

## 박판재 변형의 가열교정에서 가열면적의 영향

박준형\* · 김재웅\*\* · 김기철\*\*\* · 전중환\*\*\*

\*영남대학교 대학원 기계공학과

\*\*영남대학교 공과대학 기계공학부

\*\*\*포항산업과학연구원

### Effects of Heating Conditions in the Straightening of Sheet Metal Distortion

Jun-Hyoung Park\*, Jae-Woong Kim\*\*, Ki-Chul Kim\*\*\* and Joong-Hwan Jun\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea

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

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

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

(Received May 19, 2008 ; Revised June 10, 2008 ; Accepted June 23 2008)

#### Abstract

Use of sheet metal structure is increased in various fields such as automobile, aerospace and communication equipment industry. When this structure is welded, welding distortion is generated due to the non-uniformity of temperature distribution. Recently welding distortion becomes a matter of great importance in the structure manufacture industry because it deteriorates the product's quality by bringing about shape error. Accordingly many studies for solving the problems by controlling the welding distortion are being performed.

However, it is difficult to remove all kinds of distortion by welding process, though various kinds of methods for reducing distortion are applied to production. Consequently, straightening process is operated if the high precision quality is requested after welding. The local heating method induces compression plastic deformation by thermal expansion in the heating stage and then leaves constriction of length direction in the cooling stage. Accordingly, in the case of sheet metal structure, straightening effect is expected by heating for the part of distortion.

This study includes numerical analysis of straightening effect by the local heating method in distortion comes from production of welded sheet metal structure. Particularly straightening effect followed by dimensions of heating area is analyzed according to the numerical analysis. The numerical analysis is performed by constructing 3-dimensional finite element model for 0.4mm stainless steel-sheet metal. Results of this study confirm that straightening effect changes as heating area increases and the optimum value of heating area that proves the maximum straightening effect exists

Key Words : Thermal straightening, Weld distortion, Numerical analysis, Finite element method(FEM), Sheet metal

#### 1. 서 론

박판 구조물은 자동차, 항공우주, 전자통신 장비산업

등 많은 분야에서 사용이 증가되고 있다. 이러한 박판 구조물을 제작하는데 있어서 근래 레이저 용접이 종종 적용되고 있다. 레이저 용접은 입열량이 적으므로 변형이 적게 발생하며, 열영향부가 좁고, 또한 고속 용접이

가능하며 먼 거리 에너지 전달이 가능한 장점도 있다. 이러한 장점으로 인해 레이저 용접은 고비용 공정이지만 고품질 용접이 요구되는 경우에 적용이 확대되고 있다.

그러나 구조물의 용접 시 온도분포의 불균일로 인해 용접변형이 발생되는데 이는 구조물의 외관을 해치고 좌굴강도를 저하시키며 형상오차를 유발하여 제품의 품질을 저하시키므로 최근 구조물 제조분야에서 중요한 문제로 대두되고 있다<sup>1,2)</sup>. 따라서 용접변형을 제어함으로써 최소화하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 이러한 노력을 통해 용접변형을 감소시킬 수 있으나 추가적으로 높은 정밀도가 요구되는 제품의 경우에는 용접 후 교정(straightening)을 시행함으로써 요구품질 을 맞추게 된다.

Fig. 1은 발전용 연료전지에 사용되는 분리판의 제작에서 용접조립 후 생성된 변형을 보여주고 있다. 이 좌굴형(파형) 변형은 용접부의 수축에 따라 용접부 사이 및 가장자리에서 생성되는 변형이다. 분리판은 단위전지 간에 설치되는 것으로 이를 많이 적층할수록 연료전지의 출력이 향상 된다. 그러나 용접 후 변형은 단위전지의 적층을 어렵게 하므로 이에 대한 대책이 요망된다.<sup>3)</sup> 이와 같이 용접변형을 줄이기 위해서 용접조립을 할 때 변형에 대한 강성을 최대로 할 수 있는 형상으로 설계하는 방법, 용접순서 제어법, 입열량을 최소화하는 방법, 그리고 역변형을 인가하여 용접하는 방법 등을 들 수 있다. 하지만 이러한 방법들을 적용하여도 용접에 의한 모든 변형을 제거할 수는 없다. 따라서 용접 후 정밀도를 높이는 것이 요구되는 경우 교정(straightening)작업을 실시하게 된다. 교정방법에는 크게 기계적 교정방법과 가열교정방법으로 나눌 수 있다. 기계적 교정법에는 프레스 가압법, 롤 교정(roll straightening) 방법을 들 수 있으며, 가열교정법에는 전체(로내) 가열법과 국부가열법을 들 수 있다. 여기서 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 박판재 구조물의 경우는 국부가열법을 적용함으로써 변형을 교정할 수 있다.

국부가열교정은 가열단계에서는 열팽창에 의해 압축

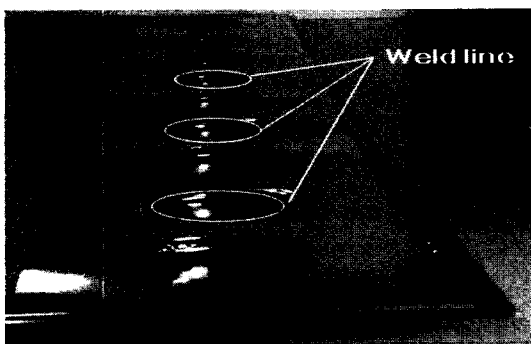


Fig. 1 Weld distortion in a separator of fuel cell

소성변형을 유도하고 냉각단계에서는 길이 방향의 탄성 수축이 일어나도록 하는 것이다<sup>4,5)</sup>. 따라서 박판재 구조물의 경우 변형이 유발된 부분에 가열을 하여 교정효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 박판에서의 파상변형 영역에 국부 가열함에 따른 교정효과를 해석하고자 한다. 특히 가열면적의 크기에 따른 교정효과를 수치해석을 통해 분석한다. 0.4 mm 두께의 스테인리스강 박판재를 대상으로 하며, 3차원 유한요소 모델을 구축하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 교정효과를 극대화할 수 있는 조건을 제시하고자 한다.

## 2. 수치해석 모델링

Fig. 1에 나타낸 분리판의 경우 매니폴더 구멍은 연료가스의 출입구로서 밀폐성을 가지도록 번갈아 용접하는데, 용접한 구멍 간 거리를 한 주기로 하는 파상(wave)의 탄성변형을 보이고 있다. 이 파상 변형영역에 국부 가열함으로써 교정효과를 기대할 수 있다.

가열교정에서 조건에 따라 교정 효과에는 차이가 있다. 가열조건에는 가열속도(또는 입열파워밀도), 최고 도달온도 및 가열면적을 들 수 있다. 그러나 여기서는 가열면적이 교정효과에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 따라서 가열속도(입열파워밀도)는 고주파 유도가열법을 통해 얻을 수 있는 값인 400 W/cm<sup>2</sup>로, 최고온도는 535 °C<sup>6)</sup>, 최고온도에 도달하기까지의 가열시간은 3.65 초로 교정하고 해석하였다. 먼저 기초자료를 확보하기 위해 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 3가지 가열면적에 대한 교정효과를 해석하고자 한다. 전체면적을 모두 가열

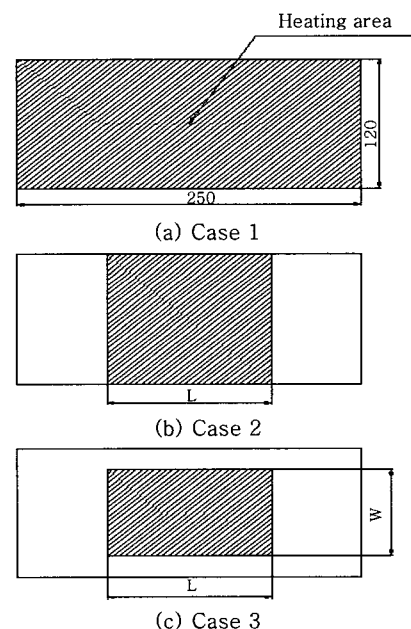


Fig. 2 Heating area conditions

하는 경우(case 1), 중간부분에 전체 폭에 대해 가열하는 경우(case 2), 그리고 일부 영역을 가열하는 경우(case 3)를 모델로 하였고, 재료는 0.4 mm 두께의 스테인리스 강판 (STS 310)을 적용하였다. 가열면적은 가열길이(L)와 가열폭(W)으로 나타내었다.

수치해석 모델에서 3차원 솔리드(solid)요소를 적용하였으며, 요소의 형태는 완전적분형 육면체요소(full intergration-hexadic)를 선택하였고 노드의 수는 총 9898 개로 구성하였다. 재료의 온도의존 물성치는 선행연구에서와 동일하게 적용하였다<sup>3,7)</sup>. 수치해석 모델에서 가열 코일의 크기는 가열면적에 해당된다고 가정하였다. 초기의 변형을 과상 변형의 일부분을 대상으로 모사하기 위하여, 초기조건으로 시편 양단에 대해 중심부를 5.822 mm 높게 탄성 변형시켰으며, 경계조건으로는 시편 양 끝단을 높이 방향(z축)으로 구속하는 조건을 적용하였다. 좌표축은 판재 평면의 길이방향 중심선과 폭방향 중심선을 각각 x, y축으로 하고 이들에 대해 수직방향을 z축으로 하였다. 여기서 탄성변형을 유도하기 위해 양 끝단을 x방향으로 변위를 일으켜 변형을 유발한 다음 x방향의 구속조건을 적용하였다. 초기상태의 수치해석 모델은 Fig. 3에 나타내었다.

3.1 가열영역에 따른 교정효과

Fig. 4에 가열교정에 의한 교정효과를 나타낸 것으

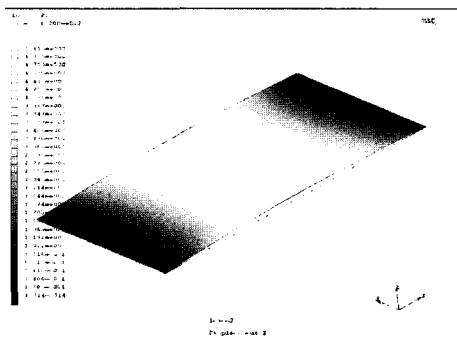


Fig. 3 Initial condition of numerical model

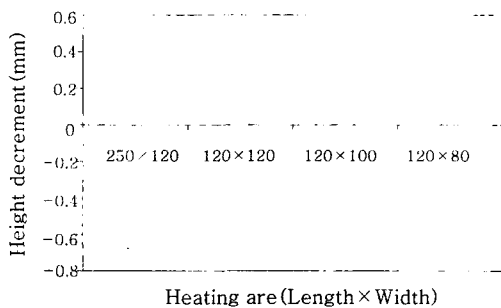
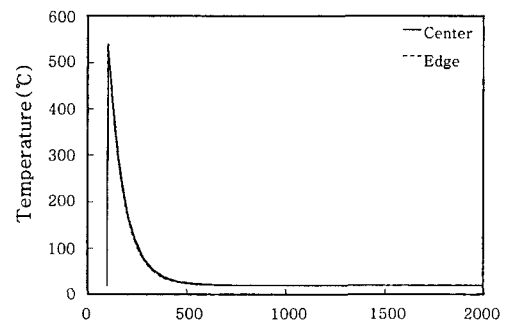


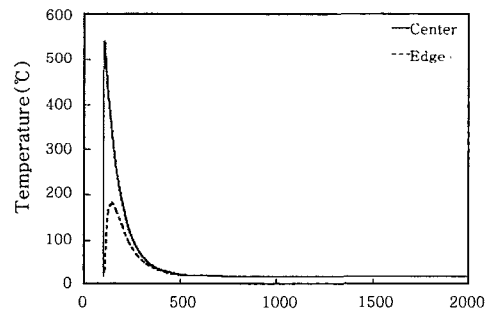
Fig. 4 Straightening result according to the heating area condition

로, 가열면적을 (LxW)로 나타낸 것이다. 교정효과는 높이 감소량을 나타낸 것으로 막대의 높이가 양의 값으로 큰 것이 교정효과가 큰 것에 해당한다. 그림에서와 같이 전체 가열(case 1)의 경우는 오히려 높이가 증가하였으며, 폭 전체를 가열하는 경우(case 2)에는 교정효과가 거의 나타나지 않았지만 가열폭이 좁은 경우에 대해서는 교정효과가 두드러지게 나타난다.

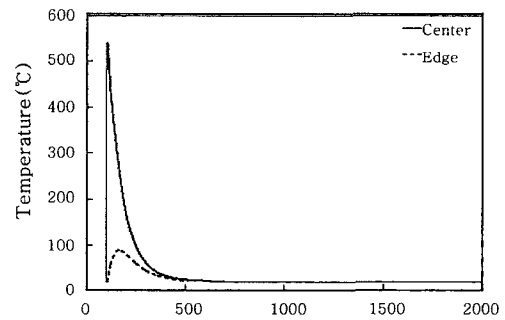
전체 가열을 했을 때와 폭 전체를 가열했을 경우는 가해지는 열에 의해 가열되는 동안은 자유 팽창을 하게 되어 압축소성변형이 생성되지 않고, 냉각을 하는 동안 가장자리에서의 냉각속도가 약간 빠른 것으로 인해 수축이 제지되어 높이가 오히려 증가하거나 약간의 교정효과만이 나타난다. 반면 좁은 폭을 가열했을 경우는 가열되는 동안 가열부위가 팽창이 되면서 압축소성변형



(a) case 1 and case 2



(b) case 3 (b=100mm)



(c) case 3 (b=80mm)

Fig. 5 Temperature histories during the process

을 형성하게 되고 그 후 수축하므로 교정효과가 두드러지게 나타나는 것으로 사료된다. 이는 Fig. 5에서와 같이 전체가열(case 1) 및 전체 폭을 가열(case 2)할 경우에는 중앙부와 가장자리의 온도이력이 거의 같게 나타나는 것을 통해 유추할 수 있다. 그러나 좁은 폭을 가열할 경우에는 중앙부와 가장자리의 온도의 분포가 차이나는 것을 확인할 수 있다. 두 가지 중 가열폭이 더욱 좁은 경우( $b = 80 \text{ mm}$ )에 교정효과가 적었는데, 이는 가장자리의 낮은 온도영역이 너무 넓으므로 냉각시 수축이 많이 일어나지 않은 것에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 가열폭 뿐만 아니라 가열길이에 따라서도 교정효과의 차이가 있을 것으로 예상할 수 있다.

### 3.2 가열 폭과 길이에 따른 교정 효과

온도분포 및 이력의 차이는 가열영역의 차이에 따라 유발되기 때문에 가열 폭에 대해 최적값이 존재한다는 것을 예상할 수 있다. 가열 폭에 따른 교정효과를 알아보기 위해 가열 길이를 120 mm로 고정시킨 후 폭을 변화시키면서 해석을 수행하였다. 해석결과 교정효과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 가열 폭이 100 mm정도 일 때 가장 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

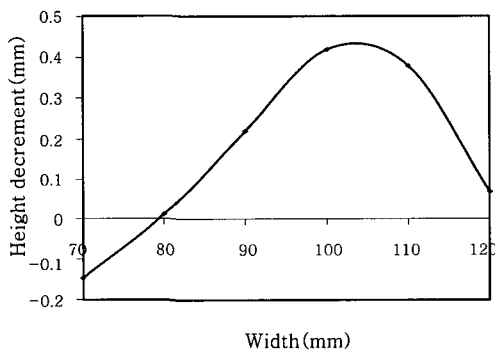


Fig. 6 Straightening result according to the heating area width

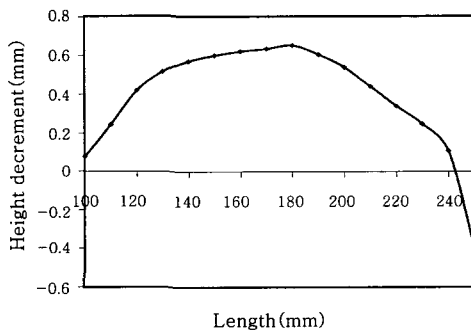


Fig. 7 Straightening result according to the heating area length

또한 가열 길이에 따른 교정효과를 알아보기 위해 가열 폭을 100 mm로 고정시킨 후 길이를 변화시키면서 해석을 수행하였다. Fig. 7에 해석결과를 나타내었는데, 교정효과는 180 내지 190 mm 영역에서 가장 큰 효과를 나타내었다.

Fig. 6에서 가열 폭이 지나치게 넓은 경우에 교정효과가 거의 없는 것은 3.1에서 설명한 바 있다. 그런데 Fig. 7에 나타난 바와 같이 가열 길이가 과도한 경우는 폭방향(y축) 강성이 작아짐으로써 압축소성변형이 급격히 줄어든 것이 원인으로 사료된다. 따라서 가열 폭과 아울러 가열 길이에 대한 최적값이 존재하며, 본 해석 조건에서는 가열을 위한 최적의 영역으로 폭 100 mm, 길이 180 mm를 제시한다.

### 3.3 정방형 판재에 대한 국부가열 교정효과

전술한 해석결과를 통해 정방형 판재에 2차원 변형에 대한 가열교정에서도 가열면적에 따라 교정효과가 달라지는 것이 예상된다. 따라서 이에 대한 해석을 위해 Fig. 8과 같이 초기변형을 가한 후 가열영역에 따른 교정효과를 해석하였다. 여기서 초기조건은 x, y-방향으로 각각 변위를 일으켜 중앙부의 높이를 5.351 mm로 변형시키고, 경계조건으로 가장자리의 높이를 구속하였다. 정방형 판재의 크기는 200×200 mm로 설정하였다.

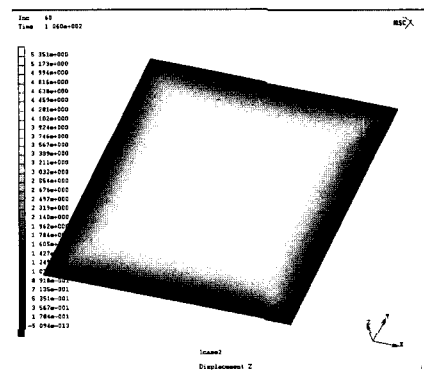


Fig. 8 Initial condition of square model

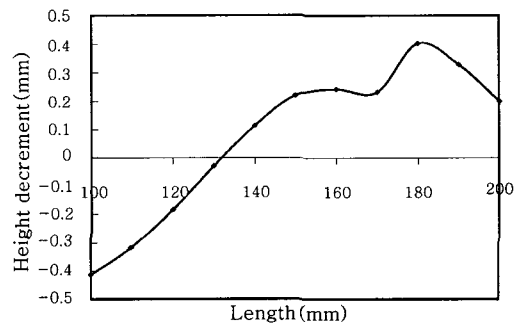


Fig. 9 Straightening result of square model

해석 대상물이 정방형이므로 가열영역도 가열폭과 길이를 같게 하여 정방형으로 설정하였다. Fig. 9는 가열폭(=가열 길이)에 따른 교정효과를 나타낸 것이다. 결과는 Fig. 7에서와 비슷한 경향을 보이고 있다. 가열면적의 크기가 점점 증가할수록 교정효과는 선형적으로 증가하다가 가열 면적이 어느 크기 이상이 되면 교정효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이 경우도 Fig. 7에서와 같이 가열 면적이 과다한 경우 가열부 주위의 강성이 부족하여 구속력이 약하게 되고, 그에 따라 압축소성변형이 적게 발생되기 때문인 것으로 사료된다.

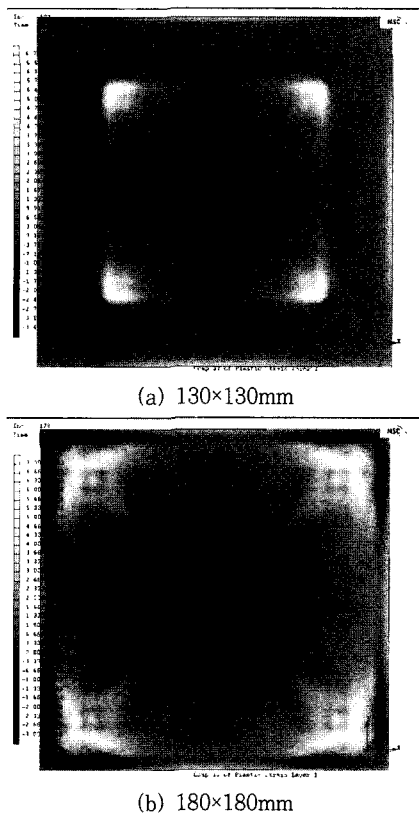


Fig. 10 Plastic strain distribution according to the heating area

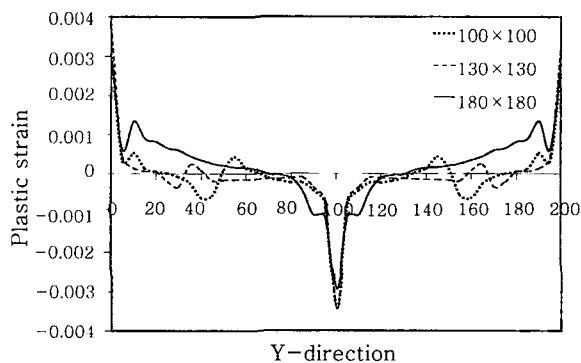


Fig. 11 Plastic strain distribution along the y-axis according to the heating area

가열 면적이 180×180 mm일 경우 가장 좋은 교정효과를 나타내고 있지만 140×140 mm이하에서는 교정효과가 없는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 두께(z) 방향 소성변형을 분포를 나타낸 것으로 밝은색 부분이 두꺼워진 부분(인장소성변형률)을 나타낸다. 여기서 볼 수 있듯이 가열면적 180×180 mm인 경우, 130×130 mm인 경우에 비해 인장소성변형률을 나타내는 부분의 넓이가 더 넓은 것을 볼 수 있다. 이는 가열 시 평면방향(x, y 방향)으로 압축이 작용하는 면적이 넓은 것을 의미한다. Fig. 11은 Fig. 10에서 y축선상에서의 가열면적에 따른 소성변형률을 나타낸 것으로 가열면적이 넓을수록 인장소성변형률이 작용하는 면적이 넓을 뿐만 아니라 그 크기도 큰 것으로 인해 교정효과가 크게 형성되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 정방형 판재의 국부가열 교정에 있어서도 가열면적에 대해 최적의 값이 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 본 해석 조건에 있어서는 180×180 mm로 나타났다.

이러한 수치적 해석을 통해 가열조건에 대한 기초자료를 구축할 수 있었으며, 향후 실 구조물을 대상으로 하는 실험적 해석이 기대된다.

#### 4. 결 론

박판재의 용접구조물 제작 시 생성되는 변형에 대해서 국부가열에 의한 교정효과를 수치적으로 해석하였다. 변형의 크기와 변형의 형태, 구속 조건에 따라 가열 교정에 대해 분석할 수 있는 수치해석 모델을 구축하였으며, 박판재의 탄성변형에 대한 가열교정 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전체 가열이나 전체 폭 가열에서는 교정효과가 나타나지 않았다.
- 2) 일부 폭을 가지는 면적을 가열한 교정방법에서는 교정효과를 확인할 수 있었으며, 최대의 교정효과를 나타내는 가열 폭이 존재함을 확인하였다.
- 3) 정해진 가열 폭에 대해 가열 길이에 따라 교정효과가 다르게 나타났으며, 가열 길이의 증가에 따라 교정효과는 증가하였다가 어느 길이 이상이 될 경우 교정효과가 감소하였고, 최대의 교정효과를 나타내는 최적 길이를 구하였다.
- 4) 두 방향(2 차원) 변형에 대한 가열교정에서 가열면적이 증가할수록 교정효과가 달라지는 것을 확인할 수 있었으며, 이 경우에도 최대의 교정효과를 나타내는 가열 면적이 존재하는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 전력산업연구개발사업에서 용융탄산염연료전지(MCFC) 개발 과제의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi : Effect of laser welding parameter on the heat input and weld-bead profile, *Journal of Materials Processing Technology*, **164-165**(2005), 978-985
2. P. Dong : Residual stress and distortions in welded structures, *Journal of Science and Technology of Welding and Joining*, **10-4**(2005), 389-398
3. 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 (in Korean)
4. R. Richard Avend, J.-S Kim : Heat straightening, *Journal of KSSC*, **8-1**(1996), 64-68 (in Korean)
5. P. Michaleis 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. C.-I. Kim, et. al, *Design and Fabrication of Weld Structures*, Wonchang Press, (1996), (in Korean)
7. C.L. Tsai, S.C. Park, W.T. Cheng : Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure, *Welding Research Supplement*, (1999), 156<sub>s</sub>-165<sub>s</sub>