

FPSO선 Moon Pool 구조의 용접변형 해석에 관한 연구

김상일*

*대우조선해양(주) 선박해양구조연구팀

A Study on the Analysis of Welding Distortion for Moon Pool Structure of FPSO Vessel

SANG-IL KIM*

*Ship & Marine Structure R&D Team, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Geoje, Korea

KEY WORDS: Welding Distortion 용접변형, Geometric Inaccuracy 기하학적 부정확성, Additional Man-Hours 추가 공수, Distortion Control Method 변형 제어법, Optimum Welding Sequence 최적의 용접순서

ABSTRACT: The welding distortion of a hull structure in the shipbuilding industry is inevitable at each assembly stage. The geometric inaccuracy caused by the distortion tends to preclude the introduction of automation and mechanization. Thus, additional man-hours are needed for the adjusting work in the assembly stage. To overcome this problem, a distortion control method should be applied. For this purpose, it is necessary to develop an accurate prediction method that can explicitly account for the influence of various factors on the welding distortion. In order to minimize the weld-induced residual deformation, this paper proposes the optimum welding sequence as a method for distortion control. The validity of this method has been substantiated by a number of numerical simulations and experiments.

1. 서 론

선박·해양구조물의 제작 및 조립 시 발생하는 용접변형은 용접속도와 모재 사이에 가열과 냉각 사이클의 전 과정을 통한 불균일한 팽창과 수축으로 인하여 발생된다. 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 조립 단계에서의 취부 작업 시 부가적인 교정 작업을 초래하여 전체 취부 작업 공수를 증가시키는 요인이 된다.

컴퓨터의 급속한 발달로 인해서, 과거 수십년동안 주로 연구용으로 사용된 열탄소성해석(thermal elasto-plastic analysis)이 실제 용접문제의 해결에 있어서 유용한 도구가 되고 있다. 이것의 주된 내용은 온도분포와 잔류응력 및 변형의 계산이다. 용접문제에서 열탄소성문제는 주로 유한요소법 등의 수치해석법을 이용하여 다루어 왔으며(김상일 등, 1997; 김상일, 1999; Fujita et al., 1972; Kim et al., 2002; Ueda et al., 1973; Ueda

et al., 1992), 만일 수치해석이 위에서 언급된 여러 열공정들로 인한 변형을 예측하는데 유용한 도구라는 것이 입증된다면, 용접변형을 최소화할 수 있는 최적의 방법이 다양한 수치시뮬레이션을 통해서 각 조립 단계 별로 제시될 수 있을 것이다.

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 turret의 작동을 돕는 것으로 고난도의 용접 기술력이 요구되는 구조물이다(Fig. 1 참조).

FPSO선의 moon pool 블록 제작을 strip cladding 방식으로 해 달라는 것은 선주 측의 요구 사항인데, 특히 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 기술력을 갖추어야 한다.

그러나 현재 용접성을 시험 중인 SUS-Overlay 용접은 고입열용접이기 때문에 용접변형으로 인한 작업 지연 발생 가능성이 있어, 이에 대한 대책 수립 및 작업 공법 결정이 반드시 필요하다.

제1저자 김상일 연락처 : 경상남도 거제시 아주동 1번지
052-233-9445 sang-il.kim@lr.org

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.

본 연구에서는 용접으로 인한 변형을 가능한 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.

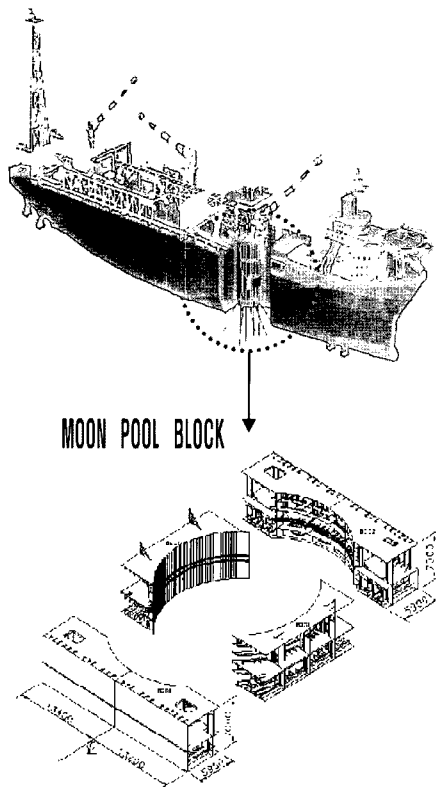


Fig. 1 Moon pool structure of FPSO vessel

2. 용접 현상의 역학적 특성

용접 중에 일어나는 현상을 이론적으로 파악하기 위해서는 열탄소성문제를 풀어야 한다. 용접변형해석 방법으로는 유한요소법에 토대를 둔 열탄소성해석이 있으나, 용접이 가지는 재료 및 기하학적 비선형성, 시간과 온도에 대한 의존성 등 복잡한 물리적 성질과 전류, 전압, 용접속도, 용접순서, 구속조건 등 용접변형의 결과에 영향을 주는 많은 인자들이 있어서, 이들의 효과를 반영하여 해석하기에는 방대한 계산 시간이 필요하다.

용접변형해석은 이론적으로 열전달문제와 열변형문제가 연성된 형태이나 변형량이 그다지 크지 않은 것으로 가정하면 구조물의 기하학적 형상 변화가 열전달문제에 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고, 따라서 열전달문제와 열변형문제를 분리하여 독립적으로 해석할 수 있다. 즉, 열전달해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행함으로써 용접변형을 계산하였다.

3. 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 보여진 바와 같으며, jig는 기본적인 보 이론을 통해서 필릿 용접으로 인한 중급힘변형이 최소화되도록 설계하였다. Fig. 3은 본 논문에서 제시한 SUS-Overlay 용접 순서를 보여 주고 있으며, 그 방법은 다음과 같다.

- (1) SUS-Overlay 용접으로 인해 발생하는 길이 방향과 폭 방향으로의 굽힘모멘트의 크기를 최소화하기 위해 양면에 판을 붙여서 작업한다.
- (2) SUS-Overlay 용접에 의해 발생하는 중·횡굽힘모멘트의 balance 유지를 위해서, 용접 순서는 판의 중앙부에서 좌·우 방향으로 대칭적으로 용접한다.

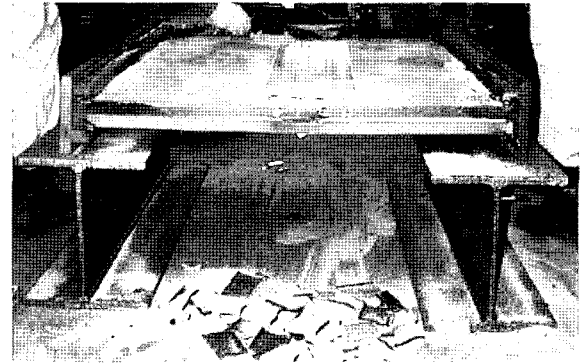
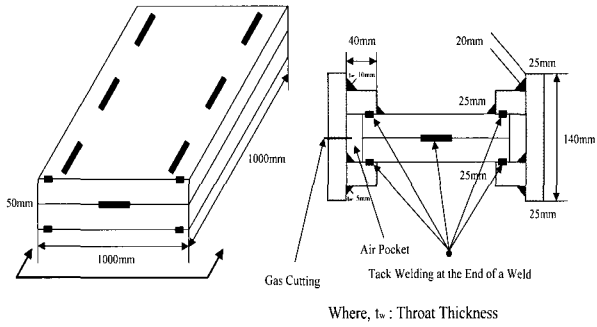
Fig. 4는 실제 용접변형실험 시의 용접 순서를 보여 주고 있으며, Table 1은 전면에서 1 layer 용접 시의 pass 수에 따른 각변형의 발생 추이를 보여 주고 있는데, jig를 이용한 free edge부 구속법이 용접변형 감소에 매우 효과적이라는 사실을 보여 주고 있다.

Fig. 5는 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. 6은 최종적인 중급힘변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1 & 2 layer 용접한 시편의 중급힘변형은 free edge 부에서 다소 발생되며, 전면에서 1 layer 용접한 시편의 중급힘변형은 반대 방향으로 약간 크게 나타난다.

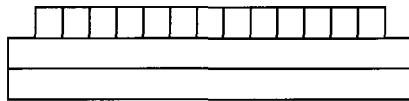
Fig. 7은 jig 철거 후의 최종적인 횡수축변형을 보여 주고 있는데, 이면에서 1 & 2 layer 용접한 시편과 전면에서 1 layer 용접한 시편 둘 다 판 길이의 중앙부에서 매우 큰 횡수축변형이 유발되며, 횡수축변형은 1 layer 용접 시가 가장 지배적이라는 사실을 알 수 있다.

Fig. 8은 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.

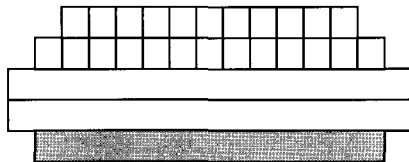


(a)

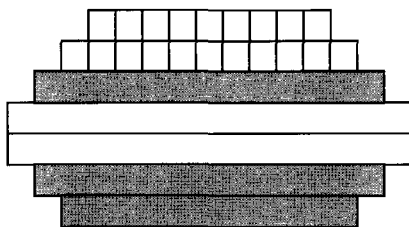
Fig. 2 Dimension of experimental model



(a)

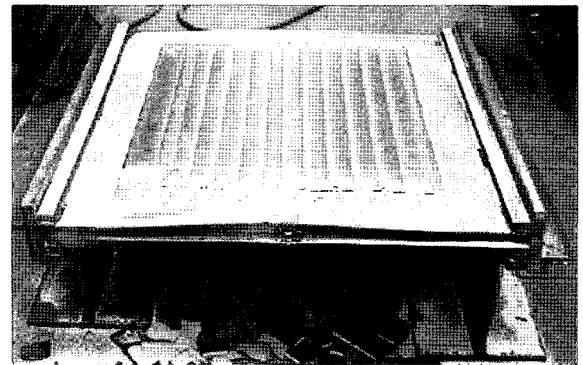


(b)



(c)

Fig. 3 Proposed welding sequence. (a) front side 1 layer welding, (b) back side 1 & 2 layer welding, (c) front side 2 & 3 layer welding.



(b)

Fig. 4 Actual welding sequence. (a) front side 1 layer welding, (b) back side 1 & 2 layer welding.

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

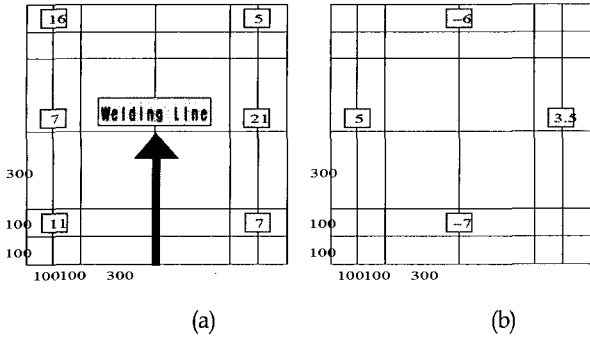


Fig. 5 Angular distortion of experimental model, in mm. (a) front side 1 layer-welded specimen, (b) back side 1 & 2 layer-welded specimen.

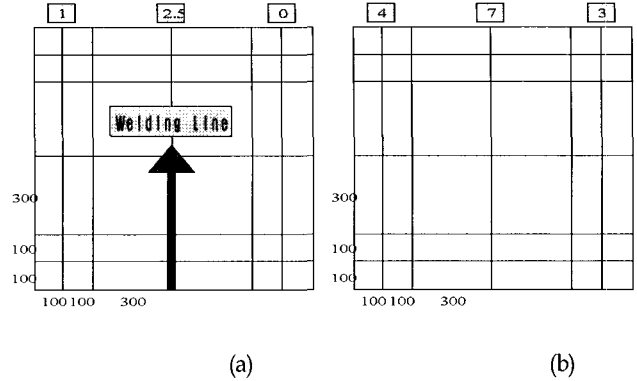


Fig. 8 Longitudinal shrinkage of experimental model, in mm. (a) front side 1 layer-welded specimen, (b) back side 1 & 2 layer-welded specimen.

4. 용접변형에 대한 수치해석

4.1 SUS-Overlay 용접으로 인한 고유변형 예측

해석 시의 유한요소모델은 2차원 일반화된 평면 변형을 요소를 이용하였다. 열전달해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였으며(Fig. 9 참조), 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)의 효과를 고려하였다. 또한 외부로부터 유입되는 용접금속(weld metal)을 모델링하기 위해 요소 탄생법(element birth method)을 이용하였는데, 그 방법은 초기에 해석 모델 전체를 모델링하고, 해석이 시작되기 이전에 용접비드(weld bead) 부분의 요소들을 모두 삭제한 다음, 시간에 따라 비드요소(bead element)가 하나씩 생성되도록 하는 것이다. 경계조건으로는 해석 모델의 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대기의 온도는 20°C로 가정하였다.

용접비드가 쌓이는 현상을 수치적으로 모델링하는 방법은, 생성되는 요소에 표면열속을 가하는 방법, 체적열속을 가하는 방법, 절점온도를 주는 방법 등이 있는데, 본 해석에서는 생성되는 비드요소에 체적열속을 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였다.

용접변형해석은 열전달해석의 결과를 토대로 출발하게 된다. 즉, 열전달해석을 통한 각 절점에서의 과도적인 온도분포가 열탄소성해석 시의 하중조건이 된다. 따라서 열탄소성해석 시에는 열전달해석 시의 요소 분할을 그대로 사용하였으며, 요소 탄생법 역시 동일한 방법을 이용하였다. 이 때에도 모든 기계적인 재료 특성치들이 온도에 따라 변하도록 모델링하였고(Fig. 10 참조), 재료의 변형도 경화 모델은 Fig. 11에 나타낸 바와 같다.

Fig. 12는 해석 모델의 차원을 보여주고 있으며, Fig. 13은 해석 모델의 시간이 지남에 따라 각 용접층이 쌓여 나가는 모습을 나타낸다. Fig. 14는 해석 모델의 변형 형상을 보여 주고 있는데, 용접 작업 시에 중·횡굽힘모멘트의 balance 유지를 위한 최적의 용접 순서를 적용하게 되면 SUS-Overlay 용접은

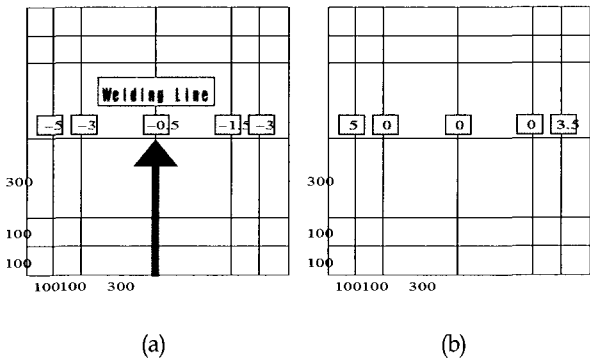


Fig. 6 Logitudinal bending distortion of experimental model, in mm. (a) front side 1 layer-welded specimen, (b) back side 1 & 2 layer-welded specimen.

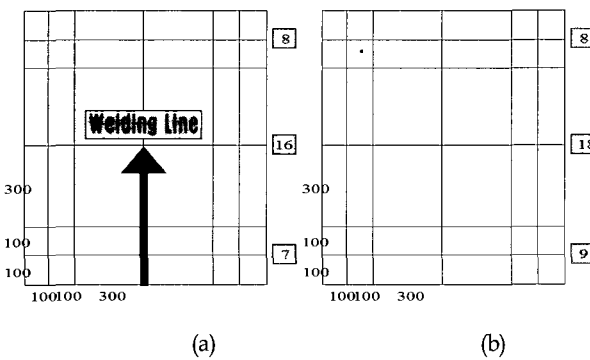


Fig. 7 Transverse shrinkage of experimental model, in mm. (a) front side 1 layer-welded specimen, (b) back side 1 & 2 layer-welded specimen.

로 인한 각변형은 좌·우 대칭적으로 발생된다는 사실을 알 수 있다.

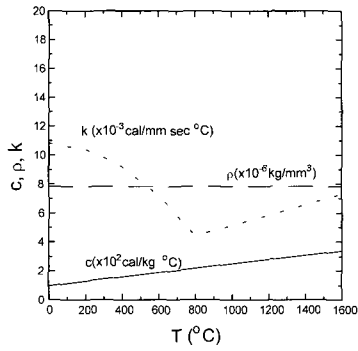


Fig. 9 Temperature-dependent physical properties of mild steel

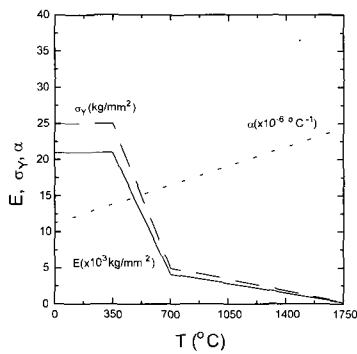


Fig. 10 Temperature-dependent mechanical properties of mild steel

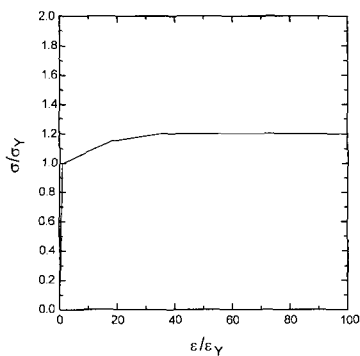


Fig. 11 Strain hardening model for mild steel

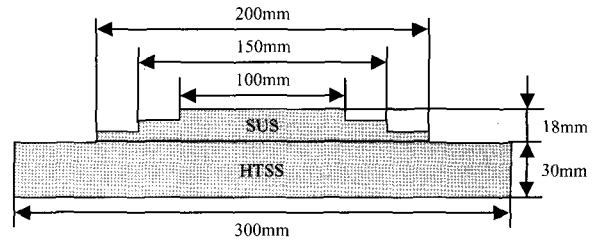


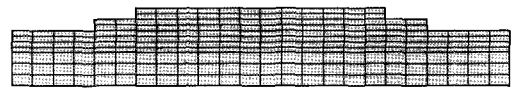
Fig. 12 Dimension of analysis model



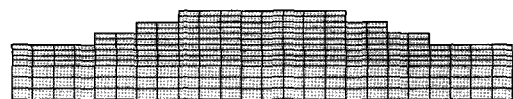
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 13 Element birth for analysis model to simulate the welding filler metal. (a) load step = 1, (b) load step = 6, (c) load step = 14, (d) load step = 18.

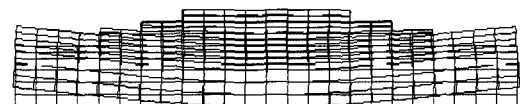


Fig. 14 Deformed shape for analysis model

4.2 실구조물의 용접변형 예측

본 연구에서는 용접 후 잔류변형에 대한 기본적인 물리적 현상에 기초하여 SUS-Overlay 용접 시에 발생하는 각변형에 있어서는 용접선 근방에 이러한 각변형을 일으키는 횡굽힘모멘트가 작용하는 것으로, 종굽힘변형에 있어서는 용접선 끝단에 종굽힘변형을 일으키는 종수축력이 작용하는 것으로 열탄 소성문제를 횡굽힘모멘트 및 종수축력에 의한 변형 문제로 치환하여 모델링함으로써 실구조물에서의 SUS-Overlay 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다.

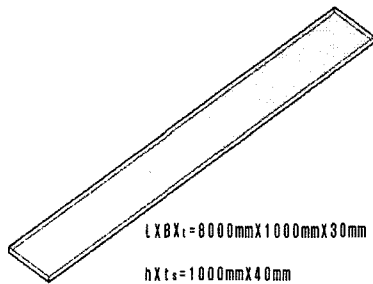


Fig. 15 Dimension of actual plate model

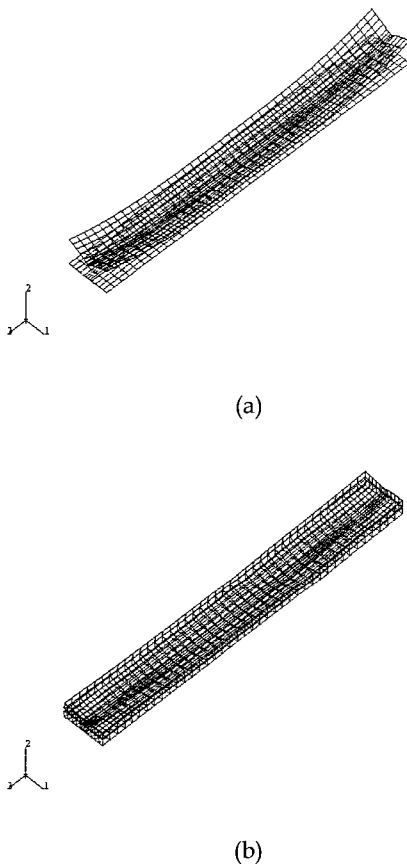


Fig. 16 Deformed shape for actual plate model. (a) free edge condition, (b) restrained edge condition.

Fig. 15는 실구조물 중에서 free edge부가 구속된 모델의 차원을 보여 주고 있으며, Fig. 16은 실구조물의 용접변형 해석 결과를 보여 주고 있는데, 판을 이용한 free edge부 구속법은 용접변형 감소에 매우 효과적이라는 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

현재 용접성 시험 중인 SUS-Overlay 용접은 고입열용접이기 때문에 용접변형으로 인한 작업 지연 발생 가능성이 있어, 이에 대한 대책 수립 및 작업 공법 결정을 위해 용접변형실험 및 해당 부분의 유한요소해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) Jig 또는 판을 이용한 free edge부 구속법은 작업 공법상 전혀 문제가 되지 않으며, 용접변형 감소에도 매우 효과적이라는 사실을 확인하였다.
- (2) SUS-Overlay 용접에 의해 발생하는 종·횡굽힘모멘트의 balance 유지를 위해서는 용접 순서를 판의 중앙부에서 좌·우 방향으로 대칭적으로 가져가야 하며, 이를 통해 용접변형은 최소화될 수 있다.
- (3) 용접변형실험을 통해서 얻어지는 횡수축변형과 종수축변형은 설계 단계에서 수축 마진을 결정하는데 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 김상일, 강중규, 조용관, 한종만 (1997), "Fillet 용접된 판의 열탄소성해석에 관한 연구", 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 338-348.
- 김상일 (1999), 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사학위논문.
- Fujita, Y. and Nomoto, T. (1972), "Studies on Thermal Elasto-Plastic Problems(1st Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 130, pp 183-191.
- Kim, S.I., Kang, J.K. and Han, J.M. (2002), "Development of Welding Deformation Control Method for Hull Structure of Ro/Ro Passenger Ferry", Proc. ISOPE- 2002, pp 314-320.
- Ueda, Y. and Yamakawa, T. (1973), "Analysis of Thermal Elastic-Plastic Behavior of Metals during Welding by Finite Element Method", Journal of the Japanese Welding Society, Vol 42, No 6, pp 567-577.
- Ueda, Y., Murakawa, H., Gu, S.M., Okumoto, Y. and Kamichika, R. (1992), "Simulation of Welding Deformation for Accurate Ship Assembling (1st Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 171, pp 395-404.

2003년 3월 6일 원고 접수

2003년 4월 28일 최종 수정본 채택