

## 레이저용접에 의한 박판구조물의 용접변형 해석에 관한 연구

김충기\* · 김재웅\*\* · 김기철\*\*\*

\*영남대학교 대학원

\*\*영남대학교 기계공학부

\*\*\*포항산업과학연구원

## A Study on the Distortion of a Thin Plate Panel by Laser Welding

Choong-Gi Kim\*, Jae-Woong Km\*\* and Ki-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, Korea

## Abstract

Prediction and control of the thermal distortion is particularly important for the design and manufacture of welded thin plate panel. In this study, experiments and computations are performed to analyze effect of a hole configuration and a specimen size 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 buckling deformation generated in plates welded around hole.

From the experiments, the severe distortion appeared in the weldments by the laser welding process, in which the specimen size plays an important role on the distortion but the hole configuration showed little effect. And the results of numerical analysis were corresponded well with the experiment ones. Thus, a thermal elasto-plastic analysis model for predicting the weld distortion of thin plate panel was successfully developed through this study.

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

(Received October 30, 2006)

Key Words : Laser welding, Thin plate panel, Thermal distortion, Buckling 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 거리 에너지 전달이 가능한 장점도 있다. 그러나 고밀도 에너지 용접은 용접부의 냉각속도와 온도 구배가 매우 커서 취성조직과 구배가 큰 잔류응력

을 형성할 수도 있다.

구조물의 용접 시 온도의 불균일로 인해 용접변형이 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 과정을 겪게 되므로 이론 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 따라 점차적으로 3차원 해석이 시도되고 있다<sup>2-6)</sup>.

면의 변형은 횡수축에 의한 각변형과 종수축에 의한 좌굴변형으로 나눌 수 있는데 각변형은 구조물의 두께 방향으로 온도 분포의 불균일로 인해 발생한다. 구조물이 박판이 될수록 두께방향으로의 온도 차이는 줄어들게 되고 좌굴에 대한 저항성이 떨어지므로 박판 구조물의 용접시 좌굴 변형에 비해 각변형은 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.

지금까지 용접 변형에 대한 연구는 주로 직선 용접의 경우에 대해서 이루어져 왔다. 그러나 레이저 용접은 다양하고 복잡한 구조물에도 사용되고 있다. 예를 들면, 연료전지의 제작시 매니폴더 구멍주위를 용접해야 한다. Fig. 1은 발전용 연료전지의 분리판을 나타낸 것으로 3장의 스테인리스 박판으로 구성되는 용접 구조물이다. 3장의 박판을 레이저 용접으로 접합하는데 이때 좌굴변형이 심각하게 발생된다. 단위전지를 많이 적층할수록 연료전지의 출력이 좋아지는데 분리판의 레이저 용접시 발생하는 변형으로 인해 적층과정에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

본 연구에서는 시편 크기의 변화와 매니폴더 구멍의 형상이 용접변형에 미치는 영향을 해석하기 위한 기초 연구로써 단순화된 시편을 설계 제작하였으며, 레이저용접을 시행한 후 변형량을 측정하여 실험적인 해석을 수행하였다. 또한 각종 용접공정 인자들의 영향을 해석하기 위해 3차원 유한요소 모델을 구축하였다. 이렇게 구축한 수치해석 모델은 향후 용접공정 변수의 최적조건 선정, 용접시그설계 및 분리판 설계의 자료제공을 위한 기초수단으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다

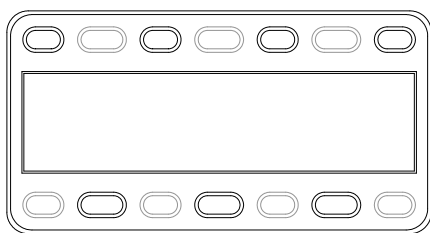


Fig. 1 A separator of fuel cell for electric power

## 2. 용접 실험

### 2.1 용접 모델

본 연구의 최종 대상물인 연료전지의 분리판은 Fig. 1과 같이 14개의 매니폴더 구멍을 가지고 있다. 이 매니폴더 구멍은 연료가스의 입출구 역할을 하는 것으로 가장자리를 밀폐 용접하는 것이 요구된다. 즉, 3장으로 구성된 박판의 외곽용접과 아울러 2장씩 겹쳐지는 각각의 매니폴더 구멍 주위를 순차적으로 용접하여 분리판을 제작하게 된다. 여기서 선진 개발된 분리판의 경우 매니폴더의 구멍형상이 타원형과 사다리꼴형인 경우가 조사되었다. 여러 개의 매니폴더 구멍을 순차적으로 용접하므로 우선 하나의 매니폴더 구멍에 대한 변형 메커니즘을 해석하는 것이 필요하다.

용접변형의 형태와 변형량을 분석하고 용접변형에 미치는 제인자들의 영향을 해석하기 위한 수치해석 방법의 개발을 위해, 실험 모델로 Fig. 2와 같은 시편형상을 선정하였다. 분리판을 개발하는 현단계에서 매니폴더 구멍형상이 용접변형에 미치는 영향을 예측코자 하며, 매니폴더 구멍 형상에 따른 용접변형을 분석함에 있어서 자체 구속조건인 용접시편의 크기를 고려하였다. 두 가지 구멍형상 설계에 있어서 연료가스 유량유속을 고려하여 동일한 면적을 적용하였다. 시편 a, 시편 c, 시편 e는 서로 같은 크기의 타원형 매니폴더 구멍을 가진 시편이고 시편 b, 시편 d, 시편 f는 서로 같은 크기의 사다리꼴 매니폴더 구멍을 가진 시편으로 이들의 비교를 통해 매니폴더 구멍형상이 용접 변형에 어떠한 영향을 주는지 알아보코자 하였다. 또한 시편 a, 시편 c, 시편 e를 비교하여 시편의 크기에 따른 변형양상을 실험을 통해 비교하여 시편의 크기가 용접변형에 미치는 영향을 확인하였다.

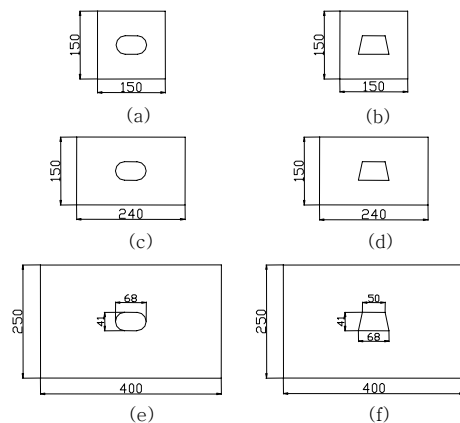


Fig. 2 Specimen model for welding experiment

### 2.2 실험 방법

STS 316 재질의 용접시편의 두께는 0.4 mm이고, 2매 겹치기 시편에 대해 400W의 Nd:YAG 레이저를 열원으로 용접을 실시하였으며, 용접시편을 고정시키기 위해 구멍 주변을 구속할 수 있도록 타원형 및 사다리꼴의 클램프를 포함하는 지그를 설계 제작하여 사용하였다. 용접 후 충분히 냉각된 후에 지그를 탈착하여 용접시편을 탈취하였다.

Fig. 3에서는 용접되는 부위를 도식으로 나타내었으며, Fig. 4는 용접 후 변형된 시편의 사진이다. 시편 전체가 비틀린 모양의 좌굴형 변형이 발생하였고, 모든 시편이 비슷한 변형형태를 나타내었다.

3차원 측정기를 이용하여 구멍 형상에 상관없이 각 시편에 대해 Fig. 5와 같은 직선부에서 일정한 간격으로 높이방향 좌표값을 측정하였다. 시편 외곽부 근처에서 세로 방향(length)의 두 변과 가로 방향(width)의 두 변을 측정하였다.

### 2.3 실험 결과 및 검토

용접한 시편에 대해 3차원 측정기로 측정된 결과를 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6(a)는 시편 a와 시편 b의 변형모습인데 매니폴더 구멍주위를 레이저 용접했을 때의 전형적인 변형양상을 잘 보여준다. 좌굴의 모드에 있어서 중간위치를 기준으로 좌우 대칭인 경우를 제 1모드, 중간점을 기준으로 180° 회전대칭인 경우를 제 2모드의 좌굴이라 분류할 수 있다. Fig. 6(a)에 나타

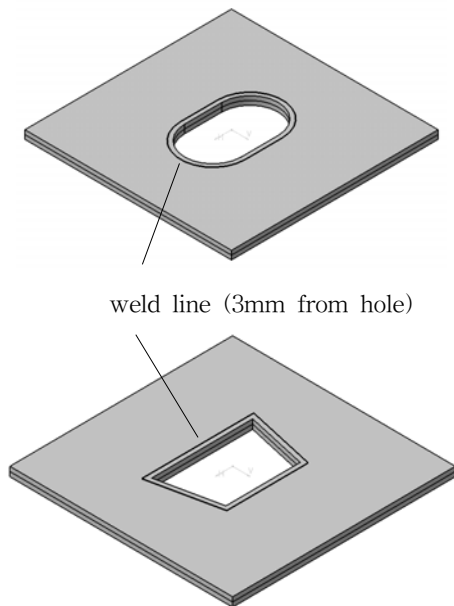


Fig. 3 Weld line of specimen

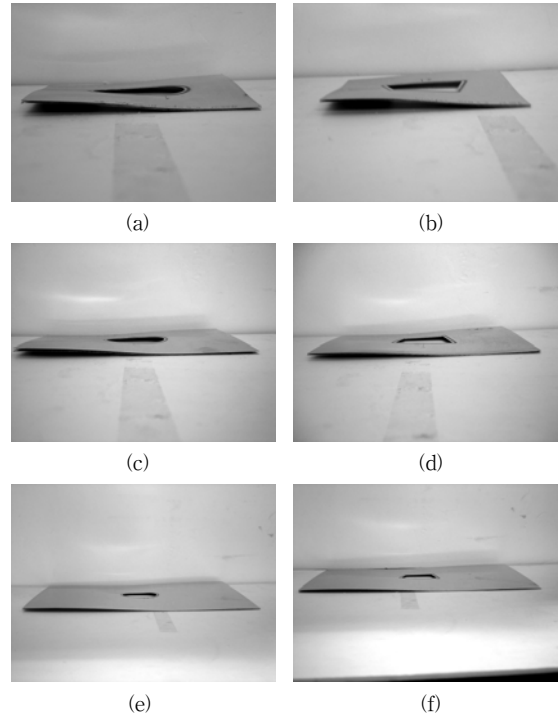


Fig. 4 Deformed specimen after welding

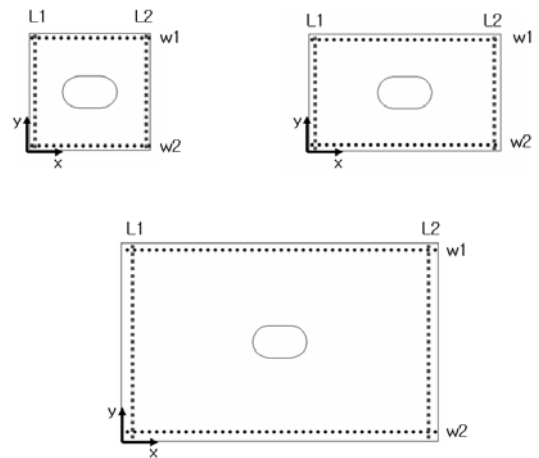


Fig. 5 Measuring location

낸 측정결과를 보면 변의 중간점을 기준으로 180° 회전대칭인 제 2모드의 좌굴이 네 변에서 각각 발생되었고, 또한 2차원적인 힘을 받기 때문에 서로의 간섭이 작용하여 비틀린 형태의 변형이 발생되었다.

Fig. 6에서는 매니폴더 구멍 형상에 따른 변형을 각 시편의 크기별로 비교하였다. 타원형 구멍의 시편과 사다리꼴 구멍 시편의 변형이 형태와 크기면에 있어서 모두 비슷한 결과를 보였으나, 세밀하게 살펴보면 사다리꼴 구멍 시편에서의 최대 변형량이 약간 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 시편a와 시편c, 그리고 시편e를 비교한 그

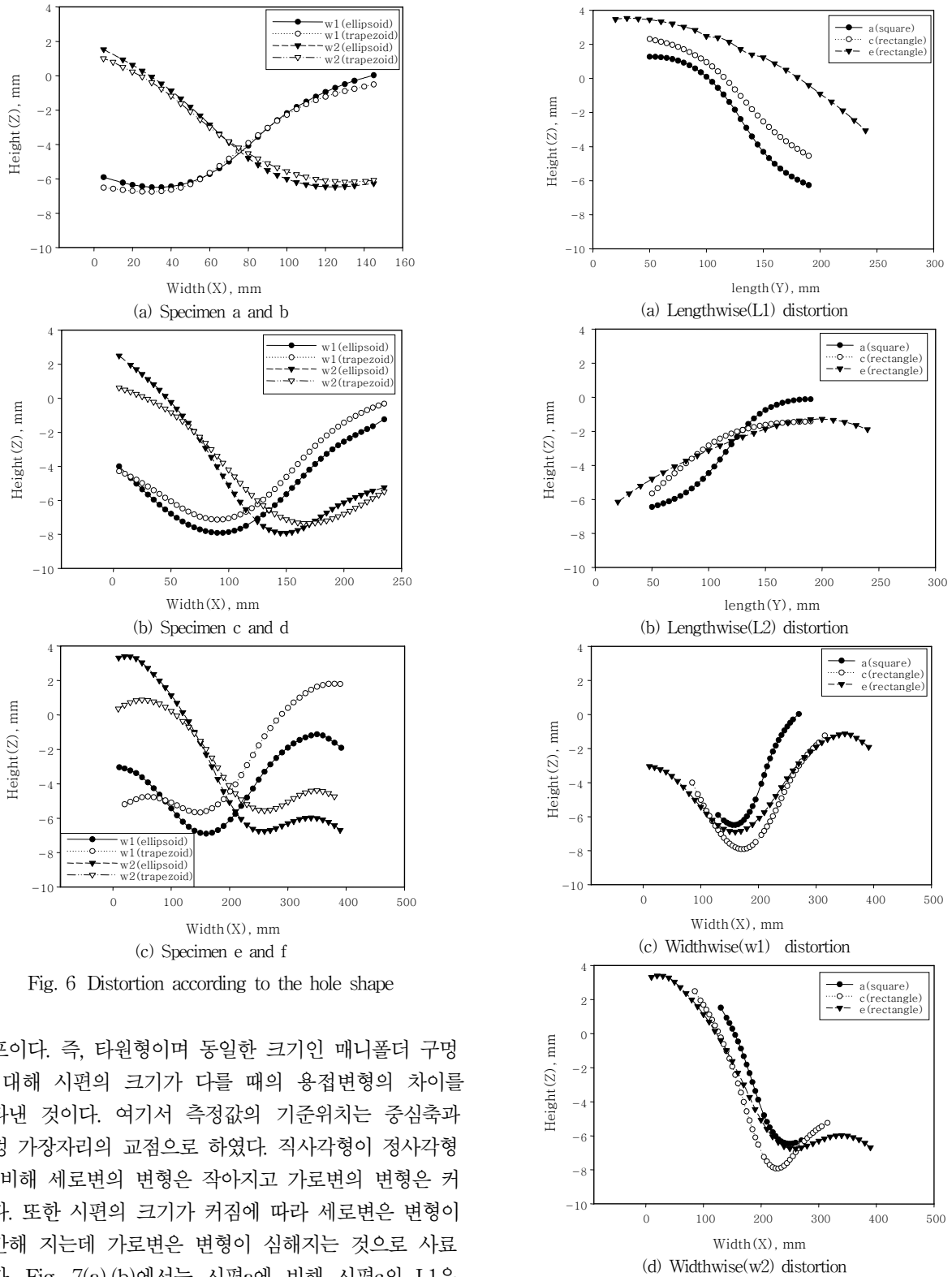


Fig. 6 Distortion according to the hole shape

래프이다. 즉, 타원형이며 동일한 크기인 매니폴더 구멍에 대해 시편의 크기가 다를 때의 용접변형의 차이를 나타낸 것이다. 여기서 측정값의 기준위치는 중심축과 구멍 가장자리의 교점으로 하였다. 직사각형이 정사각형에 비해 세로변의 변형은 작아지고 가로변의 변형은 커진다. 또한 시편의 크기가 커짐에 따라 세로변은 변형이 완만해 지는데 가로변은 변형이 심해지는 것으로 사료된다. Fig. 7(a),(b)에서는 시편a에 비해 시편c의 L1은 완만하고, L2는 제 1모드의 좌굴형상을 나타내므로 정사각형 시편에 비해 직사각형 시편의 세로변의 변형이 작아진 것을 보여주고 있다. 또한 시편c에 비해 시편e의 세로변의 변형이 완만해진 것을 볼 수 있다. Fig. 7(c),(d)에서는 시편의 크기가 커질 때 세장비가 커짐

Fig. 7 Distortion according to the specimen size

로 인한 좌굴 모드의 진전이 발생하지 않고 변형량이 포화된 것을 볼 수 있다. 이는 자체구속의 효과로 인해 변형이 더 이상 일어나지 않은 결과라고 사료된다.

### 3. 열탄소성 시뮬레이션

Fig. 8은 시편a의 유한요소 모델이다. 열원이 곡선을 따라 이동을 하므로 용접 방향으로 준평형상태를 가정한다 하더라도 열하중이 2자유도를 가진다. 따라서 2차원 해석을 적용할 수 없으며, 입체적(3차원) 변형량을 예측하기 위해서는 3차원 해석 모델이 필요하다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 3차원 쉘 요소를 사용하여 해석 모델을 구성하였으며, 박판 용접이고 완전용입 조건을 적용하기 때문에 두께 방향으로의 온도변화가 거의 없으므로 각변형은 무시하고 좌굴변형만을 고려하고자 한다.

#### 3.1 열탄소성 해석 모델

상용 유한요소 프로그램을 사용하여 3차원 비선형 열탄소성 해석을 수행하였다. staggered method를 적용한 연성해석을 하였다. Fig. 8은 해석모델a의 요소분할로 2394개의 절점과 2316개의 thin shell 4각형 요소로 구성되었다.

용접과정에서 발생하는 열원은 Goldak<sup>7)</sup>의 이중 타구형 모델이 이동열원으로 사용되었다. 여기서 레이저빔의 유효직경 0.8mm에 상응하는 열원 모델을 적용하였다. 복사과 대류 경계조건은 모든 자유표면에 부가하였고 방사율은 0.2로 하였다<sup>6)</sup>. 온도에 의존적인 재료 물성치로 Fig. 9(a)는 열전도도와 비열을 나타내고<sup>8)</sup>, Fig. 9(b)는 열팽창 계수와 탄성계수<sup>8)</sup>, 그리고 항복응력을 나타내고 있다<sup>6)</sup>. 잠열은  $247\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ , 밀도는  $7860\text{kg/m}^3$ 으로 하였으며<sup>6)</sup>, 변형해석 시 구멍주위를 따라 기계적 구속을 가하였다.

#### 3.2 온도분포 해석 결과

이동 열원에 의한 온도분포 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 각각의 그림은 용접시작 후 1초, 20초 시점에서의 시편의 온도분포를 나타낸다. 용접이 진행됨에 따라서 누적된 용접 입열 에너지가 시편을 통해 확

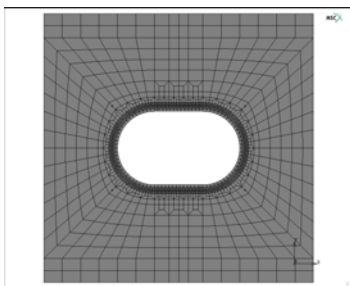
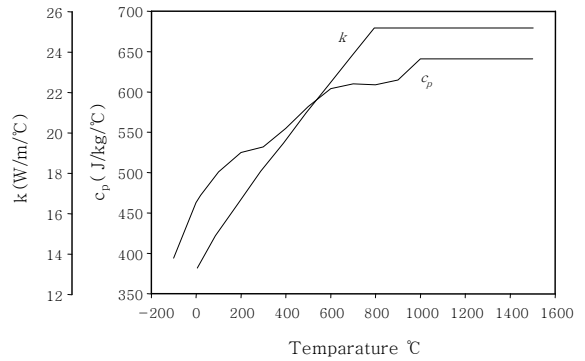
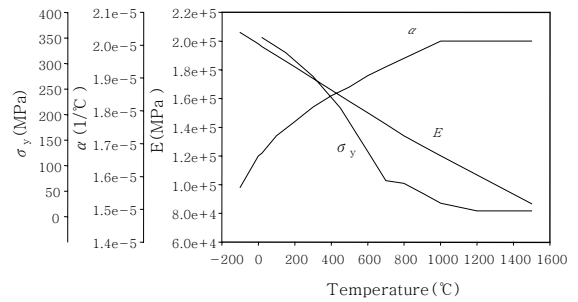


Fig. 8 Finite element model



(a) Thermal conductivity and, specific heat



(b) Young's modulus, thermal expansion and yield strength

Fig. 9 Temperature dependent material properties

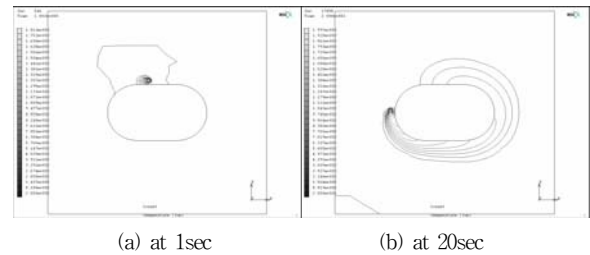


Fig. 10 Temperature distribution contour line

산되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 레이저 빔이 조사된 위치(CL)와 그로부터 2 mm, 5 mm, 14 mm 떨어진 위치에서의 시간에 따른 온도 이력을 나타낸다. 레이저 빔이 조사된 위치에서는 약 2000°C까지 급격하게 상승하였다가 냉각되는 것을 볼 수 있다. 그러나 약 14 mm 떨어진 위치에서는 온도의 상승이 거의 없는 것을 볼 수 있다.

#### 3.3 용접변형 해석 결과 및 검토

Fig. 12는 시편a와 시편b에 대한 3차원 열탄소성 해석의 결과를 나타낸 것으로 좌굴형 변형에 의해 비틀린 형상을 잘 보여준다. 앞서 설명한 바와 같이 좌굴의 형태는 그 변형의 양상에 따라 각종 모드로 분류할 수 있으며, 수치해석 결과는 실험결과와 같은 제 2모드의 좌

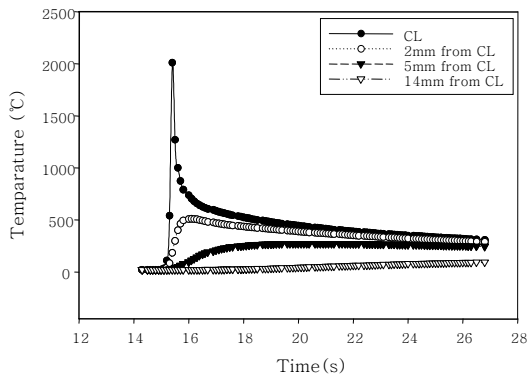
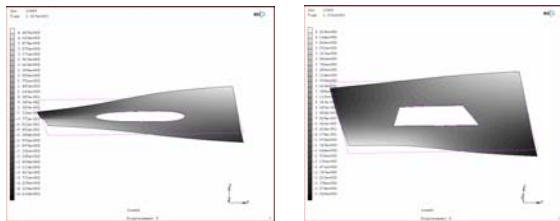


Fig. 11 Temperature history on the vicinity of welds



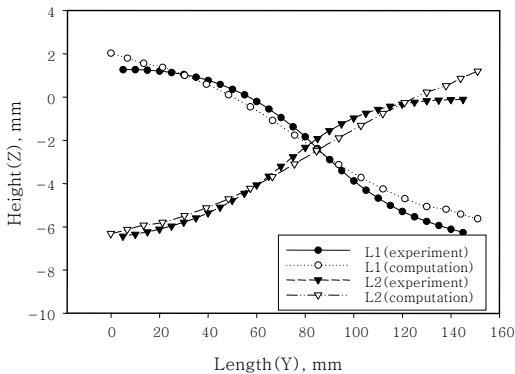
(a) Specimen with ellipsoid hole (b) Specimen with trapezoid hole

Fig. 12 Distorted shape of specimen

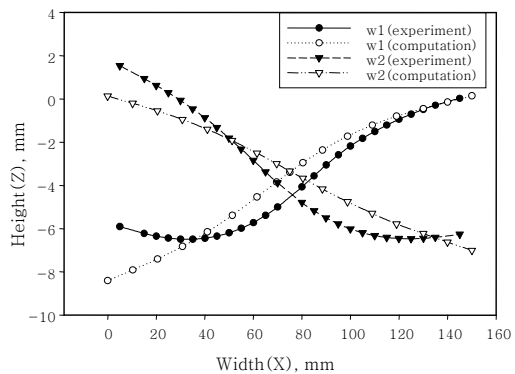
굴형태 변형을 나타내었다.

Fig. 13은 시편a와 시편b의 용접변형에 대한 실험에 의한 측정값과 수치해석에 의한 계산값을 비교한 것이다. 두 가지의 변형분포 및 크기가 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 다른 크기의 시편들도 잘 일치하였다. 따라서 본 수치해석 모델은 실제의 현상을 잘 묘사할 수 있음을 보여주고 있다.

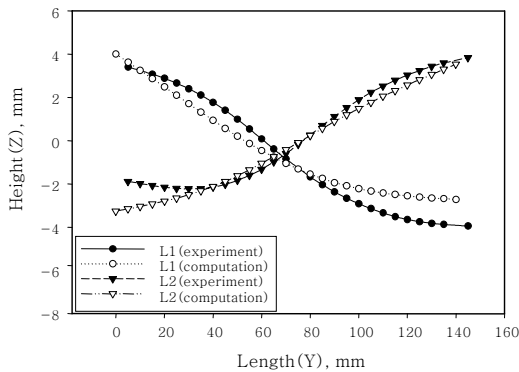
유한요소 해석결과를 통해 시편 크기에 따른 변형양상도 분석하였다. 실험에서와 마찬가지로 Fig. 14(a)에서는 폭 방향의 길이가 길어질수록, 다시 말해 용접부에서 멀어 질수록 세로변의 변형은 줄어든다. 폭 방향에서 봤을 경우 변형량은 차이가 없으나 시편 중심에서 약 100mm 이상 떨어지게 되면 용접에 의한 변형에 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 용접 구조물 자체의 구속이 작용하는 것으로 사료된다. 분리판의 경우 구멍과 구멍이 인접해 있으므로 하나의 구멍에서의 용접 변형이 다른 구멍 주위의 변형에 영향을 끼칠 수 있는데 구멍의 용접 순서나 냉각 시간 이외에도 치수 형상이 변형에 영향을 미치는 것을 예측할 수 있다.



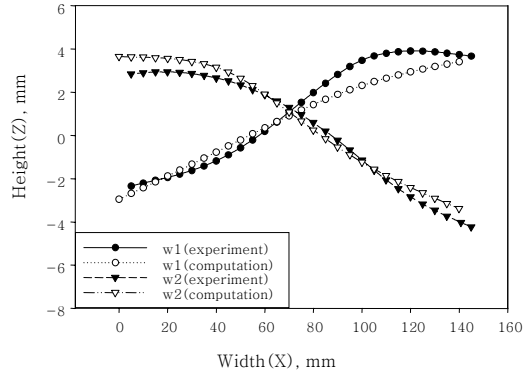
(a) Distortion of specimen a (lengthwise)



(b) Distortion of specimen a (widthwise)



(c) Distortion of specimen b (lengthwise)



(d) Distortion of specimen b (widthwise)

Fig. 13 Comparison between experiment and computation

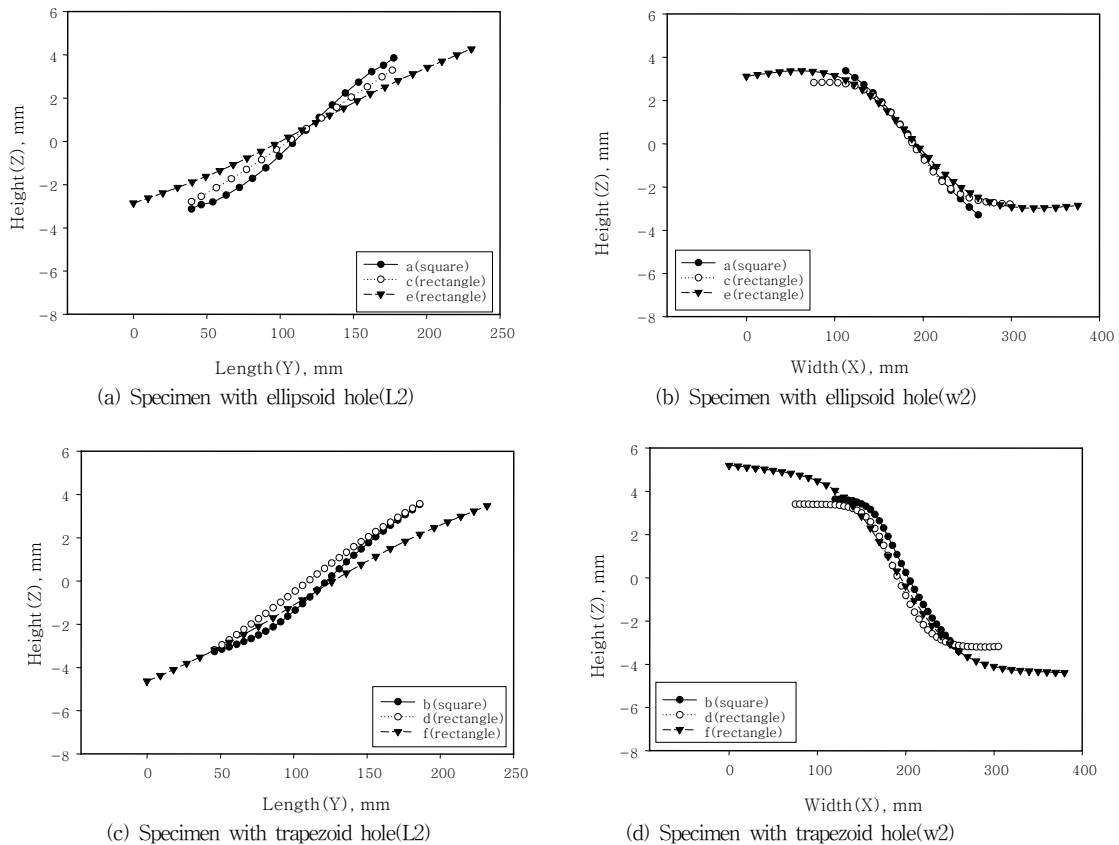


Fig. 14 Computational distortion according to the specimen size

#### 4. 결 론

구멍이 있는 박판에서 구멍 주위를 레이저용접할 경우에 대해 용접 변형실험과 3차원 유한요소 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 내부에 있는 구멍형상이 용접변형에 미치는 영향을 확인하기 위해 타원형 구멍과 사다리꼴 구멍에 대해 레이저 용접을 시행한 결과 사다리꼴 구멍 시편이 타원형 구멍 시편보다 변형이 약간 작게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 그 차이가 전체 변형량에 비해 매우 작으므로 매니폴더 구멍형상의 변형이 용접변형에 거의 영향을 끼치지 않는다고 볼 수 있다.

2) 동일한 구멍크기에 대해 크기가 다른 시편을 비교하였다. 세로변은 용접부에서 거리가 멀어지는 효과를 나타내는 것으로 좌굴모드의 변화가 발생하는 치수를 찾을 수 있었고, 가로변의 변형에서는 열하중의 영향에서 벗어남으로 인해 변형이 더 이상 일어나지 않고 자체 구속효과로 나타남을 알 수 있다.

3) 매니폴더 구멍형상에 따른 용접시편에 대한 3차원 수치해석모델을 사용하여 실험치와 비교를 한 결과

그 경향이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 용접공정 및 설계인자들에 대한 변형해석을 수행할 수 있는 수치해석 모델을 구축할 수 있었다.

#### 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. J. Goldak, A. Chakravarti, and M.Bibby : A New  
Finite Element Model for Welding Heat Sources,  
Metallurgy Transactions B, 18B (1984), 299-305.
  8. Stahl-Eisen-Werkstofflaetter(SEW) des Vereins Deutscher  
Eisenhuettenleute Verlag Stahleisen mbh, Duesseldorf,  
1992