

소성 역변형법을 이용한 박판 평 블록의 용접변형 제어

김상일*

*로이드선급협회 아시아 옥포사무소

Control of Welding Distortion for Thin Panel Block Structure Using Plastic Counter-Deforming Method

Sang-Il Kim*

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

KEY WORDS: Welding distortion 용접변형, Geometric inaccuracy 기하학적 부정확성, Adjusting work 재작업, Distortion control method 변형 제어법, Plastic counter-deforming method (PCDM)

ABSTRACT: *The welding distortion of a hull structure in the shipbuilding industry is inevitable at each assembly stage. The geometric inaccuracy caused by welding distortion tends to preclude the introduction of automation and mechanization and requires additional man-hours for adjustment work during the following assembly stage. To overcome this problem, a distortion control method should be applied. For this purpose, it is necessary to develop an accurate prediction method that can explicitly account for the influence of various factors on the welding distortion. The validity of this prediction method must also be clarified through experiments. For the purpose of reducing the weld-induced bending deflection, this paper proposes the plastic counter-deforming method (PCDM), which uses line heating as the optimum distortion control method. The validity of this method was substantiated by a number of numerical simulations and actual measurements.*

1. 서 론

여객선 갑판 블록(Deck block)의 경우에는 판 두께가 5~10mm인 박판으로 구성되어 있기 때문에, 조립 단계에서의 용접으로 인한 변형은 필연적으로 발생하게 된다. 이의 교정을 위해 곡직 작업이 조립 단계 이후에 실시되지만, 이후의 공정인 운반/적치, 선탑재(Pre-erection), 탑재 공정에서 용접 및 외력으로 인한 추가적인 변형이 재발되어 변형 교정 작업인 곡직 작업이 2~3회에 걸쳐서 추가적으로 수행되고 있는 실정이다. 이러한 곡직 작업은 조립 단계 이후의 공정에서 발생하는 추가적인 변형과 이에 기인하여 발생하는 과도한 곡직 작업 시수 등의 문제점을 초래하여 생산성 저하의 주원인이 되고 있다.

따라서 용접변형을 최소화할 수 있는 최적의 변형 제어법 개발이 절실히 요구되는데, 실제 현장에서는 용접 구조물의 형상에 따라 단편적인 변형 방지법이 용접 전후를 통해서 적용되고 있을 뿐이다.

컴퓨터의 급속한 발달로 인해서, 과거 수십년동안 주로 연구용으로 사용된 열탄소성해석이 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; 2003; 이주성과 박재우, 2008; Fujita and Nomoto, 1972;

Kim et al., 1997; Lee, 1992; Ueda et al., 1973; 1988; 1992), 만일 수치해석이 여러 열공정들로 인한 변형을 예측하는데 유용한 도구라는 것이 입증된다면, 용접변형을 최소화할 수 있는 최적의 방법이 다양한 수치 시뮬레이션을 통해서 각 조립 단계 별로 제시될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 실제 박판 평 블록 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 최소화하기 위한 새로운 개념의 변형 제어법으로서 선상가열을 이용한 소성 역변형법을 구체적인 변형 제어 방안으로 제시하였고, 이의 타당성을 다수의 수치해석을 통해서 검증하였으며, 이러한 방법이 변형 제어에 매우 효과적이라는 사실은 실물 적용을 통해서 확인하였다. 이를 토대로 여객선 갑판 블록의 작업 공법을 판 두께와 정반 조건 별로 표준화하였고, 이로부터 보강재 사이의 각변형을 현저히 줄일 수 있었다.

본 연구에서는 정량적인 변형 제어 방안인 소성 역변형법 적용 시에 역변형을 주기 위한 수단으로 선상가열을 이용하였다. 이는 지금까지 강판의 곡 가공과 곡직 작업에만 제한적으로 이용되던 선상가열의 확대 적용 측면에서 의미가 있으며, 기존에 이미 사용하던 장비를 이용할 수 있기 때문에 대규모의 투자없이 용접변형을 방지할 수 있다는 장점이 있다.

용접으로 인한 변형을 가능한 정밀하게 계산하기 위하여 본 논문에서는 비선형 열전달 및 열변형해석을 수행하였다. 모든 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이

교신저자 김상일: 경남 거제시 장승포우체국 사서함 8호, 055-682-4603, sang-il.kim@lr.org

용하였고, 비정상 열전달문제를 풀어 온도분포의 시간 이력을 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행하는 2단계 해석법을 적용하였다.

2. 용접 현상의 역학적 특성

용접 중에 일어나는 현상을 이론적으로 파악하기 위해서는 열탄소성문제를 풀어야 한다. 용접변형해석 방법으로는 유한요소법에 토대를 둔 열탄소성해석이 있으나, 용접이 가지는 재료 및 기하학적 비선형성, 시간과 온도에 대한 의존성 등 복잡한 물리적 성질과 전류, 전압, 용접속도, 용접순서, 구속조건 등 용접변형의 결과에 영향을 주는 많은 인자들이 있어서, 이들의 효과를 반영하여 해석하기에는 방대한 계산 시간이 필요하다.

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. 즉, 열전달해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 Time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행함으로써 용접변형을 계산하였다.

3. 변형 제어법의 적용

본 장에서는 소성 역변형법 적용 시의 선상가열 또는 용접으로 인한 국부적인 잔류 소성 변형율의 분포 및 해석 모델과 정반 사이의 접촉조건(Contact condition) 등을 효과적으로 구현하고, 변형 제어법의 적용 효과를 보다 자세하게 정량적으로 규명하기 위해서 ABAQUS를 이용한 2차원 열탄소성해석을 수행하였다.

3.1 유한요소 모델링

기하학적 형상과 온도분포의 대칭성을 이용하여, 갑판 블록에 대한 해석 모델은 전 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다. 또한 해석 시의 유한요소모델은 2차원 일반화된 평면 변형을 요소로 이용하였다.

열전달해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였으며, 또한 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(Latent heat)의 효과를 고려하였다. 열변형해석 시에도 모든 기계적인 재료 특성치들이 온도에 따라 변하도록 모델링하였다.

열전달해석의 경우에는 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대기의 온도는 20°C로 가정하였다. 또한 용접비드를 수치적으로 모델링하는 방법으로는 생성되는 비드요소에 체적열속을 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였고, 이에 따라 열탄소성해석을 순차적으로 수행하였다.

필릿 용접 전의 선상가열에 대한 수치해석은 선상가열 토치의 수치적 모델인 표면열속을 가열 지점인 보강재 간격의 1/2

지점에 가하여 해석을 수행하였다.

열탄소성해석 시에는 실제 용접 구조물의 필릿 용접이 정반 위에서 이루어진다는 사실에 착안하여, 이를 구현하기 위해 해석 모델의 아래 부분에 Rigid surface를 이용하여 정반(Ground)을 모델링하였고, 강제운동 방지를 위해서는 해석 모델의 양 끝단을 약한 스프링(10^{-6} kgf/mm)으로 잡아주었다.

3.2 변형 제어법의 적용 결과

실제 여객선 갑판 블록의 크기는 Fig. 1과 Table 1에 보여진 바와 같으며, 용접조건은 Table 2에 열거된 바와 같다. 이 때 사용된 용접방법은 FCAW(Flux cored arc welding)이고, 사용된 재료는 연강이다.

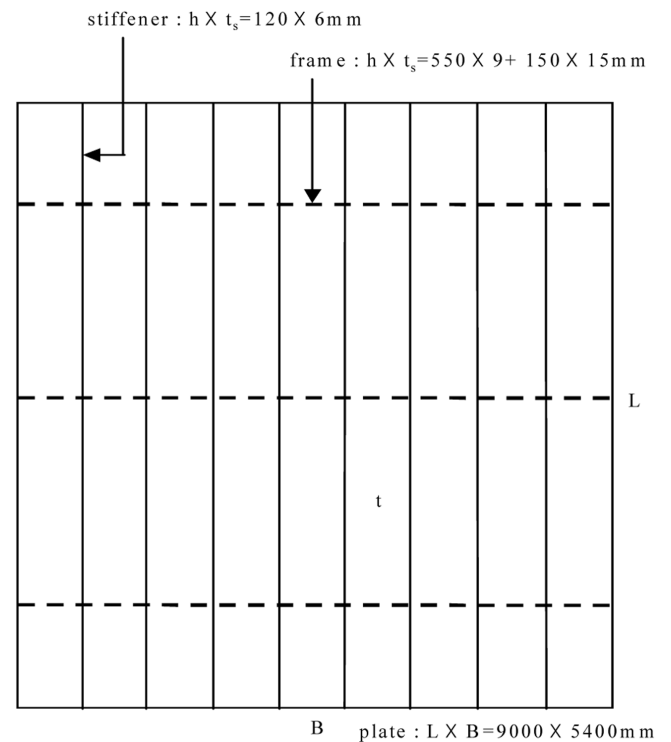


Fig. 1 Dimension of Deck block model

Table 1 Deck block models

Model	Size of deck		Stiffener space [mm]	Frame space [mm]	Supporting condition
	Plate $L \times B \times t$ [mm]	Stiffener $h \times t_s$ [mm]			
D1	$9000 \times 5400 \times 5$	120×6	600	2980	Ground
D2	$9000 \times 5400 \times 7$				

Table 2 Welding conditions

Throat thickness t_w [mm]	Leg length f [mm]	I [A]	V [V]	v [mm/sec]	Heat input Q [cal/mm]
3.0	4.0	260	30	16.7	112

선상가열을 이용한 소성 역변형법이라 함은 필릿 용접 전에 Stiffener side에서 선상가열을 통해 미리 역변형을 줌으로써 보강재 사이의 각변형을 방지하는 방법(PCDM)을 말하며, 그 기본 개념은 Fig. 2에 보여진 바와 같다.

Figure 3은 Model-D2의 필릿 용접에 따른 변형 형상을 보여 주고 있으며, Fig. 4는 대상 모델의 판 두께에 따른 굽힘 변형량의 차이를 보여 주고 있다. 결과에 의하면, 굽힘 변형량은 주어진 용접조건 하에서 판 두께에 반비례한다는 사실을 알 수 있다. Figure 5는 대상 모델의 수치해석에 의한 중앙부 다섯 곳에서의 굽힘 변형량의 평균을 실험 계측 결과와 비교한 것인데, 본 열탄소성해석법에 의한 해석 결과는 계측 결과와 비교해서 좋은

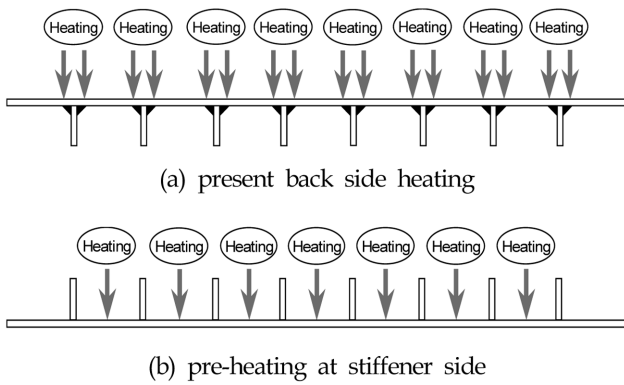


Fig. 2 Basic concept of PCDM

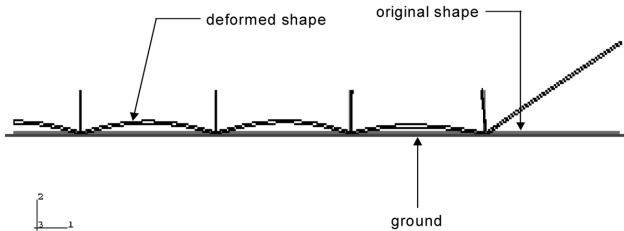


Fig. 3 Deformed shape due to fillet welding for Model-D2

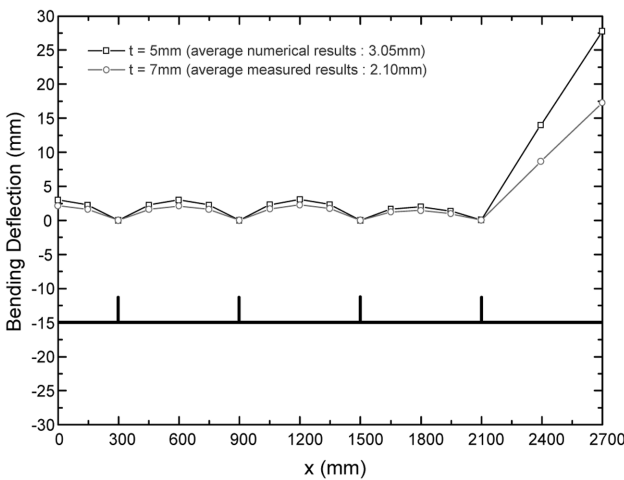


Fig. 4 Bending deflection according to the plate thickness for deck models

추정 결과를 주고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 6은 Model-D2에 대한 소성 역변형법의 적용 순서를 보여 주고 있으며, Fig. 7은 Model-D2에 대한 선가열·후용접법

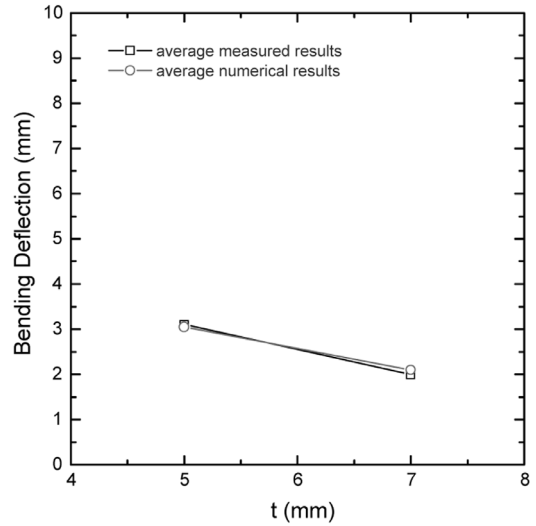


Fig. 5 Comparison of numerical results with measured results

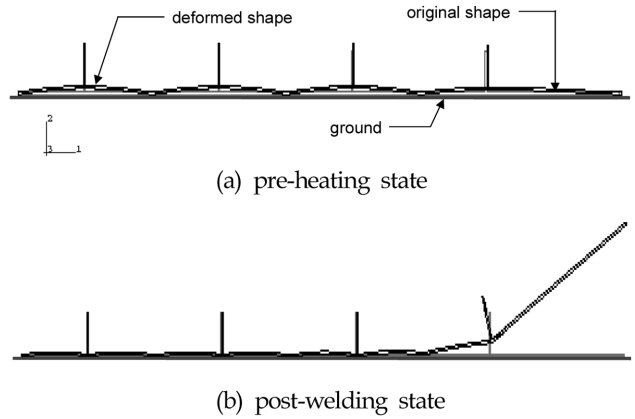


Fig. 6 Simulation result of PCDM for Model-D2

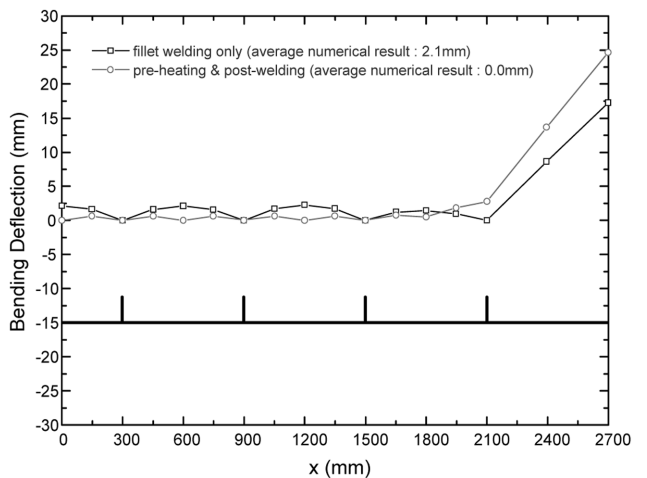


Fig. 7 Effect of application of PCDM for Model-D2

의 적용 효과를 보여 주고 있다. 결과에 의하면, 여객선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 보강재 사이의 각변형을 최소화 하기 위해서는 선상가열을 이용한 소성 역변형법을 최적의 변형 제어 방안으로 채용하는 것이 생산 기술적인 측면에서 매우 유리하다는 사실을 알 수 있다.

4. 변형 제어법의 적용 효과

본 장에서는 여객선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 대표적인 용접변형인 보강재 사이의 각변형을 효과적으로 제어할 수 있는 변형 제어법인 선상가열을 이용한 소성 역변형법에 대한 실물 적용 실험을 수행하였고, 이에 대한 적용 효과에 대해서도 상세히 기술하였다.

선상가열을 이용한 소성 역변형법 적용 여부에 따른 굽힘 변형량의 차이를 비교하기 위한 용접 및 가열조건은 Table 3에 열거된 바와 같다. Table 4는 이러한 조건 하에서의 선가열 적용 여부에 따른 굽힘 변형량을 판 두께, 보강재 간격과 프레임 간격에 따라 비교한 것인데, 선가열·후용접법을 적용하게 되면 판 두께에 상관없이 곡직 작업을 하지 않아도 되는 조건으로 관리할 수 있다. Figure 8은 선가열 적용에 따른 판 두께별 굽힘 변형량을 비교한 것이다. 결과에 의하면, 변형의 허용 오차 범위를 고려하더라도 최종적인 변형량이 1mm 이하의 수준이므로 조립 단계에서의 선가열 적용 효과는 상당히 양호하다고 판단된다.

Table 5는 실제 갑판 블록의 소성 역변형법 적용에 따른 공정

Table 3 Welding and line heating conditions

Yes or No of application of PCDM	Welding conditions		Heating conditions	
	Welding process	Throat thickness [mm]	Used fuel gas	Heating speed [mm/min]
No	FCAW	3.0	LPG	-
		2.9		-
		3.1		-
Yes	FCAW	2.9	LPG	1200
		3.0		1000

Table 4 Measured bending deflections

Yes or No of application of PCDM	Plate thickness [mm]	Stiff. space [mm]	Frame space [mm]	Bending deflection after completion of each work [mm]		
				Fitting	Heating	Welding
No	5	600	2980	-0.1	-	3.2
	7			-0.2	-	2.2
	10			-0.1	-	1.1
Yes	5	600	2980	0.1	-1.5	0.8
	7			-0.2	-1.5	0.2

Design Variable : L×B=9000×5400mm

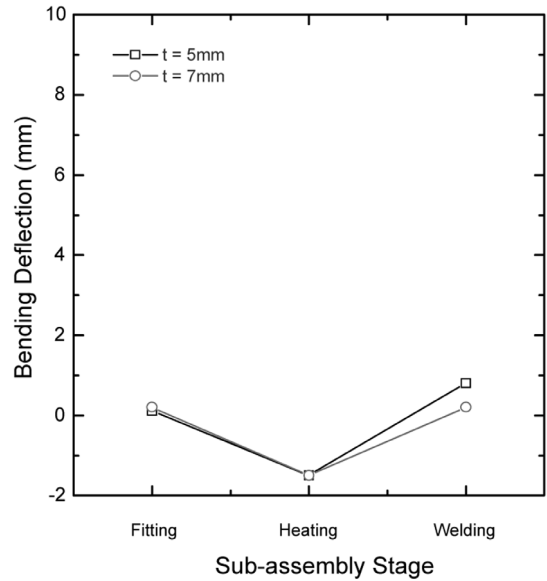


Fig. 8 Average bending deflection according to the plate thickness for deck blocks

Table 5 Influence of PCDM

Supporting condition	Parameter	Stage	
		Assembly	P.E
Bending deflection (mm)	Mean [mm]	1.1	1.0
	Max. value [mm]	2.5	5.0
	Min. value [mm]	-1.0	-2.0
Ground	Assembly stage		
	Tolerance	[± 2 mm]	2/13EA 1/17EA
		P.E stage	[± 4 mm]
	Excess rate of tolerance [%]	15	6

- (1) Design variable: Plate thickness 7 mm, stiffener space 600mm, frame space 2980 mm, L × B = 9000 × 5400 mm
- (2) Line heating condition : Heating speed 1000 mm/min

단계별 굽힘 변형량의 추이를 보여 주고 있는데, 조립 단계에서 선가열을 적용하여 보강재 사이의 각변형과 이에 대한 불량율을 현저히 줄여 준다면, 이에 기인한 변형 관련 문제는 후공정인 선탑재 공정에서도 거의 발생되지 않는다는 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

용접변형이 문제가 되는 갑판 블록을 대상으로 다양한 수치 해석과 실물 계측 실험을 수행한 결과, 아래와 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

- (1) 조립 단계에서 발생하는 보강재 사이의 각변형을 최소화 하기 위해서는 선상가열을 이용한 소성 역변형법을 최적의 변형 제어 방안으로 채용하는 것이 생산 기술적인 측면에서 가장

효과적이라는 사실을 알 수 있다.

(2) 선상가열을 이용한 소성 역변형법을 적용하는 경우에는 판 두께와 보강재 간격에 상관없이 곡직 작업을 하지 않아도 되는 조건으로 관리할 수 있다는 사실을 확인할 수 있다.

(3) 향후에는 현업과의 긴밀한 협조를 통해서 멀지 않은 장래에 여객선 구조의 용접변형을 최소화할 수 있는 최적의 변형 제어 방안을 정량적으로 제시할 예정이며, 이는 세계 여객선 건조 시장에서의 품질 경쟁력 향상을 도모할 수 있는 기폭제가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 김상일 (1999). 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위논문.
- 김상일 (2003). "FPSO선 Moon Pool 구조의 용접변형 해석에 관한 연구", 한국해양공학회지, Vol 17, No 3, pp 27-32.
- 이주성과 박재우 (2008). "박판 필릿 용접 시 변형 제어를 위한 장력법 적용", 한국해양공학회지, Vol 22, No 1, pp 64-69.
- Fujita, Y. and Nomoto, T. (1972). "Studies on Thermal Elasto-plastic Problems (1st Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol 130, pp 183-191.
- 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.
- Ueda, Y. and Yamakawa, T. (1973). "Analysis of Thermal Elastic-plastic Behavior of Metals During Welding by Finite Element Method", Journal of the Japanese Welding Society, Vol 42, No 6, pp 567-577.
- 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 22일 최종 수정본 채택