

## 기계적 인장법을 이용한 박판 평 블록의 용접변형 제어

김상일<sup>†\*</sup>

로이드선급협회 아시아 울산사무소\*

### Control of Welding Distortion for Thin Panel Block Structure using Mechanical Tensioning Method

Sang-Il Kim<sup>†\*</sup>

Ulsan Office, Lloyd's Register Asia\*

#### Abstract

The welding distortion of a hull structure in the shipbuilding industry is inevitable at each assembly stage. This geometric inaccuracy caused by the welding distortion tends to preclude the introduction of automation and mechanization and needs the additional man-hours for the adjusting work at 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 which can explicitly account for the influence of various factors on the welding distortion. The validity of the prediction method must be also clarified through experiments.

For the purpose of reducing the weld-induced bending deflection, this paper proposes the mechanical tensioning method (MTM) as the optimum distortion control method. The validity of this method has been substantiated by a number of numerical simulations and actual measurements.

※Keywords: Welding distortion(용접변형), Geometric inaccuracy(기하학적 부정확성), Distortion control method(변형 제어법), Mechanical tensioning method(기계적 인장법)

---

접수일: 2005년 10월 17일, 승인일: 2005년 12월 5일

†주저자, E-mail: sang-il.kim@lr.org

Tel: 011-594-2756

## 1. 서론

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, 선탭재(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 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(Lee 1992, 장창두와 서승일 1994, Kim et al. 2002, 김상일과 허주호 2003a, 2003b, 김상일 1999, 2003, 2004), 만일 수치해석이 여러 열공정들로 인한 변형을 예측하는데 유용한 도구라는 것이 입증된다면, 용접변형을 최소화할 수 있는 최적의 방법이 다양한 수치시뮬레이션을 통해서 각 조립 단계 별로 제시될 수 있을 것이다.

필릿 용접된 평 블록의 용접변형을 감소시키기 위한 방안으로는 탄성 선변형법(elastic pre-straining method)과 소성 선굽힘법(plastic pre-bending method)이 있는데(Kumose et al. 1954), 이들이 제시한 변형 제어 방안의 단점으로는 정량적이지 못하다는 점을 우선적으로 들 수 있으며, 실구조물에 대한 적용 예가 거의 전무하

다는 점 또한 그 단점 중의 하나이다. 또한 소성 선굽힘법에 있어서는 용접 전에 미리 소성 역변형을 줌으로써 변형을 방지할 수 있다는 개념적인 정의만 내렸을 뿐, 어떤 방법을 이용해서 어떤 조건으로 어떻게 적용한다는 구체적인 변형 제어 방안을 제시하지 못한 한계성을 지니고 있다.

현재까지의 용접변형에 대한 연구는 변형 예측을 위한 수치해석 기법 개발에 초점을 두고 있었다고 할 수 있다. 즉, 구체적인 변형 제어 방안을 이론적인 방법에 기초하여 정립하고, 이를 실구조물의 제작에 적용하는 수준에까지는 이르지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이의 한계성을 극복하기 위해 용접변형이 문제가 되는 여객선 구조의 박판 평 블록을 대상으로 구체적인 변형 제어 방안을 정량적으로 제시하고자 하였다.

본 논문에서는 실제 박판 평 블록 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 최소화하기 위한 새로운 개념의 변형 제어법으로서 기계적 인장법을 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 표준화하였고, 이로부터 보강재 사이의 각변형을 현저히 줄일 수 있었다.

용접으로 인한 변형을 가능한 정밀하게 계산하기 위하여 본 논문에서는 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 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 복

잡한 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, 열전달 해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행함으로써 용접변형을 계산하였다.

### 3. 변형 제어법의 적용

본 장에서는 기계적 인장법 적용 시의 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 3차원 열탄소성해석을 수행하였다.

#### 3.1 유한요소 모델링

기하학적 형상과 온도분포의 대칭성을 이용하여, 해석 모델은 전 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다. 또한 해석 시의 유한요소모델은 3차원 고체 요소(three-dimensional solid element)를 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 변화도록 모델링하였다.

열전달해석의 경우에는 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부과하였고, 대기의 온도는 20°C로 가정하였다. 또한 용접비드를 수치적으로 모델링하는 방법으로는

생성되는 비드요소에 표면열속을 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였고, 이에 따라 열탄소성해석을 순차적으로 수행하였다.

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

#### 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.

기계적 인장법이라 함은 필릿 용접 전에 용접선의 직각 방향으로 기계적 인장하중을 가함으로써 보강재 사이의 각변형을 방지하는 방법(MTM)을 말하며, 그 기본 개념은 Fig. 2에 보여진 바와 같다.

Fig. 3은 Model-D1의 필릿 용접에 따른 3차원 변형 형상을 보여 주고 있는데, 굽힘 변형량은 중앙부 다섯 곳에서 거의 일정한 값을 주고 있다. 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. Fig. 5는 대상 모델의 수치해석에 의한 중앙부 다섯 곳에서의 굽힘

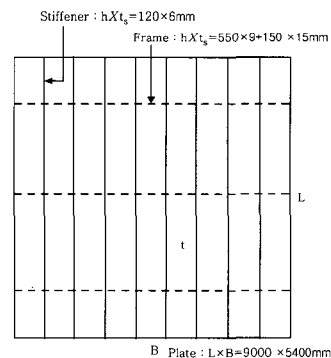


Fig. 1 Dimension of deck block model

Table 1 Deck block model

Model	Size of Deck		Stiffener Space [mm]	Frame Space [mm]	Supporting Condition
	Plate L×B×t [mm]	Stiffener h×t <sub>s</sub> [mm]			
D1	9000×5400×5	120×6	600	2980	Ground
D2	9000×5400×6				
D3	9000×5400×7				

Table 2 Welding conditions

Throat Thickness t <sub>w</sub> [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

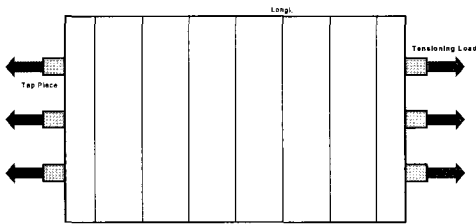


Fig. 2 Basic concept of MTM

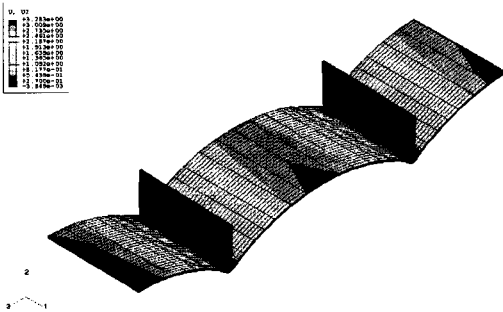


Fig. 3 Deformed shape due to fillet welding for Model-D1

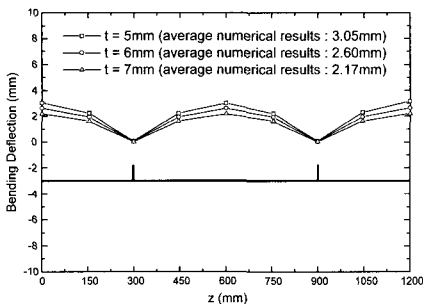


Fig. 4 Bending deflection according to the plate thickness for deck models

변형량의 평균을 실물 계측 결과와 비교한 것인데, 본 열탄소성해석법에 의한 해석 결과는 계측 결과와 비교해서 좋은 추정 결과를 주고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Model-D1의 기계적 인장법 적용 순서(tensioning load : 2ton/m) 를 보여 주고 있으며, Fig. 7은 Model-D1에 대한 기계적 인장법의 적용 효과를 보여 주고 있다. 결과에 의하면, 여객

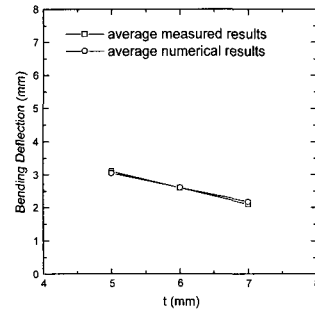


Fig. 5 Comparison of numerical results with measured results

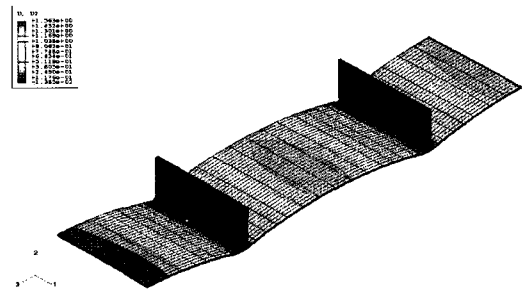
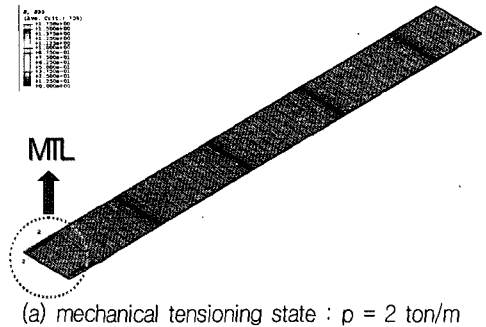


Fig. 6 Simulation result of MTM for Model-D1

선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 보강재 사이의 각변형을 줄이기 위해서는 기계적 인장법을 변형 제어의 한 방안으로 채용하는 것이 생산 기술적인 측면에서 매우 유리하다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 8은 기계적 인장법 적용 시의 인장하중에 따른 굽힘 변형량의 차이를 보여 주고 있는데, 조립 단계에서의 굽힘 변형량을 1.5mm 이하로 관리하기 위해서는 판 두께에 상관없이 최소한 2ton/m의 인장하중이 필요하다는 사실을 알 수 있다.

4. 변형 제어법의 적용 효과

본 장에서는 여객선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 대표적인 용접변형인 보강재 사이의 각 변형을 효과적으로 제어할 수 있는 변형 제어법인

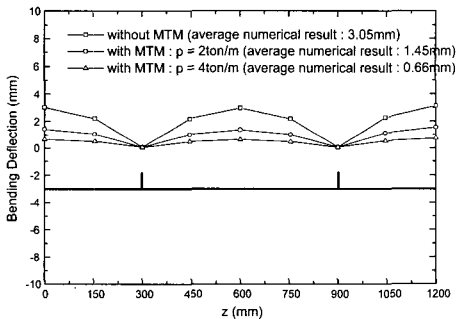


Fig. 7 Effect of application of MTM for Model-D1

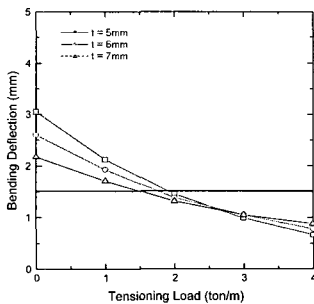


Fig. 8 Influence of tensioning load on the bending deflection

기계적 인장법에 대한 실물 적용 실험을 수행하였고, 이에 대한 적용 효과에 대해서도 상세히 기술 하였다.

Table 3과 Fig. 9는 기계적 인장하중(1.5ton×8개) 적용 여부에 따른 판 두께 별 굽힘 변형량을 비교한 것인데, 변형의 허용 오차 범위를 고려하더라도 최종적인 변형량이 1.5mm 이하의 수준이므로 조립 단계에서의 기계적 인장법 적용 효과는 매우 양호하다고 볼 수 있다.

Fig. 10은 판 두께 5mm인 여객선 갑판 블록에 기계적 인장하중(2ton×5개)을 적용한 경우의 굽힘 변형량 계측 결과를 보여 주고 있는데, 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 보강재 사이의 각 변형을 줄이기 위해서는 기계적 인장법을 변형 제어의 한 방안으로 채용하는 것이 생산 기술적인 측면에서 매우 유리하다는 사실을 알 수 있다. 기계적 인장하중이 걸린 상태에서 보강재 사이의 각 변형이 줄어드는 미케니즘을 살펴 보면, 보강재 필릿 용접 시에는 각변형 뿐만이 아니라 횡수축변형 또한 보강재 수에 비례하여 유발되는데, 이의 발생 방향이 기계적 인장하중의 작용 방향과 반대이므로 보강재 사이의 각변형은 줄어들게 된다.

Table 3 Measured bending deflections

Yes or No of Application of MTM	Plate Thickness (mm)	Stiff. Space (mm)	Frame Space (mm)	Bending Deflection after Completion of Each Work (mm)	
				Plate Fitting	Fillet Welding
No	5	600	2980	0.1	3.6
	5.5			-0.1	3.2
Yes	5	600	2980	0.0	1.6
	5.5			0.1	1.4

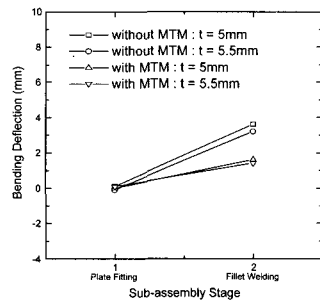


Fig. 9 Average bending deflection according to the plate thickness for deck blocks



- Kim, S.I., Kang, J.K. and Han, J.M., 2002, "Development of welding deformation control method for hull structure of Ro/Ro passenger ferry," Proceedings of ISOPE-2002, pp. 314-320.
- Kumose, T., Yoshida, T., Abe, T. and Onoue, H., 1954, "Prediction of Angular Distortion caused by One-pass Fillet Welding," Welding Journal, Vol. 33, pp. 945-956.
- Lee, S.G., 1992, Modeling of residual stress in thick section weldments, Ph.D. Thesis of the University of Ohio State.



< 김 상 일 >