

## FPSO Moon Pool 구조에서의 SUS-overlay 용접 시편의 균열 발생 가능성 검토를 위한 용접 잔류응력 해석

### Weld-induced Residual Stress Analysis to Examine the Cause of Cracking in the SUS-overlay Welding Specimen at FPSO Moon Pool Structure

김상일\*

\* 로이드선급아시아 울산사무소

#### 1. 서 론

용접 균열을 그 발생시기에 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 HAZ부에서 발생하는 종균열로 나뉘어진다. 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 weld metal 내부에서의 저온균열이 더 쉽게 발생된다고 보고되고 있다[1].

본 논문에서는 bending test 중인 FPSO moon pool 구조에서의 SUS-overlay 용접 시편의 SUS부에서 균열(crack)의 발생 가능성이 있어, 이에 대한 정확한 발생 원인 및 대책 수립을 위해 해당 부분의 용접 잔류응력 해석을 수행하였다. 이를 통해서 SUS-overlay 용접 시편의 균열 발생 가능성을 검토하였고, 그 대안에 대해서도 논의하였다.

#### 2. 용접 잔류응력 해석

##### 2.1 유한요소 모델링

해석은 2차원 generalized plane strain 모델을 선택하였고, 유한요소모델은 generalized plane strain 요소를 이용하였다. 해석 순서는 모델을 만들어 먼저 열전달 해석을 수행하였고, 그에 따라 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[2].

열전달 해석과 열응력 해석 모두 weld metal이 쌓여 나가는 과정을 구현하기 위해 해석이 진행되는 동안 해석 모델이 변하도록 하였다. 그림 4는 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℃로 가정하였다. 용접 비드가 쌓이는 현상을 수치적으로 모델링하는 방법으로는, 생성되는 요소에 body heat flux를 가하는 방법, surface heat flux를 가하는 방법, nodal temperature를 주는 방법 등이 있는데, 본 해석에서는 생성되는 요소에 body heat flux를 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였고, 이에 따라 열응력 해석을 순차적으로 수행하였다.

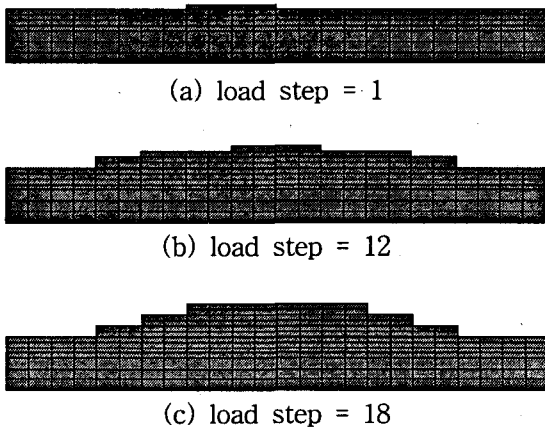


그림 1 시간에 따른 해석 모델의 변화

2.2 해석 결과

그림 2는 SUS-overlay 용접 시편 모델을 보여 주고 있으며, 그림 3은 대상 모델 중에서 present specimen의 용접선 방향으로의 잔류응력 분포를 대표적으로 보여 주고 있다. 그림 4와 5는 대상 모델들의 용접 잔류응력 분포를 도식적으로 보여 주고 있는데, 폭 방향의 응력( $\sigma_{11}$ )을 살펴보면 비드 최종 층 아래 부분의 weld metal 내부와 판의 하단부에서 높은 인장응력을 보이며, 용접선 방향의 응력( $\sigma_{33}$ )의 경우에도 최종 층 아래 부분의 weld metal 내부와 판의 하단부에서 높은 인장응력을 보인다. 그림 6은 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, 이는 용접이 끝난 후 확산성 수소의 판 두

께 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 일부를 절단해 주는 방법이 용착 금속부인 SUS부에서의 높은 인장응력을 완화시키는 역할을 한다는 사실을 확인할 있다.

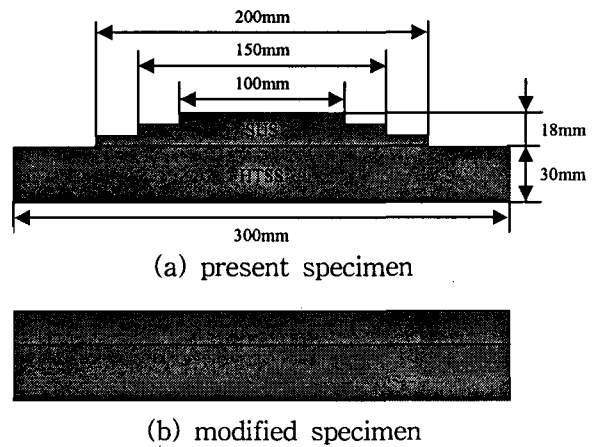


그림 2 SUS-Overlay 용접 시편 모델

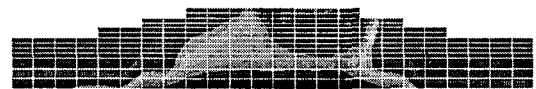
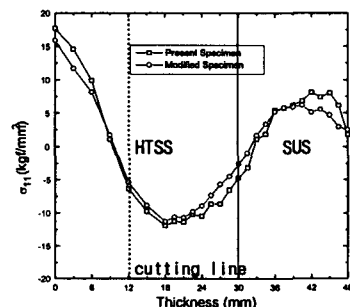
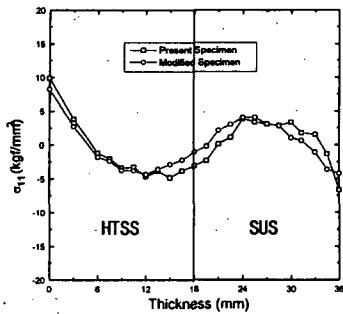


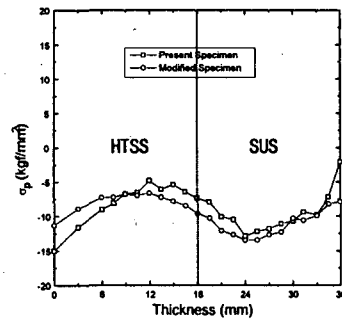
그림 3 용접선 방향으로의 잔류응력 분포



(a) 절단 전의 응력 분포



(b) 절단 후의 응력 분포  
그림 4 폭 방향의 잔류응력 분포

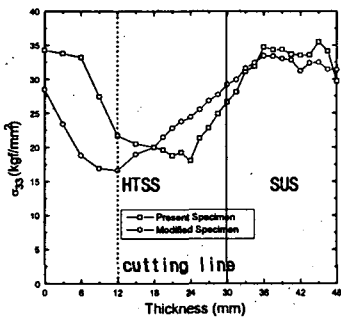


(b) 절단 후의 응력 분포  
그림 6 Hydrostatic pressure stress의 분포

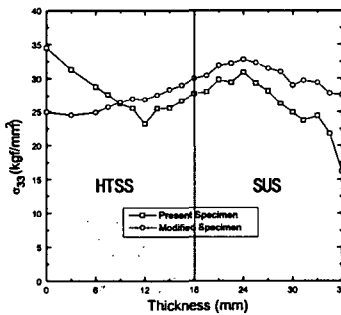
### 3. 결 론

Bending test 중인 FPSO moon pool 구조에서의 SUS-overlay 용접 시편의 SUS부에서 균열의 발생 가능성이 있어, 이에 대한 정확한 발생 원인 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 확인할 있다. 이는 HTSS의 두께를 현재보다 작게 가져가는 것이 균열 방지 측면에서 유리하다는 사실을 의미한다.



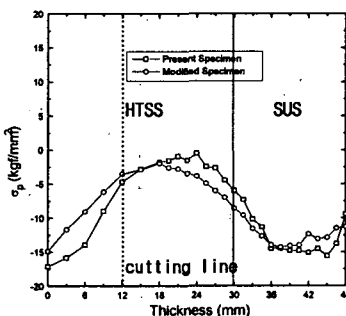
(a) 절단 전의 응력 분포



(b) 절단 후의 응력 분포  
그림 5 용접선 방향의 잔류응력 분포

### 참 고 문 헌

1. H.W. Lee and S.W. Kang: A study on transverse weld cracks in 50mm thick steel plate with SAW process, Journal of Japan Welding Society, 15-4(1997)
2. 김상일: 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위 논문(1999)



(a) 절단 전의 응력 분포