

장력법을 이용한 필릿용접변형의 감소에 관한 연구

이주성^{†*}, 박재우^{**}

울산대학교 조선해양공학부*, STX조선주식회사 LNG선 추진팀**

A Study on the Reduction of Fillet Welding Deformation
by Applying the Tensioning Method

Joo-Sung Lee^{†*} and Jae-Woo Park^{**}

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan*
LNGC Project Team, STX Shipbuilding Co., Ltd.**

Abstract

The portion of thin plate is expected to increase as to the development of design and fabrication technology. The weld-induced deformation is more serious in thin plates than in thick plates because heat affect zone of thin plates is wider than that of thick plates, and in addition internal and external constraints much more influence upon weld-induced deformation of thin plates. This paper is aimed at applying the mechanical tensioning method to fillet weld of thin plates to reduce the weld-induced deformation. For this purpose, fillet welding tests have been carried out for several thin plate specimens with varying plate thickness and magnitude of tensile load. From the present study, it has been found that the tensioning method is effective on reduction of weld-induced deformation.

※Keywords: Distortion(변형), Longitudinal shrinkage(종수축량), Residual stress(잔류응력), Tension load(인장 하중), Tensioning method(장력법), Thin plate(박판)

1. 서론

박판은 열전달 특성상 후판에 비해 용접시 열영향부가 넓고 판의 강성계수가 낮아 변형이 쉽게 발생한다. 특히 불균일한 용접 입열에 의해 수축 변형이나 잔류응력으로 좌굴변형이 빈번히 발생한다(김상일 1999, 장창두와 서승일 1988, 장창두와

이창현 2000, Masubuchi 1980). 이러한 용접변형은 구조적 강도저하와 외관상의 불량은 물론이고, 조립 단계 이후의 공정에서 발생하는 추가적인 변형과 이에 기인하여 발생하는 교정 작업 시수 등의 문제점을 초래하여 생산성 저하의 주원인이 되고 있다. 그 때문에 전체 용접구조물의 제작시간 중에서 변형 제어작업이 점유하는 공정수가 많으며, 박판의 경우는 전체 공정의 20%를 점유하는 경우도 있다.

박판 용접부의 변형에 관한 초기 연구는 주로

접수일: 2006년 12월 15일, 승인일: 2007년 9월 27일

† 교신저자: jslee2@ulsan.ac.kr, 052-259-2162

변형 제어방안에 주목해왔다. 현장에서는 용접부의 강성을 증가시키기 위하여 주판의 두께나 보강재의 크기 및 간격을 변경하는 설계적인 방안과 Fit-up 정도 향상을 통하여 용접 입열량을 조절함으로써 용접으로 인한 수축 하중을 감소 시키거나 열 및 기계적 하중을 이용하여 수축을 이완시키는 제어 방안이 대부분을 차지하고 있다(신상범과 이동주 2003).

맞대기 용접에 대한 실험을 통해(이주성 등 2006) 박판용접에 장력법을 적용하면 용접선 방향으로의 굽힘과 수축변형의 감소 그리고 용접선에 수직 방향으로의 굽힘 변형을 감소시키는 데에 상당한 효과를 볼 수 있다는 것을 확인하였고, 또한 좌굴 변형의 원인이 되는 압축잔류응력의 감소에도 적지 않은 효과가 있다는 점을 확인한 바 있다.

본 연구는 장력법을 적용하여 맞대기 용접에서 변형 감소에 대한 연구의 후속 연구로서 필릿 용접에 장력법을 적용하였다. 변형제어 방안으로서 레버 블록을 이용한 기계적 인장법의 적용에 관한 연구로서, 용접부에 인위적으로 가하는 인장력의 크기가 굽힘과 수축변형에 주는 정량적인 영향을 분석하는 연구의 주된 내용으로 설정하였다. 이를 위해 다수의 시편에 대해 인장력의 크기를 변화시키면서 필릿 용접을 수행하여 그 결과를 인장력의 크기와 변형량 사이의 관계를 그래프로 정리하였다.

2. 실험

2.1 실험방법 및 순서

본 절에서는 본 연구에서 수행한 실험방법 및 순서에 대해 간략히 기술하였다. 시편의 초기변형 형상은 Fig. 1에 보인 격자점에서 Fig. 2에 보인 변위계측장치를 이용하여 계측하고 용접선의 법선 방향과 직각방향으로의 평균인장응력이 계획된 값이 되도록 인장력을 가한 상태에서 용접을 수행하였다. Fig. 2에 보인 변위계측장치는 디지털게이지를 이동시킬 수 있는 프레임에 부착한 것으로서, 디지털 게이지를 격자점을 따라 이동시켜서 변위를 계측하였다. 용접선 방향으로 인장력을 가하는 경우에는 Fig. 3(a)와 같이 용접선 양 끝에 폭

100mm, 길이 100mm의 Tab Piece를 용접하여 붙이고 좌측 Tap Piece를 고정시킨 상태에서 우측 Tap Piece를 레버 블록에 연결하여 계획한 인장응력이 발생될 수 있도록 작용시켰다. 용접선에 법선 방향으로 인장력을 가하는 경우에는 Fig. 3(b)와 같이 좌측을 고정시키고 우측을 레버 블록에 연결하여 작용시켰다. 계획된 인장력은 본 실험에서는 두께별로 Tension load 만을 변화시켜가며 실험하였다. 인장응력은 시편 길이의 중앙에서 폭 방향으로의 평균응력이 여러 가지 경우에 해당되도록 인장력을 가한 상태에서 용접을 수행하였다. 용접이 완료된 후 냉각시간은 40분이며, 용접이 진행되면서 그리고 냉각 중의 인장력을 로드셀과 하중 인디케이터로 구성된 하중측정 장치를 이용하여 시간별로 기록하여 그 변화를 살펴볼 수 있도록 하였다. 완전히 냉각된 상태에서 시편을 정반에 놓고 면외 변위를 계측하여 변형량 변화의 분석에 활용하였다.

2.2 실험모델과 실험조건

시편의 크기는 길이×폭 = 400×300mm이고, 두께는 4mm, 5mm와 6mm인 세 종류이고, 보강재의 두께는 판의 두께와 같다. 시편에 대해 균일한 입열량을 주기위해 CO₂ 용접기를 캐리지에 연결하여 사용하였고, 두께별 용접조건은 Table 1과 같다. 4mm인 시편만 속도를 200mm/min으로 하였고, 나머지 시편은 200mm/min, 300mm/min 두 가지의 경우로 1 pass 용접을 하였다. 장력도 아래와 같은 경우로 용접선 방향과 용접선에 법선 방향으로 주었다. Fig. 3(c)와 (d)는 실험에 사용된 장비들의 배치를 보여준다.

2.3 인장력 작용 및 계측장치

본 연구의 실험에서 인장력은 체인 블록을 사용하여 작용시켰으며, 인장력 작용 위치와 시편을 연결하는 중간위치에 인장력을 계측할 수 있는 장치를 설치하였다. 인장력은 로드셀과 하중 인디케이터로 구성된 하중 계측장치를 이용하여 측정하였다. 작용 하중의 최대 값은 10ton이고 허용오차는 20kg 이다.

Table 1 Welding condition

Plate thickness (mm)	4	5	6	
Size of stiffener L X D (mm)	400X60	400X60	400X60	
Current I (A)	150	150	150	
Voltage V (V)	21	21	21	
Speed v (mm/min)	300	200 & 300	200 & 300	
Tensile stress (MPa)	weld direction	10, 25	10, 25	10, 25
	normal to weld direction	15	15	15

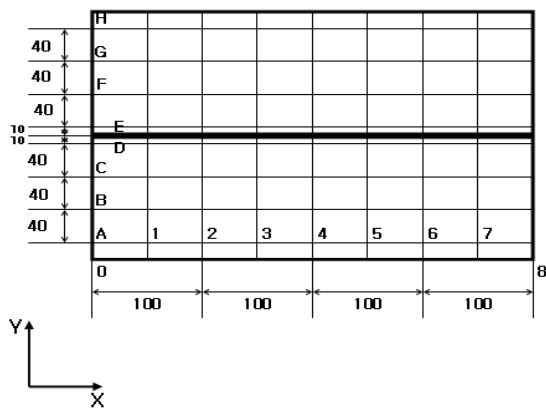


Fig. 1 Location for deformation measurement

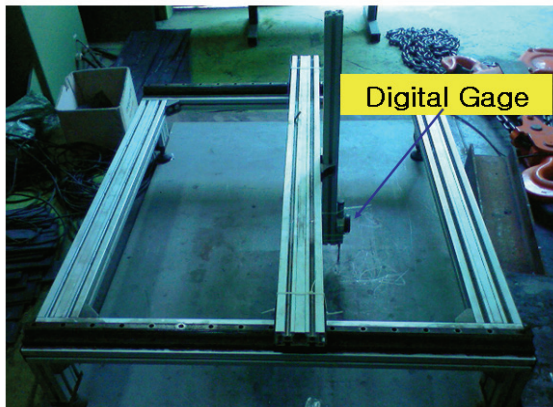
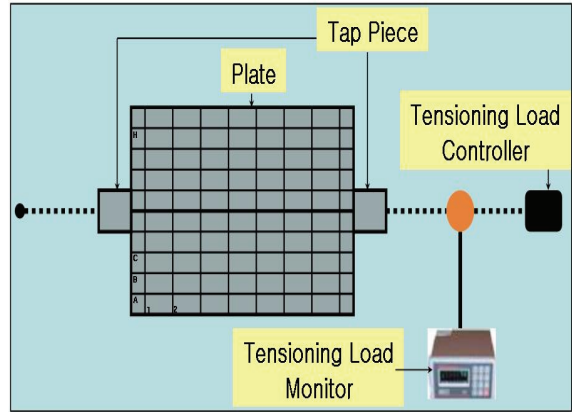
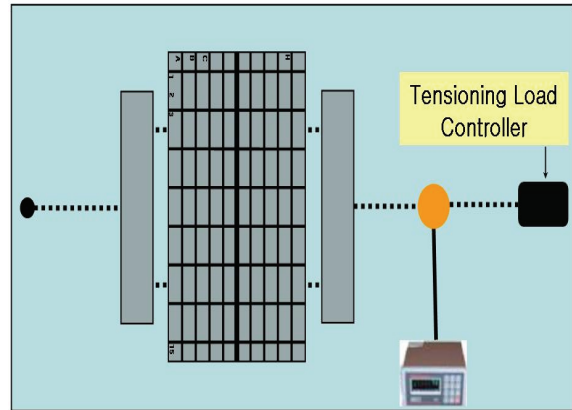


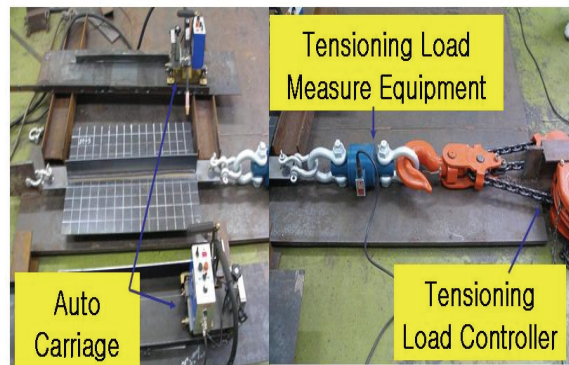
Fig. 2 Apparatus for deformation measurement



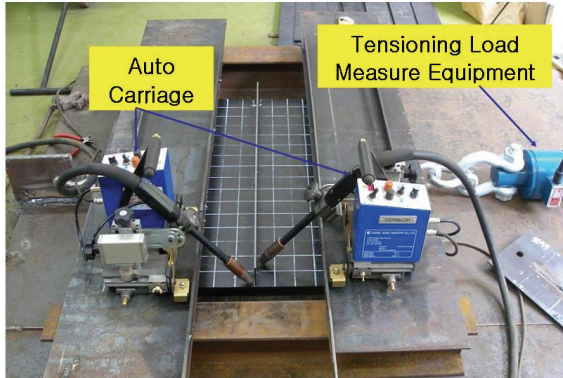
(a) Tension load in the weld line direction



(b) Tension load in the normal direction to weld line



(c) Tension load in the weld line direction
Fig. 3 Arrangement of experiment apparatus



(d) Tension load in the normal direction to weld line

Fig. 3 (continued)

2.4 변형량 계측

Fig. 2에 보인 변형량 계측 장비를 사용하여 Fig. 1에 보인 격자점들에서의 용접 전 변위와 용접 후 냉각이 완료된후 변위를 측정하여 그 차이로서 변형량을 구하였다.

3. 실험결과

3.1 시간에 따른 응력의 변화

용접 중 및 용접이 완료된 후 냉각 중 인장력 측정 장치를 이용하여 기록한 인장력의 시간에 따른 변화를 두께 5mm, 속도는 200 mm/min인 시편에 대하여 Fig. 4에 예시하였다. 용접이 진행되면서 용접 입열에 의한 열팽창이 발생하기 때문에 인장력이 감소하지만 용접이 완료되고 냉각이 진행되면서 수축작용으로 인장력이 원래의 계획된 수준으로 회복되는 현상을 뚜렷하게 볼 수 있다. 그러나 용접선에 법선방향으로서 인장력을 작용시켰을 때에는 인장력이 크게 감소되지 않는 것을 그래프에서 볼 수 있다.

3.2 면외 변형

박판의 용접시 용접선 근처에서 발생하는 인장항복응력에 평형을 이루는 압축 응력에 의해서 좌굴 변형이 발생하게 된다.

Fig. 2에 보인 변위계측장치로 각 격자점에서의

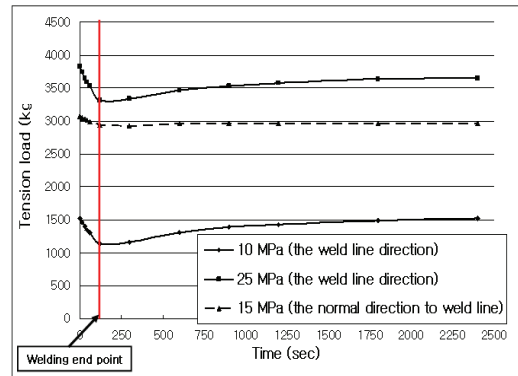


Fig. 4 Change of tensile load to time

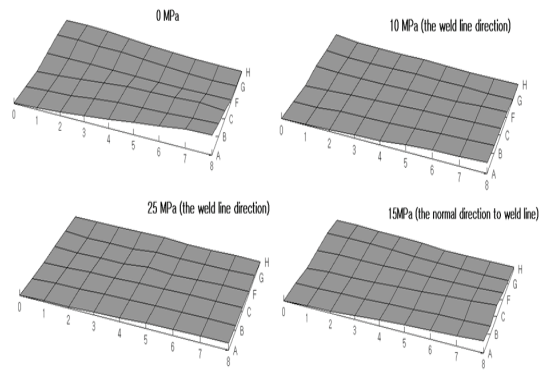


Fig. 5 Out-of-plane deformation

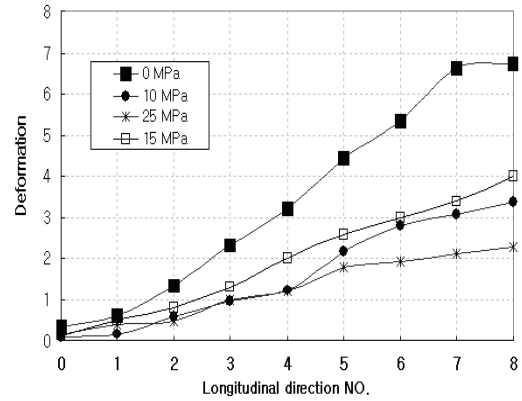
변위를 측정하였는데, 그중에서 두께가 5 mm 이고 속도는 200 mm/min인 시편에 대해 인장력의 크기와 방향에 따른 변형 형상을 Fig. 5에 예시하였다. 잘 알려진 바와 같이 용접으로 인한 잔류응력은 용접중심선 근처의 좁은 영역에서는 항복응력 크기의 용접선 방향(Fig. 1에서 x 방향)으로 인장잔류응력이 남고, 이 영역 밖에서는 인장잔류응력에 의한 힘과 평형을 이루기 위해 용접선 방향으로 압축잔류응력이 남는다. 결국 이 압축잔류응력이 박판의 경우 좌굴변형을 일으키는 원인이 되는데, 본 실험모델들의 경우 Fig. 5에서 보는 바와 같이 인위적으로 가한 인장력의 크기와 방향과 상관없이 용접선에 수직인 방향 (y 방향)으로 뒤틀리는 형태의 좌굴변형이 발생하였다. 인장력이 용접선 방향으로 인장력을 작용 시킨 경우 인장력의

크기가 클수록 좌굴변형량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 한편, 용접선에 범선 방향으로 인장력을 작용시킨 경우에는 좌굴변형의 감소에 효과가 없는 것으로 보인다. Fig. 1에서 y 방향으로 A, C, H인 지점에서 인장력의 크기에 따른 x와 y 방향으로 변형량의 변화를 각각 Fig. 6과 7에 보였다. Fig. 7에 있는 그래프들은 0번 지점의 양 끝점을 직선으로 연결하여 이를 기준선으로 설정하고, 그 기준선으로부터의 변위이다. 용접선 방향으로 인장력을 가하였을 때 인장력이 증가할수록 변형량이 감소되는 반면에 용접선 방향에 직각방향으로 인장력을 가한 경우에는 변형의 감소에 효과가 없는 것으로 보인다. Fig. 7에서 음의 각변형이 발생한 것은 압축잔류응력으로 인한 뒤틀림이나 계측시의 오차로 보인다.

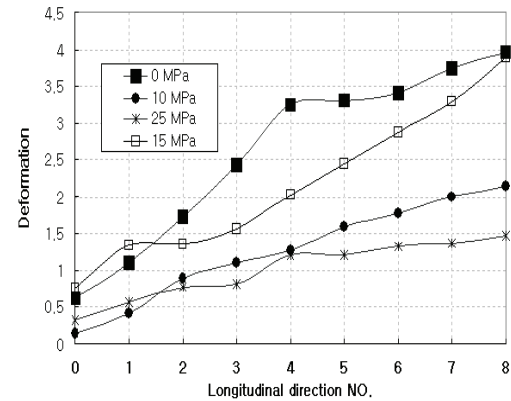
3.3 보강재 변형

박판 구조에서는 용접 후 종수축으로 인하여 보강재에 좌굴변형이 발생할 수 있다(Masubuchi 1980). Fig. 8은 판 두께가 $t = 4\text{mm}$ 인 시편들에 대해서 인장력을 작용시킨 경우와 그렇지 않은 경우에 발생한 보강재 좌굴변형 현상을 보인다. 보는 바와 같이 인장력을 작용시키지 않은 경우인 Fig. 8(c)에서는 보강재의 좌굴변형이 뚜렷한데, 인장력을 작용 시킨 Fig. 8(a)와 (b)에서는 보강재의 좌굴변형이 상당량 감소된 것을 확인할 수 있다.

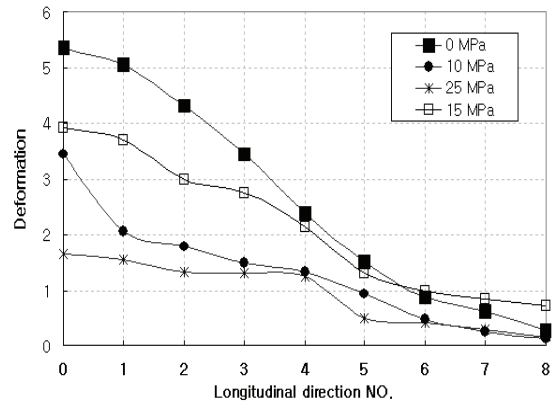
이는 인위적으로 작용시킨 인장력이 종수축력의 크기를 감소하는 역할을 하기 때문이다. 인장력이 보강재의 좌굴변형량 감소에 주는 영향을 보이기 위해 보강재의 자유단 즉, 판에 부착되지 않은 단면 위치에서의 변위를 측정하여 Fig. 9에 표시하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 판의 두께가 얇을수록 보강재의 좌굴변형이 더 심하게 나타나며 인위적으로 작용시킨 인장력으로 인한 변형량의 감소 효과가 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다. 용접선에 범선 방향으로 인장력을 작용시킨 경우에도 보강재의 좌굴변형 감소에 영향을 주기는 하나, 그 효과는 용접선 방향으로 인장력을 작용시킨 경우 보다는 작은 것으로 나타났다.



(a) Position A

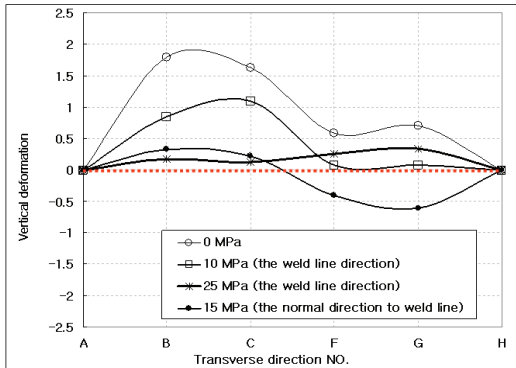


(b) Position C

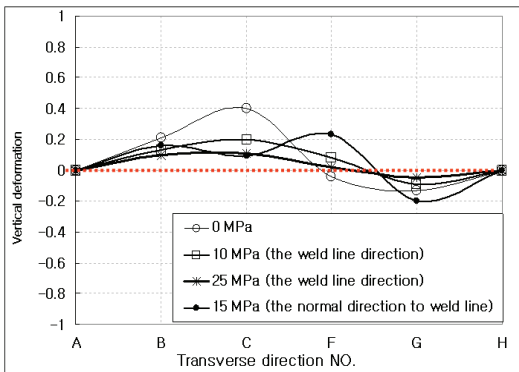


(c) Position H

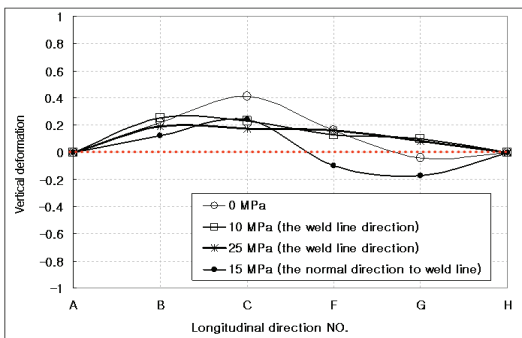
Fig. 6 Out-of-plane deformation at position A, C and H in y direction



(a) $t=4\text{mm}$, $v=300\text{mm/min}$

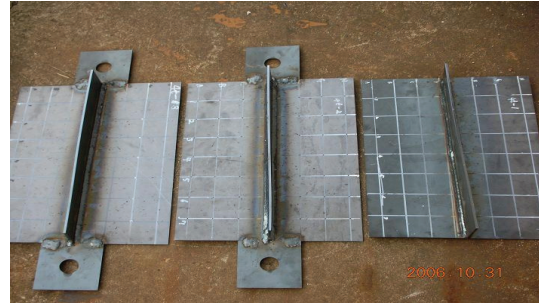


(b) $t=5\text{mm}$, $v=300\text{mm/min}$

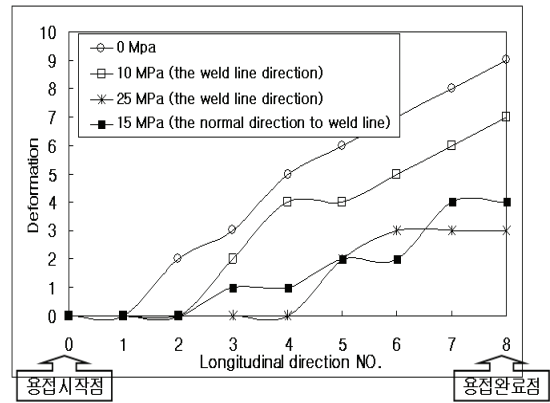


(c) $t=5\text{mm}$, $v=300\text{mm/min}$

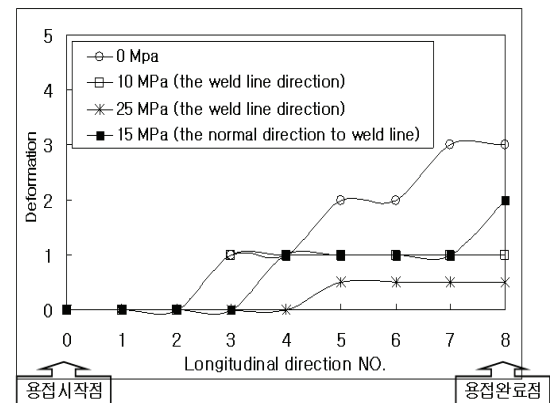
Fig. 7 Effect of magnitude of tensioning load on the weld-induced deformation



(a) 25 MPa (b) 10 MPa (c) 0 MPa
Fig. 8 Buckling deformation of stiffener

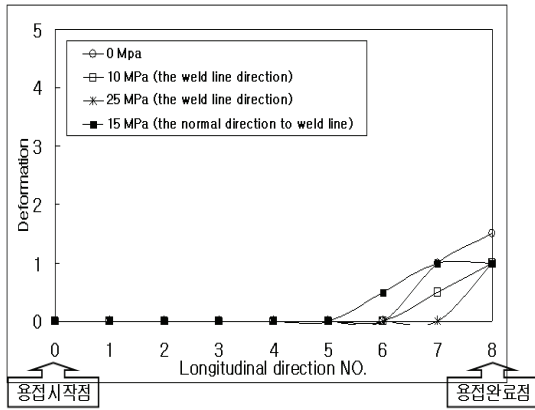


(a) $t = 4 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$



(b) $t = 5 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$

Fig. 9 Buckling deformation of stiffener

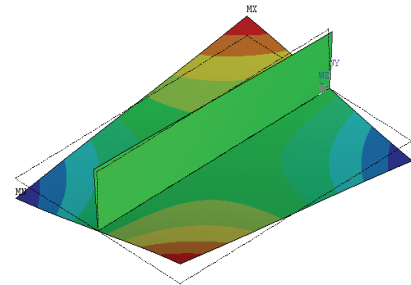


(c) $t = 6 \text{ mm}$, $v = 300 \text{ mm/min}$

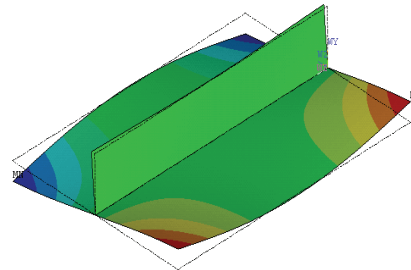
Fig. 9 (continued)

3.4 좌굴변형에 대한 수치해석

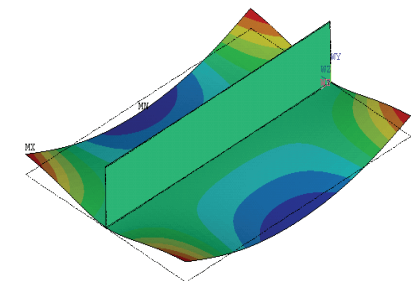
Fig. 5에 보인 변형 형상을 보면, 본 연구의 실험에서는 인위적 인장력의 작용 여부와 상관없이 좌굴변형의 형상이 뒤틀린 형태로 나타났는데, 이를 수치적으로 확인하기 위해 잔류응력으로 인한 변형 모드를 고유 값 해석을 수행하였다. 판과 보 강재 모두 4절점 사변형 요소로 모델링하였고, 보 강재가 놓인 선 중앙점을 구속하여 강체운동을 방지하였다. 하중조건은 실험의 경우와 마찬가지로 인장력을 작용시키는 경우에는 해당 인장력을 용접 중심선에 있는 절점에 작용시켰으며, 용접선에 수직인 변에 압축잔류응력을 작용시킨 상태에서 고유 값 해석을 수행하였다. 고유 값 해석의 결과로서 고유 값이 작은 3개 모드를 Fig. 10에 예시하였는데, 가장 작은 고유 값에 해당되는 Mode 1이 본 연구의 실험에서 나타난 Fig. 5의 변형 형상과 일치한다. 시편의 길이와 폭의 비인 세장비에 따라 좌굴 모드가 달라질 수 있지만, 본 연구의 실험에서 사용한 시편의 세장비인 1.33에서는 Fig. 10의 Mode 1이 지배적이라는 것을 실험과 수치해석을 통해 확인할 수 있었다. 다른 세장비를 갖는 모델에 대해서는 추가적인 실험과 수치해석을 통해 확인되어야 할 것이다.



(a) Mode 1



(b) Mode 2



(c) Mode 3

Fig. 10 Buckling modes for fillet welding

4. 결론

본 논문에서는 박판의 용접변형을 감소시키는 방법으로서 인위적 인장력을 작용시키는 장력법을 박판 필릿용접에 적용하는 것을 다루었다. 박판의 맞대기 용접 시 용접선 방향으로 인장력을 가하였을 때, 굽힘과 수축변형의 감소에 효과가 있다는

것을 선행 연구에서 확인한 바 있었는데(이주성 등 2006), 여기에서는 그 후속 연구로서 필릿용접에 장력법을 적용하였을 때, 변형 감소에 주는 영향을 실험적으로 분석하였다. 용접 중 인위적인 인장력을 용접선 방향과 용접선에 법선 방향으로 작용시켰는데, 후자의 경우보다는 전자의 경우에 변형감소에 상당한 효과가 있음을 확인하였다. 또한 장력법을 적용하면 보강재의 좌굴변형 감소에도 많은 효과를 볼 수 있었다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 실험에서 나타난 판의 좌굴 모드와 고유 값 해석을 통해 구한 좌굴모드와 일치됨을 확인하였는데, 본 연구의 실험에서 사용한 시편과 세장비가 다른 경우에 대해서는 추가적인 실험 및 수치해석을 통해 그 좌굴모드를 확인해야 할 것이다.

향후에는 추가의 실험이나 수치해석을 통해 변형을 허용수준이하로 감소시키기 위해 작용시켜야 할 인장력의 수준을 결정하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김상일, 1999, 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위논문.

- 신상범, 이동주, 2003, "박판 용접부 좌굴 변형제어에 관한 연구," 대한용접학회 특별강연 및 학술 발표대회 개요집, 제 1권, pp. 287-299.
- 이주성, 2004, "평블록의 용접변형예측 시뮬레이터," 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 1호, pp. 55-63.
- 이주성, 김철호, 박재우, 2006. "선체 박판 구조의 용접변형 제어에 관한 연구(1)," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1157-1164.
- 장창두, 서승일, 1988, "열탄소성해석에 의한 잔류응력 계산," 대한용접학회 논문집, 제 6권, 제 4호, pp. 35-43.
- 장창두, 이창현, 2000, "선체블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 2호, pp. 127-136.
- Masubuchi, K., 1980, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford.



< 이 주 성 >



< 박 재 우 >