

## 선체 박판구조의 용접변형 제어에 관한 연구(I)

이주성<sup>†\*</sup>, 김철호<sup>\*\*</sup>

울산대학교 조선해양공학부<sup>\*</sup>, STX조선 주식회사 조선해양연구소<sup>\*\*</sup>

### On the Weld-Induced Deformation Control of Ship's Thin Plate Block (I)

Joo-Sung Lee<sup>†\*</sup> and Cheul-Ho Kim<sup>\*\*</sup>

School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan<sup>\*</sup>  
Shipbuilding & Ocean Research Institute, stx Shipbuilding Co., Ltd.<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

Although weld-induced deformation is inevitable in shipbuilding, it is important to reduce it as low as possible during fabrication for a more efficient production of ships' 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 transverse and longitudinal 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. Numerical simulation has been also carried out to compare the weld-induced deformation and residual stress. From the present 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.

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

---

접수일: 2006년 12월 31일, 승인일: 2007년 9월 13일

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

#### 1. 서론

박판은 열전달 특성상 후판에 비해 용접시 열영

항부가 넓고 판의 강성이 상대적으로 낮아 변형이 쉽게 발생한다. 특히 불균일한 용접입열에 의해 수축변형이나 잔류응력으로 좌굴변형이 빈번히 발생한다(김상일 1999, 장창두와 서승일 1988, Masubuchi 1980). 이러한 용접변형은 구조적 강도저하와 외관상의 불량은 물론이고, 현 조립 단계 이후의 공정에서 발생하는 추가적인 변형과 이에 기인하여 발생하는 교정 작업 시수 등의 문제점을 초래하여 생산성 저하의 주원인이 되고 있다(이주성 2004). 그 때문에 전체 용접구조물의 제작시간 중에서 변형 제어작업이 점유하는 공정수가 많으며, 박판의 경우는 전체 공정의 20%를 점유하는 경우도 있다 (Matsui 1983).

본 논문은 박판에서의 변형제어 방안으로서 기계적 인장법의 적용에 관한 연구로서, 용접부에 인위적으로 가하는 인장력의 크기가 굽힘과 수축 변형에 주는 정량적인 영향을 실험을 통해 분석하였다 (이주성 등 2006). 또한 장력을 감안한 열탄 소성해석을 수행하여 실험결과와 용접으로 유발되는 변형과 잔류응력의 크기 및 분포를 비교하여 그 해석방법의 타당성을 보였다(장창두와 이창현 2000). 본 연구에서의 열탄소성 해석법은 추후 박판용접시 좌굴변형이 발생하지 않도록 작용시킬 장력의 크기를 결정하기 위한 연구에 적용할 예정이다. 본 연구의 실험에서는 장력의 크기를 변화시킨 다수의 박판 시편에 대한 Butt 용접을 수행하여 장력의 크기가 각변형량과 수축량의 감소에 주는 영향을 도식적으로 보였다. 본 연구의 결과에 의하면 장력법의 적용이 인장력 방향으로의 굽힘과 수축변형의 감소에 상당한 효과가 있음을 확인하였다. 또한 본 연구에서 적용한 장력을 감안한 열탄소성 해석과정이 실험과 비교해 볼 때 타당성이 있음을 확인하였다.

2. 용접실험

2.1 실험방법 및 순서

본 연구에서 수행한 용접실험에서는 우선 시편의 초기변형형상을 계측하고 용접선의 법선방향 즉, 시편의 폭 방향으로의 평균인장응력이 계획된 값이 되도록 인장력을 가한 상태에서 용접을 수행

하였다. 인장력은 실험에 사용된 장비들의 배치를 보여주는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 용접선 양 끝에 크기 150x150mm의 Tap piece를 용접하고 좌측 Tap piece를 고정시킨 상태에서 우측 Tap piece를 체인 블록(Chain block)에 연결하여 계획한 인장응력이 발생할 수 있도록 작용시켰다. 계획한 인장응력은 시편 길이의 중앙에서 폭 방향으로의 평균응력을 의미하며 시편의 두께와 상관없이 0, 5, 10, 15, 20MPa에 해당되도록 인장력을 조절하고, 그 수준이 유지된 상태에서 용접을 수행하였다. 용접이 완료된 후 냉각시간은 1시간이며, 용접이 진행되면서 그리고 냉각 중에 인장력의 기록하여 그 변화를 살펴볼 수 있도록 하였다. 시편이 완전히 냉각된 상태에서 시편을 정반에 놓고 Fig. 2에 보인 격자점들에서 변위를 계측하여 변형량 산출에 활용하였다.

2.2 실험모델과 실험조건

시편의 크기는 길이×폭=800×400mm이고, 두

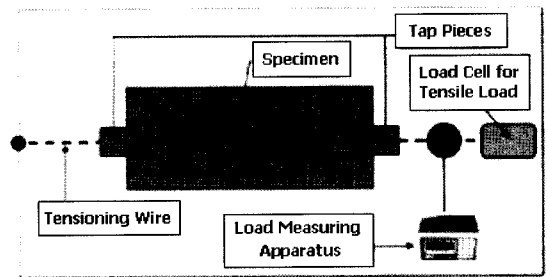


Fig. 1 Arrangement of experiment apparatus

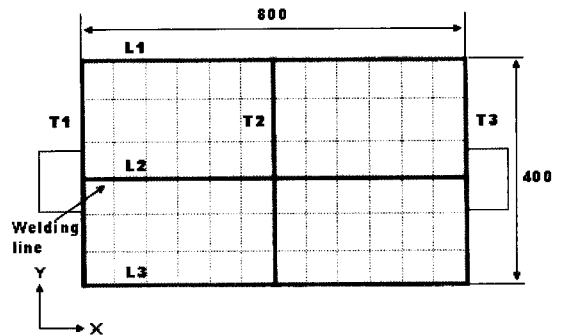


Fig. 2 Location for deflection measurement

Table 1 Welding condition

Thickness(mm)	4	5	6
Current I (A)	170	240	270
Voltage V(V)	22	24	26
Welding speed v(mm/min)	210	380	380
Heat input (cal/mm)	256.46	218.27	532.04
Process	CO2	CO2	CO2
Tip distance (mm)	10	10	10
No. of passes	1	1	2
Wire diameter (mm)	1.2	1.2	1.2

께는 4, 5와 6mm인 세 종류이다. 시편에 대해 균일한 입열량을 주기위해 CO2 자동용접기를 사용하였고, 두께별 용접조건은 Table 1과 같다. 4와 5mm의 경우에는 개선각 없이 1 pass 용접을 하였고, 6mm 시편은 50°의 개선각을 갖는 V 개선이고 2 pass 용접을 하였다.

### 2.3 인장력 작용 및 계측 장치

본 실험에서의 인장력은 Fig. 1에 보인 바와 같이 우측 Tap piece에 체인 블록을 연결하여 작용시켰으며, 우측 Tap piece와 체인 블록 사이에 로드 셀을 설치하고, 이를 작용 하중 값을 표시하는 디지털 인디케이터에 연결하여 작용하는 인장력을 계측하였다. 작용 하중의 최대 허용 값은 10ton이고, 디지털 인디케이터에서 계측되는 하중 값의 최대 오차는 20kg이다.

### 2.4 잔류응력 계측방법

본 실험의 시편에 대한 잔류응력측정은 Fig. 3에 보인 XRD장비를 사용하여 X-ray diffraction techniques 방법으로 측정하였다. 하중이 구조물에 작용할 때 구조물의 결정격자는 원자 사이의 거리가 변하면서 비틀린다. 변형이 탄성한계를 넘을 때 소성변형은 격자면 사이의 미끄러짐의 결과를 나타낸다. 금속은 결정체이며, 탄성변위를 X-ray 회절을 이용하여 결정상수를 측정함으로써 잔류응력 측정 될 수 있다. 응력이 없는 상태에서

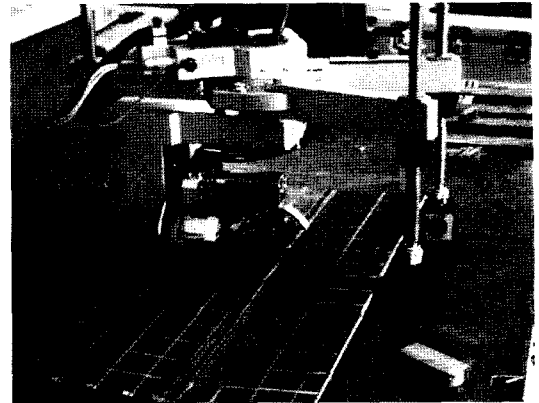


Fig. 3 XRD apparatus for residual stress measurement

금속의 결정상수는 알고 있거나 또는 실험적으로 측정될 수 있기 때문 비파괴적으로 재료에 손상을 주지 않고 탄성 변위를 측정할 수 있다.

## 3. 용접변형 해석

용접실험결과를 수치해석 결과와 비교하기 위하여 열탄소성 해석을 수행하였다. 용접으로 인한 변형량이 시편의 크기에 비해 상대적으로 작기 때문에 열전달 해석과 탄소성 해석을 분리하여 수행하였다. 용접현상의 수치 모델링 방법을 이용하여 먼저 열전달해석을 수행하였고, 그 결과인 온도분포와 인장력을 하중조건으로 하여 탄소성 해석을 수행하였다. 탄소성 해석에서는 열전도 해석으로 구해진 각 시간단계에서의 온도이력을 열하중으로 부여하고 경계조건에서 외부 하중인 인장력을 각 시간단계에 적용하였다. 냉각시간인 3600초 후 경계조건에 부여했던 외부하중을 제거하여 최종적인 구조해석을 수행하였다. 열전달 해석시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였으며, 또한 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(Latent heat)의 효과를 고려하였다. 시편의 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대기의 온도는 20°C로 가정하였다.

열탄소성 해석 과정을 Fig. 4에 보였다. 기하학적 형상과 온도분포의 대칭성을 이용하여, 시편에

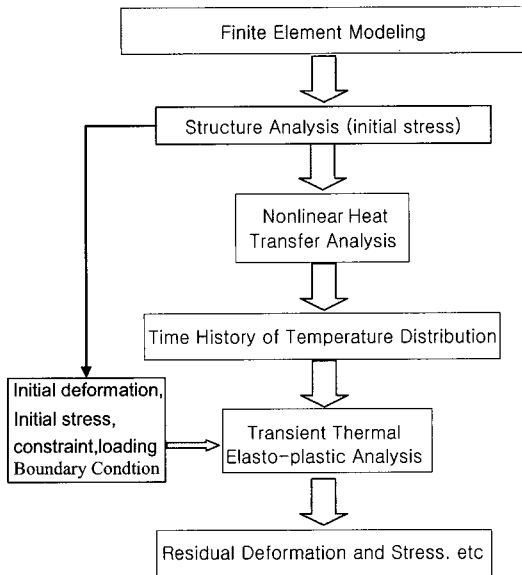


Fig. 4 Overall flow of thermal elasto-plastic analysis

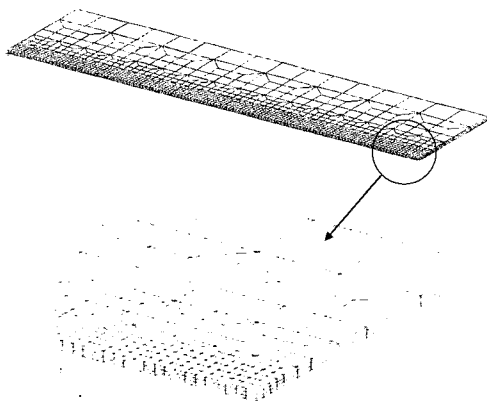


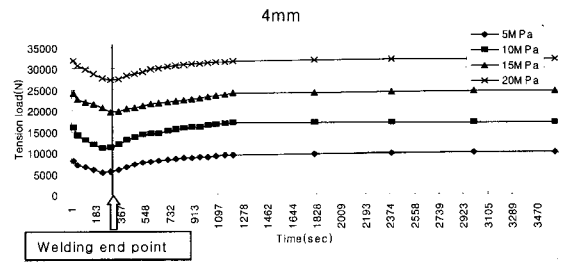
Fig. 5 Finite element model for flat plate

대한 해석 모델은 전 모델의 1/2 부분에 대해서만 Fig. 5와 같이 모델링하였다.

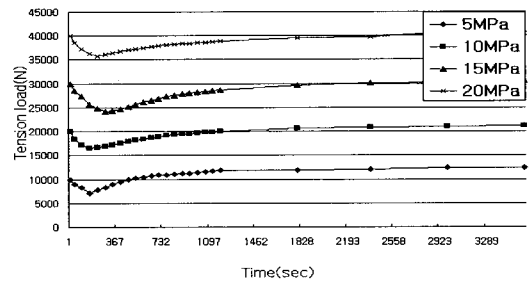
#### 4. 실험결과

##### 4.1 시간에 따른 응력의 변화

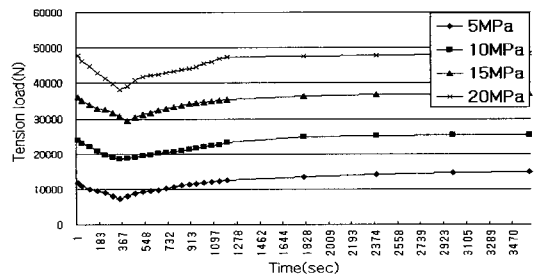
용접실험의 결과로서, 먼저 용접 중 및 용접이 완료된 후 냉각 중 인장력 측정장치를 이용하여



(a) t=4mm



(b) t=5mm



(c) t=6mm

Fig. 6 Change of tensile load to time

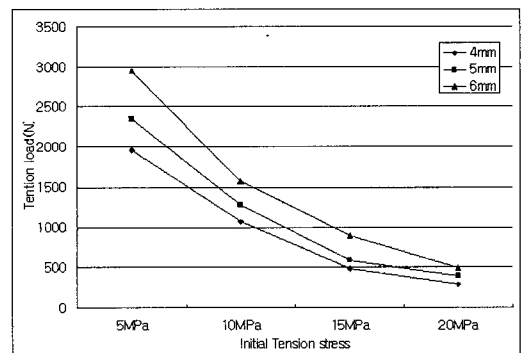


Fig. 7 Final shrinkage stress to change in tensile load

기록한 인장력의 시간에 따른 변화를 Fig. 6에 각 두께별로 보였다. 그래프에서 5, 10, 15 및 20MPa는 시편 길이의 중앙에서 인장력에 의해 발생하는 인장응력의 폭 방향으로의 평균 값을 나타낸다. 용접이 진행되면서 용접입열에 의한 열팽창이 발생하기 때문에 인장력이 감소하지만 냉각이 진행되면서 팽창된 체적이 수축하면서 인장력이 원래의 계획된 수준으로 회복되는 현상을 뚜렷하게 볼 수 있다. Fig. 7은 용접 시편이 완전히 냉각한 후 발생한 최종 응력을 측정된 결과이다. 시편에 부가한 인장력의 크기가 증가할수록 용접선방향에 발생한 수축응력이 감소되는 결과가 나타났다.

인위적으로 가한 인장력에 따른 종수축량과 횡수축량의 변화를 보기 위해 인장응력에 따른 변형률을 Fig. 8과 9에 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 평균 응력이 20MPa이 되도록 인장력을 작용시켰을 때 종수축 변형률이 각각 63.6, 45.0와 51.0% 감소하여, 장력법이 종수축량 감소에 상당한 효과를 준다는 것을 확인할 수 있었다.

인위적으로 가한 인장력의 종방향과 횡방향으로 굽힘변형의 분포에 주는 영향에 대한 예를 시편 두께 t=6mm인 경우에 대해 Fig. 10과 11에 보였다. Fig. 10과 11은 각각 Fig. 2에서 용접선 위치인 L2와 이에 수직방향인 T2 위치에서의 변위의 인장력에 의한 평균 인장응력의 크기에 따른 변화를 예시한 것이다. 보는 바와 같이 인위적으로 가한 인장력이 증가하면서 굽힘변형이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다.

인장력의 효과를 정량적으로 표시하기 위해 Fig. 2의 L1, L2 및 L3 위치에서의 최대 변형량의 인장력 크기에 따른 변화를 Table 2에 정리하였다. 인장응력이 20MPa인 경우 최대 굽힘 변형량이 두께 4, 5와 6mm에 대해 평균적인 의미에서 각각 54.3, 70.7와 81.6% 감소하는 효과를 주었다.

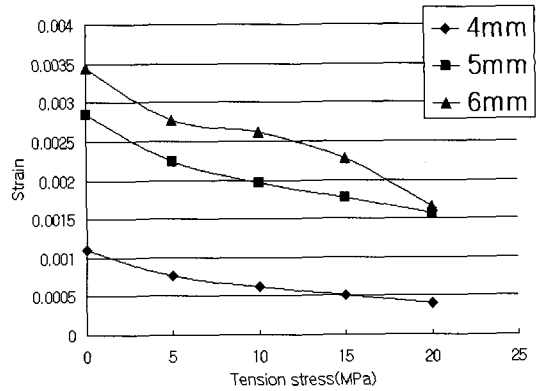


Fig. 8 Longitudinal shrinkage vs tensile stress

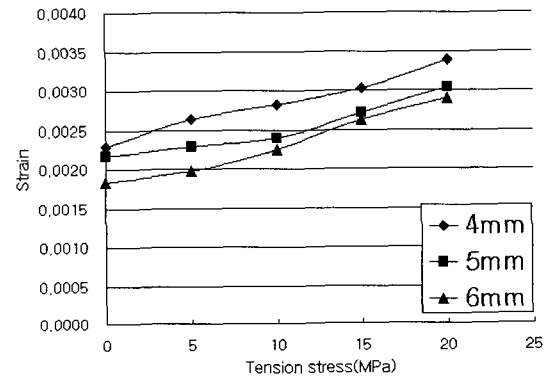


Fig. 9 Transverse shrinkage vs tensile stress

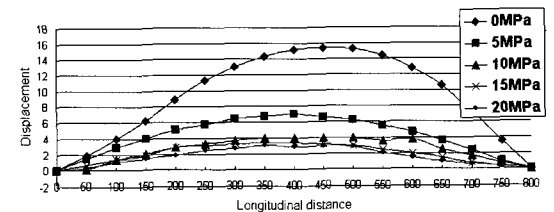


Fig. 10 Distribution of deflection in longitudinal direction (t=6mm)

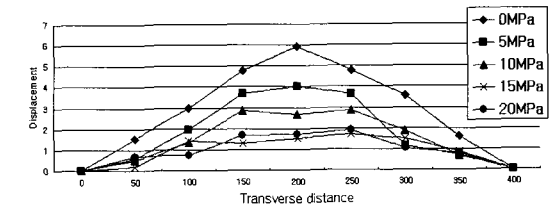


Fig. 11 Distribution of deflection in transverse direction (t=6mm)

Table 2 Maximum longitudinal bending deformation to tensile stress

(a) t=4mm

Location Tensile stress	L1	L2	L3	Average
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=5mm

Location Tensile stress	L1	L2	L3	Average
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=6mm

Location Tensile stress	L1	L2	L3	Average
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

### 5. 수치해석 및 실험 결과 비교

제3절에서 기술한 과정에 따라 본 용접실험모델에 대한 열탄소성 해석을 수행하였다. Fig. 12는 두께 t=5mm인 시편에 대한 시간단계 30초와 56초에서의 온도 분포를 예시한 것이고, Fig. 13은 인장응력의 크기에 대한 변형형상의 변화를 예시한 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 인위적인 인장력이 용접변형의 감소에 상당히 긍정적인 영향을 주는 것을 재차 확인할 수 있다.

Fig. 14는 두께가 5와 6mm인 시편에 대해 인장력을 가하지 않은 경우 (0MPa)와 인장응력이

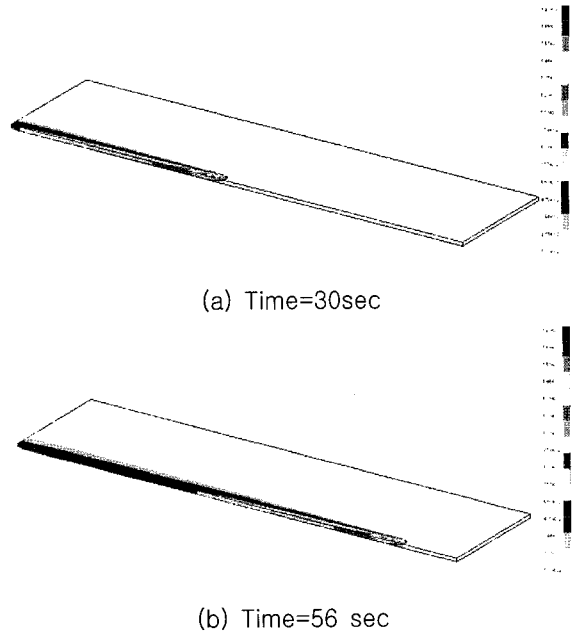


Fig. 12 Illustration of temperature distribution (t=5mm)

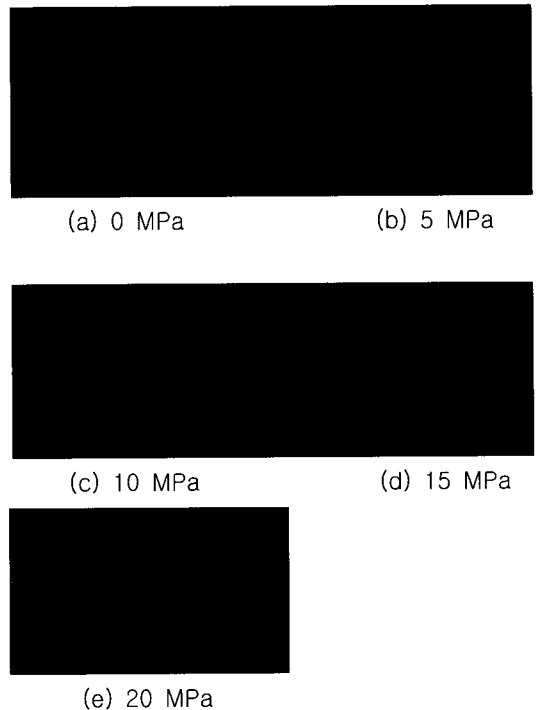
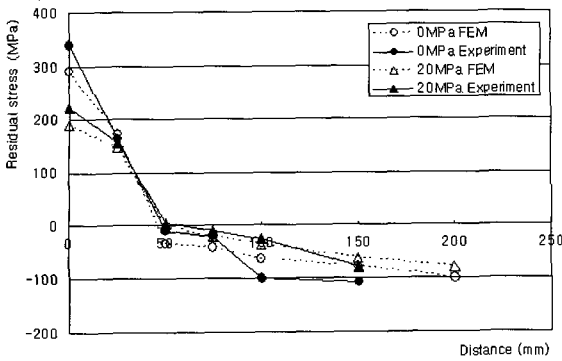
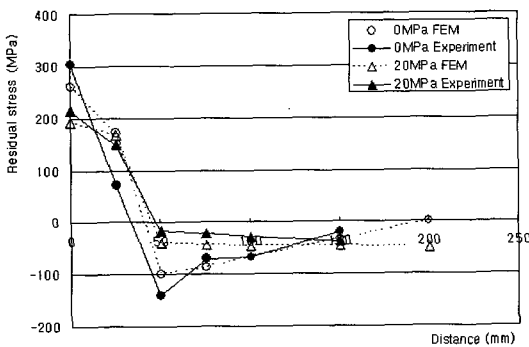


Fig. 13 Change of deformed shape to tensile stress



(a) t=5mm



(b) t=6mm

Fig. 14 Comparison of residual stress

20 MPa가 되도록 인장력을 가한 경우에 대해 용접선 방향 (종방향) 잔류응력의 폭방향으로의 분포이다. XRD 장비로 측정한 결과를 각각 ●와 ▲로 표시하였고, 열탄소성 해석에 의한 결과를 ○와 △로 표시하였다. 실험 결과에 의하면 용접선에서의 인장 잔류응력이 두께 5mm인 시편의 경우 35%, 6mm인 시편의 경우 23%가 감소하는 효과를 주었으며, 압축잔류응력도 현저히 감소되었음을 볼 수 있다. 또한 제3절에서 기술한 열탄소성 해석 과정에 의한 수치해석 결과가 실험결과와 좋은 일치치를 보여 주고 있어서 본 연구에서의 수치해석 과정에 충분한 타당성이 있으며, 이는 향후 잔류응력이 적정 수준 이하가 되도록 작용시킬 인장력의 크기를 수치해석을 통해 결정하는 데에 활용할 수 있을 것이다.

## 6. 결론

본 논문은 박판의 용접변형제어 방법으로 장력법의 적용에 대한 연구이다. 박판의 맞대기 용접 시 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 활용할 수 있으며, 이에 대한 연구결과는 추후 발표할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- 김상일, 1999, 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위논문.
- 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(I)," 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 1157-1164.
- 장창두, 서승일, 1988, "열탄소성해석에 의한 잔류응력 계산," 대한용접학회논문집, 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.
- Matsui, S., 1983, "Control of Weld Distortion in Thin-skin Welded Structure," 일본용접학회지.



< 이 주 성 >



< 김 철 호 >