

# 구조응력을 이용한 하중 전달형 십자 양면 비대칭 필렛 용접 시험편의 피로강도 평가

김성민\* · 김영남\*\* · 이승현\*\*\* · 김명현\*†

\*부산대학교 조선해양공학과

\*\*STX조선해양

\*\*\*성동조선해양

## Fatigue Assessment of Load-carrying Asymmetric Double Bevel Cruciform Welded Joints using Structural Stress Approach

Seong-Min Kim\*, Young-Nam Kim\*\*, Seung-Hyun Lee\*\*\* and Myung-Hyun Kim\*†

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

\*\*STX Offshore & Shipbuilding Co., Ltd. Changwon 645-703, Korea

\*Sungdong Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Tongyeong 650-827, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received November 8, 2012 ; Revised December 17, 2012 ; Accepted December 31, 2012)

### Abstract

Fatigue tests and analyses were carried out to investigate fatigue strength and crack initiation point of load-carrying asymmetric double bevel cruciform welded joints. Mesh-insensitive structural stress approach was adopted to estimate high precise fatigue life and crack initiation point. Two different case material and weld shape were considered in this study. Results of fatigue tests and analyses were compared and discussed in consideration of applicability of structural stress approach as the reliable fatigue assessment method of cruciform welded joints.

Key Words : Cruciform welded joint, Structural stress, Fatigue strength, Root crack

### 1. 서 론

다양한 구조물에 다양하게 적용되는 십자형 필렛 용접부는 불완전용입에 의한 루트 균열의 가능성을 가지고 있으므로 고정밀의 피로수명 예측을 필요로 한다. 필렛 용접부에 반복적인 하중이 가해지게 될 경우 용접 루트부 혹은 토우부에서 균열이 발생하게 되는데, 일반적으로 루트 균열의 경우 육안으로 식별이 불가능하여 대부분 토우파괴를 유도하는 용접부 설계를 지향한다.

십자형 필렛 용접부의 피로수명 예측 방법은 다양한 방법의 실험 및 해석을 통해 꾸준히 연구되어 왔다.

Maddox<sup>1)</sup> 및 Hobbacher<sup>2)</sup> 등에 의해 소개된 응력확대계수 (SIF, Stress Intensity Factor)를 이용한 방법

에 의한 방법<sup>3)</sup> 및 유효노치응력법<sup>4)</sup> (Effective Notch Stress)이 루트 균열을 고려한 필렛 용접부의 해석방법으로 주로 사용되고 있다. 그 밖에 광학장비를 이용한 응력확대계수 측정을 수행한 경우도 있다<sup>5)</sup>.

Kainuma<sup>6-7)</sup> 등은 다양한 실험을 바탕으로 용접부 형상, 용입 깊이 등을 고려한 경험식을 제시하였으며, 다른 두께를 가지는 두 개의 판을 용접한 하중전달형 필렛 용접부의 피로 강도 평가를 수행하기도 하였다. 필렛 용접으로 만들어진 Box형 용접구조물의 피로강도 평가를 위하여 실험적 방법에 의한 구조응력 기법을 적용하기도 하였다<sup>8)</sup>.

수치해석적 방법을 이용한 십자 필렛 용접부는 핫스팟 응력방법, 응력확대계수, 유효노치응력 등의 방법을 주로 이용하고 있으나, 핫스팟 응력방법의 경우 루트균

열에 대한 고려가 불가능하며, 응력확대계수, 유효노치 응력법은 세밀한 유한요소 모델링이 필요하여 해석결과를 얻기까지 많은 시간이 필요하다. 또한 설계 변경 등의 이유로 재계산을 수행할 경우 다시 세밀한 요소 모델링이 필요하여 즉각적인 해답을 얻기가 어렵다.

반면, 최근 소개된 구조응력 기법<sup>9-10)</sup>은 요소크기에 따른 결과의 편차가 크지 않으며, 비교적 간단한 모델링으로 신뢰도 높은 피로해석 결과를 나타내며 루트 균열의 해석도 가능한 것으로 알려져 있다<sup>11)</sup>. 구조응력을 사용한 피로해석은 국내에서도 다양한 해석을 통해 알려져 있다<sup>12-13)</sup>.

구조응력 방법의 사용은 고정밀 수명평가를 위하여 다양한 용접 시험편 및 구조물에 적용이 되어 왔다. 본 연구에서는 구조응력 기법을 이용하여 비대칭 하중전달형 십자 필렛 용접부의 균열 발생 위치 추정 및 피로수명 평가를 통하여 구조응력 기법의 용접부 피로수명 평가 및 용접 설계 적용 가능성에 대해 알아보았다.

## 2. 피로 시험

### 2.1 피로시험편 및 시험조건

본 연구에서는 각기 다른 주판과 삽입판의 두께를 가진 두 가지 시험편에 대해서 실험하였다. Fig. 1 에는 ATOS70 강재를 이용하여 주판 16 mm, 삽입판 14 mm가 사용

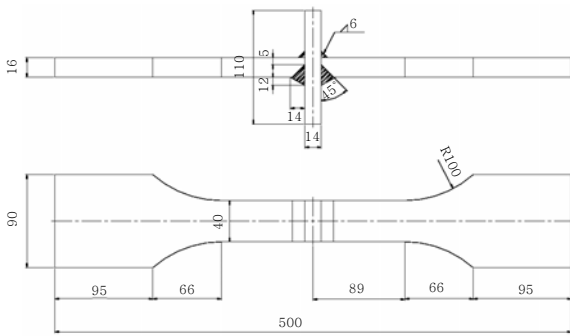


Fig. 1 ATOS70 steel test specimen

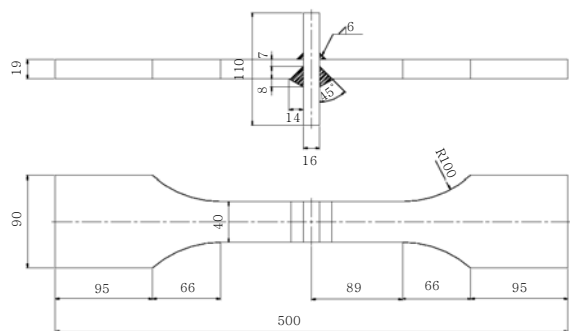


Fig. 2 SM490A steel test specimen

Table 1 Mechanical properties

	Y.S. [MPa]	T.S. [MPa]	Elong. [%]
ATOS70	620	700	33
SM490A	215	490	25

되었으며, Fig. 2에는 SM490A 강재를 이용한 주판 19 mm, 삽입판 16 mm의 시험편 도면을 나타내었다.

이런 형태의 비대칭 용접부는 주로 굴삭기와 같은 박스형 용접구조물에서 주로 발견할 수 있으며, 박스형 내부의 용접이 용이하지 않아 완전 용입 용접이 어려워 루트 균열에 의한 피로 파손의 가능성이 매우 높다.

Table 1에는 두 가지 시험편에 사용된 ATOS70 및 SM490A 강재의 재료 물성치를 나타내었다.

본 연구에 사용된 피로시험기는 Instron사의 8803 모델로 최대용량 ±50 ton, 최대변위 ±120 mm, 최대주파수 50 Hz의 축인장 압축 유압 서보 시험기이다. 피로하중의 파형은 정현파를 사용하였으며, 응력비는 0.1로 고정하여 시험하였다. 시험에 사용된 주파수는 응력을 고려하여 5~10Hz의 주파수를 사용하였으며, 피로한도는 일반적인 강재의 기준인  $2 \times 10^6$  cycle로 시험하였다.

본 연구에서 사용된 하중 전달형 십자 양면 비대칭 필렛용접 시험의 개수는 SM490A 강재 21개, ATOS70 강재 18개로 총 39개의 시험편에 대한 피로시험을 수행하였으며, 파단 수명은 피로시험편이 완전히 파단되어 분리되는 시점의 반복수로 정의하였다.

### 2.2 피로시험 결과 및 파단사진

두 가지 시험편의 피로 시험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 주판의 두께인 ATOS70 강재의 16 mm, SM490A 강재의 19 mm를 기준으로 응력집중을 고려하지 않은 공칭응력 대비 피로수명의 S-N선도로 표시하였다.

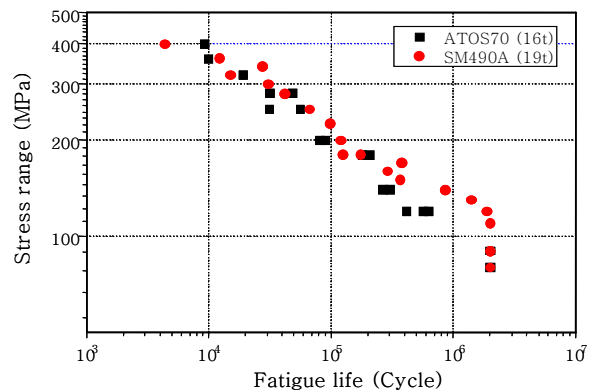


Fig. 3 Fatigue test result

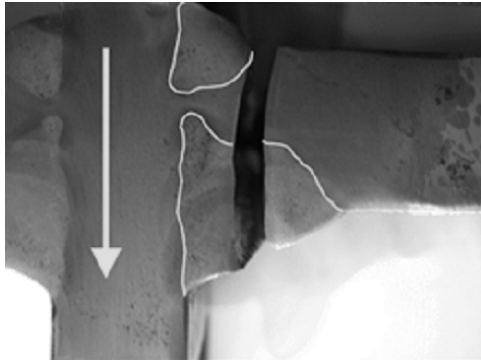


Fig. 4 Failed specimen of SM490A

두 가지 시험결과를 바탕으로 한 피로선도를 식 (1), (2)와 같이 각각 나타내었다.

$$\text{ATOS70} : \log N_f = 13.01 - 3.48 \log \Delta\sigma \quad (1)$$

$$\text{SM490A} : \log N_f = 15.67 - 4.56 \log \Delta\sigma \quad (2)$$

균열발생 위치는 SM490A 강재의 경우 응력 집중이 발생한 1 pass 토우부에서 균열이 발생, 전파하여 파단에 이르렀고, ATOS70 강재의 경우 토우부와 루트부에서 발생한 균열이 각기 전파되어 파단에 이르렀다. Fig. 4에서는 SM490A 강재의 대표적인 파단사진 및 균열 진전 방향을 나타내었다.

Fig. 5에는 ATOS70 강재 시험편의 대표적인 파단 사진 두 가지를 나타내었다. Fig. 5 (a)와 같은 토우부 균열에 의한 파단 및 Fig. 5 (b)와 같은 토우부, 루트부 균열이 동시에 발생하는 혼합 파괴모드가 나타났다.

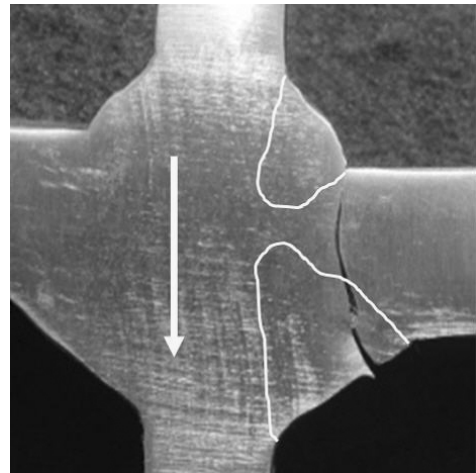
### 3. 구조응력을 이용한 피로강도 평가

#### 3.1 구조응력 기법

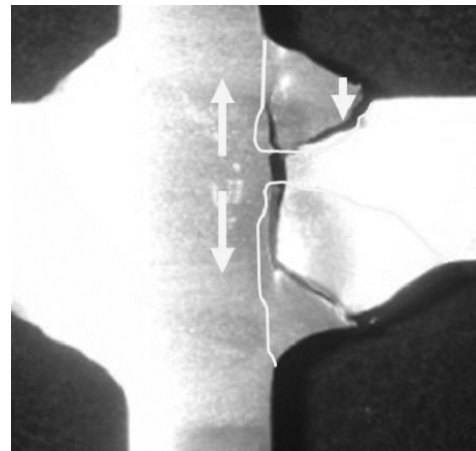
용접 토우부에서 판 두께 방향으로 발생하는 응력 구배는 구조 부재 및 용접 비드에 의해 발생하는 기하학적 불연속 및 노치에 의한 응력 특이성 등으로 Fig. 6 과 같이 생성된다.

이러한 응력 구배를 Fig. 7에서와 같이 기하학적 불연속에 의해 발생하는 선형 성분과 비드부 노치 효과에 의해 발생하는 비선형 노치 성분으로 구분할 수 있으며 이 때 전자의 경우와 같이 작용되는 하중에 대한 역학적 평형 조건으로 설명이 가능한 부분을 구조응력(Structural stress,  $\sigma_s$ )으로 정의할 수 있다.

정의된 구조응력은 막응력 (Membrane stress,  $\sigma_m$ ) 과 굽힘응력 (Bending stress,  $\sigma_b$ )성분의 합으로 표현할 수 있다. 비선형 노치성분의 경우 두께, 작용하는



(a) Toe crack failure



(b) Mixed crack failure

Fig. 5 Failed specimen of ATOS70

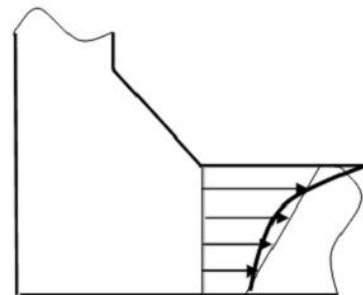


Fig. 6 Stress profile at weld toe

하중모드, 균열 형태에 대해 노치의 영향이 있는 균열 진전모델을 이용하여 구할 수 있으며 최종적으로 피로 수명 산정에 사용된다.

4절점 요소를 이용하여 계산 할 경우 유한요소 해석 결과인 nodal force로부터 nodal moment를 구한 후 역학적 평형조건을 이용하여 line force와 line moment를 계산 할 수 있다. 이로부터 식(3)과 같이 구조응력 계산이 가능하다.

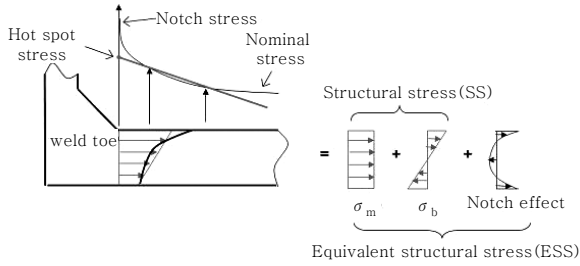


Fig. 7 Structural stress definition

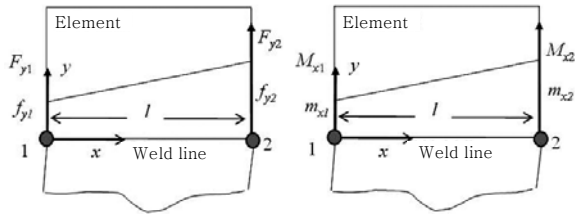


Fig. 8 Local line force and moment from nodal forces and moments for 4 node shell element

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y}{t} + \frac{6m_x}{t^2} \quad (3)$$

### 3.2 균열위치 파악

시험편 모델의 유한요소해석을 위하여 4절점 2D plane strain 요소를 사용하여 Fig. 9와 같이 모델링하여 임의의 하중을 가하여 계산하였다.

시험편의 피로균열 발생 가능 위치를 Fig. 10에서와 같이 SS\_1~4로 나타내었다. 토우 균열 2 곳과 루트부에서의 두 가지 방향의 균열을 고려하여 총 4 가지의 균열 발생 위치 및 균열 전파 방향을 결정하였다. 유한요소해석 상의 루트부의 고려는 해당 절점을 공유시키지 않는 방법을 사용하였으며, 루트 간격을 고려하여 모델링 하였다.

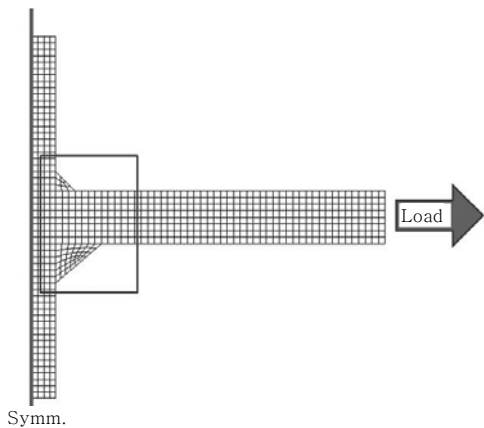


Fig. 9 Finite element modeling

또한 요소크기에 의한 구조응력 해석 값의 영향을 파악하기 위하여 Fig. 11, 12에서와 같이 각각 약 1 mm, 2 mm 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 요소 크기 약 2 mm 는 해당 용접부의 기하학적 형태를 표현 할 수 있는 최대의 요소크기이다.

Fig. 13에 구조응력을 이용한 응력해석 결과를 나타내었다. 임의의 하중을 가하여 계산된 구조응력 해석 결과는 용접부의 기하학적 불연속에 의한 응력집중이

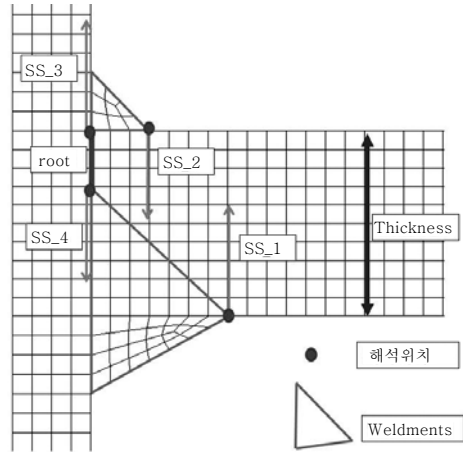


Fig. 10 Possible four points for fatigue crack initiation

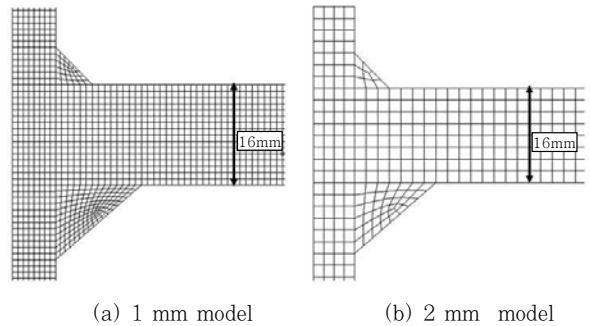


Fig. 11 Finite element modeling of ATOS70 specimen

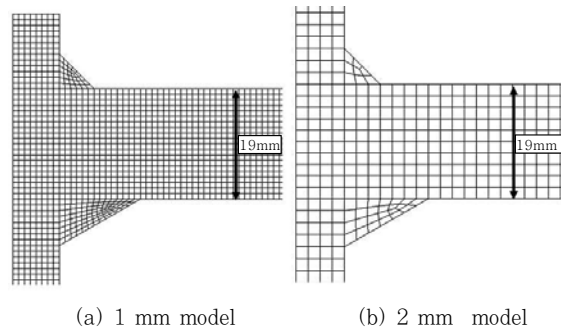


Fig. 12 Finite element modeling of SM490A specimen

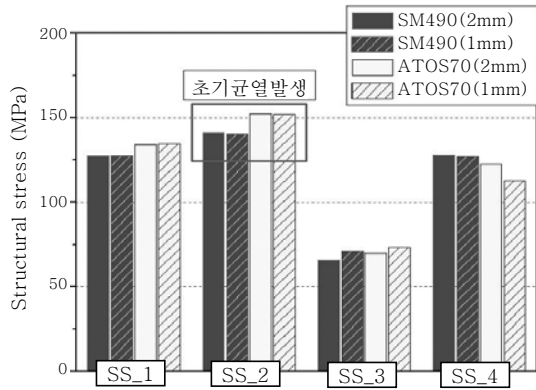


Fig. 13 Structural stress results with respect to possible crack points

다. 해석결과는 SS\_2 위치에서 가장 높은 응력이 발생하였으며 이 위치를 피로 균열 발생 가능성이 가장 높은 위치로 판단할 수 있다.

동일한 모델을 노치응력방법으로 해석 한 경우<sup>11)</sup> 역시 SS\_2번 위치에서 가장 높은 노치 계수를 나타내었으며, 역시 해당 위치에서의 피로 균열 발생 가능성이 큰 것으로 해석되었다. SM490A 강제 시험편의 경우 Fig. 4에서와 같이 토우부에서 발생한 균열이 판 두께 방향으로 진전하여 파단에 이르러 해석결과와 일치하는 경향을 보였으나, ATOS70의 경우는 해석과는 일부 차이가 나는 결과를 보였다.

ATOS70 시험편의 해석 결과에서 구조응력 해석 결과가 가장 높게 나타나는 SS\_2 위치와 SS\_1, SS\_4의 위치에서의 결과는 각각 약 10%, 20%의 비교적 적은 차이를 나타내고 있다. 이는 균열발생 가능성이 가장 높은 SS\_2 뿐만 아니라 SS\_1 및 SS\_4 에서도 균열 발생 가능성이 어느 정도 내재되어 있다고 해석할 수 있다.

Fig. 5 (a)에 나타낸 것과 같이 SM490A 용접 시험편과 같은 형태인 SS\_2번에서의 토우 균열에 의한 파단과, Fig. 5 (b)와 같은 SS\_2번에서의 토우 균열 및 SS\_3, 4번에서의 루트 균열 등이 혼재된 혼합파괴 양상을 가진 두 가지 파단양상이 나타났다. 다만, SS\_3 위치에서의 루트부에 발생한 초기균열로 인해 파단에 이른 시험편은 나타나지 않았으며, 이는 이상적인 상황을 가정하는 해석과는 달리 제작 시 발생하는 시험편 치수의 편차에 의한 것으로 판단된다.

요소크기 1 mm, 2 mm에 따른 구조응력 해석 결과는 5% 미만의 매우 잘 일치하는 결과를 나타내었다. 이는 응력확대계수, 노치응력방법을 이용한 해석과 비교하였을 때 구조응력 기법을 이용한 해석은 모델링 시 간을 절약할 수 있는 이점이 있다.

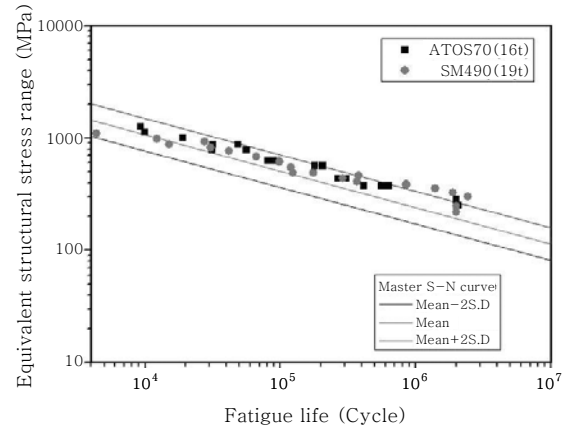


Fig. 14 S-N curve based on equivalent structural stress

### 3.3 등가구조응력을 이용한 피로수명 평가

3.1 절에서 설명한 바와 같이 비선형 노치성분에 영향을 미치는 판 두께, 하중모드, 균열 형태를 고려하여 식(4)와 같이 등가구조응력(Equivalent structural stress,  $\Delta S_{eq}$ )을 계산할 수 있다.

$$\Delta S_{eq} = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{2m} I(r)^m} \quad (4)$$

계산된 등가구조응력은 단일 S-N 선도에 비교하여 수명을 예측할 수 있다.

등가구조응력을 이용한 피로수명 계산은 항복응력 180 MPa ~ 600 MPa 까지의 범위의 강재에 대하여 동일하게 적용이 가능하여 본 연구에서는 강재의 기계적 물성치에 따른 고려를 하지 않았다.

등가구조응력 대비 수명 그래프를 Fig. 14에 나타내었다. Mean master S-N 선도를 기준으로 2 standard deviation 이내 에 들어오는 결과를 보였으며 이는 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 보여준다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 ATOS70, SM490A 강재를 이용한 두 가지 하중전달형 비대칭 십자 양면 필렛 용접부에 대하여 실험 및 구조응력기법을 이용하여 초기 균열 발생 위치 예측 및 피로수명 계산을 수행하였다.

1) 구조응력 기법을 이용한 초기균열 발생위치 예측은 균열 발생 가능 위치 중 구조응력 해석 값이 가장 높게 나타나는 지역으로 예상할 수 있다. 시험편 제작 정도가 좋은 SM490A와 노치응력해석 결과와는 잘 일

치하는 결과를 보여주었다. 시험편 제작의 편차가 심한 ATOS70 강재의 시험 결과와 해석 결과는 파손 모드에 있어서 경향성은 일치하나 제작오차에 의한 영향으로 완벽한 일치는 보여주지 않았다. 하지만 실제 구조응력을 이용한 용접부 설계시 높은 응력대를 보이는 위치에서의 균열 발생 가능성에 대해서는 충분히 고려하여야 할 것이다. 비교적 큰 요소를 사용하여 해석을 수행할 수 있는 구조응력방법은 용접부 설계 시 루트 균열 방지를 위한 신속한 결과 도출에 도움이 될 것으로 판단된다.

2) 요소크기를 달리한 구조응력 해석 결과는 요소크기에 따른 편차가 5% 미만으로 매우 잘 일치하는 결과를 보여주었다. 요소크기 및 형상에 제한을 받는 다른 해석 기법과는 달리 비교적 자유로운 요소의 형태 및 크기에 따른 해석결과의 편차가 적은 구조응력 기법은 해석 시간의 절감이 가능하다.

3) 등가구조응력을 이용한 피로수명 예측은 실험 결과와 해석결과가 서로 잘 일치하였으며, 등가구조응력을 이용한 고정밀의 신뢰도 높은 피로수명 예측이 가능하리라 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0016804)

## 참 고 문 헌

1. S.J. Maddox : An analysis of fatigue cracks in fillet welded joints, *International Journal of Fracture*, **11-2** (1975), 221-243
2. A. Hobbacher : Stress intensity factors of welded joints, *Eng Fract Mech*, **46-2** (1993), 173-182
3. Myung Hyun Kim, Sung Won Kang, Hyoung Rae Kim : A Study on the Fatigue Life Assessment for Load-carrying Fillet Welded Joints using Stress Intensity Factor, *Journal of KWJS*, **26-6** (2008), 641-646 (in Korean)
4. W. Fricke : Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for welded Structures, *International Institute of Welding IIW-Doc. XIII-2240r2-08/XV1289r2-08*, 2010
5. H.Y. Chung, S.H. Kiu, R.S. Lin, S.H. Ju : Assessment of stress intensity factors for load-carrying fillet welded cruciform joints using a digital camera, *International Journal of Fatigue*, **30-10~11** (2008), 1861-1872
6. S. Kainuma, T. Mori : A fatigue strength evaluation method for load-carrying fillet welded cruciform joints, *International Journal of Fatigue*, **28-8** (2006), 864-872
7. S. Kainuma, I.T. Kim : Fatigue strength evaluation of load-carrying fillet-welded joints made with mild steel plates of different thickness, *International Journal of Fatigue*, **27-7** (2005), 810-816
8. Sung-Won Kang, Myung-Hyun Kim, Yong-Won Jang, Jin-Woo Lee : Fatigue Strength Evaluation of Welded Box Type with HR Coil, *Journal of KWS*, **23-5** (2005), 428-432 (in Korean)
9. 2007 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Div.2, ASME, 2007
10. API Standard 579-1/ASME FFS-1 Fitness for Service, API, 2007
11. J.K. Hong : Evaluation of Weld Root Failure Using Battelle Structural Stress Method, *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2010, 73-80
12. Chung-In Ha, Sung-Won Kang, Myung-Hyun Kim, Man-Soo Kim, Sang-Yong Sohn, Joo-Ho Heo : A Study on the Fatigue Strength Evaluation for Fillet weldment including Stress Singularity using Structural Stress with Virtual Node Method, *Journal of KWS*, **24-3** (2005), 233-239 (in Korean)
13. Myung Hyun Kim, Sung Won Kang, Jeong Hwan Kim, Seong Min Kim, Kwang Seok Kim, Joong Kyoo Kang, Joo Ho Heo : The Application of Structural Stress Method for the Fatigue Strength Assessment of Longi-web Connections, *Journal of SNAK*, **45-1** (2008), 81-86 (in Korean)
12. Ho-Jung Kim, Sung-Won Kang, Myung-Hyun Kim : Fatigue Strength Assessment of Load Carrying Asymmetric Double Bevel Cruciform Welded Joints Made with high Strength Steel, *Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK, 2010*, 1270-1275 (in Korean)