박판 레이저용접시 회전변형 특성

박정웅* · 이종봉** · 안규백***,† · 김상민* · 서환웅*

*조선대학교 토목공학과

**포항금속소재산업진흥원

***조선대학교 선박해양공학과

Characteristic of Welding Rotational Deformation in Laser Welding of Thin Steel Sheet

Jeong-Ung Park*, Jong-Bong Lee**, Gyubaek An***,†, Sang-min Kim*,
and Hwan-woong Seo*

*Dept. of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452, Korea

**Pohang Institute of Metal Industry Advancement, Pohang, 37673, Korea

***Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452, Korea

†Corresponding author : gyubaekan@chosun.ac.kr

(Received July 26, 2018 ; Revised August 14, 2018 ; Accepted September 17, 2018)

Abstract

Recent trends in the automobile industry have demanded the improvement of the fuel efficiency to reduce the emission gas by strengthening the environment and environmental regulations to minimize air pollution. It becomes serious social problems in recent years and safety improvement for accident reduction is required. In order to meet these demands, various applications of high strength materials and laser welding have been applied. In this study, we investigated the effect of flange edge width on rotational deformation of flange end during laser welding of TWIP steel for automobile body. For this purpose, the amount of rotational deformation by welding was analyzed by an FE analysis while the distance between the heat source and edge was changed as 1.5mm, 2.5mm and 3.5mm. The maximum deformation occurred at 60% of the total weld length after the start of welding. The size of deformation was larger as the distance between the heat source and edge were shorter. The relative displacements of both fusion lines were analyzed to investigate the effect of tensile displacement on the solidification crack. The tensile displacement at the welding start position was larger as the distance between the welding heat source and edge was shorter.

Key Words : Laser welding, Thermal elastic plastic analysis, Rotational deformation, Thin steel sheet, Solidification crack

1. 서 론

최근 자동차 산업 동향은 더욱 심각한 사회문제로 대두되고 있는 환경보호와 대기오염을 최소화 하기 위한 환경규제가 강화되어 배출가스를 최소화 하고 자동차 연비향상과 제조물책임(PL)법에 따라 교통사고 저감을 위한 안전도 향상이 요구되고 있다. 이러한 요구에 부

응하기 위해서는 고강도 소재 및 레이저용접의 확대적용이 필요하다.

외국 선진자동차 업체는 자동차 부품의 제작 및 조립 단계에 레이저 용접^{1,2)}의 적용이 활발히 확장되고 있다. 이러한 추세에 맞추어 국내 자동차 업계에서도 국제 경쟁력을 유지하기 위해 레이저 용접을 확대 적용하고 있다. 레이저 용접은 열에너지가 고밀도로 집속된 빔을 사용하여 재료를 용융, 접합하는 방법으로 아크용접이

나 저항용접과 같은 기존의 용접공정에 비하여 용접부 특성이 매우 우수하고 생산성이 높은 특징을 가지고 있다.

또한 금속적인 측면에서는 강도 및 성형성이 우수한 DP강, TRIP강 등의 개발이 진행되고 있다. 최근 고 Mn강은 고강도 특성을 나타냄과 동시에 성형성이 매우 우수한 강종으로 주목을 받고 있다^{1,2)}. 이 강은 1880년 Hadfield가 개발한 이래, 자동차용 강재로서 Fe-Mn-C계³⁾, Fe-Mn-C-Al계⁴⁾, Fe-Mn-C-Al-Si계⁵⁾ 강종들에 대한 연구가 이루어지고 있다. 최근에는 FeMn TWIP (Twinning Induced plasticity)강⁶⁾에 대한 개발 및 응용연구가 진행되고 있다. 이들은 주로 자동차 구조재료로서의 적용확대를 위해 노력하고 있으며, 특히 높은 강도와 가공성을 이용하여 차량의 경량화뿐만 아니라 제조원가 절감에도 큰 기여를 할 것으로 기대되고 있다.

특히 이러한 고강도 강재로 이루어진 차체의 플랜지 단부를 레이저 용접 적용시 고온균열이 발생되고 있다는 보고서가 있다^{7,8)}. 고온균열^{9,10)}에 영향을 주는 다양한 인자 중 본 연구에서는 회전변형^{11,12)}에 의한 고온균열의 발생에 주안점을 두었다. 회전변형은 강판의 불균일한 온도분포에 발생하는 열팽창량의 차이에 의해 발생된다. 또한 용접열원의 속도가 빠르면 용접 그루브(groove)를 벌리려는 회전변형이, 속도가 느리면 용접 그루브를 닫으려는 회전변형^{13,14)}이 발생하는 것이 특징이다. 레이저 용접과 같이 용접속도가 빠른 경우 용접 그루브를 벌리려고 하는 힘이 작용하게 되고 이는 용접부가 아직 냉각되지 않은 상태에서 역학적으로 회전변형에 대한 저항능력이 없어 고온균열이 발생하는 원인을 제공한다. 회전변형은 기하학적 형상, 자체강성 등에 의해 영향을 받으며 강성이 강 할수록 회전 변형량이 작아진다.

본 연구는 자동차 차체용 TWIP강의 레이저 용접시 플랜지 단부의 회전변형에 관한 것으로 플랜지의 단부로부터 용접열원까지의 거리가 회전변형에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 플랜지 일단은 고정하고 타단의 플랜지 폭을 변화시키면서 용접에 의한 회전변형량을 해석적 방법으로 분석하였다.

Fig. 1 Geography of specimen and distance between welding source and edge

Fig. 2 Macro section of laser welding

2. 모델링

해석에 사용된 3가지 모델을 Fig. 1에 보여주고 있다. 모든 시험편의 두께는 1.4mm이고, 그림과 같이 한쪽은 clamping되어 있고 타단은 자유단이다. 레이저 용접은 자유단으로부터 1.5mm, 2.5mm, 3.5mm 이격되어 실시된다. Fig. 2는 Disk 레이저용접의 마크로 단면으로 레이저 출력은 3kW이고, 용접속도는 10m/min이다. 이 단면 마크로를 이용하여 해석모델의 열원단면

Fig. 3 Analysis model(Distance from the edge; 1.5mm)

을 모델링하였다. 부재의 두께는 얇고, 고밀도 열원을 사용함으로 열원이 두께방향으로 일정하게 관통된 형상을 하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 용접 열원으로부터 단부까지의 거리가 1.5mm 인 해석에 사용한 모델의 메쉬형상을 보여주고 있다. 용접부 메쉬형상은 Fig. 2의 실험에 의한 단면 마크로를 이용하였다. 경계조건은 실험과 같이 한쪽 단부만 모두 구속하였다.

해석에 사용한 강재는 YP500MPa TWIP강을 사용하였다. Fig. 4는 두 강재의 온도변화에 따른 항복강도, 인장강도, 종탄성계수, 그리고 열전도율을 보여주고 있다.

3. 연단거리가 회전변형에 미치는 영향 및 고찰

레이저 용접열원과 연단과의 거리에 따른 회전변형 특성을 밝히기 위해 Fig. 1의 3가지 모델, 연단거리 1.5mm, 2.5mm, 3.5mm 에 대해 열탄소성해석을 수행하였다. 열탄소성해석은 범용프로그램인 MSC. Marc를 사용하였다. 해석에 사용한 재료는 TWIP강이며, 온도에 대한 특성은 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 연단거리가 1.5mm의 모델에 대한 온도해석결과를 보여주고 있다. 레이저 열원이 이동함에 따라 열원 뒤에 발생하는 온도구배를 보여주고 있다. Fig. 6은 열탄소성해석 결과로부터 용접시간(0.165s, 0.3s, 0.45s, 0.75s(용접완료 직후), 3,600s(용접완료 후 부재의 온도가 실온이 되었을 때)과 그 때의 위치를 보여주고 있다.

Fig. 6 Position of analysis results according to time

Fig. 7은 3가지 연단거리에 따른 용접과도변형과 잔류변형의 특성을 알아보기 위해 용접시간에 따라 용접 전길이에 발생하는 용접부 두께중앙에서 부재의 폭방향(x)의 변형을 보여주고 있다. 용접이 진행됨에 따라 연단거리가 짧을 수 록 변형은 더 크게 발생하고 있다. 최대 변형은 용접이 완료되는 0.75 sec 근처에서 발생하였다. 연단거리 1.5mm인 경우 연단거리 3.5mm에 비해 1.5배의 변형이 발생되었다. 이러한 변형은 용접 부로부터 단부까지의 거리가 길수록 강성이 강해 변형을 억제하기 때문이다. 변형량의 크기를 비교하기 위해 Fig. 8에 중앙의 최대변위를 시간에 따라 나타내었다. 최대의 변위는 용접이 용접전체길이의 약 60%에 도달했을 때 발생하고 냉각이 되면 반대 방향에서 변형이 발생되었다. 이러한 변형은 Fig. 9로부터 설명할 수 있다. 본 시험체는 용접부가 용접구조물의 중립축을 중심으로 우측에 위치하고 있기 때문에 용접열에 의한 팽창에 의해 모두 우측으로 팽창하는 변형이 발생하고, 냉

Fig. 4 Mechanical properties according to temperature

Fig. 5 Distribution of temperature in TWIP(YP500) steel(Distance from the edge; 1.5mm)

Fig. 7 Rotational deformation at welding center according to welding time and distance from the edge

Fig. 8 Maximum displacement(Dx) of the middle of welding length according to the distance from the edge

Fig. 10 Position of deformation

Fig. 9 Schematic diagram of production processing of welding deformation

각되면 팽창시 발생한 압축소성변형에 의해 용접부의 길이가 짧아져 왼쪽으로 볼록한 변형이 최종적으로 존재하게 된다.

보다 구체적인 변형발생 특성을 관찰하기 위해 해석결과로부터 폭방향(x)으로 발생하는 변형의 위치를 Fig. 10에 나타내었다. V1은 fusion line 왼쪽이고, V2는 fusion line 오른쪽을, 그리고 V3는 구속이 없는 자유연단을 나타내고 있다. Fig. 11은 연단까지의 거리에 따른 3개의 모델에 대해 용접 진행됨에 따른 3곳(V1, V2, V3)의 폭방향(x)의 변형을 보여주고 있다. 용접시 진행됨에 따라 V1과 V3은 Fig. 9에서 설명한 것과 같이 중립축을 중심으로 우측으로 변형이 발생하나 V2의 변형은 다른 2개의 위치와는 다른 변형형태를 보여주고 있다. V1과 V3은 우측으로 변형이 발생되고 있으나 V2는 부분적으로 왼쪽으로 변형이 발생되는 것을 알 수 있다. V2의 변형은 용접열원으로부터 연단까지의 거리가 길수록 더 작고 마이너스(왼쪽)으로 발생하였다. 또한 용접시작점에서의 변형량의 크기도 연단까지의 거리가 길수록 작게 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 3곳의 변형의 형태를 설명하기 위해 용접부를 중심으로하는 회전변형에 대해 개념적인 그림을

Fig. 11 Rotational deformation at V1, V2, V3 according to welding time and distance from the edge

보여주고 있다. 본 모델과 같은 구조물은 구조물 전체의 중립축을 중심으로 하는 변형(Fig. 9)과 용접부를

중심으로 하는 변형(Fig. 12)이 존재한다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 폭방향의 온도분포는 거의 비슷한 온도

Fig. 12 Schematic diagram of production processing of welding deformation

구배를 하고 있으나, 용접선 방향의 온도구배는 용접부에서는 고온 그리고 용접부로부터 떨어져 있는 곳은 실온이 되어 큰 온도 차이를 보여주고 있다. 회전 변형은 이러한 용접선방향의 온도구배의 차이에 의해 발생하고 용접부의 온도가 더 높기 때문에 팽창을 한다. Fig. 12에서 초기에는 용접된 길이가 짧아서 팽창하려는 힘이 부족하나 용접이 전체 길이의 약 60%가 되면 그림의 왼쪽으로 볼록한 과도 회전변형이 크게 발생한다. 과도 회전 변형은 용접이 완료되고 철판의 온도가 실온에 가까워지면 오른쪽으로 볼록한 변형이 발생한다. 이것은 과도 변형시 구속에 의해 발생한 용접부에서 수축 소성 변형이 온도가 냉각되어도 그대로 남기 때문이다.

역학적 관점에서 회전변형에 의한 고온균열이 발생되기 위해서는 용접금속부에 인장력이 작용하고 그 인장력을 용접금속부가 저항하지 못 할 때 고온균열이 발생한다. 따라서 Fig. 10에서 용접부 좌/우의 fusion line의 변위의 차이($Dv2-Dv1$)가 인장이면 고온균열이 발

생할 가능성 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 13는 Fig. 11의 변위에서 V2와 V1의 변위의 차이를 보여주고 있다. Fig. 13에서 변위의 차이($V2-V1$)가 마이너스(-)이면 용접부에 압축응력이, 플러스(+)이면 인장응력이 작용하는 것을 의미한다. 용접이 진행됨에 따라 용접시작 위치에서 마이너스 변위가 발생하여 인장력이 발생하고 나머지 부분에서 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 그 마이너스 변위의 크기는 연단거리가 1.5mm인 경우 제일 크게 발생하였고, 2.5mm와 3.5mm의 경우 다소 차이가 있으나 비슷한 변형양상을 보여주고 있다. 이러한 이유는 연단 거리가 짧을수록 회전강성이 작아 회전변형이 더 크게 발생하여 연단거리 1.5mm에서 제일 큰 인장변위가 발생하였고, 연단거리가 비교적 큰 2.5mm와 3.5mm에서는 회전변형을 억제되어 압축 변위가 더 크게 발생되었다. 따라서 본 모델의 경우 용접열원으로부터 2.5mm 이상으로 하는 것이 회전변형을 줄이고 고온균열 최소한 억제할 수 있다.

Fig. 13 Difference($V2-V1$) of displacement between both fusion lines according to welding time and distance from the edge

4. 결 론

본 연구는 자동차 차체용 TWIP강의 레이저 용접시 플랜지 단부의 회전변형에 관한 것으로 플랜지의 단부 폭이 회전변형에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 플랜지 일단은 고정하고 타단의 플랜지 폭을 변화시키면 용접할 때 회전변형량을 해석적 방법으로 분석하였다.

1) 용접변형이 발생하는 방향은 용접구조물의 중립축에 의해 영향을 받아 용접시에는 용접열에 의한 팽창으로 용접열원이 있는 부위가 팽창하는 변형이 발생하고, 냉각되면 팽창시 구속에 의해 발생한 압축소성변형에 의해 용접부의 길이가 짧아져 반대 방향으로 최종변형이 발생되었다.

2) 최대 변형은 열원이 용접시작 후 전체 용접길이의 60%되는 위치에 있을 때 발생하였다. 최대 변형의 크기는 열원과 연단거리가 짧을수록 용접변형은 더 크게 나타났다. 연단거리 1.5mm인 경우 연단거리 3.5mm에 비해 1.5배의 변형이 더 크게 발생되었다.

3) 용접부에 균열을 유발시키는 외력을 검증하기 위해 용접금속부 좌/우의 fusion line의 변위의 차이를 분석한 결과 용접시작점에서 연단거리 1.5mm가 연단거리 2.5mm와 3.5mm에 비해 큰 인장변위가 발생되었고, 그 외의 용접선에서 전체적으로 압축변위가 발생하였으나 연단거리 1.5mm가 연단거리 2.5mm와 3.5mm에 비해 더 작게 나타났다.

4) 회전변형 관점에서 용접부 고온균열의 발생가능성은 연단거리 1.5mm인 경우 매우 높으며, 연단거리 2.5mm와 3.5mm는 거의 비슷하게 나타났다.

후 기

이 논문은 2018년년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

ORCID: Jeong-Ung Park: <http://orcid.org/0000-0002-0584-7994>

ORCID: Gyubaek An: <http://orcid.org/0000-0003-4274-5716>

References

- Kim Jae Woong, Jang Beom Seon, Kim Yong Tai, Chun Kwang San, A Study On An Efficient Prediction Of Welding Deformation For T-Joint Laser Welding Of Sandwich Panel Part I : Proposal Of A Heat Source Model, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(3) (2013), 348-363
<https://doi.org/10.3744/JNAOE.2013.5.3.348>
- Hui Huang, Jiandong Wang, Liqun Li, Ninshu Ma, Prediction of laser welding induced deformation in thin sheets by efficient numerical modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, 227 (2016), 117-128
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.08.002>
- Y.G. Kim, T.W. Kim and S.B. Hong, High Strength Formable Automotive Structure Steel, *Proc. of ISATA, Aachen*, (1993), 269
- T.W. Kim, S.H. Park and Y.G. Kim, Development of High Strength High-Formability Steel Sheet for Automobiles, *Materia Japan*, 36 (1997), 502-504
<https://doi.org/10.2320/materia.36.502>
- L. Remy, A. Pineau, Twinning and Strain-induced F.C.C. → H.C.P. Transformation in the Fe Mn Cr C System, *Material Sci. Eng.*, 28 (1997)99
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(77\)90093-3](https://doi.org/10.1016/0025-5416(77)90093-3)
- T.W. Kim, J.K. Han, Patent WO 93/13233, Austenitic High Manganese Steel Having Superior Formability, *Strength and Weldability, and Manufacturing Process Therefore*, (1991)
- O. Graessel, G. Frommeyer, Effect of martensitic phase transformation and deformation twinning on mechanical properties of Fe-Mn-Si-Al steels, *Material Sci. Tech.*, 14 (1998), 1213
<https://doi.org/10.1179/mst.1998.14.12.1213>
- D. Cornette, P. Cugy, A. Hildenbrand, M. Bouzekri and G. Lavato, Ultra High Strength FeMn TWIP Steels for Automotive Safety Parts, *SAE Technical Paper, Detroit* 2005, 1 (2005), 1327
- Larsson, J.K., Lundgren, J, Asbjörnsson, E. and Andersson, H., Extensive Introduction of Ultra High Strength Steels sets New Standards for Welding in the Body Shop, *Proceedings 61st Annual Assembly of the International Institute of Welding (IIW), Joint Workshop Commission III & SC-Auto, Graz, Austria*, July (2008)
- Fermér, M., Jergeus, J., Johansson, R. and Larsson, J. K., Hot-Formed Steel in Car Body Structures, *International Automotive Body Conference (IABC), Munich, Germany*, September (2010)
- Masakazu Shibahara, Shinsuke Itoh, Hisashi Serizawa, Koji Masaoka, Hidekazu Murakawa, Development of 3D Finite Element Method for Hot Cracking Using Interface Element and Its Application for Pear-shaped Bead Cracking Under Narrow Gap Welding, *Journal of the Japan Welding Society*, 27(1) (2009), 81-88
- T.Branza et al., Study And Prevention Of Cracking During Weld-Repair Of Heat Resistant Cast Steels, *Journal of materials processing technology*, 209 (2009), 536-547
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.033>
- Jeong-ung Park, Gyubaek An and Seung-hyun Yang, Prediction and Welding Sequence of Minimum Welding Deformation in Large Steel Block Welding, *Journal of Welding and Joining*, 35(6) (2017), 8-14
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.2>
- Park Jeong-Ung, Lee Hae-Woo, The effects of welding length on the angular distortion. *Journal of KWS*, 23(4) (2005), 40-44