

선체 용접부의 균열진전 및 피로수명 예측에 관한 연구(I)

김경수*, Hisashi Ito**, 서용석**, 장범선**, 김범일*, 권영빈†*

인하대학교 선박해양공학과*, ㈜삼성중공업**

A Study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure(I)

Kyung-Su Kim*, Hisashi Ito**, Yong-Seok Seo**, Beom-Seon Jang**, Beom-Il Kim* and Young-Bin Kwon†*

Dept. of Naval Architecture Engineering, Inha University, Korea*
Samsung Heavy Industries CO. LTD., Korea**

Abstract

The fatigue life of ship structure under cyclic loading condition is made up of initiation and propagation stages. In this study, crack growth test is carried out on large scale structure test specimens and fracture mechanical analysis is performed. The fatigue lives measured from fatigue tests are compared with DNV, Matsuoka and BS 5400 S-N curve. And to predict the crack initiation life, S-N curve, corresponding to crack length 20mm at welded joint, is developed based on hot spot stress range. Also crack propagation life is calculated using crack growth equation. Consequently, computed crack propagation life is compared with experiment results.

※Keywords: Welded joint(용접 이음부), Crack initiation life(균열개시수명), Crack propagation life(균열진전수명), Fatigue life estimation(피로수명산정), Stress intensity factor(응력확대계수)

1. 서 론

대형 용접구조물인 선체의 구조적인 불연속부와

접수일: 2008년 1월 9일, 승인일: 2008년 7월 24일

† 교신저자: bin1092@naver.com, 032-860-8757

집중으로 인하여 피로파괴의 가능성이 상대적으로 높아지게 된다. 이와 같이 균열이 발생하기 쉬운 부재의 피로 수명은 초기 균열이 발생할 때까지의 균열개시수명과 발생한 균열이 구조물 붕괴 시까지 성장하는 균열진전수명으로 구분 할 수 있으며, 대형 구조물의 경우에는 균열진전수명이 전체피로 수명의 많은 부분을 차지하는 것으로 알려져 있다.

하지만 피로설계의 한 방법인 S-N 선도를 이용한 피로수명 추정 방법은 피로 수명의 많은 부분을 차지하고 있는 진전수명에 대한 평가가 어렵다. 피로 설계 시, S-N 선도를 사용하는 경우 수명을 정도 높게 평가하기 위해서는 적절한 대표응력과 균열 발생 및 최종 파단 기준을 설정하고, 피로 수명 산정을 균열 발생과 파단으로 나누어 취급해야 한다. 균열의 개시수명을 기준으로 피로설계를 한다면, 경제적인 면이나 운항 효율성의 측면에서 최적의 방법이라고 할 수는 없을 것이다. 부재에 따라서 균열발생을 전혀 허용할 수 없는 부재도 있지만, 경우에 따라 일정 이하의 균열을 허용해도 구조 안전상 문제가 없는 부재가 있기 때문이다. 기존의 선체피로강도는 BS-5400(BSI 1980) 등의 데이터를 바탕으로 설계를 하였다. 하지만 이 경우 앞서 기술한 바와 같이 균열을 허용해도 무방한 부재에 대해서 피로 수명을 과소 평가하게 되는 단점이 있다.

용접 부에 균열이 존재 할 경우, 잔존수명 추정 에 관한 연구는 국내에서 활발히 이루어 졌다. Jeon et al.(2001)은 선체의 주요 용접 부위인 T 형 이음부 및 호퍼 너클 이음부 모델의 피로실험 및 피로균열 진전해석을 수행하여 집중응력을 적용한 균열 개시수명을 기준으로 하는 통합된 S-N 선도를 제시하고 이 선도를 토대로 피로균열 진전 해석을 수행하여 피로수명을 추정하였다. Lee and Kim(2001)은 FEM 을 이용하여 균열 전파 경로 및 응력강도계수를 균열이 없는 상태의 모델에 대해 얻어진 응력분포로부터 근사적으로 추정하는 방법을 정리하였다. Kim et al.(2002)은 균열의 전파 경로에 따른 여러 가지 응력확대계수를 추정, 피로 균열 전파모델을 개발하여 변동하중 및 다양한 응력 비, 과대 및 과소하중이력 하에서의 균열 전파 수명을 추정하였다.

본 연구에서는 선체구조의 대표적인 용접부인 내저판 중통재 연결부의 피로실험 및 피로균열 진전해석을 수행하였다. 용접 구조물의 형상에 의한 응력집중과 용접에 의한 응력집중을 포함하는 노치응력과 용접 부 면 곳에 작용하는 공칭응력을 각각 피로실험 결과에 적용하여, 기존의 S-N 선도와 비교함으로써 균열 개시 수명의 경향을 분

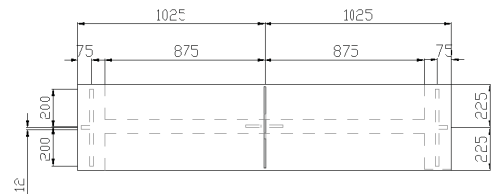
석하였다. 그리고 파괴역학이론에 기초한 균열성장 경험 식을 토대로 피로균열 진전해석을 수행하였다. 또한 핫스팟응력을 적용하여 표면균열길이 20mm 를 개시수명으로 하는 새로운 S-N 선도를 작성하고 균열의 개시수명을 추정하여 내저판 중통재 연결부의 전체피로수명을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 피로실험

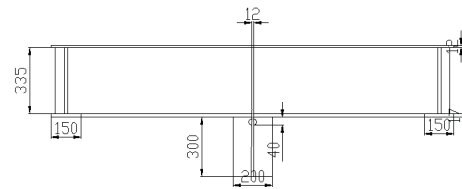
2.1. 시편 재료 및 형상

Table 1 Mechanical properties of mild steel

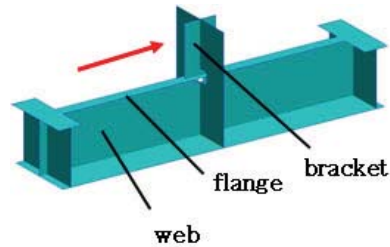
Type	Young's Modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)
Mild Steel	206,000	235	450



(a) Top view (unit: mm)



(b) Front view (unit: mm)



(c) Isometric view

Fig. 1 Configurations and dimensions of specimen

재료는 연강(Mild Steel)을 사용하였으며, 시편의 기계적 성질과 형상은 Table 1 과 Fig. 1 에 나타내었다.

2.2. 실험 방법

본 연구에서는 상온의 대기 중에서 최대하중 250kN 과 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템으로 구성되어 있는 Actuator 를 이용하여 피로 시험을 수행하였다. 하중은 Actuator 에 Fig. 4 에서 보여지는 것과 같은 지그를 장착하여 시편의 중앙에 Line Load 를 가하였다(Fig. 5). 실험은 Fig. 2 와 3 에 보여지는 것과 같이 용접 부 브라켓의 형상과

치수를 변화 시킨 3 가지 종류의 시편에 최대하중 170kN, 200kN, 230kN 을 가하여 총 9 회의 실험을 수행하였다. 이 때 하중은 응력 비 $R=0.05$, 주파수= 5Hz 로 가하였다. 균열은 균열 발생 부에 일정 사이클 마다 침투 탐상제를 침투시켜 관찰하였고, BMI Plus Se 를 사용하여 표면 길이를 측정하였다.

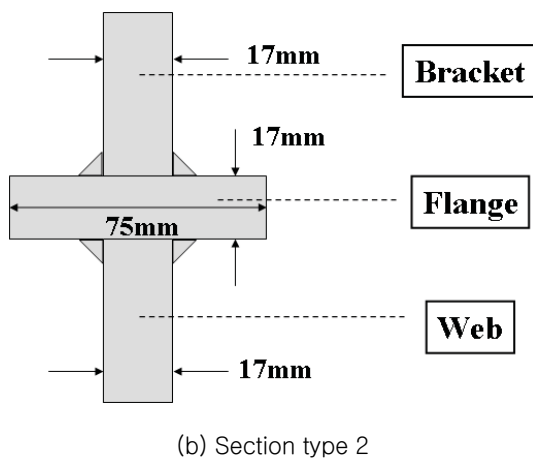
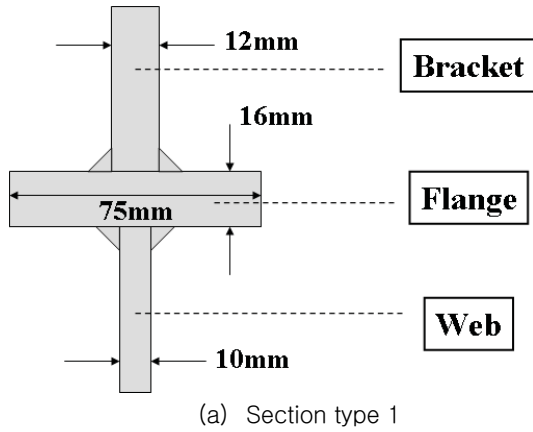


Fig. 2 Section types of specimen

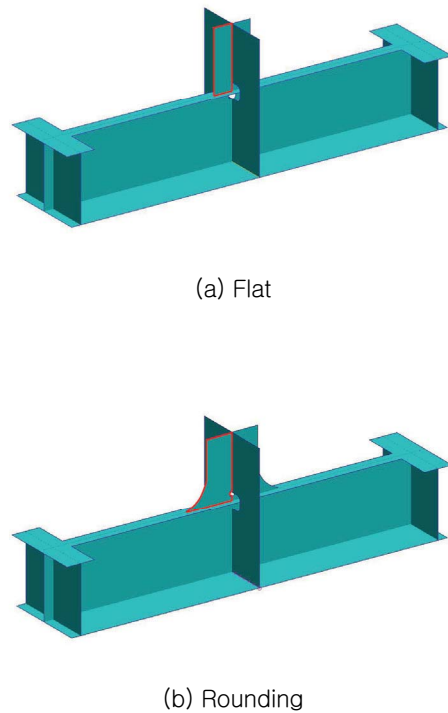


Fig. 3 Bracket shapes of specimen

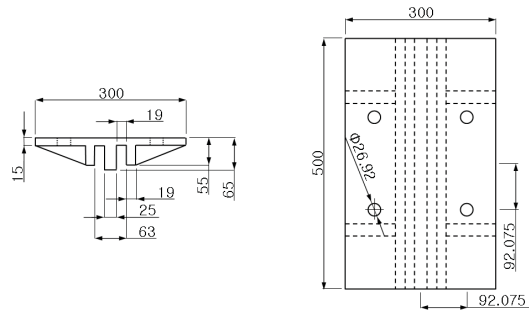


Fig. 4 Configurations and dimensions of test Jig

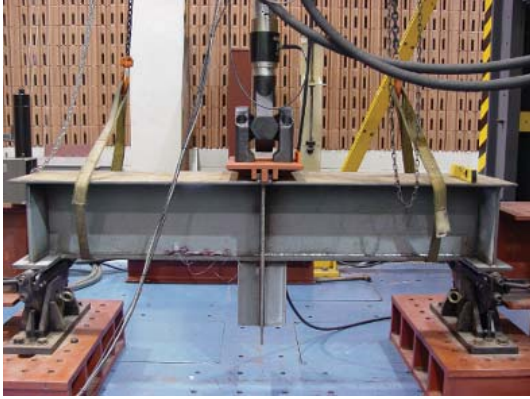


Fig. 5 Fatigue and crack propagation test set

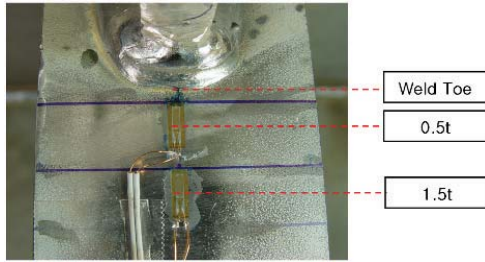


Fig. 6 Attachment of strain gage for hot spot stress measurement

2.3 Strain measurement

대표응력의 산정법에는 공칭 응력 산정법, 핫스팟 응력 산정법, 노치 응력 산정법이 있다. 이들 중 핫스팟 응력 산정법은 용접구조물의 피로강도 평가에 대한 가장 유용한 파라미터들 중의 하나이며 구조적인 응력집중을 포함하는 용접 토우부에서의 응력이다(Jeon et al. 2001). 본 연구에서는 DNV(2003)에서 제시하는 방법에 의하여 용접 토우부로부터 시편 두께의 0.5 배와 1.5 배 떨어진 곳에서의 변형률을 측정하여 외삽하는 방법을 사용하였다. Fig. 6 은 용접 토우부에서 플랜지 두께(t)의 0.5t 와 1.5t 만큼 떨어진 위치에 중심이 위치하도록 1 축 스트레인 게이지를 부착한 모습이다.

3. 실험 결과 및 고찰

일반적으로 균열의 개시수명은 균열의 크기가

육안으로 관찰이 가능 할 만큼 성장하여 합하여지는 시기이다. 이러한 미소 균열의 진전은 전체피로수명의 상당부분(20~50%)을 차지하는 것으로 알려져 있다 (Verreman et al. 1987). 미소균열은 보통 균열 깊이 1mm 이하인 균열이 이에 해당한다. 그러나 미소균열의 진전거동은 정확하게 설명하기 어렵고 복잡하며 또한 아직 연구가 진행 중인 분야이다(Jeon et al. 2001). 균열개시수명을 결정하려면 균열 깊이의 측정이 필요하지만 실제현장에서는 측정하기 어려워 표면균열길이를 이용한 균열개시수명의 산정이 더 효과적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용접 부에서 육안으로 확인할 수 있는 표면균열길이를 기초로 균열개시수명을 산정하였다.

3.1 S-N 선도

실험 결과, 표면 균열이 약 15~20mm 일 때 육안으로 관찰이 가능하였다. 초기 균열은 매우 미세하고 균열의 깊이가 얇기 때문에 육안으로는 관찰하기 어렵다. Fig. 7 은 노르웨이 선급인 DNV 에서 제안하는 S-N 선도에 표면균열길이 40mm 일 때의 실험 결과를 비교한 것이다. 40mm 의 표면 균열 길이는 균열의 깊이가 시편두께의 90%까지 진전된 시점으로써 시편의 파단으로 볼 수 있다. DNV S-N 선도는 노치 응력 범위를 기반으로 작성되었기 때문에 실험에서 구한 핫스팟 응력 범위에 용접에 대한 응력집중계수 K_w 를 곱하여 계산한 노치 응력 범위를 이용하였다. Fig. 8 는 미군 규격의 MIL-HDBK-5D 법을 일부 수정한 Matsuoka S-N 선도와 표면 균열길이 20mm 일 때의 실험 결과를 비교한 그래프이다. 이 선도는 응력 비와 최대응력이 바뀌어도, 거기에 대응한 “등가응력(Equivalence stress)” 을 이용하며, 랜덤한 응력 이력에 대해서도 적용할 수 있다는 장점이 있다 (Matsuoka and Fujii 1995). 그래프에서의 점선은 오차범위를 나타낸다.

Fig. 7 에 보여지는 것과 같이 브라켓 형상에 관계없이 내저판 중통재 연결부의 경우 표면 균열길이 40mm 일 때 DNV I 선도에 접근 하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전체수명의 90% 이상이 진전된 시점으로써 시편의 파단으로 볼 수 있으므로

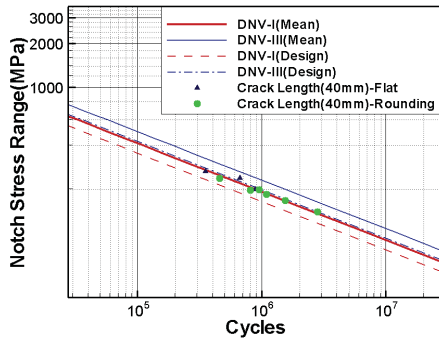


Fig. 7 Compared with DNV S-N curve at crack length 40mm

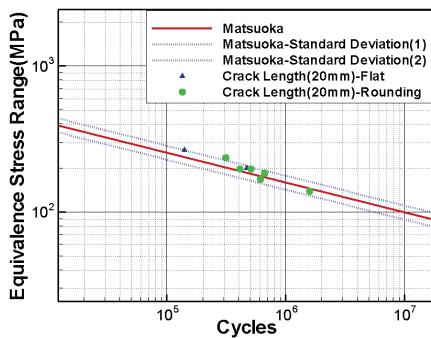


Fig. 8 Compared with Matsuoka S-N curve at crack length 20mm

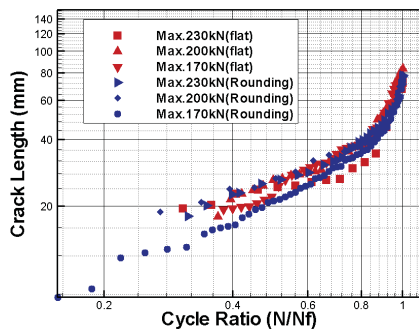


Fig. 9 Normalization of crack propagation test results

DNVI 선도는 파단수명이라고 할 수 있다. Matsuoka S-N 선도의 경우 용접 토우부 근방 스트레인 게이지의 출력 범위가 5% 저하될 때의 수명을 기반으로 작성된 그래프이다. 본 실험의 경우 용접부 근방에서 5%의 Strain 저하는 표면균열 길이 15mm 에서 20mm 일 때의 게이지 출력이다. 표면균열길이 20mm 가 전체 수명에서 차지하는 비율이 얼마인지 알아보기 위하여 실험데이터를 일반화 시켜보았다.

Fig. 9 은 수명(N)을 전체 피로수명(N_f)으로 나누어 반복수 비(Cycle ratio)를 구하고, 거기에 대응하는 표면균열길이를 모든 시편에 대하여 비교한 것이다. Fig. 9 에 보여지는 것과 같이 표면균열길이 20mm 가 전체 피로수명에서 차지하는 비율이 약 30~50%임을 확인 할 수 있으며, 이는 알려진 것과 같은 범위 내이다. 즉 표면균열길이 20mm 를 초기수명으로 정의가 가능하다고 할 수 있다. Fig. 10 은 균열의 파단수명을 BS-5400 F 선도와 비교한 것이다. 이 선도는 일반적으로 공칭응력과 파단수명을 기준으로 한 선도로 알려져 있다 (BS 5400 1980). 따라서 실험에서 얻어낸 핫스팟 응력 범위를 용접부의 형상에 의한 집중응력 계수 K_g 로 나누어 공칭응력 범위를 계산하였다. 파단수명은 균열이 시편 두께를 관통하고 폭 방향으로 완전히 파단 된 시점을 기준으로 하였다. Fig. 10 에 보여지는 것과 같이 BS 5400 F 선도와 피로실험 결과가 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

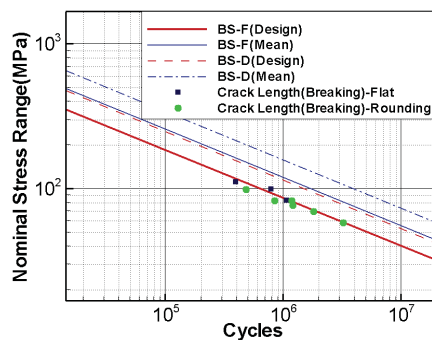


Fig. 10 Compared with BS-5400 F curve at breaking

3.1.1 새로운 S-N 선도의 제시

Fig. 11 는 초기 수명의 균열 길이를 20mm 로 가정하고 핫스팟 응력 범위를 적용하여 선체의 내저판 중통재 연결부에 적용할 수 있는 새로운 S-N 선도를 작성한 것이다. 브라켓 형상에 상관없이 구조물의 집중응력을 안다면 이 선도를 이용하여 초기균열길이 20mm 인 용접부의 균열 개시수명을 추정 할 수 있다.

3.2 피로균열 진전

전형적인 일정 진폭 피로균열전파 데이터는 Fig. 12 과 같다. 균열 길이(a)에 대응하는 반복 수(N)로 그려지고, 작용응력이 증가함에 따라 균열 성장 속도 역시 증가한다. 균열진전속도(da/dN)는 Fig. 12 의 곡선을 미분하여 얻어 진다. $\log(da/dN)$ 대 $\log\Delta K$ 의 곡선은

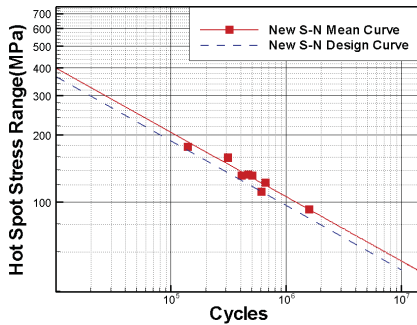


Fig. 11 S-N Curve based on crack initiation life (surface crack length 20mm)

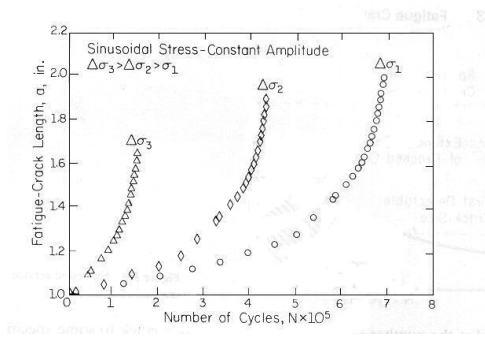


Fig. 12 Crack growth behavior under constant amplitude loading

선체 용접부의 균열진전 및 피로수명 예측에 관한 연구(I)

Fig. 13 처럼 나타내지고, 이 곡선은 3 영역으로 구분된다. 낮은 응력의 I 영역에서 균열거동은 초기 값 ΔK_{th} 의 영향을 받는다. 중간 부분은 많은 구조물 등에 적용되는 II영역으로 곡선은 선형성을 나타낸다. 마지막으로 높은 ΔK 에서, 매우 높은 균열성장속도와 작은 피로수명을 나타내는 III영역이 있다.

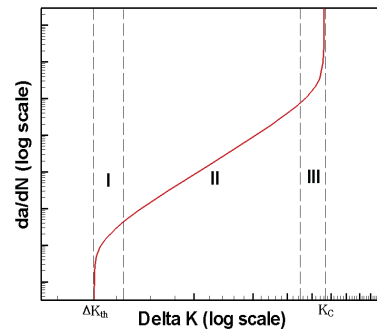


Fig. 13 Three regions of crack growth rate curve

I 영역은 미소균열이 증가하는 구간으로 명확히 규정하기가 어렵고 III 영역은 실제의 많은 공학적 상황에서 전체 피로수명에서 특별한 영향을 주지 않으므로 연구범위에서 제외하였다. 따라서 II영역, 즉 균열이 안정적으로 증가하는 구간만 연구범위에 포함하였다.

3.2.1 Paris Law & Newman-Raju Formula

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

여기에서 C 와 m 은 실험에 따라 결정되는 재료상수이다. 위 식에 따라 피로균열 진전속도는 오직 응력확대계수 K 에 의존하게 된다. Paris 는 영역 II 에서 피로균열 진전에 따라 역함수 관계식을 처음 발견하였다. 많은 연구자들이 $da/dN - \Delta K$ 관계의 전체 또는 일부분을 개발해왔지만 Paris 의 식이 균열진전 계산에 가장 기본이 된다.

또한 3 차원 반타원(Semi-elliptical) 표면 균열의 균열 진전 거동을 해석하는데 필요한 파괴역학

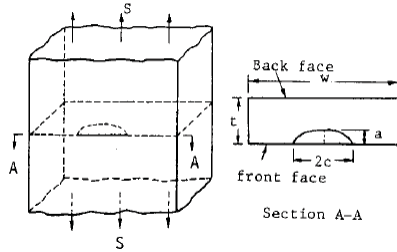


Fig. 14 Surface crack in a finite plate subjected to uniform stress

파라미터인 응력확대계수를 구하기 위하여 Fig. 14 에 나타낸 것과 같이 인장과 굽힘 하중 하에서의 반타원 표면균열을 갖는 평판의 균열진전 해석에 널리 사용되고 있는 Newman-Raju 의 공식을 이용하였다(Newman and Raju 1981).

Newman-Raju 의 공식은 다음과 같이 주어진다.

$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right)$$

for $0 < \frac{a}{c} \leq 1.0, \quad 0 \leq \frac{a}{t} < 1.0, \quad \frac{c}{b} < 0.5$

and $0 \leq \phi \leq \pi$

$\sigma_m =$ Uniform-tension stress (MPa)

$\sigma_b =$ Bending stress (MPa)

$a =$ Crack Depth (mm)

$c =$ Half - Length of Surface Crack (mm)

$t =$ Plate Thickness (mm)

$b =$ Half - Width of Cracked Plate (mm)

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$$

$$F = [M_1 + M_2(a/t)^2 + M_3(a/t)^4] \cdot f_\phi \cdot g \cdot f_w$$

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09(a/c)$$

$$M_2 = -0.54 + 0.89/(0.2 + a/c)$$

$$M_3 = 0.5 - 1.0/(0.65 + a/c) + 14(1.0 - a/c)^{24}$$

$$f_\phi = [(a/c)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi]^{1/4}$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35(a/t)^2] (1 - \sin \phi)^2$$

$$f_w = \left[\sec \left(\frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2}$$

$$p = 0.2 + a/c + 0.6(a/t)$$

$$H_1 = 1 - 0.34(a/t) - 0.11(a/c)(a/t)$$

$$H_2 = 1 + G_1(a/t) + G_2(a/t)^2$$

$$G_1 = -1.22 - 0.12(a/c)$$

$$G_2 = 0.55 - 1.05(a/c)^{0.75} + 0.47(a/c)^{1.5}$$

여기서, a 와 c 는 유한판에 존재하는 반타원형 (Semi-elliptical) 균열의 깊이와 장반경을 각각 나타낸다. 또한 판의 두께를 t, 너비를 w 로 표시한다. 식에서 Q 는 형상계수(Shape factor)이고 F 는 경계수정계수(Boundary correction factor)로서 무한 고체 평판에 존재하는 균열에 대한 응력확대계수의 경계의 영향, 즉 앞면(Front face)과 뒷면(Back face) 그리고 유한한 넓이의 영향을 고려한 계수이다.

3.2.2 균열성장수명의 계산

균열성장수명의 계산은 균열길이 20~45mm 까지만 수행하여 피로실험 데이터와 비교하였다. 미소균열의 진전은 정립하기 까다롭고 균열길이 45mm 가 되면 반타원 균열의 깊이 방향 길이가 시편 두께를 넘어서게 되어 Newman-Raju 의 응력확대계수 식을 적용하기 어렵기 때문이다. 또한 균열길이 45mm 는 전체 피로수명에서 약 90% 이상 진전한 시점이기 때문에 그 후의 진전수명 계산 결과는 전체피로수명에 영향을 주지 않는 것으로 간주하였다.

다음은 진전수명계산에서 가장 중요한 인자인 응력확대계수 K 를 Newman-Raju 식을 사용하여 계산하는 과정이다.

$$\begin{aligned}
 K &= (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F, \quad \sigma_b = 0 \\
 &= \sigma_m \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F \\
 &= \sigma_m F \sqrt{\frac{\pi}{Q}} \sqrt{a} \\
 \therefore \Delta K &= \Delta \sigma_m F \sqrt{\frac{\pi}{Q}} \sqrt{a}
 \end{aligned}$$

여기서 F, Q 는 시편이나 균열의 형상에 의존하는 함수이다. σ_m 은 인장응력, σ_b 는 굽힘 응력이다. 굽힘 응력은 0 으로 가정하였는데 시편은 I 형 보로 가정하였을 때 균열이 발생한 Lower Flange 부분은 인장응력만 작용하게 된다. 따라서 굽힘 응력의 영향을 배제함으로써 H 항도 사라지게 된다.

Fig. 15 은 Paris Law 의 재료상수인 C 와 m 을 구하기 위하여 ΔK 와 da/dN 를 log-log Scale 로 그린 그래프이다.

위의 방법으로 응력확대계수와 Paris Law 의 재료상수인 C 와 m 을 구하여 아래의 식에 대입하면 균열진전수명을 계산할 수 있다.

$$N = \int \frac{1}{C(\Delta K)^m} da$$

Fig. 16 은 위 식을 사용하여 계산한 균열성장수명과 피로실험을 통해 얻은 데이터를 비교해 놓은 것이다. 계산된 수명과 실험데이터가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

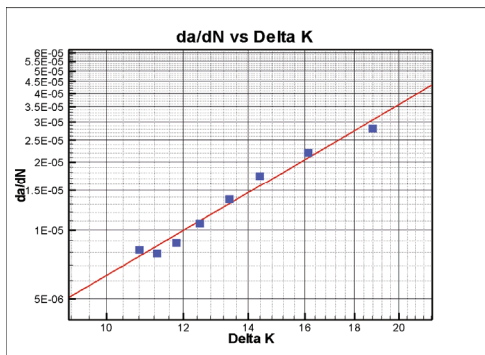
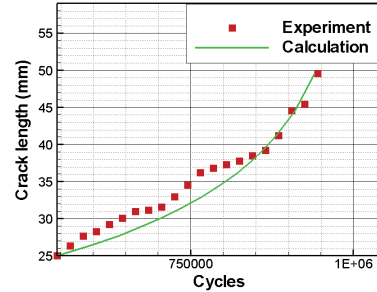
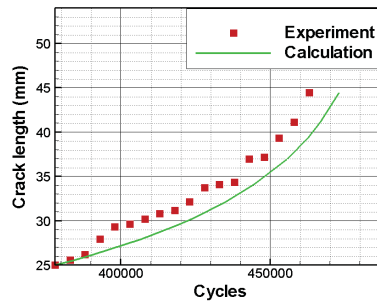


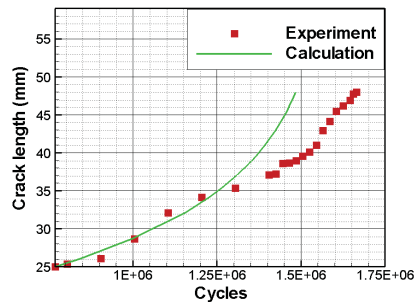
Fig. 15 Three regions of crack growth rate curve



(a) Bracket type= flat, Load= 170kN



(b) Bracket type= Rounding (1), Load= 230kN

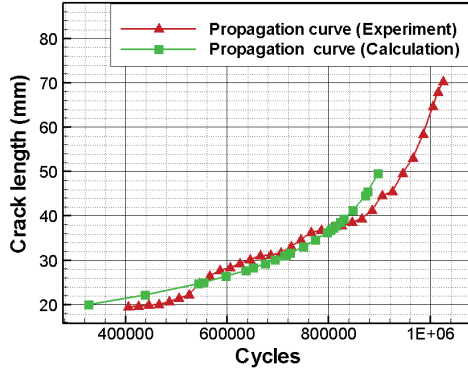


(c) Bracket type= Rounding (2), Load= 200kN

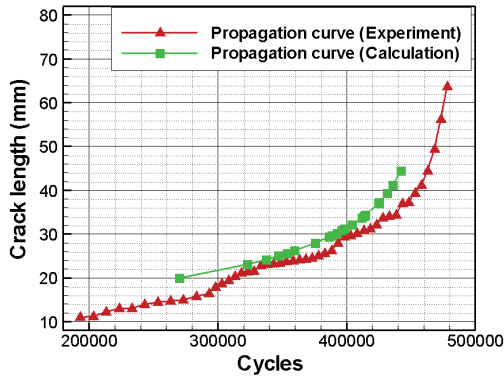
Fig. 16 Comparison between calculation data and experiment data

4. 전체 피로수명의 추정

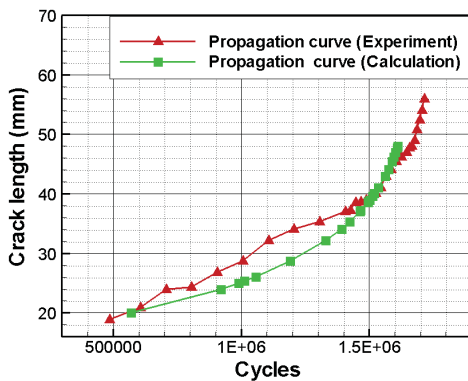
앞서 기술한 바와 같이 용접 부의 피로수명은 초기수명과 균열 진전수명으로 나눌 수 있다. 초기수명은 S-N 선도로 어느 정도 추정이 가능하다. 진전 수명 또한 파괴역학을 이용한 기존에 제안된 경험 식에 대입하여 계산할 수 있다. Fig. 17 은 본 연구에서 제안하는 S-N 선도를 이용하여 초기균



(a) Bracket type= flat, Load= 170kN



(b) Bracket type= Rounding (1), Load= 230kN



(c) Bracket type= Rounding (2), Load= 200kN

Fig. 17 Comparison between calculation data and experiment data

열길이 20mm 을 추정하고, Paris Law 를 사용하여 진전수명을 계산한 결과이다. 최종 파단 수명을 기준으로 10% 내의 오차로 결과를 추정 할 수 있었다.

5. 결론

선체 구조의 대표적인 용접부인 내저판 중통재 연결부의 피로시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초기균열은 최대응력이 작용하는 부분에서 동일하게 발생하였다.
- 2) 피로시험 결과 시편의 초기수명과 파단수명을 기존의 제안된 S-N 선도(DNV, Matsuoka, BS5400)와 비교하였을 때 좋은 결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 제안하는 S-N 선도를 이용하여 표면균열길이 20mm 일 때를 기준으로 하는 초기피로수명을 추정할 수 있었으며, 이는 전체피로수명에서 약 30~50%를 차지 하였다.
- 4) 균열진전수명은 파괴역학을 이용한 기존의 제안된 경험 식(Paris Law)을 이용하여 계산할 수 있다.
- 5) 제안된 S-N 선도과 균열진전 경험 식을 사용하여 용접부의 피로수명을 비교적 정확히 추정할 수 있다.

후 기

이 논문은 (주)상성중공업의 연구비 지원을 받아 수행된 연구로, 위 기관의 후원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Det Norske Veritas(DNV), 2003, Fatigue Assessment of Ship Structures, Classification

- Notes, No. 30.7
- Jeon, Y.C., Kim, Y.I., Kang, J.K. and Han, J.M., 2001, " A Study on Fatigue Life Prediction of Welded Joints Through Fatigue Test and Crack Propagation Analysis," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 3, pp. 93-106.
 - Kim, C.W., Kim, D.S. and Nho, I.S., 2002, " Fatigue Life Assessment of Ship Structures based on Crack Propagation Analysis," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 1, pp. 90-99.
 - Lee, C.K. and Kim, S.C., 2001, " Crack Propagation Analysis of VLCC Using Simplified K value Estimation Methods," Korean Society of Steel Construction, Vol. 13, No. 1, pp. 17-25.
 - Matsuoka, K., and Fujii, E., 1995, " An Evaluation Method on Fatigue Crack Initiation Life at Welded Joints in Steel Structures," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, pp. 513-522.
 - Newman, J.C. and Raju, I.S., 1981, " An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185-192.

- The British Standards Institution BS5400, 1980, Steel Concrete and Composite Bridges Code of Practice for Fatigue.
- Verreman, Y., Baillon, J.P. and Masounave, J., 1987, " Fatigue Life Prediction of Welded Joints-A Re-Assessment," Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structure, Vol. 10, No. 1, pp. 17-36.



< 김 경 수 >



< Hisashi Ito >



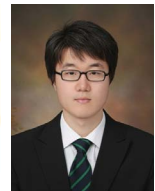
< 서 용 석 >



< 장 범 선 >



< 김 범 일 >



< 권 영 빈 >