

용접잔류응력의 이완과 재분포 해석 및 실험적 검증

송하철^{†*}, 조영천^{**}, 장창두^{**}

서울대학교 해양시스템공학연구소^{*}, 서울대학교 조선해양공학과^{**}

Numerical Analysis and Experimental Verification of Relaxation and Redistribution of Welding Residual Stresses

Ha Cheol Song^{†*}, Young Chun Jo^{**} and Chang Doo Jang^{**}

Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University^{*}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University^{**}

Abstract

For the precise assessment of the effect of welding residual stresses on structural strength and fatigue crack growth behavior, new FE analysis algorithms for the estimation of residual stress relaxation due to external load and redistribution due to fatigue crack propagation were proposed in this paper. Initial welding residual stress field was obtained by thermal elasto-plastic analysis considering temperature dependent material properties, and the amount of residual stress relaxation and redistribution were assessed by subsequent elasto-plastic analysis. In the analysis of fatigue crack propagation, the applied SIF(Stress Intensity Factor) range was evaluated by 1/4-point displacement extrapolation method, and the effect of welding residual stresses on crack propagation was considered by introducing the effective SIF concept. The test results of crack propagations were compared with the predicted data obtained by the analysis.

※Keywords: Welding residual stress (용접잔류응력), Thermal elasto-plastic analysis (열탄소성해석), Relaxation of residual stress (잔류응력이완), Redistribution of residual stress (잔류응력재분포), Fatigue crack propagation (피로균열진전), Effective SIF (유효응력확대계수)

1. 서론

선박 및 해양구조물과 같은 대형 구조물을 제작하기 위해서는 용접과정이 필수적으로 수반되는바, 용접가공 시 국부적인 열 사이클에 의해 유발되는 용접 잔류응력은 구조강도나 피로 균열진전

접수일: 2004년 9월 6일, 승인일: 2004년 10월 18일

†주저자, E-mail:shcpr@hanmail.net

Tel: 02-880-7336

특성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

그러나 용접 잔류응력은 외부에서 작용하는 하중에 의해 이완되며, 피로 균열이 진전됨에 따라 부재 내의 응력 평형을 이루기 위해 재분포되는 등, 복잡한 역학적 특성을 가지고 있어, 이완 및 재분포 특성이 피로균열진전에 미치는 영향에 대한 정량적 평가는 당해 분야의 주된 연구 과제이다. 이러한 용접 잔류응력의 이완 및 재분포 특성 평가에 대한 대표적인 선행 연구로는 이용복/정진성(1997)에 의해 수행된 자화식 응력지시계에 의한 실험적 평가를 들 수 있다. 이 연구는 자화식 응력지시계를 이용하여 반복하중에 의해 이완되는 잔류응력의 크기와 균열 진전에 따른 잔류응력의 재분포 현상을 정성적으로 잘 보여주고 있어 매우 의미 있는 결과를 담고 있으나, 저자가 논문에서 밝힌 바와 같이 실험 계측 정밀도의 한계상, 용접 토우부나 균열 선단과 같이 기하학적 특이성을 가지고 있는 부위에 대해서는 정확한 정량적 평가를 수행하지 못하였다. 해석에 기초한 평가에 대한 최근의 연구는 송하철(2001)과 Jang et al.(2002)에 의해 수행되었으며, 이 연구는 피로균열의 진전에 따른 잔류응력장의 재분포 현상을 시뮬레이션할 수 있는 용접 열탄소성해석에 기초한 유한요소해석 모델을 개발하고, 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 해석 기법의 타당성을 검증한 바 있으나, 외부 하중에 의한 잔류응력의 이완 특성은 실험 결과의 분석을 통해 이루어졌다.

이러한 연구 현황을 기초로, 본 논문에서는 용접 잔류응력장에서 전파되는 피로 균열진전 특성을 보다 엄밀하게 예측하기 위하여, 초기 잔류응력장의 해석은 물론, 작용하중에 의한 잔류응력의 이완도 평가 및 균열 진전에 따라 재분포되는 잔류응력장의 정량적 평가를 수행하였으며, 박스 필릿(box-fillet) 용접부의 피로균열진전 실험과의 비교 평가를 통해 제안된 해석 기법의 유용성과 정도를 검증하였다.

2. 초기 용접잔류응력의 평가를 위한 열탄소성 해석 모델링

해석 모델은 전술한 바와 같이, 선체 구조 부재

중 피로균열이 빈번히 발생하는 종부재와 횡부재의 결합부를 이상화한 박스 필릿 용접부이며, Fig. 1은 용접 시편의 주요치수를 나타내고 있다.

Table 1은 균열진전해석 대상부인 보강재의 기계적 특성(AH32)으로 인장실험을 통해 구하였으며, Table 2는 시편 제작 시 용접 조건을 보여주고 있다.

초기 용접 잔류응력 산정을 위해 용접 열탄소성 해석을 수행하였으며, 이를 위한 유한요소해석 모델은 시편의 대칭성을 고려한 1/4 모델로서 Fig. 2와 같다. 과도 열탄소성해석을 수행하는데 필요한 온도 의존성 물성치는 기존에 수행된 연구 결과(Jang/Lee 2003)를 참고로 결정하였고, 해석은 상용유한요소해석 코드인 ANSYS를 이용하였다. 유한요소는 8절점의 입체요소(SOLID 70)를 사용하였다.

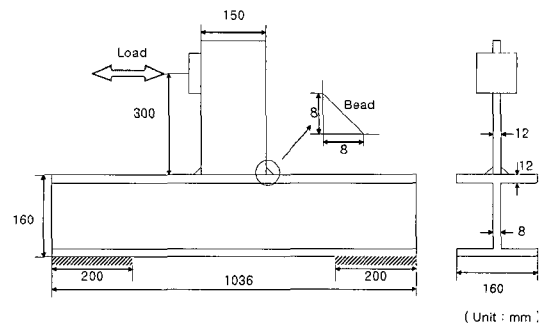


Fig. 1 Details of box fillet welded joint specimen

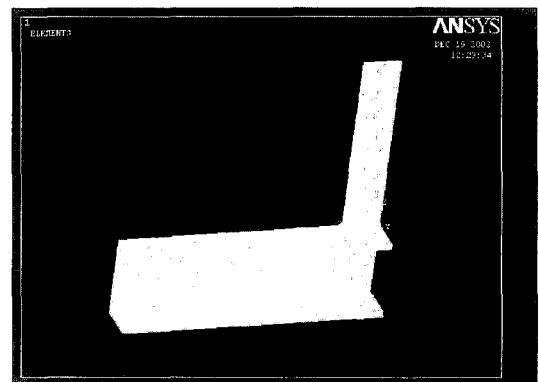


Fig. 2 FE modeling for the thermal elasto-plastic analysis

Table 1 Material properties

Yield strength	Young's modulus	Elongation
320 MPa	206 GPa	29 %

Table 2 Welding conditions

Current	Voltage	Speed	Type
280 A	31 V	372.7 mm/min.	FCAW

과도 열전달 해석에서 용접에 의해 발생하는 열속은 식 (1)과 같이 산정하였으며, 해석시 사용된 열원은 실제 용접속도 및 용접 순서를 고려하여, 각각의 해석 단계에 해당하는 비드 부분의 체적에 단위시간 및 단위체적 당 열속을 투입하는 이동열원으로 모델링하여, 3 차원 열전도 해석을 수행하였다.

$$q_{eff} = \eta \cdot V \cdot I \quad (1)$$

여기서, q_{eff} 는 유효 입열률이고, η, V, I 는 각각 용접 효율, 용접시 전압 및 전류를 나타낸다.

3. 용접 잔류응력의 이완 및 재분포 해석

박스 필릿 용접 체결부에 대한 열탄소성해석 결과로서, 균열 발생 및 진전에 영향을 미치는 성분에 대한 초기 잔류응력의 분포를 살펴보면(Fig. 3), 보강재 부분인 안쪽 토우부(inside toe)에서는 압축 잔류응력이, 형강 부분인 바깥쪽 토우부(outside toe)에서는 인장 잔류응력이 발생하였는데, 이는 기존의 연구 결과(이상갑 등 1999)와 동일한 양상을 보여준다. 이는 부재 내에서 평형 상태를 유지하는 잔류응력의 역학적 특성에 기인한 것으로 분석된다. 외부하중에 의한 용접잔류응력의 이완과 피로균열진전에 의한 용접잔류응력의 재분포 현상을 시뮬레이션하기 위해 개발된 유한요소해석 과정을 상술하면 다음과 같다.

- 온도 의존성 물성치, 용접조건 등을 고려하여 용접부의 초기 잔류응력 분포의 산정을 위한 열탄소성해석을 수행한다.
- 용접 열탄소성해석 후, 외부 하중을 부하하고 제하하는 하중 조건을 부가하여, 이에 대한 추

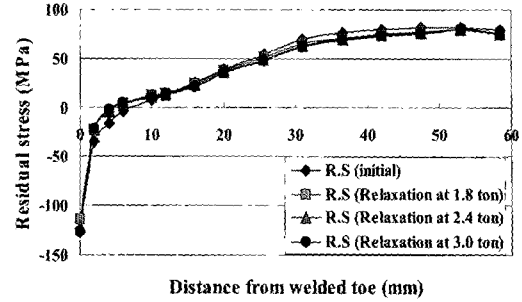


Fig. 3 Initial/relaxed welding residual stresses from FE analysis (inside toe)

가적인 탄소성해석을 통해 잔류응력이 이완되는 정도를 파악한다. 탄소성해석 시에는 bilinear kinematic hardening에 기초한 재료 비선형성을 고려하였다.

- 잔류응력 이완 해석 후, 피로균열이 진전함에 따라 균열 표면이 발생하는 현상은, 균열 표면에 인접한 요소와 경계조건들을 순차적으로 제거되는 방법으로 시뮬레이션하여, 매 균열 길이 별 탄소성해석을 연속적으로 수행하였으며, 이 결과로부터 균열진전에 따라 재분포되는 잔류응력장을 산정한다.

각각의 용접 토우부에서의 초기잔류응력과 이완된 잔류응력분포 결과는 Fig. 3 과 Fig. 4 에 나타나 있다. 해석 결과로부터 인장 잔류응력장에서는 외부하중에 의한 잔류응력의 이완현상이 나타나지만(강성원 등 2001), 압축 잔류응력장이 발생하는 안쪽 토우부에서는 외부하중에 의한 용접잔류응력의 이완현상이 거의 발생하지 않는다.

이러한 현상은, 용접과정에서 높은 수준의 인장 잔류응력이 발생된 용접선 부분에 외부 하중이 부하될 경우, 이 부분만이 국부 항복(yielding)하여 추가적인 소성 변형이 발생되고, 제하 후에 소성 변형으로부터 유발되는 압축잔류응력이 기 발생한 초기 용접 잔류응력과 중첩되는 원인에 의한 것이며, 압축 잔류응력이 발생한 부분은 이러한 국부 항복 현상을 기대할 수 없으므로 압축 잔류응력장에서는 외부 하중에 의한 잔류응력 이완이 거의 나타나지 않는다.

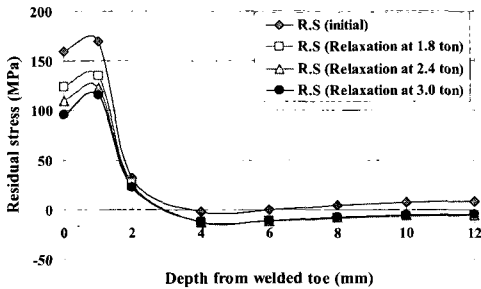


Fig. 4 Initial/relaxed welding residual stresses from FE analysis (outside toe)

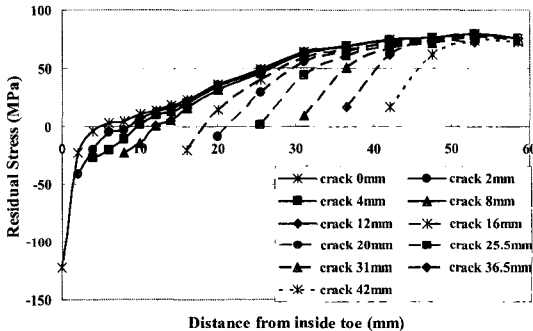


Fig. 5 Result of residual stress redistribution due to crack propagation

Fig. 5 는 실험 하중인 2.4 ton 의 외부 하중이 작용할 때, 균열진전에 따른 용접 잔류응력의 재분포 결과를 보여준다. 결과로서 제시된 Fig. 3 부터 Fig. 5 까지는 기존 연구 결과와 매우 유사한 정성적 특성을 보여준다(이용복/정진성 1997).

4. 해석 결과의 실험적 검증

전술한 바와 같이 용접 잔류응력 이완과 재분포 해석 결과의 비교, 검증을 위해 박스 필릿 용접체 결부에 대한 피로균열진전실험을 수행하였다.

실험 조건 및 방법은 다음과 같다.

실험에 이용된 하중장치는 최대하중 ±50 ton 의 유압식 동하중 장비(hydraulic dynamic actuator) 이고, 적용 하중비는 0, 반복하중의 주파수는 10Hz 로 하였다. 균열 발생 및 진전의 계측은 염색 침투 탐상체를 이용하여 확인하였고,

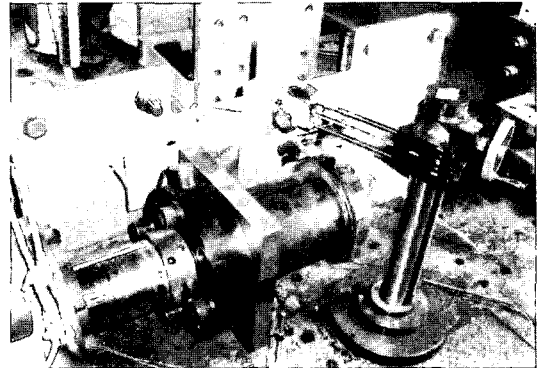


Fig. 6 Fatigue crack propagation test

10⁻⁶m 의 분해능을 갖는 이동식 광학현미경을 이용하여 균열길이를 계측하였다.

특히, 일정 반복수마다 균열길이를 측정하여 균열진전길이에 따른 피로 균열 진전률을 얻었다. 시편 및 실험 장비의 설치는 Fig. 6 과 같다.

4.1 압축 잔류응력에서의 피로균열진전해석

널리 알려진 바와 같이, 피로균열이 안정적으로 성장하는 Paris 영역에서는 선형탄성파괴역학의 주요 파라미터인 응력확대계수(SIF), K 의 개념을 도입함으로써 피로균열진전해석을 수행한다. 이러한 안정 균열 성장을 보이는 영역에서는 반복하중 당 피로 균열 진전률인 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 사이에 식(2)와 같은 관계식(Paris-Erdogan power relationship)이 성립하며, 상수 C 와 m 은 재료 특성치로서 본 연구에 사용된 AH32 의 경우 각각 5.14 × 10⁻¹² 과 3.0 의 값을 갖는다(전유철 등 2001).

이 관계식은 잔류응력장에서 전파하는 피로균열 진전해석 시에는, 균열 진전에 미치는 잔류응력의 효과를 중첩시킨 유효응력확대계수(effective SIF, K_{eff}) 범위의 개념이 도입되어 식 (3)과 같이 수정되어 적용된다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{2}$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \tag{3}$$

실제 균열 진전에 유효한 구동력만을 산정하여 피로균열진전해석에 적용하겠다는 시도로부터 도출된 것이 유효응력확대계수의 개념으로, 이에 따르면 압축 잔류응력장에서는 외부 하중이 일정 수준에 이르기까지 균열 닫힘 현상이 나타나므로, 균열전파 속도에는 균열 개구부분의 응력만이 기여한다는 Elber의 개념에 기반하여 식(4)와 같이 외부하중에 의한 응력확대계수, K_{app} 로부터 균열을 열기 위해 필요한 하중에 상응하는 응력확대계수인 K_{op} 를 빼 줌으로서 유효응력확대계수, K_{eff} 가 산정된다(Jang et al. 2002).

$$\Delta K_{eff} = \Delta K_{app} - \Delta K_{op} \quad (4)$$

본 연구에서 수행된 각각의 응력확대계수 산정 과정을 상술하면 다음과 같다.

먼저 K_{app} 는 전술한 3 차원 열탄소성해석과는 별도로, 추가적인 2 차원 유한요소해석으로부터 도출된 변위장에 기초하여 1/4 point displacement extrapolation 법을 통해 구하였다.

일반적으로 측면균열(side crack)의 경우, K_{app} 의 정해는 많은 문헌에서 제공하고 있으나, 박스 필릿 용접부는 보강재를 지지하고 있는 형강의 강성이나 용접부의 기하학적인 형상이 K_{app} 산정에 영향을 미치게 되므로, 본 연구에서는 형강은 물론 용접부 형상을 정의하는 주요 파라미터인 각장과 프랭크 각도 등을 실 모델 계측 결과에 맞춰 상세 모델링하였고, K_{app} 산정 시 sliding mode (Mode II)도 고려하였다.

해석에 사용한 유한요소는 균열선단의 특이 응력장이 잘 구현되도록 Barsoum(1977)이 제안한 2 차원 quarter point collapsed 요소(PLANE183)를 이용하였으며, 균열선단 주변의 모델링은 Fig. 7과 같다.

두번째로, K_{op} 는 이에 상응하는 하중인 P_{op} 를 산정하여 계산하였다.

P_{op} 는 초기 용접 잔류응력 해석, 균열진전에 의한 용접잔류응력의 재분포 해석 및 외부하중에 의한 용접잔류응력의 이완 해석에 이어, 외부하중을 점진적으로 모델에 적용하면서 탄소성해석을 수행하여, 균열면에 존재하는 균열닫힘 영역이 외부

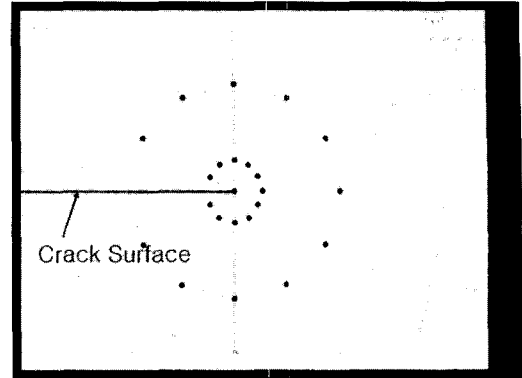


Fig. 7 Position of nodes near crack tip for the evaluation of SIF

하중의 효과와 중첩되어 균열면이 열리게 될 때의 최소 하중으로 결정하였다.

4.2 인장 잔류응력장에서의 피로균열진전해석

인장 잔류응력장에서의 균열진전해석의 경우, 유효응력확대계수, K_{eff} 는 외부작용하중에 의한 응력확대계수, K_{app} 와 잔류응력에 의한 응력확대계수 K_{res} 를 중첩하여 식(5)와 같이 구할 수 있다. 인장 잔류응력을 고려한 응력비 R 은 식(6)과 같고 (전유철 등 2001), 인장 잔류응력장에서의 응력비는 0 보다 크므로, 응력비를 고려한 균열진전을 관계식은 식(7)처럼 바뀌는데 이를 Walker 관계식이라 부른다(Stephens et al. 2001).

$$\Delta K_{eff} = \Delta K_{app} + \Delta K_{res} \quad (5)$$

$$R = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K_{eff})^m}{(1-R)^{m(1-\lambda)}} \quad (7)$$

여기서, K_{res} 는 잔류응력에 의한 유효응력확대계수이고, λ 는 재료상수이며, 그 값은 금속의 경우 0.3에서 1까지의 범위를 갖는데, 해석 대상인 강에 대한 전형적인 값은 0.5이다(Stephens et al

2001).

인장 잔류응력장에서의 응력확대계수 K_{res} 의 계산은 Fett/Munz(1997) 방법에 의해 구하였으며, 이에 따른 식(8)과 같은 가중치 함수(weight function)는 균열면에 단위 하중이 가해졌을 때 균열 선단에서의 응력확대계수로 정의된다.

$$K_{res} = \int_{a_0}^a h(x, a) \sigma(x) dx \quad (8)$$

여기서 a_0 는 slot 길이, a 는 균열의 길이이며 $h(x, a)$ 는 가중치함수이다.

4.3 해석결과

Fig. 8 과 Fig. 9 은 각각 2.4 ton 과 3.2 ton 크기의 외부하중이 작용할 때 유효응력확대계수 개념에 기반한 피로균열진전해석 결과와 피로균열진전실험 결과를 비교한 그래프이다. Table 3 은 균열진전해석 별로 고려된 효과들을 설명하였다.

실험 및 해석 결과를 비교, 검토할 때, 용접잔류응력의 이완 및 재분포 특성을 고려한 해석결과(Analysis III)가 피로균열 진전수명을 보다 정확히 예측함을 알 수 있다.

Table 3 Descriptions of analyses in Fig. 8 and Fig. 9

Effects	Analysis I	Analysis II	Analysis III
Applied load	Included	Included	Included
Initial residual stress	Not included	Included	Included
Residual stress relaxation due to applied load	Not included	Not included	Included
Residual stress redistribution due to crack propagation	Not included	Not included	Included

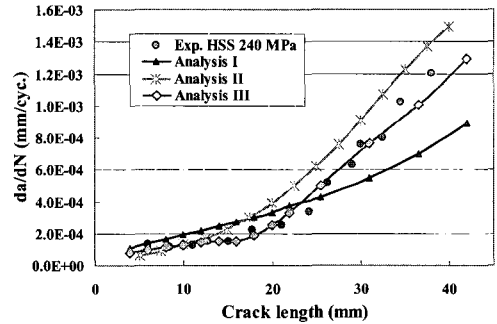


Fig. 8 Comparison of results (HSS, 240MPa)

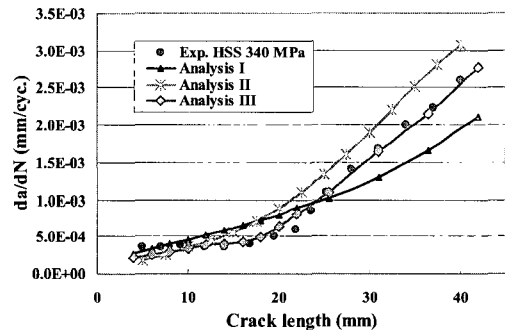


Fig. 9 Comparison of results (HSS, 340MPa)

5. 결론

본 연구에서는 용접잔류응력의 외부하중에 의한 잔류응력의 이완 및 균열진전에 따른 잔류응력의 재분포 특성을 고려한 피로균열진전 해석을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

- 해석 대상 모델에 대해 온도의존성 물성치를 고려한 용접 열탄소성해석을 수행하여 초기 용접 잔류응력분포를 얻었으며, 용접잔류응력의 이완 및 재분포 현상을 시뮬레이션할 수 있는 유한요소해석 기법을 제안하였다.
- 용접잔류응력의 영향을 고려한 유효응력확대계수 개념을 이용하여 피로균열진전에 대한 정량적 해석을 수행하였고, 해석 결과와 실험 결과의 비교를 통해 해석 결과의 유용성을 검증하였다. 용접잔류응력의 이완 및 재분포를 고려한

해석결과는 용접 체결부 피로균열 진전수명 예측에 보다 정확함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 2004 년도 차세대 성장동력 핵심연구개발사업 위탁과제의 일부로 수행되었으며, 관계기관의 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

- 강성원, 김영옥, 김화수, 김도현, 2001, " Padding plate 용접구조의 인장 정하중 이력에 의한 용접잔류응력 변화 및 피로강도에의 영향," 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 4 호, pp. 75-82.
- 송하철, 2001, 국부가열을 이용한 관통균열을 가진 강판의 피로수명 연장에 관한 연구, 공학 박사학위논문, 서울대학교.
- 이상갑, 이윤기, 김화수, 김도현, 1999, " 잔류응력이 피로수명에 미치는 영향," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 390-393.
- 이용복, 정진성, 1997, " 용접재의 잔류응력 재분포와 피로거동," 대한용접학회지, 제 15 권, 제 3 호, pp. 20-28.
- 전유철, 김유일, 강중규, 한종만, 2001, " 피로실험 및 균열진전 해석을 통한 용접부의 피로수명 예측에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 3 호, pp. 93-106.

- Barsoum, R.S., 1977, " Triangular Quarter-Point Elements in Linear Fracture Mechanics," International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 11, pp 85-98.
- Fett, T. and Munz, D., 1997, Stress Intensity Factors and Weight Functions, Computational Mechanics Publications.
- Jang, C.D. and Lee, C.H., 2003, " Prediction of Welding Deformation of Ship Hull Blocks," Journal of Ship & Ocean Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 41-49.
- Jang, C.D., Song, H. C. and Lee, C.H., 2002, " Fatigue Life Extension of a Through-Thickness Crack Using Local Heating," International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 223-228.
- Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R. and Fuchs, H.O., 2001, Metal Fatigue in Engineering, 2nd ED, Wiley Inter-Science, pp. 156-157.



< 송 하 철 >



< 조 영 천 >



< 장 창 두 >