

후판 구조의 각변형 예측 및 제어에 관한 연구

김상일*

*로이드선급협회 아시아 옥포사무소

A Study on the Prediction and Control of Angular Distortion in Thick Weldments

SANG-IL KIM*

*Okpo Office, Lloyd's Register Asia, Kyungnam, Korea

KEY WORDS: Block assembly 블록 조립 Thermal elasto-plastic analysis 열탄소성해석 Angular distortion 각변형 Thick weldments 후판 용접 구조물, Groove design 홈 설계, Distortion control method 변형 제어법

ABSTRACT: *The block assembly of ship consists of a series of heat processes such as cutting, bending, welding, residual stress relaxation and fairing. With the fast development of computers, the thermal elasto-plastic analysis method has become a versatile tool for practical applications in the ship production. If numerical analysis is proved to be an advantageous tool to predict the residual deformation due to various heat processes, the optimum methods which can remove the welding distortion can be presented at each assembly stage, which will result in great progress in improving the accuracy of block assembly. In order to minimize the weld-induced angular distortion in thick weldments, this paper proposes the optimum groove design for various plate thickness as the distortion control method. The validity of this method has been substantiated by a number of numerical simulations and experiments.*

1. 서 론

대형 Container선의 Torsion box 구역은 판 두께가 30~60 mm인 후판으로 구성되어 있으며, 이로 인해 X-개선 맞대기 용접 이음부에는 판 두께에 상관없이 1/2 개선이 공통적으로 적용되고 있다. 이들 후판 구조의 용접 이음부 근방에는 전면과 이면의 입열량(용작량) 차이로 인해 변형의 허용치를 초과하는 과도한 각변형이 발생되고 있으며, 이의 교정을 위해 조립 단계 이후의 공정에서 변형 교정 작업인 곡직 작업이 2~3회에 걸쳐서 추가적으로 수행되고 있는 실정이다. 이러한 조립단계 이후의 공정에서 발생하는 부가적인 변형과 이에 기인한 과도한 곡직 작업은 생산성 저하의 주 원인이 되고 있다. 이의 방지를 위해 현장에서는 후판 맞대기 용접 전에 역변형을 시공하는 방법 등을 적용하고 있으나, 이는 근본적인 변형 제어 방안이 되지 못해 후 공정에서의 수정 작업은 계속적으로 이루어지고 있으며, 이로 인해 추가적인 공수가 소요되고 있다.

컴퓨터의 급속한 발달로 인해서, 과거 수십년동안 주로 연구용으로 사용된 열탄소성해석(Thermal elasto-plastic analysis)이 실제 용접문제의 해결에 있어서 유용한 도구가 되고 있다. 이것의 주된 내용은 온도분포와 잔류응력 및 변형의 계산이다. 용접문제에서 열탄소성문제는 주로 유한요소법 등의 수치해석법을 이용하여 다루어 왔으며(김상일, 1999; Kim et al., 1997;

Lee, 1992; Ueda et al., 1988; Ueda et al., 1992), 만일 수치해석이 여러 열공정들로 인한 변형을 예측하는데 유용한 도구가 되는 것이 입증된다면, 용접변형을 최소화할 수 있는 최적의 방법이 다양한 수치 시뮬레이션을 통해서 각 조립 단계 별로 제시될 수 있을 것이다.

Masubuchi는 후판 구조의 용접 각변형에 미치는 개선 형상의 영향을 Ring-type 시편에 대하여 정량적으로 규명하였으나, 판 두께가 19mm로 매우 제한적이기 때문에 광범위하게 적용하는 데에는 문제가 있다(Masubuchi, 1956). 따라서 본 연구에서는 이의 한계성을 극복하기 위해 용접변형이 문제가 되는 대형 Container선의 후판 구조를 대상으로 구체적인 변형 제어 방안(판 두께 별 Groove design의 최적화 기술)을 정량적으로 제시하고자 하였고, 이에 대한 적용 효과는 다양한 실험 및 수치해석을 통해서 확인하였다.

본 논문에서는 후판 구조의 용접 각변형을 최소화하기 위한 변형 제어 방안으로서 최적화된 개선 형상을 판 두께 별로 제시하였고, 이의 타당성을 다수의 실험 및 수치해석을 통해서 검증하였다. 이로부터 후판 구조의 X-개선 맞대기 용접 이음부 주위에 고질적으로 발생되어 온 용접 각변형을 현저히 줄일 수 있었다.

용접으로 인한 변형을 가능한 한 정밀하게 계산하기 위하여 본 연구에서는 비선형 열전달 및 열변형해석을 수행하였다. 모든 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 비정상 열전달문제를 풀어 온도분포의 시간 이력을 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을

교신저자 김상일: 경남 거제시 장승포우체국 사서함 8호

055-682-4603 sang-il.kim@lr.org

수행하는 2단계 해석법을 적용하였다.

2. 후판 구조의 용접변형실험

용접변형실험이 정립된 열탄소성해석의 타당성을 검증하기 위해 수행되었다. 사용된 용접방법은 SAW(Submerged arc welding)이고, 용접 시 용접속도를 일정하게 유지하기 위해 Carriage를 이용하였으며, 사용된 재료는 고장력강(AH32 high strength steel)이다. 실험 모델의 차원은 Fig. 1에 보인 바와 같다. 판 두께에 따른 개선조건은 Table 1에 열거된 바와 같으며, 용접조건은 Table 2, 3과 4에 정리하였다. 이 때의 용접조건은 X-개선 맞대기 용접 시에 이용되는 실제 용접조건이며, 이러한 조건을 선정한 것은 각각의 판 두께에 대하여 개선 형상을 변화시킴으로써 판 두께와 개선 형상이 후판 구조의 용접 각변형에 미치는 영향을 정량적으로 조사하고자 함이 그 목적이다.

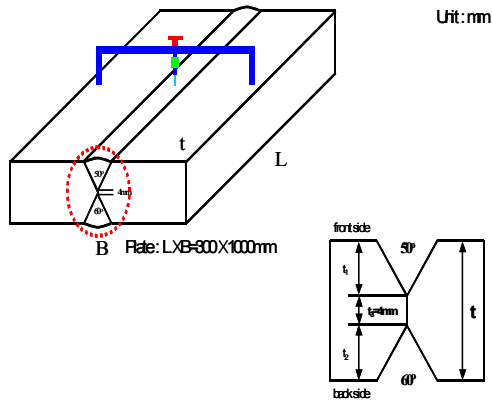


Fig. 1 Dimension of experimental model

Table 1 Groove conditions: no gouging

Model	Plate thickness t [mm]	Root face t_3 [mm]	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Groove design parameter $p = t_1/(t-t_3)$
X1			31.0	31.0	1/2(0.50)
X2	66	4	24.8	37.2	2/5(0.40)
X3			20.7	41.3	1/3(0.33)
X4			23.0	23.0	1/2(0.50)
X5	50	4	18.4	27.6	2/5(0.40)
X6			15.3	30.7	1/3(0.33)
X7			13.0	13.0	1/2(0.50)
X8	30	4	10.4	15.6	2/5(0.40)
X9			8.7	17.3	1/3(0.33)

Fig. 2는 실험 결과로부터 얻은 개선 형상 별 각변형과 층수 (Number of pass) 사이의 관계를 판 두께 별로 보여 주고 있는데, 용접 각변형 방지 측면에서 판 두께 66mm 조건에서는 1/3 개선이 가장 유리하고, 판 두께 50mm 조건에서는 2/5 개선이 가장 유리하며, 판 두께 30mm 조건에서는 현재의 1/2 개선이 가장 유리하다는 사실을 알 수 있다. Fig. 2에서 0 이하의 값이 있는 이유는 각변형이 이면 용접 방향으로 발생되었음을 의미하며, 각변형 측정 위치는 $L=30, 150, 270\text{mm}$ 지점이다. Fig. 3은 용접 각변형 최소화를 위한 최적의 개선 형상을 판 두께 별로 보여 주고 있는데, 후판 맞대기 용접 전에 역변형을 시공하더라도 판 두께 50mm 이상에서는 현재의 1/2 개선이 문제가 있어 보인다.

Table 2 Welding conditions: $t = 66\text{mm}$

Model	Working stage	Pass	I [A]	V [V]	v [cm/min]	
X1	Front side welding	1	650	30	45	
		2	750	32	40	
		3	750	30	40	
		4	800	32	35	
		5	800	32	38	
		6	800	32	35	
		7~8	750	30	35	
		Back side welding	9	850	30	35
	10-19	750	30	35		
	X2	Front side welding	1	650	30	45
			2	750	30	40
			3-4	750	30	35
			5	600	30	40
		Back side welding	6	700	30	40
			7	850	30	35
			8~20	750	30	35
			X3	Front side welding	1	650
	2	750			30	40
	3	750			30	35
4	600	30			35	
Back side welding	5	600		30	40	
	6	850		30	35	
	7~23	750		30	35	

(1) Measured span: 950 mm
(2) Weld metal: S717ULT×H14 (4.8φ)

Table 3 Welding conditions: $t = 50\text{mm}$

Model	Working stage	Pass	I [A]	V [V]	v [cm/min]	
X4	Front side welding	1	650	30	45	
		2	750	30	40	
		3-4	750	30	35	
		5-6	650	30	35	
	Back side welding	7	850	30	35	
		8	750	30	40	
		9-10	750	30	35	
		11	750	30	40	
		12-13	750	30	35	
		1	650	30	45	
		Front side welding	2	750	30	40
			3	750	30	35
4	700		30	40		
5	650		30	40		
Back side welding	6	850	30	35		
	7-14	750	30	35		
X6	Front side welding	1	650	30	45	
		2-3	750	30	40	
		4	650	30	35	
	Back side welding	5	650	30	40	
		6	850	30	35	
		7-15	750	30	35	

(1) Measured span: 950 mm
 (2) Weld metal: S717ULT×H14 (4.8 φ)

Table 4 Welding conditions: $t = 30\text{mm}$

Model	Working stage	Pass	I [A]	V [V]	v [cm/min]
X7	Front side welding	1	650	30	45
		2	700	30	30
	Back side welding	3	850	30	35
		4	750	32	35
X8	Front side welding	1	650	30	40
		2	700	32	35
	Back side welding	3	850	30	35
		4	700	30	35
		5	700	32	40
		6	650	32	40
X9	Front side welding	1	650	30	40
		2	850	30	35
	Back side welding	3	750	30	35
		4-5	650	30	35

(1) Measured span: 950 mm
 (2) Weld metal: S717ULT×H14 (4.8 φ)

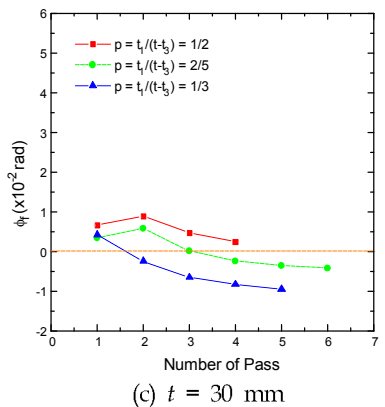
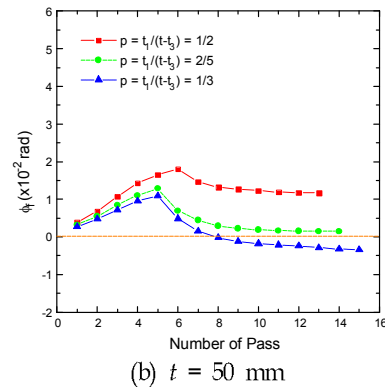
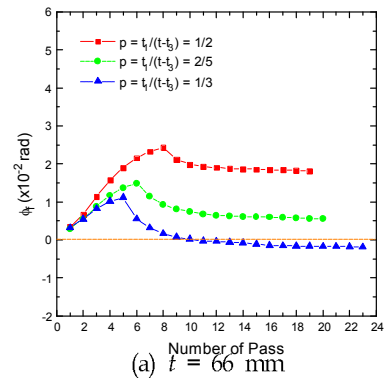


Fig. 2 Influence of pass number on the angular distortion

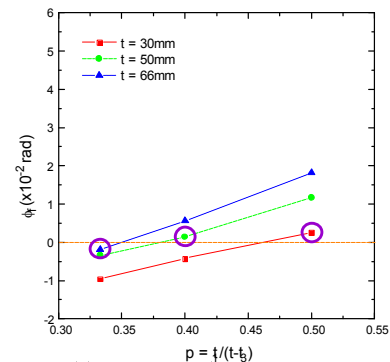


Fig. 3 Most suitable groove shape to minimize the angular distortion

3. 용접변형에 대한 수치해석

본 장에서는 X-개선 맞대기 용접에 대한 해석 모델을 만들어 먼저 열전달해석이 수행되었고, 그 결과인 온도분포를 하중 조건으로 하여 열변형해석이 수행되었다. 용접변형해석은 이론적으로 열전달문제와 열변형문제가 연성된 형태이나 변형량이 그다지 크지 않은 것으로 가정하면 구조물의 기하학적 형상 변화가 열전달문제에 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고, 따라서 열전달문제와 열변형문제를 분리하여 독립적으로 해석할 수 있다.

3.1 유한요소 모델링

해석 시의 유한요소모델은 2차원 일반화된 평면 변형을 요소를 이용하였다. 열전달해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였으며(Fig. 4 참조), 여기서, k 는 열전도율, c 는 비열이며 ρ 는 밀도이며, 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(Latent heat)의 효과를 고려하였다. 또한 외부로부터 유입되는 용착금속(Weld metal)을 모델링하기 위해 요소 탄생법(Element birth method)을 이용하였는데, 그 방법은 초기에 해석 모델 전체를 모델링하고, 해석이 시작되기 이전에 용접비드(Weld bead) 부분의 요소들을 모두 삭제한 다음, 시간에 따라 비드요소(Dead element)가 하나씩 생성되도록 하는 것이다. 경계조건으로는 해석 모델의 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대기의 온도는 20°C로 가정하였다.

용접비드가 쌓이는 현상을 수치적으로 모델링하는 방법은, 생성되는 요소에 표면열속을 가하는 방법, 체적열속을 가하는 방법, 절점온도를 주는 방법 등이 있는데, 본 해석에서는 생성되는 비드요소에 체적열속을 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였다.

용접변형해석은 열전달해석의 결과를 토대로 출발하게 된다. 즉, 열전달해석을 통한 각 절점에서의 과도적인 온도분포가 열탄소성해석 시의 하중조건이 된다. 따라서 열탄소성해석 시에는 열전달해석 시의 요소 분할을 그대로 사용하였으며, 요소 탄생법 역시 동일한 방법을 이용하였다. 이 때에도 모든 기계적인 재료 특성치들이 온도에 따라 변화하도록 모델링하였고(Fig. 5 참조), 재료의 변형도 경화 모델은 Fig. 6에 나타낸 바와 같다. 해석 모델에 작용하는 외력은 불균일한 온도분포에 따른 열하중이며, 온도분포는 열전달해석에서의 절점온도 결과를 이용하였다. 경계조건으로는 후판 구조의 맞대기 용접이 정반 위에서 이루어진다는 사실에 착안하여, 이를 구현하기 위해 해석 모델의 아래 부분에 Rigid surface를 이용하여 정반(Ground)을 모델링하였고, 강체운동 방지를 위해서는 해석 모델의 양 끝단을 약한 스프링(10^6kgf/mm)으로 잡아주었다.

2장에서 용접변형실험 결과, 용접선 방향으로의 각변형은 용접 개시점에서 용접 완료점으로 갈수록 다소 변하는 것으로 나타났으나, 그 차이는 무시할 만한 수준임이 확인되었다. 따라서 본 논문에서는 X-개선 맞대기 용접의 경우에 2차원 해석을 수행하였고, 이는 용접부 근방에서 판 두께 및 폭 방향으로

의 요소의 크기를 작게 모델링할 수 있기 때문에 2차원 해석이라 하더라도 정도있는 해석 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있기 때문이며, 3차원 다층 맞대기 용접변형해석 시에 소요되는 과도한 계산 시간 또한 그 이유 중의 하나가 된다.

3.2 열전달해석

대상 모델의 크기와 용접조건은 2장의 Fig. 1과 Table 2, 3과 4에 보여진 바와 같으며, 본 절에서는 Table 2에 있는 Model-X1에 대한 열전달해석 결과를 X-개선 맞대기 용접 시의 과도적인 온도분포의 전형적인 예로 제시하고자 하였으며, 용

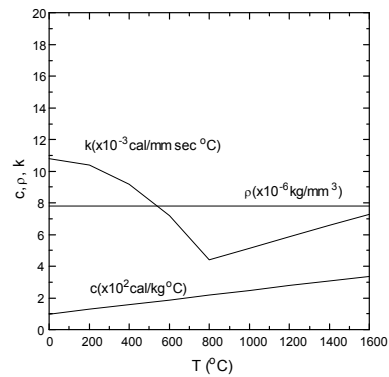


Fig. 4 Temperature-dependent physical properties of AH32 high tensile steel

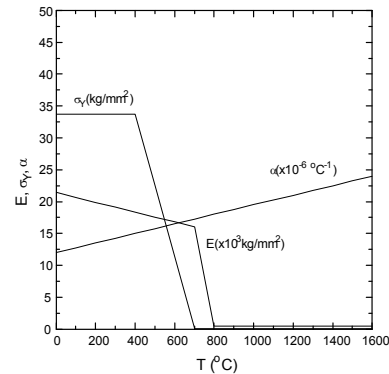


Fig. 5 Temperature-dependent mechanical properties of AH32 high tensile steel

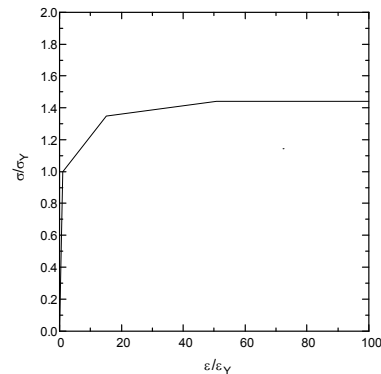


Fig. 6 Strain hardening model for AH32 high tensile steel

접층의 출발점인 원점에서 폭 방향과 모재 두께 방향으로의 좌표는 1, 2(x, y)로 정의하였다.

Fig. 7은 용접층 수의 변화에 따른 용접 중의 최고 온도 발생 시의 Model-X1의 용접부 주위의 온도분포를 보여 주고 있는데, 본 열전달해석 절차는 X-개선 맞대기 용접 시의 용융부(Fusion zone)와 열영향부(Heat affected zone) 등과 같은 열전달 특성들을 합리적으로 잘 구현해 준다는 사실을 알 수 있다. Fig. 8은 Model-X1의 마지막 용접층 시공 시의 폭 방향 및 모재 두께 방향으로의 과도적인 온도분포를 보여 주고 있다. 결과에 의하면, 두께 방향으로의 온도분포는 용접 초기에만 약간의 차이를 보일 뿐 어느 정도 시간이 경과하면 균일한 분포 양상을 보임을 알 수 있다.

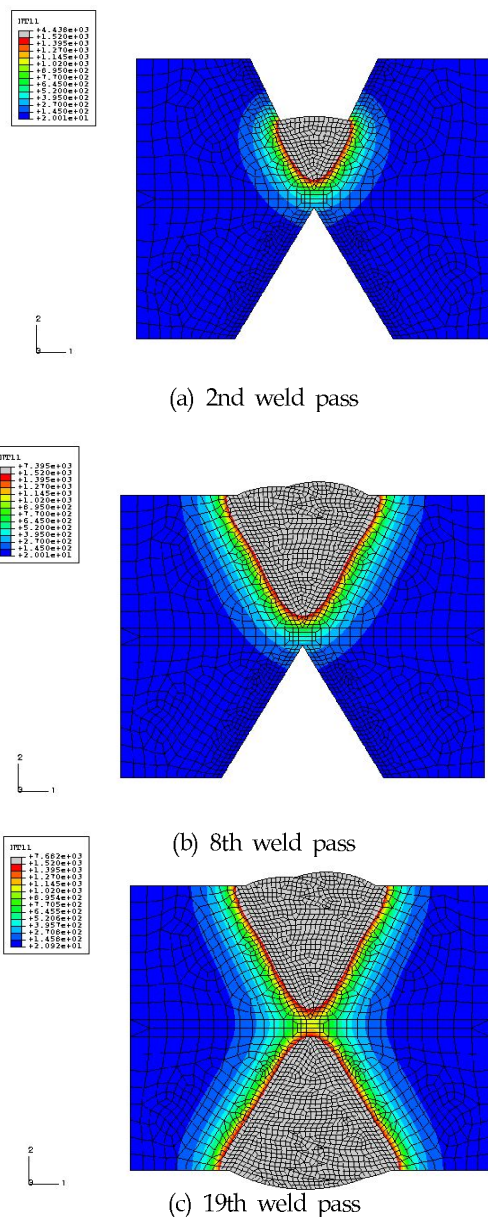


Fig. 7 Temperature history for Model-X1 varying with weld pass

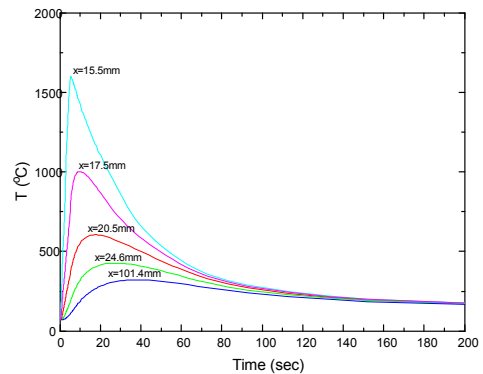
3.3 열탄소성해석

본 절에서는 수치해석 결과의 검증을 위하여 Table 1에 있는 Model-X1~X3에 대한 용접변형실험 결과와 비교하여 열탄소성해석법의 정당성을 확인하였다.

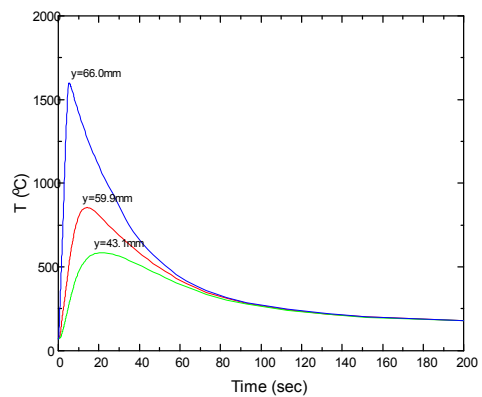
Fig. 9는 용접 후 정상 상태(20°C)일 때의 Model-X1의 용접층 수의 변화에 따른 변형 형상을 보여 주고 있으며, Fig. 10은 Model-X1의 용접층 수의 변화에 따른 각변형의 추이를 보여 주고 있는데, 3장의 용접변형실험 결과와 마찬가지로 판 두께 66mm 조건에서는 현재의 1/2 개선이 각변형 방지 측면에서 문제가 있다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 11은 Table 1에 있는 Model-X1~X3의 용접 각변형에 대한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교한 것인데, 열탄소성해석에 의한 수치해석 결과는 실험 결과와 비교해서 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있으며, 이로부터 본 2차원 X-개선 맞대기 용접변형해석 절차의 유효성을 확인할 수 있다.

이를 토대로 향후에는 가우징 효과와 용접부의 구속 정도 등과 같은 최종적인 용접 각변형에 영향을 미치는 중요한 인자들을 모두 고려한 수치해석을 다수 수행하여 후판 구조의 용접 각변형 최소화를 위한 최적의 용접 시공 기준을 정량적으로 제시할 예정이다.



(a) Breadth direction at $y = 66$ mm



(b) Thickness direction at $x = 15.5$ mm

Fig. 8 Temperature history for Model-X1 at the 19th weld pass

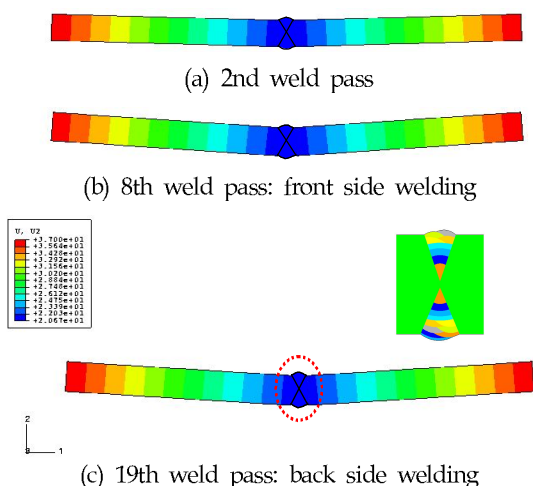


Fig. 9 Deformed shape due to X-groove butt welding for Model-X1

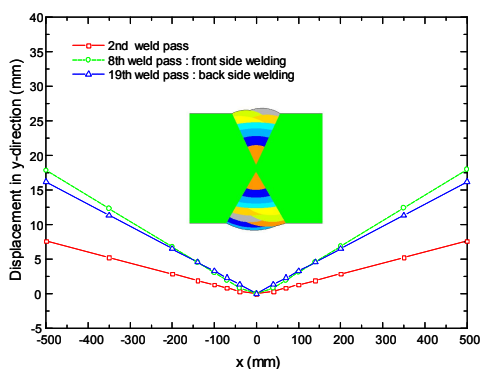


Fig. 10 Computed angular distortion for Model-X1

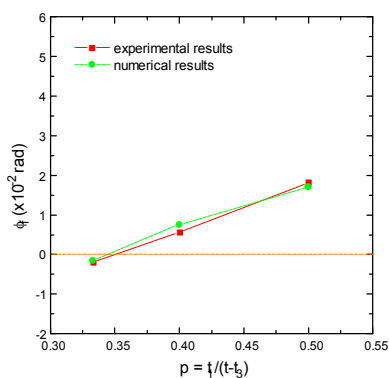


Fig. 11 Comparison of numerical results with measured results

4. 결 론

후판 구조의 용접변형실험과 수치해석을 수행한 결과, 아래와 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

(1) X-개선 맞대기 용접 시에 발생하는 최종적인 각변형은 판 두께에 따라 그 발생 경향이 조금씩 다르게 나타나지만, 개선 형상에 상당히 의존한다는 사실을 알 수 있다.

(2) 용접 각변형 방지 측면에서 판 두께 66mm 조건에서는 1/3 개선이 가장 유리하고, 판 두께 50mm 조건에서는 2/5 개선이 가장 유리하며, 판 두께 30mm 조건에서는 현재의 1/2 개선이 가장 유리하다는 사실을 알 수 있다.

(3) 용접 각변형 최소화를 위한 최적의 개선 형상을 판 두께 별로 살펴 보면, 후판 맞대기 용접 전에 역변형을 시공하더라도 판 두께 50mm 이상에서는 현재의 1/2 개선이 문제가 있다는 사실을 알 수 있다.

(4) 용접 각변형에 대한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교한 결과, 열탄소성해석에 의한 수치해석 결과는 실험 결과와 비교해서 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있으며, 이로부터 본 2차원 X-개선 맞대기 용접변형해석 절차의 정당성을 확인하였다.

향후에는 가우징 효과와 용접부의 구속 정도 등과 같은 최종적인 용접 각변형에 영향을 미치는 중요한 인자들을 모두 고려한 수치해석을 다수 수행하여 후판 구조의 용접 각변형 최소화를 위한 최적의 용접 시공 기준을 정량적으로 제시할 예정이다.

참 고 문 헌

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

Kim, S.I., Han J.M., Cho, Y.K., Kang, J.K., Lee, J.Y. and Lee, J.S. (1997). "A Study on the Accuracy Control of Block Assembly in Shipbuilding-simulation of Residual Deformation Due to Fillet Welding" Proceedings of ICCAS-1997, pp 367-381.

Lee, S.G. (1992). Modeling of Residual Stress in Thick Section Weldments, Ph.D. Thesis, Department of Welding Engineering, University of Ohio State.

Masubuchi, K. (1956). Reports of Transportation Technical Research Institute, Vol 20.

Ueda, Y., Kim, Y.C., Yamakita, T. and Bang, H.S. (1988). "Applicability of Substituting Plane-deformation Problems for Three-dimensional Thermal Elasto-Plastic Problems", Transactions of the Japanese Welding Society, Vol 6, No 1, pp 47-59.

Ueda, Y., Murakawa, H., Gu, S.M., Okumoto, Y. and Kamichika, R. (1992). "Simulation of Welding Deformation for Accurate Ship Assembling(1st Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 171, pp 395-404.

2008년 10월 28일 원고 접수

2008년 12월 2일 최종 수정본 채택