

## 박판 필릿용접시 변형제어를 위한 장력법 적용

이주성\* · 박재우\*

\*울산대학교 조선해양공학부

# Application of Tensioning Method to Deformation Control of Thin Plate Fillet Weld

JOO-SUNG LEE\* AND JAE-WOO PARK\*

\*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEYWORDS:** Buckling deformation 좌굴변형, Buckling mode 좌굴모드, Residual stress 잔류응력, Tension load 인장 하중, Tensioning method 장력법, Thin plate 박판, Fillet weld 필릿용접

**ABSTRACT:** As it has been well appreciated from the viewpoint of efficiency, The weld-induced deformation control is one of the most important issues in marine structure production. In the case of thin plate block, weld-induced deformation is more serious than in the case of relatively thick plate block. The heat affect zone of thin plates is wider than that of thick plates with the same heat input. Among weld-induced deformations, the buckling deformation by the shrinkage and residual stress in the weld line direction is one of the most serious deformation types. This paper is concerned with controlling buckling deformations for the thin plate fillet welds, by using the tensioning method. A numerical analysis was carried out to illustrate several dominant buckling modes due to compressive residual stress in the fillet welds of thin plates. Then, weld tests were carried out for 20 specimens with varying plate thickness, and with different magnitudes and directions for the tension load. The results graphically represented to show the effect of the tensioning method in reducing the weld-induced deformation. From the present findings, it was seen that the tensioning method is a useful way to control weld-induced deformations in the fillet welds of thin plates.

### 1. 서 론

선박해양구조물의 건조공정에 있어서 용접으로 인한 변형은 필연적으로 발생하게 되지만, 생산의 효율성을 위해 발생하는 변형의 수준을 가능한 낮은 수준이 되도록 제어해야 한다는 점은 이미 널리 잘 인식되어져 있다. 최근 선체중량의 경량화를 위해 박판의 사용 비율이 증가하고 있으며, 특히 여객선이나 PCTC (Pure car and truck carrier) 선과 같이 다수의 갑판을 갖는 선박에서는 상당량의 박판이 사용되고 있다. 박판은 열전달 특성상 용접시 동일한 크기의 입열량에 대해 후판 보다 열영향부의 폭이 넓고 또한 내적 및 외적 구속이 더 민감하기 때문에 상대적으로 많은 변형이 발생하는 것에 대해서는 이미 많은 연구를 통해 밝혀진 바 있다(김상일, 2003; 신대희 등, 2006; 장창두와 서승일, 1988; Masubuchi, 1980). 용접시 발생하는 변형의 형태 중에서 박판의 경우에는 특히, 용접이 완료된 후 용접선 방향으로의 종수축과 압축잔류응력으로 인한 좌굴변형 (Buckling deformation)이 특히 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 좌굴변형은 구조적 강도를 저하와 외관상의 불량은 물론이고, 조립 단계 이후의 공정에서 발생하는 추가적인 변형과 이에 기인하여 발생하는 과도한 곡직 작업으로 인해

잔류되는 초기응력은 구조강도 저하에 추가적인 원인을 제공하며, 변형 교정작업에 많은 시간이 추가로 투입해야 하는 등 생산성 저하의 주된 원인으로 작용하고 있다. 이러한 이유로 발생된 변형을 교정하는 작업이 전체 블록 제작 시간 중 상당 부분을 차지하고 있는 실정이다. 용접변형의 교정 측면에서 보면 실제의 용접구조물에 있어서 용접조건 특히, 입열량의 크기에 따른 온도분포 특성에 의해서 변형의 정도가 다르기 때문에 변형형상과 그 양을 해석적인 방법으로 예측하는 것은 매우 어렵다. 실제 현장에서는 작업자의 경험에 의해서 변형을 예상하고, 조립작업 이전에 변형방지대책을 마련하여 시행하는 것이 대부분이다. 따라서 용접변형을 교정하는 기술보다는 용접변형 자체를 조립단계 이전에서 제어하는 기술이 필요하다(김상일, 2001; 이주성, 2004).

본 논문에서는 박판 용접시 좌굴변형을 제어하기 위해 장력법 (Tensioning method)을 적용한 연구로서, 필릿 용접시 발생하는 변형의 감소에 주는 정량적인 효과를 다루었다. 신상범과 이동주(2003)는 박판 용접부의 좌굴변형 제어를 위해 용접으로 인한 수축 하중을 감소시키거나 열 또는 기계적인 하중을 작용시켜서 수축현상을 이완시키는 제어방안을 제시한 바 있다. 장력법은 용접변형을 감소시킬 목적으로 용접선 방향이나 용접선에 법선 방향으로 인위적인 인장력을 작용시키는 변형 제어 방법의 일종으로서, 최근 맞대기 용접이나 필릿용접에 적용하여 변형감소에 상당한 효과가 있다는 것을 실험적으로 또는

교신저자 이주성: 울산광역시 남구 무거동 산29

052-259-2162 jslee2@ulsan.ac.kr

수치해석적으로 검증한 바 있다 (허주호와 김상일, 2003; 이주성과 김철호, 2006). 허주호와 김상일(2003)은 평블록 조립시 장력법을 적용하였을 때 횡각변형 등의 감소에 주는 영향을 실험과 수치해석을 통해 다룬 바 있고, 이주성과 김철호(2006)는 박판의 맞대기 용접에 장력법을 적용하여 변형량과 잔류응력의 감소에 상당한 효과가 있다는 것을 실험을 통해 보인바 있다.

전술한 바와 같이 본 논문에서는 장력법을 박판의 필릿 용접에 적용하였을 때 발생하는 좌굴변형의 제어에 어느 정도의 효과가 있는지를 분석하는 것을 주된 내용으로 다루고 있다. 이를 위해 우선 필릿 용접시 발생하는 잔류응력에 의한 지배적인 좌굴모드의 형상들을 예상하기 위해 수치해석을 수행하였다. 인위적으로 작용시키는 인장력의 크기가 변형감소에 주는 정량적인 영향을 파악하기 위해 인장력의 크기와 방향 그리고 판의 두께를 변화 시킨 20개 시편에 대한 필릿 용접실험을 수행하였다. 실험의 결과로서 장력의 크기와 방향이 좌굴변형의 감소에 주는 영향을 분석하여 정리하였다.

본 연구의 결과에 의하면 장력을 용접선방향으로 작용시킨 경우 장력의 크기에 따라 6~60% 정도의 변형 감소 효과가 있으며, 용접선에 법선방향으로 작용시킨 경우에는 약 20% 이상의 변형감소 효과가 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 입열량이 적은 경우보다 입열량이 큰 경우에 변형감소 효과가 더 크다는 점을 알 수 있었다. 한편 좌굴변형형상은 실험에 의한 변형형상이 수치해석을 통해 예상한 것과 잘 일치되는 것을 확인하였다.

본 논문의 결과는 추후 판재의 크기와 용접조건에 따른 적정수준의 인장력의 크기를 결정하는 예측식의 개발 등에 활용할 수 있을 것이다.

## 2. 좌굴변형에 대한 수치해석

잘 알려진 바와 같이 맞대기 용접이든 필릿 용접이든 용접에 따른 열 사이클의 영향으로 용접이 완료된 후 용접선 근처의 좁은 영역에서는 용접선 방향으로 항복응력 크기에 상당하는 인장 잔류응력 그리고 나머지 부분에서는 이에 평형을 이루는 크기의 압축응력이 용접선 방향으로 작용한다. 이러한 잔류응력 상태에서 특히, 박판 용접시 발생 가능한 좌굴변형 형상을 우선 파악하기 위해 여기에서는 좌굴변형 해석을 수행하였다. 3절에서 기술하고 있는 본 연구의 용접실험을 위한 시편은 판의 중앙에 보강재가 하나 있는 모델로서, 용접 후 잔류응력의 분포를 Fig. 1과 같이 이상화하여 취급할 수 있다.

여기에서는 3절에서 기술한 시편모델과 같은 크기의 모델에 대해, 판과 보강재를 모두 4절점 사변형 요소로 모델링하였고, 보강재가 놓인 선 중앙점을 구속하여 강제운동을 방지하였다. 하중조건은 Fig. 1에 보인 잔류응력의 분포형태대로 작용시켰다. 3절에서의 시편모델의 두께는 각각 4, 5 그리고 6mm 인데, 좌굴해석으로부터 좌굴모드의 형태는 판 두께와 관계없이 모두 동일하게 얻어졌다. 가장 지배적인 좌굴모드 4개를 Fig. 2에 보였다.

Fig. 2(a)의 Mode 1은 용접선 방향으로 Sine 반파가 1/2개 있고 이들이 용접선을 중심으로 서로 반대되는 변형 형태로서 뒤틀린 형상에 해당된다. Mode 2는 Sine 반파 1개가 용접선을 중심으로 서로 반대되는 변형형상을 갖는 경우이며, 한편 Mode 3는 Sine 반파의 개수가 1개인 것은 Mode 2와 같으나 용접선을 중심으로 좌우 대칭형태로 변형이 되는 경우이다. Mode 4는 Sine 반파가 용접선 방향으로 2개가 있고 이들의 방향이 용접선을 중심으로 반대되는 형상이다. 이러한 좌굴해석으로부터 본 연구의 필릿 용접실험에서는 Fig. 2의 Mode 1 형태로 좌굴변형이 발생할 것이라는 것을 예상할 수 있겠다. 물론 판의 길이와 폭의 비인 세장비가 달라지면 지배적인 좌굴형상이 달라질 수 있으므로, 보강재의 수가 다르거나 다른 세장비를 갖는 경우의 지배적인 좌굴 형상에 대해서는 좌굴해석을 통해 확인해야 할 것이다.

## 3. 용접실험

본 절에서는 본 연구의 필릿용접실험을 위한 시편모델과 용접조건 및 실험방법에 대해 기술하였으며, 실험결과와 분석결과를 언급하였다.

### 3.1 실험모델과 실험조건

본 용접실험을 위한 시편은 판의 중앙에 보강재가 하나 부착된 것으로서 보강재와 판의 접합부 좌우를 동시에 필릿 용접을 하였다.

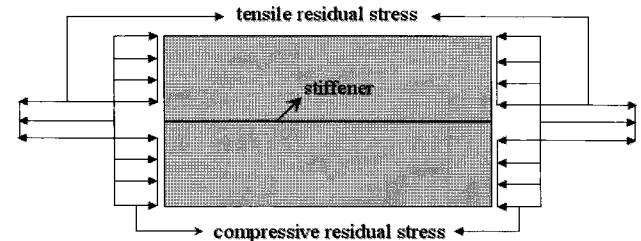


Fig. 1 Idealization of residual stress distribution

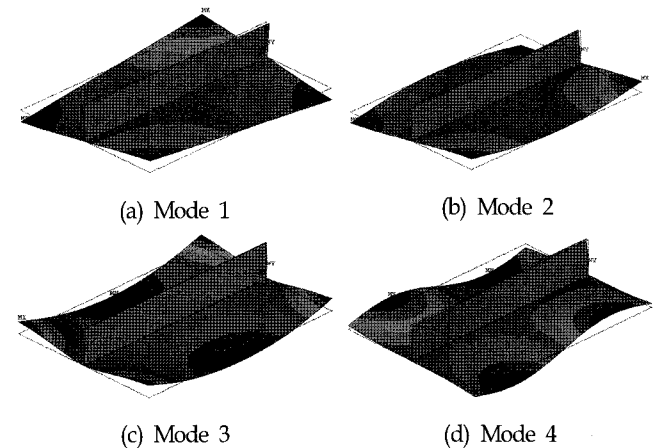


Fig. 2 Buckling modes for fillet welding

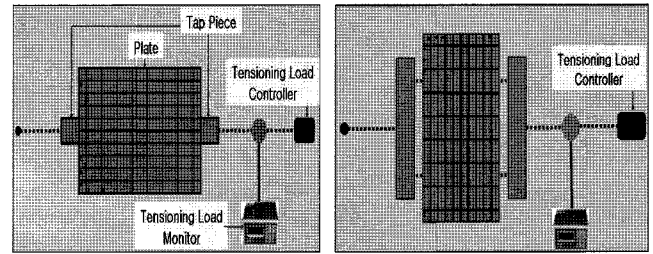
모든 시편의 크기는 길이×폭=400×300mm이고, 두께는 4, 5와 6mm인 세 종류이다. 절단으로 인한 초기변형을 최소화하기 위해 모든 시편은 플라즈마 절단으로 제작하였다. 재료는 공칭항복응력이 235MPa인 연강이다. 시편의 크기와 용접조건 등 실험조건들을 Table 1에 정리하였다. 보강재의 크기는 길이×높이=400×60mm이고 두께는 판의 두께와 같게 하였다. 용접 기로는 CO<sub>2</sub> 자동용접기를 사용하였으며, 용접전류와 용접전압은 모든 시편에 대해 같은 값을 사용하였다. 용접속도는 두께 4mm인 경우에는 300mm/min 그리고 5와 6mm인 경우에는 각각 200mm/min와 300mm/min인 두 가지 경우에 대해 실험을 수행하여 입열량의 변화에 대한 변형감소의 변화를 파악할 수 있도록 설정하였다. 장력은 용접선 방향 (보강재 방향) 또는 용접선에 법선 방향 (보강재에 법선 방향)으로 작용시킨 상태에서 용접을 수행하였다. Table 1에서는 장력 자체의 크기가 아닌 장력을 그 작용 방향에 대한 단면적으로 나눈 평균응력으로서 'Tensile stress'로 표시하였다. 예로서 'Weld direction'으로 10MPa라 함은 보강재 단면적을 제외한 판재에 작용하는 평균인장응력이 10MPa가 되도록 장력을 작용시켰음을 의미한다. 따라서 본 연구의 용접실험에서는 두께-속도로 구분해서 4t-300, 5t-200, 5t-300, 6t-200, 6t-300인 다섯 가지 경우 각각에 대해 장력이 없는 경우 즉, 평균인장응력이 0MPa인 경우, 평균인장응력이 각각 10과 25MPa이 발생되도록 용접선 방향으로의 장력을 작용시킨 경우 그리고 평균인장응력이 15MPa이 발생되도록 용접선에 법선방향으로의 장력을 작용시킨 네 가지로서 총 20개 시편에 대해 실험을 수행하였다.

3.2 실험방법

Fig. 3에 시편과 실험장치의 배치도를 보였다. Fig. 3(a)는 용접선 방향 즉, 보강재가 놓인 방향으로 장력을 준 상태에서 실험하는 경우인데, 보강재 양끝단부의 판재에 Tap piece를 부착하고 좌측 단은 고정시키고 우측 단에서 장력을 가한 상태에서 필릿 용접을 하는 경우이다. 장력은 체인블록을 사용하여 하중 지시계(Load indicator)에 계획된 크기가 될 때 까지 작용시킬 수 있다. Fig. 3(b)는 용접선에 법선 방향으로 장력을 주는 경우인데, 용접선 즉, 보강재가 놓인 방향으로의 단면을 따라 가능한 균일한 응력이 발생하도록 하기 위해 보강재를 중

심으로 대칭되는 두 곳에서 하중이 작용하도록 하였다. 좌측 단은 Fig. 3(a)와 마찬가지로 고정 단이다. Fig. 4는 Fig. 3(a)인 경우인 용접선방향으로 장력을 준 상태에서 시편, 자동용접기 등 용접준비가 완료된 장면을 보여준다.

용접 전후의 변위는 Fig. 5에 보인 것처럼 폭 방향으로 A에서 H까지 여덟 위치, 길이 방향으로 0에서 8까지 아홉 위치로서 총 72 위치에서의 변위를 디지털 게이지로 측정하였다.



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

Fig. 3 Arrangement of experiment apparatus

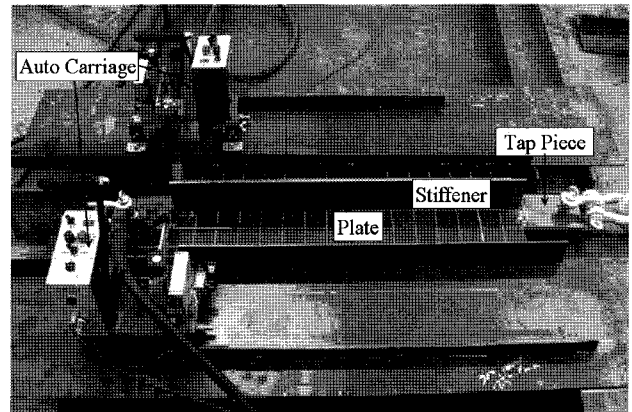


Fig. 4 Setting for test

Table 1 Specimen size and test condition

Plate thickness (mm)	4	5	6	
Size of stiffener $L \times D \times t$ (mm)	400×60×4	400×60×5	400×60×6	
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	0, 10, 25	0, 10, 25	0, 10, 25
	Normal to weld line	0, 15	0, 15	0, 15

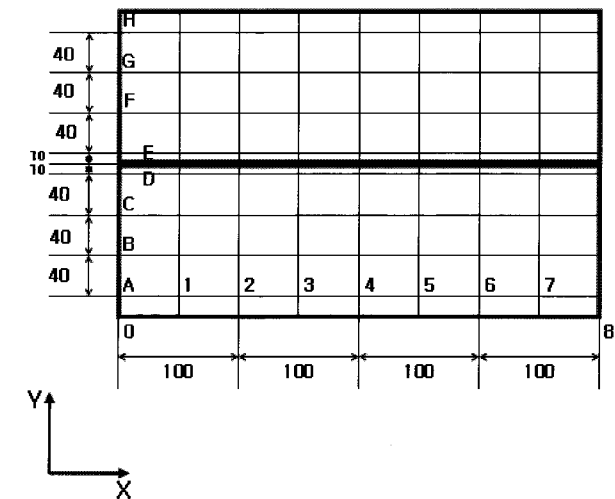


Fig. 5 Locations for deformation measurement

3.3 실험 결과 및 검토

본 용접실험에서 수행한 시편들에 대한 변형형상을 보이기 위해 대표적인 것 네 가지 경우를 Fig. 6에 예시하였다. 여기에서는 변형 형상을 보여주는 것이고 그 절대적인 크기를 나타내는 것은 아니다. Fig. 6(a), Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)는 수치해석 결과인 Fig. 2(a)에 보인 Mode 1과 일치한다. 본 실험에서는 장력의 크기에 관계없이 대부분의 시편에서 Fig. 2의 Mode 1에 해당되는 변형형상이 관찰되었으나, Fig. 6(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 장력을 작용시킨 경우에는 Mode 1 보다 좌굴하중이 큰 Mode 2 형상이 관찰되었다. 이는 장력을 작용을 작용시키지 않은 경우엔 Fig. 2(a)의 Mode 1이 좌굴변형에 있어서 지배적이나 장력이 작용한 상태에서는 그 보다 고차의 좌굴모드가 발생할 가능성이 있음을 의미한다. 본 연구의 실험에서 사용한 시편의 세장비인 1.33에서는 Fig. 2의 Mode 1 이 지배적이며 장력의 크기에 따라서는 Fig. 2의 Mode 2 형태로 좌굴 변형이 발생할 수 있다고 말할 수 있겠다. 한편, 본 실험에서 Fig. 2(c)나 Fig. 2(d)가 관찰되지 않은 것으로 보아 그러한 좌굴변형형상이 발생하지는 않을 것으로 판단된다. 그러나 판재의 세장비가 달라지면 변형형상 역시 달라질 가능성이 있으므로 이에 대해서는 추가적인 실험과 수치해석을 통해 확인되어야 할 것이다.

장력의 크기와 방향에 따른 변형 형상의 변화를 판 두께는  $t=5\text{mm}$ 이고 용접속도는  $200\text{mm}/\text{min}$ 인 경우에 대해 Fig. 7에 보였다. Fig. 7에서 보듯이 변형형상은 모두 Fig. 2의 Mode 1에 해당되지만 장력을 작용시킨 경우 변형의 크기가 감소하는데, 그 효과는 용접선의 법선 방향으로 장력을 작용시킨 경우보다는 용접선 방향으로 작용시킨 경우에 보다 크다는 것을 볼 수 있다.

장력법 적용 효과를 보여주는 또 하나의 예로서 판 두께  $t=4\text{mm}$ 인 모델에 대해 장력에 의한 평균응력이 각각 0, 10과 25MPa인 세 모델의 용접 후 변형형태를 Fig. 8에 보였다. 장력법을 적용하지 않은 경우에는 용접선 방향으로의 수축(종수축)으로 인한 보강재의 좌굴변형이 뚜렷하나 장력법을 적용하면 그러한 변형이 상당히 감소됨을 볼 수 있다.

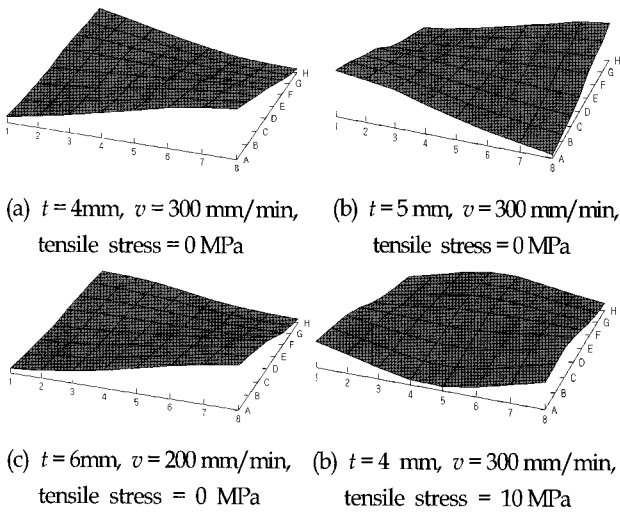


Fig. 6 Typical examples of deformed shape

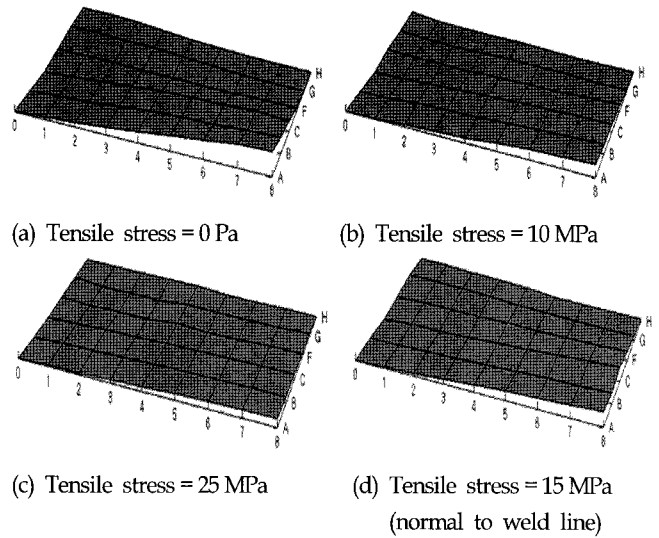
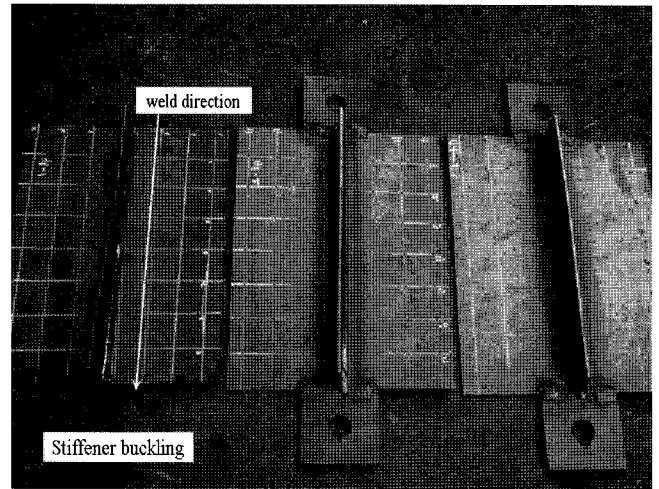


Fig. 7 Deformed shape to magnitude and direction of tensile stress



(a) 0 Mpa (b) 10 MPa (c) 25 MPa

Fig. 8 Buckling deformation of stiffener

장력의 크기와 방향이 필릿 용접시 변형에 주는 정량적인 영향을 보이기 위해 Fig. 9와 Fig. 10에서는 용접선 방향으로 장력을 작용시킨 경우 그리고 Fig. 11과 Fig. 12에서는 용접선에 법선 방향으로 장력을 작용시킨 경우 발생된 최대 변형량을 비교하였다.

Fig. 9는 용접선방향으로 장력을 작용시킨 경우와 그렇지 않은 경우 최대 변형량을 비교한 것인데, 횡축은 장력으로 인한 평균인장응력이고 종축은 최대 변형량을 판 두께로 무차원화시킨 것을 나타낸다. 최대 변형량이 인위적으로 작용시킨 인장응력에 대해 거의 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 절대적인 크기로 비교하자면 판 두께가 얇을수록 그 효과가 크다는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 같은 결과를 입열량에 따른 장력법 적용의 효과를 보인 것이다. Fig. 10에서 횡축의 입열량 계수(Heat input parameter)는 식 (1)과 같다.

$$q = \frac{Q}{t^2} \tag{1}$$

여기에서 Q는 식 (2)로 정의되는 유효 입열량이다.

$$Q = 0.239 \frac{IV}{v} \tag{2}$$

Fig. 10에서 보듯이 입열량이 클수록 장력법의 효과가 두드러짐을 알 수 있다.

용접선에 법선방향으로 장력을 작용시킨 경우, 동일한 표현 방법으로 결과를 표시한 것이 Fig. 11과 Fig. 12와 같다. 본 실험에서 용접선에 법선방향으로 장력의 크기 변화에 대한 실험을 수행하지 않았기 때문에 장력의 크기에 따른 변형 감소의 효과에 대해 구체적으로 분석할 수는 없으나 용접선방향으로 장력을 작용시킨 경우와 유사한 양상을 보일 것으로 예상된다.

Fig. 10과 Fig. 12로부터 장력의 작용 방향과 관계없이 입열량 계수가 큰 범위에서 장력법의 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

본 실험을 통해 얻은 장력의 크기와 방향이 최대 변형량의 변화에 주는 효과를 보이기 위해 Table 2에 장력법을 적용하지 않는 경우 즉, 0MPa tensile stress의 경우를 기준으로 장력법을 적용한 경우의 무차원화 된 최대 변형량의 감소의 정도를 정리하였다. 본 연구의 실험에 의하면 용접선 방향으로 공칭항복응력의 약 2.5% 수준에 달하는 장력을 작용시켰을 때, 판의 두께와 용접속도에 따라 최대 변형량이 약 6~27% 정도 감소하며, 공칭항복응력의 약 10% 수준의 장력을 작용시킨 경우에는 약 20~60%의 정도 감소되었다. 용접선에 법선 방향으로 장력을 작용시키는 경우 변형량 감소에 주는 영향은 용접선 방향으로 장력을 작용시키는 경우 보다 상대적으로 적지만 공칭항복응력의 약 6.5% 수준에 해당되는 응력을 발생시키는 장력을 가할 경우 20%이상의 변형감소효과가 있다는 것을 볼 수 있다.

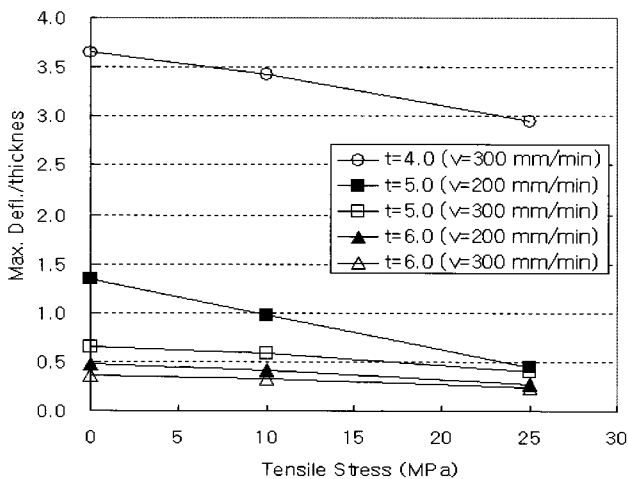


Fig. 9 Change of maximum deflection to tensile stress: tensile load in weld direction

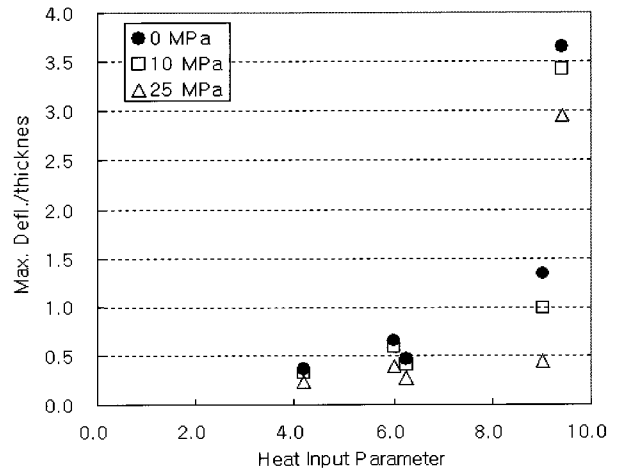


Fig. 10 Change of maximum deflection to heat input parameter : tensile load in weld direction

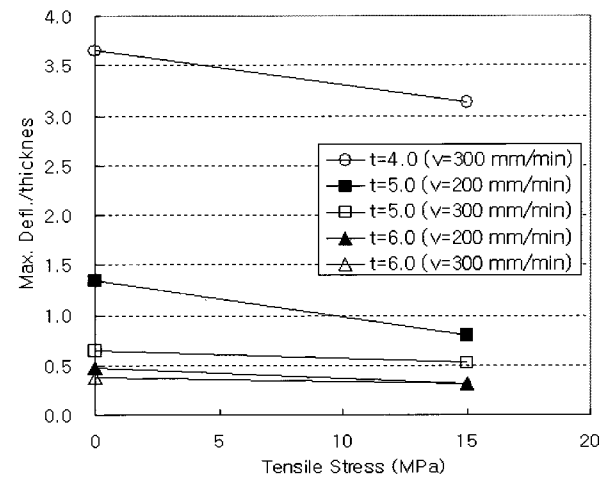


Fig. 11 Change of maximum deflection to tensile Stress: tensile stress in the normal direction to weld line

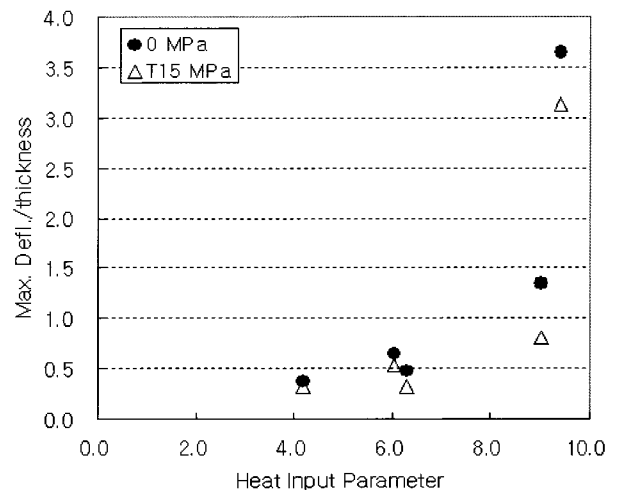


Fig. 12 Change of maximum deflection to heat input parameter: tensile load in the normal direction to weld line

**Table 2** Normalized maximum deflection to magnitude and direction of tensile stress

Thickness-weld speed	Tension in weld direction		Tension in normal to weld direction
	10 MPa	25 MPa	15 MPa
t4-300	0.938	0.808	0.856
t5-200	0.729	0.337	0.596
t5-300	0.899	0.607	0.807
t6-200	0.862	0.591	0.664
t6-300	0.886	0.635	0.853

**4. 결 론**

본 논문에서는 장력법이 박판의 필릿 용접시 발생하는 좌굴변형에 주는 효과를 분석하기 위해 두께가 t=4, 5와 6 mm인 세 가지 시편 모델에 대해 장력의 크기와 방향에 따른 필릿 용접실험을 수행하였다. 실험 결과로서 발생하는 좌굴 형상은 수치해석에서 구한 지배적인 좌굴모드와 일치됨을 확인할 수 있었다. 최대 변형량을 기준으로 했을 때 장력법을 적용한 정량적인 효과는 장력법을 적용하지 않는 경우보다 용접선 방향으로 공칭항복응력의 약 2.5%와 10% 수준에 해당되는 인장응력을 발생하는 장력을 작용시켰을 때, 판의 두께와 용접속도에 따라 최대 변형량이 각각 약 6~27%와 20~50% 정도 감소되었다. 용접선에 법선 방향으로 장력을 작용시키는 경우 변형량 감소에 주는 영향은 용접선 방향으로 장력을 작용시키는 경우 보다 상대적으로 적지만 공칭항복응력의 약 6.5% 수준에 해당되는 응력을 발생시키는 장력을 가할 경우 20%이상의 변형감소효과가 있다는 것을 볼 수 있다. 이러한 효과는 장력이 수축작용을 제한하기 때문으로 분석된다.

추후에는 판재의 세장비 및 보강재의 수 등에 따른 연구와 함께 그 결과들을 토대로 판재의 크기와 용접조건에 따른 적

정수준의 장력의 크기를 결정하는 부분에 대한 연구가 필요할 것이다.

**후 기**

이 논문은 2006년도 울산대학교 연구비 지원에 의하여 연구된 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

김상일 (2001). "박판 평블록 구조의 용접변형 제어법 개발", 대한용접학회 춘계학술발표대회 개요집, 제1권, pp 153-156.

김상일 (2003). "FPSO 선 Moon Pool 구조의 용접변형 해석에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제17권, 제3호, pp 27-32.

신대회, 신상범, 이주성 (2006). "유한요소해석을 이용한 Channel I butt SA 용접부 변형 해석에 관한 연구", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 189-192.

신상범, 이동주 (2003). "박판 용접부 좌굴 변형 제어에 관한 연구", 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, 제1권, pp 287-289.

이주성 (2004). "평블록의 용접변형제어에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제18권, 제1호, pp 35-40.

이주성, 김철호 (2006). "장력법을 적용한 선체 박판블록의 변형감소방안에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제20권, 제3호, pp 103-108.

장창두, 서승일 (1988). "열탄소성해석에 의한 잔류응력 계산", 대한용접학회논문집, 제6권, 4호, pp 35-43.

허주호, 김상일 (2003). "박판 평 블록 구조의 용접변형 제어법 개발(I)", 대한용접학회지, 제21권, 4호, pp 75-79.

Masubuchi, K. (1980). Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford.

2007년 12월 21일 원고 접수

2008년 2월 12일 최종 수정본 채택