

&lt;학술논문&gt;

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.1.049>ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 수치해석모델을 이용한 강판재의 종굽힘 용접변형 생성기구의 해석

김용래\* · 엄괄신\* · 송규영\*\* · 김재웅\*\*

\* 영남대학교 공과대학 기계공학부, \*\* 경북하이브리드부품연구원

### Analysis of the Mechanism of Longitudinal Bending Deformation Due to Welding in a Steel Plate by Using a Numerical Model

Yong Rae Kim\*, Jieshen Yan\*, Gyu Yeong Song\*\* and Jae-Woong Kim\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.

\*\* Kyongbuk Hybrid Technology Institute,

(Received September 9, 2016 ; Revised October 10, 2016 ; Accepted October 12, 2016)

**Key Words:** Longitudinal Bending(종굽힘), Welding Deformation(용접변형), Finite Element Analysis(유한요소해석)

**초록:** 용접변형이란 용접열원에 의해 구조물에 생성되는 불균일 온도분포에 의해서 발생하는 영구적인 변형이다. 용접변형은 용접구조물의 강도와 외관 및 치수 정밀도를 저하시킴으로써 생산성 저하의 주원인이 되기도 하며, 이러한 용접변형을 제어하기 위해 많은 실험과 연구가 수행되었다. 본 논문은 용접 시 발생하는 변형 중에 하나인 종굽힘에 대하여 실험과 수치적 해석결과를 통해 비교 및 분석하였으며, 이를 통해 종굽힘 용접변형의 생성기구에 대하여 연구한 것이다. 용접실험은 4, 8.5 mm 두께의 평판에 대해 실시하였으며, 수치적 해석은 MSC.marc 상용프로그램을 사용하였다.

**Abstract:** Welding deformation is a permanent deformation that is caused in structures by welding heat. Welding distortion is the primary cause of reduced productivity, due to welded structural strength degradation, low dimensional accuracy, and appearance. As a result, research and numerous experiments are being carried out to control welding deformation. The aim of this study is to analyze the mechanism of longitudinal bending deformation due to welding. Welding experiments and numerical analyses were performed for this study. The welding experiments were performed on 4 mm and 8.5 mm thickness steel plates, and the numerical analysis was conducted on the welding deformation using the FE software MSC.marc.

### 1. 서론

용접공정은 재료를 부분적으로 가열하여 용융시키고 접합하여 냉각시키는 과정이다. 용접변형이란 용접에 의해 용접구조물에 최종적으로 잔류되는 영구적인 변형을 말하며, 이는 용접이 실시되는 작업에서 필연적으로 발생하게 된다.

용접 시 발생하는 온도상승은 재료의 기계적 성질과 항복응력의 저하를 야기한다. 또한, 구조물의 국부적인 가열에 의해 발생하는 열전달로

인하여 내부에 불균일한 온도분포가 연속적으로 생성된다. 불균일한 온도분포는 구조물 내부의 열팽창량의 차이를 유발시키고, 내외적 구속에 의해 열응력이 발생하게 된다. 이 때 발생한 열응력이 부분적으로 항복응력을 넘어서게 됨으로써 소성변형을 일으키게 된다. 이렇게 발생한 용접변형은 용접 후에도 영구적으로 잔류하게 된다. 용접변형은 소성변형과 함께 탄성변형도 포함하는데, 탄성변형량은 용접잔류응력과 평형을 유지할 정도로만 발생한다.<sup>(1-4)</sup>

이러한 용접변형은 용접구조물의 강도와 외관 및 치수 정밀도를 저하시킴으로써 생산성을 떨어

† Corresponding Author, [jackim@ynu.ac.kr](mailto:jackim@ynu.ac.kr)

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

트리는 주원인이 되기 때문에, 용접변형을 제어하기 위하여 많은 연구와 실험이 진행되고 여러 방법들이 제시되었다.<sup>(5-7)</sup>

본 논문은 여러 가지 형태의 용접변형 중 용접선 길이 방향으로 발생하는 종굽힘(longitudinal bending)의 변형기구에 대하여 실험과 수치적 해석을 통해 분석하고, 그 원인을 구체적으로 입증하고자 함에 그 목적을 두고 있다. 또한, 수치적 해석을 통하여 종굽힘 모드의 천이두께를 연구함으로써 용접변형을 예측하기 위한 기초자료를 구축하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 용접실험

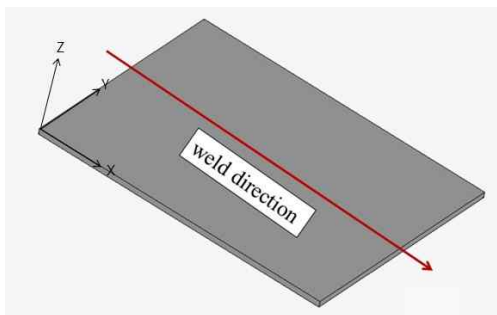
용접 종굽힘 변형의 양상과 변형량을 측정하기 위하여 시편 센터라인에 bead on plate 용접을 수행하였다. 용접은 TIG(tungsten inert gas) 용접으로 실시하였으며, 용접구조물의 치수와 용접방향 및 위치는 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 시편두께의 경우 4 mm와 8.5 mm 두 가지에 대하여 실험을 실시하였다. 시편은 S20C로 선정하여 실험을

**Table 1** The measurements of weldment

Length	200 mm
Width	150 mm
Thickness	4, 8.5 mm

**Table 2** The TIG welding parameters

Weld current	150 A (DC)
Weld voltage	12 V
Weld speed	5 mm/s
Arc length	3 mm
Shielding gas	Ar (15l/min)



**Fig. 1** The direction and position of welding

수행하였다.

Table 2에 용접실험에 대한 조건을 나타내었다. 용접전류와 용접전압은 각각 150 A, 12 V로, 용접과위는 1.8 kW이다. 또한 용접변형이 자유롭게 발생하도록 용접 중 시편에 물리적인 구속력은 가하지 않았다.

### 2.2 용접변형 측정

용접 실험을 완료한 후 용접변형을 측정하였다. 측정 정밀도를 높이기 위하여 3차원 정밀측정기를 이용하였다. 측정은 시편 상부면에 위치한 비드에서 발생하는 오차값을 피하기 위하여 시편의 하부면에서 실시하였으며, 시편의 중심점에서 X(200 mm), Y(150 mm)축 전체 길이에 대하여 측정하였다.

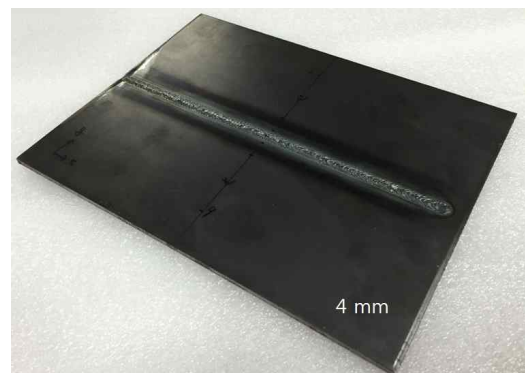
여기서, X축 길이에 따른 Z축 방향의 변형을 종굽힘, Y축 길이에 따른 Z축 방향의 변형을 각 변형(angular distortion)이라 한다.

## 3. 실험 결과

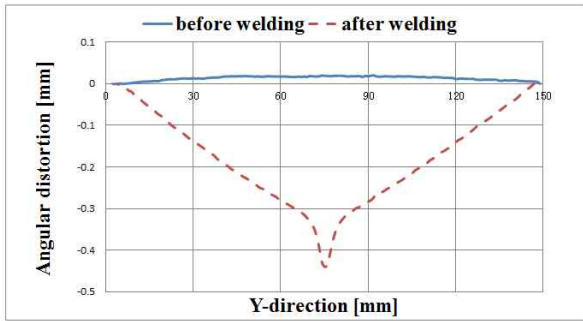
용접실험 후 시편(4 mm)을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2를 통해 용접시편에 발생된 용접변형을 육안으로 확인하기 힘들기 때문에, Fig. 3, 4에 4, 8.5 mm 두께의 용접구조물에 대하여 용접 전, 후의 종굽힘량과 각변형량의 측정치를 나타내었다.

Fig. 3과 4의 용접 후 변형값은 초기 변위 값을 고려하여 나타낸 것이다. Fig. 3과 4에서 각변형의 경우 두 시편 모두 아래로 처짐을 확인할 수 있다. 이때 최대 각변형량은 용접선상에서 발생하였으며 4, 8.5 mm 두께 시편 각각 -0.42, -0.56 mm 이다.

한편, 종굽힘의 경우 두 시편에 대해 반대방향



**Fig. 2** The welded specimen

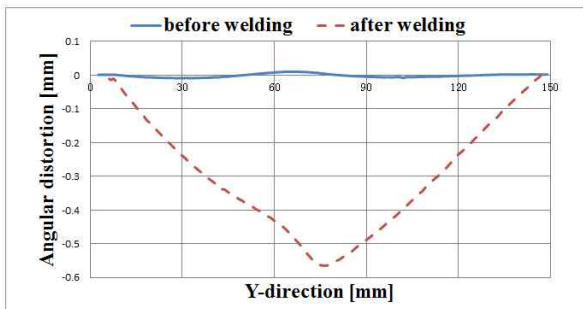


(a) Angular distortion

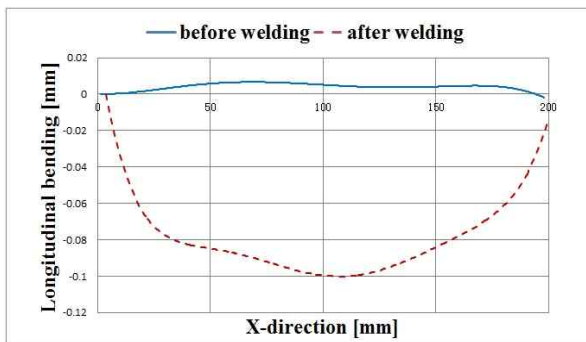


(b) Longitudinal bending

Fig. 3 The welding deformations of 4 mm thickness plate



(a) Angular distortion



(b) Longitudinal bending

Fig. 4 The welding deformations of 8.5 mm thickness plate

으로 변형이 발생한 것을 확인할 수 있다. 4 mm 두께 시편의 경우 위로 볼록한 형상(이하 볼록형)의 종굽힘이 발생하였으며 그 값은 약 0.18 mm이다. 8.5 mm 두께 시편의 경우 아래로 처지는 형상(이하 오목형)을 나타내며 약 -0.10 mm이다.

종굽힘 변형의 형상은 상이하게 나타났으나 최대 종굽힘 변형량은 역시 용접선상에서 발생됨을 확인할 수 있다.

#### 4. 수치적 해석

##### 4.1 수치적 해석 모델링

실제 용접과정 중에 실시간으로 파악이 불가능한 여러 인자들의 분석을 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통하여 상이한 패턴의 종굽힘변형의 원인을 파악하고자 함에 그 목적이 있다.

Fig. 5에 유한요소 모델을 나타내었다. 수치해석에 적용된 물성치는 Table 2와 같으며, 그 외 열전도도(thermal conductivity)는 42.3W/m°C, 프와송 비(Poisson's rate)는 0.3이다. 해석 프로그램은 상용 소프트웨어(MSC.marc)를 사용하였다.

Table 3 Material properties of S20C

Temp. [°C]	E-modulus [GPa]	Expansion coefficient [10 <sup>-5</sup> /°C]	Specific heat [J/kg°C]
20	212	1.18	460
200	199	1.40	533
400	182	1.58	615
600	165	1.64	778
1500	74	1.64	778

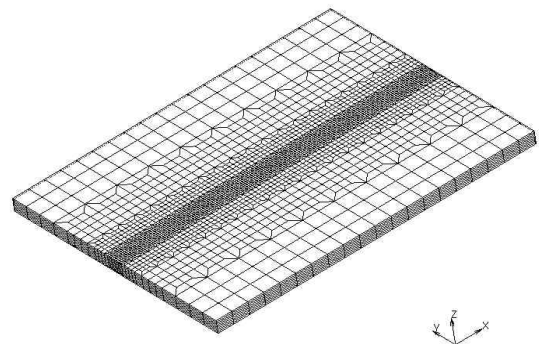


Fig. 5 The finite element of model (8.5t)

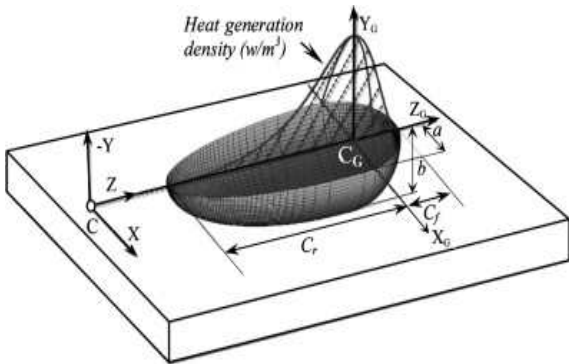


Fig. 6 Goldak's double ellipsoidal shaped weldheat source model

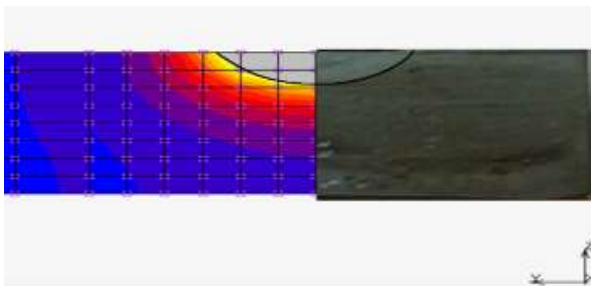


Fig. 7 Comparison of bead size between experiment and analysis result (8.5t)

4.2 수치적 해석 열원 모델링

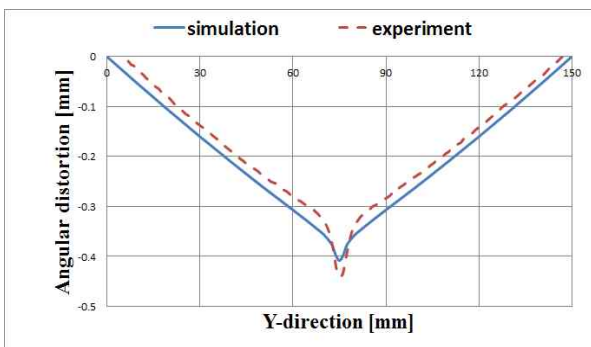
수치적 해석에서 용융부의 크기는 실제와 유사하게 모델링해야 한다. 따라서 3차원 열원모델에 가장 적합하다고 알려져 있는 Fig. 6에 나타난 골닥의 이중 타구형 열원모델(Goldak's double ellipsoidal shaped weldheat source model)을 이용하였다.<sup>(8)</sup>

Fig. 6에 나타난 Goldak 열원모델의 변수(a, b, c<sub>f</sub>, c<sub>r</sub>)를 조절하여 반복적으로 수치적 해석을 수행한 결과, Fig. 7과 같이 실제 용융부와 거의 유사한 용융지 사이즈를 구현하였다. 이때 결정된 변수 a, b, c<sub>f</sub>, c<sub>r</sub>의 값은 각각 4, 2, 2, 5 mm이다.

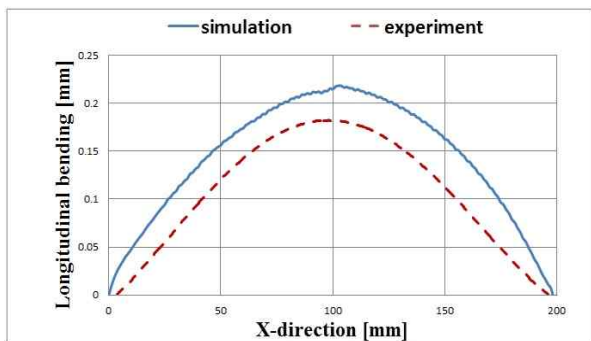
4.3 수치해석 결과 및 분석

Fig. 8과 9에 각각 4, 8.5 mm 두께의 시편에 대한 용접변형의 실험값과 수치해석값을 비교하였다. 수치해석 결과, 실험값과는 약간의 오차가 발생하였지만 전체적인 변형의 유형은 실험값과 같음을 확인할 수 있다.

실험 및 수치해석을 통하여 4 mm 두께의 시편에서는 볼록형 종굽힘이, 8.5 mm 두께의 시편에서는 오목형 종굽힘이 발생한 것을 확인하였다.

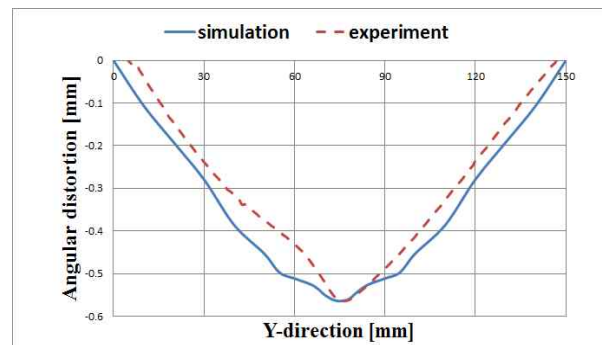


(a) Angular distortion

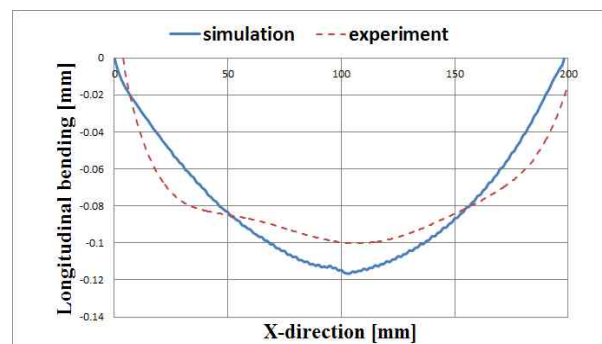


(b) Longitudinal bending

Fig. 8 Comparison of deformations experiment and analysis result (4t)

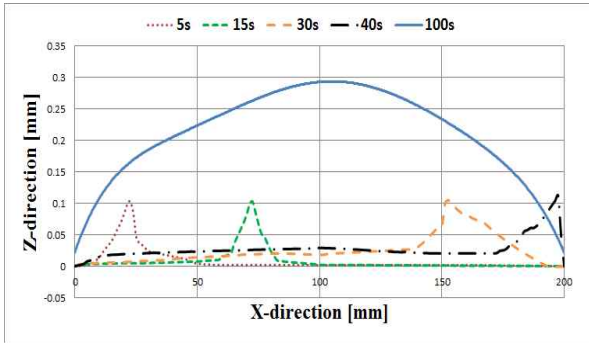


(a) Angular distortion

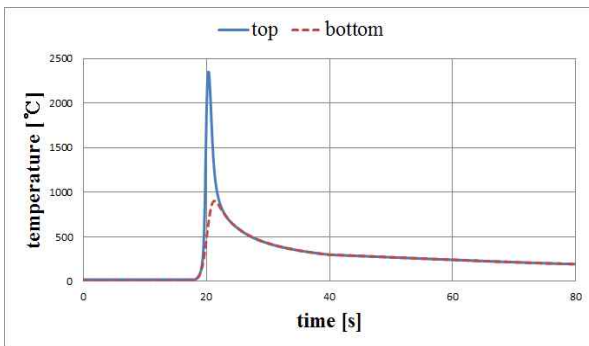


(b) Longitudinal bending

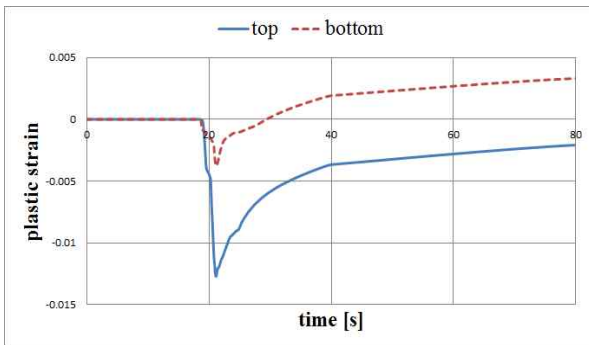
Fig. 9 Comparison of deformations experiment and analysis result (8.5t)



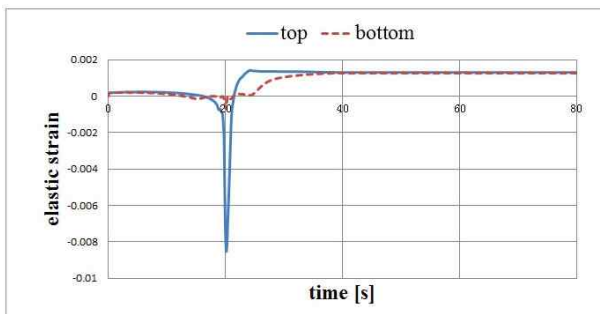
(a) Z-displacements according to time step



(b) Temperature history(x=100 mm, y=75 mm)



(c) Plastic strain( $\epsilon_x^p$ ) history (x=100 mm, y=75 mm)



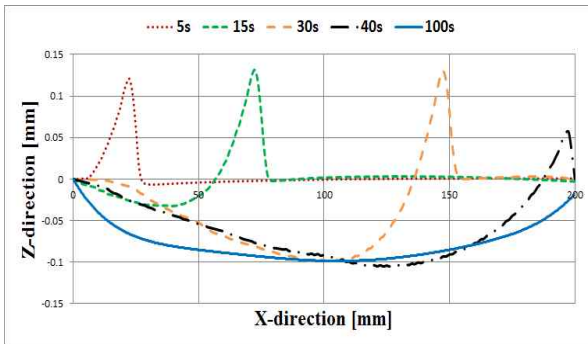
(d) Elastic strain( $\epsilon_x^e$ ) history(x=100 mm, y=75 mm)

Fig. 10 Various factors in analysis (4t)

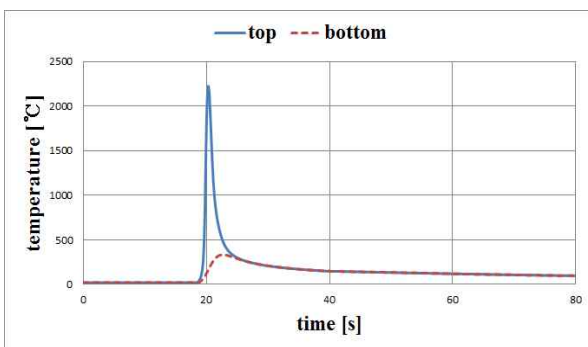
이러한 종굽힘변형의 양상이 바뀌는 원인을 규명하기 위하여 수치적 해석 과정에서 나타나는 여러 인자들을 분석하였다.

Fig. 10에 4 mm 두께의 용접수치해석 중에 나타나는 인자들의 변화를 나타내었다. Fig. 10(a)에는 시간에 따른 용접 상부면의 Z축 변위를 나타낸 것이며, (b)~(d)는 시편의 길이방향 중간지점(x=100 mm)에서의 온도, 소성변형률, 그리고 탄성변형률의 시간에 따른 이력을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 용접열원 직하 지점에서는 고온에 의한 팽창 및 강성의 약화로 인하여 +Z방향으로 변위가 발생하였으며, 열원이 지나간 후에도 표면의 높이가 원래보다 높은 상태로 잔류하는 것을 볼 수 있다. 한편, Fig. 10(b)를 통해 약 22초 이후에 상면과 하면의 온도가 거의 동일하게 되게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 소성변형률도 증가하여 약 25초 이후에는 증가율이 거의 동일해지는 것을 Fig. 10(c)를 통해 확인할 수 있다. 즉, 용접 초기에는 상부면에서 재료의 팽창에 의한 압축 소성변형이 다량 발생하며, 약 25초 이후에는 상하면이 동시에 수축함에 따라 소성변형이 증가하는 방향으로 진행되었다. 최종적으로 상부면에서 -0.00074, 하부면에서 0.00435의 소성변형률을 나타내고 있다. 따라서 상부면에서는 팽창에 의한 압축소성이 잔류하고 있으며, 하부면에서는 수축에 의해 인장소성에 의해 볼록형 종굽힘이 발생하게 된다. 한편 Fig. 10(d)에 나타낸 탄성변형률의 경우, 22초 이후 상부면에서의 값이 하부면보다 크게 나타났으나 약 30초 이후 거의 동일한 값이 되어 상하면부에 동일한 인장력이 가해지므로 종굽힘변형의 곡률형성에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

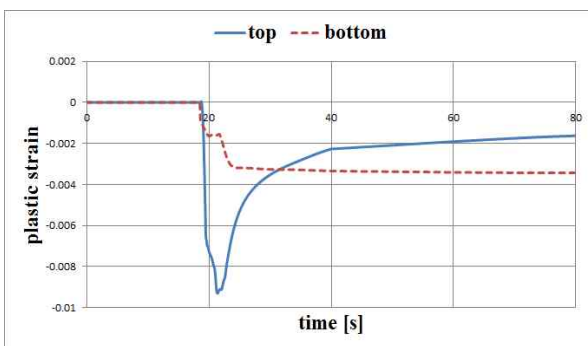
Fig. 11에 8.5mm 두께의 용접수치해석에서 도출한 각 인자들의 변화를 나타내었다. Fig. 11(a)에서 4 mm 두께의 경우와 마찬가지로 용접열원 직하 지점에서는 +Z방향으로 변위가 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 열원이 지나간 후에는 표면의 높이가 원래보다 낮은 상태로 잔류하는 것을 볼 수 있다. 온도이력 역시 25초 이후에는 상하면이 거의 동일함을 나타내고 있다. 또한 Fig. 10(c)와 같이 상부면에서의 소성변형률이 25초 이후 급격히 증가하나, 하부면에서는 증가가 나타나지 않는다. 최종적으로 상부면에서 -0.00116, 하부면에서 -0.00316의 소성변형률을 나타낸다. 즉, 상



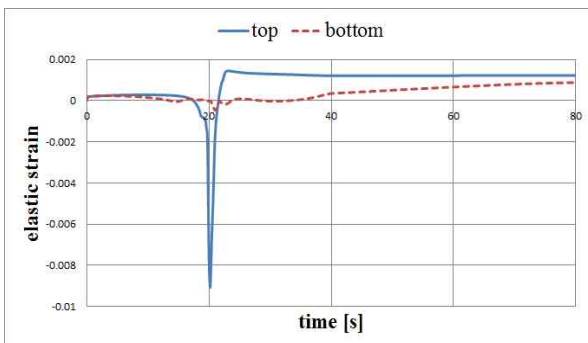
(a) Z-displacements according to time step



(b) Temperature history(x=100 mm, y=75 mm)



(c) Plastic strain( $\epsilon_x^p$ ) history(x=100 mm, y=75 mm)



(d) Elastic strain( $\epsilon_x^e$ ) history(x=100 mm, y=75 mm)

Fig. 11 Various factors in analysis (8.5t)

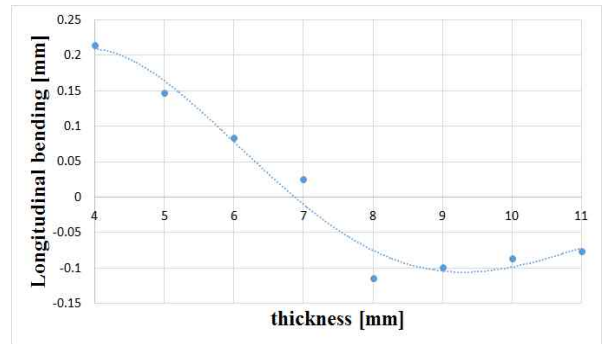


Fig. 12 The maximum longitudinal bending values according to plate thickness

하부면 모두 압축소성변형이 잔류하고 있으나, 상부면 보다 하부면에서 팽창에 의한 압축소성이 더 크게 잔류하였다. 따라서 상부면에서는 수축에 의해 소성변형의 증가가 지속적으로 일어났고, 하부면에서 소성변형의 증가가 더 이상 진행되지 않은 관계로 오목형 종굽힘이 발생됨을 추론할 수 있다. 아울러 탄성변형률의 경우도 열원이 지나간 이후 지속적으로 상부면에서 더 큰 인장응력이 형성되어 오목형 종굽힘의 발생에 기여하고 있는 것으로 판단된다.

한편, 용접에 의해 발생하는 종굽힘모드의 변화인자로 Z방향 중립축에 대해서도 고려할 수 있다. 후판재(8.5t)의 경우 용융지의 최대깊이는 1.9 mm로 소성변형 영역이 판재의 Z방향 중립축에 대해 주로 상부에 작용하므로 오목형 변형에 기여한다. 박판재(4t)의 경우 용융지의 최대깊이는 2.1 mm로 소성변형 영역이 판재의 Z방향 중립축에 걸쳐있으나, 가열시 상부의 팽창이 볼록형 변형에 기여하고 냉각시 수축이 동시에 발생하는 관계로 중립축의 효과보다는 탄소성변형의 영향이 더욱 크게 작용한 것으로 판단된다.

#### 4.4 종굽힘 모드의 변환 분석

실험 및 수치적 해석을 통하여 박판재(4t)에서는 볼록형 종굽힘이, 후판재(8.5t)에서는 오목형 종굽힘이 발생됨을 확인하고 그 원인을 파악하였다. 결과를 바탕으로 동일한 조건으로 용접을 수행한다면 두께의 변화에 따라 종굽힘의 모드가 바뀌는 천이두께가 있음을 유추할 수 있으며, 이를 살펴보고자 추가 수치적 해석을 수행하였다.

Fig. 12는 두께를 4 mm 두께서부터 시작하여 1 mm씩 증가시켜 11 mm 두께까지 수치해석을 수행하고 최대 종굽힘값을 이용하여 피팅선으로 나

타낸 것이다. Fig. 12를 통하여 본 연구에 적용된 용접조건에 대하여 종굽힘 모드변환의 천이두께가 약 7 mm 임을 확인할 수 있었다. 즉, 7 mm 보다 얇은 두께에서는 볼록형 종굽힘이, 7 mm 보다 두꺼운 두께에서는 오목형 종굽힘이 발생하는 것을 예측할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 평판용접 시 발생하는 용접변형에 대하여 분석하였다. 특히, 시편 두께에 따른 종굽힘의 양상이 다르게 나타나는 원인을 실험과 수치적 해석을 통하여 규명하고자 하였다. 실험 및 수치해석의 수행을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 용접 실험 및 수치적 해석을 통해 용접변형을 예측할 수 있는 수치해석 모델을 구축하였다.

(2) 4, 8.5 mm 두께의 용접 종굽힘변형의 생성과정을 시간에 따른 변형률의 해석을 통해 규명하였다.

(3) 4 mm 두께의 경우 용접 진행 시 상부면에서 열팽창이 크게 발생하는 반면, 두께가 얇은 관계로 냉각 시에는 동시에 수축함으로써 볼록형 종굽힘이 발생하게 된다.

(4) 8.5 mm 두께의 경우 상하부면의 온도차이가 4 mm 두께에 비하여 많이 발생하게 되고, 자체 구속력이 크기 때문에 가열시 상부면에서의 압축 소성변형률이 하부면 보다 크게 형성되었다. 또한 냉각 시 상부면의 인장소성변형이 하부면 보다 크게 나타나며, 이로 인하여 오목형 종굽힘이 발생하게 된다.

(5) 수치적 해석을 통하여 주어진 용융부 사이에 대해 종굽힘변형의 양상이 달라지는 천이두께를 구할 수 있었다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Dong, P., 2005, "Residual Stress and Distortions in Welded Structures," *Journal of Science and Technology of Welding and Joining*, 10-4, pp. 389~398.
- (2) Yang, Y.-S., 2005, "Generation Mechanism and Analysis of Welding Distortion," *Journal of KWJS*, 23-4, pp. 317~321.
- (3) Jang, G.-B. and Kang, S.-S., 2000, "Numerical Modeling of the Transformation Temperature Effect on the Relaxation of Welding Residual Stress," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 24, No. 10, pp. 2552~2559.
- (4) Kim, Y. R., Wang, C. and Kim, J. W., 2015, "Experimental Study of the Redistribution of Welding Distortion According to the Partial Removal of Welded Structure," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 7, pp. 707~712.
- (5) Kim, C.-G., Kim, J.-W. and Kim, K.-C., 2007, "Welding Distortion Analysis of a Laser Welded Thin Box Structure," *Journal of KWJS*, 25-5, pp. 72~77.
- (6) Kwon, K.-B., Kim, J.-W. and Kim, C.-H., 2009, "Analysis of Welding Distortion for Laser Welded Sheet Metal Structure of Aluminum Alloy," *Journal of KWJS*, 27-3, pp. 44~51.
- (7) Wang, C., Kim, Y.-R. and Kim, J.-W., 2016, "Numerical Modelling of Welding Distortion Redistribution due to the Change of Self-constraint in a T-joint Welded Structure," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30-6, pp. 2683~2690.
- (8) Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., 1984, "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 15, pp. 299~305.