

FPSO Moon Pool 구조에서 발생하는 용접 잔류응력에 관한 연구

이주성^{*†} · 한성우^{*} · 이상훈^{*} · 김상일^{**}

^{*}울산대학교 조선해양공학부

^{**}로이드선급 아시아

A Study on the Weld-induced Residual Stress Analysis at FPSO Moon Pool Structure

Joo-Sung Lee^{*†}, Sung-Woo Han^{*}, Sang-Hoon Lee^{*} and Sang-Il Kim^{**}

^{*}School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

^{**}Lloyd's Register Asia, Koje 656-610, Korea

[†]Corresponding author : jslee2@ulsan.ac.kr

(Received March 8, 2011 ; Revised May 2, 2011 ; Accepted June 20, 2011)

Abstract

Welding process generates distortion and residual stress in the weldment due to rapid heating and cooling. Welding distortion and residual stress in the welded structure result in many troubles such as dimensional inaccuracies in assembling and safety problem during service. The accurate prediction of welding residual stress is thus very important to improve the quality of weldment and find the way to reduce itself. This paper presents the simulation of welding-induced residual stress analysis to examine the cause of cracking in the SUS-overlay welding specimen at FPSO Moon Pool structure.

Key Words : Residual stress, Numerical analysis

1. 서 론

선박·해양구조물의 제작 및 조립 시 용접변형 및 용접균열은 작업과정에 의해 필연적으로 나타나게 된다. 용접변형의 경우 용접금속과 모재 사이에 가열과 냉각 사이클의 전 과정을 통한 불균일한 팽창과 수축으로 인하여 발생된다^{1,2)}. 이러한 변형은 구조물의 강도 저하나 외관상의 문제 등으로 엄격히 규제되어, 용접 후 변형을 제거하는 비용이 큰 비중을 차지하고 있다. 현재 선박의 블록 조립 공정은 절단, 굽힘, 용접, 응력 완화 및 곡직 공정으로 구성되어 있어, 공정 대부분이 가열 및 냉각을 수반하는 열공정을 포함하고 있다. 이러한 열공정들 중에서도 용접으로 인한 잔류변형은 조립 단계 별로 반드시 발생하게 되는데, 각 조립 단계에서 발생하는 이러한 기하학적 부정확성은 자동화와 기계화의 도입을 방해하고 있으며, 다음 조립단계에서의 취부 작업 시 추가적인 교정 작업을 초래하여 전체 취부 작업

공수를 증가시키는 요인이 된다^{3,4)}.

또한 용접균열을 그 발생 시기에 따라 분류하면 비교적 높은 온도에서 발생하는 고온균열과 낮은 온도에서 발생하는 저온균열로 나눌 수 있다. 고온균열은 액화균열이나 응고균열과 같이 저융점 개재물의 영향으로 발생하는 균열로 주로 용접부 초층에서 흔히 발생되고, 저온균열은 용접부 내로 유입된 확산성 수소, 잔류응력, 경화조직에 의해 발생된다. 저온균열은 발생위치에 따라 weld metal 내부에서 발생하는 횡균열과 열영향부(HAZ: Heat Affect Zone)에서 발생하는 종균열로 나뉜다^{1,2)}. 상대적으로 경도 값이 높은 HAZ부에서의 발생 가능성이 높다고 알려져 있지만 최근에는 TMCP 강(Thermo Mechanical Controlled Process Steel)과 같은 저합금 고장력강의 개발로 인해 열영향부보다는 오히려 용접금속 내부에서의 저온균열이 더 쉽게 발생된다고 보고되고 있다⁵⁻⁷⁾.

FPSO선(Floating Production, Storage and Off-loading Vessel)의 모든 블록은 moon pool 블록을

중심으로 탑재된다. moon pool이란 FPSO선의 선체를 바람, 조류, 파도 등의 영향이 가장 작은 방향으로 이동시키고, 원유를 뽑아 선체 상부에 설치되어 있는 모듈로 보내 주는 기름 호스의 가이드 역할을 하는 터렛의 작동을 돕는 것으로 고난도의 용접 기술력이 요구되는 구조물이다.

FPSO선의 moon pool 블록 제작을 strip cladding 방식으로 해 달라는 선주 측의 요구 사항에 의해 본 연구가 진행되었다. 선주 측에서는 직경 22m의 대형 원형 판 내부에 비드 폭이 약 600mm 이상, 비드 높이가 약 22mm 정도로 1차 용접되어 16mm로 가공되는 다층 stainless steel strip cladding 방식을 요구하였다. 이를 위해서는 1회 용접시 비드 폭이 약 60mm 이상 나오는 용접장비를 이용하여 13 pass 이상 용접 가능해야 하며, 비드 높이가 가공 마진을 고려해 22mm 이상을 유지해야 하고, 약 6 layer 이상을 지속적으로 용접하는 방법을 반복 실시해야 하는 고난도의 용접 기술을 갖추어야 한다.

본 논문에서는 moon pool 구조의 용접변형을 최소화하기 위한 변형 제어 방안으로서 최적화된 용접 순서를 제시하였고, 이의 타당성을 다수의 실험 및 수치해석을 통해서 검증하였다. 이로부터 FPSO선 moon pool 구조의 SUS-Overlay 용접 이음부 주위에 고질적으로 발생되어 온 용접변형을 현저히 줄일 수 있었다.

또한 굽힘시험을 수행 할 경우 FPSO moon pool 구조에서의 SUS-overlay 용접 시편의 SUS부에서 균열(crack)의 발생 가능성이 있어, 이에 대한 정확한 발생원인 및 대책 수립을 위해 해당 부분의 용접 잔류응력 해석을 수행하였다. 이를 통해서 SUS-overlay 용접 시편의 균열 발생 가능성을 검토하고, 그 대안에 대해서도 논의하였다.

본 연구에서는 용접으로 인한 변형을 가능한 한 정밀하게 계산하기 위하여 비선형 열전달 및 열변형해석을 수행하였다. 모든 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 비정상 열전달문제를 풀어 온도분포의 시간 이력을 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행하는 2단계 해석법을 적용하였다^{8,9)}.

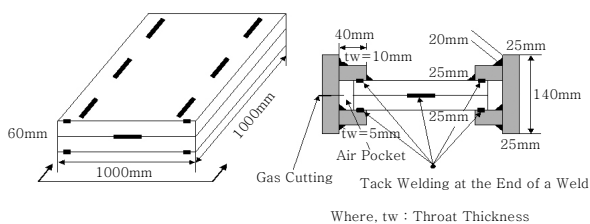


Fig. 1 Dimension of experimental model

2. 용접변형실험

본 장에서는 jig를 이용한 free edge부 구속법이 작업 공법상 전혀 문제가 되지 않으며, 용접변형 감소에도 효과적이라는 사실을 규명하기 위해 용접변형실험을 수행하였다. 실험 모델의 치수는 Fig. 2에 보인 바와 같으며, jig는 기본적인 보 이론을 통해서 필릿 용접으로 인한 중굽힘변형이 최소화되도록 설계하였다. Fig. 3은 본 논문에서 제시한SUS-Overlay 용접 순서를 보여 주고 있으며, 실험방법은 SUS-Overlay용접으로 인해 발생하는 길이 방향과 폭 방향으로의 굽힘모멘트의 크기를 최소화하기 위해 양 끝단에 판을 붙여서 작업을 하고, SUS-Overlay 용접에 의해 발생하는 중·횡굽힘 모멘트의 균형 유지를 위해서, 용접 순서는 판의 중앙부에서 좌·우 방향으로 대칭적으로 용접을 수행 하였다.

Fig. 3은 실제 용접변형실험 시의 용접 순서를 보여

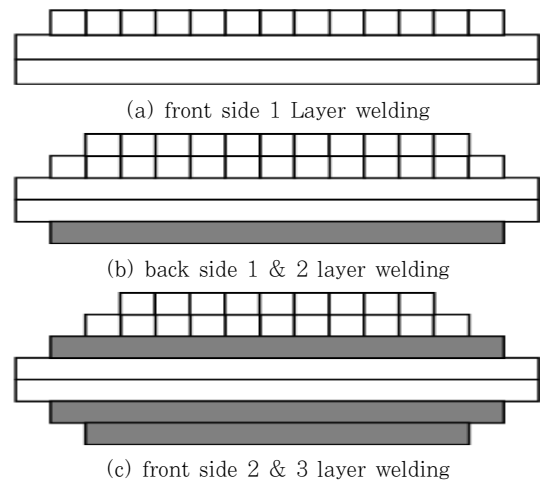
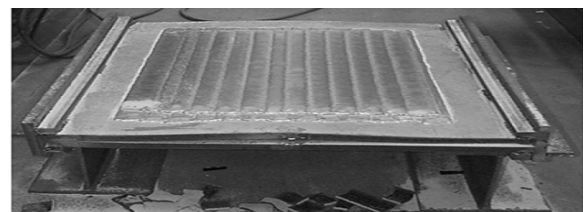


Fig. 2 Proposed welding sequence



(a) front side 1 layer welding



(b) back side 1 & 2 layer welding

Fig. 3 Actual welding sequence

Table 1 Angular distortion according to the welding pass number (measured span : 800mm)

| Pass Number | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| Bending Deflection (mm) | 5 | 5 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 8 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |

주고 있으며, Table 1은 전면에서 1 layer 용접 시의 pass 수에 따른 각변형의 발생 추이를 보여 주고 있는데, jig를 이용한 free edge부 구속법이 용접변형 감소에 매우 효과적이라는 사실을 보여 주고 있다.

Fig. 4는 jig 철거 후의 최종적인 각변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1 & 2 layer 용접한 시편의 각변형은 현저히 감소되나, 전면에서 1 layer 용접한 시편의 각변형은 다소 크게 나타난다.

Fig. 5는 최종적인 종굽힘변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1 & 2 layer 용접한 시편의 종굽힘변형은 free edge 부에서 다소 발생되며, 전면에서 1 layer 용접한 시편의 종굽힘변형은 반대 방향으로 약간 크게 나타난다.

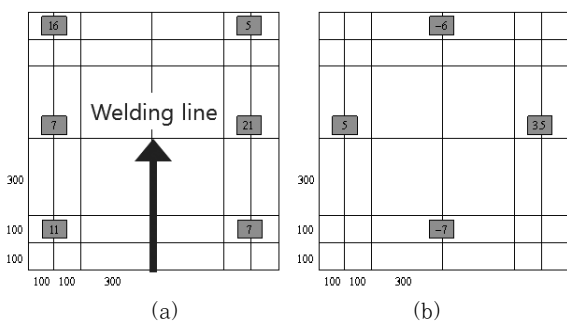


Fig. 4 Angular distortion of experimental model, in mm (a) front side 1 layer-welded specimen, (b) back side 1 & 2 layer-welded specimen

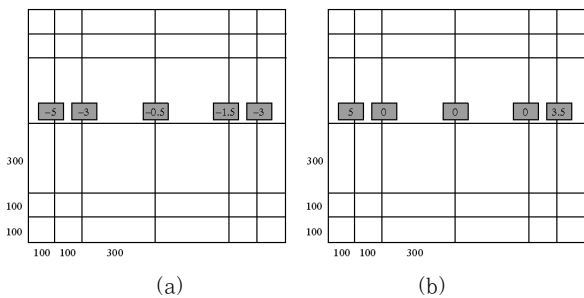


Fig. 5 Longitudinal bending distortion of experimental model, in mm (a) front side 1 layer-welded specimen, (b) backside 1 & 2 layer-welded specimen

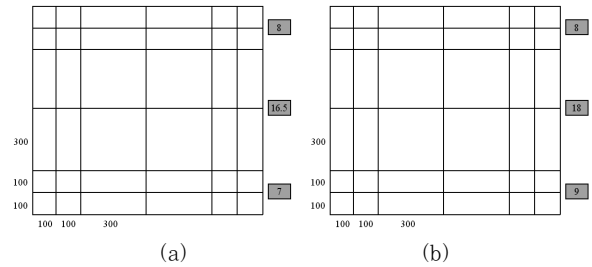


Fig. 6 Transverse shrinkage of experimental model, in mm (a) front side 1 layer-welded specimen (b) back side 1 & 2 layer-welded specimen

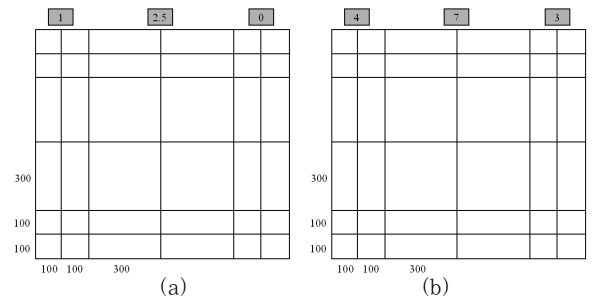


Fig. 7 Longitudinal shrinkage of experimental model, in mm (a) front side 1 layer-welded specimen, (b) back side 1 & 2 layer-welded specimen

Fig. 6은 jig 철거 후의 최종적인 횡수축변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1 & 2 layer 용접한 시편과 전면에서 1 layer 용접한 시편 둘 다 판 길이의 중앙부에서 매우 큰 횡수축변형이 유발되며, 횡수축변형은 1 layer 용접 시가 가장 지배적이라는 사실을 알 수 있다.

Fig. 7은 최종적인 종수축변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1 & 2 layer 용접한 시편과 전면에서 1 layer 용접한 시편 둘 다 판 폭의 중앙부에서 꽤 큰 종수축변형이 발생되며, 종수축변형은 layer 수에 비례한다는 사실을 확인할 수 있다.

3. 용접 잔류응력 해석

3.1 유한요소 모델링

해석은 2차원 일반화 평면 변형을 모델(generalized plane strain)을 선택하였고, 유한요소모델은 일반화 평면 변형을 요소를 이용하였다. 해석 순서는 모델을 만들어 먼저 열전달 해석을 수행하고, 그에 따라 열응력 해석을 수행하였다. 열전달 해석과 열응력 해석의 비연성 가정은 이미 많은 연구를 통하여 그 유효성이 입증되었으므로, 두 가지 현상의 연성 효과를 고려하지

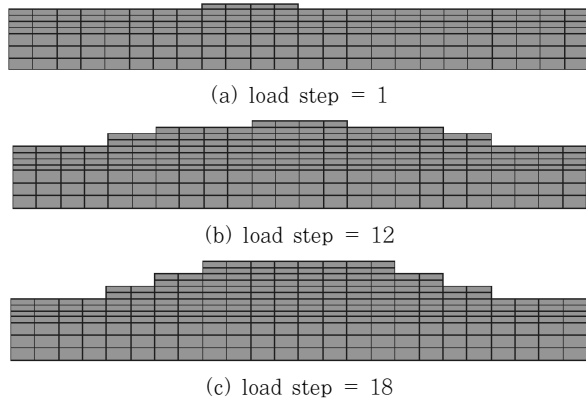


Fig. 8 Changes over time in the analytical model

않고 순차적으로 독립적인 두 가지 해석을 수행하였다. 열전달 해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도의존성을 고려하였으며, 또한 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)의 효과를 고려하였다. 열응력 해석 시에도 모든 기계적인 재료 특성치들이 온도에 따라 변하도록 모델링하였다³⁾.

열전달 해석과 열응력 해석 모두 용착 금속(weld metal)이 쌓여 나가는 과정을 구현하기 위해 해석이 진행되는 동안 해석 모델이 변하도록 하였다. Fig. 8은 시간이 지남에 따라 각 용접 층이 쌓여 나가는 모습을 나타낸다. 초기에는 전체를 모델링하고, 해석이 시작되기 이전에 비드(bead) 부분의 요소들을 모두 삭제한 다음, 시간에 따라 요소가 하나씩 생성되도록 하였다.

열전달 해석의 경우에는 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대기의 온도는 20°C로 가정하였다. 용접 비드가 쌓이는 현상을 수치적으로 모델링하는 방법으로 본 해석에서는 생성되는 요소에 체적 열속(body heat flux)을 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였고, 이에 따라 열응력 해석을 순차적으로 수행하였다.

3.2 해석 결과

Fig. 9는 SUS-overlay 용접 시편 모델을 보여 주고 있다. Fig. 9 (a)는 실제 시편이고 (b)는 용접 시편을 단순화하여 나타낸 그림이다. Fig. 10은 본 연구에 사용된 시편의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. Fig. 11과 12는 대상 모델들의 중앙부에서 깊이 방향으로의 용접 잔류응력 분포를 도식적으로 보여주고 있는데, 폭 방향의 응력(σ_{11})을 살펴보면 비드 최종 층 아래 부분의 용착 금속 내부와 판의 하단부에서 높은 인장응력을 보이며, 용접선 방향의 응력(σ_{33})의 경우에도 최종 층

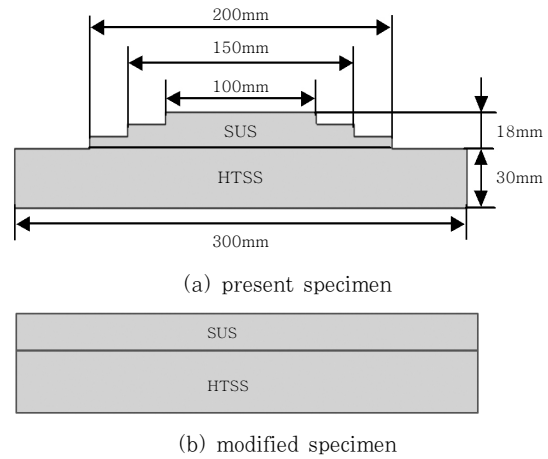


Fig. 9 Experimental model of SUS-overlay weld

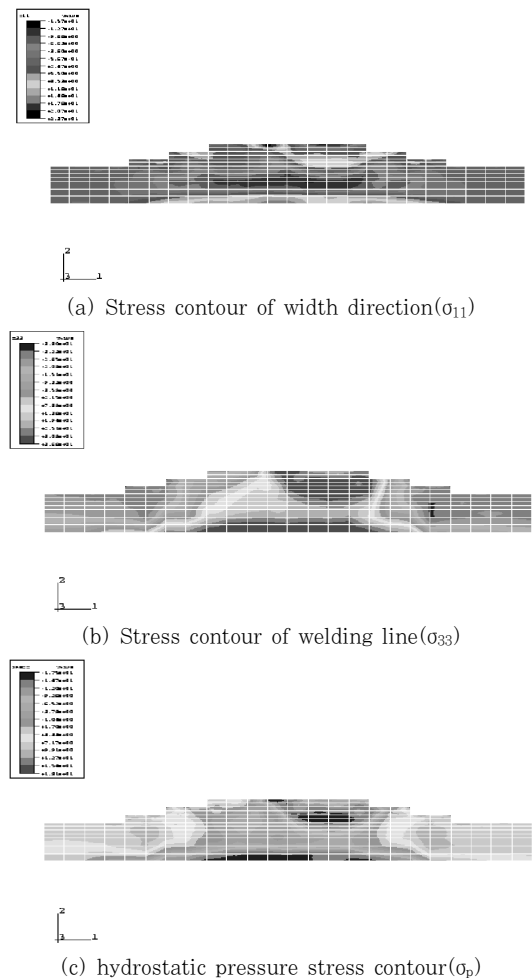
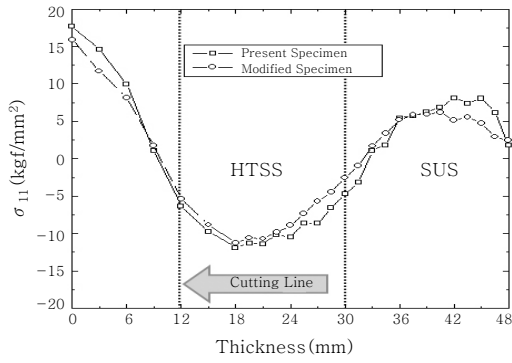
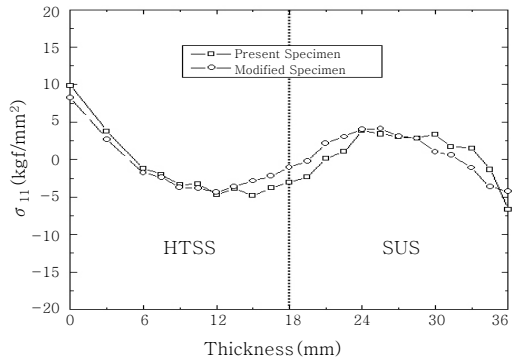


Fig. 10 Residual stress distribution of present specimen model

아래 부분의 용착 금속 내부와 판의 하단부에서 높은 인장응력을 보인다. Fig. 13은 정수압 응력(hydrostatic

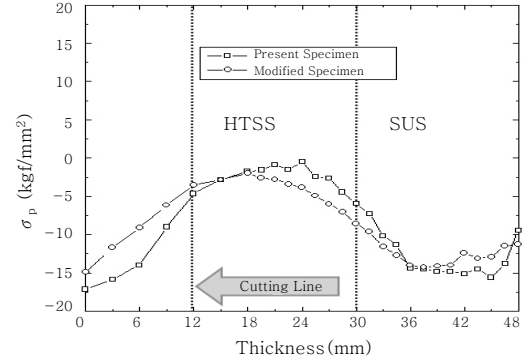


(a) Stress distribution before cutting

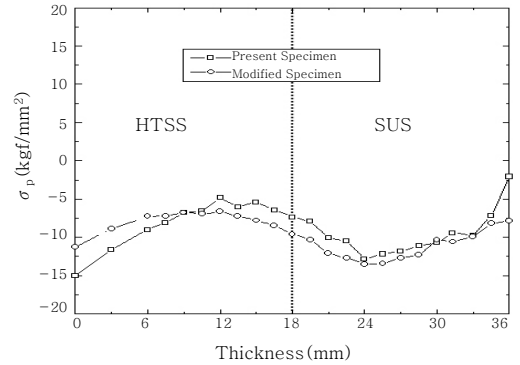


(b) Stress distribution after cutting

Fig. 11 Residual stress distribution of width direction

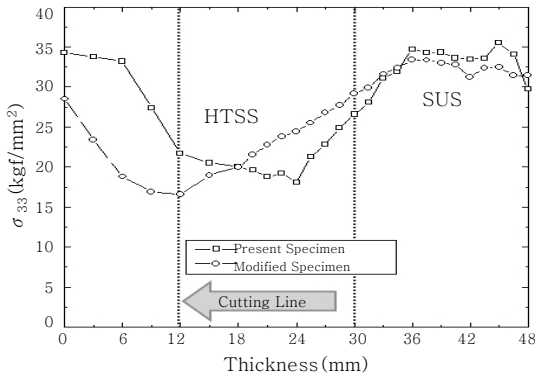


(a) Stress distribution before cutting

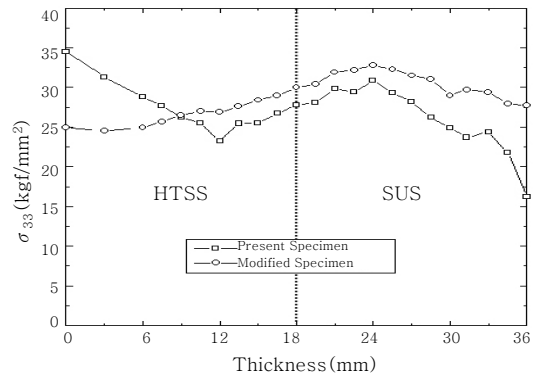


(b) Stress distribution after cutting

Fig. 13 Distribution of hydrostatic pressure stress



(a) Stress distribution before cutting



(b) Stress distribution after cutting

Fig. 12 Residual stress distribution of welding line

pressure stress)의 분포를 보여 주고 있는데, 비드 최종 층 아래 부분에 높은 3축 인장응력(high hydrostatic tension stress) 상태가 형성되어 있음을 알 수 있으며, 이는 용접이 끝난 후 확산성 수소의 판 두께 방향의 분포가 최종 비드 아래 부분에 집중될 수 있다는 것을 의미한다. 이는 최대 잔류응력의 발생 위치와도 일치하는데, 이러한 사실은 용착 금속부인 SUS부에서 높은 수소 농도와 용접 잔류응력의 결과로 균열이 발생할 가능성이 있음을 설명해 주고 있다.

또한, 대상 모델 둘 다 용접이 완료된 이후에 모재부인 HTSS(high tensile strength steel)부의 하부를 12mm 절단 한 후 열응력 해석을 수행하고, 이를 절단 이전의 결과와 비교한 결과 용착 금속부인 SUS부에서 높은 인장응력을 완화시키는 역할을 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

FPSO moon pool 구조에서의 SUS-overlay 용접 시편의 SUS부에서 균열의 발생 가능성이 있어, 이에 대한 정확한 발생원인 및 대책 수립을 위해 해당 부분의 용접 잔류응력 해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결

론을 얻을 수 있었다.

1) 용착 금속부인 SUS부에서의 높은 수소 농도와 인장잔류응력의 결과로 균열이 발생할 가능성이 있다.

2) 대상 모델 둘 다 용접이 완료된 이후에 모재부인 HTSS(high tensile strength steel)부의 일부를 절단해 주는 방법이 용착 금속부인 SUS부에서의 높은 인장응력을 완화시키는 역할을 한다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 HTSS의 두께를 현재보다 작게 가져가는 것이 균열 방지 측면에서 유리하다는 사실을 의미한다.

후 기

이 논문은 울산대학교 연구비 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부임 (과제번호 = 2008-0142).

참 고 문 헌

1. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford, 1980
2. H.B. Cary : Modern Welding Technology, 4th Edition, Upper Saddle River, New Jersey, 1997
3. Sang Il Kim : Development of welding deformation control method for hull structure, Ph. D Thesis, University of Ulsan, Republic of Korea, 1999 (in Korean)
4. Jin Tae Lee : Study of the influence of increasing productivity through the implementation of the grand block unit system in ship construction, Ph. D Thesis, University of Ulsan, Republic of Korea, 2010 (in Korean)
5. H.W. Lee, S.W. Kang : A study on transverse weld cracks in 50mm thick steel plate with SAW process, Welding research abroad, **44-2** (1998), 7-17
6. Taik Soon Lee, Dae Sek Oh, Hwi Won Lee : The characteristics of near - threshold fatigue crack propagation for welding zone in TMCP high strength steels, Journal of ocean engineering and technology, **11-3** (1997) 39-47 (in Korean)
7. H.S. Yu, Y.S. Chang, B.G. Ahn, S.H. Chung : A study on effect of PWHT in AH36-TMCP steel, Journal of KWS, **16-6** (1998), 44-51 (in Korean)
8. Chang Doo Jang, Seung il Seo : Calculation of residual stresses by thermal elasto-plastic analysis, Journal of KWS, **6-4** (1988), 35-43 (in Korean)
9. Sung Woo Han : A Study on the thermal deformation characteristics a thin panels according to the type of a stiffener, Master's Thesis, University of Ulsan, Republic of Korea, 2009 (in Korean)