

등가하중법을 이용한 PCTC 박판 블록 용접변형에 관한 연구

강성구^{1,†}·양종수¹·김호경¹·허주호¹
STX조선해양 기술연구소¹

A Study on Welding Deformation of Thin Plate Block of PCTC by Using Equivalent Load Method

SungKoo Kang^{1,†}·JongSoo Yang¹·HoKyung Kim¹·JooHo Heo¹
Research Institute of Technology, STX Offshore & Shipbuilding¹

Abstract

The use of thin plate increases due to the need for light weight in large ship. Thin plate is easily distorted and has residual stress by welding heat. Therefore, the thin plates should be carefully joined to minimize the welding deformation. In this study, the welding deformation of PCTC which use a thin plate is investigated by using equivalent load method. The analysis model of 10, 11, 12, upper and garage deck is composed of thin plate of 6mm which is susceptible to welding heat. For two different welding sequences, the welding deformation is calculated and its trend is investigated. The influence of gravity on welding deformation is studied.

Keywords : Welding Deformation, 등가하중법, 구속도

1. 서론

최근 선박 건조 기술의 향상 등으로 대형 선박 건조가 지속적으로 이루어지고 있다. 선박의 대형화는 강재 소요량 및 인건비 등을 증가시키며 원가 부담을 발생시킨다. 이를 극복하기 위해 선박의 경제성 및 효율성을 추구하게 되었으며, 구체적으로 선박 하중 경량화를 실현하고자 노력하고 있다. 이에 따라 박판으로 구성된 부분이 지속적으로 증가하는 추세이다. 박판은 이러한 장점과 함께, 용접 입열에 취약한 단점을 가지고 있다. 특히 용접 시 발생하는 용접 변형은 곡직 등의 추가적인 작업을 필요로 하는 등의 시간 및 비용의 발생을 초래한다. 이것을 최소화하기 위해서 선박을 건조하기 전에 용접 변형을 예측하는 것이 필요하다.

용접 변형을 예측하는 방법은 크게 두 가지 방법이 존재한다. 첫번째 방법은 열탄소성해석이며, 두번째 방법은 간이해석법이다.

열탄소성해석은 용접이 가지는 재료 및 기하학적 비선형성, 시간과 온도에 의한 의존성 등 복잡한 물리적 성질과 전류, 전압, 용접속도, 용접순서, 구속조건 등 용접변형에 영향을 주는 많은 인자들을 고려하여 해석을 실시하므로, 결과의 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다. 그러나, 해석 시 과도한 계산시간이 필요한 단점이 있다. 특히 선체구조와 같이 복잡한 구조를 해석하는 것은 슈퍼컴퓨터를 사용하더라도 현실적으로 많은 어려움이 따른다.

그리하여 열탄소성해석은 단순 형상 구조물에 대한 기초 연구에 많이 활용되고 있다. Michaleris and Debiccari(1997)는 조선 판넬 구조에 대한 좌굴변형을 열탄소성 해석을 실시하였다. Tsai et al.(2006)은 박판 용접에서 최대 온도와 좌굴변형의 관계를 열탄소성 해석 및 용접 실험을 통해 연구하였다. Jung and Tsai(2004)는 박판 필렛 용접에 대한 열탄소성 해석을 실시하였다. 예측된 각변형량과 실험값과 비교하여 해석 결과를 검증하였다.

또 다른 방법은 간이해석법으로, 용접 실험에 의한 변형량으로부터 등가하중 혹은 고유변형도를 유도하여 탄성해석을 실시하는 것이다. 해석 소요 시간이 일반 구조해석과 같아지며, 처리할 수 있는 유한요소 개수도 크기 때문에 대형구조물 용접변형 해석에 적합하다. Ha(2008)는 고유변형도를 경계조건으로 갖는 대형 구조물에 대한 해석을 실시하였으며, Kim et al.(2002)은 고유변형도를 이용한 평블록 구조의 용접 변형을 연구하였다. Park et al.(2002)는 강구조물 용접 변형 해석을 실시하였고, Lee and Park(2007)는 필렛 용접 변형 감소법 연구에 등가하중법을 사용하여, 방법의 유용성을 제시하였다.

본 연구에서는 등가하중법을 이용하여 PCTC(Pure Car and Truck Carrier) 용접 변형을 정량적으로 예측하고자 하였다. 용접 열변형에 취약할 것으로 예상되는 박판 PCTC 상부 구조 블록을 선정하여 해석을 실시하였다. 용접 순서 및 하중이 블록 변형에

[†] 교신저자 : skkang@onestx.com, 055-548-3867

미치는 영향에 고려하였으며, 이를 통해 블록 제작 시에 발생할 변형 문제를 예측하고자 하였다.

2. 등가하중법 개요

구속도는 등가하중법의 핵심이 되는 개념이다. 이는 구조물에 하중을 가했을 때, 발생하는 응력 및 평균 변위 사이의 관계를 정의하며, 아래와 같다.

$$\sigma_o = k_s [\bar{v}] \quad (1)$$

k_s : 구속도

σ_o : 응력

$[\bar{v}]$: 평균 변위

Masubuchi는 Slit-type 용접에서 구속도가 횡수축에 미치는 효과를 용접 실험을 통해 확인하였다. 구속도가 증가할수록 횡수축이 감소한다는 것을 검증하였다. 또한, Kihara 및 Masubuchi는 원형 링 형상 용접에서 구속도가 횡수축에 미치는 효과를 연구하였으며, 비슷한 결과를 얻었다. Fig. 1은 이 실험들의 결과를 종합적으로 표시한 것으로서, 구속도 및 자유 상태 변형(S_{tf}) 및 구속 상태 변형(S_c)의 상관관계를 표시하고 있다. 구속도가 클수록 S_c/S_{tf} 가 작게 되어 구속 상태 변형이 작은 값으로 발생하는 것을 의미한다.

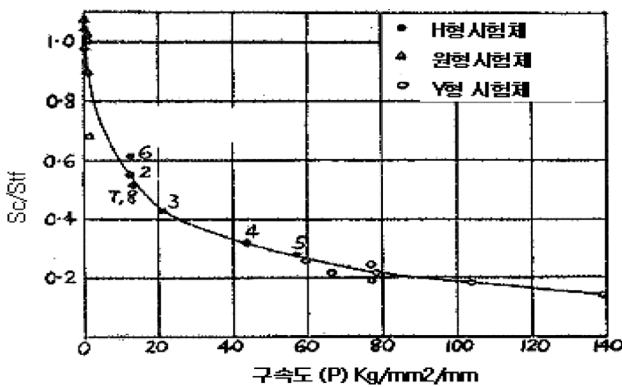


Fig. 1 Effect of external constraint on the transverse shrinkage

등가하중법을 이용한 용접 변형 해석 Flow chart는 Fig. 2와 같다. Masubuchi(1980) 등이 제시한 실험식 2,3,4를 사용하여 자유 상태 용접 변형을 계산한다. 실험식이 용접부 형상 정보만을 기초로 용접변형을 예측하도록 개발되었다. 실험식을 구하기 위해 사용한 용접 조건(용접 방법, 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도, 개선키의 크기, 재료 등)이 본 용접 조건과 유사하기에 그대로 사용하였다. 해석 모델에서 용접선 직각 방향으로 단위 변위를 가한 후 해석을 실시하여 각 노드에서 발생하는 용접선 직각

방향의 응력을 읽어내어 구속도를 구한다. 자유 상태 용접 변형, 구속도 및 Fig. 1을 이용하여 구속 상태 용접 변형을 계산한다. 해석 모델에 구속 상태 용접 변형을 다시 가하여, 전 모델 용접 변형을 해석한다.

1. Butt Joint

$$S = \frac{[0.2(A/t) + 0.05 \times g]}{2} \quad (2)$$

2. Fillet Joint

$$S = \frac{L_f}{t} \times 0.04in \quad (3)$$

3. Lap Joint

$$S = \frac{L_f}{t} \times 0.06in \quad (4)$$

S : 수축량

L_f : 각장

t : 판두께

A : 용접부 단면적

g : 루트 간격

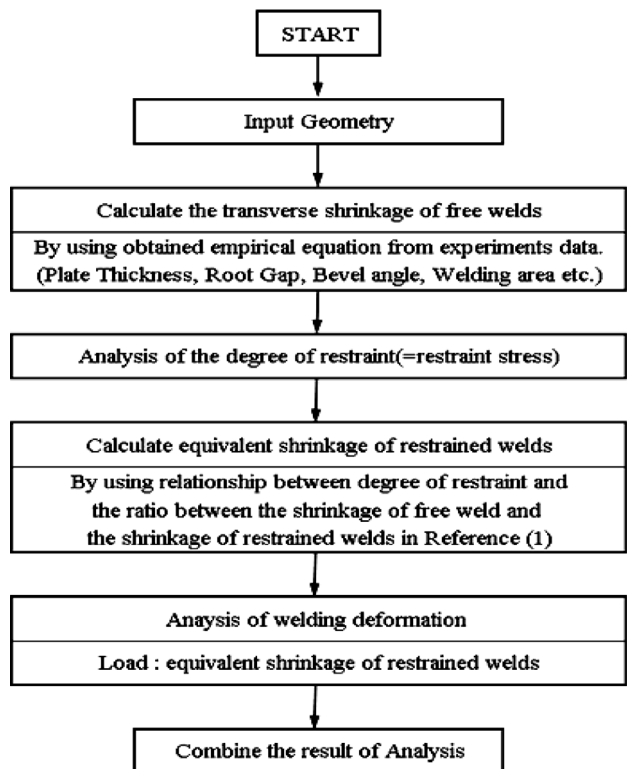


Fig. 2 Flow chart to analyze the welding deformation

3. 해석

3.1 해석 모델

해석을 위한 PCTC 모델을 Fig. 3에 표시하였다.

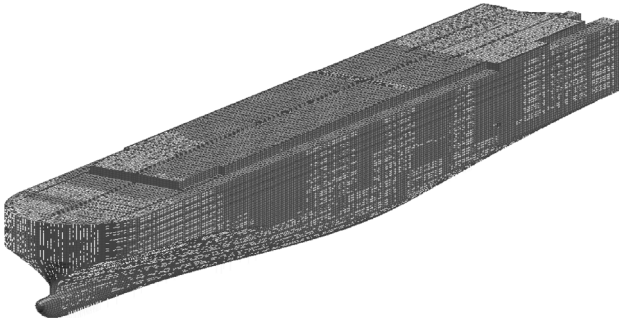


Fig. 3 Configuration of PCTC

PCTC 상부 구조는 6mm 강판을 사용한다. 박판으로 구성되어 있기 때문에 용접 변형에 취약할 것으로 예상된다. 해석 블록의 전체 모델에서 차지하는 위치는 Fig. 4에 표시하였으며, 세부적인 구조는 Fig. 5, 블록의 사이즈는 Table 1에 표시하였다.



Fig. 4 Analysis range of PCTC

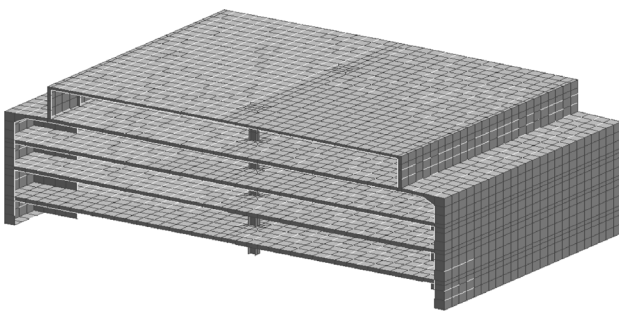


Fig. 5 Finite element model

Table 1 Size of FEM

Width	32,260mm
Length	19,200mm
Height	3,170mm

해석에 사용된 Pre, Post Processor는 Patran 2005 r2를, Solver는 Nastran V2005.5를 사용하였다. 해석에 사용한 관련 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2 Material properties

Elastic Modulus	210,000N/mm ²
Poisson Ratio	0.3
Shear Modulus	80,769N/mm ²
Density	7.8*10 ⁻⁶ Kg/mm ³

3.2 경계 조건 및 하중 조건

관심있게 보고자 하는 용접 변형 부위는 10 Deck, 11 Deck, 12 Deck, Upper Deck, Garage Deck로서 이 부분들이 자유롭게 변형을 할 수 있도록 경계조건을 설정하였다. 아래 구조와 접촉하는 부분의 X, Y, Z방향을 Fig. 6과 같이 구속하였다. 자중을 고려하여, Fig. 7과 같이 중력이 작용하도록 하였다.

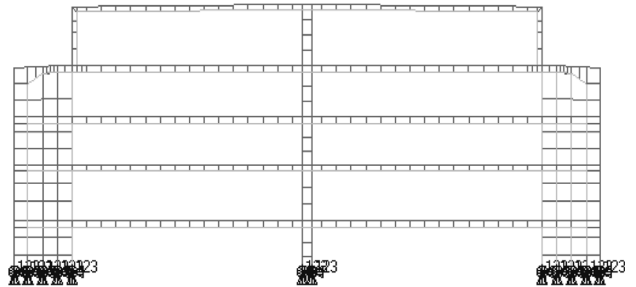


Fig. 6 Boundary condition of FEM



Fig. 7 Gravity condition of FEM

블록에 존재하는 용접 부위 및 용접 종류를 Fig. 8에 표시하였다. 10, 11, 12 Deck는 랩 및 필렛 조인트로 양쪽이 구성되었으며, Upper, Garage Deck는 필렛 및 맞대기 조인트로 구성되었다.

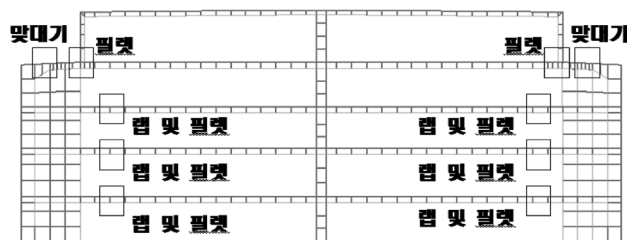


Fig. 8 Welding joints of FEM

용접 순서는 용접 변형에 영향을 미치는 것으로 알려졌다. 하나의 Deck 좌우를 용접할 때, 한쪽을 먼저 용접하고 다른 쪽을 나중에 용접한다. 먼저 시행하는 용접이 나중에 용접 하는 것보다 구속이 덜하기 때문에 용접 변형이 많다. 이러한 이유로 한 Deck를 용접하면 비 대칭적인 용접 변형이 발생하게 된다. Deck가 적층되면서 비대칭 용접 변형이 서로 영향을 줄 것으로 예상되며, 어떤 순서로 진행하는 것이 용접 변형을 적게 발생하는 지를 고려하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 두 가지 용접 순서를 선택하였다. 한 방법은 Fig. 9(a)에 표시하였듯이 오른쪽을 용접하고 왼쪽을 용접하는 것이다. 용접변형이 비대칭적으로 한쪽에 집중되도록 고려한 순서이다. 다른 방법은 Fig. 9(b)에 표시하였듯이 Deck가 올라가면서 “c”자 형태로 용접이 진행되도록 하였다. 각 Deck의 용접변형이 양쪽에 균일하게 분포하도록 고려한 용접 순서이다.

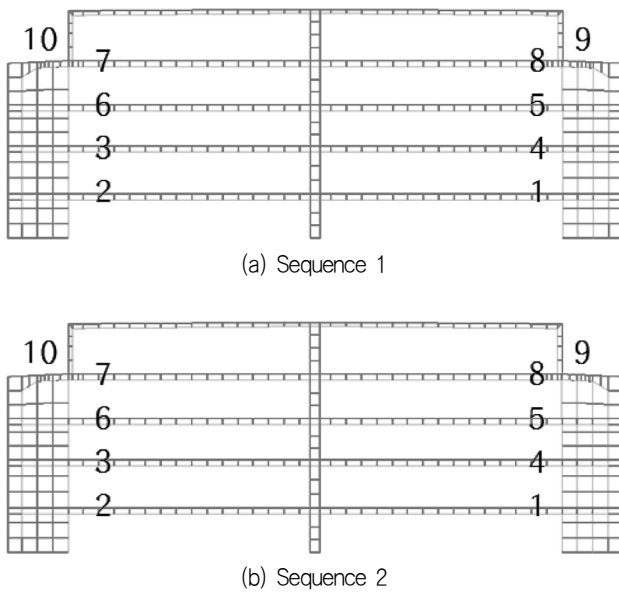


Fig. 9 Welding sequence

3.3 해석 결과

Fig. 9에 설명한 용접 순서 1(Welding sequence 1)에 대한 변형 예측 결과를 Fig. 10부터 14까지 표시하였다. 10 Deck를 용접함에 따라 용접선 부근은 수축이 발생했음을 알 수 있다. 최대 변위는 5.68mm로서 Deck 중앙 전면 부위에서 발생하였다. Side shell에서 동일하게 5mm 이상의 최대변위가 발생한 것을 알 수 있다. 11 Deck가 올라가면서 7.7mm의 최대변위가 발생하였으며 발생 부위는 Deck 중앙 전면 부위에서 발생하였다. Side shell 변위가 10 Deck때 보다 상대적으로 적어졌다. 12 Deck가 올라가면서 8.57mm 최대변위가 Deck 중앙 전면 부위에서 발생하였으며, Side shell 변위는 더 작아졌다. Deck 중앙 앞부분에서 최대 변위가 발생한 것은 Deck 양쪽의 용접 조인트의 수축 및 자중으로 인한 영향으로 사료된다. Deck 후면 부위가 전면 부위보다 변위가 상대적으로 작는데, 이는 Side shell의 후면부위 Web frame

이 Deck를 구속하기 때문에 발생한 현상이다. Side shell의 변위도 Deck가 10번에서 12으로 갈수록 작아지는데, 이는 Deck가 진행될수록 Side shell이 구속되어, 안쪽 방향 모멘트가 감소하기 때문이다.

Upper Deck가 올라가면서 최대변위는 급격하게 증가하여 74.2mm가 발생하였다. Upper Deck 오른쪽 홀 끝단에서 최대 변위가 발생하였다. 절대값이 12 Deck에서 발생한 값보다 수배가 증가한 것으로 이는 기존과는 다른 원인에 의해서 갑작스런 증가가 발생한 것이라고 생각할 수 있다. Garage Deck가 올라가면서 최대 변위가 69.6mm로서 홀 끝단에서 최대 변위가 발생하였다. Garage Deck가 Upper Deck를 구속시키는 역할을 하면서 최대 변위 값이 감소한 것으로 사료된다.

Fig. 10에서 14를 통해 Deck가 진행함에 따라 최대변위가 지속적으로 증가하는 것을 쉽게 알 수 있다. 이는 Deck가 올라갈수록, 구속된 부위와 Deck 사이 간격이 커지기 때문에, 변형이 쉽게 발생하기 때문이다.

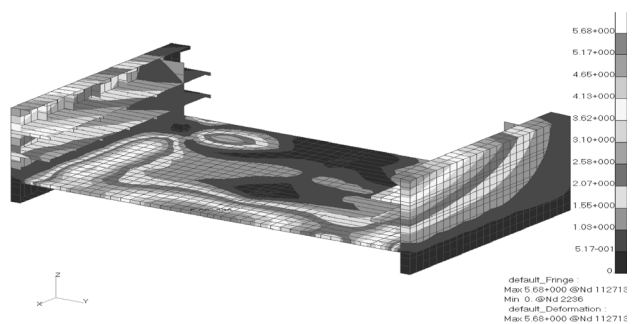


Fig. 10 Deformation of 10 Deck

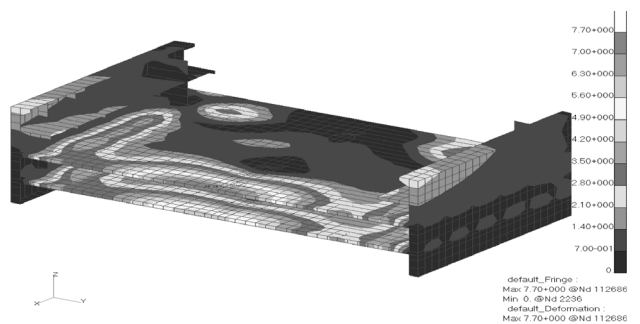


Fig. 11 Deformation of 11 Deck

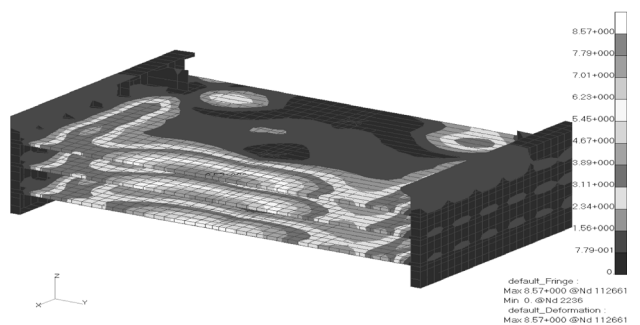


Fig. 12 Deformation of 12 Deck

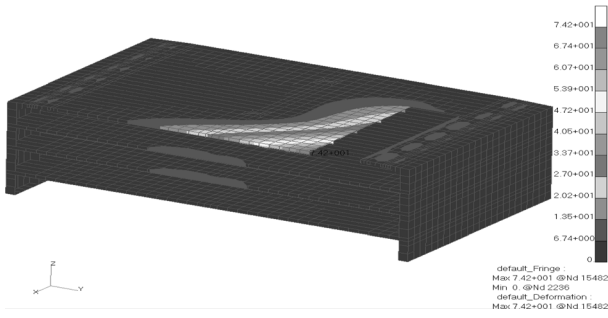


Fig. 13 Deformation of Upper Deck

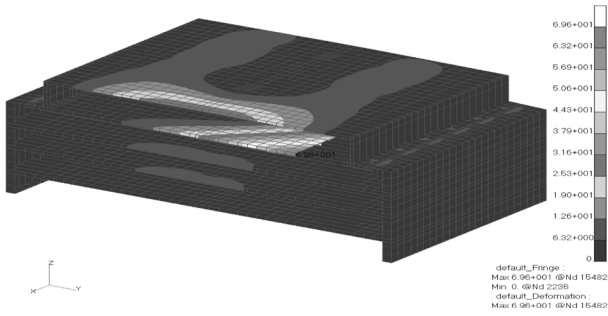


Fig. 14 Deformation of Garage Deck

Upper Deck에서 최대 변위의 급격한 증가 원인을 확인해 보기 위해, 자중을 제거한 상태로 해석을 실시하였다. Fig. 15는 해석결과를 표시한 것으로, 14mm 최대변위가 발생하였다. 이는 자중을 고려한 경우의 74.2mm의 1/5에 해당하는 값으로서, 변형의 대부분이 자중으로 발생하였음을 말해주고 있다. 10 Deck에 대해서도 자중을 제거한 상태로 해석을 실시하였고, Fig. 16에 결과를 표시하였다. 최대변위가 10.1mm 발생함을 확인하였다. 하중을 고려했을 때의 5.68mm와 비교할 때 값의 변화가 큼을 알 수 있다.

용접선 부근의 변형 및 Side Shell의 변형도 상대적으로 적게 형성된 것을 확인할 수 있으며, 이 부분의 변형도 자중에 의해 많은 영향을 받음을 알 수 있다.

10 Deck는 좌우 대칭이지만, Upper Deck 홀 부분은 비대칭이기 때문에 자중으로 인한 영향이 상당히 크게 작용한 것으로 사료된다.

자중을 고려하지 않은 두 경우의 해석 결과를 통해, 자중이 최대변위에 미치는 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있다.

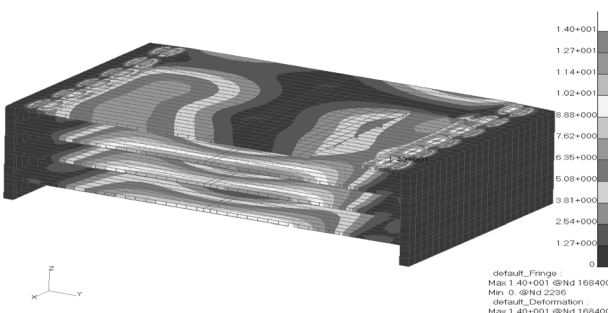


Fig. 15 Deformation of Upper Deck without gravity

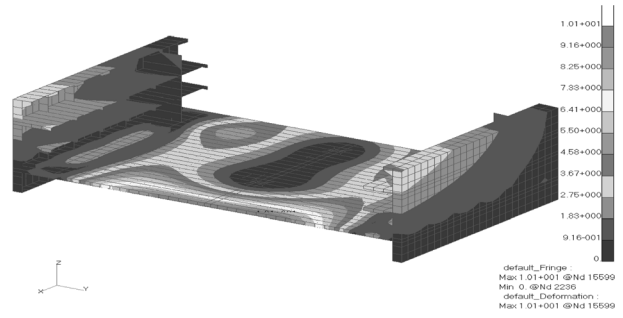


Fig. 16 Deformation of 10 Deck without gravity

용접 순서 2에 대해서도 용접 순서 1처럼 Deck가 진행됨에 따라 용접 변형이 비슷한 경향으로 발생함을 확인하였다.

용접 순서 1 및 2로 인한 영향을 비교 분석하기 위하여 Deck 진행에 따른 최대변위를 Fig. 18에 표시하였다. 그래프 상에는 하나의 선으로 표시되어 있는데, 이는 순서 1 및 2에 따른 최대 변위 라인이 겹쳐서 그림에 표시되었기 때문이다. 이는 용접 순서를 어느 것을 선택하더라도, 최대 변위는 경향이 바뀌지 않는 것을 의미한다. 구속부위와 Deck 사이 간격이 변형에 미치는 영향이 지배적이기 때문에, 용접 순서 1, 2 차이로 인한 영향이 거의 없는 것으로 결과가 발생한 것으로 사료된다.

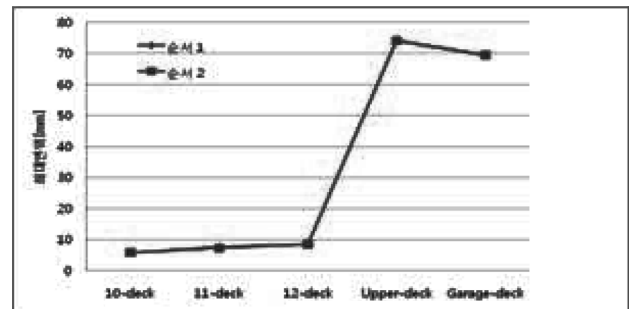


Fig. 17 Change of the largest deformation as welding of deck proceeds

4. 결론

본 연구에서는 등가하중법을 이용하여 PCTC 박판 블록 용접 시 발생하는 변형을 연구하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 용접 순서를 1 및 2로 용접해도 변형량은 큰 차이를 보이지 않는다.
- 2) 홀 등의 비연속적인 구간에서 큰 변형이 발생한다.
- 3) 하중이 변형에 큰 영향을 주며, 특히 홀 등의 비 연속적 구간에서 큰 영향을 미친다.
- 4) Deck가 올라 갈수록 최대 변위가 점진적으로 증가한다.

참고 문헌

Ha, Y.S., 2008. Development of Thermal Distortion Analysis

Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(1), pp.93-100.

Jung, G.H. and Tsai, G.L., 2004. Plasticity-Based Distortion Analysis for Fillet Welded Thin Plate T-joints. *Welding Journal*, 83(6), pp.177s-187s.

Kim, S.I., Kang, J.K. and Han, J.M., 2002. Prediction and Control of Welding Deformation for Panel Block Structure. *Journal of the Korean Welding Society*, 20(2), pp.139-144.

Lee, J.S. and Park, J.W., 2007. A Study on the Reduction of Fillet Welding Deformation by Applying the Tensioning Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(6), pp.590-597.

Masubuchi, K., 1980. *Analysis of Welded Structures- Residual Stresses, Distortion, and their Consequences*. Pergamon Press Ltd.

Michaleris, P. and Debicari, A., 1997. Prediction of Welding Distortion. *Welding Journal*, 76(4), pp.172s-181s.

Park, J.U., Lee, J.W. and Lee, H.W., 2002. Analysis of Welding Deformation by Equivalent Load Method on Steel Structures. *Journal of the Korean Welding Society*, 20(3), pp.385-393.

Tsai, C.L., Han, M.S. and Jung, G.H., 2006. Investigation the Bifurcation Phenomenon in Plate Welding. *Welding Journal*, 85(7), pp.151s-162s.



강 성 구

양 종 수

김 호 경

허 주 호