

장력법을 적용한 필릿용접변형 제어에 관한 연구

이 주 성 · 김 철 호

大韓熔接·接合學會誌 第27卷 第4號 別冊

2009. 8

장력법을 적용한 필릿용접변형 제어에 관한 연구

이 주 성^{*†} · 김 철 호^{**}

^{*}울산대학교 조선해양공학부

^{**}STX조선 조선해양연구소

On the Fillet Weld-Induced Deformation Control by Applying the Tensioning Method

Joo-Sung Lee^{*†} and Cheul-Ho Kim^{**}

^{*}School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680-749, Korea

^{**}Shipbuilding & Ocean Research Institute, STX Shipbuilding, Changwon, 641-839, Korea

[†]Corresponding author : jslee2@ulsan.ac.kr

(Received December 2, 2008 ; Revised March 16, 2009 ; Accepted June 19, 2009)

Abstract

As it has been well appreciated, the weld-induced deformation control is one of the most important issues from view point of efficiency in ship production. The weld-induced deformation is more serious in the case of thin plate block than in the case of relatively thick plate block, since, for example, heat affect zone of thin plates is wider than that of thick plates for the same heat input. Among weld-induced deformation, buckling deformation due to shrinkage and residual stress in weld line direction is one of the most serious deformation type. This paper is concerned with the controlling the buckling deformation of thin plate fillet weld by applying the tensioning method. Weld experiments have been carried out for specimens with varying the magnitude and direction of tension load. The results are graphically represented to show the effect of tensioning method upon reducing the weld-induced deformation. From the present findings, its has been seen that tensioning method is one of the useful ways to control the weld-induced deformation of fillet weld of thin plates.

Key Words : Buckling deformation, Buckling mode, Residual stress, Tension load, Tensioning method, Thin plate, Fillet weld, Weld-induced deformation

1. 서 론

선박의 건조에 있어서 용접변형은 필연적으로 발생하게 되지만, 생산성 향상을 위해 용접변형의 발생량을 가능한 낮은 수준이 되도록 제어해야 하는 중요성은 이미 잘 인식되어져 있다. 최근 선체중량의 경량화를 위해 박판의 사용 비율이 증가하고 있으며, 특히 여객선과 같이 다수의 갑판을 갖는 선박에서는 상당량의 박판이 사용되고 있다. 박판은 열전달 특성상 용접시 입열량이 동일하다면 후판 보다 열영향부의 폭이 넓고 또한 내적 및 외적 구속에 더 민감하기 때문에 상대적으로 많은 변형이 발생한다¹⁻⁴⁾. 용접시 발생하는 변형의

형태 중에서 박판의 경우에는, 용접이 완료된 후 용접선 방향으로의 종수축과 압축잔류응력으로 인한 좌굴변형 (Buckling deformation)이 특히 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 좌굴변형은 구조적 강도 저하와 외관상의 불량은 물론이고, 조립 단계 이후의 공정에서 발생하는 추가적인 변형과 이를 바로잡기 위한 과도한 곡직 작업으로 인해 잔류되는 초기응력은 구조강도저하에 추가적인 원인을 제공하며, 변형교정작업에 많은 시간이 추가로 투입해야 하는 등 생산성 저하의 주된 원인으로 작용하고 있다. 이러한 이유로 발생된 변형을 교정하는 작업이 전체 블록 제작 시간 중 상당부분을 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 변형 방지대책을 마련하여 시행하는 것이 대부분이다. 따라서 용접변형을 교정하는 기술보다는 용접변형 자체를 조립단계 이전에서 제어하는 기술이 필요하다^{5,6)}.

본 논문에서는 박판 용접시 좌굴변형을 제어하기 위해 장력법 (Tensioning method)를 적용한 연구로서, 필릿 용접시 발생하는 변형의 감소에 주는 정량적인 효과를 다루었다. 신상범과 이동주⁷⁾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 수치해석적으로 이미 검증한 바 있다^{8,9)}. 허주호와 김상일⁸⁾은 평블록 조립시 장력법을 적용하였을 때 횡각변형 등의 감소에 주는 영향을 실험과 수치해석을 통해 다룬 바 있고, 이주성과 김철호⁹⁾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 용접변형의 제어에 어느 정도의 효과가 있는지를 분석하는 것을 주된 내용으로 다루고 있다. 인위적으로 작용시키는 인장력의 크기가 변형감소에 주는 정량적인 영향을 파악하기 위해 인장력의 크기와 방향 그리고 판의 두께를 변화 시킨 다수의 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 20~60% 정도의 변형감소 효과가 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 입열량이 적은 경우보다 입열량이 많은 경우에 변형감소 효과가 더 크다는 점을 알 수 있었다.

2. 필릿용접실험

본 절에서는 본 연구의 필릿용접실험을 위한 시편모델과 용접조건 및 실험방법 그리고 실험결과를 기술하

였다. 실험 1은 보강재가 하나인 경우로서 박판 용접시 좌굴변형을, 그리고 실험 2는 보강재가 두 개인 경우로서 각변형의 감소에 장력법이 어느 정도 효과가 있는지를 알아보기 위한 것이다.

2.1 실험시편과 실험조건

2.1.1 실험 1의 시편과 실험조건

본 용접실험을 위한 시편은 Fig. 1에 보인 바와 같이 판의 중앙에 보강재가 하나 부착된 것으로서 보강재와 판의 접합부 좌우를 동시에 필릿 용접을 하였다.

시편의 길이와 폭은 400×300mm로 같고, 두께는 4, 5와 6mm인 세 종류이다. 절단으로 인한 초기변형을 최소화하기 위해 모든 시편은 플라즈마 절단으로 제작하였다. 재료는 공칭항복응력이 235 MPa인 연강이다. 시편의 크기와 용접조건 등 실험조건들을 Table 1에 정리하였다. 보강재의 크기는 길이×높이 = 400×60 mm 이고 두께는 판의 두께와 같게 하였다. 용접기로는 CO₂ 자동용접기를 사용하였으며, 용접전류와 용접전압은 모든 시편에 대해 같은 값을 사용하였다. 용접속도는 두께 4mm인 경우에는 300mm/min 그리고 5mm와 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 용접

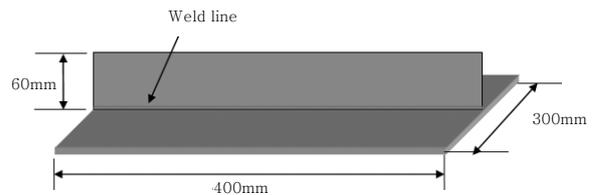


Fig. 1 Specimen model for welding test 1

Table 1 Specimen size and test condition for test 1

Plate thickness(mm)	4	5	6	
Size of stiffener L × D × 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

을 수행하였다. Table 1에서는 장력 자체의 크기가 아닌 장력을 그 작용 방향에 대한 단면적으로 나눈 평균 응력으로서 'Tensile stress'로 표시하였다. 예로서 'weld direction'으로 10 MPa라 함은 보강재 단면적을 제외한 판재에 작용하는 평균인장응력이 10 MPa가 되도록 장력을 작용시켰음을 의미한다. 따라서 본 용접실험에서는 '두께-속도'로 구분해서 4t-300, 5t-200, 5-300, 6t-200, 6t-300인 다섯 가지 경우 각각에 대해 장력이 없는 경우 즉, 평균인장응력이 0 MPa인 경우, 평균인장응력이 각각 10과 25 MPa이 발생되도록 용접선 방향으로의 장력을 작용시킨 경우 그리고 평균인장응력이 15 MPa이 발생되도록 용접선에 법선방향으로의 장력을 작용시킨 네 가지로서 총 20개 시편에 대해 실험을 수행하였다.

2.1.2 실험 2의 시편과 실험조건

시편의 길이와 폭은 800×400mm이고, 두께는 6과 8mm인 두 종류이다. 재료는 공칭항복응력이 235 MPa인 Grade A 연강이다. 용접 프로세스는 CO₂ 용접이고 용접조건 및 장력에 의한 인장응력 등 실험조건을 Table 2에 열거하였다. 보강재의 크기는 길이×높이 = 400×130 mm이고 두께는 판의 두께와 같다. 장력은 용접선에 법선 방향 (보강재에 법선 방향)으로 작용시킨 상태에서 용접을 수행하였다. Table 1에서와 마찬가지로 장력 자체의 크기가 아닌 장력을 그 작용 방향에 대한 단면적으로 나눈 평균응력으로 표시하였다.

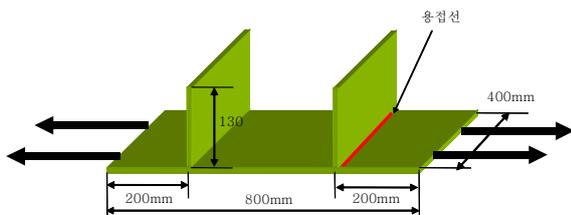
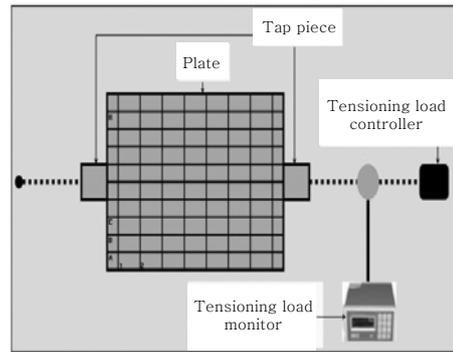


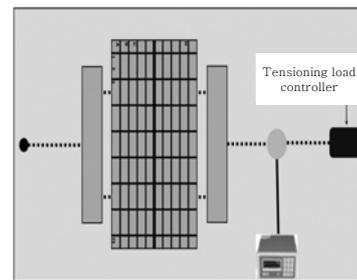
Fig. 2 Specimen model for welding test 2

Table 2 Specimen size and test condition for test 2

Plate thickness(mm)	6	8
Size of specimen	800×400	800×400
Steel grade	A	A
Current I (A)	290	270
Voltage V (V)	29	27
Speed v (mm/min)	400	360
Tensile stress normal to weld line (MPa)	0, 12.2, 24.5	0, 9.2, 18.4



(a) Tension load in the weld direction



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

Fig. 3 Arrangement of experiment apparatus for test 1

2.2 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 중심으로 대칭되는 두 곳에서 하중이 작용하도록 하였다. 좌측 단은 Fig. 3(a)와 마찬가지로 고정 단이다. Fig. 4와 5는 실험 시편, 자동용접기 등 용접준비가 완료된 장면을 보여준다.

용접으로 인한 변형량은 시편에 미리 표시한 격자점들 (Grid points)에서의 수직 변위를 용접 전후에 디지털 게이지로 측정하여 구하였다.

3 실험 결과 및 검토

3.1 실험 1

장력의 크기와 방향에 따른 변형 형상의 변화를 판

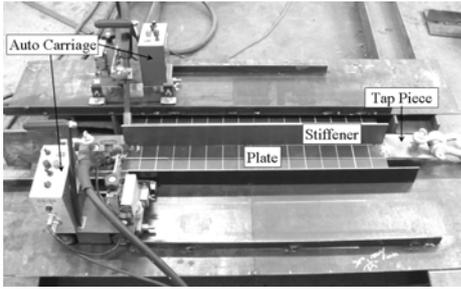


Fig. 4 Arranged apparatus for test 1



Fig. 5 Arranged apparatus for test 2

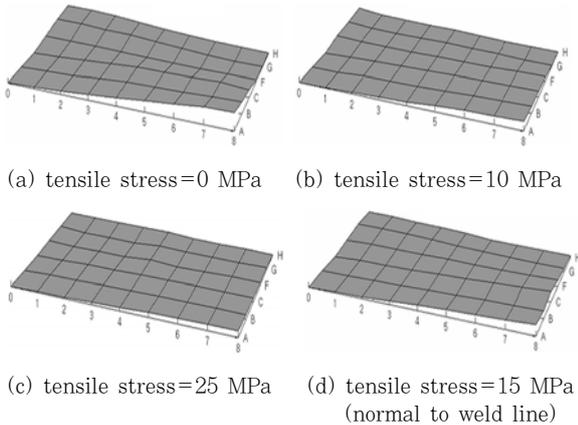


Fig. 6 Deformed shape to magnitude and direction of tensile stress

두께는 $t=5\text{mm}$ 이고 용접속도는 $200\text{mm}/\text{min}$ 인 경우에 대해 Fig. 6에 보였다. Fig. 6에서 보듯이 변형형상은 모두 같지만 장력을 작용시킨 경우 변형의 크기가 감소하는데, 그 효과는 용접선의 법선 방향으로 장력을 작용시킨 경우 보다는 용접선 방향으로 작용시킨 경우에 보다 크다는 것을 볼 수 있다.

장력의 크기와 방향이 필릿 용접시 변형에 주는 정량적인 영향을 보이기 위해 Fig. 7과 8에서는 용접선 방향으로 장력을 작용시킨 경우 그리고 Fig. 9와 10에서는 용접선에 법선 방향으로 장력을 작용시킨 경우 발생된 최대 변형량을 비교하였다.

Fig. 7은 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

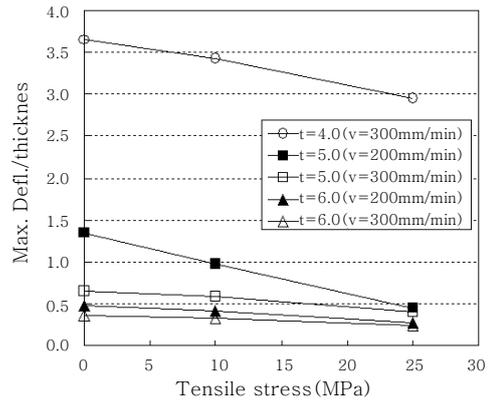


Fig. 7 Change of maximum deflection to tensile stress : tensile load in weld direction

인위적으로 작용시킨 인장응력에 대해 거의 선형적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 절대적인 크기로 비교하면 판 두께가 얇을수록 그 효과가 크다는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 같은 결과를 입열량에 따른 장력법 적용의 효과를 보인 것인데, 여기에서 횡축의 입열량 계수 (Heat input parameter)는

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

로 정의된 것이다. Q 는 유효 입열량으로서 아래의 식 (2)와 같이 정의된다.

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

Fig. 8에서 보듯이 입열량이 클수록 장력법의 효과가 두드러짐을 알 수 있다.

용접선에 법선방향으로 장력을 작용시킨 경우, 동일한 표현 방법으로 결과를 표시한 것이 Fig. 9와 10과

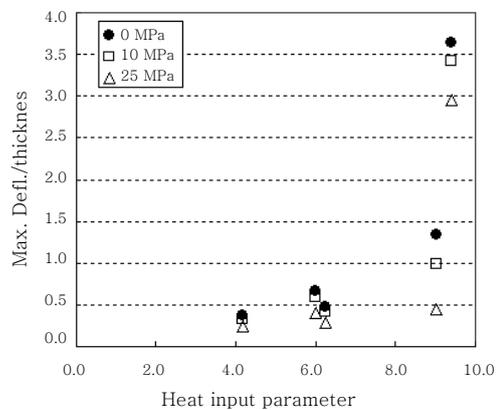


Fig. 8 Change of maximum deflection to heat input parameter : tensile load in weld direction

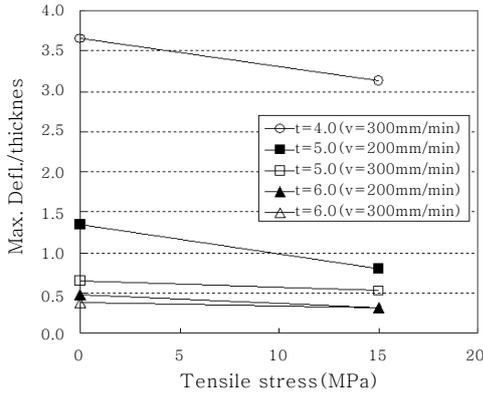


Fig. 9 Change of maximum deflection to tensile stress : tensile load in the normal direction to weld line

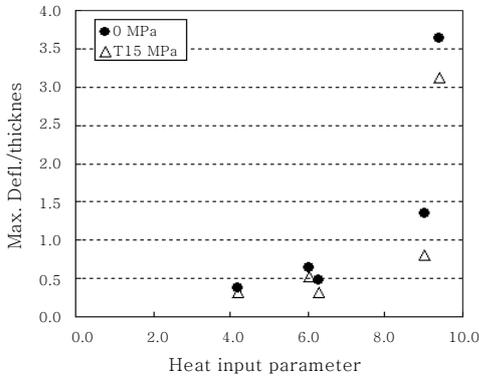


Fig. 10 Change of maximum deflection to heat input parameter : tensile load in the normal direction to weld line

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. 8과 10으로부터 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 장력법을 적용하지 않는 경우 즉, 인장응력이 0 MPa인 경우의 최대 변형량에 대해 장력법을 적용한 경우의 최대 변형량을 무차원화시켜 최대 변형량의 감소의 정도를 Table 3에 정리하였다. 본 연구의 실험에 의하면 용접선 방향으로 공칭항복응력의 약 4.3% 수준에 달하는 인장응력을 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 장력

Table 3 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

을 작용시키는 경우, 변형량 감소에 주는 영향은 용접선 방향으로 인장력을 작용시키는 경우 보다 상대적으로 적지만 공칭항복응력의 6.5% 수준에 해당되는 응력을 발생시키는 장력을 가할 경우 최소 15%이상의 변형감소효과가 있다는 것을 볼 수 있다.

3.2 실험 2

본 실험은 보강재가 두 개인 모델에 대한 것으로서 인위적으로 작용시키는 인장력이 좌굴변형 보다는 횡각 변형의 감소에 주는 영향을 보고자 하는 것이 주된 목적이다. Fig. 11에는 두께별로 인장응력의 크기에 따른 변형형상의 변화를 표시하였고, 인장력에 의한 인장응력의 크기에 대한 횡각변형량의 변화를 Fig. 12에 표시하였다. 보는 바와 같이 본 인위적으로 작용시킨 인장력이 횡각변형량의 감소에 상당히 효과적이며, 판 두께 t=6과 8mm 모두가 비슷한 감소 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 횡각변형량의 감소와 인위적 인장력에 의한 인장응력 사이의 관계를 Fig. 13에 보였다. 횡측은 인장응력을 시편 재료의 공칭항복응력으로 무차

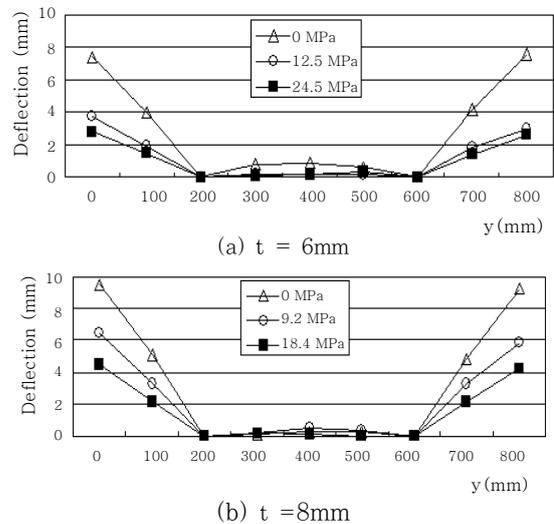


Fig. 11 Deformed shape to change in tensile stress

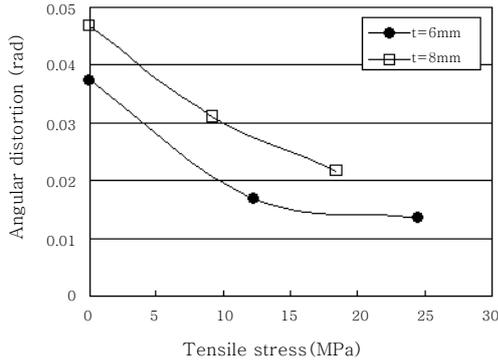


Fig. 12 Angular distortion to change in tensile stress

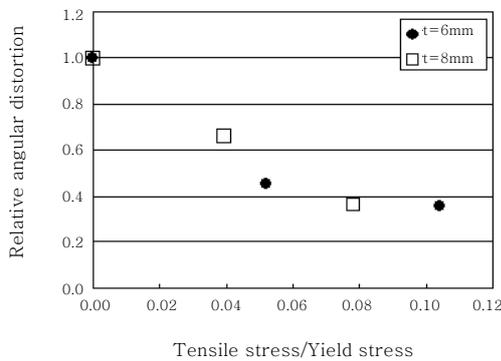


Fig. 13 Relative angular distortion to change in tensile stress

원화 시킨 것이고 증축은 인장력을 작용시키지 않는 경우에 대한 각변형량의 상대적인 비율이다. 본 실험결과에 의하면 항복응력의 약 4~10%에 상당하는 인장응력을 작용시켜도 각변형량이 약 30~60% 정도의 감소 효과를 얻을 수 있다는 점을 보여 주며, 공칭항복응력의 10% 수준을 넘어서는 경우에는 그 감소의 기율이 적어짐을 예상할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 장력법이 박판의 필릿 용접시 발생되는 용접변형의 감소에 주는 효과를 분석하기 위해 보강재가 하나인 경우 (실험 1)와 두 개인 경우 (실험 2)인 시편 모델에 대해 장력의 크기와 방향에 따른 필릿 용접실험을 수행하였다. 본 연구의 실험결과에 의하면 변형량의 감소 수준은 인장력에 의한 인장응력의 크기와 방향에 따라 달라지는데, 실험 1의 결과로부터 비교적 박판의 경우 용접선 방향으로 장력을 작용시키면 용

접변형량 감소에 보다 효과적임을 알 수 있었다. 한편 실험 2의 결과로부터, 횡각변형 즉, 용접선에 법선방향으로의 굽힘변형은 용접선의 법선방향으로 장력을 작용시키면 상당한 제어효과가 있다는 것을 확인하였다.

본 연구의 실험에 의하면 용접선 방향 또는 그에 법선방향으로 인위적 인장력에 의한 인장응력이 공칭항복응력의 10% 수준으로 작용시키면 좌굴변형과 횡각변형의 제어에 최적이라고 판단된다. 그러나 보다 최적의 장력 수준은 추가적인 실험을 통해 확인해야 하며 또한 실제 현장에 적용시 생산성 측면에서 그 적용 가능성을 검토해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. S.I. Kim : A Study on the Analysis of Welding Distortion for Moon Pool Structure of FPSO Vessel, Journal of Ocean Engineering and Technology, **17-3**(2003), 27-32 (in Korean)
2. D.H. Shin, S.B. Shin and J.S. Lee : A Study on the Prediction of Welding Distortion and Residual Stress for Channel I Butt SA Weldment using FE Analysis, Proceedings of the Korean Society of Ocean Engineers Autumn Meeting (2006), 189-192 (in Korean)
3. C.D. Chang and S.I. Seo : Calculation of Residual Stresses by Thermal Elasto-Plastic Analysis, Journal of the Korean Welding & Joining Society, **6-4** (1988), 35-43 (in Korean)
4. Masubuchi, K. : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford, 1980
5. S.I. Kim, Y.K. Cho and S.W. Park : Development of Welding Deformation Control Method for Thin Panel Block Structure, Proceeding of the Korean Welding & Joining Society Spring Meeting, **1**(2001), 153-156 (in Korean)
6. J.S. Lee : A Study on the Accuracy Control of Panel Blocks, Journal of Ocean Engineering and Technology, **18-1**(2004), 35-40 (in Korean)
7. S.B. Shin and D.J. Lee : A Study on the Control of Buckling Distortion of the Thin Panel Structure, Proceeding of the Korean Welding & Joining Society Special Meeting, **1**(2003), 287-289 (in Korean)
8. J.H. Heo and S.I. Kim : Development of Welding Distortion Control Method for Thin panel Block Structure(I), Journal of the Korean Welding & Joining Society, **21-4** (2003), 75-79 (in Korean)
9. J.S. Lee and C.H. Kim : On the Deformation Control of Ship's Thin Plate Block by Applying the Tensioning Method, Journal of Ocean Engineering and Technology, **20-3** (2006), 103-108 (in Korean)