

선체 용접부의 균열진전 및 피로수명예측에 관한 연구(II)

김경수*, 심천식†**, 권영빈*, 고희승*, 기혁근*, K.K. Viswanathan*

인하대학교 선박해양공학과*
국립목포대학교 기계·선박해양공학부**

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

Kyung-su Kim*, Chun-sik Shim †**, Young-bin Kwon*, Hee-seung Ko*,
Hyeok-geun Ki* and K.K. Viswanathan*

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University*
Dept. of Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University**

Abstract

The fatigue life of ship structure under cyclic loading condition is made up of crack initiation and propagation stages. For a welding member in ship structure, the fatigue crack propagation life is more important than the fatigue crack initiation life. To calculate precisely the fatigue crack propagation life at the critical welding location, the knowledge of the residual stress sensitivity on the fatigue strength is necessary. In this study, thermo elastic-plastic analysis was conducted in order to examine the effect of residual stress on the fatigue crack propagation life. Also the fatigue crack propagation lives considering residual stress were calculated using fatigue crack growth code, AFGROW, on the basis of fracture mechanics. AFGROW is widely used for fatigue crack growth predictions under constant and variable amplitude loading. The reliability of AFGROW on the fatigue of ship structure was confirmed by the comparison of the estimated results with the fatigue propagation test results.

※Keywords: Inner bottom longitudinal connection(선저종이음부), Welded joint(용접 이음부), Crack initiation life(균열개시수명), Crack propagation life(균열진전수명), Fatigue life prediction(피로수명예측), Thermal elastic-plastic analysis(열탄소성해석), AFGROW(Air Force Growth), Residual stress(잔류응력)

접수일: 2008년 1월 11일, 승인일: 2008년 6월 15일

† 교신저자: csshim@mokpo.ac.kr, 061-450-2768

1. 서론

선박과 같은 대형 용접구조물의 경우 호퍼너클 이음부나 선저종이음부와 같은 복잡한 구조적 이음부를 갖는다. 이러한 구조 이음부는 급격한 형상 변화로 인해 응력집중이 발생하게 되며, 응력이 집중되는 용접 토우부(weld toe)에서 균열발생의 가능성이 높아지게 된다.

균열이 발생한 경우 균열발생이 곧바로 파단으로 직결되는 부재도 있지만, 초기균열에 따라 균열 발생 이후에도 긴 수명 동안 선박의 운항에 지장이 없는 부재도 있다. 하지만 초기균열이 전체 피로수명에서 작은 부분을 차지하는 부재의 경우 균열개시 이후 전체수명의 많은 부분을 차지하는 잔존수명 즉 피로균열진전수명을 명확히 정의하기 어렵기 때문에 S-N 선도를 이용한 기존의 피로설계 방법으로는 모든 선체 구조에 대해 적합한 피로수명을 규명하기 어렵다. 따라서 균열발생 이후의 잔존수명을 정확히 평가하기 위해서는 균열진전수명에 대한 파괴역학적인 접근방법이 필요하며, 이를 이용한 최적화된 피로설계방법이 요구된다.

용접부에 균열이 존재 할 경우, 잔존수명 예측에 관한 연구는 국내에서 활발히 이루어 졌다. Jeon et al.(2003)은 선체의 주요 용접 부인 T-형 이음부 및 호퍼너클 이음부 모델의 피로균열진전 실험 및 용접잔류응력을 고려한 피로균열진전 해석을 수행하여 용접 이음부의 전체피로수명을 예측하였고, Lee and Kim(2001)은 균열이 없는 상태의 모델에 대하여 유한요소해석으로부터 얻어진 응력 분포에서 균열전파경로 및 응력강도계수를 근사적으로 추정하는 방법을 정리하였다. Kim et al.(2008)은 선박의 대표적 용접부인 선저종이음부(inner bottom longi. connection) 모델에 대한 피로균열진전실험을 수행하여 핫스팟응력(hot spot stress)을 적용한 균열 개시수명을 기준으로 하는 통합된 S-N curve 를 제시하였고, 이 curve 를 토대로 피로균열진전수명을 계산하여 전체피로수명을 예측하였다

본 연구에서는 대표적인 피로균열진전해석 프로

그램인 AFGROW 를 이용하여 용접잔류응력을 고려한 피로균열진전해석을 수행하였다. 용접에 의한 잔류응력을 평가하기 위하여 열탄소성 해석을 수행하였고, 계산된 결과와 Kim et al.(2008)에서 제안한 S-N curve 를 이용하여 전체피로수명을 예측하였다. 최종적으로 피로균열진전실험 결과와 피로균열진전해석 결과를 비교해 봄으로써 AFGROW 를 이용한 균열진전수명 해석결과가 임의의 형상을 갖는 용접 이음부의 균열진전수명 평가에 유효함을 입증하였다.

2. 피로균열진전해석

전형적인 일정진폭하중 하에서 피로균열진전 데이터는 Fig. 1 에 보여지는 것과 같다. 균열 길이(a)에 대응하는 반복수(N)로 그려지고, 작용응력이 증가함에 따라 균열진전속도 역시 증가한다.

균열진전속도(da/dN)는 Fig. 1 에 보여진 균열 길이(a)대 반복수(N)의 곡선을 미분함으로써 얻을 수 있다. 또한 $\log(da/dN)$ 값은 주어진 균열길이를 식 (1)에 대입하여 구할 수 있는 $\log\Delta K$ 에 대하여 Fig. 2 에 보여지는 것과 같은 관계를 갖는다.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f(g)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

여기서,

$\Delta\sigma$ = 먼 거리에서 부재에 작용하는 응력진폭
 $f(g)$ = 시편과 균열의 기하학적인 형상에 의존하는 보정계수

Fig. 2 에 보여지는 곡선은 3 영역으로 구분된다. 작은 ΔK 상태인 I 영역에서 균열거동은 초기값 ΔK_{th} 의 영향을 받는다. 중간 부분은 많은 구조물 등에 적용하는 II영역으로 $\log(da/dN)$ 와 $\log\Delta K$ 는 서로 선형관계를 갖는다. 마지막으로 큰 ΔK 에서 빠른 균열진전속도와 짧은 피로수명을 나타내는 III영역이 있다.

I 영역은 미소균열이 증가하는 구간으로 명확히 규정하기가 어렵다. 그리고 III 영역은 실제의 많은

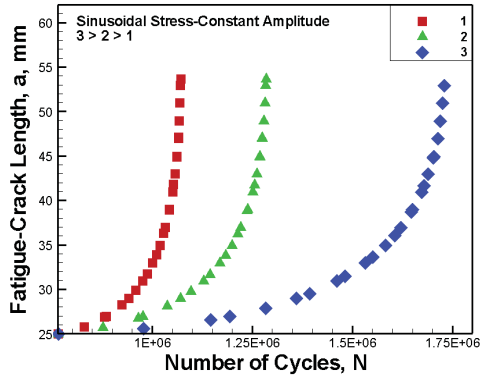


Fig. 1 Crack growth data under constant amplitude loading

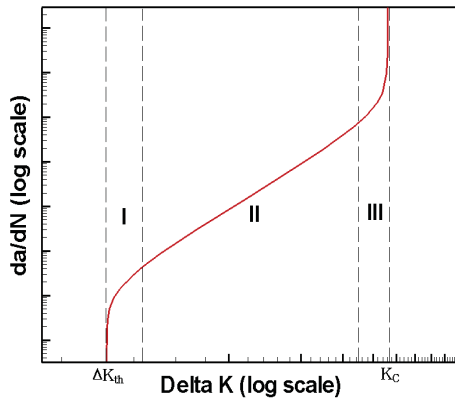


Fig. 2 Three regions of crack growth rate curve

공학적 상황에서 전체 피로수명에 특별한 영향을 주지 않을 만큼 짧은 피로수명을 갖기 때문에 연구범위에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 II 영역, 즉 균열이 안정적으로 증가하는 구간에 대해서만 계산을 수행하였다.

2.1 AFGROW 를 이용한 균열진전수명 예측

AFGROW(Air Force Growth)는 균열시작, 피로 균열성장, 파괴 그리고 강구조물의 수명 평가에 이용하는 균열진전수명 예측 프로그램이다. 오늘날 가장 빠르고, 효과적이며, user-friendly 한 프로그램중의 하나로 알려져 있다. AFGROW 는 미 공군(Air Force Research Laboratory)에서 개발된

프로그램으로 1985 년, Sikorsky H-53 Helicopter 의 균열진전해석을 위해 개발한 균열 진전 해석 코드인 ASDGRO 을 시작으로 오늘날까지 계속해서 발전해 왔다(Harter 2006). AFGROW 의 장점 가운데 첫째는, 미항공우주국 NASA 에서 개발된 NASGRO equation 을 비롯한 Harter T-method, walker equation 등 5 가지의 균열진전 식 및 재료의 물성치 정보를 이용하여 상황에 따른 적절한 계산이 가능하다는 것이며 둘째는, 잔류응력 효과, 균열지연 그리고 환경 영향 등을 계산 과정에 적용하기 쉽다는 것이다. 따라서 사용자가 다루기 쉬우며 빠른 계산 결과를 얻을 수 있기 때문에 강력한 균열진전 해석용 프로그램으로써 많이 이용하고 있다.

2.2 NASGRO equation

AFGROW 는 $\log(da/dN)$ 대 $\log \Delta K$ 의 곡선을 얻기 위해 Forman equation, Walker equation, Tabular lookup, Harter-T method 그리고 NASGRO equation 등 총 5 가지의 계산식을 사용한다. 본 연구에서는 NASGRO equation 을 이용하여 균열진전수명을 계산하였다. NASGRO (NASA 의 균열진전 해석프로그램)의 균열진전 계산식으로 쓰이는 NASGRO equation 을 이용하기 위해서는 해석 대상 재료에 대한 다양한 파괴역학적 물성치가 필요하다. AFGROW 는 각종 구조용 강재들의 파괴역학적 물성치 정보들을 material database 화 하여 저장하고 있기 때문에 물성치 실험을 따로 수행하지 않아도 원하는 재료의 정보를 가지고 균열진전수명 계산이 가능하다.

본 연구에서는 균열진전실험에 사용한 연강과 같은 재료인 Table 1 에 보여지는 ASTM A36 steel, plate 의 파괴역학적 물성치 정보를 이용하였다.

Table 1 Properties of ASTM A36 steel, plate

Tensile strength, ultimate	400 ~ 550 MPa
Tensile strength, Yield	250 MPa
Modulus of elasticity	200 GPa
Poisson' s ratio	0.26
Shear modulus	79.3 GPa

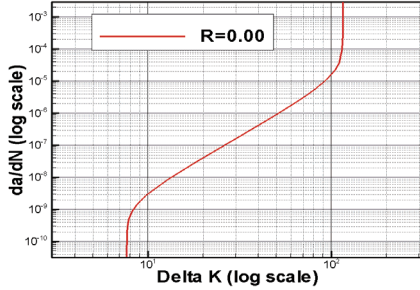


Fig. 3 Crack growth-rate data of ASTM A36 steel, plate (stress ratio R=0)

Fig. 3 은 ASTM A36 steel, plate 의 $\log(da/dN)$ 대 $\log \Delta K$ 곡선이다.

NASGRO equation 은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{\Delta K_{max}}{\Delta K_{crit}} \right)^q} \quad (2)$$

여기서 C, n, p, q 는 실험적으로 얻어내는 상수들이며, 나머지 상수들은 다음과 같이 정의된다.

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

$$A_0 = \left(0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2 \right) \times \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} S_{max} / \sigma_0 \right) \right]^{1/\alpha} \quad (4)$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) S_{max} / \sigma_0 \quad (5)$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \quad (6)$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \quad (7)$$

α = Plane stress/strain constraint factor

S_{max} / σ_0 = Ratio of the maximum applied stress to the flow stress

또한, ΔK_{th} 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta K_{th} = \Delta K_0 \left(\frac{a}{a+a_0} \right)^{\frac{1}{2}} / \left(\frac{1-f}{(1-A_0)(1-R)} \right)^{(1+C_{th}R)} \quad (8)$$

여기서,

ΔK_0 = threshold stress intensity range at R=0

a = crack length (a or c in AFGROW)

a_0 = intrinsic crack length (0.0015 inches or 0.0000381 meters)

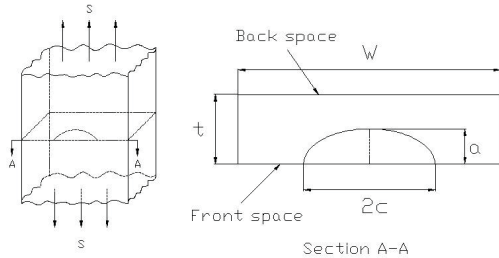
C_{th} = threshold coefficient

2.3 Stress intensity factor

AFGROW 는 30 가지 이상의 geometry 에 대한 응력확대계수(stress intensity factor) 라이브러리를 제공한다. 또한 multiple crack, non-symmetric corner crack 등 복잡한 균열형상에 대한 응력확대계수 역시 고려가 가능하다. 본 연구에서는 반타원(semi-elliptical) 표면 균열의 응력확대계수를 구하기 위하여 Fig. 4 에 보여진 것과 같이 Newman-Raju 의 응력확대계수 식에 기초한 center semi-elliptical surface crack classical model 을 이용하였다.

여기서, a 와 c 는 유한 판에 존재하는 반타원 균열의 깊이와 장 반경을 각각 나타내며 판의 두께를 t, 너비를 w 로 표시한다.

반타원 균열의 응력확대계수는 균열의 깊이가 시편의 두께를 초과하지 않는 범위 ($0 < a/t < 1$)에서 그 때 작용하는 공칭인장응력과 굽힘응력에 대해 유효하다(Newman and Raju 1981). AFGROW 를 이용하기 위해서는 초기 균열의 표면길이(c)와 깊이(a)를 알아야 한다. 이를 위해 Kim et al.(2008)



Default angle (Φ) used for the c Dimension: 0°

Default angle (Φ) used for the a Dimension: 90°

This solution is valid for the following dimensions:

$0 < a/t < 1.0$

$0.2 \leq a/c \leq 2.0$

Fig. 4 Center semi-elliptical edge surface crack

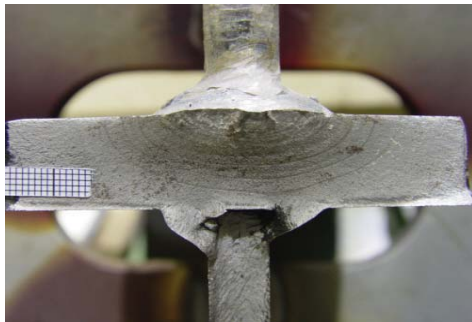


Fig. 5 Beach mark on crack section

이 수행한 비치마크 테스트(beach mark test) 결과를 이용하였다. Fig. 5 는 비치마크 테스트를 통해 얻어진 균열 단면의 모습이다.

2.4 Residual stress analysis

용접에 의한 잔류응력은 균열의 진전특성에 많은 영향을 미치는 주요 인자로 알려져 있다. 실제 실험에 사용한 시편은 균열발생지점인 bracket

toe 부에 모퉁이 돌리기 용접이 되어 있기 때문에 균열진전계산에 있어 용접잔류응력의 영향을 고려할 필요가 있다. Lee et al.(2002)은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 버트용접부 및 다층 용접된 필렛용접부에 대한 용접잔류응력을 계산하였다.

따라서 본 연구에서는 용접잔류응력을 고려하기 위한 방법으로 ANSYS 10.0 을 이용한 열탄소성 해석을 수행하였다. Table 2 는 시편 제작에 사용한 용접조건을 보여주고 있다.

해석상 편의를 위하여 Fig. 6 에서와 같이 bracket toe 부분의 반을 유한요소 모델링 하였으며, 해석 시 symmetric 조건을 주어 나머지 반을 고려하였다. 또한 정확한 해석 결과를 얻기 위하여 용접 부 요소의 크기를 3mm 이하로 모델링 하였다.

AFGROW 에서는 균열발생단면에 수직한 방향의 용접잔류응력을 균열진전수명에 영향을 미치는 응력으로 고려한다. 따라서 시편 길이방향으로의 용접잔류응력을 계산하였다.

Table 2 Welding conditions

용접횟수	current	voltage	용접속도 (cm/min)
2	220	30	30

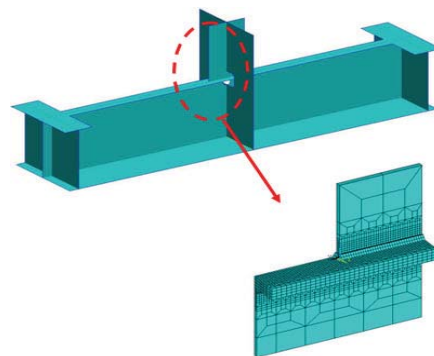
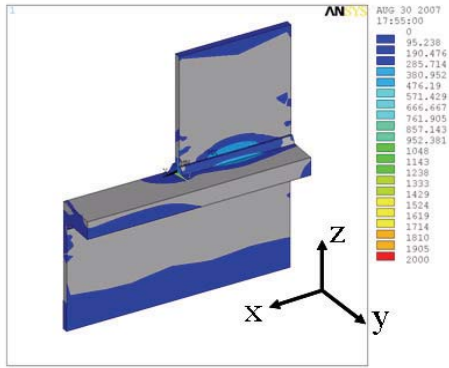
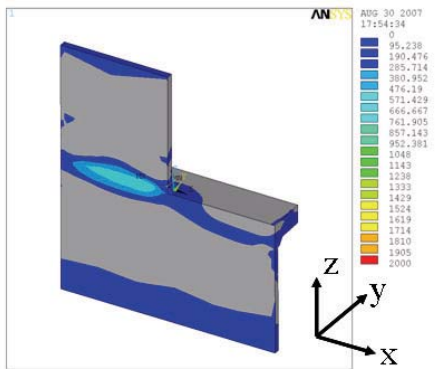


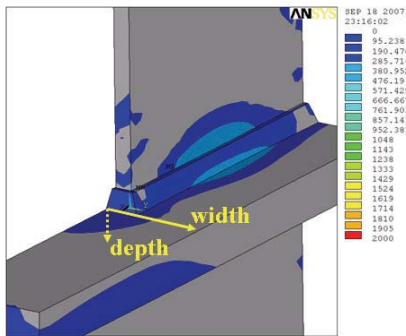
Fig. 6 Finite element model for thermal elastic-plastic analysis



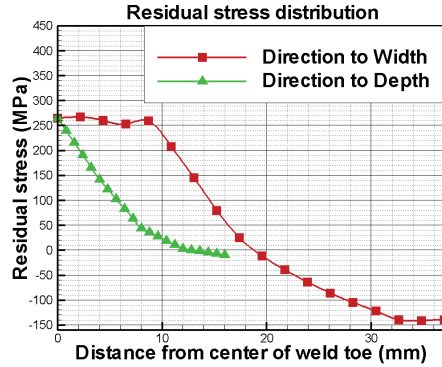
(a) Residual stress distribution on the surface



(b) Residual stress distribution in the inner plate



(c) Width and depth direction at weld toe



(d) From weld toe, residual stress distribution in width and depth direction

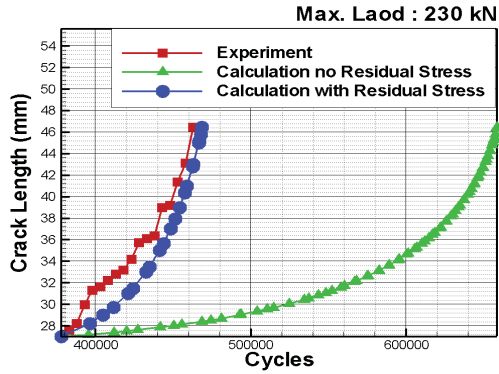
Fig. 7 Residual stress distribution

Fig. 7 은 bracket toe 부에 대해 계산한 시편 길이 방향으로의 용접잔류응력 분포를 나타낸다 (σ_x). 균열발생 지점인 weld toe 부 끝 단에서 폭 방향으로 인장과 압축응력이 분포하고, 깊이 방향으로는 전체적으로 인장응력이 분포하고 있음을 확인하였다. Fig. 7 (d)에서 보여지는 것과 같이 균열의 중심을 기점으로 최대 260MPa 정도의 용접 잔류응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 실제 반복 하중을 받는 용접부의 용접잔류응력은 여러 가지 요인으로 인해 분포가 변해나가지만, 본 연구에서는 초기 잔류응력의 분포가 균열이 전파하는 동안 일정하다고 가정하였다.

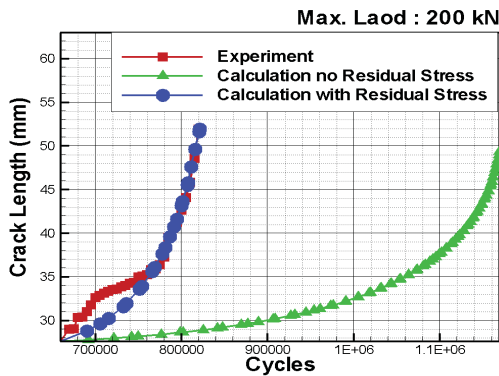
2.5 균열진전수명 예측 결과

본 연구에서는 Kim et al.(2008)이 수행한 피로 균열진전실험 결과들 중 비치마크 테스트를 수행한 section type 1 의 rounding bracket 시편 3 개 모델에 대해서 균열진전수명을 계산하였다. 또한 균열진전수명은 균열길이 25~50mm 정도까지만 계산하여 균열진전실험 결과와 비교하였다. 실제 현장에서는 길이 25mm 이하의 균열을 발견하기 어렵고, 균열길이 45mm 이상이 되면 반타원 균열의 깊이가 시편 두께를 관통하기 때문에 파괴역학에 기초한 응력확대계수의 적용이 어렵다.

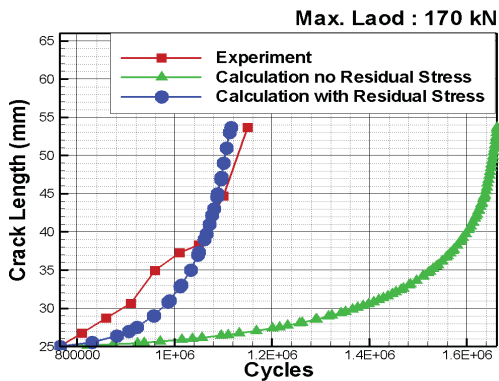
또한 균열길이 45mm 는 전체 피로수명의 약



(a) For the max. load : 230kN



(b) For the max. load : 200kN



(c) For the max. load : 170kN

Fig. 8 Comparison of calculation considering the effect of residual stress with calculation without it

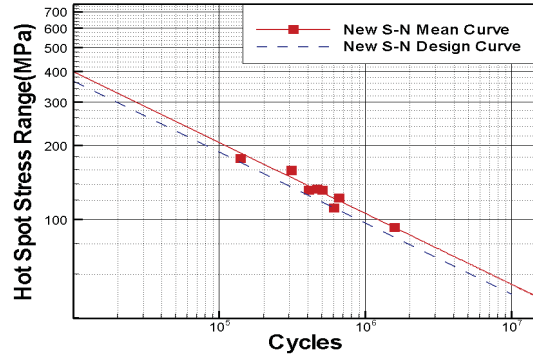


Fig. 9 S-N curve based on crack initiation life (surface crack length 20mm)

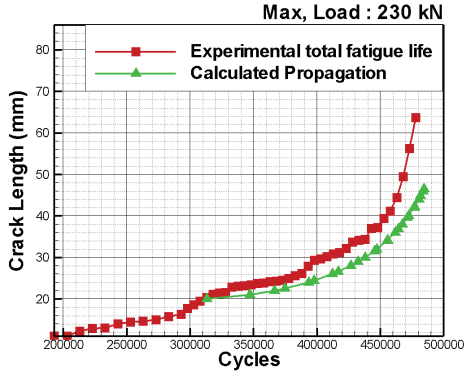
90%정도를 차지하는 시점이기 때문에 그 이후의 균열진전수명예측은 비교대상에서 제외하였다. Fig. 8 는 용접잔류응력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 피로균열진전 계산 결과를 보여주고 있다. 용접잔류응력을 고려한 경우에 실험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

3. 전체피로수명의 예측

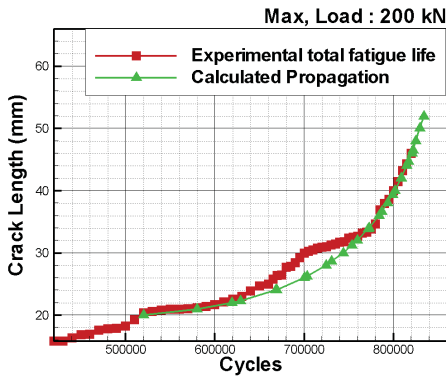
일반적으로 용접부의 전체피로수명은 균열개시 수명과 균열진전수명으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 Kim et al.(2008)이 제안한 S-N curve (Fig. 9) 를 이용하여 계산한 균열개시수명과 용접잔류응력을 고려하여 AFGROW 로부터 계산한 균열진전수명을 합산하여 전체피로수명을 계산하였다. Fig. 10 은 이들 방법을 이용하여 계산한 전체피로수명과 균열진전실험 결과를 비교한 결과이다. 최종파단수명을 기준으로 할 때 약 10% 이내의 오차범위에서 선저종이음부의 용접부에 대한 전체피로수명 예측이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

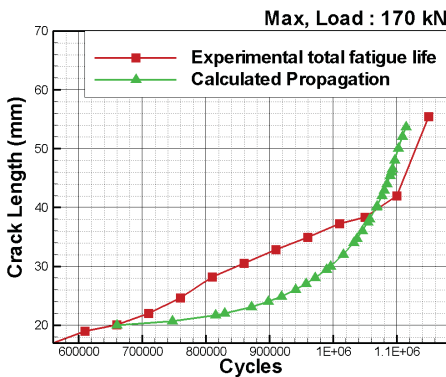
선체 구조의 대표적인 용접부인 선저종이음부에 대한 피로균열성장해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



(a) For the max. load : 230kN



(b) For the max. load : 200kN



(c) For the max. load : 170kN

Fig. 10 Comparison of calculation result with experimental result for three load cases

- 1) 열탄소성해석을 통하여 용접 부에서의 용접잔류응력이 균열진전수명 계산에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.
- 2) 피로균열진전 해석프로그램인 AFGROW 를 이용하여 용접잔류응력을 고려한 균열진전수명을 예측할 수 있었다.
- 3) Kim et al.(2008)에서 제안한 S-N Curve 와 AFGROW 를 이용하여 용접부의 전체피로수명을 비교적 정확히 예측할 수 있었다.
- 4) 초음파 탐상과 같은 균열형상 측정 방법을 이용하여 균열길이 측정 과정에서 발생하는 오차를 감소 시키고, flange 단면에서 web 의 영향으로 인해 변화하는 하중 분포를 해석 과정에서 구현할 수 있다면 좀 더 정확한 균열진전수명을 예측 할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2007-000-20340-0).

참 고 문 헌

- Harter J.A., 2006, AFGROW Users Guide and Technical Manual, AFRL-VA-WP-TR-2006-XXXX, Air Force Research Laboratory.
- Jeon, Y.C., Kim, Y.I., Kang, J.K. and Han, J.M., 2003, " 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, K.S., Hisashi, Ito., Seo, Y.S., Jang, B.S., Kim, B.I. and Kwon, Y.B., 2008, " A Study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure," Proceedings of the Annual Autumn Meeting the Society of Naval Architects of Korea, pp. 984-992.
- 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.

- Lee, J.H., Shin, J.G. and Kim, J.H., 2002, “ Three Dimensional Thermal–Elastic Analysis of GMAW considering the Melting of Weld Bead,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 1, pp. 49–60.
- 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



< 김 경 수 >



< 심 천 식 >



< 권 영 빈 >



< 고희 승 >



< 기 혁 근 >



< Viswanathan >