

## 십자형 용접 시편의 3차원 용접 잔류응력 분포 예측에 관한 연구

유미지\* · 이장현\*\*† · 황세운\* · 김경수\*\* · 김성찬\*\*\*

\*인하대학교 대학원 조선해양공학과

\*\*인하대학교 기계공학부 조선해양공학과

\*\*\*인하공업전문대학 선박해양시스템과

### A Study of Predicting 3-dimensional Welding Residual Stresses Distribution for T-joint Fillet Specimen

Mi-Ji Yoo\*, Jang-Hyun Lee\*\*†, Se-Yun Hwang\*, Kyung-Su Kim\*\* and Sung-Chan Kim\*\*\*

\*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha Univ., Incheon 402-020, Korea

\*\*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 402-020, Korea

\*\*\*Dept. of Ship and Ocean System, Inha Technical College, Incheon 402-020, Korea

†Corresponding author : jh\_lee@inha.ac.kr

(Received December 17, 2009 ; Revised January 4, 2010 ; Accepted February 23, 2010)

#### Abstract

Fillet welding accounts for about 80% of all constructing process of ship and ocean structure. T-joint is one of the typical shapes which are frequently reported to experience the fatigue damage when the marine structure meets the storm loads. The fatigue damage is affected by the magnitude of residual stresses on the weld. Recently, many shipping registers and design guidances have required that the fatigue strength assessment method should be compensated by the effect of the residual stress in case that the random loading or storm loading is applied to the marine vessels. This study suggests the computational procedure to analyze the residual stresses of T-joint specimen that is frequently reported to get damaged by the storm loading. Experiment by XRD as well as the 3-D computational welding model is presented in order to get the profile of residual stress. Throughout the comparison of experimental result with the computational result, the computational model was validated. Thereafter, characteristics of the residual stresses in the joint are discussed..

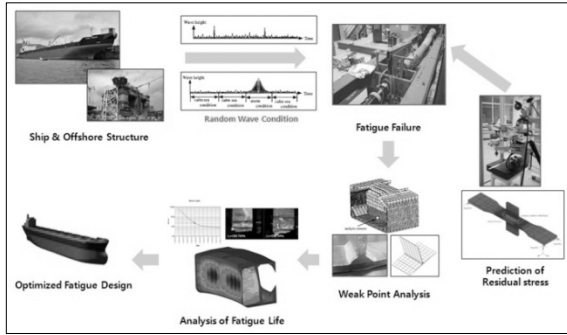
Key Words : Welding, Residual stress, Fatigue damage, FEA, XRD, T-joint, Extreme storm load

#### 1. 서 론

선박 및 해양 구조물의 조립에서 Fillet 용접은 약 80% 이상을 차지하고 있다<sup>1)</sup>. 용접 구조물에서 피로균열의 70% 이상이 용접 이음부에서 발생하며 많은 종류의 용접부 중 피로균열의 80%는 이음 형식이 복잡한 Fillet 용접부에서 대부분 발생한다고 보고되고 있다<sup>2)</sup>. Fillet 용접부의 피로파괴는 용접 토우부와 루트부에서 발생된 초기 피로균열의 발생 및 전파의 특성에 지배되며 이러한 피로균열의 특성은 용접부의 잔류응력

범위에 따라 큰 영향을 받는다<sup>3)</sup>. 이러한 용접부의 피로균열 진전 수명을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 용접에 의한 잔류응력이 피로 강도에 미치는 영향을 반드시 고려해야 할 필요가 있다는 것은 일반적인 사실이다<sup>4)</sup>.

선박 해양 구조물에서 발생하는 피로 균열에 의한 손상 사례 중 상당한 비율은 불규칙 변동(random)하중 및 폭풍(storm)하중에 의하여 발생하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 최근 들어 각 선급은 불규칙 변동 하중을 받는 부재를 설계 하기 위해서는 잔류응력 분포를 고려한 피로 수명 예측 결과를 요구하고 있다. 이 과정을 Fig. 1에 간단하게 나타냈다.



**Fig. 1** Frequently damaged by fatigue induced by the storm load in marine vessels

잔류응력을 고려한 용접구조물의 피로수명 평가는 주로 파괴역학 기법에 의해 수행되었으며 실험 및 열탄소성 해석에 의해 계산된 잔류응력 정보를 바탕으로 구조응력법 또는 핫스팟 응력법을 이용하여 피로 수명을 평가하는 방법을 채택하고 있다<sup>5)</sup>.

본 연구에서는 폭풍 하중 및 불규칙 변동하중을 받는 선박 및 해양 구조물에서 피로 손상이 가장 많이 보고되는 T-joint Fillet부의 피로수명 예측을 위한 선행 연구로서 잔류 응력 예측을 위한 열탄소성 계산 과정을 제시하고자 하였다.

이를 위하여 제작된 시편에 대하여 X-Ray 방법을 이용하여 잔류 응력을 계측하였고 3차원 열탄소성 해석을 수행하였다. 실험 결과에 유한요소 해석의 결과를 비교함으로써 해석 결과의 타당성을 검증한 후 3차원 잔류응력의 분포 특성을 파악하였다.

## 2. XRD 잔류 응력 계측

### 2.1 재료 및 시험편

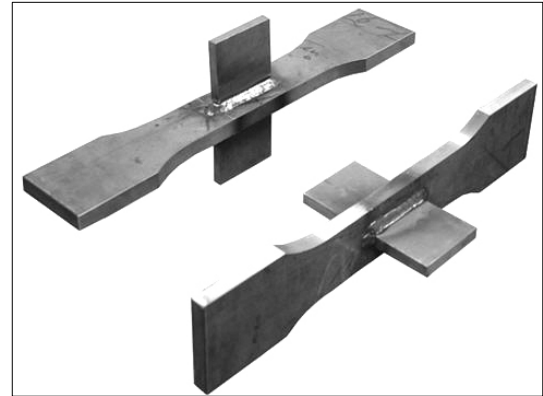
본 연구에서 사용된 시편의 재료는 선체 부재에 주로 이용되는 고장력 강재인 AH32 를 사용하였고, 이 재료의 화학적인 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 같다. 또한 용접봉은 직경 1.2mm인 일본 고베사의 DW-55LSR을 사용하였으며 용접봉의 화학적인 성질과 기계적인 성질은 각각 Table 2와 같다. 시험편의 형상은 Fig. 2에서와 같이 십자형 Fillet 용접 시편이

**Table 1** Chemical and mechanical component of AH 32

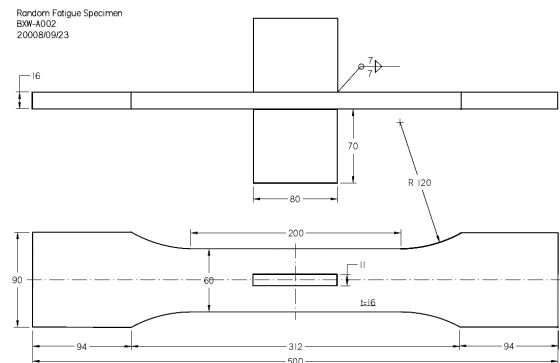
|                   |      |      |      |      |         |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|---------|------|------|
| C                 | Si   | Mn   | P    | S    | Ni      | Cu   | Mo   |
| 0.15              | 0.14 | 0.91 | 0.19 | 0.44 | 0.01    | 0.02 | 0.02 |
| Yield Strength    |      |      |      |      | 310 MPa |      |      |
| Ultimate Strength |      |      |      |      | 500 MPa |      |      |

**Table 2** Chemical and mechanical component of DW-55LSR

|                       |      |      |         |       |     |
|-----------------------|------|------|---------|-------|-----|
| C                     | Si   | Mn   | P       | S     | Ni  |
| 0.04                  | 0.36 | 1.37 | 0.008   | 0.008 | 1.4 |
| Offset Yield Strength |      |      | 550 MPa |       |     |
| Tensile stress        |      |      | 585 MPa |       |     |



**Fig. 2** Geometric configuration of specimen



**Fig. 3** Dimensional detail of specimen

**Table 3** Welding condition of FCAW

| Welding Condition |     |
|-------------------|-----|
| Current (A)       | 230 |
| Voltage (V)       | 27  |
| Speed(Cm/min)     | 50  |
| Arc Efficiency(%) | 80  |

며, 시편의 치수는 Fig. 3에 나타내고 있다.

본 시편에 사용된 용접은 1-pass FCAW (Flux Cored Arc Welding) 방법이 사용되었으며, 사용된 FCAW의 전류, 전압, 용접속도 및 용접 효율은 Table 3에 정리하였다.

### 2.2 잔류 응력 계측

본 연구에서는 잔류응력 측정 방법으로써 X-Ray Diffraction(XRD) 방법을 이용하였다.

XRD 방법은 현재까지 알려진 비파괴적 잔류응력 측정법 중 가장 신뢰도가 높은 방법이다<sup>6)</sup>. XRD 측정 방법은 청결하고 균일한 시편표면을 요구하기 때문에 잔류응력의 신뢰성을 확보하기 위하여 시편의 표면을 화학 부식하여 표면상태가 균일하도록 처리한 후에 잔류응력 측정을 수행하였다. 장비의 계측 한계성에 의하여 시편을 Fig. 4와 같이 가공 절단 하였으며 절단에 의한 응력 변화 효과를 최소화 하기 위하여 절단부와 가장 먼 위치의 모퉁이 돌리기 용접 토우 부분에서 시편의 종방향으로의 10개 point에서 종방향 응력( $\sigma_{xx}$ )을 측정하였다. 각 point 위치에서의 응력값은 Table 4와 Fig. 5에 정리하였다.

### 3. 3차원 용접 유한요소 해석

국부적인 고온 가열로 발생한 열 응력 및 열 변형률에 의해 나타나는 인장 및 압축 잔류응력은 용접 구조물의 피로수명 단축 및 좌굴발생을 일으키는 주요 원인으로 분석되고 있으며 특히 인장 잔류응력의 수준이 구조물 모재의 항복응력에 도달하거나 이를 초과하게 되



Fig. 4 Configuration of specimen and the measurement points

Table 4 Measured residual stresses

| NO. | measurement location (mm) | $\sigma_{xx}$ (MPa) |
|-----|---------------------------|---------------------|
| 1   | 0                         | 302                 |
| 2   | 5                         | 169.4               |
| 3   | 10                        | 26.3                |
| 4   | 15                        | -70.0               |
| 5   | 20                        | -62.9               |
| 6   | 30                        | -31.0               |
| 7   | 40                        | 1.6                 |
| 8   | 60                        | -1.1                |
| 9   | 80                        | 1.4                 |
| 10  | 100                       | -2.0                |

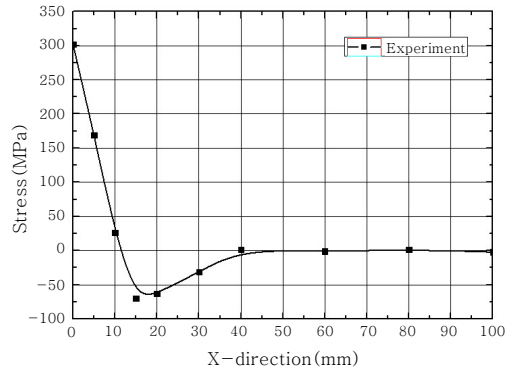


Fig. 5 Longitudinal stress along length direction

면 구조물의 피로수명은 급격하게 저하된다<sup>7)</sup>. 따라서 용접 구조물의 피로수명을 정확하게 예측하기 위해 잔류응력을 정확하게 분석해야 한다. 본 연구에서는 상용 코드인 MARC를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

### 3.1 유한요소 모델

용접 시뮬레이션은 열원의 진행에 따른 각 time step에 따라 열전달 해석 및 탄소성 해석이 진행되기 때문에 시간 증분(increment) 계산을 필요로 한다. 따라서 용접단계의 시간 증분은 충분한 열전달을 고려하여 0.25sec/1step으로 가정하였으며 냉각단계 시간의 증분은 5sec/1step 으로 가정하였다. 또한 용입재 생성시 1 step에 평균  $\pm 20^\circ\text{C}$ 의 온도 변화를 보였다. 시편의 온도 변화에 따른 비선형 해석의 수치해석 기법으로는 Newton-Raphson 방법을 사용하였으며 열 확산 방정식의 유한요소 모델 시간 적분에는 1차 후진 차분 (Backward difference)법을 적용하였다.

전체 모델은 Fig. 6에 보이는 바와 같으며 용접 부를 중심으로 요소를 세부적으로 분할 후 용융부에서 멀어질수록 요소의 크기를 증가 시켰다. 사용된 모델의 요

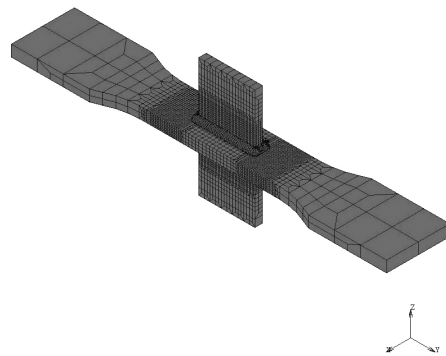


Fig. 6 Finite element mesh

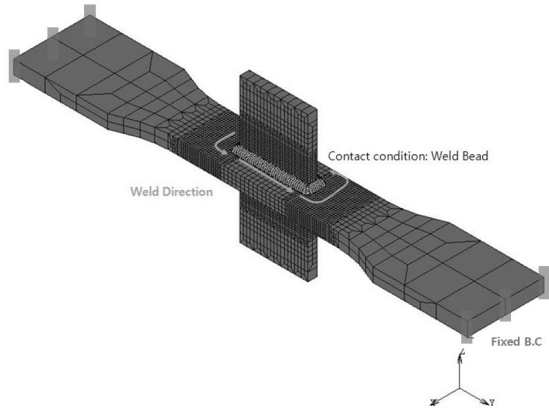


Fig. 7 Contact condition and boundary condition applied to the specimen

소의 갯수는 총 17,596개, 절점의 개수는 총 22,831개로 구성하였다. 사용된 요소는 8절점 Hexahedral 요소로써, 적분법은 완전적분(Full integration)을 적용하였다.

수평판에 위 아래로 수직판을 세운 뒤 이의 교차부위에 용입재를 투입하여 완성된 십자형 시편의 실제 상황을 최대한 실제에 가깝게 재현하기 위하여 수평판과 수직판 그리고 용입재를 각각 불연속하게 모델링 하였다. 따라서 해석 과정에서 용입재로 생성된 요소의 절점 위치와 수평판 및 수직판의 절점 위치는 일치하지 않으므로 실제 해석 상에서는 접촉 요소를 사용하는 것이 적절하다. 유한요소 모델에 사용한 경계조건은 Fig. 7에 설명하였다.

용접 속도를 수직판의 둘레 길이로 나눈 값을 총 용접 진행 시간으로 하였으며 step이 진행되면서 수평판 위, 그리고 아래의 용입재가 각각 지정한 용접방향 및 용접선을 따라 차례로 생성되었다.

시편은 본래 구속되지 않은 상태였으나, 해석 과정에서 발생할 수 있는 강제 운동을 방지하기 위하여 별도의 경계 조건을 부여하였다. 수평판 양끝 전체 12개의 절점을 강제 구속하였으며 구속 경계 조건은 Fig. 7에 설명하였다.

### 3.2 재료 특성

본 연구에 사용된 AH32 강재의 재료 특성은 이장현 등<sup>8)</sup>이 제시한 값을 참고하여 Fig. 8과 같이 온도 의존성을 가지는 것으로 가정하였다. 소성 경화 모델은 비선형 등방 경화(non linear Isotropic hardening)로 가정하였으며, Von-Mises 항복 조건을 따르는 것으로 가정하였다. 응력-변형률 선도는 Fig. 9에 예시하였다.

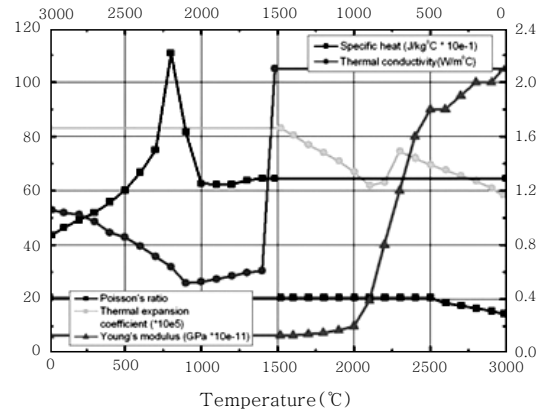


Fig. 8 Material property dependent on temperature

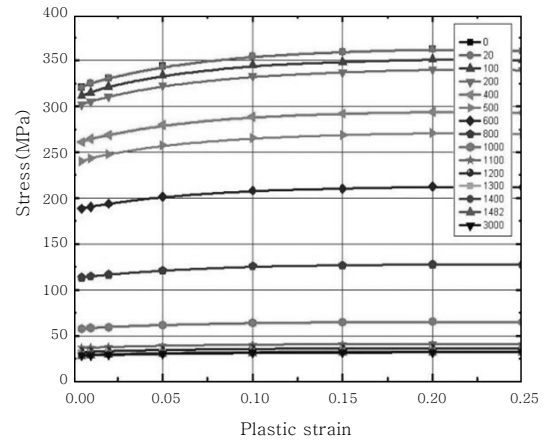


Fig. 9 Stress-Plastic strain curves depending on temperatures

### 3.3 열원의 입열 분포

FCAW의 열원 모델은 Fig. 10과 같이 일반적인 arc의 특성을 잘 반영하는 Goldak<sup>9)</sup>의 이중 타원 열원 모델을 이용하였으며, 열 유속 (Heat Flux,  $q_{f,r}$ )은 다음 식 (1)~(3)을 이용하여 이동하는 경계 조건으로 가정하였다.

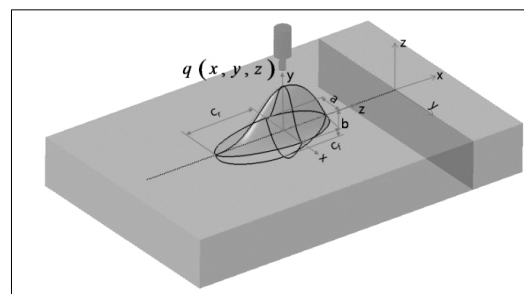


Fig. 10 Goldak's double ellipsoidal heat source

$$q_{f,r}(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_{f,r}\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c^2} \quad (1)$$

$$Q = \eta VI \quad (2)$$

$$f_f + f_r = 2 \quad (3)$$

여기서,  $Q$ 는 Heat Power,  $\eta$ 는 용접효율,  $a$ 는 용융부의 폭,  $b$ 는 Heat Flux의 깊이,  $c$ 는 Heat Flux의 전체 길이이며  $c_{f,r}$ 은 Heat Flux의 전,후 길이를 의미한다.

FCAW 용접 효율은 Atkins의 연구에서 제시한 효율 80%를 가정하였다<sup>10)</sup>. 또한  $f_f$ 와  $f_r$ 은 식 (4)와 같이 정의된 값이다.

$$f_f = \frac{2}{(1+c_r/c_f)}, f_r = \frac{2}{(1+c_f/c_r)} \quad (4)$$

Heat flux의 각 길이를 정의하는 변수  $a, b, c_f, c_r$ 은 시편의 단면을 절단한 후 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)의 형상을 직접 계측하여 정하였다. 입열량 결정에 필요한 각 변수는 열전도 해석을 통하여 얻은 온도 분포를 통해 상변태에 일어나는 750°C 이상의 형상과 시편에서 계측한 HAZ부의 형상이 동일 하도록 결정하였다. 즉, 입열 변수 값을 변경하며 온도 해석을 수행한 후, 시편에서 관찰되는 HAZ 영역과 동일한 온도 분포를 도출하는 값을 선택하였으며, 해석에 사용한 입열 변수는 Table 5에 정리하였다. Fig. 11은 열전도 해석을 통한 온도 분포를 보이고 있으며 이 부분은 응력을 계측한 모퉁이 용접부분에 용입재가 생성되는

Table 5 Parameters for heat flux distribution

| a (mm) | b (mm) | cf (mm) | cr (mm) |
|--------|--------|---------|---------|
| 7      | 7      | 5       | 9       |

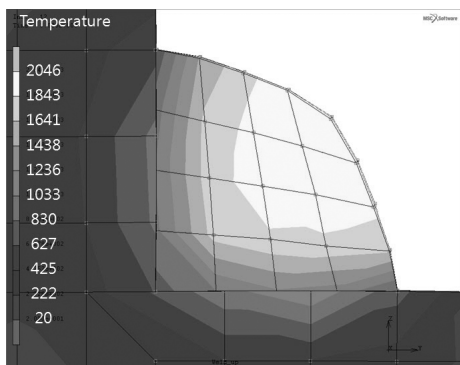


Fig. 11 Temperature distribution on the weldment

순간의 단면이다. 여기서 보인 HAZ 부의 형상과 시편에서 계측한 단면 HAZ부의 형상이 동일한 패턴임을 비교하여 일치함을 확인하였다. 또한 다소 불규칙한 온도 경계의 형상은 본 모델이 용입재와 수평 및 수직판을 각각 별도로 모델링 한 후 부여된 접촉 조건의 영향일 것으로 추정된다.

### 3.4 대류 경계 조건

용접 후 냉각단계에서 상온의 온도는 20°C, 총 1시간 동안 상온에 노출된 모든 표면에 대하여 대류 냉각 조건을 적용하였다. 대류 냉각은 주변 공기에 의한 자연 대류 열전달 및 복사 열전달에 의한 열전달을 모두 고려하기 위하여, 식 (5)에서 보인 것과 같은 대류 계수( $h$ )의 실험식을 사용하였다.

이 식에서의 방사율( $\epsilon^r$ )은 0.9로 가정하였다<sup>11)</sup>.

$$h = 24.1 \times 10^{-4} \epsilon^r T^{1.41} \quad (5)$$

### 3.5 온도분포 해석 결과

앞서 Fig. 4에서 보인 0mm 위치의 toe부 point로부터 toe에서 멀어지는 방향의 일직선 상 3개의 절점에서 시간에 따른 온도 변화를 살펴본 후 이의 분포를 도시하였다(Fig. 12).

결과에서 Bead toe 끝부의 최대 온도가 약 1100°C임을 확인할 수 있었고 여기서 Bead가 모두 용융되어 용접이 실제와 같이 반영되었음을 알 수 있었다. 용입재가 투입되는 순간부터 고온으로 상승하며, 용입재 투입 이후에 자연 대류에 의하여 급격하게 온도가 하강하는 일반적인 온도 이력의 양상을 나타냄을 확인 하였다.

### 3.6 잔류 응력 해석 결과

해석 수행 후 시편 길이방향의 longitudinal stress

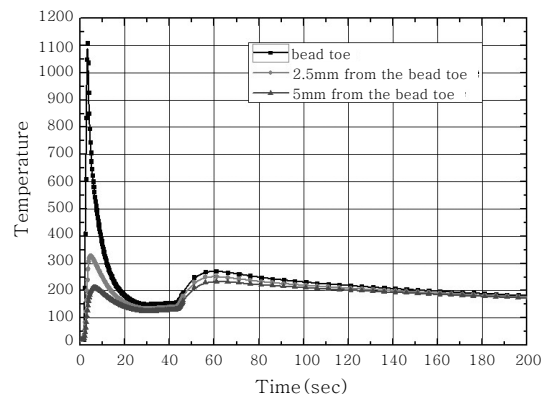


Fig. 12 Temperature histories at points

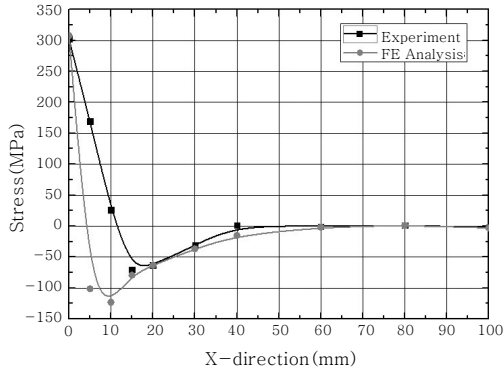


Fig. 13 Longitudinal stress obtained by experiment and FEA

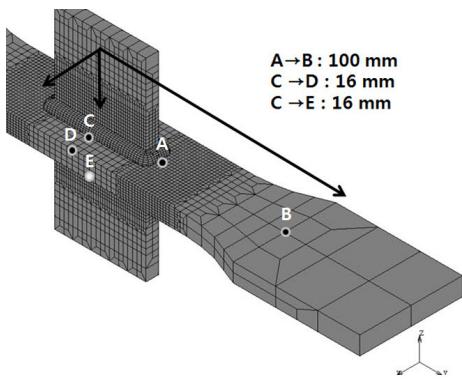


Fig. 14 Location of measurement points and the direction

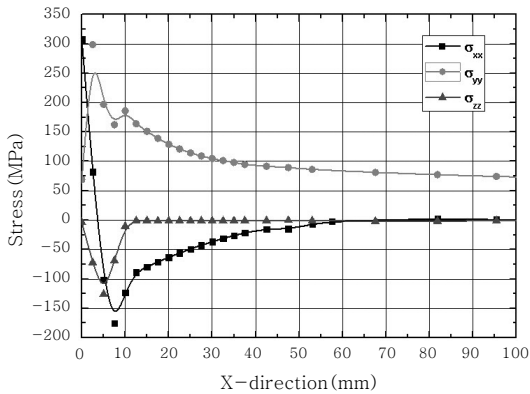


Fig. 15 Residual stresses distribution along A-B

의 결과를 XRD 측정 결과와 비교하였으며 Fig. 13과 같이 정성적으로 일치하는 패턴을 보였다.

이에 따라 본 해석 절차와 가정이 타당하다는 가정 아래 주요 관심 부위의 응력을 파악하였다. 이를 도시하기 위한 점의 위치를 Fig. 14에 보인 것과 같이 AB, CD, CE로 정하였고 시편의 길이, 폭, 두께 방향으로 잔류 응력의 패턴을 확인하였다.

1) Fig. 15는 AB방향의 잔류 응력을 표시한 것이

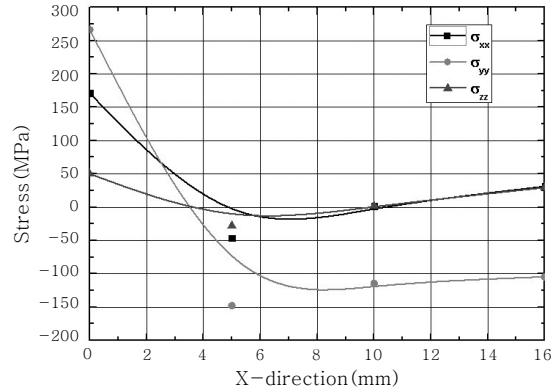


Fig. 16 Residual stresses distribution along C-D

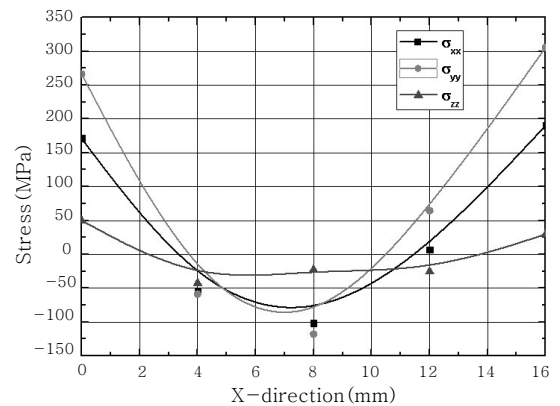


Fig. 17 Residual stresses distribution along C-E

다. 용접부 부근에서 매우 높은 응력상태를 보여주며 항복응력에 가까운 인장응력이 집중되어 있고 용접선에서 멀리 떨어질수록 압축응력이 작용하였다가 점점 그 크기가 줄어드는 일반적인 잔류 응력의 양상을 보여주고 있다.

2) Fig. 16은 CD 방향의 응력이며, 수평 부재의 폭이 작기 때문에, 압축 잔류 응력이 분포하는 특징을 볼 수 있었다.

3) Fig. 17은 두께 방향의 잔류 응력 분포를 도시한 것이다. 두께 방향으로 진행되면서 응력이 감소하는 일반적인 양상을 보여주고 있으며 반쪽을 기준으로 하여 정성적인 대칭의 분포를 보이고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 불규칙 하중 및 폭풍 하중에 의하여 피로 손상이 주로 발생하는 해양 구조물의 T-joint 용접부 형상을 대상으로 피로 균열의 진전특성에 많은 영향을 미치는 주요 인자로 알려진 용접 잔류 응력의 패턴을 파악하고자 하였다. 피로 손상이 가장 많이 보고되는

대표적인 T-joint Fillet 부재를 시편으로 제작하여 XRD를 이용, 잔류 응력을 측정 하였으며 3차원 열탄 소성 해석 과정을 제시하였다. 접촉 조건의 반영 및 해석 과정에 필요한 열원 모델의 산정 과정을 정리하였으며 수치해석 모델을 통하여 구한 Bead부 주변의 온도 분포와 잔류응력의 결과를 제시하였다.

현재 본 연구에서 제시한 잔류 응력 해석 결과로부터 불규칙 하중 및 폭풍 하중을 받는 선박 및 해양구조물의 T-joint 부의 응력 분포 형태를 파악하였으며 본 결과는 추후 잔류응력을 고려한 피로 손상의 전파 및 피로 수명 관계 평가를 위한 실험 및 평가 연구에 활용할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. R01-2007-000-20340-0) 결과의 일부임을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

1. V.Balasubramanian and B.Guha : Influence of Flux Cored Arc Welded Cruciform Joint Dimensions on Fatigue Life of ASTM 517 'F' Grade Steels, International journal of pressure vessels and piping, **75**, 1998, 765-772
2. C.Miki and M.Sakano : A Survey of Fatigue Cracking Experience in Steel Bridges, IIW Doc, 1990, XII-1383-90
3. Sung Won Kang, Woo Il Ha, Jong Suk Shin, Tae Won Jang and Jung Sin Jae : A Study on the Characteristics of Fatigue Failure for Fillet Welded Joint, Journal of the society of naval architects of Korea, **33-4**, 1996, 133-141
4. Young Bin Kwon : A study on crack propagation life prediction on welded joints of ship structure using AFGROW, A dissertation for master graduation, 2008, 21-25
5. Chi Seung Lee and Jae Myung Lee : Numerical Analysis Model for Fatigue Life Prediction of Welded Structures, Journal of the Korean welding and joining society, **27-6**, 2009, 627-628 (in Korean)
6. Seung Seok Lee and Bong Young Ahn : Development of Residual Stress Measurement Techniques in Weldments, Proceedings of Korea Institute Structure Maintenance Insection, 1997, 43-48
7. T.R. Gurney : Fatigue of Welded Structures(2nd Edition), Cambridge University Press, 1979, 1-456
8. Jang Hyun Lee, Se Yun Hwang, Yong Sik Yang and Sung Woo Im : Residual stress analysis of multi-path flux core arc welding in the thick plate butt-welded joint, Proceedings of Korean society of ocean engineers, 2008
9. JA.Goldak, AP.Chakravarti. and M.Bibby : A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical Trans-actions **15B**, 1984, 299-135
10. G.Atkins, D.Thiessen, N.Nissley and Y.Adonyi : Welding Process Effects in Weldability Testing of Steels, Welding Journal, 2002, 64-S
11. EA.Bonifaz : Finite Element Analysis of Heat Flow in Single-Pass Arc Welds, 2000, 123-s-124-s