FPSO Moon Pool 구조의 용접변형과 잔류응력에 관한 연구

한성우¹·이주성¹·김상일^{2,†}
울산대학교 조선해양공학부¹
로이드 선급 아시아²

A Study on the Weld-Induced Deformation and Residual Stress Analysis at FPSO Moon Pool Structure

Sung-Woo Han¹·Joo-Sung Lee¹·Sang-Il Kim^{2,†}
School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan¹
Lloyd's Register Asia²

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.

Keywords : Residual stress(잔류응력), Numerical analysis(수치해석)

1. 서론

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(Masubuchi, 1980; Cary, 1997). 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 부가적인 교정 작업을 초래하여 전체 취부 작업 공수를 증가시키는 요인이 된다(Kim, 1999; Lee, 2010).

또한 용접균열을 그 발생 시기에 따라 분류하면 비교적 높은 온도에서 발생하는 고온 균열과 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 HAZ(Heat Affect Zone)부에서 발생하는 종균열로 나뉘인다(Masubuchi, 1980; Cary, 1997). 상대적으로 경도 값이 높은 HAZ부에서의 발생 가능성이 높다고 알려져 있지만 최근에는 TMCP강과 같은 저합금 고장력강의 개발로 인해 열영향부보다는 오히려 용접금속 내부에서의 저온균열이 더 쉽게 발생된다고 보고되고 있다(Lee & Kang, 1997; Lee & Oh, 1997; Yu & Cahng, 1998).

FPSO선(Floating Production, Storage and Off-loading Vessel)의 모든 블록은 Moon pool 블록을 중심으로 탑재된다(Fig. 1 참고). 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 Turret의 작동을 돕는 것으로 고난도의 용접 기술력이 요구되는 구조물이다.

본 연구는 FPSO선의 Moon pool 블록 제작을 기존 방식이 아닌 Strip cladding 방식으로 해 달라는 선주 측의 요구 사항에 의해 진행되었다. 선주 측에서는 직경 22m의 대형 원형 판 내부에 비드 폭이 약 600mm 이상, 비드 높이가 약 22mm 정도로 1차 용접되어 16mm로 가공되는 다층 스테인레스 강 스트립 클래딩

(Stainless steel strip cladding) 방식을 요구하였다. 이를 위해서는 1회 용접 시 비드 폭이 약 60mm 이상 생성되는 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 기술력을 갖추어야 한다 (Kim, 2006).

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 본 논문에서는 굽힘시험 중 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 검토하였고, 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 열 하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행하는 2단계 해석법을 적용하였다(Jang & Seo, 1988; Han, 2009).

Fig. 1 Moon pool structure of FPSO vessel

2. 용접변형

여기에서는 지그를 이용한 자유단 (Free edge)의 구속법이 작업 공법상 전혀 문제가 되지 않으며, 용접변형 감소에도 효과적이라는 사실을 규명하기 위해 실구조물에 대한 용접변형해석과 용접변형실험을 수행하였다. 용접변형해석 모델은 실구조물과 같은 길이가 8000mm, 폭이 1000mm이고, 두께가 30mm 판에 비드 폭이 100mm, 비드 두께가 40mm가 되도록 하는 오버레이 용접을 시험하는 열탄소성해석을 수행하였다. 그 결과로서 Fig. 2에 최종 변형형상을 보였다. Fig. 2(a)은 자유단을 구속하지 않은

상태에서의 용접변형해석 결과이고, Fig. 2(b)는 자유단을 구속한 상태에서 용접변형해석을 수행한 결과이다. 각각의 용접변형해석 결과를 비교해 보면 자유단을 구속했을 때, 용접변형이 현저히 감소하는 것을 알 수 있었다. 지그를 이용한 자유단 구속법 (Constraining method)을 적용한 용접변형실험 모델의 치수는 Fig. 3에 보인 바와 같으며, 지그는 기본적인 보 이론을 통해서 필릿 용접으로 인한 중첩변형이 최소화되도록 설계하였다. Fig. 4는 본 논문에서 제시한 SUS-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·횡굽힘모멘트의 균형 유지를 위해서, 용접 순서는 판의 중앙부에서 좌·우 방향으로 대칭적으로 용접을 수행 하였다.

Fig. 5는 실제 용접변형실험 시의 용접 순서를 보여 주고 있으며, Table 1은 전면에서 1층 용접 (1 layer welding) 시의 Pass 수에 따라 발생하는 각변형의 크기 변화를 보여 주고 있는데, 지그를 이용한 자유단의 구속법이 용접변형 감소에 효과적이라는 사실을 보여 주고 있다. Fig. 6은 지그 철거 후의 최종적인 각변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1층과 2층을 용접한 시편의 각변형은 현저히 감소되나, 전면에서 1층 용접한 시편의 각변형은 다소 크게 나타난다. Fig. 7은 최종적인 중첩변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1층과 2층을 용접한 시편의 중첩변형은 자유단에서 다소 발생되며, 전면에서 1층 용접한 시편의 중첩변형은 반대 방향으로 약간 크게 나타난다. Fig. 8은 지그 철거 후의 최종적인 횡수축변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1층과 2층을 용접한 시편과 전면에서 1층을 용접한 시편 둘 다 판 길이의 중앙부에서 매우 큰 횡수축변형이 유발되며, 횡수축변형은 1층 용접 시 발생하는 것이 가장 지배적이라는 사실을 알 수 있다. Fig. 9는 최종적인 종수축변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1층과 2층을 용접한 시편과 전면에서 1층 용접한 시편 둘 다 판 폭의 중앙부에서 큰 종수축변형이 발생되며, 종수축변형은 층수에 비례한다는 사실을 확인할 수 있다.

Fig. 2 Result of welding deformation analysis for real structure

Fig. 3 Dimension of experimental model

Fig. 4 Proposed 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

(a) front side 1 layer welding

(b) back side 1 & 2 layer welding

Fig. 5 Actual welding sequence

(a) Front side 1 layer-welded (b) Backside 1 & 2 layer-welded
Fig. 6 Angular distortion of experimental model, in mm

(a) Front side 1 layer-welded (b) Backside 1 & 2 layer-welded
Fig. 7 Longitudinal bending distortion of experiment model, in mm

(a) Front side 1 layer-welded (b) Backside 1 & 2 layer-welded
Fig. 8 Transverse shrinkage of experimental model, in mm

(a) Front side 1 layer-welded (b) Backside 1 & 2 layer-welded
Fig. 9 Longitudinal shrinkage of experimental model, in mm.

3. 용접 잔류응력 해석

3.1 유한요소 모델링

열전달 해석 및 열응력 해석은 2차원 일반화된 평면 변형률 모델 (Generalized plane strain model)을 선택하였고, 유한요소모델은 일반화된 평면 변형률 요소 (Generalized plane strain element)를 이용하였다. 수치 해석 순서는 유한요소 모델을 만들어 먼저 열전달 해석을 수행하고, 열전달 해석의 결과 값을 열 하중으로 하여 열응력 해석을 수행하였다. 열전달 해석과 열응력 해석의 비연성 가정은 이미 많은 연구를 통하여 그 유효성이 입증되었으므로, 두 가지 현상의 연성 효과를 고려하지 않고 순차적으로 독립적인 두 가지 해석을 수행하였다.

열전달 해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 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 모델링하였다 (Kim, 1999).

열전달 해석과 열응력 해석 모두 용착금속 (weld metal)이 쌓여 나가는 과정을 구현하기 위해 해석이 진행되는 동안 해석 모델이 변하도록 하였다. Fig. 10은 시간이 지남에 따라 각 용접 층이 쌓여 나가는 모습을 나타낸다. 초기에는 전체를 모델링하고, 해석이 시작되기 이전에 비드 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 방법으로는, 생성되는 요소에 체적 열 유속 (Body heat flux)를 가하는 방법, vways 열 유속 (Surface heat flux)를 가하는 방법, 절점 온도 (nodal temperature)를 주는 방법 등이 있는데, 본 해석에서는 생성되는 요소에 체적 열 유속을 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였고, 이에 따라 열응력 해석을 순차적으로 수행하였다.

Fig. 10 Changes over time in the analytical model

3.2 해석 결과

Fig. 11은 SUS-overlay 용접 시편 모델을 보여 주고 있다. Fig. 11 (a)은 실제 시편이고 (b)는 용접 시편을 단순화하여 나타낸 그림이다. Fig. 12는 본 연구에 사용된 시편의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. Fig. 13과 14는 대상 모델들의 중앙부에서 깊이방향으로의 용접 잔류응력 분포를 도식적으로 보여주고 있는데, 폭 방향의 응력(σ_{11})을 살펴보면 비드 최종 층 아래 부분의 용착금속 내부와 판의 하단부에서 높은 인장응력을 보이며, 용접선 방향의 응력(σ_{33})의 경우에도 최종 층 아래 부분의 용착금속 내부와 판의 하단부에서 높은 인장응력을 보인다. Fig. 15는 중앙부에서 깊이방향으로의 Hydrostatic pressure stress의 분포를 보여 주고 있는데, 비드 최종 층 아래 부분에 높은 3축 인장응력(high hydrostatic tension stress) 상태가 형성되어 있음을 알 수 있으며, 이러한 해석 결과를 바탕으로 용접이 끝난 후 확산성 수소의 판 두께 방향의 분포가 최종 비드 아래 부분에 집중될 수 있다고 생각할 수 있다. 이는 최대 잔류응력의 발생 위치와도 일치하는데, 이는 용착 금속부인 SUS부에서 높은 수소 농도와 용접 잔류응력의 결과로 균열이 발생할 가능성이 높다고 가정할 수 있고, 이를 확인하기 위하여 용접 후 확산성 수소의 분포에 대한 실험을 차후 실험을 수행 하여야 할 것이다.

또한, 대상 모델 둘 다 용접이 완료된 이후에 모재부인 HTSS (high tensile strength steel)부의 하부를 12mm 절단한 후 열응력 해석을 수행한 결과 용착 금속부인 SUS부에서의 높은 인장응력을 완화시키는 역할을 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

Fig. 11 Experimental model of SUS-overlay weld

(b) Stress contour of welding line(σ_{33})

(c) hydrostatic pressure stress contour(σ_p)

Fig. 12 Residual stress distribution of present specimen model

(a) Stress distribution before cutting

(b) Stress distribution after cutting

Fig. 14 Residual stress distribution of welding line

(a) Stress distribution before cutting

(b) Stress distribution after cutting

Fig. 13 Residual stress distribution of width direction

(a) Stress distribution before cutting

(b) Stress distribution after cutting

Fig. 15 Distribution of hydrostatic pressure stress

4. 결 론

FPSO moon pool 구조에서 스트림 클래딩 방식을 사용하여 SUS-overlay 용접을 수행한 시편의 용접변형을 감소시키기 위한 방법으로 Jig를 이용한 구속법의 타당성을 용접변형해석 및 실험을 통하여 검증하였고, SUS부에서 균열의 발생 가능성이 있어, 이에 대한 정확한 발생원인 및 대책 수립을 위해 해당 부분의 용접 잔류응력 해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 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 열응력 해석을 통하여 확인할 수 있었다. 이는 HTSS의 두께를 현재보다 작게 가져가는 것이 균열 방지 측면에서 유리하다는 사실을 의미하고, 이를 검증하기 위한 용접실험을 차후에 진행할 계획이다.

참 고 문 헌

- Cary, H.B., 1997. Modern Welding Technology, 4th Edition, Upper Saddle River, New Jersey.
- Han, S.W., 2009. 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.
- Jang, C.D. Seo, S.I., 1988. Calculation of residual stresses by thermal elasto-plastic analysis, Journal of KWS, 6(4), pp.35-43.
- Kim, S.I., 1999. Development of welding deformation control method for hull structure, Ph. D Thesis, University of Ulsan, Republic of Korea.
- Kim, S.I., 2006. Weld-induced Residual Stress Analysis to Examine the Cause of Cracking in the SUS-overlay Welding Specimen at FPSO Moon Pool Structure. 2006 Spring Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, Samcheok, Republic of Korea, 100-102 May, 2006.
- Lee, H.W. Kang, S.W., 1997. A study on transverse weld cracks in 50mm thick steel plate with SAW process. Journal of Japan Welding Society, 15-4.
- Lee, J.T., 2010. Study of th 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.
- Lee, T.S. Oh, D.S. Lee, H.W., 1997. The characteristics of Near -threshold fatigue crack propagation for welding zone in TMCP high strength steels, Journal of ocean engineering and technology, 11(3), pp.39-47.
- Masubuchi, K., 1980. Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford.
- Yu, H.S. Chang, Y.S. Ahn, B.G. Chung, S.H., 1998. A Study on Effect of PWHT in AH36-TMCP Steel, Journal of KWS, 16(6), pp.44-51.

한 성 우

이 주 성

김 상 일