

박판재 용접 구조물의 선상 가열 교정에서 최적 조건의 선정에 관한 연구

박 준 형* · 김 재 웅**†

*영남대학교 대학원 기계공학과

**영남대학교 공과대학 기계공학부

A Study on the Optimum Line Heating Condition for Straightening a Thin Plate Welded Structure

Jun-Hyoung Park* and Jae-Woong Kim**†

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

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

†Corresponding author : jaekim@yu.ac.kr

(Received February 11, 2010 ; Revised April 2, 2010 ; Accepted September 2, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to establish the optimum line heating condition to straighten the excessive bending distortion of a thin plate welded structure. For it, the extensive FEA and experiments were performed to evaluate the effect of heat source, heating speed and position on the straightening of a thin plate welded structure. In accordance with the results obtained by FEA and experiments, the straightening effect of line heating was strongly depends on the variables used in this study. With the results, the optimum line heating condition was established by using the response surface method and verified through comparing it with the numerical analysis result.

Key Words : Line heating straightening, Sheet metal, Weld distortion, Numerical analysis, Finite element method(FEM), Optimal condition

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 점차 확대되고 있다.

그러나 구조물의 용접 시 온도분포의 불균일로 인해 용접변형이 발생하는데 이는 구조물의 외관을 해치고 좌굴강도를 저하시키며 형상오차를 유발하여 제품의 품질을 저하시키므로 최근 구조물 제조분야에서 중요한

문제로 대두되고 있다^{1,2)}. 따라서 용접공정을 제어함으로써 변형을 최소화하기 위한 연구들이 많이 수행되어 왔다.

일반적으로 용접변형을 제어하기 위한 방안은 용접조립을 할 때 변형에 대한 강성을 최대로 할 수 있는 형상으로 설계하는 방법, 용접순서 제어법, 입열량을 최소화하는 방법. 그리고 역변형을 인가하여 용접하는 방법 등이 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.

박판재 구조물에 대해 용접조립을 실시하였을 경우 입열량이 작은 레이저 용접을 이용하여 용접을 시행하여도 박판재 구조물은 변형에 대한 강성이 작기 때문에 용접 후 변형이 생성된다³⁾. 특히 박판 구조물에서는 용접부의 수축에 따라 용접부 사이 및 가장자리에서 굽힘

변형 또는 좌굴형 변형이 생성된다.

이러한 용접 변형에 대한 교정방법으로는 크게 기계적 교정방법과 가열 교정방법으로 나눌 수 있다. 기계적 교정방법에는 프레스 가압법, 롤 교정법을 들 수 있으며, 가열 교정방법에는 전체 가열법과 국부 가열법을 들 수 있다. 박판재 구조물의 경우는 국부 가열법을 적용함으로써 변형을 교정할 수 있다. 국부 가열 교정은 가열단계에서는 열팽창에 의해 압축소성변형을 유도하고 냉각 단계에서는 길이 방향의 탄성수축이 일어나도록 하는 것이다^{4,5)}. 따라서 기계적 교정이 힘든 박판재 구조물의 경우 변형이 유발된 부분에 가열을 하여 교정효과를 기대할 수 있다.

본 연구는 박판에서의 굽힘변형 영역에 국부 가열을 적용하는 경우 교정효과를 해석하고자 하였다. 특히 선상 열원에 따른 교정효과를 수치해석 및 실험을 통해 분석하였다. 0.4mm 두께의 스테인리스강 박판재를 대상으로 선정하였으며, 용접 실험 및 가열 교정에 대한 실험을 실시하였고, 3차원 유한요소 모델을 구축하여 수치해석을 수행하였다. 또한 수치해석과 최적화 기법을 이용하여 가열교정에서 최적 조건을 선정하고자 하였다.

2. 실험

2.1 용접 실험

가열 교정 실험을 위해서는 용접변형 실험이 선행되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서 사용한 용접 시험편은 Fig. 1과 같이 단면 형상이 일정하고 단면에 비해 길이가 길어 굽힘 변형의 발생이 용이하도록 고안하였다. 그리고 용접 실험을 통해 생성된 변형량을 가열 교정 실험 및 해석의 초기조건으로 사용하였다.

용접 실험에 사용된 용접 장비는 Fig. 2에 보이는 Yb: YAG 레이저 용접기로서 출력은 최대 4kW이며, 빔의 초점거리는 560mm이다. 용접 구조물의 재질은 스테인리스 강 STS 304이며, Table 1에 나타난 용접 조건으로 구조물에 대해 용접을 실시하였다.

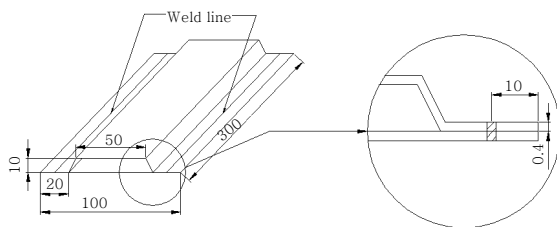


Fig. 1 Shape of welding structure

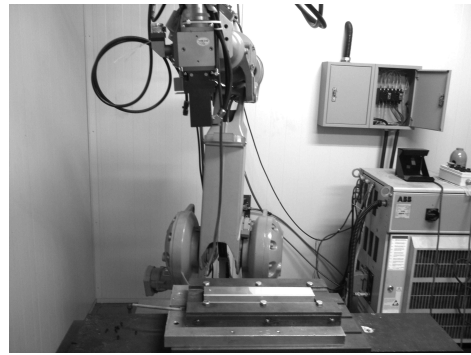


Fig. 2 Yb: YAG laser welding machine of TRUMPF Inc

Table. 1 Conditions for YAG laser welding

Laser power	1.2 kw
Welding speed	30 mm/s
Irradiation angle	5°
Focal position	-6 mm
Shielding gas (Ar 100%)	20 l/min

2.2 선상 가열 교정 실험

선상 가열 교정에서도 가열 조건에 따라 차이가 있다. 선상 가열 교정에서의 가열 조건은 열원의 위치, 열원의 이동속도, 열원의 종류 등이 교정 효과에 영향을 미치는 변수들이다. 선상 가열법에서 각 변수에 따라 온도분포의 차이가 나타나기 때문에 교정효과의 차이를 예상할 수 있다.

Fig. 3은 가열선의 위치를 나타내고 있으며, 중앙선에서 한쪽 방향을 가열하였을 때와 중앙선에서 일정하게 떨어져 대칭적으로 가열한 경우에 대하여 용접 구조물의 상판 가장자리의 교정효과를 비교하였다. Fig. 4는 실험 결과로써 레이저 열원에 의한 선상 가열에서 가열위치에 따른 교정효과를 나타내고 있으며, 중앙선에서 한쪽 방향으로 가열했을 때보다 일정하게 떨어져 대칭적으로 가열하였을 때 교정 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 열원으로 레이저 빔과 가스 화염을 이용하여 선상 가열을 하였을 때의 교정효과를 비교한 것이

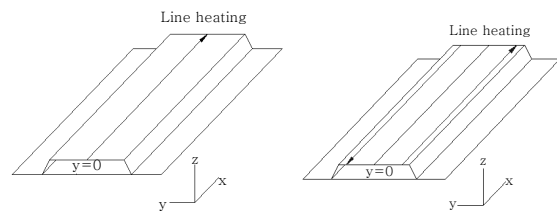


Fig. 3 Position of line heating

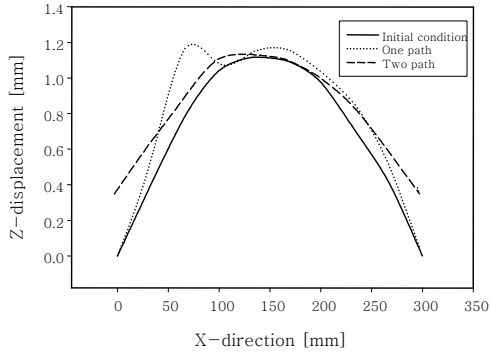


Fig. 4 Straightening results of experiment according to heating position

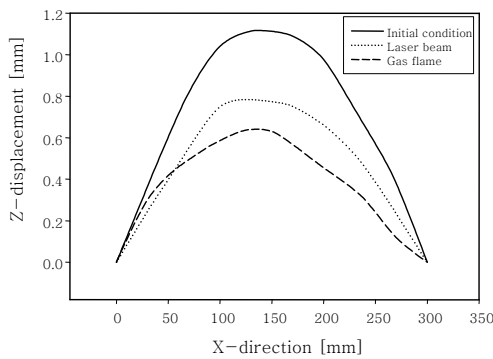


Fig. 5 Straightening results of experiment according to heat source type

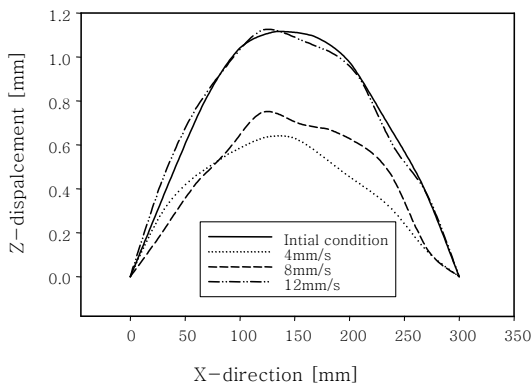


Fig. 6 Straightening results of experiment according to heating speed

다. 레이저 빔보다 상대적으로 열원이 큰 가스 화염을 이용하였을 때 교정효과가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

또한 선상가열교정법은 이동 열원을 사용하기 때문에 열원의 이동속도가 중요한 변수가 된다. 이동속도는 입열량을 대변하기 때문에 박판에 대해 너무 느린 속도로 열원이 이동할 경우 박판 구조물의 강성보다 열에 의한 변형이 더 크게 나타나기 때문에 적절한 열원 이동속도

가 요구된다. Fig. 6은 가스 화염을 적용한 선상가열 조건에서 열원의 이동속도에 따른 교정효과를 나타내고 있다.

3. 수치해석 모델

3.1 용접 구조물 수치해석 모델

선상 가열 교정법에 대한 해석을 위해서는 우선적으로 용접변형을 일으킨 용접 구조물에 대한 해석이 필요하다. 이는 용접 변형량이 구조물에 분포되어 있는 잔류응력과 관련이 있기 때문이다. 일반적으로 용접 해석 시 두께 방향으로 온도분포가 중요하므로 3차원 요소를 이용한 해석을 실시하여야 하지만 본 연구에서는 박판 용접이고 완전 용입 조건을 적용하기 때문에 두께 방향으로의 온도변화가 거의 없으므로 쉘(shell) 요소를 사용하였다.

Fig. 7은 수치해석 모델로써 요소 분할은 8898개의 절점과 8820개의 박판 쉘 4각형 요소로 구성하였고, 상용 유한요소 프로그램을 사용하여 열탄소성 해석을 수행하였다. 이때 열전달 해석과 기계적 해석에 대해 교차연계법(staggered coupled method)⁶⁾를 적용한 연성해석을 실시하였다. 재료의 물성치는 각 온도에 따른 변화 값을 적용하였으며, 용접실험 시 기계적 구속은 가장자리 완전 구속을 하였으며 해석 시에도 동일한 구속 조건을 가하였다.

3.2 용접 열원 및 가스 화염 열원 모델

정확한 용접변형 해석 및 가열 교정 해석을 위해서는 정확한 온도분포해석이 선행되어야 한다. 용접 열원의 모델링을 위하여 선행연구에서 가장 적합하다고 알려져 있는 Goldak⁷⁾의 이중 타구형 열원모델(Goldak's double

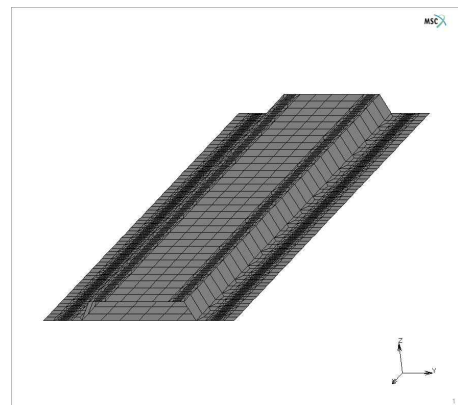


Fig. 7 Finite element model for line heating method

ellipsoidal shaped weld heat source)를 채택하였다. 이중 타구형 열원 모델은 레이저 용접이나 전자빔 용접과 같이 용입이 깊은 용접에도 적용할 수 있을 뿐만 아니라 열원이 이동함에 따른 온도 이력을 잘 나타낼 수 있다. 용접 열원의 파라미터들은 실제 레이저 용접을 실행한 모재의 단면과 해석을 통한 단면의 비교를 통해 찾았다.

Goldak의 이중 타구형 열원 모델 중 전방 사분원 내의 용접 열속(heat flux)의 분포는 식(1)과 같으며, 후방 사분원 내의 용접 유속의 분포는 식(2)와 같다.

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_f}{abc\sqrt{\pi}} \exp\left[\frac{-3x^2}{a^2} - \frac{-3y^2}{b^2} - \frac{-3z+v(\tau-t)^2}{c_f^2}\right] \quad (1)$$

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_r}{abc\sqrt{\pi}} \exp\left[\frac{-3x^2}{a^2} - \frac{-3y^2}{b^2} - \frac{-3z+v(\tau-t)^2}{c_r^2}\right] \quad (2)$$

위 식에 포함된 파라미터 a, b, c_f, c_r 은 Fig. 8에 나타난 값으로, 각각 독립적인 값으로 결정해주어야 한다. 이를 결정하기 위해서 0.4mm 두께의 스테인리스 판재 두 장을 겹치기 용접하여 용접부 단면으로부터 용융부 크기를 구하였고, 이와 동일한 용융부 크기를 나타내는 해석 결과를 얻기 위한 반복적인 해석을 통하여 파라미터 값을 구하였다. Fig. 9는 해석 모델의 용융부 크기와 실제 용접부 단면의 용융부의 크기를 비교한 것으로 비교적 일치하는 결과를 얻었다. 이렇게 구한 레이저 열원 모델의 파라미터 값은 Table 2와 같다.

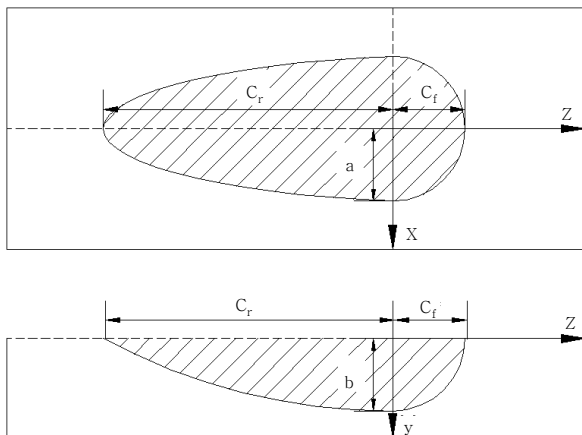


Fig. 8 Goldak's double ellipsoidal heat source configuration

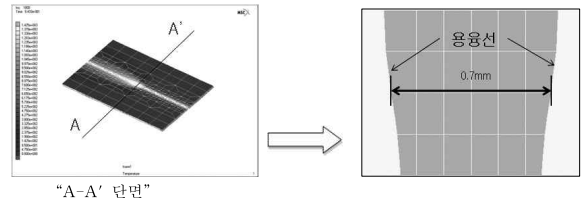
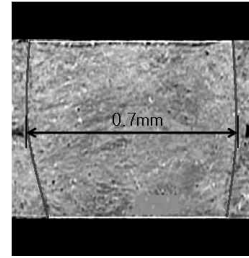


Fig. 9 Cross section of weldpool and heat transfer analysis

Table 2 Weld heat source parameters

Parameter	Magnitude [mm]
Width 'a'	1
Depth 'b'	2.4
Front 'c _f '	1
Rear 'c _r '	4

또한 선상 가열 교정을 위해 열원은 부탄을 이용한 가스화염을 사용하였다. 선상 가열법 역시 이동열원이므로 Goldak의 이중 타구형 모델을 사용하였다. 가스화염 열원을 모델링하기 위해 Fig. 10과 같이 이동 영역에서 화염의 중심이 지나는 선의 위치를 0mm로 하고 5, 10mm의 일정한 간격으로 써머미터를 설치하여 시간에 따른 온도 이력을 측정하였다. 또한 유한 요소 해석 프로그램을 이용하여 구한 온도 이력을 Fig. 11과 같이 비교하여 가스화염 이동 열원의 파라미터들을 구하였으며, 그 값들을 Table 3에 나타내었다.

4. 실험계획법을 이용한 선상 가열 조건의 최적화

선상 가열 교정법에서 가열위치와 열원 이동속도에 따라 그 교정효과가 달리 나타나고 있어 두 변수에 따른 최적조건이 존재한다는 것을 예상할 수 있다. 최적

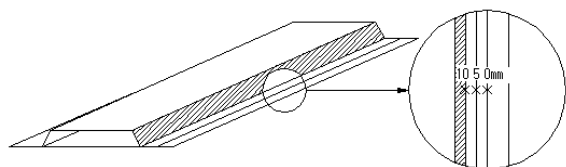


Fig. 10 Measuring positions of temperature history

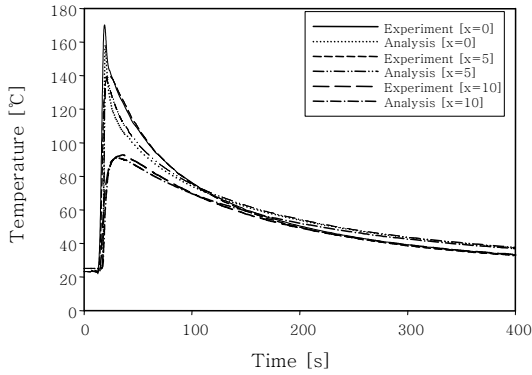


Fig. 11 Temperature histories during the process

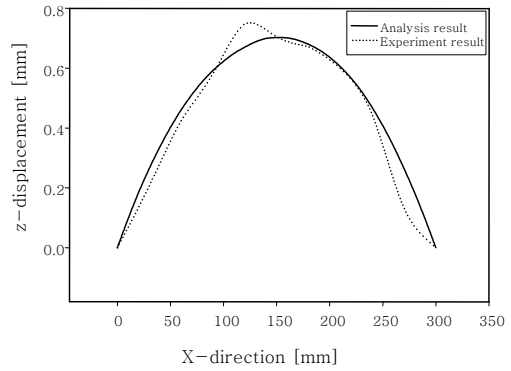


Fig. 12 Comparison between analysis and experiment

Table 3 Gas flame heat source parameters

Parameter	Magnitude [mm]
Width 'a'	12
Depth 'b'	7.5
Front 'cf'	12
Rear 'cr'	12

조건 선정을 위해 실험계획법에 따라 유한요소해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 통해 최적조건을 선정하고자 한다.

최적조건을 선정하기 위해서 표면반응 분석법을 적용하였으며, 이 분석에 필요한 실험적 회귀모델을 구하기 위해 실험계획법의 하나인 중심합성계획법을 이용한다. 중심합성계획법은 심플렉스계획법이나 2^k요인배치법의 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 중심점과 축점을 2^k요인실험에 추가시킨 실험계획법이다.

2^k요인실험법에 따라 네 개의 점 (1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1, -1)이 있고, 2^k=4개의 축점 (1, 0), (-1, 0), (0, 1), (0, -1)가 있으며 중심점으로 (0, 0)이 하나 이상 있다. 따라서 k=2인 경우에는 중심합성계획이 갖는 최소의 실험점은 9개이다. 여기서 입력 변수는 가열 위치와 이동 속도이며, 출력변수는 교정효과이다. 우선 시뮬레이션을 하기 위해서는 실험과 시뮬레이션 값의 비교가 필요하다. 실험결과와 수치해석 결과를 비교하기 위하여 가열위치를 중앙선에서 대칭적으로 21mm 떨어진 곳에 두었고 열원 이동속도를 8mm/s로 하였다. 또한 열원은 가스화염을 이용하였으며, Fig. 12는 실험 결과와 수치해석 결과가 유사한 것을 보여주고 있다.

따라서 이렇게 구축된 유한요소모델을 이용하여 최적조건을 도출하였다. Table 4는 각 입력변수의 범위를

Table 4 Factors and levels for numerical analysis design

Factor	Factor name	Coded value		
		-1	0	1
x_1	Heating Position [mm] (y value in Fig. 3)	21	13	5
x_2	Speed [mm/s]	6	8	10

Table 5 Central composite design and analysis result

	Heating Position [mm]	Speed [mm/s]	Height decrement [mm]
1	1	1	0.346
2	-1	1	0.066
3	1	-1	0.333
4	-1	-1	0.260
5	1	0	0.295
6	-1	0	0.141
7	0	1	0.187
8	0	-1	0.422
9	0	0	0.296

나타내고 있다. 여기서 x_1 은 가열위치이며, 중앙선을 $y=0$ 으로 하여 y 방향으로 일정하게 떨어진 위치를 나타내고 있다. x_2 는 선상 가열에서 열원의 이동속도이다. Table 5는 각 입력변수에 따라 시뮬레이션 후 교정효과를 나타낸 것이다.

Table 5의 결과를 이용하여 관심 영역에서 입력변수인 열원의 가열위치와 이동속도에 대한 출력변수 교정효과(S)의 회귀식을 구하면 다음 식과 같다.

$$S = 0.295 + 0.069x_1 - 0.084x_2 - 0.076x_1^2 + 0.010x_2^2 + 0.029x_1x_2 \quad (3)$$

Table 6 Analysis of variance regression

	Source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares	F_0	$F(\alpha)$
Straightening	regression	0.087	5	0.017	15.27	9.01
	error	0.003	3	0.001		
	total	0.090	8			

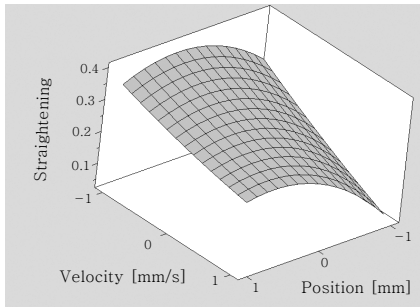


Fig. 13 Desirability function of straightening

Table 7 Optimal line heating condition

Coded variables		Natural variables	
x_1	x_2	Position [mm]	Speed [mm/s]
0.273	-1	14.184	6

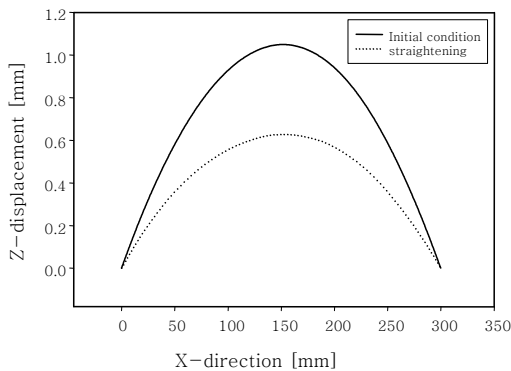


Fig. 14 Effect of straightening by optimal line heating condition

회귀식에 대한 분산분석표를 Table 6에 나타내었다. 회귀식의 F_0 값과 $F(\alpha)$ 와 비교하였을 때 F_0 값이 $F(\alpha)$ 값보다 크게 나타나면 회귀식이 유의하다는 것을 알 수 있다. 이 회귀식을 이용하여 반응표면을 구하면 Fig. 13과 같이 반응표면 그래프로 나타낼 수 있으며, 두 변수에 대한 최적조건은 Table 7에서 코드변수와 자연변수로 나타낸 바와 같다. Fig. 14는 수치해석의 결과로써 앞에서 구한 최적조건을 적용하였을 때의 교정 효과

를 나타내고 있으며, 이와 같이 유한요소 해석 모델을 이용하여 최적조건을 제시할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

박판재의 용접구조물 제작 시 생성되는 용접변형에 대해서 국부가열과 선상가열에 의한 교정효과를 실험과 수치해석을 통해 알아보았다. 가열 교정의 조건에 따라 달라지는 교정효과에 대해 분석할 수 있는 수치해석 모델을 구축하였으며, 이를 이용한 최적조건의 선정에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접실험 결과를 이용하여 열원을 모델링하였으며, 이를 적용하여 용접변형의 해석을 위한 유한요소해석 모델을 구축할 수 있었다.
- 2) 선상 가열법은 열원의 종류, 열원의 가열위치, 열원의 이동속도 등 여러 변수에 의해 그 교정효과가 다르게 나타났으며, 레이저 빔보다는 열원 크기가 넓은 가스화염에서 더 좋은 결과를 얻었다.
- 3) 가스화염을 이용한 선상가열법의 해석을 위한 열원모델을 구축하였고 가열교정해석을 위한 수치해석 모델을 구축하였다.
- 4) 선상가열 해석 모델과 반응표면법을 이용하여 열원의 가열위치와 이동속도를 입력변수로 하고 교정효과를 출력변수로 하여 우수한 회귀식을 구할 수 있었으며, 최적조건을 선정할 수 있었다.

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 Korea)
4. 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
5. C.-I. Kim, *Design and Fabrication of Weld Structures*, Wonchang Press, Korea, 1996 (in Korea)
6. Stahl_Eisen-Werkstoffclaetter(SEW) des Vereins Deutscher Eisenhuettenleute Verlag Stahleisen mbh, Duesseldorf, 1992
7. J. Goldak, A. Chakravarti, and M.bibby : A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, *Metallurgy Transactions B*, 18B (1984), 299-305