

반복 인장 하중을 받는 YP47 극후판 Butt 용접부의 잔류응력 재분포에 관한 연구

강 봉 국* · 이 동 주* · 신 상 범*†

*현대중공업 생산기술연구소

A Study on Evaluation of Residual Stress Redistribution for FCA Butt Weldment of Ultra-Thick YP47 Steel Plate under Tensile Cyclic Load

Bong Gook Kang*, Dong Ju Lee* and Sang Beom Shin*†

*Hyundai Heavy Industries, Ulsan 44032, Korea

†Corresponding author : str@hhi.co.kr

(Received April 19, 2016 ; Revised May 10, 2016 ; Accepted May 19, 2016)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the redistribution of transverse residual stress in the multi-pass FCA butt weld of YP47 in the hatch coaming top plate of ultra large size containership under the tensile cyclic load. In order to do it, the configuration of modified H type specimen including restraint length was first designed to simulate the restraint condition of the butt weld in hatch coaming top plate. FE analysis procedure for evaluating the transverse residual stress was verified by comparing the calculated mean and surface residual stresses with the measured results in the test specimen. After that, the effect of the cyclic load on the redistribution of transverse residual stress was evaluated by comprehensive FEA. From the results, it was found that although the maximum transverse residual stress decreased with an increase in the applied maximum load, the effect of the cyclic load on the mean residual stress is small enough to be negligible. It is because the maximum stress of the ship corresponding to the probability of 10E-8 is less than 70% of yield stress of the weld.

Key Words : Residual stress redistribution, Ultra large size containership, Restraint condition, Tensile cyclic load

1. 서 론

최근 컨테이너 운반선의 대형화 및 극한 환경에서의 운전 조건이 요구되는 해양 구조물이 증가함에 따라 극후판 부재의 사용이 증가되고 있다. 하지만 극후판 부재의 용접부 피로 강도(fatigue strength)와 취성파괴(brittle fracture)에 대한 저항성은 두께의 증가와 함께 급격하게 감소하기 때문에 실제 구조물에 적용하기 위해서는 다양한 방향으로 충분한 검토가 필요하다¹⁾. 초대형 컨테이너 선의 경우 극후판 부재 용접부의 불안정 파괴(unstable fracture) 발생 가능성을 평가하기

위한 설계 하중으로는 선체 운동으로부터 유발되는 1차 응력(primary stress)과 용접 공정에 의해 유발되는 잔류응력과 같은 2차 응력(secondary stress)으로 구분할 수 있다. 특히 용접부 잔류 응력의 경우 용접부 불안정 파괴의 발생 가능성에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 평가가 요구된다. 최근 개정된 BS7910²⁾에 의하면 용접부 잔류 응력 평가 시 구속 조건하에 있는 용접 구조물의 횡방향 잔류응력의 경우 용접부의 항복 응력과 동일한 값으로 가정하도록 정의하고 있다. 그러나 실제 횡방향 잔류응력의 경우 용접부 구속도에 비례하여 증가하기 때문에 선체와 같이 구속도가 낮은 경우 잔류응력 수준을 항복 응력 수준으로 가정하는 적절하

지 않다. 과대 평가된 용접부 잔류응력 평가 결과는 파괴 방지 설계 시 보수적인 결과를 초래할 수 있기 때문에 실제 용접부의 구속도를 고려한 잔류응력 평가가 요구된다³⁾. 또한 기존의 연구 결과에 따르면 외부 인장 응력을 받는 용접부의 잔류응력 재분포 특성을 고려하게 되면 파괴 방지 설계의 보수성에 관한 문제를 최소화할 수 있을 것으로 보고되고 있다.

이에 본 논문에서는 반복 인장 하중을 받는 극후 다층 FCA 맞대기 용접부의 잔류응력 재분포 특성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 KWJS에서 제안한 온도 분포 해석을 위한 표준 규약⁴⁾에 따라 용접부 온도 분포 해석 및 잔류 응력 해석을 수행하였다. 그리고 이를 XRD와 홀드릴링 기법 그리고 1축 스트레인 게이지를 이용하여 측정한 용접부 표면 잔류응력과 평균 구속 응력 결과와 비교함으로써 본 논문에서 제안된 해석 기법의 타당성을 검증하고자 하였다. 그리고 검증된 기법을 이용하여 평가된 잔류응력 해석 결과를 바탕으로 극후판 다층 용접부에 인장 응력이 추가로 가해졌을 때 가해진 인장 응력의 크기에 따른 용접부 잔류응력의 재분포 거동 특성을 규명하였다.

2. 용접 잔류응력 평가

2.1 유한요소해석 및 실험 방법

2.1.1 유한요소해석 모델 및 절차

구속도를 고려한 극후판 FCA 맞대기 용접부의 잔류응력을 평가하기 위해서 사용된 모델은 H-type 시편으로 Fig. 1과 같으며 시편의 치수는 Table 1과 같다. Table 2와 같이 시험편 제작에 사용된 모재는 두께

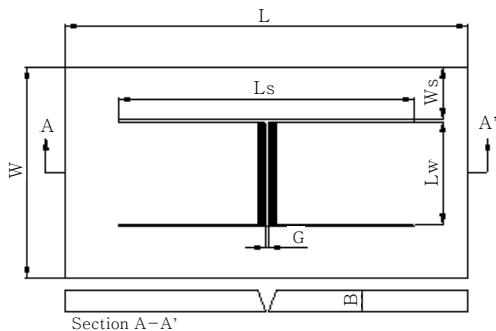


Fig. 1 Configuration of the H-slit type specimen

Table 1 Dimension of the H-slit type specimen

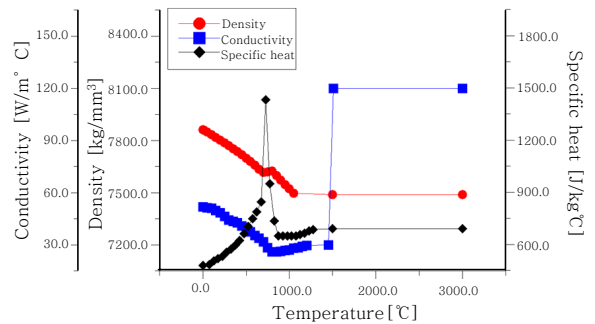
Ks [MPa/mm]	Specimen Dimension [mm]						
	L	Ls	W	Lw	Ws	B	G
100	1,500	1,100	800	390	195	80	6

Table 2 Thickness of the analysis model, heat input and restraint degree

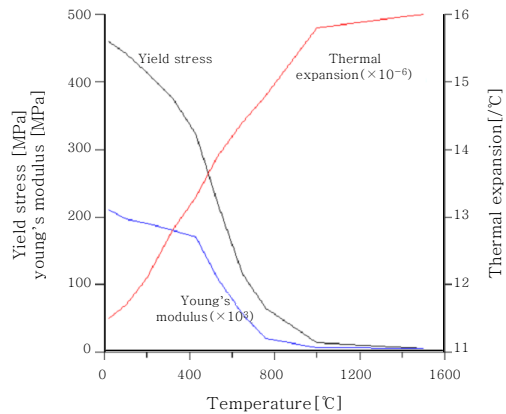
Steel grade	Thickness [mm]	Heat input [kJ/cm]	Restraint degree [MPa/mm]
EH47	80	18.7	100

80mm의 EH47 선급용 강재이다. 그리고 해석 모델의 구속도는 선체의 해치 코밍 용접부를 모사하기 위해 탑재 조인트 구속도 평가 결과를 바탕으로⁵⁾ 100MPa/mm로 선정하였다.

다층 FCA 맞대기 용접부의 온도 분포 해석은 대한용접접합학회의 강도연구위원회에서 제안한 해석 규약에 따라 3차원 열전달 문제를 준 정상상태 (quasi-stationary condition)의 2차원 열전달 문제로 가정하였으며, Ansys ver.13.0을 사용하여 평가하였다. FCA 용접의 입열 모델은 균일 분포 체적 열원으로 가정하였으며, 각 용접 패스의 용착 금속에 해당하는 요소에만 작용하는 것으로 가정하였다. 이때 FCA 용접 아크의 효율은 2차원 열전달 특성을 고려하여 0.7로 가정하였다. Fig. 2는 잔류응력 평가를 위해 사용된 열적, 기계적 물성치를 나타낸다.



(a) Thermal properties



(b) Mechanical properties

Fig. 2 Temperature dependent material properties of YP47 for FEA

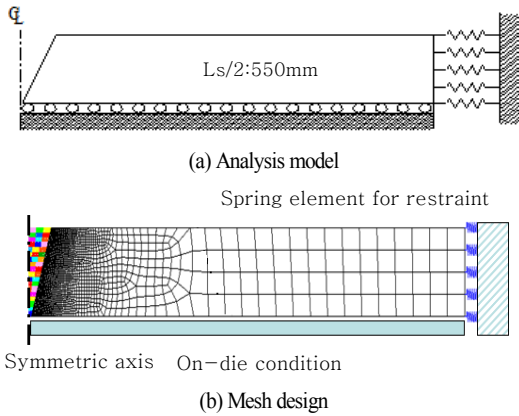


Fig. 3 Analysis model and mesh design used for FEA

잔류응력 평가를 위한 열 탄소성 해석시 사용한 해석 모델과 요소망은 Fig. 3과 같다. 종방향의 과도한 잔류 응력을 제어하기 위해 일반화된 평면 변형률요소(generalized plane strain element)를 사용하여 모델을 구성하였다. 그리고 해석에서 사용된 모재 및 용접부의 기계적 물성은 등방성이고, 온도에 의존하는 이동경화연속체로 가정하였다.

항복 개시 조건은 von-Mises조건을 적용하였다. 변위 경계 조건은 대칭 축에 위치한 절점에 대칭 조건을 부여하였고, 용착금속 생성 및 인근 용접부의 가열시 발생하는 용접 하부면 방향의 각변형을 제어하기 위해 “on-die” 조건을 적용하였다⁶⁾. 그리고 시편의 구속도를 모사하기 위하여 해석 모델의 우측 끝단에 식(1)로 정의되는 강성을 가지는 스프링 요소를 적용하였다.

반복 하중에 의한 잔류응력 재분포 효과는 맞대기 용접에 의해 형성된 잔류응력 평가 후 스프링 끝단에 부여한 구속 조건을 해제하고, 구속되었던 절점에서 용접 해석 중 발생한 반력과 반복 하중 크기를 합한 하중을 각 절점에 부여함으로써 평가하였다. 본 논문에서 고려한 반복 하중의 크기는 선급에서 규정한 YP47 맞대기 용접부의 최대 설계 응력을 고려하여 70MPa, 175MPa 그리고 280MPa로 선정하였고, 실제 발생 확률을 고려하여 1회 가해지는 것으로 가정하였다.

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

where,

K_{spr} : Spring constant corresponding in-plane rigidity [N/mm]

F: Shrinkage force [N]

\bar{u} : Mean displacement [mm]

K_s : Restraint degree [MPa/mm]

A: Cross-section area of weldment [mm²]

L_s : Restraint length of test specimen [mm]

E: Elastic modulus [MPa]

2.1.2 실험 방법

유한요소해석을 통한 YP47 다층 FCA 맞대기 용접부의 잔류응력 평가 기법의 유효성 검증을 위한 실제 시험편 형상은 Fig. 4와 같다. 시험편의 치수는 Table 1과 같으며, 설계 구속도 (100MPa/mm)를 고려하여 시험편의 길이(L)와 구속 슬릿의 길이(L_s)를 결정하였다. Table 3은 실제 시험에 적용된 용접 조건을 나타낸다. 용접 후 시험편의 횡방향 잔류응력은 Fig. 5와 같이 XRD(X-ray diffraction)와 홀드드릴링 방법을 사용하여 계측하였으며, 용접부 표면에 작용하는 평균 구속 응력은 Fig. 6과 같이 용접 시험편의 상/하부에서 설치된 1축 스트레인 게이지를 통해 계측된 결과의 평균치로 정의하였다.

본 실험에서 계측된 용접부 표면의 잔류응력 분포와 평균 구속 응력을 계측하여 해석 결과와 비교함으로써 유한요소해석 기법의 타당성을 검증하였다.

2.2 해석 및 실험 결과

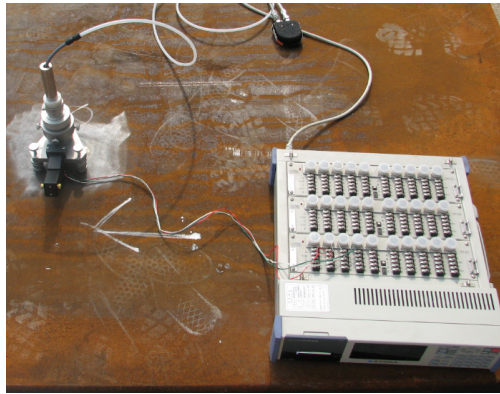
Fig. 7은 시험편의 상면과 하면에서 계측된 횡 방향 잔류응력과 유한요소해석을 통해 평가된 잔류응력 값을 비교한 결과이다. Fig. 7과 같이 유한요소해석을 통해 평가된 결과는 최대 잔류 응력값과 용접부 중앙에서 횡 방향으로의 잔류응력 분포 양상이 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 1축 스트레인 게이지

Table 3 Welding condition used for experiment

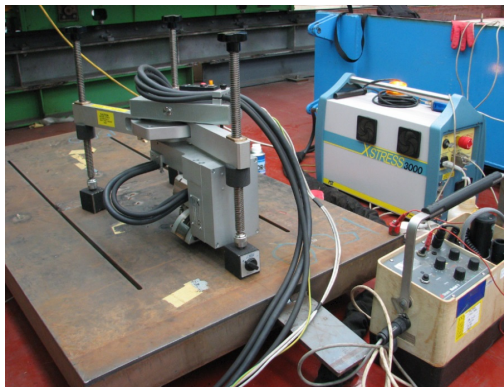
Pass	Welding Condition [A × V × cm/min]			Heat input [kJ/cm]
	A	V	S	
1	240	26	14.6	25.6
2	280	30	29.3	17.2
3	300	31	29.3	19.1
4~71	310	32	31.2	19.1



Fig. 4 Experimental model for verification of FE



(a) Hole-drilling method



(b) X-ray diffraction method

Fig. 5 Measurement methods of the residual stress in the test specimen

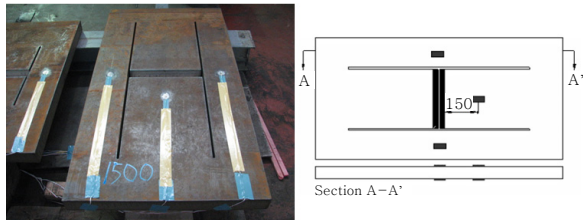


Fig. 6 Locations of 1 axis strain gages

를 이용하여 H-type 시험편에서 용접 및 냉각시 용접 선과 수직인 방향으로 작용하는 구속력의 계측 결과를 유한요소해석 결과와 함께 도시한 것이다. 여기서 구속력은 시험편에 부착한 스트레인 게이지에서 계측된 값의 평균으로 정의하였다. Fig. 8과 같이 용접부가 상온으로 완전히 냉각 후 최종적으로 잔류하는 구속력의 계측 결과는 유한요소해석을 이용하여 평가된 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 사용한 평가 기법이 타당함을 의미한다.

3. 잔류응력 재분포 거동 특성

선박의 운항 중 유발될 수 있는 인장 응력의 크기에 따

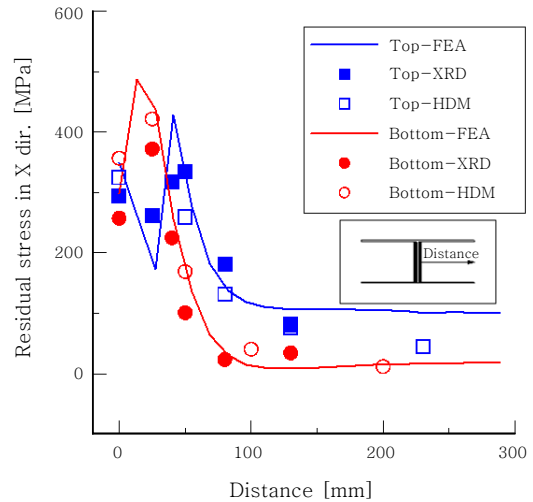


Fig. 7 Comparison results of transverse residual stress evaluated by FEA and experiment with the restraint

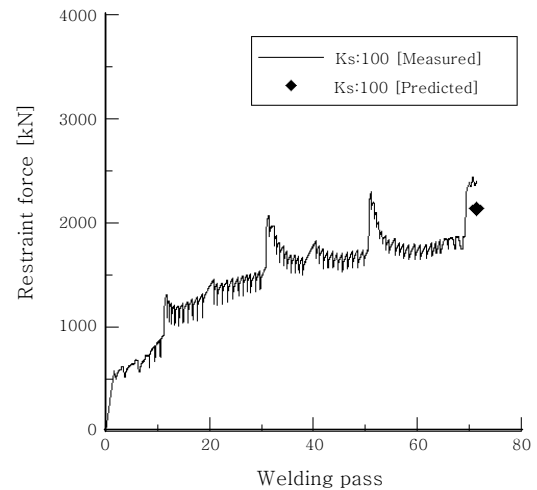


Fig. 8 Comparison results of restraint stress at H-type test specimen with restraint degree of 100MPa/mm

른 다층 FCA 맞대기 용접부의 횡 방향 잔류응력 재분포 거동 특성을 평가하기 위해 본 연구에서 적용한 인장 응력은 선급에서 규정한 YP47 맞대기 용접부의 최대 설계 응력을 고려하여 70MPa, 175MPa 그리고 280MPa 로 선정하였다.

Fig. 9는 280MPa의 인장 응력이 작용한 경우 용접부 횡방향 잔류응력의 재분포 거동 특성을 나타낸다. Fig. 9(b)와 같이 용접 후 280MPa의 인장 응력이 작용하게 되면 토우부 상부면과 용접부 중심의 상부면 바로 아래의 위치에서 모재의 항복응력을 초과하는 응력이 발생한다. 그 후 가해진 인장 응력을 제거하게 되면 Fig. 9(c)와 같이 횡방향 용접 잔류응력은 재분포된다. 인장 하중 제거 후 재분포된 잔류응력은 용접 직후의

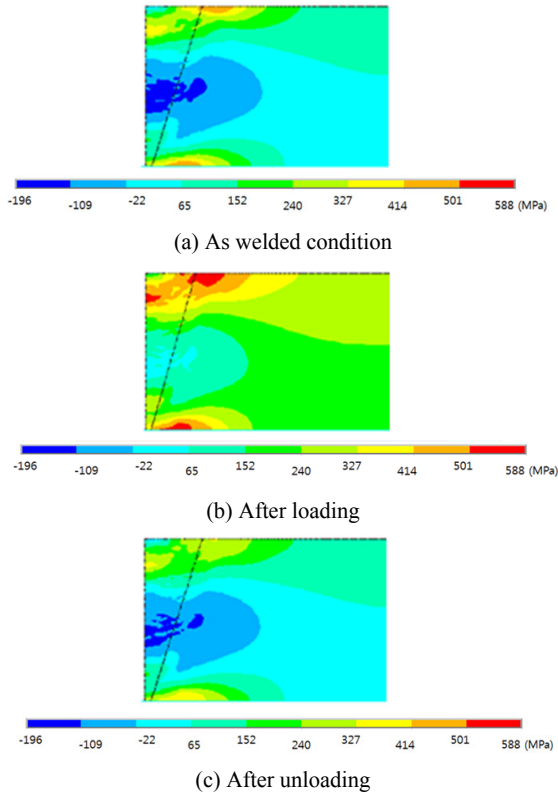


Fig. 9 The redistribution behavior of the transverse residual stress after tensile stress (280MPa)

잔류응력 분포에 비해 두께 방향으로 균일한 분포를 가지며, 최대 인장응력 또한 감소한다.

Fig. 10은 반복 하중의 크기에 따라 하중 제거 후 용접부 잔류응력의 분포를 도시한 것이다. Fig. 10과 같이 가해진 인장 응력 수준의 크기가 증가함에 따라 두께 방향의 횡방향 잔류응력이 균일하게 분포한다. 이것은 가해진 인장 응력의 크기가 증가함에 따라 최종 잔류응력에 미치는 용접 잔류응력의 영향이 감소함을 의미한다.

Fig. 11은 용접부 중심과 토우에서 반복 하중이 작용한 후 횡방향 잔류응력과 모재의 항복강도비를 두께 방향을 따라 도시한 것이다. Fig. 11과 같이 반복 하중이 작용한 후에도 전체적인 잔류응력의 분포 양상 즉, 최대 인장 응력이 발생한 위치는 거의 유사하다. 하지만 용접부 중심과 토우에서 발생한 최대 인장 잔류응력의 크기는 가해진 인장 하중이 증가함에 따라 감소하였으며, 280MPa가 작용했을 때 용접부 중심과 토우에서 나타난 최대 인장 잔류응력의 크기는 용접 직후 나타난 최대 용접 잔류응력의 34%와 57%수준으로 나타났다. 그러나 70MPa의 인장 응력이 작용한 후 잔류응력 분포는 용접 직후의 잔류응력 분포와 거의 유사하였다.

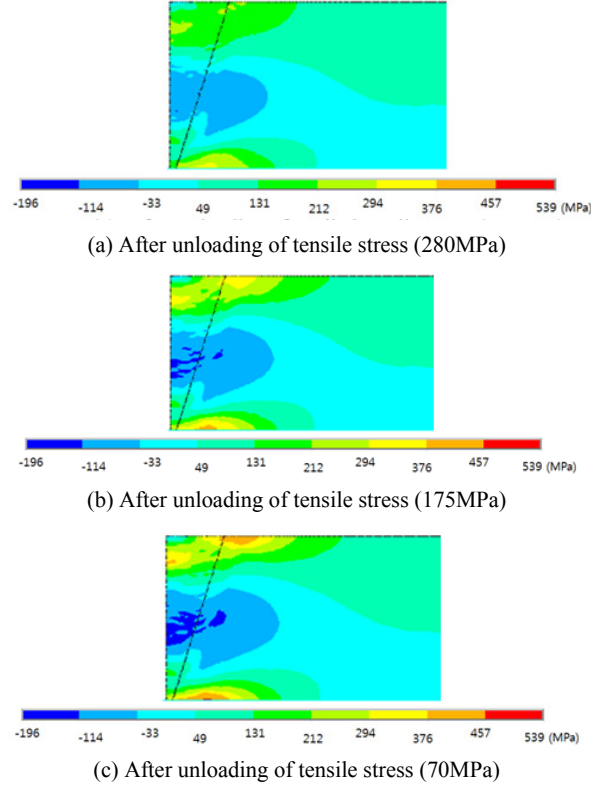


Fig. 10 The redistribution behavior of the transverse residual stress with tensile stresses

Table 4는 용접부 중심과 토우에서 반복 하중의 제거 후 최대 횡방향 잔류응력과 평균 잔류응력 값을 나타낸 것이다. 용접 후 최대 횡방향 잔류응력은 모재의 항복응력과 거의 유사하며, 반복 인장 응력의 제거 후 최대 압축 및 인장 잔류응력은 가해진 하중의 크기가 증가함에 따라 감소하는 반면 평균 잔류응력의 경우 가해진 응력 크기에 관계 없이 거의 유사한 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

초대형 컨테이너 선의 파괴 방지 설계의 일환으로 반복 하중 하의 다층 FCA 맞대기 용접부의 횡방향 잔류응력 재분포 거동 특성을 유한요소해석을 이용하여 평가하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1) 용접강도위원회에서 제안한 용접부 온도 분포 해석 규약을 적용하여 평가된 다층 FCA 맞대기 용접부의 잔류응력 분포 해석 결과는 XRD와 홀드릴링 방법을 이용해 계측된 결과와 잘 일치하였다.

2) 극후판 YP47 용접부의 잔류응력 평가 결과 용접 후 형성된 평균 잔류응력의 크기는 약 59MPa로 항복응력 (약 470MPa)대비 약 12% 수준에 불과했다. 따

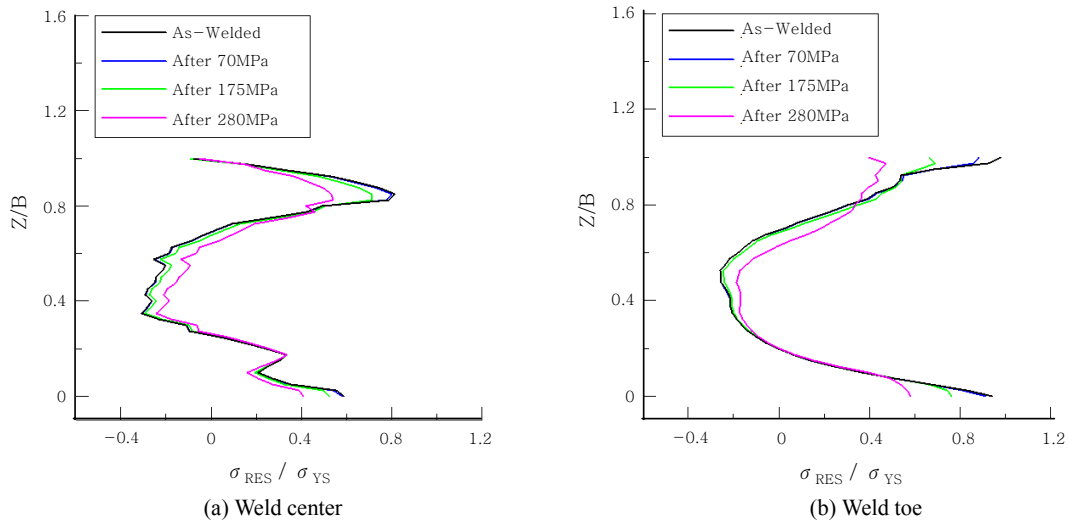


Fig. 11 Variation of the ratio of transverse residual stress to yield strength of the weldment at the weld center and weld toe with applied tensile load

Table 4 Residual stress after releasing of the applied tensile load at the weld center and toe

Load condition		Maximum tensile stress [MPa]	Maximum compressive stress [MPa]	Mean stress [MPa]
As-welded	Center	375.7	-140.9	58.7
	Top	450.5	-118.4	
70MPa	Center	367.2	-140.3	58.7
	Top	420.1	-118.3	
175MPa	Center	328.2	-133.6	58.5
	Top	351.4	-111.6	
280MPa	Center	248.4	-112.4	57.5
	Top	266.8	-85.0	

라서 초대형 컨테이너선의 파괴 방지 설계를 위한 용접부 잔류응력 평가 시 BS7910에서 규정한 바와 같이 용접부 잔류응력 수준을 항복 응력으로 가정하는 것은 매우 보수적이다.

3) 반복 하중의 크기가 증가함에 따라 최대 잔류응력의 크기는 비례적으로 감소하지만 평균 잔류응력의 크기의 변화는 미미하였다. 이는 선급에서 규정한 설계 하중의 크기가 선체 구속 조건하의 두께 방향 잔류응력을 이완시킬 수 있을 만큼 충분히 크지 않기 때문이다.

4) 이상의 맞대기 용접부의 반복 하중하의 횡방향 잔류응력 해석결과, 용접부의 파괴 방지 설계를 위하여 잔류응력 재분포 효과를 고려하기 위해서는 응력 선형화를 통한 파괴 방지 설계 응력의 정의가 선행되어야 한다.

References

1. Masubuchi, K, Analysis of welded structure, Pergamon Press, (1980)
2. British Standard 7910, Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, (2013)
3. Sang Beom Shin and Dong Ju Lee and Dong Hwan Park, A Study on the Evaluation of Transverse Residual Stress at the Multi-pass FCA Butt Weldment using FEA, *Journal of KWJS*, 28-4 (2010), 380-386 (in Korean)
4. Commission of Design, Analysis and Structural Strength of Welded Structures, Standardization for Temperature Distribution Prediction of the Arc Weld using FEA, *Journal of KWJS*, 23-6 (2003), 497-503 (in Korean)
5. Sang Beom Shin and Dong Ju Lee and Joo Sung Lee, A Study on the Predicting Transverse Residual Stress at the Ultra Thick FCA Butt Weldment of Hatch Coaming in a Large Container Vessel, *Journal of KWJS*, 28-4 (2010), 387-394 (in Korean)
6. Sang Beom Shin and Joong Geun. Youn, A Study on the angular Distortion Prediction of Double Sided Multi- ass Butt Weldment, *Journal of KWJS*, 25-1 (2007), 37-41 (in Korean)