

장력법을 적용한 박판블록의 변형제어에 관한 연구

김철호* · 양종수* · 김호경*

*STX 조선주식회사 조선해양연구소

A Study on the Deformation Control of Thin Plate Block by Applying the Tensioning Method

Cheol-Ho Kim*, Jong-Soo Yang* and Ho-Kyung Kim*

*Shipbuilding & Ocean Research Institute, STX Shipbuilding Co., LTD

Abstract

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 have 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 has 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 in reducing the weld-induced residual stress as well as the weld-induced deformation.

*Corresponding author : joons99@stxship.co.kr

(Received August 29, 2007)

Key Words : Longitudinal shrinkage, Transverse shrinkage, Distortion, Residual Stress, Tension load, Thin plate

1. 서 론

용접에 의한 박판의 변형 제어·교정기술은 고부가가치 선박 및 기자재뿐만 아니라 여객선 건조를 위한 필수기술이다. 하지만 현재 국내에서 여객선 건조경험이 없는 관계로 체계적인 관련기술개발이 미흡한 실정이다.

박판은 열전달 특성상 입열량이 같은 경우 후판에 비해 용접시 열영향부가 넓고 판의 강성계수가 낮아 변형이 쉽게 발생한다. 이러한 용접변형은 구조적 강도저하와 외관상의 불량은 물론이고, 현 조립단계이후의 공정에서 변형을 교정하는 데에 많은 공수의 투입이 요구되어 생산성저하의 주원인이 되고 있다¹⁾. 실제구조물을 제작하는 전체제작시간 중에 변형교정 작업이 점유하는 비율이 높으며, 특히 박판의 경우는 전체작업공수의

20%를 점유하는 경우도 있다.

박판 용접부의 변형에 관한 초기연구는 주로 변형제어방안에 주목해왔다. 현장에서는 용접부의 강성을 증가시키기 위하여 주판의 두께나 보강재의 크기 및 간격을 변경하는 설계적인 방안과 Fit-up 정도향상을 통하여 용접 입열량을 조절함으로써 용접으로 인한 수축하중을 감소시키거나 열 및 기계적하중을 이용하여 수축을 이완시키는 생산적인 제어방안이 대부분을 차지하고 있다²⁾. 그러나 선체구조형상은 설계초기 단계에서 결정되므로 구조변경 자체가 어렵고, 특히 박판용접부의 용접 특성이 정반조건, 작업자의 숙련도, 그리고 용접장비의 특성 등과 같은 작업환경에 대한 의존성이 매우 높기 때문에 변형제어를 위한 기존방안의 활용도는 극히 제한적이다. 실제의 용접구조물에 있어서 용접조건 중 입열량의 변화에 의해서 변형의 정도가 다르고, 따

라서 변형량을 해석적인 방법으로 예측하는 것은 매우 어렵다. 실제현장에서는 작업자의 경험에 의해서 변형을 예상하고, 조립작업이전에 변형방지대책을 마련하여 시행하는 것이 대부분이다. 따라서 용접변형을 교정하는 기술보다는 용접변형 자체를 조립단계 이전에서 제어하는 기술이 필요하다³⁾.

조선산업의 주된 경쟁국인 일본의 경우 지난 수년간 체계적인연구를 수행하여 상당수준의 기술력을 보유하고 있어서 호화유람선과 같은 고부가가치선박의 건조가 가능하다. 한편, 국내에서도 용접변형제어에 관해 많은 관심을 갖고 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 박판의 용접변형제어 및 교정에 관한기술은 일본에 비해 뒤쳐져있는 실정이다.

본 논문에서는 외부적인 인장하중을 주어 용접부에서 발생하는 국부적인수축을 제어함으로써 전체구조물의 잔류응력과 변형을 방지하고 그 효과를 규명하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구에서는 용접부에 나타나는 국부적인 수축을 제어하기 위해서 레버블록을 사용하였다. 이를 이용하여 기계적 인장법의 변형감소 효과의 원리를 규명하고, 인장응력과 변형량사이에 관계를 정량적으로 제시하여 판의 두께와 허용변형량 사이의 관계를 규명함으로써 본 방법의 현장에서의 활용성을 증대함에 있다.

2. 배경 이론

2.1 용접변형 현상과 제어법

용접잔류응력 및 용접변형은 용접부에 국부적으로 열이 가해짐에 따라 온도변화가 심한 용접부근에서는 팽창, 수축량이 크게 되고 온도변화가 작은 주위영역에 의해 구속된다. 이 때문에 부재는 그에 상응하는 잔류응력과 용접변형이 발생하게 된다. 특히 용접입열의 흡수확산을 목적으로 처치를 강구하지 않은 박판의 경우는 상당히 넓은 범위에서 수축이 일어난다.

용접변형의 크게 ①입열량, ②구속, ③재료에 관계되는 3가지 인자에 의해 지배되는데 지금까지 나와 있는 용접변형제어 방법은 용접입열량 제어와 구속조건의 제어를 통한 연구가 보편적이다.

본 연구에서는 구속에 의한 변형제어의 한 방법으로서 용접에서 발생하는 수축량을 줄여 전체적인 잔류응력과 변형을 줄이는데 있다.

2.2 간이 예측식

일반적인 구조물에서는 용접선방향의 잔류응력이 역

학적으로 중요한의미를 갖는다. 이는 용접선방향에서 항복응력에 가까운 잔류응력이 발생하기 때문이다. 후판과 같이 판의 강성이 큰 부재에서는 그다지 문제되지 않지만 박판에서는 좌굴변형을 유발하기도 한다.

용접으로 인해 발생하는 변형과 잔류응력의 해석을 위해 여러 방법들이 시도되었다. 그중 크게 실험적인 방법과 이론적인 해석방법으로 나뉜다. 이론적인 방법은 용접변형과 잔류응력의 문제를 열탄소성해석을 통해 수학적으로 해석 하는 방법이다. Sprargen⁴⁾은 수축 변형을 용착단면적, 루트갭 및 두께의 함수로서 나타내었다. 한편 Watqnabe 와 Satoh⁵⁾는 용접변형을 전류, 전압 용접속도, 두께등의 함수로 표시하는 시도를 하였다. Terasaki⁶⁾는 온도, 횡수축, 각 변형을 모두 무차원화 시킨 Prameter를 이용하여 실험결과치를 정리하였다.

본 논문에서는 용접선 방향에 작용하는 초기인장력과 변형량 관계를 정의하기위해 인장력 작용방향인 종수축을 계산식으로 정의할 필요가 있다. 종수축의 크기는 모재의 단면적과 관계가 깊은데 용접조건이 동일할 때는 단면적이 클수록 종수축은 감소된다. 이때 단면적은 용접선과 직각 방향의 단면적이다.

Okerblom(1958)⁷⁾은 종수축에 대한 계산식을 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$\epsilon_L = 0.335 \cdot \eta \frac{1}{A} \cdot \frac{q}{v} \cdot \frac{\alpha}{\rho c} \quad (1)$$

ϵ_L : 종수축률	α : 선팽창계수
A : 용접선과 직각방향의 단면적	ρ : 밀도
η : 용접효율	c : 비열
q : 입열량 (I*V)	L : 용접길이
I : 전류	S : 종수축량
V : 전압	h : 판두께
v : 용접속도	

식(1)에서 나타난 바와 같이 종수축은 단위길이당의 용접열에 비례하고, 판의 단면적에 반비례한다. 여기에서 A의 상한은 판폭으로 환산해서 판두께의 약 40배정도에 대응하는 값에 한정된다⁸⁾. 판두께가 h인 연강의 경우

$$A = 40h^2 (mm^2), \quad \frac{\alpha}{\rho c} = 0.01 (mm^3 cal)$$

로 나타낼 수 있고, 입열량을 $\frac{q}{v} = Q (J/mm)$ 라고 하면 위의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_L = 0.335 \cdot \frac{1}{40h^2} \cdot 0.24\eta Q \cdot 0.01 \quad (2)$$

여기에서 0.24는 입열량의 단위를 J에서 cal로 변환하기 위해 사용하였고 η 는 용접 방법에 따라 달라진다. 위의 공식은 아래와 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_L = 2 \times 10^{-5} \cdot \eta \cdot \frac{Q}{h^2} \quad (3)$$

용접길이에 대한 종수축량은 식(4)와 같다.

$$S = \epsilon_L \times L \quad (4)$$

여기서 용접효율 η 와 전체 용접길이 L은 용접 방법과 부재치수등과 같은 환경에 따라 달라지는 변수이므로 종수축량은 Q/h^2 의 함수로 표현될 수 있다.

$$S = C \cdot \frac{Q}{h^2} \quad (5)$$

3. 용접 실험

3.1 실험재료 및 용접조건

본 실험에서는 두께별로 Tension load와 입열량을 변화시켜가며 실험하였다. 시편내부에 작용하는 응력조건은 0, 10, 20MPa 일때 용접하였고, 동일한 방법으로 시편의 두께를 4, 5, 6 (mm) 3종류의 판에 대하여 입열량을 달리하며 실험하였다.

용접은 정량적인 이동속도를 얻기 위해 Auto carriage를 사용하였고, 보호가스는 CO₂를 사용하였다. 용접재료로는 ss-41 강재를 사용하였다.

판의 두께별로 입열량과 하중조건을 변화 시켜가며, Bead on으로 용접실험을 수행하였다. Table 1 에서는 시편의 두께별로 실험 입열량과 적용하중 조건을 나타내고 있다.

실험에서 Load cell을 사용하여 인장하중을 측정하였고, 체인블록을 사용하여 시편에 인장력을 발생시켰다. Fig. 1은 시편의 형상과 전체적인 실험장치의 구성을 나타내고 있다.

4. 실험 결과

4.1 수축응력 측정

시편은 용접이 시작될과 동시에 용접입열에 의한 팽창과 냉각과정의 수축작용으로 인하여 발생하는 하중변

Table 1 Welding condition for experiment

NO	Thickness (mm)	Voltage (V)	Current (A)	Speed (mm/sec)	Heat input (J/mm)	Tension stress (kgf/cm ²)
a1	4	20	180	6.67	540	0.00
a2	4	20	190	6.67	570	1.53
a3	4	20	190	6.67	570	3.06
b1	4	20	190	8.33	456	0.00
b2	4	20	180	8.33	432	1.53
b3	4	20	180	8.33	432	3.06
c1	4	20	190	10.00	380	0.00
c2	4	20	170	10.00	340	1.53
c3	4	20	190	10.00	380	3.06
a1	5	22	220	6.33	764	0.00
a2	5	22	230	6.33	799	1.61
a3	5	22	210	6.33	729	3.14
b1	5	22	220	9.67	501	0.00
b2	5	22	210	9.67	478	1.53
b3	5	24	230	9.67	571	3.06
c1	5	22	220	12.83	377	0.00
c2	5	24	240	12.83	449	1.53
c3	5	24	230	12.83	430	3.14
a1	6	26	260	6.17	1096	0.00
a2	6	27	260	6.17	1138	1.53
a3	6	26	250	6.17	1054	3.22
b1	6	26	250	9.33	696	0.00
b2	6	26	250	9.33	696	1.53
b3	6	26	250	9.33	696	2.91
c1	6	26	260	12.50	541	0.00
c2	6	26	240	12.50	499	1.61
c3	6	26	260	12.50	541	3.14

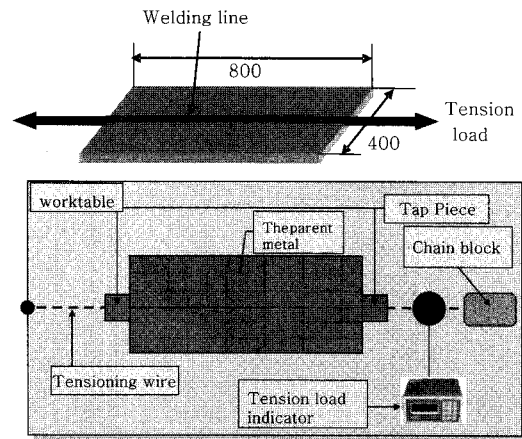


Fig. 1 Arrangement of experiment apparatus

화를 Tension load 측정장치를 통해 확인하였다(Fig. 2). 측정 결과 용접이 끝나는 지점까지 시편의 팽창으로 인하여 인장하중의 값이 낮아지고, 냉각이 시작되면서 수축량의 증가로 인하여 인장하중값이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3에서는 완전히 냉각된 시편의 최종 인장응력 변화 값이다. 초기 인장하중이 높을수록 최종 수축응력이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이 실험을 통하여 용접부의 수축량을 제어하는데 인장력이 효과 적임을 알 수 있다.

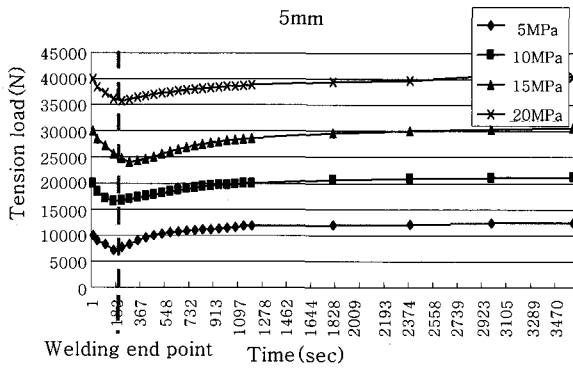


Fig. 2 Change of tensile load to time(5mm)

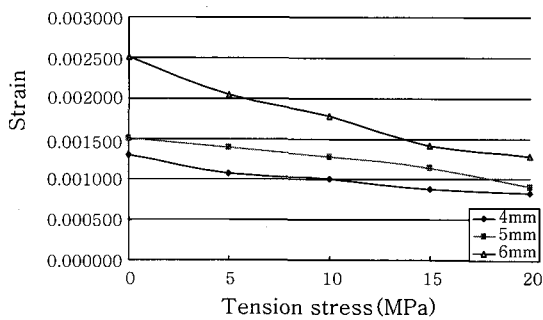


Fig. 3 Longitudinal shrinkage vs tensile stress

4.2 면외변형량

장력법실험을 통해 계측한 면외변형값을 단순비교 하기 위해 시편전체 면외변형량을 표준분포로 나타내었다.(Fig. 4)

시편의 두께와 입열량, 그리고 인장응력의 조건을 달리하여 실험한 결과 입열량 보다는 장력법에 적용시킨 인장응력의 크기가 변형량에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

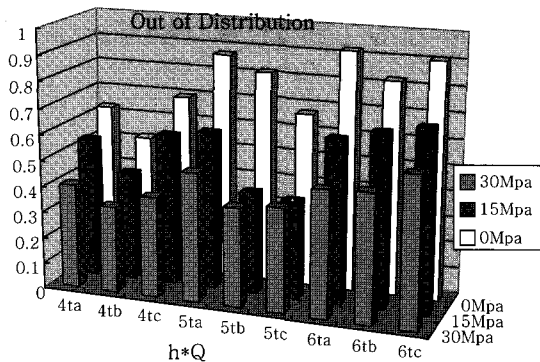


Fig. 4 Distribution of deflection

5. 간이 예측식

각각의 인장응력을 기준으로 용접변형에 영향을 미치는 입열파라미터 Q/h^2 의 영향관계를 그래프로 나타내었다.

Fig. 5 에서는 (판 두께 4~6mm범위) 동일한 인장응력을 적용하였을 경우 적용인장응력에 대하여 하나의 곡선위에 분포하는 것을 볼 수 있다. 이것은 동일한 인장응력에서는 용접입열량에 따라 수축변형이 비례하는 것을 보여준다. 또한 응력에 크기가 다를 때는 응력의 크기별로 곡선이 나누어지는 것으로 보아 응력의 크기에 따라 수축량이 반비례하는 것을 확인할 수 있다.

간이 예측식을 만들기 위해 실험결과 Data를 입열량과 인장응력을 고려하고, 수축량에 대하여 하나의 곡선으로 나타나는 그래프를 만들어 보았다. 중수축량은 입열량에 비례하고 초기인장력에 반비례하기 때문에 이를 고려하여, 하나의 곡선에 나타 내기위해 시행착오법을 사용하여 Fig. 6과 같이 나타내었다.

Fig. 6에 나타난바와 같이 변화된 입열파라메타를 적용한 그래프를 살펴보면 응력과 입열량에 대해 거의 하나의 곡선으로 나타낼 수 있는데 이것은 중수축 S/h가

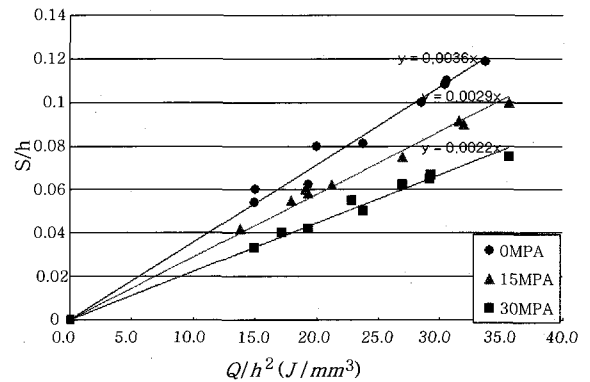


Fig. 5 Longitudinal shrinkage according to heat input parameter and tensile stress

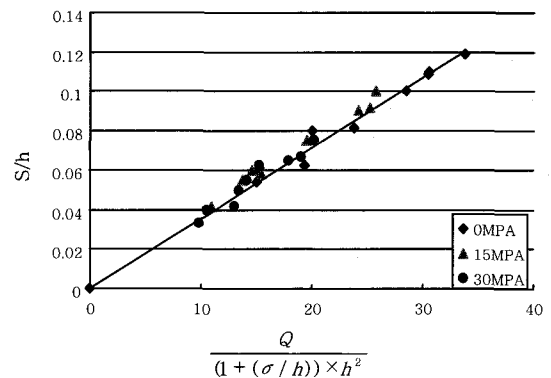


Fig. 6 Simplified prediction model for longitudinal shrinkage

식(6)과 같이 분포하고 있음을 나타낸다.

$$S/h = \frac{Q}{(1+(\sigma/h)) \times h^2} \times 3.7 \times 10^{-3} \quad (6)$$

6. 결 론

박판의 맞대기 용접시 용접선 방향으로 인위적으로 가하는 인장력의 크기가 굽힘변형과 수축변형에 주는 정량적인 영향을 분석하기 위해 다수의 실험을 수행하였다.

- 1) 수축변형은 입열량과 초기 인장력의 크기와 방향에 많은 영향을 받는다.
- 2) 인장력 작용방향에서의 용접변형 제어에 효과적임을 확인하였다.
- 3) 기계적 인장법적용으로 용접후의 잔류응력 감소와 인장력 크기에 따른 변형량 관계를 확인하였다.

본 연구의 결과에 의하면 장력법을 적용하면 용접선 방향으로의 굽힘과 수축변형을 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. 또한 본 논문에서는 현장에서 입열량과 하중조건을 결정하여 수축량의 크기를 조절함으로써 잔류응력과 변형발생을 제어할 수 있는 식을 유도하는데 필요한 기초적인 실험을 수행하였다.

참 고 문 헌

1. Joo-Ho Heo, Sang-Il Kim : Development of Welding Distortion Control Method for Thin Panel Block Structure(I), Journal of KWS, **21-4**(2003) 75-79.
2. Sang-Beom Shin, Dong-joo Lee : A Study on the Control of Buckling Distortion of the Thin panel Structure, Journal of KWS, **Vol.1**, Spring (2003) 287-289.
3. Sang-Il Kim, Young-guan Jo, Sang-Woo Park : Development of Welding Deformation Control Method for Thin Panel Block Structure, Journal of KWS, **Vol.1**, Autumn (2001) 153-156.
4. Spraragen W., Claussen G E, (1950) "Shrinkage distortion in welding : A review of the literature to Jan 11937", The Welding Journal-Welding Research Supplement, 292-294.
5. Watanabe, M. and Satoh, K., "Control of Angular Distortions due to Welding Conditions in T-fillet Welding Joints - Shrinkage Distortion in Welded Joints (Report 2) -," Journal of the Japanese Welding Society, **25-6**, 343-348, (1956).
6. Satoh, K. and Terasaki, T., "Effect of Welding Condition on Residual Stress Distribution and Welding Deformation in Welded Structural Materials," Journal of the Japanese Welding Society, **45-1**, 42-53, 1976
7. Okerblom N O, 'The Calculations of Deformations of Welded Metal Structures', Dept. of Scientific and Industrial Research, London, Translation from Russian, (1958)
8. 대한용접학회편 : 용접·접합편람, 대한용접학회, 1998, 390-394 (in Korean)