

# 대형 컨테이너선의 해치 코밍 FCA 맞대기 용접부의 횡 방향 잔류응력 예측에 관한 연구

신 상 범<sup>\*†</sup> · 이 동 주<sup>\*</sup> · 이 주 성<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>현대중공업 산업기술연구소

<sup>\*\*</sup>울산대학교 조선해양공학부

## A Study on the Predicting Transverse Residual Stress at the Ultra Thick FCA Butt Weldment of Hatch Coaming in a Large Container Vessel

Sang-Beom Shin<sup>\*†</sup>, Dong-Ju Lee<sup>\*</sup> and Joo-Sung Lee<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Hyundai Industries Co., Ltd., Ulsan 682-060, Korea

<sup>\*\*</sup>Ulsan University, school of Naval Architecture & Ocean Engineering, Ulsan 682-192, Korea

†Corresponding author : str@hhi.co.kr

(Received December 17, 2009 ; Revised February 11, 2010 ; March 26, 2010)

### Abstract

The purpose of this study is to establish a predictive equation of transverse residual stress at the thick FCA butt weldment of large container vessel. The variables used were restraint degree, yield strength of base material, thickness of weldment and welding heat input. Restraint degree at the thick weldment of container ship having the various welding sequence was calculated using FEA. From the result, the H-type specimen was designed to reproduce the level of restraint degree at the actual weldment of containership. Based on the results, the predictive equations of the mean value and the distribution of transverse residual stress at each location of the weldment were established using dimensional analysis and multiple-regression method. The predictive equations were verified by comparing with those measured by XRD in the actual weldment of the ship.

Key Words : Containership, Transverse residual stress, Restraint degree, Heat input, Yield strength, FEA, Modified H-type specimen, XRD

## 1. 서 론

컨테이너선(container vessel)의 대형화는 선주에게 투자비 부담 경감 및 운송비 절감 등의 매우 많은 경제적인 장점을 제공한다. 2001년 “Ocean Shipping Consultant”의 보고서에 따르면 2000년 이후로 세계 물동량이 년 7.1% 이상씩 상승하고 있을 뿐 아니라, 최근 세계 운송 화물이 컨테이너로 공통 규격화됨에 따라 1980년대 약 22%를 차지하는 컨테이너 화물의 비중이 지속적으로 증가하여 2006년 55%를 차지하였다. 그리고 향후 지속적인 증가를 통하여 수 년 내에 컨테

이너 화물 비중은 전체 화물의 약 75% 수준을 차지할 것으로 예측하고 있다. 컨테이너의 탑재를 위하여 다수의 화물창을 가진 컨테이너선의 경우 구조 안전성을 확보하기 위한 방안으로 응력이 집중되는 해치 코밍(hatch coaming)과 상갑판(upper deck)에 극후 강재가 보편적으로 적용되고 있다. 그러나 이러한 극후 부재에 있어 용접부의 피로강도(fatigue strength)와 취성파괴(brittle fracture)에 대한 저항성은 강재 두께에 비례하여 급격히 감소하기 때문에 극후 용접부의 선체 적용을 위해서는 먼저 파괴역학적 설계 기준의 정립이 선행되어야 한다<sup>1,2)</sup>. 이를 위하여 본 논문에서는 선박의 설계 수명 기간 동안 취성파괴 발생 및 균열진

전거동 특성에 관여하는 응력 중 2차응력(secondary stress)에 해당하는 극후 용접부의 잔류응력에 대한 거동 특성을 규명하고자 한다. 물론 BS7910<sup>3)</sup>과 같이 용접 구조물의 파괴역학적 설계 코드에 따르면 구속이 존재하는 극후 용접부에서 용접선과 수직한 방향의 잔류응력을 규정하고 있지만, 실선 용접부에 대한 구속 수준에 대한 고려가 이루어지지 않아 매우 보수적이다. 이에 본 논문에서는 대형 컨테이너선의 극후 맞대기 FCA 용접부의 파괴 거동 특성 평가를 위한 실선 용접부의 잔류응력 예측 기법을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 먼저, 선체 블록의 탑재시 용접순서에 따른 극후 맞대기 용접부의 구속도(restraint degree) 수준을 평가하고, 이를 반영할 수 있는 H-type 시험편을 설계하였다. 그리고, 실선 해치 코밍 용접부의 구속도와 용접 입열량, 용접부의 강도에 따른 잔류응력의 거동 특성을 유한요소해석을 이용하여 평가하였다. 그리고 해석 결과를 토대로 차원해석(dimensional analysis)과 다중회귀분석(multi-regression analysis)을 이용하여 용접부 토우에서 용착금속의 두께 방향으로 각 위치에서 존재하는 잔류응력 분포와 평균 잔류응력의 크기에 대한 예측식을 제안하였다.

## 2. 해치 코밍 용접부의 구속도

### 2.1 해석 모델 및 방법

용접부의 수축시 저항하는 정도를 나타내는 구속도( $K_s$ )는 식(1)과 같이 용접 수축시 용접선과 수직한 방향으로 단위 수축을 유발하기 위하여 요구되는 응력의 크기로 정의된다<sup>4)</sup>.

$$K_s = \frac{\sigma_o}{\bar{u}} \tag{1}$$

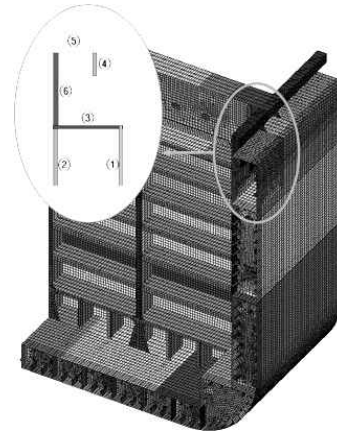
where,

$K_s$  : Restraint degree [MPa/mm]

$\sigma_o$  : Uniformly distributed stress at the weldment [MPa]

$\bar{u}$  : Mean shrinkage at the weldment [mm]

일반적으로 단순 용접부의 경우 용접부의 구속도를 식(1)을 이용하여 정의할 수 있으나, 선체와 같은 용접 구조물에서 구속도( $K_s$ )는 용접순서의 영향이 매우 크기 때문에, 이를 이용한 평가는 어렵다. 이에 본 논문에서는 해치 코밍 용접부의 탑재 용접순서를 고려하여 구속도( $K_s$ ) 수준을 정의하고자 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 1은 해치 코밍 용접부에서 구속도 수준을 평가하기 위하여 사용된 대형 컨테이너선의 유한요소해석용 요소망(mesh design)과 해치 코밍 용접부의 탑재 용접



Welding Sequence					
1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>
①	②	③	④	⑤	⑥

Fig. 1 FE mesh design and welding sequence used for evaluating restraint degree

순서를 나타낸 것이다. Fig. 1과 같이 해석 모델은 선체 블록의 탑재 순서와 기하학적 대칭성을 고려하여 선체 중앙부에 위치한 단위 화물창의 1/4로 선정하였으며, 4절점 등대개 쉘 요소를 이용하여 요소망을 구성하였다. 여기서 각 용접부에서 구속도는 탑재 용접순서에 따라 용접선에 수직한 방향으로 단위 하중을 가한 후 해당 용접부에서 용접선과 수직한 방향으로 발생하는 평균 수축량( $\bar{u}$ )과 식(1)을 이용하여 평가하였다. 이때, 기 용접된 용접부에 위치한 절점에서 변위는 구속하였다.

### 2.2 해석 결과 및 고찰

Table 1은 Fig. 1에 나타낸 컨테이너선의 탑재 용접순서에 따라 유한요소해석으로 평가된 각 용접부에서 평균 수축량( $\bar{u}$ )과 식(1)을 이용하여 평가한 각 용접부의 구속도( $K_s$ )의 값을 나타낸 것이다. Table 1과 같이

Table 1 Mean restraint degree with the welding sequence of case 1

Joint ID	$u$ [mm]	$K_s$ [MPa/mm]
①	0.17	56.71
②	0.12	80.54
③	0.08	118.31
④	0.31	31.78
⑤	0.08	127.04
⑥	0.08	118.89

탑재 용접부에서 최대 구속도는 127 MPa/mm로 해치 코밍 상부 맞대기 용접부에서 발생함을 알 수 있다.

그러나 실제 초대형 컨테이너선의 해치 코밍 용접부는 상부 구조 형상 및 탑재 용접 순서에 따라 매우 다양한 값을 가질 수 있다. 이에 본 논문에서는 초대형 컨테이너선의 해치 코밍 용접부의 횡 방향 잔류응력 예측 기법 개발시 구속도 범위를 25MPa/mm~ 300MPa/mm 로 선정하였다.

### 3. 잔류응력 거동 특성 및 예측 결과

#### 3.1 해석 모델 및 방법

초대형 컨테이너선 해치 코밍 용접부의 잔류응력 분포 및 평균잔류응력의 크기에 대한 예측식을 개발하기 위하여 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 Table 2와 같이 용접부 구속도( $K_s$ ), 단위 패스당 평균 용접 입열량( $Q_0$ ), 용접부 두께(B) 그리고 모재의 항복강도를 고려하여 변수별 해석을 수행하였다. 이때, 동일 용접부에 대해서 용접 패스당 입열량은 일정한 것으로 가정하였다.

잔류응력 평가를 위한 열 탄소성 해석은 열전달 해석으로부터 결정된 온도 분포를 하중조건으로 사용하여 수행하였다. 여기서 해치 코밍 용접부의 온도 분포는 KWJS의 용접강도연구위원회가 제안한 유한요소해석을 이용한 아크 용접부의 온도 분포 해석 규약에 따라 수행하였으며<sup>5)</sup> 사용된 요소망은 Fig. 2와 같다.

Table 2 Variables used for FEA

Steel grade	Thickness, B [mm]	$Q_0$ [kJ/cm]	$K_s$ [MPa/mm]
E EH36 EH40	61 ~ 80	14 ~ 28	25 ~ 300

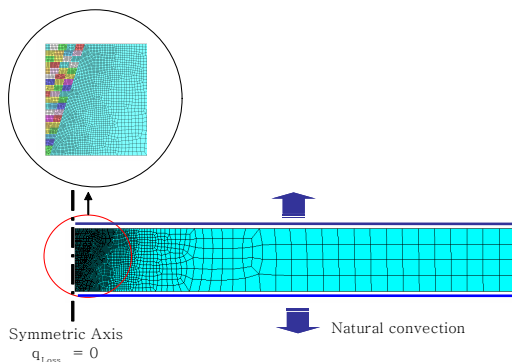


Fig. 2 Mesh design used for heat transfer analysis

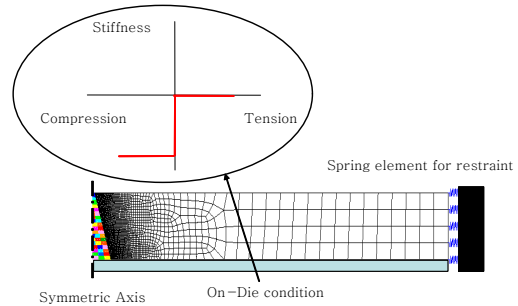


Fig. 3 Mesh design used for residual stress analysis

$$K_{spring} = \frac{F}{\bar{u}} = \frac{\sigma_o B}{\left(\frac{\sigma_o}{K_s} - \frac{\sigma_o L_s}{E}\right)} = \frac{B}{\left(\frac{1}{K_s} - \frac{L_s}{E}\right)} \quad (2)$$

where,

$K_s$  : Spring constant [N/mm]

$F$  : Welding shrinkage force [N]

$\bar{u}$  : Mean shrinkage at the weldment [mm]

$A$  : Cross-sectional area of weldment [mm<sup>2</sup>]

$L_s$  : Restraint length [mm]

$E$  : Elastic modulus [MPa]

잔류응력 평가를 위한 열 탄소성 해석시 사용된 요소망은 일반화된 평면변형률요소를 이용하여 구성하였으며, 변위 경계 조건으로는 해석 모델의 대칭 축에 위치한 절점에는 대칭 변위 경계 조건을 부여하고, 용착금속의 생성 및 인근 용접부의 가열시 발생하는 용접 하부면 방향으로의 각 변형을 제어하기 위하여 “on-die” 조건을 적용하였다<sup>6)</sup>. 그리고 실선 용접부의 구속도를 2차원 해석 모델에서 구현하기 위하여 Fig. 3과 같이 동일 크기( $L_s/2=550\text{mm}$ )의 해석 모델의 끝단에 구속도에 따라 식(2)로 정의되는 강성을 가진 스프링 요소 (spring element)를 부착하였다. 해석시 사용된 모재 및 용접부의 기계적 물성은 동일하며, 등방성이고 온도에 의존하는 것으로 가정하였으며, 항복 개시 조건으로 von-Mises 조건을 적용하였다.

#### 3.2 해석결과 및 고찰

##### 3.2.1 잔류응력 거동 특성

초대형 컨테이너선의 해치 코밍 용접부의 잔류응력 분포 및 평균잔류응력의 예측 기법을 개발하고자 Table 4의 용접부의 항복강도, 용접부 두께, 평균 용접 입열량 그리고 용접부 구속도 등의 해석 변수를 고려하여 총 23개의 해석 모델을 선정하였다. Fig. 4는 용접부 두께가 각각 61mm와 78mm이고, 용접부의 구속도가

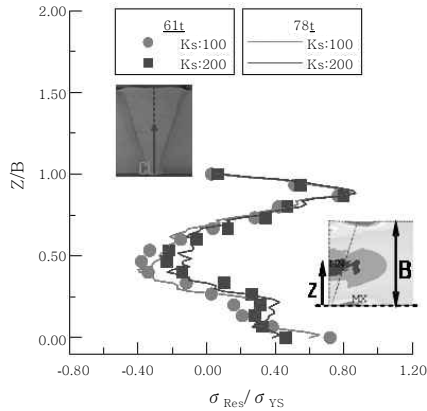


Fig. 4 Variation of of transverse residual stress at the center of the thick weldment with restraint degree and plate thickness

각각 100MPa/mm와 200MPa/mm인 경우 용접 개 선면내 중앙부에서 두께 방향으로 각 위치에서 횡 방향 잔류응력의 분포에 대한 해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 4와 같이 FCA 다층 맞대기 용접부내의 최대 잔 류응력은 용접부의 표면이 아닌 용접부 두께 4/5지점 에서 발생하며 용접부 두께 중앙부에는 대부분 압축으 로 작용한다. 그리고 주판 두께가 다른 경우에도 전반 적인 잔류응력의 분포 즉 최대응력의 발생 위치 그리고 인장 및 압축 잔류응력으로 천이 구간의 위치에 대한 차이는 거의 없다. 그러나 구속도가 증가함에 따라 두께 방향의 각 위치에서 잔류응력의 분포가 인장영역으 로 이동함으로써 평균잔류응력은 증가한다.

Fig. 5는 용접부 두께가 78mm이고, 용접부의 구속 도가 각각 100MPa/mm와 200MPa/mm인 경우 용 접 입열량에 따른 용착금속에서 두께 방향의 각 위치에 서 횡 방향 잔류응력 분포에 대한 해석 결과를 도시한

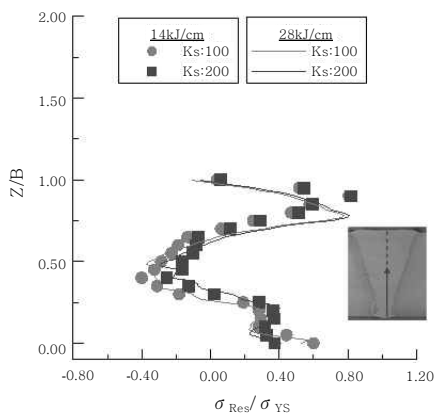


Fig. 5 Variation of transverse residual stress at the center of the thick weldment with restraint degree and welding heat input

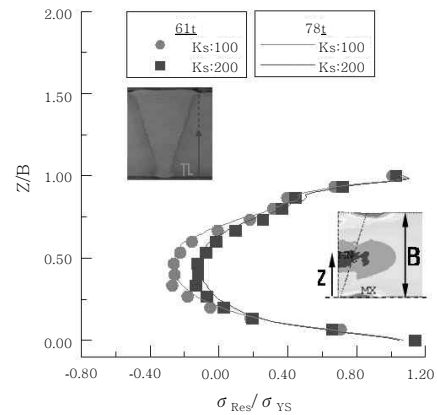


Fig. 6 Variation of transverse residual stress to at the toe of FCA weldment with restraint degree and plate thickness

것이다. Fig. 5와 같이 용접 입열량이 감소함에 따라 최대 잔류응력의 발생 위치는 용접부의 상부 표면에 근 접한다. 이는 각 단위 용접 패스에서 용접 입열량의 차 이에 따른 용접부의 적층 수의 차이에 기인한 것이다. 그러나 용접 입열량이 증가하는 경우 용접부의 구속도 와 동일하게 잔류응력 분포가 전반적으로 인장영역으로 이동하여 평균잔류응력의 크기가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 용접부 두께가 각각 61mm와 78mm이고, 구속도가 각각 100MPa/mm와 200MPa/mm인 경우 용접부 토우에서 두께 방향으로 각 위치에서 횡 방향 잔류응력 분포에 대한 결과를 도시한 것이다.

Fig. 6과 같이 용접부 토우에서 두께 방향의 각 위치 에서 작용하는 횡 방향 잔류응력의 분포는 Fig. 4와 5 의 용접부 내에 작용하는 횡 방향 잔류응력 분포와는 매우 상이하다. 즉, 용접부 토우에서는 용접부의 상부 및 하부 표면에서 최대응력이 발생하며, 최대 잔류응력 수준 또한 모재의 항복강도 수준을 초과하고 있다. 그 러나 용접부 두께 방향으로 각 위치에서 잔류응력의 분 포는 용접 중앙부에서 잔류응력과 동일하게 구속도가 증가함에 따라 평균잔류응력이 증가하는 방향으로 이동 함을 알 수 있다.

### 3.2.2 예측기법

#### 3.2.2.1 평균잔류응력 예측 기법

다층 용접부의 횡 방향 잔류응력에 대한 해석 결과로 부터 평균잔류응력은 용접부의 구속도 ( $K_s$ )와 항복강 도( $\sigma_y$ ) 그리고 평균 용접 입열량( $Q_0$ )이 증가함에 따라 거의 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 따라서 본 논문 에서는 다층 FCA 용접부의 평균잔류응력을 식(3)과 같 이 평균 용접 입열량, 항복강도 그리고, 구속도의 함수

로 정의하고, 식(3)의 각 변수에 대한 차원을 정리하여 평균잔류응력 인자들의 차원변수를 각각 식(4)와 식(5)와 같이 정의하였다.

$$\sigma_{MR} = f\left(Q_o^a, \sigma_Y^b, K_{S_s}^c\right) \quad (3)$$

$$[\sigma_{MR}] = \left[Q_o^a, \sigma_Y^b, K_{S_s}^c\right] \quad (4)$$

$$[FL^{-2}] = [F]^a [FL^{-2}]^b [FL^{-3}]^c \quad (5)$$

$$F : a + b + c = 1$$

$$L : -2b - 3c = -2 \quad (6)$$

where,

$\sigma_{MR}$  : Mean residual stress [MPa]

F : Dimensional variable for force

L : Dimensional variable for length

a, b, c : Exponential variables

식(6)에서 각 차원 변수들의 관계는 매우 다양하게 정의될 수 있다. 이에 본 논문에서는 각 차원 변수들의 값 즉, a, b 그리고, c의 값에 따른 평균잔류응력에 대한 예측 결과와 유한요소해석 결과간의 유사성을 식(7)을 이용하여 평가하고, 이 결과를 토대로 평균잔류응력에 대한 예측식을 식(8)과 같이 제안하였다.

$$\zeta = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_T} (g_i - p_i)^2}{N_T g_{\max}}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_T} d_i^2}{N_T}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{MR} &= f(Q_o^{0.25} \times \sigma_Y^{0.25} \times K_S^{0.5}) = f(\Psi) \\ &= 0.000693\Psi^2 + 0.217\Psi \end{aligned} \quad (8)$$

where,

$\zeta$  : Similarity

$g_i$  : Mean residual stress by FEA [MPa]

$p_i$  : Mean Yield strength by Eqn(8) [MPa]

$g_{\max}$  : Maximum mean restraint stress [MPa]

$N_T$  : The number of analysis model (=23)

Fig. 7은 해치 코밍 용접부의 구속도와 평균 용접 입열량 그리고, 항복강도에 따른 평균잔류응력에 대한 해석 결과와 식(8)을 이용하여 예측된 평균잔류응력 결과를 상호 비교하여 도시한 것이다. Fig. 7과 같이 유한요소해석해석 결과와 식(8)을 이용하여 예측된 평균 잔류응력의 크기가 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 참고로 각 차원변수들의 관계로부터 정의한 식(8)과 유한요소해석 결과간의 유사성은 0.995이다.

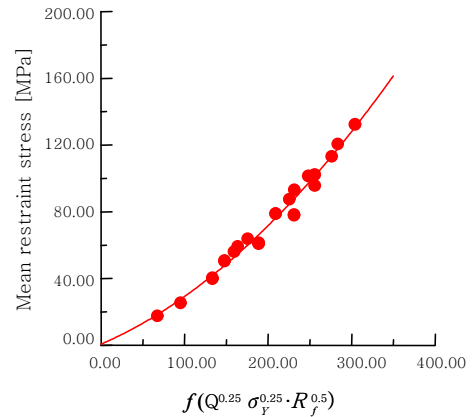


Fig. 7 Behavior of mean restraint stress in thick FCA butt weldment

### 3.2.2.2 잔류응력 분포 예측 기법

전 절의 Fig. 4 ~ Fig. 6의 극후 FCA 용접부의 두께 방향의 각 위치에서 횡 방향의 잔류응력 분포는 구속도, 용접 패스당 평균 용접 입열량 그리고 용접부의 항복강도에 따라 절대적인 값의 차이는 존재하지만 전반적인 분포 양상은 매우 유사함을 알 수 있었다. 이에 본 논문에서는 해치 코밍 극후 맞대기 용접부의 용착금속과 토우에서 두께 방향의 각 위치에서 작용하는 횡 방향의 잔류응력 분포를 위한 예측식을 다중회귀분석법을 이용하여 식(9)와 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{Res}}{\sigma_Y} &= b_0 + b_1\left(\frac{z}{B}\right) + b_2\left(\frac{z}{B}\right)^2 + b_3\left(\frac{z}{B}\right)^3 + b_4\left(\frac{z}{B}\right)^4 \\ &+ b_5\left(\frac{z}{B}\right)^5 + b_6\left(\frac{z}{B}\right)^6 \end{aligned} \quad (9)$$

where,

$\sigma_{Res}$  : Transverse residual stress [MPa]

z : Location in the thickness direction of weldment [mm]

$b_0 \sim b_5$  : Coefficients (see Table 3 and 4)

$$\begin{aligned} b_0 \sim b_5 &= c_0 + c_1(\sigma_Y) + c_2(Q_o) \\ &+ c_3(K_S) + c_4(\sigma_{MR}) + c_5(B) \end{aligned}$$

$\sigma_{Res}$  : Transverse residual stress [MPa]

z : Location in the thickness direction of weldment [mm]

$b_0 \sim b_5$  : Coefficients (see Table 3 and 4)

$$\begin{aligned} b_0 \sim b_5 &= c_0 + c_1(\sigma_Y) + c_2(Q_o) \\ &+ c_3(K_S) + c_4(\sigma_{MR}) + c_5(B) \end{aligned}$$

Fig. 8과 9는 해치 코밍 맞대기 용접부의 구속도,

Table 3 Coefficients for residual stress near the center of FCA butt weldment

Coeff. for Eq(9)	Constant	$\sigma_y$ [MPa]	$Q_0$ [kJ/mm]	$K_s$ [MPa/mm]	$\sigma_{MR}$ [MPa]	B [mm]
	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
$b_0$	223.3	0.7	0.3	-0.2	-0.9	-3.2
$b_1$	-5340.0	-13.9	-19.5	0.7	20.2	145.4
$b_2$	47328.0	84.7	223.7	-4.4	7.9	-1418.4
$b_3$	-194777.0	-228.0	-1022.2	31.8	-315.0	5654.8
$b_4$	385056.0	262.9	2126.2	-78.2	764.0	-10677.0
$b_5$	-354671.0	-98.9	-2011.3	76.7	-714.0	9463.3
$b_6$	122243.0	-7.7	702.4	-26.6	238.9	-3164.8

Table 4 Coefficients for residual stress near the toe of FCA butt weldment

Coeff. for Eq(9)	Constant	$\sigma_y$ [MPa]	$Q_0$ [kJ/mm]	$K_s$ [MPa/mm]	$\sigma_{MR}$ [MPa]	B [mm]
	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
$b_0$	143.2	0.9	0.1	-0.1	0.2	-0.9
$b_1$	-519.0	-10.9	-0.7	-1.5	2.4	7.7
$b_2$	-8640.0	50.8	-13.5	11.7	32.1	56.8
$b_3$	47282.0	-155.8	74.9	-30.6	-120.6	-385.9
$b_4$	-87916.0	27.3	-147.4	43.8	124.7	749.5
$b_5$	69969.0	-236.2	133.1	-36.1	-19.0	-604.7
$b_6$	-20328.0	78.9	-47.2	12.7	-19.2	178.6

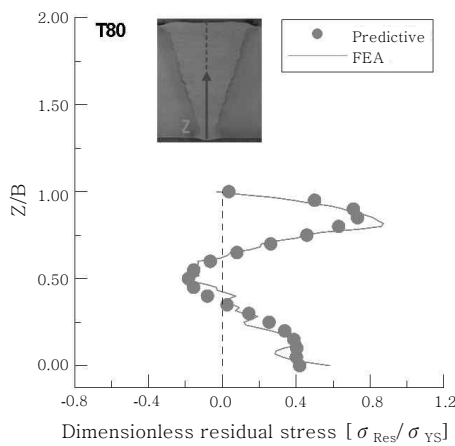


Fig. 8 Comparison results of transverse residual stress distribution at the center of FCA butt weldment

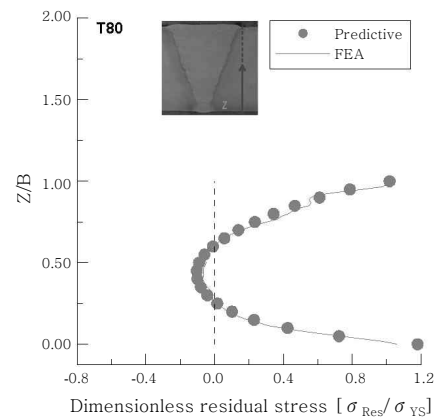


Fig. 9 Comparison results of transverse residual stress distribution at the toe of FCA butt weldment

용접 입열량 그리고 항복강도가 Table 5와 같은 경우 용접부 중앙부와 토우에서 횡 방향 잔류응력 분포에 대한 예측 및 유한요소해석 결과를 비교하여 도시한 것이다. Fig. 8과 9에 도시한 바와 같이 각 위치에서 잔류응력의 분포에 대한 예측 및 해석 결과가 매우 유사함을 알 수 있다.

Table 5 Analysis Conditions used for verifying the predictive method for residual stress distribution

Yield strength [MPa]	Thickness [mm]	$Q_0$ [kJ/cm]	$K_s$ [MPa/mm]
360	80	190	200

5.4.4 예측 기법 타당성 평가

본 논문에서 제안한 해치 코밍 용접부의 평균잔류응력 예측식의 타당성을 평가하기 위하여 Fig. 10과 같이 실선의 해치 코밍 용접부에 스트레인게이지와 XRD를 이용하여 탑재 공정에서 용접선과 수직한 횡 방향의 평균잔류응력을 계측하였다.

여기서 탑재 용접순서는 Fig. 1과 같으며, 모재 및 용접부의 두께는 각각 EH36과 80mm이고, 용접 입열량 및 구속조건은 각각 Table 6과 같다. 그리고 평균잔류응력 계측을 위하여 계측 위치는 용접부와 1,000mm이상 떨어진 위치에서 계측하였다. Fig. 11은 탑재공정 중 1축 스트레인게이지를 해치 코밍 용접부에 부착하여 계측한 횡 방향 응력의 거동을 도시한 것이다. Fig. 11과 같이 스트레인게이지에서 계측된

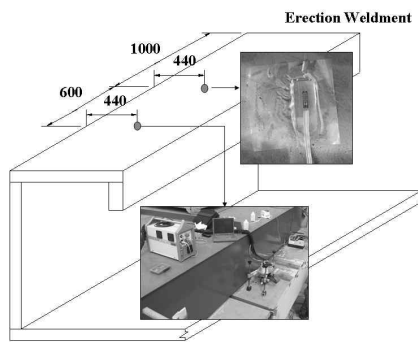


Fig. 10 Measuring locations using strain gage and XRD

Table 6 Variables for validation evaluation of predictive equation

$Q_0$ [kJ/mm]	$K_s$ [MPa/mm]	Predicted Results [MPa]
92.1	127.04	67.7

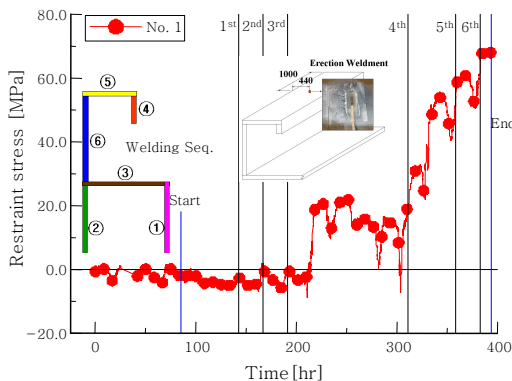


Fig. 11 Variations of restraint stress at the hatch coaming weldment during erection welding process

Table 7 Comparison results of restraint stress in way of the hatch coaming weldment in a large containership

Strain Gage (at 1,000mm)	XRD Method (at ,600mm)	Predicted Results
69MPa	80.26MPa	67.7MPa

횡 방향의 최종 잔류응력의 크기는 69MPa로 Table 7에 나타난 예측 결과인 평균잔류응력 67.7MPa과 매우 유사함을 알 수 있다. 그리고 용접부로부터 1,600mm 떨어진 위치에서 XRD를 이용하여 측정된 잔류응력은 80MPa로 예측 결과보다 다소 높다. 그러나 예측 및 XRD를 통한 계측 결과간의 차이는 ASTM E910-06에서 규정한 측정 오차( $\pm 14$ MPa)를 고려하면 본 논문에서 제안한 예측식이 초대형 컨테이너선의 해치 코밍 용접부의 평균 잔류응력 수준을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

대형 컨테이너선의 극후 맞대기 FCA 용접부의 파괴 거동 특성 평가를 위한 실선 용접부의 횡 방향 잔류응력 예측기법을 개발하기 위하여 유한요소해석을 이용하여 구속도, 용접 입열량 그리고 용접부의 강도에 따른 FCA 다층 맞대기 용접 잔류응력 거동 특성을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대상 모델로 선정된 대형 컨테이너 운반선 해치 코밍 용접부의 최대 구속도는 용접 순서에 의존하지만 주어진 용접 순서에서의 최대 구속도는 127MPa/mm로 매우 낮은 수준으로 일반적으로 알려진 선체 용접부의 최대 구속도(400MPa/mm)에 비하여 매우 낮다. 따라서 해치 코밍 용접부의 잔류응력 수준을 용접부의 항복응력 수준으로 가정하는 것은 지나치게 보수적이다.
- 2) 용접부의 평균 잔류응력은 용접부의 구속도, 단위 용접 입열량 그리고, 용접부의 강도가 증가함에 따라 증가하지만, 동일 위치에서 횡 방향 용접 잔류응력 분포는 거의 일정하다.
- 3) 구속도, 단위 용접 패스당 입열량 그리고 용접부 강도가 횡 방향 잔류응력에 미치는 영향을 유한요소해석 결과를 이용하여 평가하고, 차원해석 그리고 다중회귀분석법을 이용하여 용접부의 두께 방향의 각 위치에서 횡 방향 잔류응력 분포와 평균잔류응력의 크기에 대

한 예측기법을 제안하였다. 차원 해석을 통하여 정의된 평균 잔류응력의 크기에 대한 예측 및 해석 결과간의 유사성은 0.995이었으며, 다중회귀분석법을 이용한 용착금속의 중앙부와 용접부 토우에서 잔류응력분포에 대한 유사성은 각각 0.92와 0.97로 예측 결과가 해석 결과를 비교적 잘 예측 하고 있음을 알 수 있었다.

4) 제안된 예측 기법의 타당성을 검증하기 위하여 실선 해치 코밍 용접부에서 평균잔류응력 및 잔류응력에 대한 예측 및 계측 값을 비교한 결과, 두 결과간의 차이는 약 1.4MPa와 13.3MPa로 측정오차 범위 내에서 비교적 잘 일치하였다.

### 참 고 문 헌

1. Satoh, H.: Learns form Damaged, Bulletin of The Society of Naval Architects of Japan, 882, 2004
2. Y Yamaguchi, T Matsumoto and H Yajima : Technical Requirements to Ensure Structural Reliability For Mega Container Ship - Application of New Higher Strength Hull Structural Steel Plates of Heavy Thickness, Design & Operation of Container Ship, London, UK, 2006
3. BS7910: Guide and Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, British Standard Institution, 1999
4. Masubuchi, K.: Analysis of Welded Structures Pergammon Press, Oxford, 1980
5. Commission of Design Analysis And Structural Strength of Welded Structural Strength: Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, J. of KWS, 23-6 (2005), 1-7, (in Korean)
6. S. B. Shin and J. G. Youn : A Study on the Angular Distortion Prediction of Double Sided Multi-pass Butt Weldment, J. of KWJS, 25-1 (2007), 37-41 (in Korean)