

선체 박판구조의 용접변형 제어에 관한 연구(II)

이주성^{†*}, 김철호^{**}

울산대학교 조선해양공학부*, STX조선 주식회사 조선해양연구소**

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

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

School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan*
Shipbuilding & Ocean Research Institute, stx Shipbuilding Co., Ltd.

Abstract

In the case of thin plate blocks, buckling deformation due to longitudinal shrinkage is the most important weld-induced deformation. This paper is concerned with developing the formula to predict the longitudinal shrinkage due to welding, in which mechanical tension effect in welding direction is accounted for. For this purpose, bead on plate welding test has been carried out for the 27 thin plate specimens with varying welding conditions and magnitude of tensile load. Empirical formula of predicting the longitudinal shrinkage has been derived based on the results of welding test, in which effect of mechanical tension is included. The derived formula can be usefully used in predicting the level of tensile load to reduce the longitudinal shrinkage.

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

1. 서 론

선박건조에서 선체 중량의 감소로 인한 운항 유지비 감소와 여객선과 같은 갑판의 수가 많은 선박에서 무게중심을 낮게 하여 안정성 측면에서 유리하기 때문에 박판의 사용량이 증가하고 있는

실정이다. 조선 산업의 주된 경쟁국인 일본의 경우 지난 수년간 박판구조 선체에 대한 체계적인 연구를 수행하여 상당 수준의 기술력을 보유하고 있어서 호화 유람선과 같은 고부가가치 선박의 건조가 가능하다(산업자원부 2006). 한편, 국내에서도 용접변형제어에 관해 많은 관심을 갖고 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 박판의 용접변형제어 및 교정에 관한 기술은 선진 조선국에 비해 뒤쳐져 있는 실정이다. 용접변형은 입열량, 구속 그리고 재료특성에 관계되

접수일: 2006년 12월 31일, 승인일: 2007년 9월 13일

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

는 인자들에 의해 지배되는데 지금까지 사용되는 용접변형제어 방법은 용접입열량 제어와 구속조건의 제어를 통한 연구가 대부분을 차지하고 있다.

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 결정 되므로 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. 실제의 용접구조물에 있어서 용접조건중 입열량의 변화에 의해서 변형의 정도가 다르고, 따라서 변형량을 해석적인 방법으로 예측하는 것은 매우 어렵다. 실제 현장에서는 작업자의 경험에 의해서 변형을 예상하고, 조립작업 이전에 변형방지대책을 마련하여 시행하는 것이 대부분이다. 따라서 용접변형을 교정하는 기술보다는 용접 변형 자체를 조립단계 이전에서 제어하는 기술이 필요하다(김상일 2001, 장창두와 이창현 2000).

본 연구에서는 이주성 등(2006)이 박판의 맞대기 용접 시 변형 감소에 대한 실험적 연구를 위해 사용하였던 장력법의 개념을 적용하여 박판 Bean on plate 용접 시 발생하는 횡 및 종수축량 감소에 주는 영향을 분석하기 위해 27개 시편에 대한 용접실험을 수행하였다. 본 연구의 실험결과에 의하면 용접 시 인위적으로 작용시킨 인장력이 횡수축의 감소에 주는 영향은 크지 않지만, 박판의 좌굴변형의 원인인 종수축량 감소에는 상당한 효과가 있음을 확인하였다. 실험결과를 토대로 종수축량과 입열량 계수 및 인장력의 크기 사이의 관계식을 제안하였다. 본 연구를 통해 제안한 관계식은 종수축량 감소를 위해 적정 수준의 인장력의 크기를 결정하는 데에 활용될 수 있을 것이다.

2. 종수축에 대한 간이 예측식

용접으로 인해 발생하는 변형과 잔류응력의 해석을 위해 여러 방법들이 시도 되었다. 그중 크게 실험적인 방법과 이론적인 해석방법으로 나뉜다. 이론적인 방법은 용접변형과 잔류응력의 문제를 열탄소성해석을 통해 수학적으로 해석 하는 방법이다. Malisius는 수축변형은 용접부의 선팽창계수 및 입열량에 비례하며 두께에 비례한다고 간주하였다(Masubuchi 1980). Sprargen and Claussen(1950)은 수축변형을 용착 단면적, 루트 갭 및 두께의 함수로서 표현하였다. 한편 Watanabe and Satoh(1956)은 용접변형을 전류, 전압, 용접속도 및 두께 등의 함수로 표시하는 시도를 하였다. Satoh and Terasaki(1976)는 온도, 횡수축과 각 변형을 모두 무차원화 시킨 계수를 이용하여 실험결과를 정리한 바 있다.

본 논문에서는 용접선 방향으로 인위적으로 작용시키는 인장력과 변형량으로서 종수축량 사이의 관계를 도출하는 것을 주된 내용이다. 일반적으로 종수축의 크기는 모재의 단면적과 관계가 깊은데 용접조건이 동일 할 때는 용접선과 직각 방향의 단면적이 클수록 종수축은 감소된다. 종수축량을 표현하는 여러 형태가 제안되어 있는데(Masubuchi 1980), 본 논문에서는 횡수축을 표현하는 데에 사용한 것과 같은 형태로서 아래의 식으로 가정하였다(김상일 2001, 이주성 2004).

$$S = C \frac{Q}{h^2} \tag{1}$$

여기에서 S 은 종수축량이고, h 는 판 두께이다. Q 는

$$Q = \frac{VI}{v} \tag{2}$$

로 주어지는 입열량으로 단위는 J/mm이다. 식(2)에서 V, I 와 v 는 각각 용접전압, 용접 전류와 용접속도이다. 식(1)에서 C 는 실험결과를 토대로 결정되는 계수이다.

3. 용접실험

본 연구에서 수행한 용접실험에서는 용접선의 법선방향 즉, 시편의 폭 방향으로의 평균인장응력이 계획된 값이 되도록 인장력을 작용시킨 상태에서 용접을 수행하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 장비들의 배치를 보여주는 데, 용접선 양 끝에 크기 150x150mm의 Tab piece를 용접하고 좌측 Tap piece를 고정시킨 상태에서 우측 Tap piece를 체인 블록(Chain block)에 연결하여 계획한 인장응력이 발생될 수 있도록 작용시켰다. 계획한 인장응력은 시편 길이의 중앙에서 폭 방향으로의 평균 응력을 의미하며, 본 실험에서는 이 인장응력이 0, 15, 30MPa인 세 가지 경우에 해당되도록 인장력을 가한 상태에서 용접을 수행하였다. 인장력은 Fig. 1에 보인 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. 용접이 완료된 후 냉각시간은 1시간으로 하였다. 횡 방향 및 종 방향으로의 수축량은 Fig. 1의 'Specimen'에 표시한 격자점들의 횡 및 종방향으로의 거리를 실험 전과 후에 계측하여 계산하였다.

본 실험에서 사용한 시편의 크기는 길이×폭=800×400mm이고, 두께는 4, 5와 6mm인 세 종류이다. Table 1에 용접조건과 인장응력 등 실험 조건들을 열거하였다. 실험에 사용한 용접기는 CO₂ 자동용접기이며 1.2mm의 Wire를 사용하였다.

Table 1 Models and welding condition

t (mm)	Voltage (V)	Current (A)	Welding speed (mm/sec)	Heat Input (J/mm)	Tensile stress (MPa)
4	20	180	6.67	540	0
	20	190	6.67	570	15
	20	190	6.67	570	30
	20	190	8.33	456	0
	20	180	8.33	432	15
	20	180	8.33	432	30
	20	190	10.00	380	0
	20	170	10.00	340	15
5	20	190	10.00	380	30
	22	220	6.33	764	0
	22	230	6.33	799	15
	22	210	6.33	729	30
	22	220	9.67	501	0
	22	210	9.67	478	15
	24	230	9.67	571	30
	22	220	12.83	377	0
6	24	240	12.83	449	15
	24	230	12.83	430	30
	26	260	6.17	1096	0
	27	260	6.17	1138	15
	26	250	6.17	1054	30
	26	250	9.33	696	0
	26	250	9.33	696	15
	26	250	9.33	696	30
6	26	260	12.50	541	0
	26	240	12.50	499	15
	26	260	12.50	541	30
	26	260	12.50	541	30

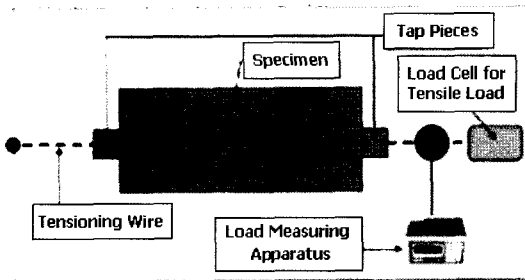


Fig. 1 Arrangement of experiment apparatus

4. 수축량 예측식

제2장에서 기술하였듯이 수축 변형량을 Q/h^2 로 정의되는 입열량 계수(Heat input parameter) 사이의 관계로 정의하는 것이 타당하다.

횡 및 종 수축량의 인장응력과 입열량 계수 사이의 관계를 보기 위해 인장응력의 크기에 따른 수축량-입열량 계수(Q/h^2)사이의 추세선과 함께 Fig. 2와 3에 각각 표시하였다. 횡축은 입열량 계

수이고, 종축은 수축량을 판 두께로 무차원화 시킨 것이다. 우선, 종 수축량의 입열량 및 인장응력에 대한 영향을 보여주는 Fig. 2를 보면 인장력의 작용 방향과 수축 방향이 일치하기 때문에 인장력이 종 수축량에 주는 영향이 뚜렷하다는 것을 볼 수 있다. 한편, 횡수축의 경우 입열량에 대해서는 변형량이 변화하는 것을 당연히 확인할 수 있으나 인장력이 횡수축량의 변화에 거의 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다.

본 실험 결과에 대한 추세선을 보면 판두께 4~6mm범위에서 동일한 수준의 인장응력이 발생 되도록 인장력을 적용하였을 경우 거의 하나의 직선상에 분포하는 것을 볼 수 있다. 이것은 용접 입열량에 대해서는 수축변형은 비례한다는 것을 보여준다. 즉, Q/h^2 로 정의되는 입열량 계수와 종 및 횡 수축량 사이에는 일반적으로 선형적인 관계가 유지되는 것으로 알려져 있는데(예 : 이주성 2004, 허주호와 김상일 2003), Fig. 2와 3에서 보듯이 이는 인장력의 작용 유무와는 관계없이 성립되는 것을 볼 수 있다.

인장력의 크기에 따른 종수축-입열량 계수 관계인 Fig. 2를 살펴보면 인위적 인장력에 의한 인장응력의 크기에 따라 종수축량이 반비례하는 것을 확인할 수 있다.

이상의 분석결과를 감안하여 인장응력의 크기를 고려한 종수축량과 입열량 계수 사이의 관계를 도출하기 위하여 입열량 계수의 분모에 인장응력을 포함시킨 입열량 계수와 종수축 사이의 관계를 추세선과 함께 Fig. 4와 같이 표시하였다. Fig. 4에서

- S : 종수축량(mm)
- h : 판 두께(mm)
- Q : 단위길이 당 입열량(J/mm)
- σ : 인장응력(kgf/mm²)

이다. 인장응력을 포함시켜서 수정된 입열량 계수를 적용한 그래프인 Fig. 4를 살펴보면 인장응력과 입열량에 대해 하나의 관계식으로 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다. 회귀분석으로 구한 종수축, S/h와 입열량 계수 사이의 관계는 아래의 식(3)과 같이 유도되었다.

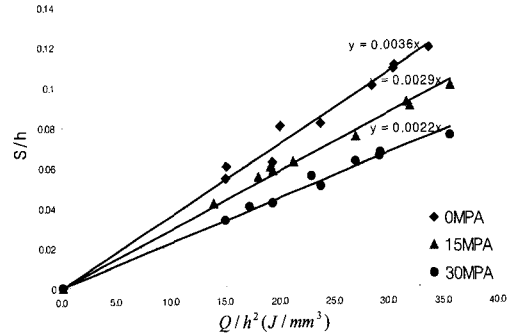


Fig. 2 Result of welding test: relation of longitudinal shrinkage, heat input parameter and tensile stress

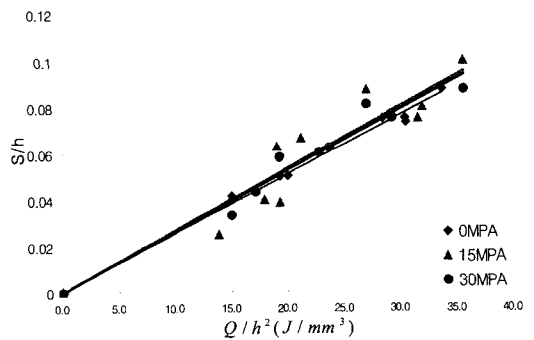


Fig. 3 Result of welding test : relation of transverse shrinkage, heat input parameter and tensile stress

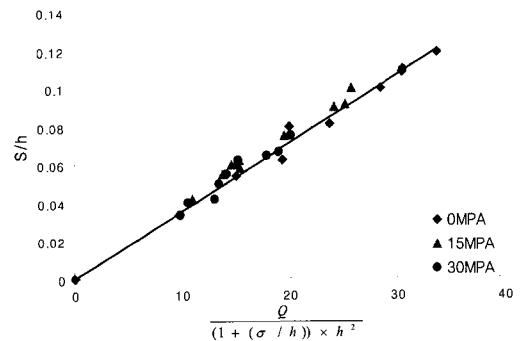


Fig. 4 Longitudinal shrinkage to heat input parameter and tensile stress

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

5. 결 론

박판의 Bead on plate 용접시 용접선 방향으로 인위적으로 가하는 인장력의 크기가 용접선 방향과 이에 수직방향인 횡 및 종방향으로의 수축변형에 주는 정량적인 영향을 분석하기 위해 다수의 시편에 대해 실험을 수행하였다.

본 연구의 실험결과에 의하면 용접 시 인위적으로 작용시킨 인장력이 횡수축의 감소에 주는 영향은 무시할 수 있는 정도이지만, 박판의 좌굴변형의 원인인 종수축량 감소에는 상당한 효과가 있음을 보았다. 실험결과를 토대로 종수축량과 인장력에 의한 인장응력이 포함된 입열량 계수 사이의 관계식을 제안하였다. 본 연구를 통해 제안한 관계식은 종수축량 감소를 위해 적정 수준의 인장력의 크기를 결정하는 데에 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 김상일, 2001, "박판 평블록 구조의 용접변형 제어법 개발," 대한용접학회 춘계학술발표대회 개요집, 제 1권, pp. 153-156.
- 산업자원부, 2006, 산업기술로드맵-조선해양.
- 신상범, 이동주, 2003, "박판 용접부 좌굴 변형 제어에 관한 연구," 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, 제 1권, pp. 287-289.
- 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 춘계학술대회, pp. 1157-1164.
- 장창두, 이창현, 2000, "선체블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 2호, pp. 127-136.
- 허주호, 김상일, 2003, "박판 평 블록 구조의 용접변형 제어법 개발(I)," 대한용접학회지, 제 21권, 제 4호, pp. 75-79.
- Masubuchi, K., 1980, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, Oxford.
- Satoh, K. and Terasaki, T., 1976, "Effect of Welding Condition on Residual Stress Distribution and Welding Deformation in Welded Structural Materials," Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 45, No. 1, pp. 42-53.
- Spraragen, W. and Claussen, G.E., 1950, "Shrinkage Distortion in Welding : A Review of the Literature to Jan 11937," The Welding Journal-Welding Research Supplement, pp. 292-294.
- Watanabe, M. and Satoh, K., 1956, "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, Vol. 25, No. 6, pp. 343-348.



< 이 주 성 >



< 김 철 호 >