

원통형 문풀 구조물의 탑재 시 변형과 수정

성우제[†]·천광산
대우조선해양(주) 산업기술연구소 용접기술연구부

Welding Deformation and Its Correction of Cylindrical Moon Pool Structure

Woo-Jae Seong[†]·Kwang-San Chun
Industrial Application R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Turret mooring type Floating Production Storage and Offloading (FPSO) is designed to rotate the hull around a turret system. The system is mounted inside a cylindrical moon-pool structure of the ship hull structure. The upper part of the moon-pool structure called Bogie Support Structure (BSS) is supported on ring type rail structure (bogie), so high roundness is required at the top of the structure. In this study, the deformation measured during BSS installation was compared with the predicted values through the thermal elasto-plastic analysis, and the causes of deformation were analyzed. Deformation behavior of cylindrical structure with a very large diameter compared to the thickness was investigated. In addition, a proper welding sequence and correction method for the deformed structure were proposed. This study can be an example of the solution to the tolerance problem of large cylindrical structures.

Keywords : FPSO, Moon-pool structure(문풀 구조물), Thermal elasto-plastic analysis(열탄소성해석), Welding sequence(용접순서), Correction method(수정 방법)

1. 서론

해양플랜트의 플랫폼 중 하나인 FPSO(Floating Production Storage and Offloading)의 계류(mooring) 방식은 크게 해풍의 방향에 따라 선수부가 회전할 수 있도록 설계된 turret mooring 방식과 회전하지 않고 자세를 유지하는 spread mooring 방식으로 나뉠 수 있다. 본 연구에서 다룰 turret mooring 방식에서의 문풀(Moonpool) 구조물은 원통 형상으로 설계되며 turret이 내부에 삽입되어 원활히 회전할 수 있도록 휠(wheel or bogie)이 장착되어 있다. 따라서 휠과 접촉하는 부위는 높은 정밀도가 요구되므로 제작 시 공차 관리가 매우 중요하다. 문풀 구조물은 Fig.1과 같이 상부에 축 대차(axial bogie)를 지지하는 직경 22m 가량의 Bogie Support Structure (BSS)와 하부의 Tank Insert Structure (TIS)라고 불리는 선체구조물이 서로 수평 용접에 의해 조립된다. TIS 구조물의 하부에는 베어링 패드가 부착되는 Free Hanging Structure (FHS)로 불리는 또 하나의 구조물이 조립되며 이 패드부위는 주로 육성용접(Overlay welding)을 통해 제작되고 있다.

FPSO 문풀 구조의 용접 변형과 관련한 연구는 주로 이 FHS에서 이뤄지는 육성용접에 의한 변형 또는 잔류응력 문제를 다뤘다. Kim (2003)은 스테인리스 육성 용접 실험을 통해 변형을 최소화할 수 있는 용접 순서를 제시하였다. 또한 유한요소해석을 통해 잔류응력(Lee et al., 2011)을 산출하였으며 확산성 수소로 인해 균열이 발생하기 쉬운 부위를 정수압 응력 분포를 통해 확인하였다. Ha (2012)는 자체 개발한 변형도경계법을 적용하기 위해 인코넬 육성 용접 시 하중을 모사하는 방법을 제안하였으며 이를 통해 열변형 해석을 수행하였고, 간단한 배관 용접 해석에도 적용한 예를 보여주었다.

한편 원통형 구조물의 용접변형 문제는 파이프나 튜브 등을 대상으로 최적의 용접순서 개발이나 용접변형 및 잔류응력 예측과 관련한 연구가 주로 수행되어 왔다. Sattari-Far and Javadi (2008)는 대각 방향 용접 순서를 기본 틀로 정하여 용접 방향과 분할 개수를 조절하여 변형량을 도출하였으며 분할 개수가 많을수록 변형량이 대체적으로 적어지는 결과를 얻었다. 하지만 이는 소형 파이프에 해당하며 FPSO와 같은 대형의 원통형 구조물은 두께(45mm) 대비 직경(22m)이 매우 커 박판 파이프와 유사한 거동을 하게 된다. 따라서 정확한 변형 예측과

제어가 쉽지 않을 뿐만 아니라 반복적인 실험이 불가능하여 기술 축적에 어려운 면이 있다.

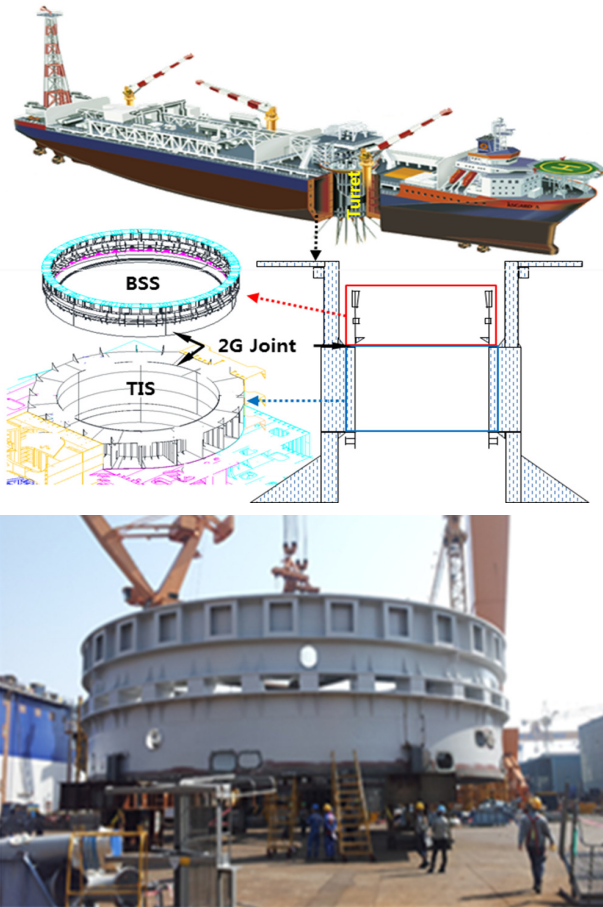


Fig. 1 Moon-pool structures of mooring type FPSO (above) and Bogie Support Structure, BSS (below)

본 연구에서는 실제 FPSO의 문풀 구조물 탑재 시 발생했던 문제와 이를 해결한 사례를 구체적으로 다루고 있다. 대상은 TIS위에 탑재되는 BSS 구조물이며 BSS와 TIS 구조물 사이의 용접부까지 포함한다. 탑재 과정에서 발생한 대형 원통형 구조물의 변형 거동을 관찰하였고 유한요소해석을 활용하여 이에 대한 특징을 분석하였다. 또한 변형 발생 시 이를 교정하기 위한 방법과 용접 변형 예측량 및 순서를 제시하였다. 이러한 기술적 근거를 바탕으로 BSS가 설치되었으며 최종 측정 결과 변형량은 정도기준에 부합하였다.

2. 구조물의 탑재 시 변형

2.1 탑재 후 변형 현상

Fig. 1과 Fig. 2에서 보듯이 BSS 구조물은 직경이 22m인 원통의 대형 구조물이다. 두께는 상하 위치마다 다르나 TIS와 용접되는 부위는 45mm이다. 구조물은 십자 모양의 임시 보강용

beam을 상부와 하부에 고정한 채로 외부에서 제작되어 인계되었다. 이후 Fig. 2와 같이 BSS 구조의 상부를 지속적으로 측정하면서 TIS와의 원점을 일치시킨 후 하부는 충분한 강성을 갖도록 가접(tack welding)과 스트롱백(Strong-back)으로 취부(Fit-up)를 완료하였다. 이후 BSS 십자형 Beam를 제거하였다.

BSS 상부에는 Axial bogie가, 중간부에는 Radial bogie가 설치되므로 진원도(Roundness deviation)가 주요 관리점이 된다. 여기서 진원도는 측정점과 진원(reference circle)과의 최소거리로 정의된다. 탑재 후 이 관리점 이외의 부위의 측정은 생산성 차원에서 제외되었다. 이와 같은 대형 구조물의 경우 모든 지점을 측정하기에 많은 시간과 노력이 소요되므로 주요 관리점들을 선정하여 관리하게 된다.

Fig. 3은 탑재 단계별로 반지름을 측정하여 도면상의 진원('Ideal'로 표기함)과 상대변위 값을 표기한 결과를 보여준다. 3차원 레이저 측정기를 이용하여 등각 간격으로 8곳을 측정하였다. 결과를 살펴보면 셋팅 후 B점에서 최대 11mm, 스트롱백 취부 후 D점에서는 12mm가 모두 안쪽으로 변형된 형상을 보였다. 이후 상하부 임시 beam을 제거한 후 C점에서는 최대 22mm가

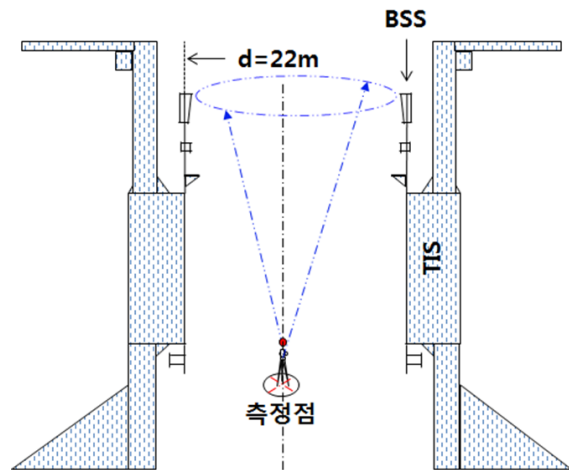


Fig. 2 Bogie Support Structure (BSS) and Tank Insert Structure (TIS)

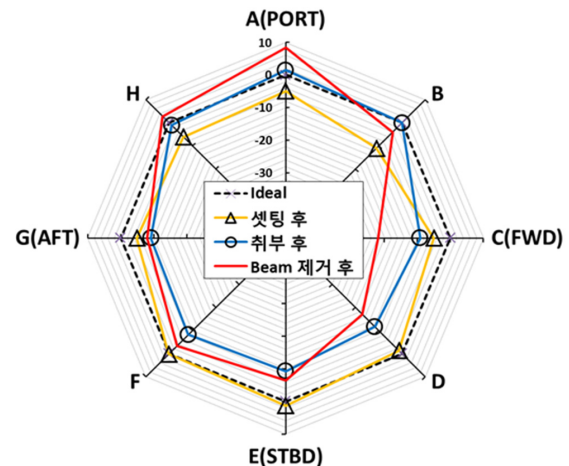


Fig. 3 Roundness deviation measured at each stage (diameter: 22m)

안쪽으로 들어간 반면 A점에서는 8mm 정도가 바깥으로 나와 있는 타원형상(Ovality)을 보였다. BSS 상부에서의 진원도 기준은 $\pm 7.5\text{mm}$ 이므로 같은 방향으로 최대 15mm까지 허용된다. 따라서 Beam 제거 후부터 이 기준에 부합되지 못했다.

2.2 BSS 구조물의 변형 거동과 발생 원인 가정

Fig. 3로부터 BSS 상부는 좌현(Port) 방향으로 인장력이, 선수(FWD)와 우현(STBD)사이에서는 압축력이 작용하고 있음을 추측할 수 있으나 변형은 구조물의 하부에서 기인하기에 보다 정확한 분석이 필요하다. 일반적으로 높이나 두께에 비해 직경이 큰 튜브나 배관 등의 원통형 구조물은 기하학적 형상이 반영된 탄성거동을 하기 때문에 Fig. 4와 같이 변형될 수 있다. 하부의 좌현(Port)과 우현(STBD)을 서로 벌리면서 수직방향인 선수(FWD)와 선미(AFT)방향은 오므라들게 된다. 이때 상부의 경우는 반대로 좌현, 우현 방향은 서로 오므라들며 선수와 선미 방향은 벌어지게 된다. 이러한 현상을 일상에서 간단히 확인할 수 있는 예로, 종이컵의 막힌 원형의 밑 부분을 없애고 상부를 잡아당기면 이와 같은 변형 양상을 직접 확인할 수 있다. 이는 마치 3차원 보(Beam)의 굽힘에서 윗면이 saddle형상을 보이는 anticlastic curvature와 유사한 현상을 보인다. 보의 경우 종-횡방향에서의 곡률비와 변형을 비는 프아송비(Poisson's ratio, ν)와 같다. 본 구조물을 하나의 재료로 가정하면 축방향 대칭이므로 이방성 탄성재료와 유사한 거동을 할 것으로 보인다. 실제 유한요소해석을 통해 프아송비(종-횡방향 변형률 비 및 곡률비)를 계산하면 1.0에 가깝게 나타났다. 예를 들면 좌-우현에서 1만큼 인장 변형량이 발생하면 선수미 방향으로 1만큼 수축 변형량이 발생하게 된다.

이러한 직관적인 변형 양상과 유한요소 해석 결과에 따라 구조물 하부에 걸리는 하중 방향을 추측할 수 있으나, 실제 구조물은 경계조건이 다름을 이해하고 접근할 필요가 있다. 탑재된 BSS의 하부는 TIS의 상부와 스트롱백으로 고박 되었으므로 높이(상-하) 방향으로의 구속이 되어 있는 상태이다. 따라서 구조물 하부에서 높이 방향의 구속을 고려한 경계조건을 부가하여 해석하면 Fig. 5와 같은 변형 거동을 보인다. 이 경우 하부에서 좌현과 우현을 서로 벌리게 되면 수직방향인 선수 선미 방향이 오므라들게 드는 현상은 Fig. 4의 경우와 같다. 하지만 상부에서의 거동은 하부와 같이 좌현 및 우현으로 벌어지고, 선수 선미 방향으로 줄어드는 현상은 상부와 하부가 동일한 방향으로의 변형 거동을 겪게 됨을 의미한다. 상부에서의 곡률은 발생하지 않았지만, 종-횡방향에서의 변형량을 프아송비와 같이 비율로 계산하면 Fig. 4와 Fig. 5가 동일하게 1.0에 가까운 수치를 보였다.

본 구조해석 결과를 바탕으로 Fig. 3의 변형 원인을 살펴보면, 스트롱백 취부 시 TIS구조물과의 단차를 맞추기 위해 BSS 하부를 좌현-우현 방향으로 벌렸거나 선수-선미방향으로는 오므려 맞춘 것으로 추론할 수 있다. 또한 취부 당시 단차는 문제가 없더라도 주변 선체부에 용접 작업이 남아 있었기에 용접 수축력으로 인한 영향으로 인해 좌현-우현 방향에 인장하중이

발생한 것으로도 볼 수 있다. 다만 BSS의 하부 변형 형상이 문제인지 TIS의 상부가 문제인지는 현 단계에서는 파악할 수가 없었다. 위의 추정과 구조해석 결과를 통해 변형의 원인으로 하중의 위치와 방향을 가정하면 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) BSS 하부의 선수 선미부에 압축하중 발생
- 2) BSS 하부의 좌현 우현에 인장 하중 발생
- 3) 위의 1), 2)가 동시 발생

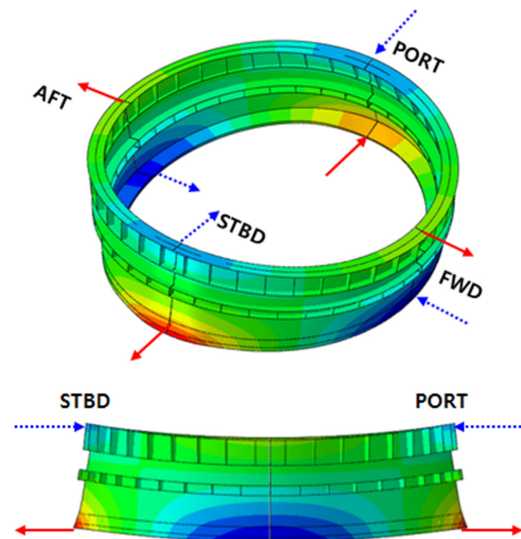


Fig. 4 Deformation behavior of BSS under free bottom edge

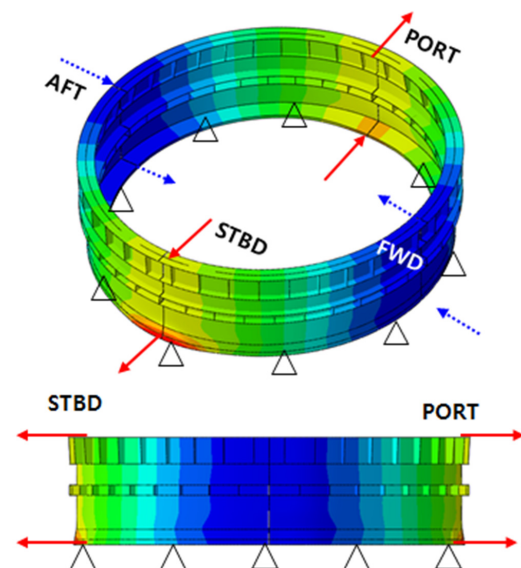


Fig. 5 Deformation behavior of BSS under fixed bottom edge

3. 구조물의 변형 교정 방법

3.1 구속 제거와 축 조절 후 변형 양상

본 구조물의 탄성 변형 거동을 보면 네 방향 중 어느 한 방향만 집중적인 하중이 작용해도 타원형의 변형이 나타나게 된다.

앞 절의 구조해석 결과에 의하면, 이러한 현상은 두께 대비 직경이 커서 반경 방향으로의 강성이 작아 대변형이 쉽게 발생하는 구조에서 발생하는 것으로 보인다. 이러한 배경을 바탕으로 취부 상태에서 진원도를 맞추기 위해 일부 구간의 구속을 해소하기로 결정하였다. 앞서 설명한 1번 가정, 즉 선수 부근의 구간 C-D에서 큰 압축하중이 작동하고 있다는 가정을 기반으로 그 부위의 스트롱백을 먼저 제거하였다. 만약 본 가정이 변형의 주요 원인이라면 축 조정이나 여타 수정 작업 없이 그 부위는 제자리를 찾을 수 있기 때문에 본 문제를 해결할 가능성이 높았다.

Table 1은 그 결과(C-D Release로 표기)를 보여준다. 임시 beam 제거 시와의 진원도를 비교하면 오히려 타원성이 증가하여 좋지 않은 결과를 보였다. 이를 통해 변형의 원인으로는 1번 가정이 아닌 2번 가정이 타당함을 알 수 있었다. 즉 좌현과 우현 또는 한 쪽에 큰 인장 하중이 발생하고 있음을 유추할 수 있었다. 그럼에도 좌현이나 우현 부위의 추가적인 스트롱백 제거를 통해 본 문제를 해결할 수 없다는 결론을 내렸다. 이유는 C-D구간의 구속제거로 인해 이미 중심 축의 위치가 이동하였을 뿐만 아니라, 좌현이나 우현의 구속까지 제거하면 절반 이상이 자유상태가 되어 구조의 위험성이 증가하게 되기 때문이다.

Table 1. Measurement data of roundness deviation on top of BSS during each process (refer to Fig. 3 for measurement points)

Measurement points	A (PORT)	B	C (FWD)	D
After beam removal	8.2	-5	-24.3	-17.7
C-D release	9.5	-7.8	-26.21	-21.2

Measurement points	E (STBD)	F	G (AFT)	H
After ream removal	-5.6	-2	-5.6	3.8
C-D release	-10.7	-5	-6.3	0.5

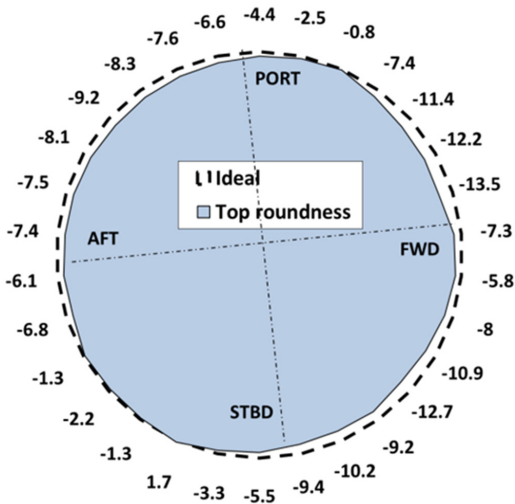


Fig. 6 Measurement data of top roundness deviation after resetting

따라서 본 실험에서는 스트롱백을 전부 제거하고 구조물에 걸린 응력을 초기화하여 원점을 재조정 한 뒤 스트롱백을 재설치하는 순서로 본 문제를 해결하고자 하였다. Fig. 6는 구조물을 들어올려 중심축을 조절하고 BSS와 TIS의 단차가 적은 부위에만 스트롱백을 재설치 한 뒤 상부에서 측정한 진원도를 나타낸다. 등각으로 30개 지점을 측정하였으며 이상적인 진원은 점선으로 표기하였고, 측정값은 실선과 음영으로 표기하였다. 최대 편차는 -13.5mm로 나타났지만 이는 한 방향에서 최대 15mm 이내로 규정된 기준에 부합되는 수준을 보였다. 한편 Fig. 7은 BSS하부에서 TIS의 상부를 뺀 단차를 측정한 값을 나타내며 부호가 '-'인 경우 TIS에 비해 BSS가 오그라든 것을 의미한다. 물론 상대적인 값이므로 BSS에 비해 TIS가 확장된 것으로도 볼 수 있다. BSS의 하부는 좌현 부근에서 최대 31mm 만큼 안쪽으로 변형되어 있으며 우현에서도 최대 16mm 까지 오므라져 있음을 확인하였다. 이 결과로부터 본 구조물의 변형은 BSS하부와 TIS의 단차 부위를 강제 구속하여 발생한 것임을 알 수 있었다. 또한 위에서 언급한 두 번째 가정, 즉 BSS 하부의 좌현과 우현에서의 인장하중이 작동하여 변형이 발생한다는 가정이 검증되었으며, 구속조건을 고려한 구조해석의 변형 양상도 틀리지 않음이 확인되었다.

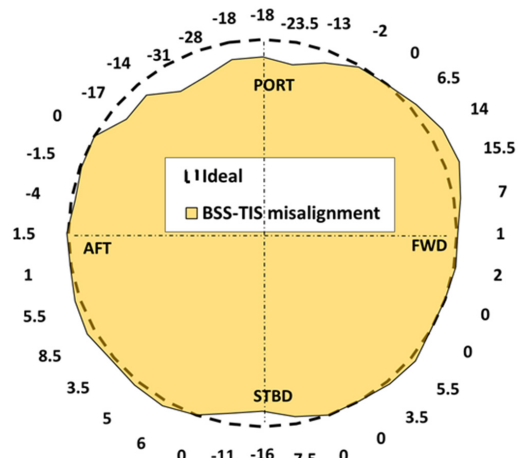


Fig. 7 Measurement data of misalignment at BSS-TIS weld joint (relative displacement)

3.2 구조물의 수정 방법 과 예측

Fig. 7와 같이 일부 구역에서의 단차가 큰 경우 BSS의 하부 구조를 절취하여 벌리거나 TIS의 상부 구조를 절취하고 오므려 주는 수정 방법이 있겠으나, TIS의 경우 두께가 BSS보다 두껍고 접근이 제한적이었기 때문에 BSS를 수정하는 방향으로 검토하였다. 수정작업은 절취 후 강제 변위를 부가하고 용접하는 작업이 요구되므로 이들 작업 간 주변 부위나 상부 진원도에 얼마만큼의 영향을 주는지를 예측해야 한다. 본 연구에서는 이를 열탄소성 해석을 통해 확인하고자 하였다. Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 구조물의 하부는 모든 방향으로 구속된 경계조건을

좌현 방향을 중심으로 약간 선미부로 치우쳐진 위치로 선정되었으며 이 부위에 네 개의 2m 길이의 절취된 새로운 용접선('new weld seam'으로 표기)을 생성하고, 밑단에 강제 변위를 각각 부여하였다.

이 상태에서 용접선에 용접할 경우 구조물의 최종 변형량은 Fig. 9와 같이 예측되었다. 진원도가 중요한 상부에서 변형량은 최대 1.2mm 이내로 계산되어 문제가 발생하지 않을 것으로 보였다. 다만 wave baffle 보강 구조물이 최대 13.2mm 가량 처지는 현상이 발견되었다. Wave baffle의 경우 기능 및 구조상 현재의 변형량으로는 문제가 없는 것으로 판명되어 본 수정 방법을 채택하여 작업을 수행하였다.

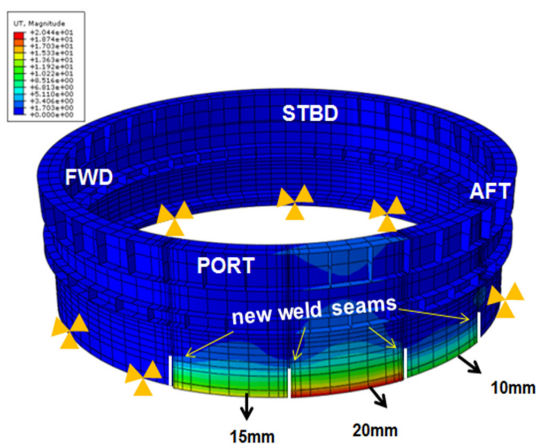


Fig. 8 The amount of correction

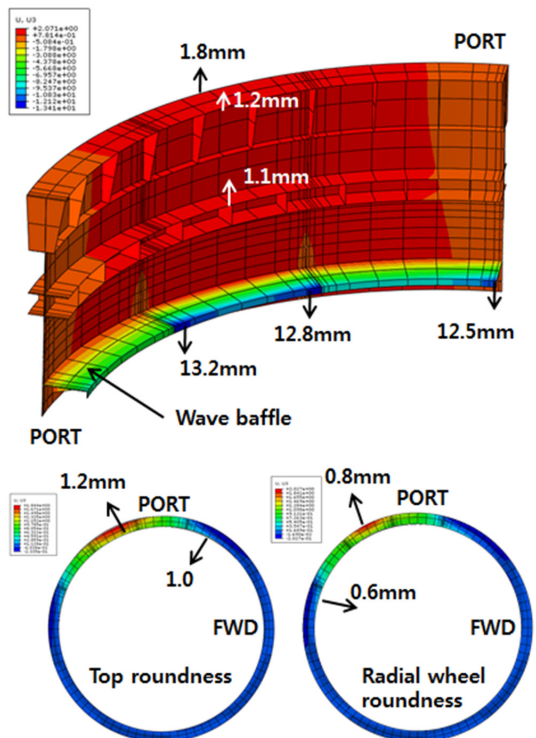


Fig. 9 Deformation prediction of surrounding structure by correction

3.3 수평 원주 용접 순서와 변형 예측

수정 작업 이후 BSS와 TIS 사이의 원주방향 수평 용접순서를 결정하기 위해 용접 변형 해석을 수행하였다. 효율적 해석을 위해 BSS의 직경-두께 비율과 동일한 박판 배관(Pipe) 구조물을 대상으로 용접 순서에 따른 변형량을 산출하였다. 부가된 입력은 1kJ/mm이며 용접 순서에 따라 이동 열원을 적용하였다. 구체적인 해석 방법이나 절차는 Sattari-Far and Javadi (2008)의 연구와 동일하다. Fig. 10는 해석 후 변형 결과를 나타내며 단순한 배관을 대상으로 하였기에 용접 순서에 따른 상대적인 수치만 참고해야 한다. 가로축은 배관의 최상단인 12시 방향에서 시작하여 시계방향으로의 각도를 나타내며, 세로 축은 이때의 변형량을 나타낸다. 결과에 따르면 대각 용접('Diagonal'로 표기)할 경우 각도에 따라 사인곡선의 변형양상을 보이며, 초기 대각 방향으로 용접(1, 2번)한 부위는 인장 변형이, 후속으로 대각 용접(3, 4번)한 부위는 압축 변형이 발생함을 알 수 있다. Back step 용접의 경우 변형량은 현저히

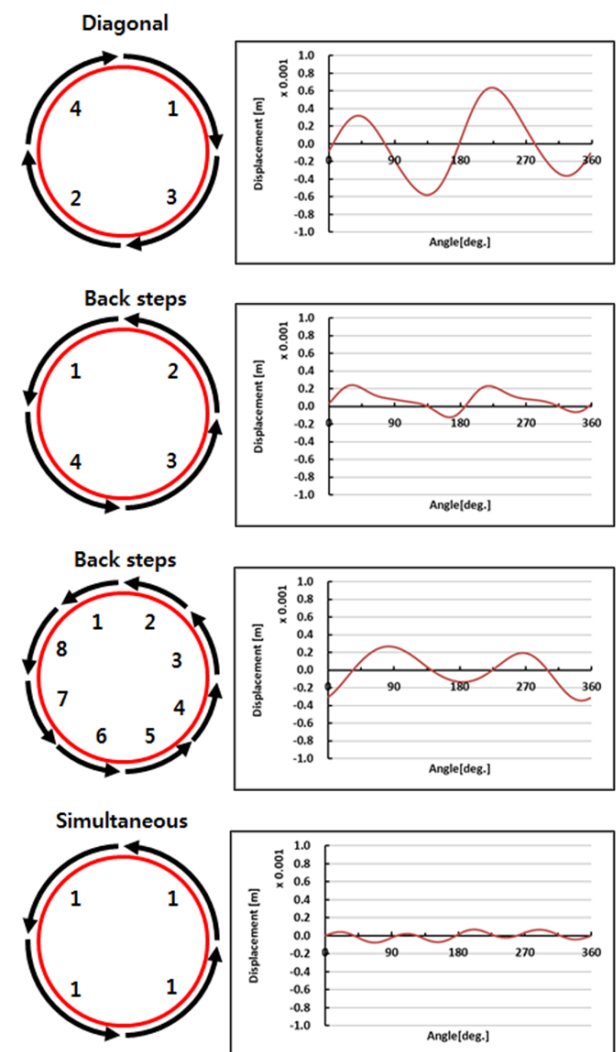


Fig. 10 Welding deformation of thin pipe under various welding sequence

감소하나 4분할이나 8분할은 큰 차이가 나지 않는 것으로 확인 되었다. 동시 용접 ('Simultaneous'로 표기)의 경우가 가장 변형량이 적게 나타났다. 결론적으로 박판 원형 구조물이나 배관의 경우 용접 순서는 대각방향을 피하고 Back step이나 가능하면 동시 용접을 수행하는 것이 변형 측면에서 유리할 것으로 판단 된다.

일반적으로 두께가 충분히 큰 원통형 구조물의 원주방향 용접은 변형을 최소화하기 위해 대각 방향으로 대칭 용접하고 있다. 용접변형은 용접이 진행되면서 mismatch가 발생하므로 구조물이 충분히 큰 경우 가능하면 여러 작업자가 동시용접하고, 많은 수로 균등하게 분할하는 것이 유리하다. 하지만 위의 결과처럼 박판 배관 용접의 경우, 보다 정확히 말하면 두께에 비해 직경이 충분히 클 경우, 대각-대칭 용접 시 먼저 용접한 대각 방향에서 인장변형이 발생하면 이에 수직인 방향으로 압축변형이 발생하게 된다. 이는 Fig. 4와 Fig. 5에서 보여준 종-횡방향의 변형 비율이 1.0에 가까운 변형 거동현상과 매우 유사하다고 할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 12명 기준으로 동시 용접을 수행할 시 변형을 예측하고자 유한요소해석을 수행하였다. 대상 두께는 BSS의 경우 45mm, TIS는 60mm으로 경사진

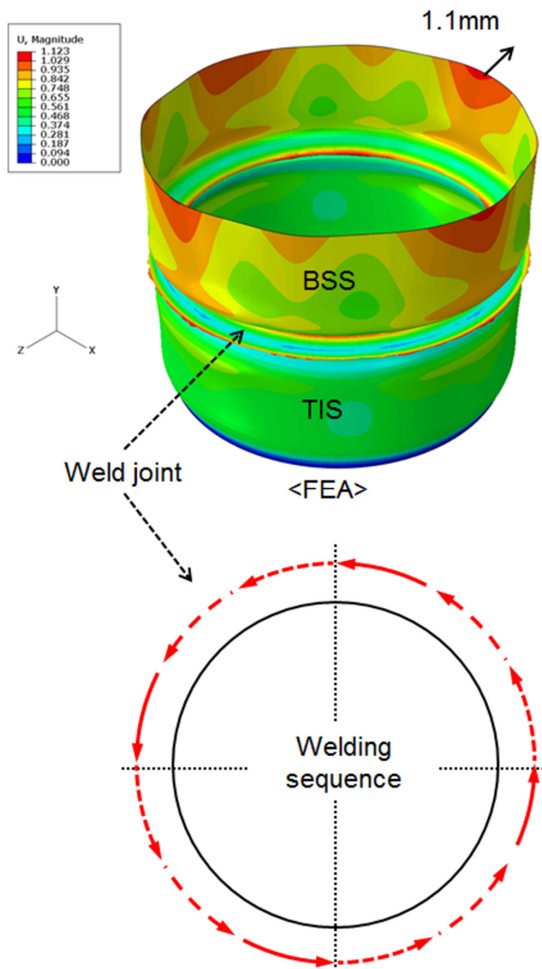


Fig. 11 Welding sequence of BSS-TIS interface and its estimation of welding distortion

용접 조인트를 갖는다. 개선 깊이 1:2 비율의 X개선부에 미리 설정된 순서로 다층 용접되며 패스당 유효 입열량은 1kJ/mm가 적용되었다. 이러한 조건으로 2차원 열탄소성 해석을 수행하여 3차원 쉘요소에 부가될 등가 입열을 구하였다. 또한 용접순서를 고려하기 위해 입열은 용접부를 따라 이동하도록 하였다. 구조물에 부착된 복잡한 보강재 중 영향력이 큰 것은 보조소를 사용하였고, 그 외는 생략하였으며 원통 구조물과 용접부는 쉘 요소를 사용하였다. TIS 구조물의 하단은 두께가 크고 주변 선체와 용접되어 강성이 매우 크므로 해석 모델의 하단 변위를 모든 방향으로 구속하였다.

Fig. 11은 변형량을 나타낸 해석 결과이며 용접 후 상부에서의 변형량은 최대 1.1mm가 발생할 것으로 예상되었다. 용접으로 인해 상부의 진원도에 영향을 주지 못하는 것으로 판명되어 본 용접순서로 작업 착수를 결정하였다.

4. 결과

Fig. 12은 수정 작업과 수평 용접을 완료하고 스트롱백을 제거한 뒤 상부에서 측정된 진원도를 보여준다. 수정 작업 전(Fig. 6)과 수정 후(Fig. 12)의 변화량은 Fig. 13에 정량적으로 나타내었다. 수정 작업과 수평 용접으로 인해 평균 2.2mm 만큼 선미 방향으로 원의 중심이 이동하였으며 이동 값을 고려하면 작업으로 인해 변화된 변형량은 평균 1.2mm, 최대 2.4mm로 계산되었다. 이러한 결과는 Fig. 9과 Fig. 11에서 예측한 해석 결과로부터 정량적으로 가능한 범위 내에 존재한다. 구조물 하부에서의 수정작업과 용접 작업은 상부에 최대 2.4mm 정도의 영향만 준다는 것을 의미한다. 원점이 이동한 원인으로는 측정 위치의 변화, 측정 장비의 해상도(1mm이내)와 또는 외기 온도와 태양복사에 의한 불균일한 철판의 온도의 편차를 들 수 있다.

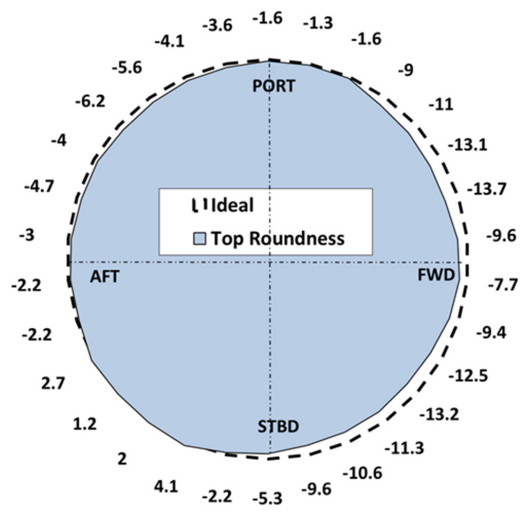


Fig. 12 Measurement data of top roundness deviation after welding at BSS-TIS weld joint

References

- Ha, Y.S., 2012. Thermal distortion analysis by inconel over-lay at circular moonpool structures. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(4), pp.304-311.
- KIM, S.I., 2003. A study on the analysis of welding distortion for moon pool structure of FPSO vessel. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(3), pp.27-32.
- Lee, J.S., Han, S.W., Lee, S.H. and Kim, S.I., 2011. A study on the weld-induced residual stress analysis at FPSO moon pool structure. *Journal of Welding and Joining*, 29(3), pp.70-75.
- Sattari-Far, I. and Javadi, Y., 2008. Influence of welding sequence on welding distortions in pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(4), pp.265-274.

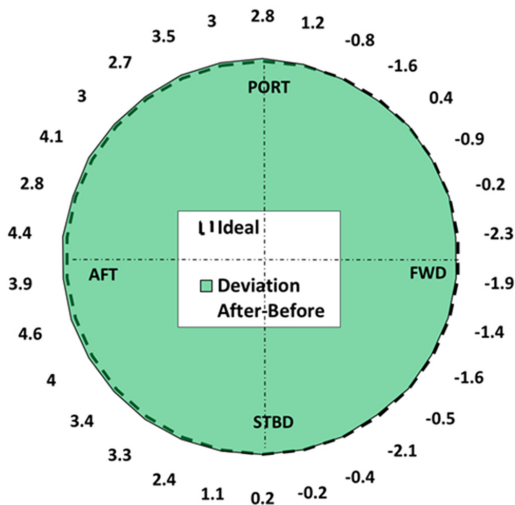


Fig. 13 Top roundness difference between before-welding and after-welding

5. 결론

본 연구에서는 실제 조선소에서 발생하였던 FPSO의 문풀 구조물의 변형 문제에 대한 하나의 해결 절차를 소개하였다. 대형 원형 구조물의 변형 거동에 대해 각 단계별 측정값을 통해 분석하였고, 유한요소해석을 통해 효율적이고 효과적인 수정방법을 제안하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 두께에 비해 직경이 충분히 큰 대형 원통형 구조물의 경우 경계조건에 따라 변형양상이 다르므로 직관적인 추론보다 해석적 검증이 우선된다.
- 2) 원통형 구조물의 경우 하부가 높이방향으로 구속되어 있고 하부의 한 지점에서 하중이 부가된 경우, 상부와 하부가 같은 방향으로 변형되는 반면 하부가 구속되지 않은 자유단인 경우 서로 반대 방향으로 변형이 발생한다.
- 3) 원통형 구조물의 경우 가로-세로방향 변형률(재료의 경우 프아송비로 표현 가능)의 비가 거의 1.0에 가까우므로 취부 또는 용접 시 최소 4분할로 균등하게 나눠 동시에 균일한 하중(수축)을 분포하도록 작업을 수행한다.
- 5) 정도기준이 엄격한 구조물의 경우 취부 전 주변 구조물의 용접을 종료해야 하며 취부 시 단차가 있을 경우 외력이 가해지지 않도록 미리 수정한 후 취부 및 용접을 한다.
- 6) 수정할 경우 추가 변형이 발생하지 않는 위치에서 적당량을 절취하고 재용접하되, 구조해석을 활용하여 주변부 변형량을 미리 확인한다.



성우제

천광산