전파에 대한 피로수명 추정은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$N_f^R = N_p^R = \int dN = \frac{1}{C} \int \frac{1}{(\Delta K_R)^m} da$$

$$= \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_f} (\Delta K_R)^{-m} da$$
(7)

**Table 3** Comparison for SIF form Factor

Root failure	Toe failure
C: $1.2 \times 10^{-12}/m$ ; 2.8322	C: $4.2 \times 10^{-11}/m$ ; 2.3591

여기서,  $N_f$ 는 파단수명,  $N_p$ 는 균열전파수명,  $a_i$ 는 초기 불용입부의 길이,  $a_f$ 는 파단시의 길이,  $\Delta K_R$ 은 유한요소해석 결과를 바탕으로 계산된 응력확대계수이다.

토우부 피로수명 추정은 초기균열 발생수명과 균열전파수명의 합으로 구할 수 있으며 식 (8)와 같이 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$N_f^T = N_c^T + N_p^T$$
(8)

$$N_p^T = \int dN$$

$$= \frac{1}{C} \int \frac{1}{(\Delta K_T)^m} da = \frac{1}{C} \int_{a_i}^{a_f} (\Delta K_T)^{-m} da$$
(9)

$$D = K_t (\Delta S \cdot \Delta e \cdot E)^{1/2} = (\Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon \cdot E)^{1/2}$$

$$= \{ (AEN_c^{a'}) \cdot (AN_c^{a'} + BN_c^{b'}) \cdot E \}^{1/2}$$

$$= (A^2 E^2 N_c^{2a'} + ABE^2 N_c^{a'+b'})^{1/2}$$
(10)

여기서,  $N_c$ 는 초기균열 발생수명,  $K_t$ 는 응력집중계수,  $\Delta S$ 는 nominal stress range,  $\Delta \sigma$ 는 true stress range,  $\Delta \epsilon$ 과  $\Delta e$ 는 true strain range와 nominal stress range이다. 토우부 균열전파 수명은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있고, 토우부의 초기균열 발생수명  $N_c$ 는 Manson이 제안한 응력-변형을 함수인 D로 식 (10)과 같이 표현할 수 있다<sup>8-10)</sup>. Neuber의 근사식과 본 연구에 사용된 재료와 특성이 유사한 SM50B 강재의 물성치로서  $A=0.0106$ ,  $B=0.64$ ,  $a'=-0.124$ ,  $b'=-0.616$ 를 채택하여 식 (10)의 상수로 활용하여 토우부 초기균열 발생수명을 계산하였다<sup>8-10)</sup>.

따라서 본 연구에 사용된 하중전달형 십자형 필릿 시험편의 유한요소해석을 통해 얻어진 응력확대계수와 피로시험에서 얻어진 균열진전 데이터를 바탕으로 얻어진 예상 피로수명을 실험수명과 비교한 결과는 Fig. 6과 같다. 루트와 토우균열 진전에 따라 계산된 예상수명과 시험수명을 비교한 결과 전체 작용 응력대에 따라서 미소한 차이는 있으나, 대체적으로 신뢰할만한 결과를 보이고 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 불완전 용입부를 가지는 십자형 필릿 시험편의 피로강도평가를 파괴역학적인 방법을 통해 수행하였다. 정밀도 높은 피로수명을 계산하기 위해 균열선단부 요소의 크기에 따른 민감도 평가를 실시하였으며, 유한요소해석을 통해 계산된 응력확대계수와 피로

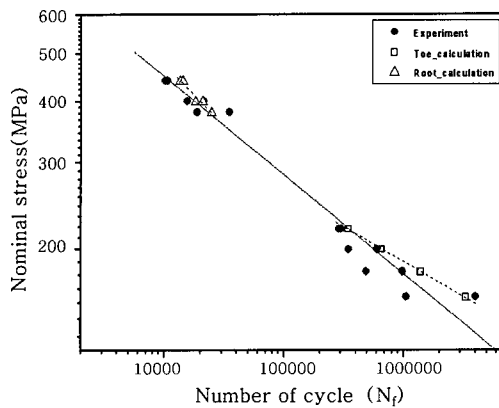


Fig. 6 Comparison of results between experimental data and calculation values

시험결과 얻어진 균열진전데이터를 활용하여 예상피로 수명을 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피로시험결과 고하중에 해당하는 380~440 MPa 영역에서는 루트파괴, 중간하중에 해당하는 280~350MPa 영역에서는 혼합파괴, 저하중에 해당하는 220MPa 이하에서는 토우파괴 양상을 보였다.

2) 단축 인장응력이 작용하는 필릿 용접부의 경우, 모드 I의 영향이 루트와 토우균열 진전에 따라 모든 영역에서 지배적이었다.

3) 분할된 요소 크기에 따른 응력확대계수의 민감도를 평가해본 결과, 요소크기 0.25mm, 0.5mm, 1.0mm 간의 결과값 차이는 10% 미만으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석의 효율성을 높이기 위해 중간값인 0.5mm의 요소크기로 전체 균열비에 대한 해석을 수행하였다.

4) 루트부 불완전 용입부를 가지는 십자형 필릿시험편의 피로시험결과와 유한요소해석을 통해 얻어진 응력확대계수를 사용하여 예상피로수명을 계산할 수 있었으며, 피로시험을 통해 얻어진 실험수명과 비교시 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

1. S.W.Kang, W.I.Ha, J.S.Shin, T.W.Jang: A study on the Characteristics fo Fatigue for Fillet Welded Joint, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **33-4** (1996) (in Korean)
2. W.H.Bae: Determination of S.I.F. for Mixed Mode Crack and Development of Accuracy, Journal of Korean Society of Industrial Application, **7-4** (2004), 355-361 (in Korean)
3. T.L.Anderson: Fracture Mechanics, 3rd Edition, Taylor & Francis, 2005
4. H.R.Kim, S.W.Kang, J.H.Pyun, H.W.Lee, M.H.Kim: A study for Fatigue Life Assessment of Fillet Joints using Stress Intensity Factor, Proceeding of SNAK, 2008 (in Korean)
5. M.H.Kim, J.H.Pyun, J.M.Lee, H.R.Kim, S.W.Kang: Fatigue Strength Evaluation of Fillet Joints in Ship Structures, Proceeding of ICTWS, 2008
6. J.S.Shin: A Study on the Characteristics of Fatigue Failure for Load-carrying Fillet Welded Cruciform Joint, Pusan National University, 1997 (in Korean)
7. P.Paris, F.Erdogan: A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Journal of Basic Engineering, **85** (1963), 528-534
8. H.Neuber: Theory of Stress Concentration for Shear Strained Prismatic Bodies Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law, Journal of Applied Mechanics, **28-14** (1961), 544-550
9. J.A.Vannantine, J.J.Commer, J.L.Handrock: Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice-Hall, 1990
10. The 200<sup>th</sup> Research Committee: A Study on the Fatigue Design of the Ship Structure, The Shipbuilding Research Association of Japan, **92** (1980)