

## 얇은 박스형 용접구조물의 용접변형 해석

김 충 기\* · 김 재 응\*\* · 김 기 철\*\*\*

\*영남대학교 대학원

\*\*영남대학교 기계공학부

\*\*\*포항산업과학연구원

### Welding Distortion Analysis of a Laser Welded Thin Box Structure

Choong-Gi Kim\*, Jae-Woong Kim\*\* and Kim-Chul Kim\*\*\*

\*Dep. of Mechanical Eng., Graduate School of Yeungnam University, Kyung-san 712-749, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyung-san 712-749, Korea

\*\*\*Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330, Korea

#### Abstract

Prediction and control of the thermal distortion is particularly important for the design and manufacture of welded thin metal structure. In this study, numerical computations are performed to analyze effect of structure section shape and weld line location on distortion. In addition, this study aims to develop a thermal elasto-plastic simulation using finite element method to predict distortion, with particular emphasis on bending deformation generated in outline welding of a thin box structure.

From the numerical analysis, it was revealed that the section shape and weld line location play an important role on the welding distortion. Among 3 types of section shape design proposed in this study, the least deformation remained in the two path welded structure.

\*Corresponding author : jaekim@yu.ac.kr

(Received October 1, 2007)

Key Words : Welding distortion, Laser welding, Thin metal structure, Bending deformation, Finite element method

#### 1. 서 론

박판 구조물은 자동차, 항공우주산업 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 최근 소형화, 경량화를 위해 그 사용이 증가되고 있는 추세이다. 이러한 박판 구조물을 접합하는데 있어서 근래 레이저 용접의 적용이 종종 검토되고 있다. 레이저 용접은 열영향부가 작고, 냉각속도가 빠르므로 변형이 작게 발생된다. 또한 고속 용접이 가능하며 먼 거리에도 에너지 전달이 가능한 장점도 있다. 그러나 고밀도 에너지 용접은 용접부의 냉각속도와 온도 구배가 매우 커서 취성조직과 구배가 큰 잔류응력을 형성할 수도 있다.

구조물의 용접 시 온도분포의 불균일로 인해 용접변

형이 발생되는데 이는 구조물의 외관을 해치고 좌굴강도를 저하시키며 형상오차를 유발하여 생산성을 저하시키므로 최근 구조물 제조분야에서 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 용접변형을 예측하여 설계에 반영하거나 변형을 제어함으로써 막대한 비용을 절감할 수 있으므로 용접변형의 예측에 관한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 용접은 복잡한 열탄소성 변형과정을 겪게 되므로 이론적인 해석해를 구하기가 매우 어렵다. 이러한 어려움 때문에 수치적 방법으로 유한요소해석을 통한 열탄소성 시뮬레이션이 시도되어 왔다<sup>1)</sup>.

용접변형을 수치해석하기 위해서는 3차원 해석을 해야 하지만 3차원 해석은 계산시간이 과도하게 소요되어 비효율적이므로 과거에는 주로 단순화된 2차원 해석이 수행되었다. 그러나 근래 컴퓨터의 성능이 좋아짐에 따

라 점차적으로 3차원 해석이 시도되고 있다<sup>2-6)</sup>.

면외변형은 횡수축에 의한 각 변형과 종수축에 의한 좌굴변형으로 나눌 수 있는데 각 변형은 구조물의 두께 방향으로 온도분포의 불균일로 인해 발생한다. 구조물이 박판일수록 두께방향으로의 온도 차이는 줄어들게 되고 좌굴에 대한 저항성이 떨어지므로 박판 구조물의 용접 시 좌굴변형에 비해 각 변형은 매우 작아서 무시할 수 있다<sup>3,4)</sup>. 이러한 가정은 3차원 쉘 요소를 사용할 수 있게 한다. P.Michaleris<sup>5,6)</sup> 등은 2차원 해석을 통해 열응력을 구하고 이를 3차원 쉘 요소에 하중으로 가하여 좌굴변형을 예측하였다.

연료전지의 분리판 제작 시 레이저 용접은 주요 공정 중 하나이다. Fig. 1은 발전용 연료전지 분리판의 대표적인 형상을 나타낸 것으로 3장의 스테인리스 박판으로 구성되는 얇은 박스형 용접 구조물이다. 3장의 박판을 레이저 용접으로 접합하는데 이때 변형이 심각하게 발생된다. 단위전지를 많이 적층할수록 연료전지의 출력이 좋아지는데 분리판의 레이저 용접 시 발생하는 변형으로 인해 적층과정에 어려움을 일으키게 된다<sup>7)</sup>.

분리판의 변형모드는 구멍용접에 의한 좌굴변형과 외곽용접에 의한 굽힘변형으로 나눌 수 있다. 본 저자들에 의한 선행연구에서 구멍용접에 의한 좌굴형 변형은 이미 해석을 수행하였다<sup>7)</sup>. 본 연구에서는 외곽용접에 의한 굽힘변형을 해석하고자 하며, 선행연구에서 실험을 통해 검증한 수치해석 모델을 활용하여 해석을 수행하였다. 특히, 본 연구에서는 시편의 단면 구조가 변형에 미치는 영향을 해석하고자 하며, 3차원 유한요소 모델을 구축하여 수치해석을 수행하였다.

## 2. 용접변형 해석모델

연료전지용 분리판은 음극판(cathode plate), 양극판(anode plate), 그리고 중간판(center plate)으로 구성되며, 음극측과 양극측의 가스유동을 중간판에 의해 완전 분리시키는 구조물이다. 이 분리판은 스테인리스 박판재를 성형한 후 밀폐성을 가지도록 용접 조립한 얇은 박스형 구조물이다. 이러한 성형구조는 외곽용접 시 종수축에 대한 큰 강성을 가지므로 좌굴이 발생하지

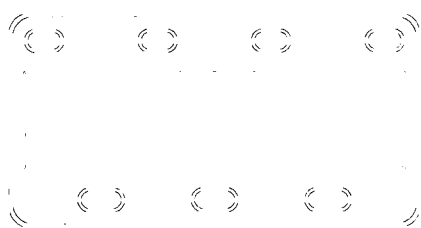


Fig. 1 A separator of fuel cell for electric power

않고 굽힘변형이 남게 된다. 그리고 중간판의 단면 구조에 대해 강성이 크도록 설계하면 이러한 굽힘변형을 줄일 수 있게 된다.

판재의 외곽을 용접하기 때문에 분리판의 굽힘변형을 해석하기 위해 분리판 전체를 모델링해야 한다. 하지만 본 연구는 굽힘변형에 대한 최적구조를 찾기 위해 해석을 실시하며 각기 다른 구조의 모델에 대한 비교를 목적으로 하므로, 계산의 효율을 높이기 위하여 분리판 전체의 가로대 세로 비율을 맞춰 축소된 모델을 해석 모델로 사용하였으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 재료는 0.4mm 두께의 스테인리스 강판(STS310)을 적용하였다.

굽힘변형에 대한 강성의 측면에서 최적의 단면구조와 용접선 위치를 찾기 위해 세 가지 모델을 선정하였다. 이 세 가지 모델의 단면형상 및 용접 위치는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 (a)는 외곽용접으로 2매 겹치기 용접이 실시되며, 상판(top plate, anode plate)과 하판(bottom plate, cathode plate)을 각각 중간판에 따로 용접하므로 두 용접선(two path) 용접이라 명명하였다. (b)와 (c)는 상판과 하판, 중간판을 단일 용접선(one path)으로 용접하며, 3매 겹치기 용접이 실시된다. (b)는 하판과 동일한 위치에서 용접되므로 바닥(one path - bottom) 용접이라 하고, (c)는 중간판 위치에서 용접되므로 중앙(one path - center) 용접이라고 한다.

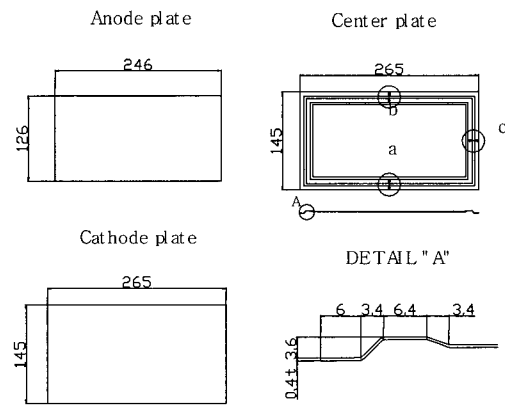


Fig. 2 Model for analysis

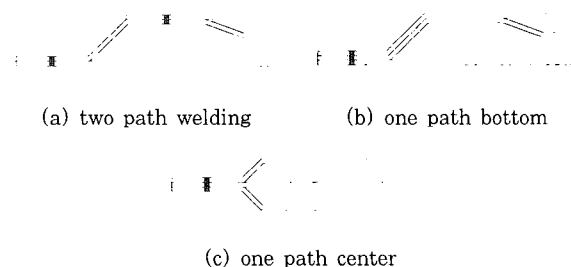


Fig. 3 Structure shape and weld design

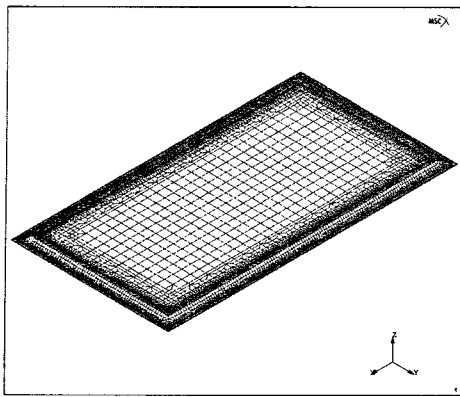


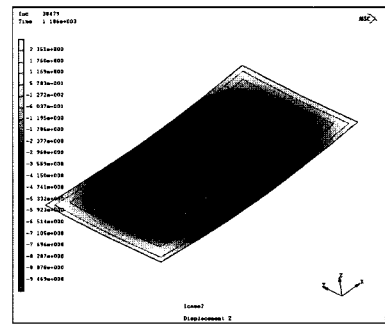
Fig. 4 Finite element mesh

3차원 셸(shell)요소를 사용하여 Fig. 4와 같이 메쉬(mesh)를 생성하였고 세 가지 구조에 대해 온도분포 해석과 변형 및 응력 해석을 실시하였다. 수치해석에서 재료의 온도 의존 물성치와 열원모델 및 레이저 용접조건은 선행연구<sup>7)</sup>에서와 동일하게 적용하였으며, 탄소성 해석을 위한 경계조건은 분리판 평면의 중심선(x,y축)에 대해 각각 수직방향으로, 네 모서리에 대해 높이방향(z축)으로 구속조건을 적용하였다.

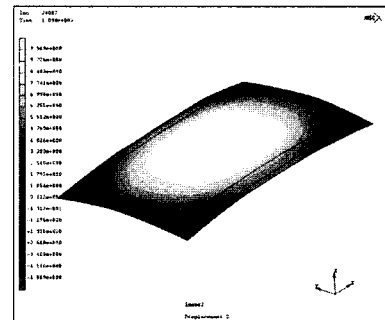
### 3. 용접변형 해석 결과 및 검토

Fig. 5와 같이 두 용접선(two path)용접은 오목한 형태로 변형을 했고, 단일 용접선(one path) 용접들의 경우는 볼록한 형태로 변형이 발생하였다. Fig. 6에서와 같이 가로, 세로 방향으로 각각 외곽과 중앙부에 대해 높이를 측정하였고, 변형량의 비교를 위해 두 용접선 용접물의 변위를 뒤집어서 Fig. 7에 나타내었는데 두 용접선 용접의 경우가 변형이 가장 작게 발생하였고 바닥용접(one path - bottom) 용접이 가장 크게 발생하였다. L1과 L3에서는 중앙(one path - center) 용접의 변형이 작아 보이나 세로방향 외곽부를 제외한 나머지 부분에서는 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

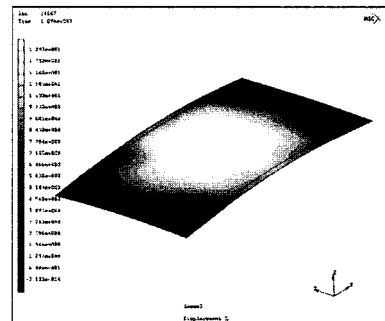
두 용접선 용접은 용접을 두 번 하기 때문에 변형이 크게 발생할 것으로 예측할 수도 있었으나 오히려 가장 작게 발생하였다. 이를 확인하기 위해 두 용접선 용접에 대해 용접중 변형과정을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 (a)는 첫 번째 용접선인 상판 가장자리 용접을 위해 레이저 빔이 이동함에 따른 변형양상을 나타낸 것이고, (b)는 두 번째 용접선인 하판 가장자리 용접을 위해 레이저 빔이 이동함에 따른 변형양상을 나타낸 것이다. 굽힘변형의 양상은 판재의 형상으로 나타내었으며, 짙은 색은 높은 온도값을 나타내므로 빔의 위치를 추정할 수 있다. Fig. 8에 나타낸 것과 같이 첫 번째 용접



(a) two path welding



(b) one path bottom



(c) one path center

Fig. 5 Analysis result of weld deformation

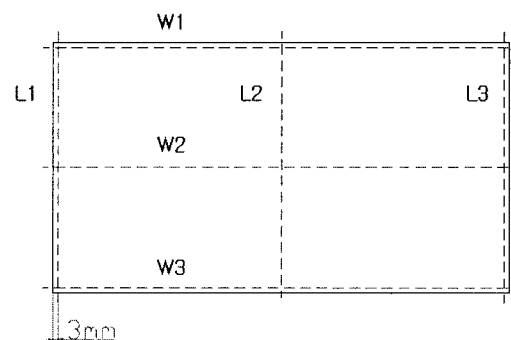


Fig. 6 Measuring locations

선에서 상판을 용접할 때 오목한 방향으로 변형이 크게 발생하였고 두 번째 용접선에서 하판을 용접할 때 전체적인 변형이 감소하는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 용접선에서는 수축력이 중립축 보다 위쪽에서 작용하므로

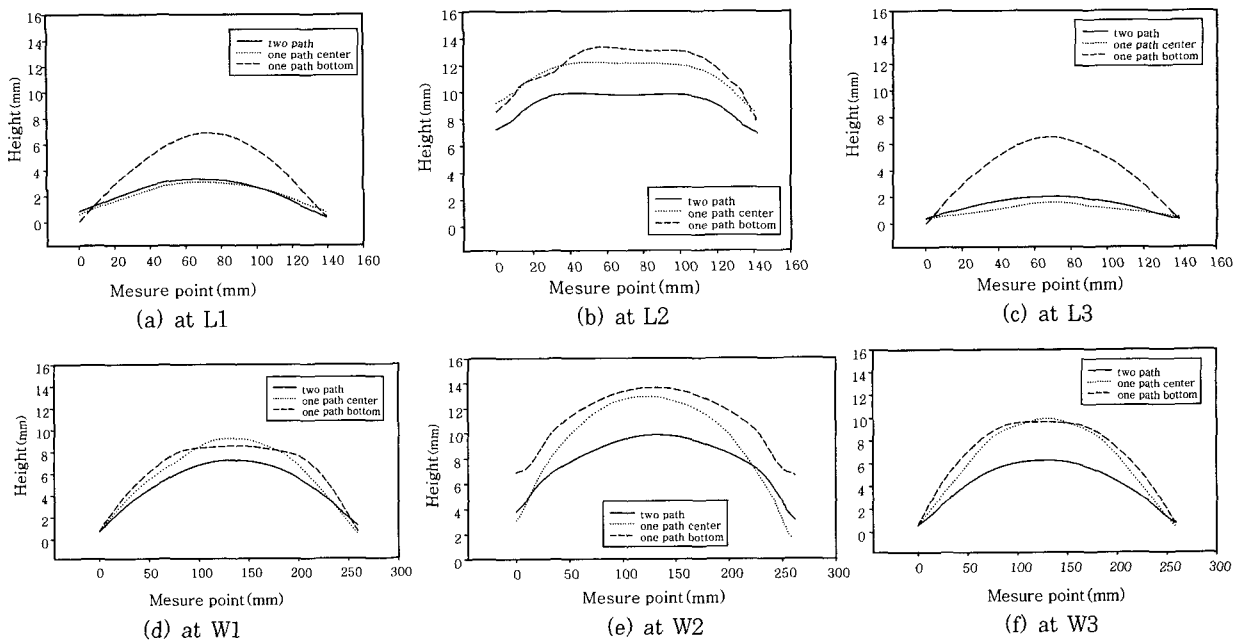


Fig. 7 Distortion according to the structure design

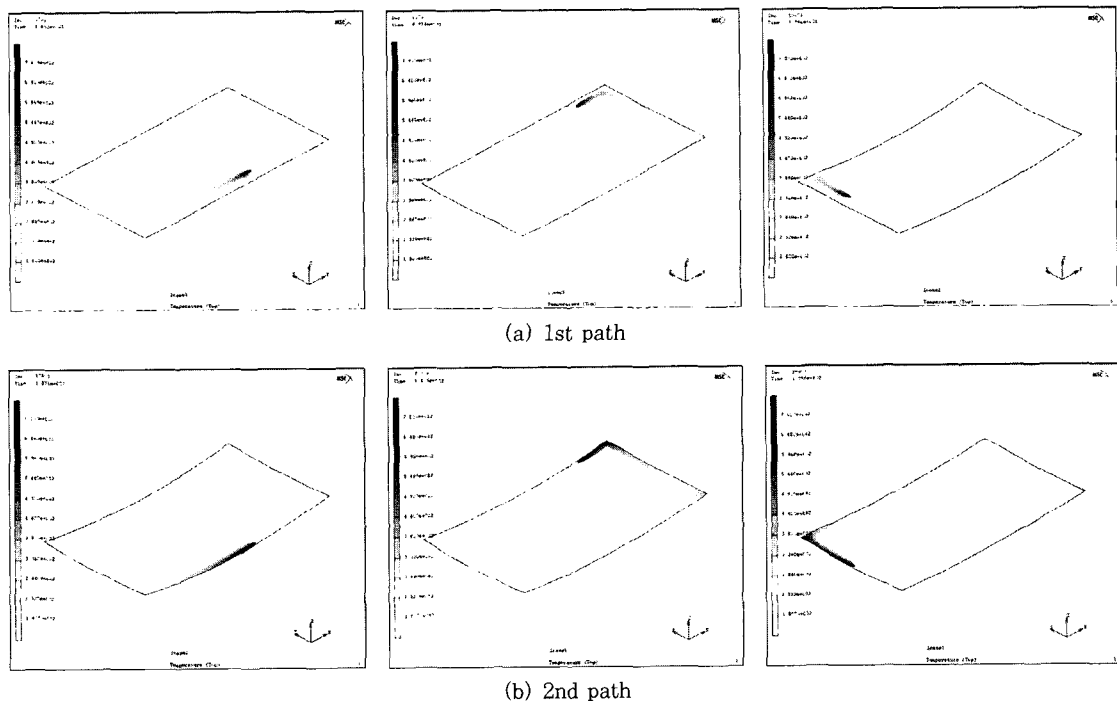


Fig. 8 Welding distortion according to progress

오목하게 하는 방향으로 굽힘 모멘트가 발생하여 (a)와 같은 변형이 발생하고 두 번째 용접선에서는 수축력이 중립축 보다 아래쪽에서 작용하므로 반대 방향으로 굽힘 모멘트가 발생하여 변형이 상쇄되는 것이다.

또한 바닥 용접이 중앙 용접보다 변형이 크게 발생하는 것은 용접부가 중립축보다 낮아짐으로 인해 굽힘 모

멘트가 커졌기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 용접을 진행함에 따른 구조물 길이방향에 대한 중방향 응력분포를 나타내고 있다. 밝은 부분은 인장응력을 나타내고 짙은 부분은 압축응력을 나타낸다. 용접부에서는 수축에 의해 인장응력이 발생되고 그 주변은 평형을 이루기 위해 압축응력이 발생된다. 첫

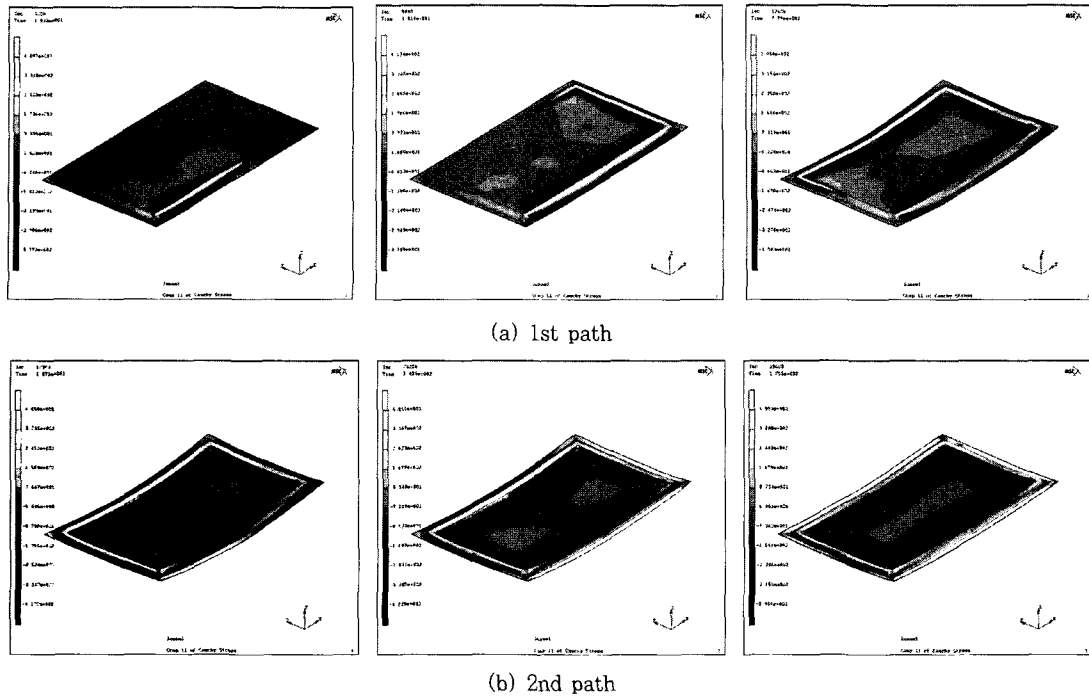


Fig. 9 Distribution of stress

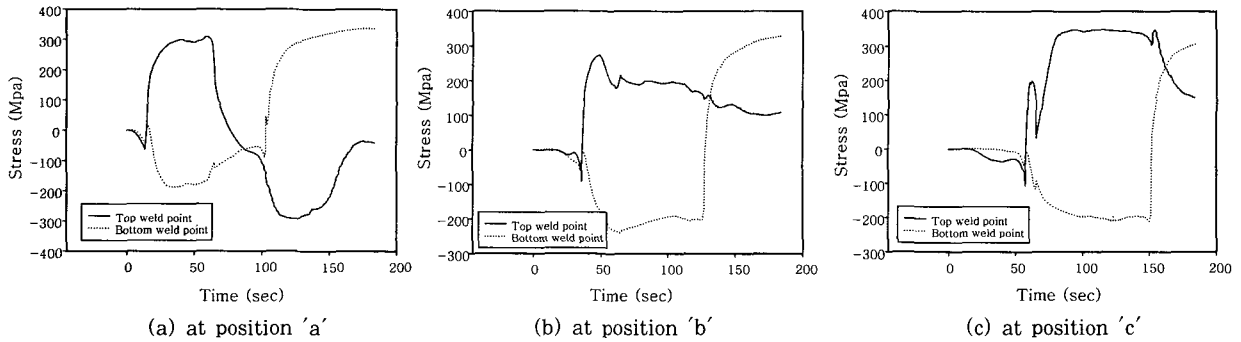


Fig. 10 History of stress at points indicated in Fig. 2

번째 용접선에서는 이러한 현상을 잘 보여주고 있다. 그러나 두 번째 용접선에서는 첫 번째 용접선에서 발생한 인장응력과 압축응력을 상쇄시키면서 응력의 재분포가 일어난다.

이러한 현상은 임의 점에서의 시간에 따른 응력값을 보면 극명하게 드러나는데 Fig. 10은 상판과 하판의 용접부, 즉 Fig. 2의 우상 측 그림에 나타난 a, b, c 점에서의 응력 이력(history)을 보여준다. 상판이 먼저 용접되므로 첫 번째 용접선에서는 상판에서 인장응력이 발생되고 하판에서 압축응력이 발생되었다가 두 번째 용접선에 의해 하판에 인장응력이 생기고 상판에서는 압축이 발생하여 첫 번째 용접선에서 발생되었던 인장 응력을 어느 정도 상쇄시킨다. a 점에서는 분리판이 크게 변형하면서 상판의 용접부에 일찍 생성되었던 인장

응력이 이완되기 때문에 상판 용접부의 응력이 제거되었다가 다시 두 번째 용접에 의해 압축응력이 생성되는 것을 볼 수 있다. b와 c 점에서도 두 번째 용접에 상판부의 인장응력이 완화되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 구조물의 단면 형상과 용접선의 위치가 용접변형에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 단면구조 및 용접선 위치 선정을 고려한 설계에 대해 용접변형을 비교함으로써 용접변형이 작은 용접구조설계가 가능한 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

용접변형을 최소화할 수 있는 성형 구조물의 설계를 위하여 수치적 방법을 이용한 변형해석을 수행하였다.

두 용접선 용접, 단일 용접선 바닥용접, 단일 용접선 중앙용접을 포함하는 분리판 구조를 설계하여 해석을 수행함으로써 변형양상 및 응력분포를 확인할 수 있었다. 해석결과 두 용접선 용접의 경우가 변형이 가장 작게 발생하였고, 바닥용접이 가장 크게 발생하였다. 두 용접선 구조가 변형이 작은 것은 상판을 용접할 때는 오목하게 휘고 하판을 용접할 때는 볼록하게 휘는 작용 때문에 변형이 상쇄되기 때문이다. 또한 용접이 중립축에 가까울 경우 변형이 작게 나타나는 것을 확인하였다. 즉 구조물의 단면모멘트와 용접선의 위치 선정에 따라 용접변형의 양상과 변형량이 달라지는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 해석을 통하여 용접변형을 최소화할 수 있는 설계대안의 선택이 가능한 것을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 에너지-자원기술개발사업에서 용융탄산염연료전지(MCFC) 개발 과제의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. L.E. Lindgren : Finite Element Modeling and Simulation of Welding Part 1: Increased Complexity, *Journal of Thermal Stresses*, **24**(2001), 141-192
2. P. Mollicone, T. Comlekci, T.G.F. Gray, D. Camilleri: Simple Thermo-elastic-plastic Models for Welding Distortion Simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006.
3. C. Conrardy and R. Dull : Control of Distortion in Thin Ship Panels, *Journal of Ship Production*, **13**(1997), 83-92
4. D. Camilleri, T. Comlekci, and T.G.F. Gray: Thermal Distortion of Stiffened Plate Due to Fillet Welds Computational and Experimental Investigation, *Journal of Thermal Stresses*, **29**(2006), 111-137
5. P. Michaleris and A. DeBicari : A Predictive Technique for Buckling Analysis of Thin Section Panels Due to Welding, *Journal of Ship Production*, **12-4**(1996), 269-275
6. P. Michaleris and A. DeBicari : Prediction of Welding Distortion, *Welding Research Supplement*, **76-4** (1997), 172-181
7. C.-G Kim, J.-W Kim and K.-C Kim : A Study on the Distortion of a Thin Plate Panel by Laser Welding, *Journal of KWS*, **25-1**(2007), 49-56