

# 장력법을 적용한 선체 박판블록의 변형감소 방안에 관한 실험연구

이주성\* · 김철호\*  
\*울산대학교 조선해양공학부

## On the Deformation Control of Ship's Thin Plate Block by Applying the Tensioning Method

JOO-SUNG LEE\* AND CHEUL-HO KIM\*

\*School of NAVA, Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEY WORDS:** Distortion 변형, Longitudinal shrinkage 종수축량, Residual stress 잔류응력, Tension load 인장 하중, Tensioning method 장력법, Thin plate 박판, Transverse shrinkage 횡수축량

**ABSTRACT:** It has been well appreciated that reducing weld-induced deformation as low as possible is important during fabrication for a more efficient production of blocks. 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 deals with the application of the mechanical tensioning method to butt weld of thin plates to reduce the weld-induced deformation. In order to investigate the quantitative effect of tensioning method upon the reduction of angular deformation and shrinkage in longitudinal and transverse direction of weld line, butt welding test have been carried out for several thin plate specimens with varying plate thickness and magnitude of tensile load. From the present experimental study, it has been found that the tensioning method is very effective on reduction of weld-induced residual stress as well as weld-induced deformation.

### 1. 서 론

용접에 의한 박판의 변형 제어·교정기술은 고부가가치 선박 및 기자재 관련 기술로서 여객선 건조를 위한 필수 기술이나 현재 우리나라에는 여객선 건조 경험의 전무로 인하여 박판용접기술 또한 발전이 미비하다.

박판은 열전달 특성상 후판에 비해 용접시 열영향부가 넓어서 많은 변형이 발생하는데 (방한서 등, 1998), 특히 종굽힘 및 수축변형이나 잔류응력으로 인한 좌굴변형이 빈번히 발생한다 (김상일, 1999; 김상일, 2003; 장창두, 서승일, 1988; Masubuchi, 1980). 이러한 용접변형은 구조적 강도저하와 외관상의 불량은 물론이고, 조립 단계 이후의 공정에서 발생하는 추가적인 변형과 이에 기인하여 발생하는 과도한 곡직 작업 시수 등의 문제점을 초래하여 생산성 저하의 주원인이 되고 있다. 그 때문에 전체 용접구조물의 제작시간 중에서 변형 제어작업이 점유하는 공정수가 많으며, 특히 박판의 경우는 전공정수의 20%를 점유하는 경우도 있다 (Matsui, 1983).

실제의 용접구조물에 있어서 용접조건 특히 입열량의 변화에 의해서 변형의 정도가 다르므로, 따라서 변형량을 해석적인 방법으로 예측하는 것은 매우 어렵다. 실제 현장에서는 작업자

의 경험에 의해서 변형을 예상하고, 조립작업 이전에 변형방지 대책을 마련하여 시행하는 것이 대부분이다. 따라서 용접변형을 교정하는 기술보다는 용접변형 자체를 조립단계 이전에서 제어하는 기술이 필요하다 (김상일, 2001; 이주성, 2004).

박판 용접부의 변형에 관한 초기 연구는 주로 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 감소시키거나 열 및 기계적 하중을 이용하여 수축을 이완시키는 생산적인 제어 방안이 대부분을 차지하고 있다 (신상범과 이동주, 2003). 그러나 선체 구조형상은 설계초기 단계에서 결정되므로 구조변경 자체가 어렵고, 특히 박판 용접부의 용접 특성이 정반 조건, 작업자의 숙련도, 그리고 용접장비의 특성 등과 같은 작업 환경에 대한 의존성이 매우 높기 때문에 변형제어를 위한 기존 방안의 활용도는 극히 제한적이다.

조선 산업의 주된 경쟁국인 일본의 경우 지난 수년간 체계적인 연구를 수행하여 상당 수준의 기술력을 보유하고 있어서 호화 유람선과 같은 고부가가치 선박의 건조가 가능하다. 한편, 국내에서도 용접변형제어에 관해 많은 관심을 갖고 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 박판의 용접변형제어 및 교정에 관한 기술은 일본에 비해 뒤쳐져 있는 실정이다.

본 논문은 레버 블록을 이용한 장력법을 구체적인 변형제

교신저자 이주성 : 울산광역시 남구 무거2동 산29번지

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

어 방안으로 적용한 연구로서 (허주호와 김상일, 2003; 이주성과 김철호, 2005), 맞대기 용접시 용접선 방향으로 인위적으로 가하는 인장력의 크기가 종굽힘과 수축변형에 주는 정량적인 영향을 분석하는 것을 연구의 주된 내용으로 설정하였다. 이를 위해 인장력의 크기를 변화시킨 다수의 박판 시편에 대한 맞대기 용접을 수행하여 그 결과를 인장력의 크기와 변형량 사이의 관계 그래프로 정리하였다. 본 연구의 결과에 의하면 장력법을 적용해서 용접선 방향으로의 굽힘과 수축변형의 감소에 상당한 효과가 있음을 확인하였다. 본 논문의 결과는 추후 판재의 크기와 용접조건에 따른 적정수준의 인장력의 크기를 결정하는 예측식의 개발 등에 활용할 수 있을 것이다.

## 2. 본 연구의 용접실험

본 절에서는 본 연구에서 수행한 용접실험의 방법, 용접조건 그리고 계측 방법 등을 정리하였다.

### 2.1 실험모델과 실험조건

시편의 크기는 길이×폭=800×400mm이고, 두께는 4, 5와 6mm인 세 종류이다. 시편은 초기 변형을 줄이기 위해 플라즈마 절단으로 제작하였다. Table 1에 시편과 용착금속의 특성치들을 열거하였다. 용접기로는 CO<sub>2</sub> 자동용접기를 사용하였고, 두께별 용접조건은 Table 2와 같다. 4와 5mm의 경우에는 개

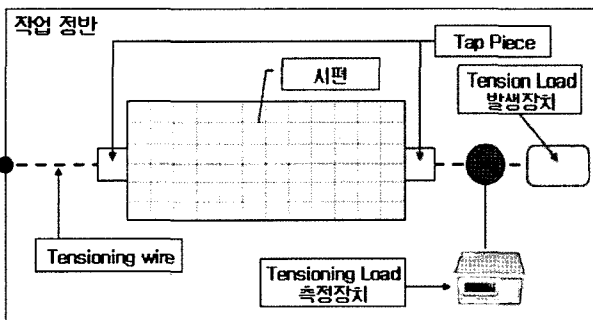


Fig. 1 Arrangement of experiment apparatus

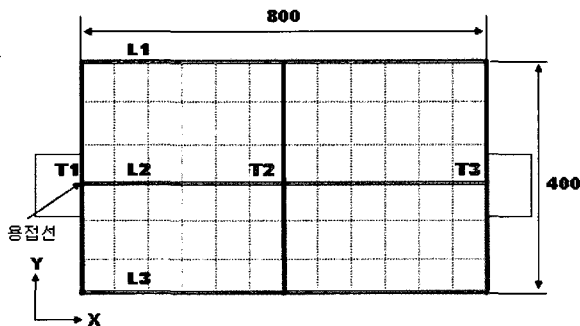


Fig. 2 Location for deformation measurement

선각 없이 1 Pass 용접을 하였고, 6mm 시편은 50°의 개선각을 갖는 V 개선이고 2 Pass 용접을 하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 장비들의 배치를 보여준다.

### 2.2 변형계측방법

변형형상을 측정하기 위해 Fig. 2에 보인 바와 같이 용접선 방향과 용접선에 수직한 방향으로 50mm 간격으로 격자를 그리고 판재를 정반에 놓은 다음 각 격자점에서 면외변위 (z 방향으로의 변위)를 디지털 게이지로 계측하여 각변형량 산출에 이용하였다. 종수축과 횡수축량은 용접전 판재에 미리 표시해 놓은 위치의 거리를 버니어 캘리퍼스로 측정하여 산출하였다.

### 2.3 잔류응력 계측방법

시편에 대한 잔류응력측정은 XRD장비를 사용하여 측정하였다. 잔류응력 측정 지점에 (용접선에서 0, 25, 50, 75, 150mm) 전해 연마기를 통해 시편의 표면처리를 한 후 STRESSTSCH사의 X3000\_XRD 장비 (Fig. 3)를 사용하여 잔류응력을 측정하였다.

Table 1 Mechanical properties of specimen and weld material

Specimen	SS-41	Yield stress	Tensile strength	Ductility(%)
		(kg/mm <sup>2</sup> )	(kg/mm <sup>2</sup> )	
		50	29	90
Weld material	MC-50S	46	57	28

Table 2 Welding condition

Thickness of specimen(mm)	4	5	6
Current, I (A)	170	240	270
Voltage V(V)	22	24	26
Weld speed v(mm/min)	210	380	380
Heat input (cal/mm)	256.46	218.27	532.04
Process	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Tip distance(mm)	10	10	10
No. of passes	1	1	2
Wire diameter (mm)	1.2	1.2	1.2

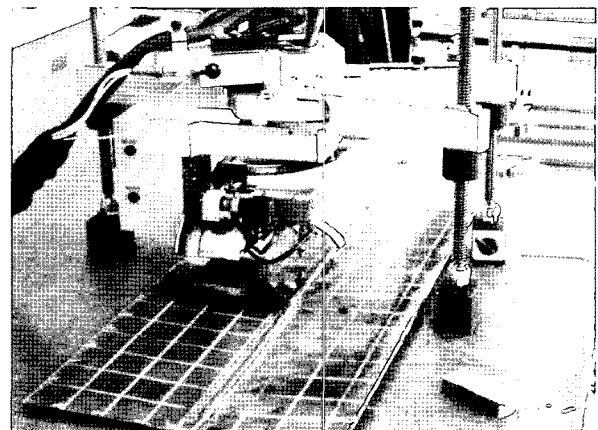


Fig. 3 Residual stress measurement

2.4 실험방법 및 순서

본 연구에서 수행한 실험의 순서도를 Fig. 4에 보였다. 시편의 초기변형형상을 계측하고 용접선의 법선방향 즉, 판재의 폭 방향으로의 평균인장응력이 계획된 값이 되도록 인장력을 가한 상태에서 용접을 수행하였다. 인장력은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 용접선 양 끝에 폭 150mm의 Tab piece를 용접하고 좌측 Tap piece를 고정시킨 상태에서 우측 Tap piece를 레버 블록에 연결하여 계획한 인장응력이 발생될 수 있도록 작용시켰다. 본 실험에서는 두께별로 인장력만을 변화시켜가며 실험하였다. 인장응력은 시편 길이의 중앙에서 폭 방향으로의 평균 응력이 0, 5, 10, 15, 20MPa에 해당되도록 인장력을 가한 상태에서 용접을 수행하였다. 용접이 완료된 후 냉각시간은 1시간이며, 용접이 진행되면서 그리고 냉각 중에 인장력의 기록하여 그 변화를 살펴볼 수 있도록 하였다. 완전히 냉각된 상태에서 시편을 정반에 놓고 2.1절에서 기술한 방법에 따라 면외변위와 수축량을 계측하여 변형량 산출에 활용하였다.

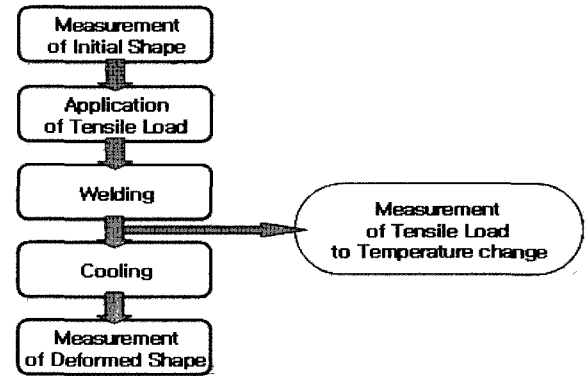


Fig. 4 Procedure of the present welding test

3. 실험결과 및 검토

3.1 인장력의 변화

용접 중 및 용접이 완료된 후 냉각 중 인장력 측정장치를 이용하여 기록한 인장력의 시간에 따른 변화를 Fig. 5에 각 두께별로 보였다. 용접이 진행되면서 용접선 길이방향으로의 팽창이 발생하기 때문에 인장력이 감소하지만 냉각이 진행되면서 인장력이 원래의 계획된 수준으로 회복되는 현상을 뚜렷하게 볼 수 있다.

3.2 면내 변형과 면외변형

인위적으로 가한 인장력에 따른 종수축량과 횡수축량의 변화를 보기위해 Fig. 6과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 인장응력에 따른 변형률로 표시하였다. 예상할 수 있는 바와 같이 종수축 변형률은 인장력 때문에 감소하는 반면 횡수축 변형률은 횡수축 작용과 인장력에 의한 Poisson 효과로 증가하는 것을 알 수 있다. 두께 4, 5와 6mm 시편에 대해 20MPa를 작용시켰을 때 종수축 변형률이 각각 63.6, 45.0와 51.0% 감소하여, 장력법이 종수축량 감소에 상당한 효과를 준다는 것을 확인할 수 있었다.

인장 응력의 크기에 따른 시험결과로서 Fig. 8은 두께 5mm 인 판의 면외 변형의 변화를 보여주는 것이다. 면외 변위를 실제 값을 10배 확대한 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 인장 응력의 증가에 따라 종방향과 횡방향으로의 굽힘변형이 현저하게 감소하고 있음을 알 수 있다.

인위적으로 가한 인장력이 종방향과 횡방향으로의 굽힘변형 분포에 주는 영향을 보기 위해 Fig. 2에 보인 용접선에 평행한 L2 위치와 그에 수직방향인 T2 위치에서의 굽힘변형의 크기 변화를 Fig. 9와 Fig. 10에 각 두께별로 보였다. 굽힘 변형량은 종굽힘에 대해서는 Fig. 2의 L2 위치 그리고 횡굽힘에 대해서는 T2 위치에서 계측한 변형량의 양 끝점을 직선으로 연결하여 이를 기준선으로 설정하고 그 기준선으로부터의 변위를 의

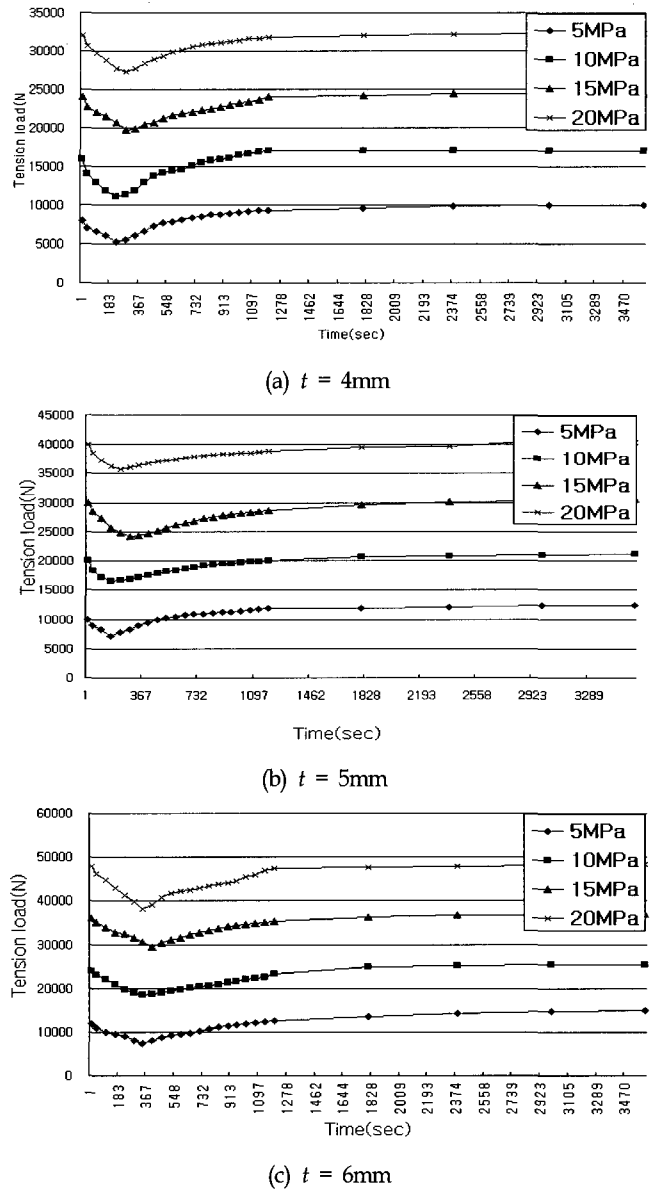


Fig. 5 Change of tensile load to time

미한다. Fig. 9와 10에서 보는 바와 같이 인장력이 용접선 길이 방향으로 작용시키는 것이지만 종굽힘 뿐만 아니라 횡굽힘 변형의 감소에도 효과적임을 알 수 있다. 인장응력에 따른 종굽힘 변형량의 최대값의 변화를 Table 3에 열거하였다. 인장응력이 20 MPa인 경우 최대 종굽힘 변형량이 두께 4, 5와 6mm에 대해 각각 54.30, 70.67와 81.60% 감소하였다.

**3.3 응력의 변화**

Fig. 11은 용접 시편이 완전히 냉각한 후 인장력 발생장치 때문에 수축하지 못해서 발생한 인장응력을 Tension Load 계로 측정된 결과를 나타내었다. 시편에 부가한 인장력의 크기가 증가할수록 용접선방향에 발생한 수축응력이 감소되는 결과가 나타났다.

Fig. 12는 두께가 5mm와 6mm인 시편에 대해 인장력을 작용시키지 않은 경우 (0MPa)와 인장응력이 20MPa가 되도록 인장력을 작용시킨 경우에 대해 잔류응력을 계측하여 그 분포를 표시한 것으로서 용접선방향 (종방향)으로의 잔류응력의 폭 방

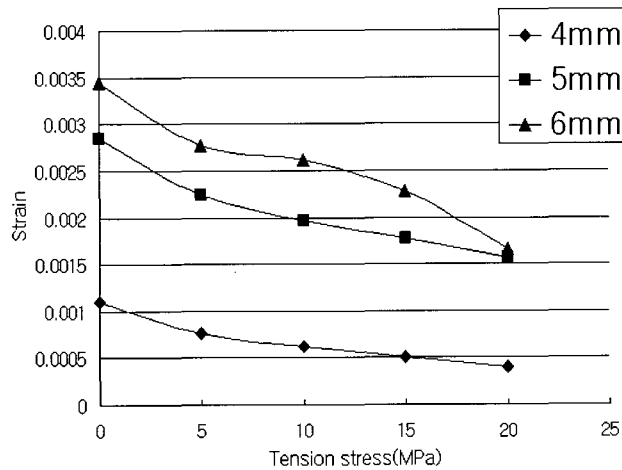


Fig. 6 Longitudinal shrinkage vs tensile stress

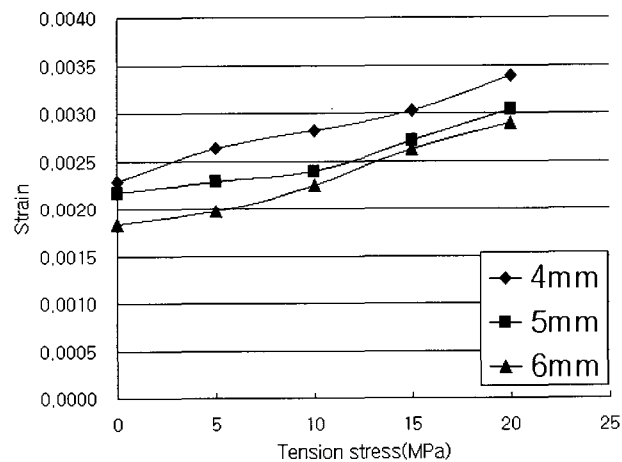


Fig. 7 Transverse shrinkage vs tensile stress

향으로의 분포이다. 용접선에서의 인장 잔류응력이 두께 5mm인 시편의 경우 35%, 6mm인 시편의 경우 23%가 감소하는 효과를 주었으며, 압축잔류응력도 현저히 감소되었음을 볼 수 있다. 이 결과로부터 압축잔류응력에 의한 좌굴변형방지에 장력법을 효과적으로 적용할 수 있다는 점을 알 수 있다.

**4. 결론**

본 논문은 박판의 용접변형제어 방법으로 장력법을 적용에 대한 연구이다. 박판의 맞대기 용접시 용접선 방향으로 인위적으로 가하는 인장력의 크기가 굽힘변형과 수축변형에 주는 정량적인 영향을 분석하기 위해 다수의 시편에 대해 실험을 수행하였다.

본 연구의 결과에 의하면 장력법을 적용하면 용접선 방향으로의 굽힘과 수축변형의 감소 그리고 용접선에 수직인 방향으로의 굽힘변형을 감소시키는 데에 상당한 효과를 볼 수 있다는 것을 확인하였고, 또한 좌굴변형의 원인이 되는 압축잔류응력의 감소에도 적지 않은 효과가 있어서 박판에서 빈번히 발생하는 좌굴변형방지에 장력법을 효과적으로 적용할 수 있다는 점을 알 수 있다.

본 논문의 결과는 추후 판재의 크기와 용접조건에 따른 적정수준의 인장력의 크기를 결정하는 예측식의 개발 등에 활용될 수 있으며, 이에 대한 연구결과는 추후 발표할 예정이다.

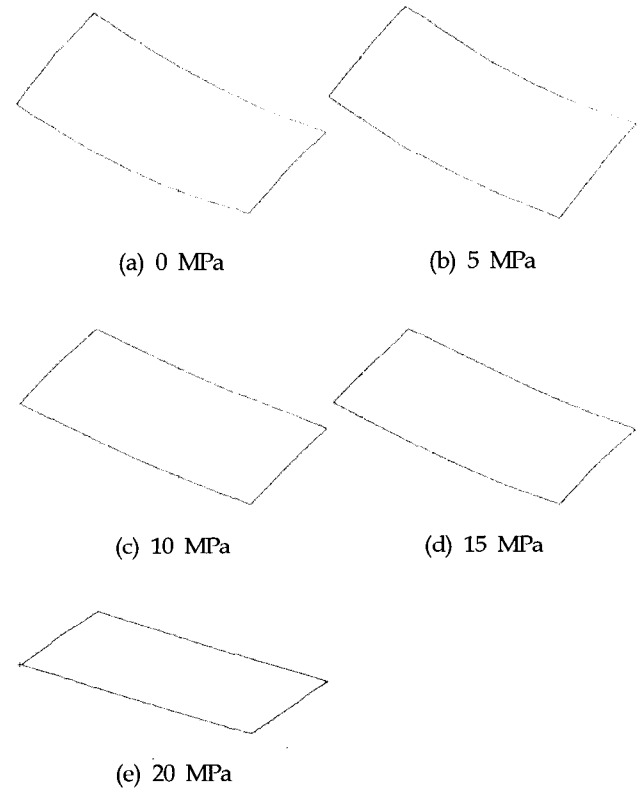
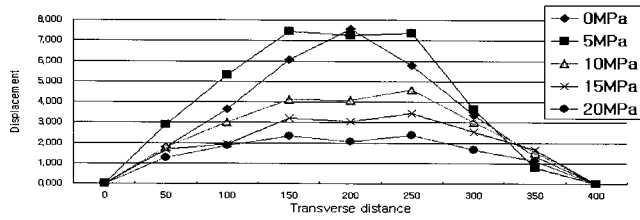
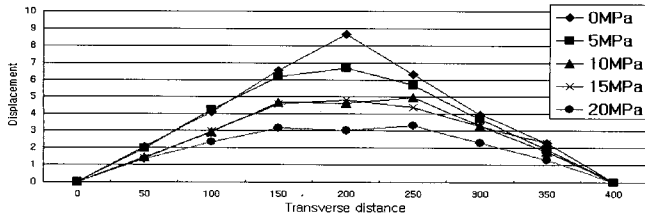


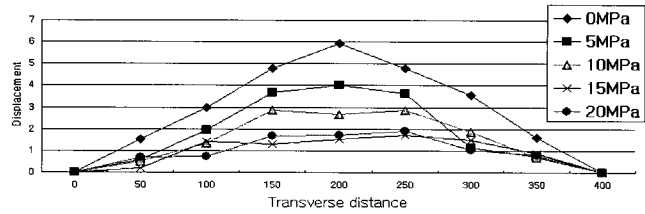
Fig. 8 Change of deformed to tensile stress



(a)  $t = 4\text{mm}$

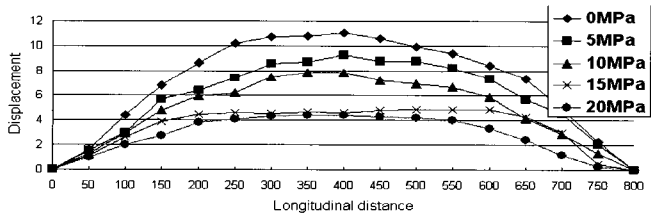


(b)  $t = 5\text{mm}$

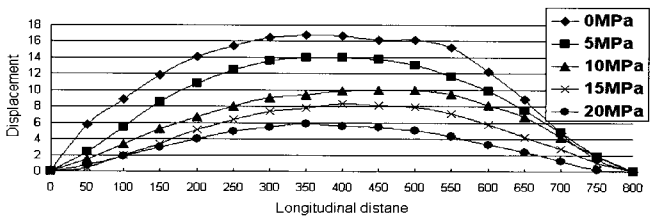


(c)  $t = 6\text{mm}$

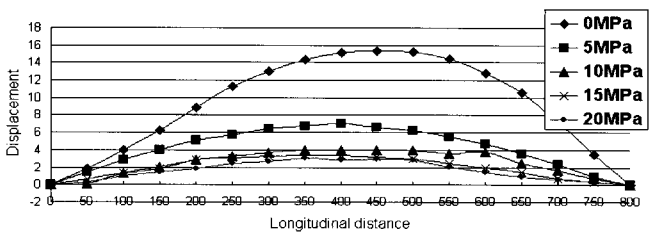
Fig. 9 Distribution of deflection in transverse direction (along T2 in Fig. 2)



(a)  $t = 4\text{mm}$



(b)  $t = 5\text{mm}$



(c)  $t = 6\text{mm}$

Fig. 10 Distribution of deflection in longitudinal direction (along L2 in Fig. 2)

Table 3 Maximum longitudinal bending deformation to tensile stress

(a)  $t = 4\text{mm}$

Location	L1	L2	L3	Average
Tensile stress				
0 MPa	16.92	11.10	14.19	14.07
5 MPa	13.67	9.26	10.10	11.01
10 MPa	12.36	7.90	7.23	9.16
15 MPa	11.05	4.90	6.75	7.57
20 MPa	9.95	4.40	4.96	6.43

(b)  $t = 5\text{mm}$

Location	L1	L2	L3	Average
Tensile stress				
0 MPa	18.76	16.79	20.17	18.58
5 MPa	15.46	14.01	17.24	15.57
10 MPa	7.77	10.01	12.41	10.06
15 MPa	11.69	8.32	8.78	9.60
20 MPa	5.72	5.83	4.79	5.45

(c)  $t = 6\text{mm}$

Location	L1	L2	L3	Average
Tensile stress				
0 MPa	15.13	15.37	13.52	14.67
5 MPa	7.2	7.03	8.34	7.52
10 MPa	4.75	4.03	4.25	4.34
15 MPa	3.36	3.38	2.44	3.06
20 MPa	2.87	3.09	2.13	2.70

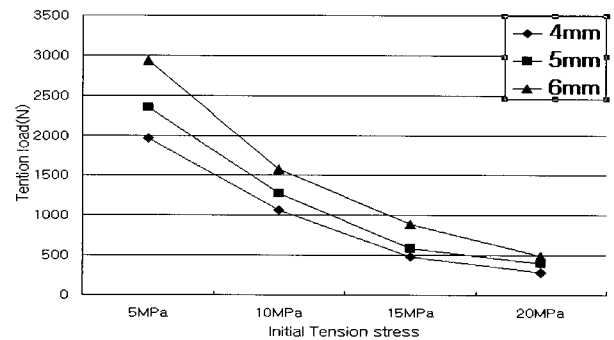


Fig. 11 Final shrinkage stress

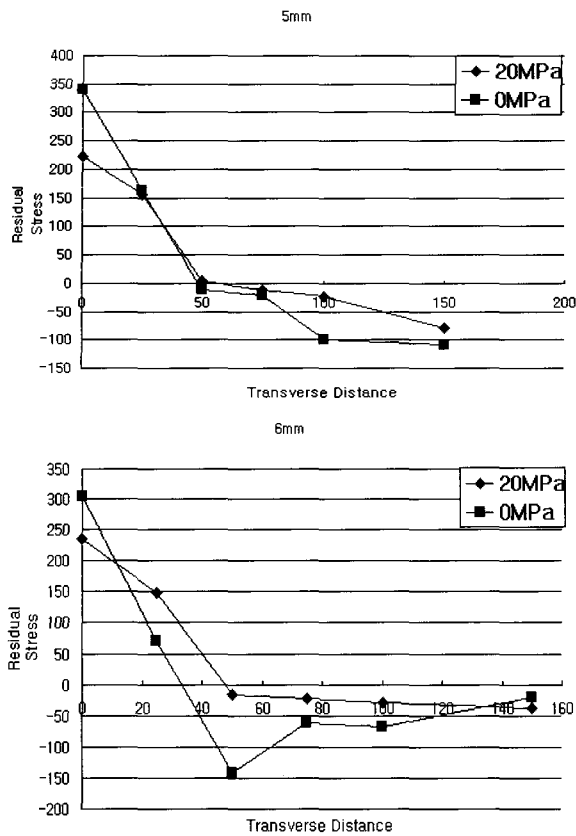


Fig. 12 Measured residual stress

후 기

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구된 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다 (KRF-2004-041-D00819).

참 고 문 헌

김상일 (1999). "선체 구조의 용접변형 제어법 개발", 울산대학교 공학박사 학위논문.

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.

방한서, 임래수, 김종명 (1998), "고장력강 용접부의 열·역학적 거동에 관한 수치해석적 연구", 한국해양공학회지, 제12권, 제4호, pp 33-42

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 (2005). "장력법을 적용한 선체 박판블록의 변형감소방안에 관한 연구", 한국해양공학회 춘계학술대회논문집, pp 80-85.

장창두, 서승일 (1988). "열탄소성해석에 의한 잔류응력 계산", 대한용접학회논문집, 제6권, 제4호, pp 35-43.

허주호, 김상일 (2003). "박판 평 블록 구조의 용접변형 제어법 개발(I)", 대한용접학회지, 제21권, 제4호, pp 75-79.

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

Matsui, S. (1983). "Control of Weld Distortion in Thin-skin Welded Structure". J. of Welding Society of Japan.

2006년 4월 10일 원고 접수  
 2006년 5월 10일 최종 수정본 채택