

레이저용접에 의한 알루미늄 박판구조물의 용접변형 해석

권 기 보* · 김 재 응**† · 김 철 희***

*영남대학교 대학원 기계공학과

**영남대학교 공과대학 기계공학부

***한국생산기술연구원

Analysis of Welding Distortion for Laser Welded Sheet Metal Structures of Aluminum Alloy

Ki-Bo Kwon*, Jae-Woong Kim**† and Cheol-Hee Kim***

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

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

***Production Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-130, Korea

†Corresponding author : jaekim@yu.ac.kr

(Received July 9, 2008 ; Revised August 19, 2008 ; Accepted April 13, 2009)

Abstract

In this study, welding distortion analysis is performed for various design of tube shape structures which are assembled with aluminum sheet metal. Aluminum 5052 plates of 1mm thickness are used to analyze. An efficient keyhole model, as a welding heat source, is used for the prediction of full penetration weld size and shape which is required for the thermal analysis. The thermal and mechanical material properties are considered as temperature dependent functions, due to the high temperature variations during the welding. The numerical model is calculated by using a commercial software and evaluated with the experiments. The calculation results could make a comparative study in the view of distortion for the various size and shape of structure.

Key Words : Welding distortion, Finite element method(FEM), Aluminium alloy, Laser beam welding (LBW), Keyhole model

1. 서 론

용융용접은 국부적으로 재료를 용융시켜 야금학적으로 결합시키는 방법으로 부재를 구조적으로 일체화시킨다. 그래서 용접부는 국부적으로 급격히 고온에 달하게 되고 체적이 큰 저온부로 열전도에 의하여 급속히 냉각하게 된다. 이 사이에 온도가 변화하는 범위는 넓기 때문에 재료의 기계적 성질은 온도에 따라서 크게 변화한다. 이와 같은 현상이 연속해서 국부적으로 일어나는데 온도 상승 시에는 팽창이, 냉각 시에는 수축이 일어나고 이것이 다른 부분에 의하여 구속되므로 용접응력

(welding stress)이 발생하게 된다¹⁾. 즉, 국부적 가열로 인해 중심부분이 팽창하게 되고 이를 둘러싼 부분에 의하여 변형이 구속되므로, 열을 가한 부분은 압축응력이, 이를 둘러싼 부분은 인장응력이 생성되며, 가열부가 냉각하면서 다시 수축이 발생하여 균형된 응력분포를 이루는 과정에서 변형이 유발된다. 이러한 용접응력으로 인한 변형이나 수축은 제품의 치수 정밀도나 외관을 해칠 뿐만 아니라 부재의 강도를 저하시키는 원인이 되며, 그 교정에도 많은 시간과 노력이 필요하므로 결국 제작 비용이 많이 들게 하는 요인이 된다.

최근 자동차를 포함하는 수송기계분야에서 경량화를 위한 알루미늄 판재의 적용이 증가하고 있다. 알루미늄

합금은 열전도율이 크기 때문에 가열시 온도증가 부위가 넓고 열팽창계수도 큰 관계로 용접변형의 발생이 용이하다. 따라서 정밀한 용접구조 부품을 제작하기 위해서는 용접변형을 최소화 하는 것이 요구된다. 용접변형에 미치는 영향인자들은 재료의 물성치 이외에 구조물의 형상 및 크기, 용접선의 위치 등이 있으므로 용접변형을 최소화하기 위한 자료를 구축하기 위해서는 용접변형을 해석하는 방법과 이들 영향인자들에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 관(tube)형태의 알루미늄 용접 구조물을 대상으로 변형해석을 수행하고자 한다. 수치적 해석을 위한 모델을 구축하기 위해 Al5052 sheet²⁾에 대하여 실험을 실시하여 열원 모델과 변형 해석 모델을 검증하였다. 이렇게 구한 수치해석 모델을 이용하여 관형 구조물의 형상 및 크기, 용접선의 위치에 따른 용접변형의 크기 및 양상을 분석함으로써 알루미늄 판재 구조물의 용접변형에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 수치해석 모델링

2.1 용접열원의 모델링

용접열원을 모델링하기 위하여 3차원 열원모델에 가장 적합하다고 알려진 Fig. 1에 나타난 이중 타구형 열원모델(Goldak's double ellipsoidal shaped weld heat source)³⁾ 이용하였고 실제 실험한 용접부 단면사진과 일치하는 용융부 크기를 나타내는 열원 파라미터를 찾고자 하였다.

전방 사분원 내의 파워밀도분포는 다음과 같다.

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_f}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2 - 3y^2/b^2 - 3[z+v(\tau-t)]^2/c^2}$$

후방 사분원 내의 파워밀도분포는 다음과 같다.

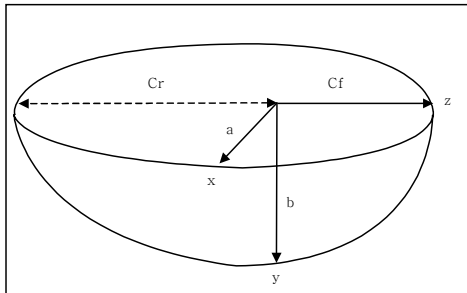


Fig. 1 Goldak's double ellipsoidal shaped weld heat source model

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}f_r}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2 - 3y^2/b^2 - 3[z+v(\tau-t)]^2/c^2}$$

위 식에서 파라미터 a, b, c는 각각 독립적인 값으로 결정해 주어야 한다.

해석 프로그램으로 MARC를 사용하였으며 이 프로그램은 Goldak이 제시한 열원의 수학적 모델을 직접 제공하고 있어 계수 값만을 지정함으로써 열원모델의 적용이 가능하다. 또한 모델에서 용접선을 지정할 수 있는 기능이 있다.

실제 용융부의 크기를 알아내기 위해 100×300×2mm 크기의 Al5052 시편에 대해 YAG레이저 비드용접(bead on plate)을 수행하였다. Table 1에 나타난 용접조건은 Al5052 판재⁴⁵⁾의 두께가 2 mm일 때 완전용입 조건을 실험을 통해 찾아낸 것이다.

용접 후 단면을 취하고 에칭작업을 하여 수치해석결과와 비교하였다. Fig. 2와 3은 각각 실제 용접부 단면 사진과 수치해석에 의한 온도 분포를 나타낸 것이다.

Table 1 Welding condition for experiments

Laser power	3 kW
Welding speed	2 m/min
Irradiation angle	5°
Focal position	-6 mm
Shielding gas (Ar 100%)	surface; 20 l/min bottom; 10 l/min

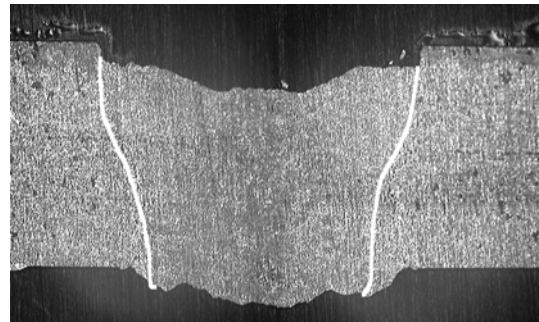


Fig. 2 Etching cross section

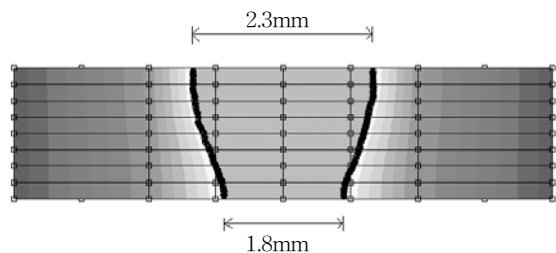


Fig. 3 Weld line from numerical analysis

Table 2 Parameters of laser heat-source model

Parameter	Value(mm)
Width : a	1.0
Depth : b	2.0
Forward Length : c_f	1.0
Rear Length : c_r	4.0

그림에 표시한 용융라인은 알루미늄의 용융점인 650°C를 기준으로 정하였으며 용융지 형상이 일치하는 경우의 열원모델 파라미터 값들을 Table 2와 같이 선정하였다. 이렇게 선정된 열원 모델을 이후 알루미늄 구조물 해석에 적용하였다.

2.2 수치해석 모델링

용접변형에 미치는 구조물의 형상 및 크기, 용접선 위치의 영향을 해석하기 위해 비교적 단순한 구조물을 선택하였다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 단면형상이 일정하며 길이가 긴 용접구조물을 대상으로 하였다⁶⁾. 일반적으로 두꺼운 부재의 용접해석 시 두께 방향으로의 온도분포가 중요하므로 3차원 해석을 실시하여야 하지만 본 연구에서는 박판 용접이고 완전 용입 조건을 적용하

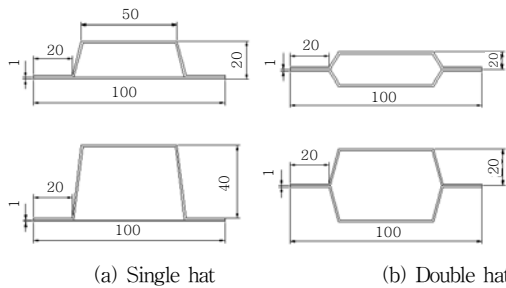


Fig. 4 Example of cross section of structure

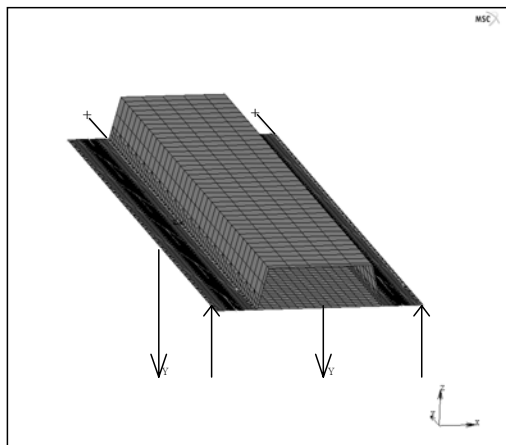


Fig. 5 Finite element model

기 때문에 두께 방향으로의 온도변화가 거의 없으므로 shell 요소를 사용하였다. Fig. 5와 같은 해석모델에서 요소분할은 7594개의 절점과 7543개의 shell요소를 사용하였고 용접라인에서의 shell요소의 한 변의 길이는 1mm이다. 변형해석시 경계조건은 네 모서리에 대해 높이방향 구속을 적용하였다. 구조물의 종류는 크게 단일 절곡판(single hat; 이하 SH라 칭함)구조와 양면 절곡판(double hat; 이하 DH라 칭함)구조로 나누었다. 이러한 대상을 선정한 것은 용접선의 위치가 단면의 중앙부에 있는 경우(DH)와 바닥면에 있는 경우(SH)에 각각 용접 변형에 미치는 영향을 알아보기 위해서 이다. 또한 길이 (L) 300mm의 SH와 DH구조에 대해서 각각 40mm와 20mm 높이에 대해서 해석을 수행하였다.

구조물의 재료는 두께가 1mm인 알루미늄합금(Al5052)으로 하였으며, 용접부에서의 두께는 2 mm이므로 2mm 두께에 대한 완전 용입조건으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 6과 Table 3에 나타난 것과 같은 재료의 물성치를 적용하였으며 대류 경계조건은 모든 자유표면에 부가하였다.

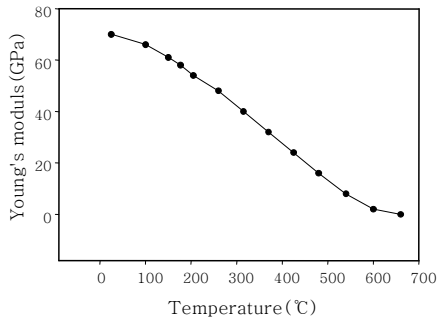
구조물의 변형양상을 파악하기 위하여 Fig. 7에 나타난 것과 같이 좌표계를 정하였으며⁷⁾, Y=0인 지점과 Y=L/2인 지점에서의 변위와 응력을 측정하여 구조물 형상에 따른 변형양상을 비교하고자 하였다.

2.3 레이저 용접실험

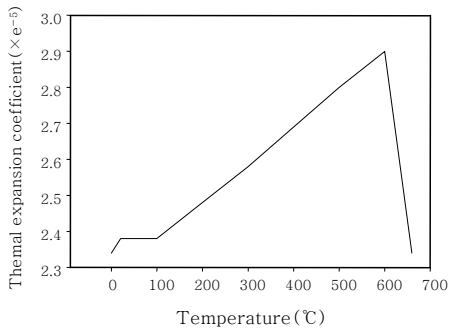
수치해석 모델의 유의성을 확인하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 장비는 독일 트럼프사의 Yb: YAG 레이저 용접기로써 최대 출력이 4 kW이며, 초점 거리가 0.56mm, 초점에서의 빔의 직경이 1.064mm, 파장이 1040nm이다. YAG 단결정 내에 이터븀(Yb)을 첨가시킨 레이저로서 단결정 3준위로 효율이 낮으나 Nd와는 달리 많은 양의 Yb을 첨가시킬 수 있어 고출력에서 발진 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 실험과 수치해석에서의 구속조건을 유사하게 만들기 위해 Fig. 8과 같이 네 모서리를 기계적으로 구속하고 용접을 시행하였다.

2.4 수치해석 모델의 검증

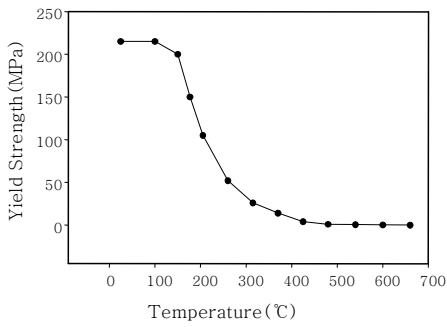
Fig. 9와 10은 SH 20mm구조의 실험과 해석 결과의 비교이다. 앞서 나타난 해석을 통한 X축 방향 단면 변형의 양은 Y=0지점에서는 거의 나타나지 않았고 Y=L/2 지점에서 최대 변형이 약 1mm정도로 나타났는데 실험을 통한 X축 방향 단면 변형의 양은 Y=0지점



(a) Young's modulus



(b) Thermal expansion coefficient



(c) Yield strength

Fig. 6 Temperature dependent material properties

Poisson's ratio	0.33
Mass density	2680 kg/m ³
Thermal conductivity	138 W/m°C
Specific heat	900 J/kg°C
Latent heat(607~650°C)	10 kJ/kg

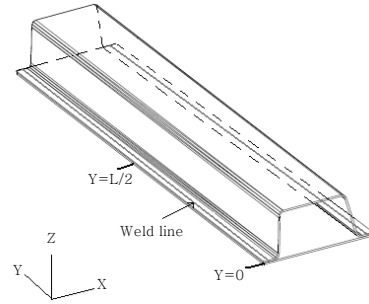


Fig. 7 Coordinate system of the structure

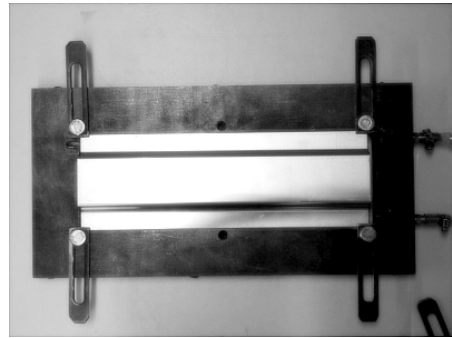


Fig. 8 Two point constraint

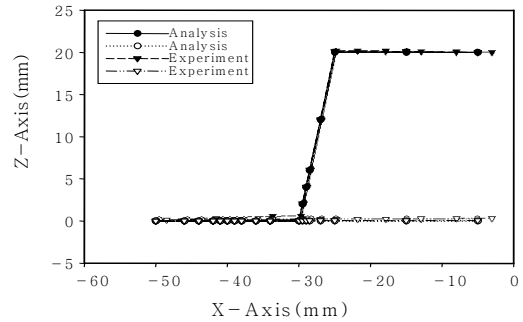


Fig. 9 Comparison between analysis and experiment in section shape of 20mm SH at Y=0

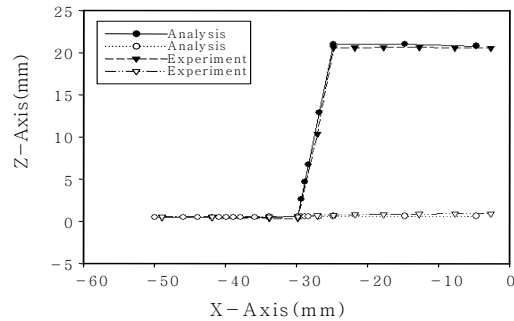


Fig. 10 Comparison between analysis and experiment in section shape of 20mm SH at Y=L/2

에서는 역시 거의 나타나지 않았으며 $Y=L/2$ 지점에서는 약 0.95mm로 나타났다. 이 변형은 단면방향의 변형이라기보다 용접라인의 종방향 굽힘변형에 의한 전체적인 변형이다.

Fig. 11과 12는 SH 20mm구조의 weld line과 upper line에서의 실험과 해석의 비교이다. 해석에 의한 결과는 weld line에서는 약 0.9mm upper line에서는 약 0.93mm로 나타났다. 실험에 의한 결과는 용접선에서는 약 0.95mm upper line에서는 1.17mm로 각각 나타났다.

Fig. 13과 14는 DH 40mm구조의 실험과 해석에서의 단면 변형의 비교를 나타낸다. $Y=0$ 에서 해석에서의 변형량은 위 아래로 누르는 방향으로 약 1mm정도 나타났고 실험에서의 측정값은 약 0.93mm로 나타났다. $Y=L/2$ 에서의 해석에서의 변형량은 $Y=0$ 에서의 변형의 방향과 반대방향으로 0.1mm였고 실험에서의 측정값은 0.36mm였다.

비교를 통하여 SH구조와 DH구조의 변형은 해석과 실험에서 거의 일치함을 볼 수 있다. 즉, 수치해석을 수

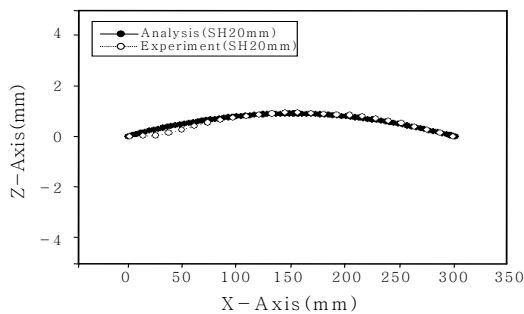


Fig. 11 Comparison between analysis and experiment in z-displacement along Y-axis at the weld line

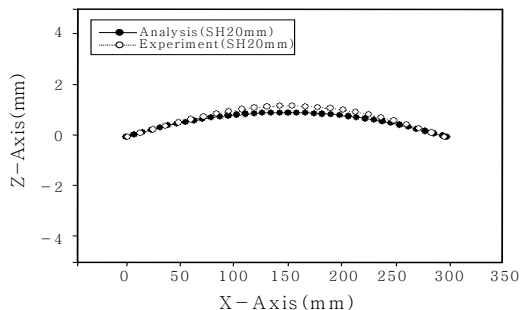


Fig. 12 Comparison between analysis and experiment in z-displacement along Y-axis at center of upper plate

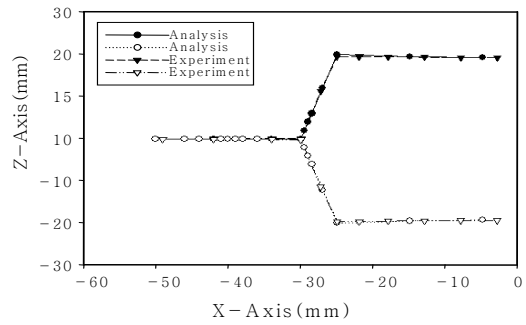


Fig. 13 Comparison between analysis and experiment section shape of 40mm DH at $Y=0$

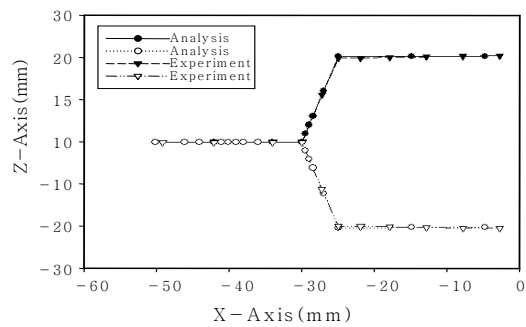


Fig. 14 Comparison between analysis and experiment section shape of 40mm DH at $Y=L/2$

행함으로써 실험을 대변할 수 있음을 확인할 수 있다.

3. 구조물의 수치해석 결과

실험을 통해 검증한 수치해석 모델을 이용하여 구조물의 종류에 따른 용접변형의 양상 및 크기를 비교하였다. 본 수치해석에서도 열해석 및 변형해석에 대한 경계 조건은 전술한 바와 같은 동일한 조건을 적용하였다.

3.1 용접에 의한 구조물의 단면변형

Fig. 15-18은 높이가 20mm인 SH와 DH구조의 단면형상의 변형을 나타낸 것이다. 20mm SH구조에서 $Y=0$ 인 지점에서의 변형은 거의 없고 $Y=L/2$ 지점에서 변형이 전체적으로 약 1mm정도로 나타났다. 그러나 이 변형은 단면형상의 변형이기 보다는 전체적인 굽힘변형에 따른 단면위치의 이동으로 볼 수 있다. 20mm DH구조에서의 $Y=0$ 지점에서의 변형은 아래 윗 판재가 위 아래로 누르는 방향으로 약 0.8 mm 정도로 나타났고,

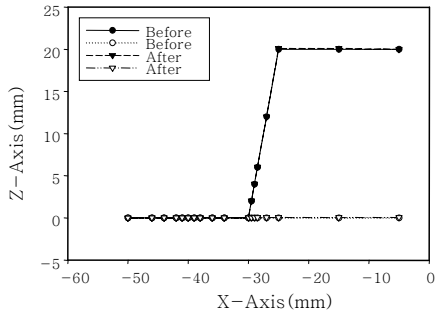


Fig. 15 Section shape of 20mm SH at Y=0

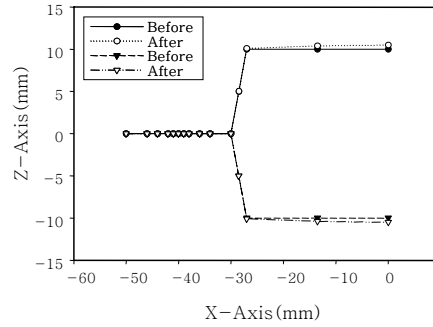


Fig. 18 Section shape of 20mm DH at Y=L/2

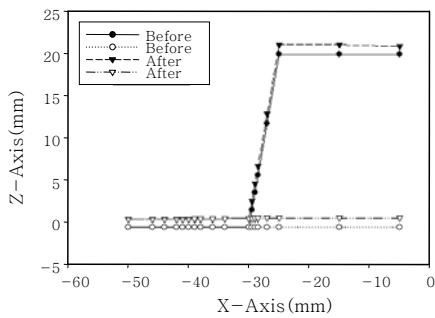


Fig. 16 Section shape of 20mm SH at Y=L/2

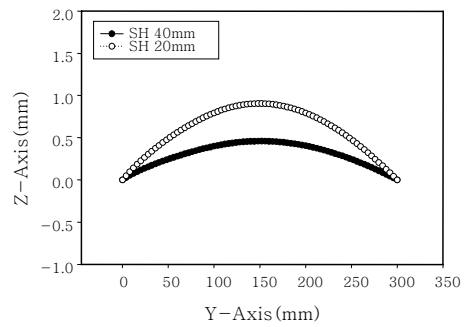


Fig. 19 Z-displacement along Y-axis at the weld line

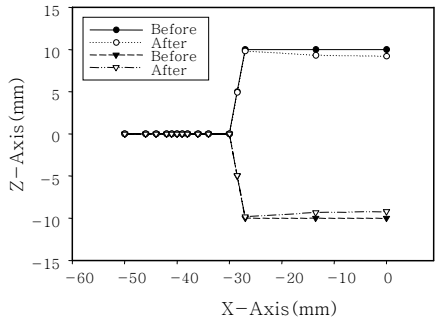


Fig. 17 Section shape of 20mm DH at Y=0

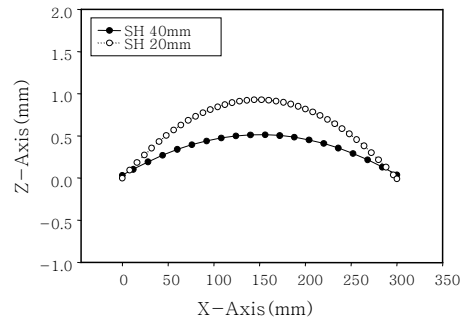


Fig. 20 Z-displacement along Y-axis at center of upper plate

Y=L/2 지점에서의 변형은 반대방향으로 약 0.5 mm 정도로 볼록한 변형을 나타내었다.

3.2 구조물의 높이에 따른 용접변형

구조물 높이에 따른 용접변형의 양상을 비교하기 위하여 SH구조 40, 20 mm와 DH구조 40, 20 mm 구조를 각각 비교한다. Fig. 19와 20을 보면 SH구조의 높이 40 mm와 20 mm 구조의 Y축 방향에 대한 Z축의 변형량

을 비교하여 볼 수 있다. SH 40 mm에서는 용접선 중간 위치에서의 Z축 방향 변형량은 약 0.46 mm 정도이며 SH 20 mm인 경우 약 0.9 mm 정도이다. 그리고 SH 구조의 윗판 중앙부의 변형량은 40 mm일 때 약 0.5 mm, 20 mm일 때 약 0.93 mm 정도이다(Fig. 19). 여기서 SH구조의 변형은 구조물의 높이가 낮은 경우가 굽힘변형이 크게 나타났다. 굽힘변형은 용접선에서의 수축에 의해 발생하는 것으로, SH구조의 경우 바닥면에 위치한 용접선 부위의 수축에 의해 발생되며 구조물의 단

면모멘트가 크면 굽힘에 대해 저항하는 강성이 크게 되므로 변형은 작게 된다. 따라서 SH구조의 높이가 작을수록 단면모멘트의 값은 감소하므로 굽힘 변형량은 많이 발생한다.

Fig. 21과 22를 보면 DH구조의 높이가 40 mm인 경우와 20mm인 경우의 변형 양상을 비교해 볼 수 있다. 용접선 위치에서 DH 40 mm의 변형은 거의 나타나지 않았으며 DH 20 mm에서의 변형은 약 0.225 mm 정도의 변형량을 나타내었다. 그리고 구조물 윗판 중앙부와 양단의 최대 높이 차를 살펴보면 DH 40 mm일 때 약 0.9 mm 정도이고 DH 20 mm일 때는 약 1.3 mm 정도이다. 여기서 용접선의 위치가 구조물의 중립면에 있으므로 굽힘 변형은 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

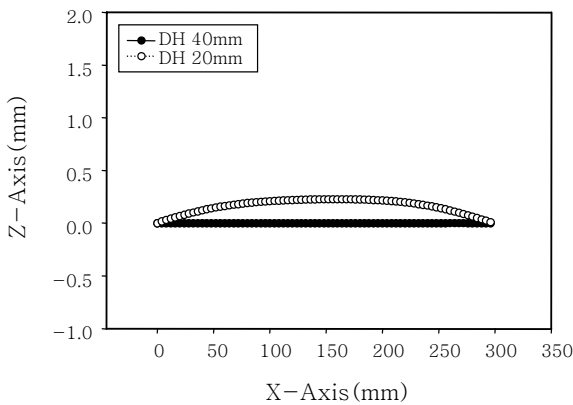


Fig. 21 Z-displacement along Y-axis at the weld line

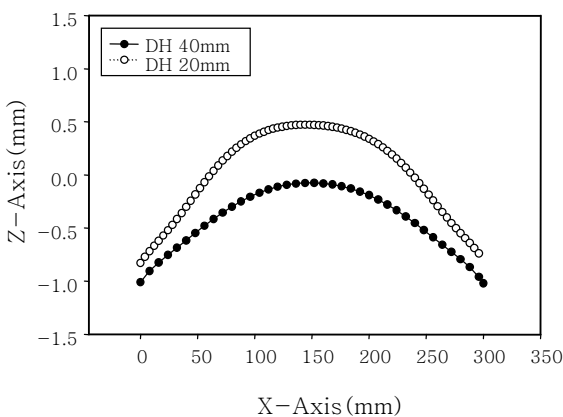


Fig. 22 Z-displacement along Y-axis at center of upper plate

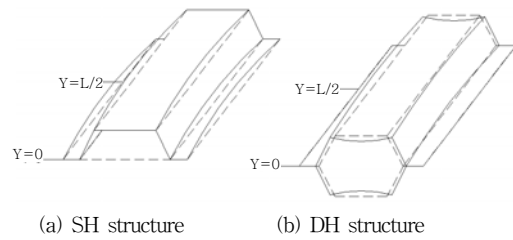


Fig. 23 Schematic diagram of weld distortion

3.3 구조물에 형상에 따른 변형양상 비교

구조물 형상에 따른 비교를 위해 우선 20 mm 높이의 SH구조와 DH구조에 대해 보면(Fig. 19와 21), 용접선에서 SH구조의 변형은 약 1 mm인데 비해 DH구조에서의 변형은 약 0.226 mm로 낮았다. 윗판에서의 변형을 비교해 보면 SH일 때 약 0.905 mm, DH일 때 약 1.274 mm로 오히려 DH구조에서의 변형이 0.369 mm 정도 더 크게 나타났다(Fig. 20과 22).

즉, SH와 DH구조를 비교해 보면 동일한 높이의 구조물인 경우 용접 후 구조물의 최대 높이차가 DH구조에서 더 크게 나타났다. 용접 후 굽힘 변형은 SH가 컸음에도 불구하고 전체적인 변형량은 DH구조의 경우가 더 크게 나타난 것은 Fig. 23과 같이 양단에서의 단면형상 변형으로 인해 윗판의 높이가 감소하였기 때문이다. 결과적으로 DH구조물의 경우에 굽힘 변형보다는 단면형상의 변형이 주도적인 변형임을 알 수 있다.

DH 구조물에서 이와 같은 변형양상이 나타나게 된 원인은 용접선에서의 수축에 의해 중간지점(Y=L/2)에서는 양 쪽 용접선이 가까워지고, 양단(Y=0, L)에서는 서로 멀어지는 방향으로 변형을 유발하여 궁극적으로 단면의 형상 변형을 유발하였기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 구조물의 양단(Y=0, L)에서 X-방향으로의 인장응력에 대한 강성이 작기 때문에 단면형상의 변형이 크게 발생한 것이다.

4. 결 론

Al5052 박판재를 사용한 용접구조물의 변형 해석을 위한 수치해석 모델을 구축하였다. 본 해석 모델을 이용하여 크게 두 가지 형태의 관형 구조물을 대상으로 용접 변형 해석을 수행하였다. 실험을 통해 수치해석 모델의 유의성을 검증한 후 두 가지 구조물의 일반적인 변형 양상과 구조물의 높이에 따른 변형량을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 동일한 모양의 단면형상을 가진 구조물인 경우 높이가 클수록 굽힘 변형량이 작게 나타났으며, 전체적인 변형량도 작았다.

2) 높이가 같은 경우에 단면형상에 따라 용접변형의 양상이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 즉, SH구조물의 경우 굽힘변형이 주도적으로 발생한 반면 DH구조물의 경우는 단면형상의 변형이 주도적으로 발생하는 것을 알 수 있었다.

3) SH구조물보다 DH구조에서 전체적인 용접변형이 더 크게 나타난 것은 DH구조가 폭방향 (X-방향) 인장력에 대한 저항강성이 작아서 단면형상의 변형이 크게 나타났기 때문이다.

4) 용접변형의 관점에서 볼 때에, 용접선 위치에서의 굽힘 변형량이 작아야 하는 경우는 DH구조물이 적합하고, 단면형상의 변형이 작아야 하거나 폭방향 인장력에 대한 강성이 중요시 되는 경우에는 SH구조물이 더 적합함을 알 수 있었다.

5) 이상과 같이 Al합금재료의 용접구조물을 해석할 수 있는 수치해석 모델을 구축함과 아울러 단순한 관형 용접구조물의 변형에 관한 기초자료를 구축할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. D. Radaj, Heat Effects of Welding - Temperature Field, Residual Stress, Distortion. Springer-Verlag, Berlin (1992)
2. Dr. Nisith and R. Mandal, Aluminum Welding, Woodhead Publishing Ltd - Cambridge England Alpha Science International Ltd. Pangbourne, (2002)
3. J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby: A new finite element model for welding heat sources, Metallurgical Transactions B. June (1984), 299-305
4. J. G. Kaufman : Properties of Aluminum Alloys, The Aluminum Association, Inc. and ASM International, (1999)
5. V. A. Karkhin, A. S. Ilin, H. J. Pesch, A. A. Prikhodovsky, V. V. Plochikhine, M. V. Makhutin¹, and H.-W. Zoch: Effects of latent heat of fusion on thermal processed in laser welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining, 10-5 (2005), 597-603
6. M. Palmonella, M. I. Friswell, J. E. Mottewshead, A. W. Lees: Finite element models of spot welds in structural dynamics - review and updating, Computers and Structures, 83 (2005), 648-661
7. C. L. Tsai, S. C. Park, and W. T. Cheng: Welding distortion of a thin-plate panel structure, Welding Research Supplement, May (1999), 156-165
8. P. Dong : Residual stresses and distortions in welded structures: a perspective for engineering applications, Science and Technology of Welding and Joining, 10-4 (2005), 389-398
9. G. A. Moraitis and G. N. Labeas: Residual stress and distortion calculation of laser beam welding for aluminum lap joints, Journal of Materials Processing Technology, 198 (2008), 260-269