

## EH40과 API2W강재의 극 후판재 다층 FCAW 버트 접합부 잔류응력해석

황세윤\* · 이장현\*\*† · 양용식\* · 이성제\* · 김병중\*

\*인하대학교 대학원 조선해양공학과

\*\*인하대학교 공과대학 조선해양공학과

### Numerical Analysis of Welding Residual Stresses for Ultra-thick Plate of EH40 TM and API 2W Gr.50 Steel Joined by Flux Core Arc Welding

Se-Yun Hwang\*, Jang-Hyun Lee\*\*†, Young-Sik Yang\*, Sung-Je Lee\* and Byung-Jong Kim\*

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

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

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

(Received December 17, 2009 ; Revised January 4, 2010 ; Accepted April 14, 2010)

#### Abstract

Some structural members of large-scale marine vessels such as large-scale offshore structures and very large container ships are assembled by very thick plates of which thickness exceeds 60mm. Also, high-tensile steels have been selected to meet the required structural strength and fatigue strength. Generally, multi-pass welding method such as FCA(Flux-Core Arc) welding has been used to join the thick plates. Considering the welding residual stresses, fatigue strength of the welded joints of thick plates should be assured since the residual stress influences the fatigue strength. This paper presents a numerical procedure to investigate the residual stress of structure joined by multi-pass FCA welding so that it can be incorporated into the fatigue strength assessment considering the effect of welding residual stress. The residual stress distribution is also measured by X-Ray diffraction method. The residual stress obtained by the computational model also has been compared with that of experiment. The results of FEA are in very good agreement with the experimental measurements.

Key Words : Multi-pass FCA welding, FEA, Welding residual stress, Flux core arc welding, X-Ray diffraction measurement, EH40 TM, API2W Gr.50

### 1. 서 론

최근에 해상 물동량이 증가하면서 대형 컨테이너 운반선의 수요가 증가함에 따라 10,000 TEU(Twenty feet Equivalent Unit) 이상을 적재할 수 있는 초대형 컨테이너 운반선이 설계 및 건조되기 시작하였다. 대형 컨테이너 운반선에는 높은 수준의 응력이 발생할 뿐만 아니라, 상갑판 및 현측판 등의 용접부에서 피로 파괴의 가능성이 높다. 따라서 상갑판과 현측판 등에

400MPa 이상의 높은 항복 강도를 가지는 TMCP(thermo mechanical control process)형 고장력강을 사용할 뿐만 아니라 두께가 70mm를 넘는 경우도 있다<sup>1)</sup>.

TLP(Tension leg platform)와 같은 대형 해양 구조물에 tendon이 용접되는 tendon porch는 구조물 전체의 안전성과 관련된 중요한 부재이며, 구조물 전체의 부력이 집중되므로 매우 높은 하중을 받고 있다. 따라서 이 부재는 설계 시에 용접부를 고려한 피로 강도 예측이 매우 중요하다. 각 선급의 규정에 의하면 tendon

porch 부재는 API 2W 강재로 제작되어야 하며, 실제 설계에서는 60mm이상의 극 후판이 사용되고 있다<sup>2,3)</sup>. 그리고 FPSO (Floating Production, Storage and Offloading)와 같은 심해 해양구조물의 갑판 및 현측 판에도 API 2W 또는 EH 40 급의 강종이 사용되고 있다. 초대형 선박, 해양구조물의 용도와 부재위치에 따라 다르나 90mm의 두께까지도 사용되고 있다.

이러한 고장력 극후판이 사용되는 부재의 용접에는 자동화된 FCAW(flux cored arc welding)가 주로 사용되고 있다. FCAW는 SAW(submerged arc welding)과 함께 입열량이 적고 용착 속도가 좋기 때문에 자동화가 용이하여 후판의 자동용접에 가장 많이 사용하고 있고, 특히 후판이 적용된 긴 용접장의 수직상향 맞대기 이음이나 선체 블록 탑재과정의 맞대기 이음에서는 약 15회 이상의 다층 용접방법을 적용하여 사용되고 있다<sup>4)</sup>. 용접된 구조물의 잔류응력은 피할 수 없으며, 용접 잔류응력에 구조물의 외력이 더해졌을 때 피로수명이 단축되는 것은 주지의 사실이다<sup>5)</sup>.

용접 잔류응력을 고려한 피로수명평가 및 용접 잔류응력 완화 등에는 3차원 응력 분포를 파악할 필요가 있다<sup>6)</sup>. 유한요소해석법과 같은 수치해석 모델은 용접 잔류응력을 파악하기 위해 사용하는 일반화된 방법이다. 그러나, 후판에 적용되는 FCAW 방법은 15여 회 이상의 용접 적층이 생성되기 때문에, 각각의 적층을 모두 반영하여 3차원 잔류응력 분포를 수치적인 모델로 구현하는 것이 어려울 뿐만 아니라 많은 계산 시간을 필요로 한다.

후판의 다층 용접에 의한 잔류응력 해석을 위해서 주로 2차원 평면 모델을 이용한 연구가 수행되어 왔으며<sup>7,8)</sup>, 2차원 해석결과를 3차원적으로 확장하여 사용하고 있는 사례를 찾아볼 수 있다<sup>9)</sup>. 2차원 모델을 이용하면 계산 시간을 단축할 수 있는 편리함이 있으나 예측할 수 있는 응력의 성분이 많지 않으며 3차원 응력 분포를 모두 파악할 수는 없는 한계를 가지고 있다. 3차원 유한요소해석 모델을 적용한 사례로 적층의 수가 2회 이하인 박판에 대한 연구<sup>10)</sup>는 찾아 볼 수 있으나, 적층의 수가 많은 후판의 3차원 해석 사례를 찾아보기는 쉽지 않다.

본 연구는 다층 용접에 의한 후판의 3차원 잔류응력 분포를 파악하기 위한 해석 모델을 제시하고자 한다. 이를 위하여 초대형 선박 및 해양 구조물에 사용되는 EH40 강종 및 API 2W 계열의 두께 80mm 후판을 대상으로 3차원 잔류응력 분포를 해석 및 계측하였다. 각 시편은 초대형 컨테이너 운반선 및 FPSO에 적용된 부재로서 다층 FCAW가 사용되었다. XRD(X-ray

diffraction) 방법을 이용하여 잔류응력을 계측한 후에 유한요소해석 결과를 비교하여 수치 모델의 타당성을 살펴보고자 한다.

## 2. 시편의 특성 및 용접조건

### 2.1 용접시편

본 연구에 사용된 시편의 형상은 Fig. 1과 Fig. 2에 보인 것과 같으며, FCAW 방법으로 용접된 EH40 TM 시편과 API 2W Gr. 50 시편을 제작하였다. 시편은 D 조선소의 설비를 이용하여 제작되었다. API 2W 강재는 toe grinding 및 ultra shot-peening의 후처리 방법을 적용하여 용접 잔류 응력을 감소시킨 시편을 동시에 제작하였다. 시편의 단면 형상과 적층 순서는 Fig. 3에 보인 것과 같다. 각 용접시편은 두께가 80mm이며, X형 개선을 가진 맞대기 용접으로 제작하였으며 상면과 하면에 각각 14회 용접을 실시하였다.

두 강재의 화학 조성과 기계적 재료 특성은 각각

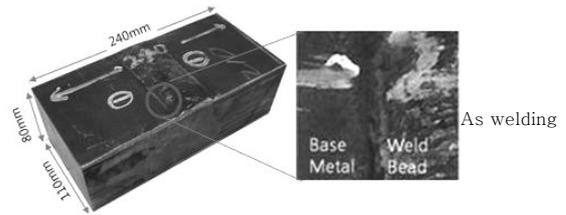


Fig. 1 Specimen of EH40 TM

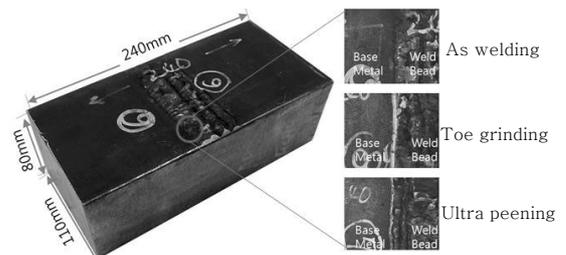


Fig. 2 Specimen of API 2W Gr. 50

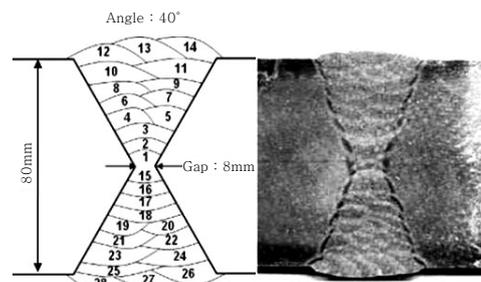


Fig. 3 Sectional view of weldment layers and X-groove joint

**Table 1** Chemical component of specimen (wt %)

Steel	C	Si	Mn	P	S
EH40 TM	0.08	0.03	1.56	0.01	0.001
API 2W Gr.50	0.08	0.25	1.43	0.01	0.002

**Table 2** Mechanical property of specimen

Steel	YS(MPa)	US(MPa)	EL(%)
EH40 TM	470	582	25
API 2W Gr.50	433	548	30

**Table 3** Welding condition of FCAW

Welding Condition	Layer				
	Root	Fill	Cap	Fill	Cap
	1	2~11	12~14	15~25	26~28
Current(I)	260	250	250	236	210
Voltage(V)	27	27	28	26.6	23
Speed (cm/min)	9.1	13.1	12.1	13.6	13.7
Heat input (KJ/mm)	4.63	2.93	2.47	2.76	2.12

Table 1과 Table 2에 정리하였다. 각 적층 별로 사용된 용접 조건은 Table 3에 보인 것과 같다.

수치해석은 As-Welding 시편을 대상으로 수행하였으며, 모든 시편의 용접 잔류 응력을 계측하였다.

### 3. 다층 FCA용접의 유한요소해석

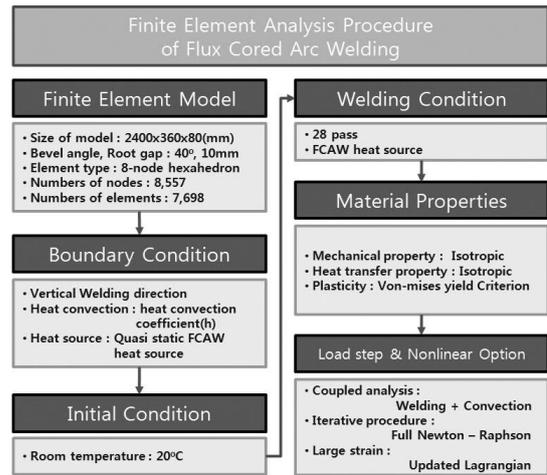
용접 구조물은 이동열원이 가진 열에너지의 유입으로 인하여 국부적으로 높은 온도 차가 발생한다. 불균일한 온도분포는 높은 열응력을 발생시키고, 부재의 소성변형과 잔류응력을 발생시킨다. 따라서 잔류응력 해석은 온도분포해석과 열변형 해석의 연성 문제로 접근할 수 있다<sup>8,11)</sup>. 이동 열원의 열 유입으로 인한 온도분포는 식 (1)에서와 같이 열 확산 방정식으로 표현된다.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + q^v = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

여기서  $k$ 는 heat conductivity이고,  $T$ 은 온도,  $q^v$ 는 internal heat rate,  $\rho$ 는 재료의 밀도,  $C$ 는 재료의 specific heat capacity이다.

본 연구에서는 수치해석을 위해서 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC.Marc를 이용하였다.

각 적층 별로 열원이 진행되는 과정에 따라 열전달 해석을 수행하고, 온도 분포를 열 하중으로 치환하는



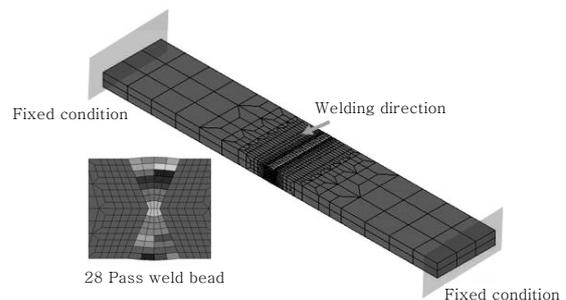
**Fig. 4** Schematic procedure for welding residual stress analysis

연성 구조해석 방법을 선택하였다. 비선형 해석을 수행하기 위한 기법으로는 Newton-Raphson 방법을 선택하였다. 유한요소해석의 절차는 Fig. 4에 정리하였다.

### 3.1 유한요소해석 모델

각 적층 별로 용접 부의 생성과정을 따라 온도 분포 해석과 열응력 해석을 수행하기 위한 방법으로는 시차 방법(staggered approach)를 사용하였다. 용접 비드(bead)의 생성과정은 요소 제거(deactivation) 및 생성(activation) 방법을 이용함으로써 각각의 비드가 생성되는 순간에 요소의 강성을 회복시키는 방법으로 묘사하였다.

시편의 제작에 자동화된 FCAW 방법을 사용하였기 때문에 각 적층 별로 용융부의 형상이 유사하다는 가정하에 Fig. 5에서와 같이 각 적층 별로 요소의 형상을 정의하였다. 각 적층 단계별로 용접 열원이 진행되는 속도에 맞춰서 요소가 생성되도록 하였다. 각 용접 적층 별로 서로 다른 용접 속도, 전류 및 전압이 적용되므로 28개의 하중 조건(load case)을 정의한 후에 해석을 수행하였다.



**Fig. 5** Finite element model of specimen

또한 용융부를 중심으로 요소를 세부 분할하였고, 멀어질수록 요소의 크기를 증가시킴으로써 전체 모델의 요소의 수를 감소시켰다. 해석 모델은 8,557개의 절점, 7,698개의 요소로 구성하였으며 8-절점 육면체 요소를 사용하였다<sup>12)</sup>.

Quad-core CPU를 사용하는 워크스테이션을 이용하였을 때 5 시간이 해석에 소요되었다.

### 3.2 Double Ellipsoidal Heat Source Model

아크 용접에 의한 열 에너지 유입은 용접봉과 모재(base metal) 사이에 투입되는 아크에 의한 열 유속(Heat flux)과 용입재(electrode)에 의한 초기 열에너지의 투입으로 가정할 수 있다<sup>14)</sup>. 따라서 아크 용접의 열에너지 투입은 통상 열 유속의 분포 함수에 따라 계산된 열 유속을 경계 조건으로 부여하거나, 생성되는 요소에 초기 온도를 부여함으로써 열에너지 투입을 반영한다.

본 연구에서는 열 유속을 입열 에너지 분포로 가정하였으며, Fig. 6에 보인 것과 같이 Goldak이 제안한 double ellipsoidal heat source 모델을 이용하였다<sup>15)</sup>. 열 유속 분포 함수 ( $q_{f,r}(x,y,z)$ )는 식 (2)과 같이 가정하였으며, 열에너지량  $Q$ 는 식 (3)에 정의한 값을 사용하였다.

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

$$Q = \eta \cdot V \cdot I \quad (3)$$

여기서,  $\eta$ 는 아크와 모재 사이의 열손실을 고려한 아크의 효율이고<sup>16)</sup>,  $V$ 는 용접 전압, 그리고  $I$ 는 아크의 전류를 나타낸다.

열원 모델의 형상 변수인  $a$ 와  $b$ 는 각각 열원의 폭과 깊이를 나타내며,  $c_{f,r}$ 은 열원의 진행방향 길이 및 후측 길이를 나타낸다<sup>15)</sup>. 본 연구에서의 FCAW의 아크 효율( $\eta$ )은 0.8로 가정하였다<sup>17)</sup>. 또한 이중 타원체 열원

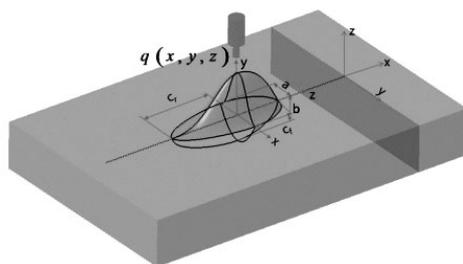


Fig. 6 Double ellipsoidal heat source model

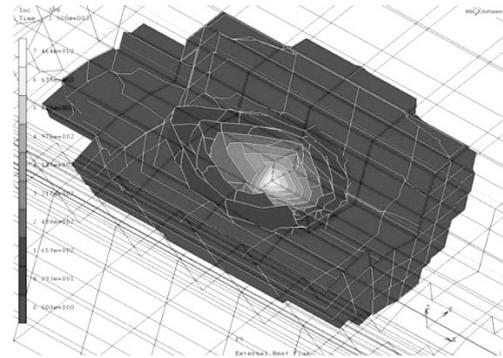


Fig. 7 Sectional view of heat flux distribution

모델의 전면과 후면에 투입되는 입열 비  $f_f, f_r$ 는 식 (4)에서와 같이 정의하였으며  $f_f + f_r = 2$ 을 만족하도록 가정하였다<sup>15,16)</sup>.

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

Fig. 7은 유한요소해석 모델에 적용된 열유속 경계조건의 형상을 나타내고 있다.

### 3.3 대류조건

용접이 진행되는 과정 및 용접 완료된 후에 냉각 과정을 고려하여야 하므로, 각 용접 적층 사이에 대류에 의한 냉각 경계 조건을 부여하였다.

따라서 용접 진행 단계, 용접 pass가 바뀌는 중간 단계, 용접 후 냉각 단계로 구별하여 Table 4에서와 같이 자연대류 값을 경계 조건으로 적용하였다. 대기 온도는 20°C로 가정하였으며, 대류 과정은 각 적층을 고려하여 28개의 경계 조건으로 작성하였다. 냉각은 자연대류와 복사에 의한 효과를 모두 고려하여야 하지만, 이 효과를 이론적으로 정확히 예측하는 것은 어렵다. Rykalin이 제시한 대류 계수( $h$ )는 대류 냉각 효과와 복사 열 전달에 의한 냉각 효과를 동시에 포함한 값으로 식(5)에 제시한 것과 같다<sup>18)</sup>. 본 연구에서는 방사를

Table 4 Load cases of heat convection

Cooling steps	Convective time	Convective surfaces
Each welding pass	Weld time	Convection on all the surface except weldment
Interval of pass	5 min	Convection on all the surface except weldment
After welding	2 hour	Convection on all surface

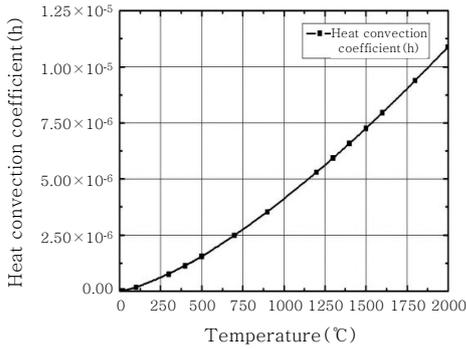


Fig. 8 Heat convection coefficients

( $\epsilon^r$ )은 0.9로 가정하였으며, 대류 계수는 Fig. 8과 같은 값이다.

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

### 3.4 재료 특성

재료의 특성(material property)은 온도에 따라 변하는 값으로 정의하였다. EH40 TM과 API 2W Gr. 50 강재의 재료 특성은 Fig. 9와 같이 온도의존 함수로 가정하였다. 재료의 소성 경화 모델은 비선형 등방 경화(nonlinear isotropic hardening)조건을 적용하고 von-Mises 항복 조건을 따르는 것으로 가정하였다. 또한 plastic modulus는 multi-linear isotropic hardening 특성을 기준으로 온도에 따라 세분화하여 정의하였다. EH40 TM 재료의 응력-변형을 특성은 Fig. 10에 보인 것과 같은 값을 이용하였다. API2W Gr. 50재료의 응력-변형을 특성 EH40 TM의 항복응력의 비율을 Fig. 10에 곱하여 가정하였다<sup>19)</sup>.

### 3.5 온도분포 해석

용접에 의한 입열량은 식 (3)에서 정의한 값을경계 조건으로 부여하였다. Table 3에서 정리한 것과 같이

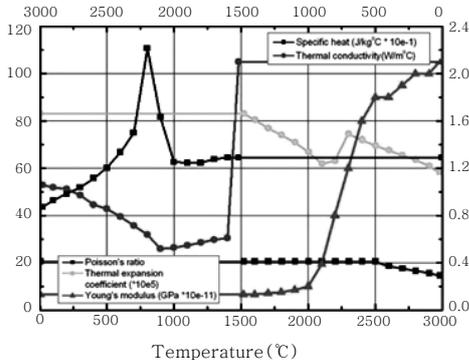


Fig. 9 Material properties

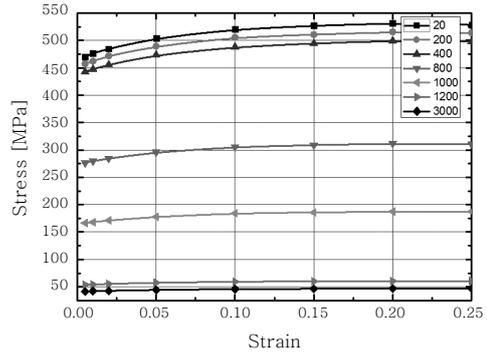


Fig. 10 Temperature dependency of stress plastic strain curve

Table 5 Maximum temperature at each pass

Layer	No	Temp(°C)
Root	1	2,150
Fill	2~11	2,300
Cap	12~14	1,800
Fill	15~24	2,350
Cap	25~28	1,790

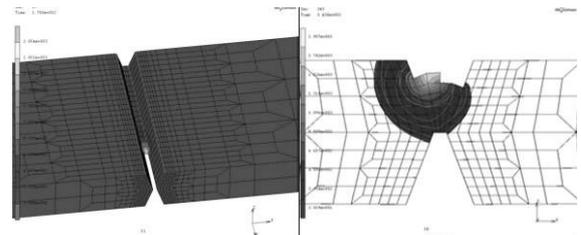


Fig. 11 Temperature distribution in FEA

각 적층 단계별로 전류, 전압, 용접 속도가 다르기 때문에 Table 5에서와 같이 각 용접 단계 별로 다른 온도분포를 가지고 있다. Fig. 11는 용접 진행 과정에서 발생한 단면의 온도 분포를 보이고 있다.

유한요소해석을 통하여 얻은 열영향부(Heat Affected Zone)과 Fig. 3에서 보인 용접 시편에서 측정한 영역과 동일하도록 식(3)의 변수의 값을 정하였다. Fig. 12는 용접부 끝부분(Bead toe)으로 부터 y 방향으로 6mm 떨어진 지점의 계산된 온도 이력을 나타낸 것이다. 용접부 끝부분에서 최대 약 1,500°C의 온도가 발생하였으며, 6mm 떨어진 지점에서는 약 900°C의 온도가 계산되었다.

## 4. 잔류응력 계측 실험

잔류응력을 계측하기 위해서 현재까지 알려진 비파괴적 잔류응력 측정 방법들 중 효과적인 방법인 XRD(X-

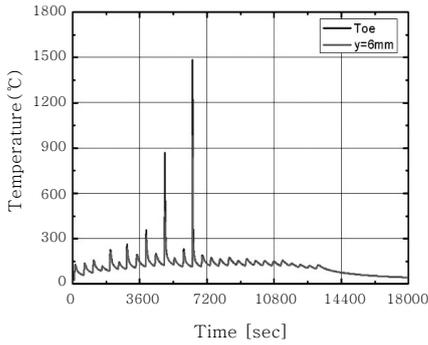


Fig. 12 Temperature history at observed points

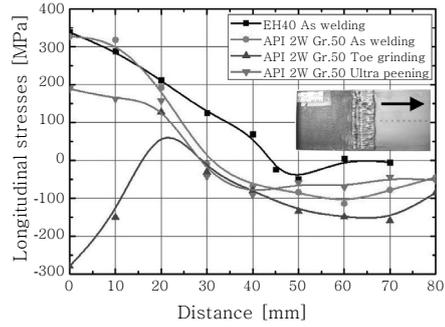


Fig. 15 Residual stresses distribution of each specimen

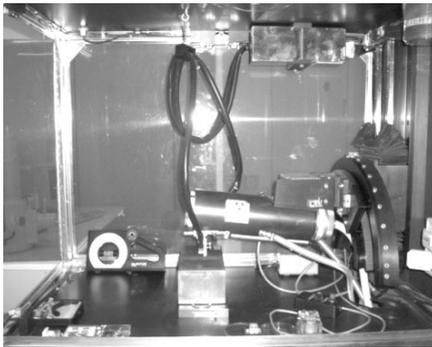


Fig. 13 Residual stress measurement by X-Ray

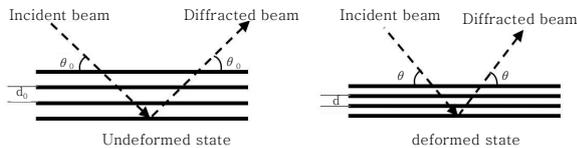


Fig. 14 Measurement of variations in the lattice spacing from the diffraction angle<sup>20)</sup>

Ray Diffraction)를 이용하여 Fig. 13에서와 같이 용접 시편 표면의 잔류 응력을 측정하였다.

XRD를 이용한 잔류응력 측정은 Fig. 14에서와 같이 시편 표면에서의 X-Ray의 회절각의 변화를 이용하여 측정한다<sup>20)</sup>. 따라서 동일한 위치라도 시편 표면의 상태에 따라 측정 값이 변화하기 때문에 정확한 측정을 위해서는 표면의 상태를 매우 청결하고 균일하게 유지하여야 한다. 따라서 측정된 잔류응력의 신뢰성을 높이기 위해서 화학적 부식방법을 이용하여 표면 상태를 처리한 후 잔류응력을 측정하였다.

표면의 불순물을 제거한 시편의 상면(Top Side)의 잔류 응력을 용접 비드 끝부분을 시작으로 10mm 간격으로 8개의 점에서 측정하였다. 피로수명에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 종방향 응력(Longitudinal stress)을 측정하였다.

Fig. 15는 다층 FCA용접이 적용된 EH40의 as

welding 시편과 API 2W Gr.50의 as welding, toe grinding, ultra peening 시편에서 측정한 잔류응력을 비교하였다. As welding 시편의 경우 용융부 끝부분에서 약 320MPa정도의 인장 잔류응력이 발생하고 거리가 30mm 이후에는 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 두 시편의 응력 형태는 비슷함을 확인할 수 있었다. 그리고 toe grinding과 ultra peening을 거친 시편에서 측정된 잔류응력은 as welding 시편과 비교하였을 때 잔류응력이 감소함을 확인할 수 있었으며, 특히 toe grinding의 잔류 응력 감소 효과가 큼을 확인할 수 있었다.

Im & Chang<sup>1)</sup>은 본 연구와 동일한 종류의 시편에 대해서 고주기 피로 실험을 수행한 결과 용융부 끝을 시작점으로 두께방향으로 균열이 진전됨을 확인하였다. EH40 TM 시편과 API 2W Gr.50 시편 모두 as welding 상태의 피로수명은 UK DEn class D mean+2S curve를 따르고 있으며 toe grinding과 ultra peening시편의 피로 수명은 as welding 상태보다 증가함을 실험으로 확인하였다<sup>1)</sup>.

### 5. 극 후판 FCA 용접부 잔류응력 특성

유한요소해석 결과와 측정된 종방향 응력( $\sigma_{xx}$ )을 Fig. 16과 Fig. 17에 비교하였다. 두 재료에 대해서 측정 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였을 때 약 90% 정도 일치함을 확인하였다. 다른 응력 성분 및 두께 방향의 응력 성분을 비교하지는 못하였으나, 유한요소해석 모델의 타당성을 일부분 확인하였다고 사료된다.

Fig. 18은 용접선을 중심으로 종방향의 응력 성분을 도시한 것이다. 두께방향의 잔류응력은 Fig. 19와 같이 분포함을 확인하였으며, Fig. 20은 두께 방향을 따라 종방향 응력( $\sigma_{xx}$ ) 횡방향 응력( $\sigma_{yy}$ ), 그리고 von-Mises 등가 응력을 도시하였다.

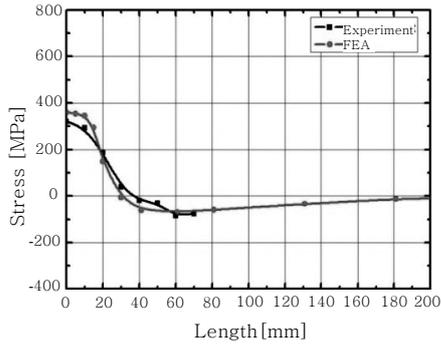


Fig. 16 Comparison of residual stresses obtained by FEA and measurement (EH40 TM)

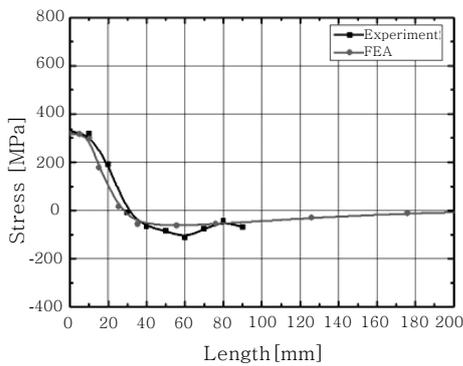


Fig. 17 Comparison of residual stresses obtained by FEA and measurement (API 2W Gr.50)

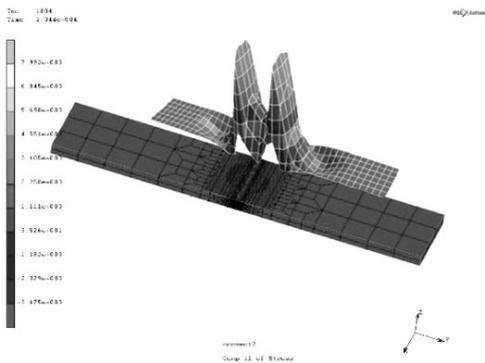


Fig. 18 Longitudinal stress distribution obtained by FEA

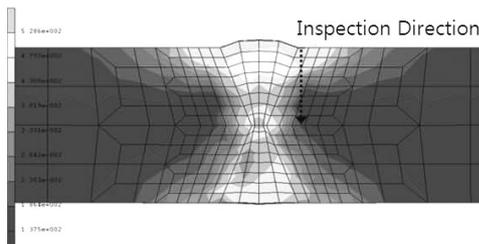


Fig. 19 Sectional view of the residual stress distribution

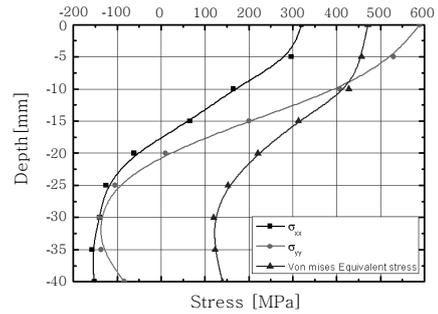


Fig. 20 Residual stresses along the thickness direction

### 6. 결 론

본 연구에서는 극후판의 다층 용접에 의한 잔류응력 예측을 위한 유한요소해석 모델을 제시하고 FCAW 방법에 의해서 28회 적층된 80mm의 극 후판 구조물을 EH40 TM과 API 2W Gr. 50강재로 각각 제작한 후에, 잔류 응력을 파악하였다. 또한 다층 FCAW의 특성을 반영한 3차원 유한요소해석 절차를 제시하고, 해석과 계측을 통해 얻은 잔류응력을 비교하여 두 결과가 유사함을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 연구방법과 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 다층용접이 적용된 80mm 극 후판 용접 구조물의 3차원 유한요소해석 방법을 제시하였다.
- EH40 TM과 API 2W Gr.50 고강도 극 후판의 다층 맞대기 용접 구조물의 잔류응력을 파악하였다.
- 극 후판의 다층 용접을 3차원 모델로 해석한 후 계측값과 비교함으로써 잔류응력 예측이 가능함을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 포항산업과학재단의 지원으로 이루어 졌습니다. 연구 지원뿐만 아니라 토론에 참여하여 주신 임성우박사님과 시편을 제작해주신 대우조선해양(주)께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. S. W. Im, and I. W. Chang: Fatigue Performance of EH40-TM Steel Plate for Container Carrier, Proceedings of the Nineteenth 2009 International Offshore and Polar Engineering Conference, (2009)
2. S. W. Im, I. W. Chang, C. H. Cho, and K. K Park:

- Fatigue Behavior of Large Scale Tabular Joint for API 2W Gr.50 Steel, Journal of Korean Society of Ocean Engineers, (2005), **19-3** (in Korean)
3. S. W. Im, and J. S. Lee: Assessment of Fatigue Strength Characteristics of Tendon Porth in Offshore platforms for API 2W Gr.50 Steel, Journal of Korean Society of Ocean Engineers, **20-5** (2006) (in Korean)
  4. I. W. Han, Y. H. Park, G. B. An, and Y. H. An: Development Trends of Steel Plates for Ship Building and Off-shore Construction and It's Weldability, Journal of KWJS, **27-1**(2009), 25-33 (in Korean)
  5. M. N. James, D. J. Hattingh, D. G. Mills, and P. J. Webster: Residual stress and strain in MIG butt welds in 5083-H321 aluminum: As-welded and fatigue cycled, Int J of Fatigue, **31-1** (2009), 28-40
  6. T. L. Teng, and P. H. Chang: Effect of Residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints, Journal of Materials Processing Technology, **145** (2004), 325-335
  7. G. B. Jang, H. K. Kim, and S. S Kang: The Effects of Root Opening on Mechanical Properties, Deformation and Residual Stress on Weldments, Welding Research Supplement, (2001)
  8. I. S. Kim, I. K. Kim, C. J. Moon, Y. J. Jeong, and Y. H. An: A Study on Analysis of Heat Transfer and Residual Stress on the Weld Zone using FEM, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, **9-5** (2000), 96-104 (in Korean)
  9. S. M. Joo, B. H. Yoon, W. S. Chang, H. S. Bang, H. S. Bang, and C. S. Ro: Redistributions of welding residual stress for CTOD specimen by local compression, Journal of KWJS, **27-6** (2009) 31-35 (in Korean)
  10. C. H. Lee, and J. H. Chang: Three-dimensional finite element simulation of residual stresses in circumferential welds of steel pipe including pipe diameter effects, Materials Science and Engineering, **487-1** (2008), 210-218
  11. J. H. Lee, S. Y. Hwang, and Y. S. Yang: Effect of Melting Pool on the Residual Stress of Welded Structures in Finite Element Analysis, Journal of Ship and Ocean Technology, **11-3** (2007), 14-23 (in Korean)
  12. S. Y. Hwang, J. H. Lee, Y. S. Yang and, S.W. Im: Numerical Analysis and Experiments of Residual Stress in Tandem EGW for Very Thick Plate, Journal of KWJS Conference, **50** (2008), 11 (in Korean)
  13. MSC.Marc Volume B : Element Library, MSC. Software Co., (2007)
  14. MSC.Marc Volume A : Theory and User Information, MSC.Software Co., (2007)
  15. J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby: A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, Metallurgical Transactions, **15B** (1983), 299-305
  16. S. S. Lee, and B. Y. Ahn: Development of Residual Stress Measurement Techniques in Weldments, Proceedings of Korea Institute Structure Maintenance Insection, (1997), 43-48
  17. E. Armentani, R. Esposito, and R. Sepe: The effect of thermal properties and weld efficiency on residual stresses in welding, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, **20-1** (2007), 319-322
  18. R. R. Rykalin: Energy Source for Welding, Houdrement Lecture, International Institute of Welding, (1974), 1-23
  19. S. Lamont: The Behaviour of Multi-storey Composite Steel Framed Structures in Response to Compartment Fires, Ph.D. Thesis, The University of Edinburgh, (2001)
  20. K. S. Chun, H. C. Song, and S. W. Im: Measurement of Welding Residual Stresses by X-ray Diffraction Method, Proceedings of the Annual Autumn Meeting of SNAK, (2007), 208-213