

박판 평블록 구조의 용접변형 제어법 개발

Development of Welding Deformation Control Method for Thin Panel Block Structure

김 상일^{(1)*}, 조 용관⁽²⁾, 박 상우⁽³⁾

(1) 대우조선공업(주) 시험평가연구팀

(2) 대우조선공업(주) 생산혁신팀

(3) 대우조선공업(주) 품질기획기술팀

1. 서언

1.1 연구 배경

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.

1.2 연구 내용

본 논문에서는 실제 박판 평블록 구조의 조립시에 발생하는 용접변형을 최소화하기 위한 새로운 개념의 변형 제어법으로서 선상가열을 이용한 소성 역변형법과 레버 블록을 이용한 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 판 두께와 정반 조건별로 표준화하였고, 이로부터 보강재 사이의 각변형과 자동 용접부 주위에 고질적으로 발생되어 온 갈매기 형태의 각변형을 현저히 줄일 수 있었다.

본 연구에서는 용접으로 인한 변형을 가능한한 정밀하게 계산하기 위하여 비선형 열전달 및 열변형 해석을 수행하였다. 모든 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고, 비정상 열전달문제를 풀어 온도분포의 시간 이력을 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행하는 2단계 해석법을 적용하였다.

2. 변형 제어법의 적용

본 장에서는 여객선 구조의 평블록 중에서 용접변형이 문제가 되는 대표적인 블록인 갑판 블록을 대상으로 조립 단계에서 발생하는 맞대기와 필릿 용접변형을 효과적으로 제어할 수 있는 최적의 변형 제어법에 대해서 기술하였고, 그 중에서 선상가열을 이용한 소성 역변형법과 레버 블록을 이용한 기계적 인장법에 대해서는 실물 계측 실험을 통해 그 적용 효과를 파악하였다.

2.1 유한요소 모델링

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

해석 순서는 먼저 모델을 만들어 열전달해석을 수행하였고, 그 결과인 온도분포를 하중조건으로 하여 열변형해석을 수행하였다. 열전달해석과 열변형해석의 비연성 가정은 이미 많은 연구를 통하여 그 유효성이 입증되었으므로, 두 가지 현상의 연성 효과를 고려하지 않고 순차적으로 독립적인 두 가지 해석을 수행하였다.

열전달해석시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였으며, 또한 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)의 효과를 고려하였다. 열변형해석시에도 모든 기계적인 재료 특성치들이 온도에 따라 변하도록 모델링하였다. 열전달해석의 경우에는 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대기의 온도는 20℃로 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 수행하였는데, 이때도 용접 현상에 대한 해석과 마찬가지로 열전달해석과 열변형해석이 순차적으로 수행되며, 마찬가지로 재료의 소성 변형과 같은 기계적인 응답이 열전달에 아무런 영향을 미치지 못한다는 가정을 전제로 한다. 다시 말해서, 초기의 모델에 선상가열에 의한 열전달과 용접 현상에 의한 열전달을 순차적으로 수행한 다음, 이를 열탄소성해석의 온도 하중으로 순서대로 읽어들이어 선가열·후용접(pre-heating & post-welding) 해석을 수행하였다.

열탄소성해석시에는 실제 용접 구조물의 맞대기와 필릿 용접이 정반 위에서 이루어진다는 사실에 착안하여, 이를 구현하기 위해 해석 모델의 아래 부분에 Rigid Surface를 이용하여 정반(ground or pin jig)을 모델링하였고, 강제운동(rigid body motion) 방지를 위해서는 해석 모델의 양 끝단을 약한 스프링으로 잡아주었다.

2.2 변형 제어법의 적용 결과

본 절에서는 여객선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 맞대기와 필릿 용접변형을 효과적으로 제어할 수 있는 최적의 변형 제어법에 대해서 기술하였다.

2.2.1 선상가열을 이용한 소성 역변형법

실제 여객선 갑판 블록의 크기는 Table 1에 보여진 바와 같으며, 필릿 용접조건은 Table 2에 열거된 바와 같은 FCAW가 사용되었다. 해석 모델은 기하학적 형상과 온도 분포의 대칭성을 이용하여 대상 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다.

선상가열을 이용한 소성 역변형법이라 함은 필릿 용접 전에 Stiffener Side에서 선상가열을 통해 미리 역변형을 줌으로써 보강재 사이의 각변형을 방지하는 방법을 말한다.

Fig. 1은 Model-D2의 정반 조건에 따른 선가열·후용접법의 적용 효과를 보여 주고 있는데, 여객선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 보강재 사이의 각변형을 최소화하기 위해서는 선상가열을 이용한 소성 역변형법인 선가열·후용접법을 최적의 변형 제어 방안으로 채용하는 것이 생산 기술적인 측면에서 매우 유리하다는 사실을 알 수 있다.

2.2.2 레버 블록을 이용한 기계적 인장법

레버 블록을 이용한 기계적 인장법이라 함은 맞대기 용접 전에 레버 블록을 이용하여 기계적 인장력(mechanical tensioning load)을 가함으로써 자동 용접부 주위에 고질적으로 발생되어 온 갈매기 형태의 각변형을 방지하는 방법을 말한다.

실제 여객선 갑판 블록의 크기와 필릿 용접조건은 2.2.1절의 Table 1과 Table 2에 보여진 바와 같으며, 맞대기 용접조건은 Table 3에 열거된 바와 같다. 해석 모델은 선상가열을 이용한 소성 역변형법의 경우와 마찬가지로 기하학적 형상과 온도 분포의 대칭성을 이용하여 대상 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다.

Fig. 2는 Model-D1의 기계적 인장법 적용 효과를 보여 주고 있는데, 여객선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 자동 용접부 주위의 각변형을 최소화하기 위해서는 레버 블록을 이용한 기계적 인장법을 최적의 변형 제어 방안으로 채용하는 것이 생산 기술적인 측면에서 매우 유리하다는 사실을 알 수 있다.

3. 변형 제어법의 적용 효과

본 장에서는 여객선 갑판 블록의 조립 단계에서 발생하는 대표적인 용접변형인 보강재 사이의 각변형과 자동 용접부 주위의 각변형을 효과적으로 제어할 수 있는 변형 제어법인 선상가열을 이용한 소성 역변형법과 레버 블록을 이용한 기계적 인장법에 대한 실물 적용 실험을 수행하였고, 이에 대한 적용 효과에 대해서도 상세히 기술하였다.

3.1 선상가열을 이용한 소성 역변형법

Fig. 3은 선가열 적용에 따른 판 두께별 굽힘 변형량을 비교한 것인데, 변형의 허용 오차 범위를 고려하더라도 최종적인 변형량이 1mm 이하의 수준이므로 조립 단계에서의 선가열 적용 효과는 상당히 양호하다고 볼 수 있다. 이로부터 선가열·후용접법을 적용하게 되면 판 두께에 상관없이 곡직 작업을

하지 않아도 되는 조건으로 관리할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

3.2 레버 블록을 이용한 기계적 인장법

Fig. 4는 기계적 인장법 적용 여부에 따른 판 두께별 굽힘 변형량을 비교한 것인데, 변형의 허용 오차 범위를 고려하더라도 최종적인 변형량이 2mm 이하의 수준이므로 조립 단계에서의 기계적 인장법 적용 효과는 매우 양호하다고 볼 수 있다. 이로부터 맞대기 용접 전에 기계적 인장법을 적용하면 판 두께 5mm 범위에서는 곡직 작업이 불필요하다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

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

- (1) 여객선 갑판 블록의 변형 제어법에 대한 연구 결과, 조립 단계에서 발생하는 보강재 사이의 각변형과 자동 용접부 주위의 각변형을 최소화하기 위해서는 선상가열을 이용한 소성 역변형법과 레버 블록을 이용한 기계적 인장법을 최적의 변형 제어 방안으로 채용하는 것이 생산 기술적인 측면에서 가장 효과적이라는 사실을 알 수 있다.
- (2) 여객선 갑판 블록의 변형 제어법의 실물 적용 효과에 대한 검토 결과, 선상가열을 이용한 소성 역변형법을 적용하는 경우에는 판 두께와 보강재 간격에 상관없이 곡직 작업을 하지 않아도 되는 조건으로 관리할 수 있으며, 맞대기 용접 전에 레버 블록을 이용한 기계적 인장법을 적용하면 판 두께 5mm 범위에서는 곡직 작업이 불필요하다는 사실을 알 수 있다. 이는 선상가열을 이용한 소성 역변형법과 레버 블록을 이용한 기계적 인장법이 가장 효과적인 변형 제어 방안이라는 사실을 의미한다.

Table 1 Deck models for measurement

Model	Size of Deck		Stiffener Space l_s (mm)	Frame Space l_f (mm)	Supporting Condition
	Plate $L \times B \times t$ (mm)	Stiffener $h \times t_s$ (mm)			
D1	9000 × 5400 × 5	120 × 6	600	2980	Ground / Pin Jig
D2	9000 × 5400 × 7				Ground / Pin Jig
D3	9000 × 5400 × 10				Ground / Pin Jig

Table 2 Fillet welding conditions for deck models

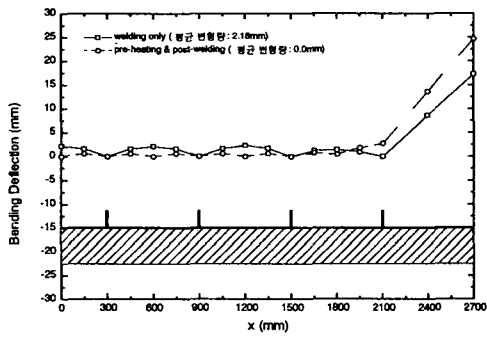
Throat Thickness t_w (mm)	Leg Length f (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Heat Input Q (cal/mm)
3.0	4.0	260	30	16.7	112

Table 3 Butt welding conditions for deck models

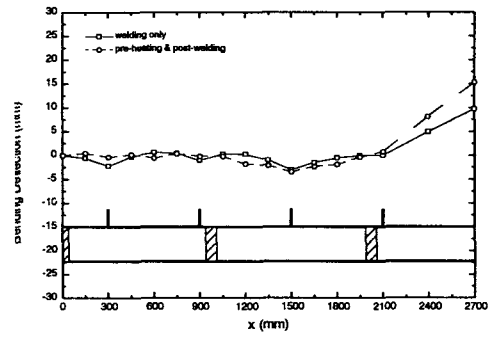
Welding Sequence	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Heat Input Q (cal/mm)
Front	300	31	10.83	206
Back	360	32	12.50	221

Table 3 Butt welding conditions for deck models

Welding Sequence	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Heat Input Q (cal/mm)
Front	300	31	10.83	206
Back	360	32	12.50	221



(a) ground condition



(b) pin jig condition

Fig. 1 Application of plastic counter-deforming method for Model-D2

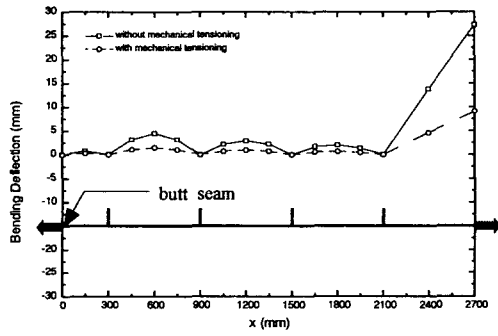


Fig. 2 Effect of application of MM for Model-D1

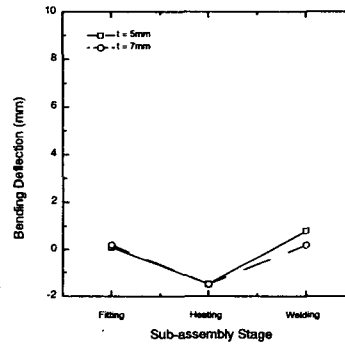
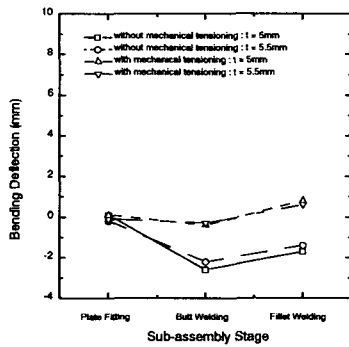
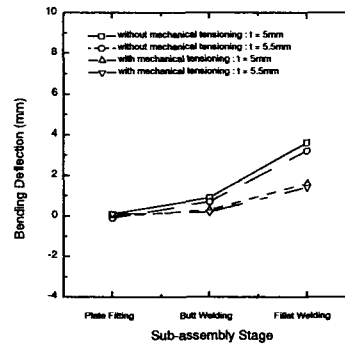


Fig. 3 Bending deflection according to the plate thickness



(a) bending deflection around butt seam



(b) bending deflection between stiffeners

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