

선루 제작시 데크의 전 변형 제어에 관한 연구

김 하 근*·† · 신 상 범* · 김 경 규*

*현대중공업 산업기술연구소

A Study on the Control Technology for Global Distortion of the Deck in the Superstructure during Manufacturing Process

Ha-Geun Kim*·†, Sang-Beom Shin* and Kyung-Gyu Kim*

*Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. Ulsan 682-792, Korea

†Corresponding author : hageun@hhi.co.kr

(Received February 5, 2010 ; Revised March 9, 2010 ; Accepted May 20, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to develop the control technology of global distortion in the deck of superstructures during manufacturing processes. The behavior of global distortion in the deck was evaluated by FEA and verified through comparing with the measured results by 3D measuring instrument. It was seen from the results that the principal factor inducing the global distortion is to be the bending moment associated with the longitudinal shrinkage force and transverse shrinkage caused by welding of stiffeners and flame heating to correct the excessive local out-of-plane distortion. Based on the results, the amount of reverse distortion in the thin deck plate was determined to control the global distortion in the deck plate. The proposed distortion control technology was verified by applying it to the actual structure.

Key Words : Superstructure, Global distortion, Welding, Line heating, Reverse distortion

1. 서 론

군용 함정과 같은 박판 선체의 경우 경량화 및 저중심 설계를 목적으로 선루(superstructure)의 경우 주로 4.5mm ~ 6.0mm의 두께의 박판으로 제작된다. 따라서 일반 상선의 갑판실(deckhouse)에 비하여 변형에 대한 저항성이 매우 낮아 제작 공정에서 각변형(angular distortion)과 좌굴변형(buckling distortion)으로 대별되는 국부 면의 변형(local out-of-plane distortion)¹⁾ 뿐만 아니라 데크(deck) 전체에 걸쳐서 발생하는 전 변형(global distortion)에 대한 문제가 유발된다. 따라서 선루와 같은 박판 선체 구조물의 제작시 효과적인 변형 제어를 위하여 내업 공정에서 판 맞대기 용접 및 거더 및 횡 보강재의 필릿 용접시 용접 수축 하중에 기인하여 발생하는 웨이브(wave)형의 좌굴 변형을 효과적으로 제어하기 위한 기계적 인장법

(mechanical tensioning method)²⁾ 및 에그 크레이터 시공(egg crate construction)과 같은 국부 면의 변형 제어 기법이 보편적으로 적용되고 있다. 기계적 인장법은 용접선 방향으로 외부적인 인장 하중을 주어 판 맞대기 용접부에서 발생하는 국부적인 수축을 제어함으로써 웨이브형의 좌굴변형을 제어하는 방법이다. 그리고 에그 크레이터 시공 방법은 보강재간의 용접을 수행한 후 주판과 보강재의 용접을 행함으로써 거더 및 횡 보강재간의 용접시 발생하는 인장 하중에 의하여 유발되는 주판 데크에서의 압축 하중을 최소화함으로써 웨이브형의 변형 발생을 억제하는 동시에 주판의 각 구속도를 증가시킴으로써 보강재의 용접시 발생하는 각변형이 국부적인 영역에서만 발생되도록 하는 기법이다. 그러나 이러한 국부 변형 제어 방안은 데크에서 발생하는 변형의 크기를 줄이고 변형 양상을 일정하게 함으로써 교정이 용이하도록 하는 방안이다. 따라서 내업 공정이 완료된 후 박판 선체의 경우 각변형에 대한 과다

변형이 필연적으로 수반되므로, 이를 교정하기 위하여 선상 가열과 같은 교정 작업이 수반된다. 그러나 교정 작업 후 탑재된 블록의 데크에서는 보강재가 부착된 방향으로 전 데크가 함몰되는 전 변형 양상이 발생한다. 이에 본 연구에서는 박판 선체 상부 구조물의 제작 공정에서 발생하는 전 변형 거동 특성을 평가하고 이를 제어하기 위한 방안을 제안하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 유한요소 해석과 3차원 계측기를 이용하여 제작 공정별 박판 선체 상부 구조물의 전 변형 거동 특성을 평가하고, 이를 계측 결과와 비교함으로써 타당성을 검증하였다. 그리고 이상의 결과를 토대로 전 변형을 제어하기 위한 역 변형 시공 기준을 제안하고, 이를 실 구조물에 적용함으로써 타당성을 검증하였다.

2. 박판 데크의 제작 공정

Table 1과 Fig. 1은 박판 선체 상부 구조물의 단위 블록 제작시 제작 순서를 나타낸 것이다. Table 1과 같이 박판 선체 상부 구조물의 경우 총 6개의 공정을 거쳐 제작된다. 첫 공정에서 주판의 판 맞대기 및 중

Table 1 Manufacturing sequence & procedure

Sequence	Manufacturing procedure
1 st stage	Butt welding, Fillet welding of the longitudinal stiffeners
2 nd stage	Fillet welding of girder & the transverse stiffeners to deck
3 rd stage	Block-out
4 th stage	Turn over
5 th stage	Flame heating
6 th stage	Erection

보강재 용접(1st stage)을 거쳐 거더 및 횡 보강재, 그리고 프레임(frame)과 외판의 동시 취부 후 필릿 용접(2nd stage)이 적용된다. 여기서, 2nd stage의 용접 순서는 거더 및 횡 보강재간의 용접을 수행한 후 횡 보강재 혹은 프레임, 거더를 주판에 용접하는 에그 크레이터 시공 방법이 적용되었다. 이와 같이 박판 데크의 내업 공정중 에그 크레이터 시공 방법의 적용은 보강재의 용접시 발생하는 각 변형을 국부적인 영역으로 제한함으로써 주판의 웨이브형의 좌굴 변형을 제어함과 동시에 후 공정의 열간 교정량을 줄임으로써 열간 교정시 주판 데크에 작용하는 수축 하중을 최소화하는데 목적이 있다. 그리고 제작된 블록은 내업 반출(3rd stage) 및 턴 오버(turn over)를 거쳐 백 히팅과 같은 열간 교정을 이용한 변형 교정 작업(5th stage) 후 최종적으로 선체에 탑재(6th stage)하게 된다.

3. 전 변형 거동 예측

3.1 유한요소해석 기법

Fig. 2는 박판 선체 블록의 데크에서 전 변형의 거동 특성을 평가하기 위하여 본 논문에서 선정된 대상 블록의 형상 및 기 개발된 간이 열 탄성 해석 기법(STEM, simplified thermo-elastic method)⁴⁻⁵⁾을 이용한 유한요소해석 시 사용된 해석 모델과 요소망을 나타낸 것이다. Fig. 3과 같이 요소망 구성 시 사용된 요소는 4절점 등매개 셸(shell) 요소이며, 해석 모델의 단순화 및 편의성을 위해서 중 보강재 및 거더 그리고, 횡보강재를 제외한 프레임 및 내부 격벽의 경우 보강재가 없는 판 형상으로 모델링하였다. 이는 박판 선체 블록의 각 프레임과 내부 격벽의 경우 보강재가 대부분 높이

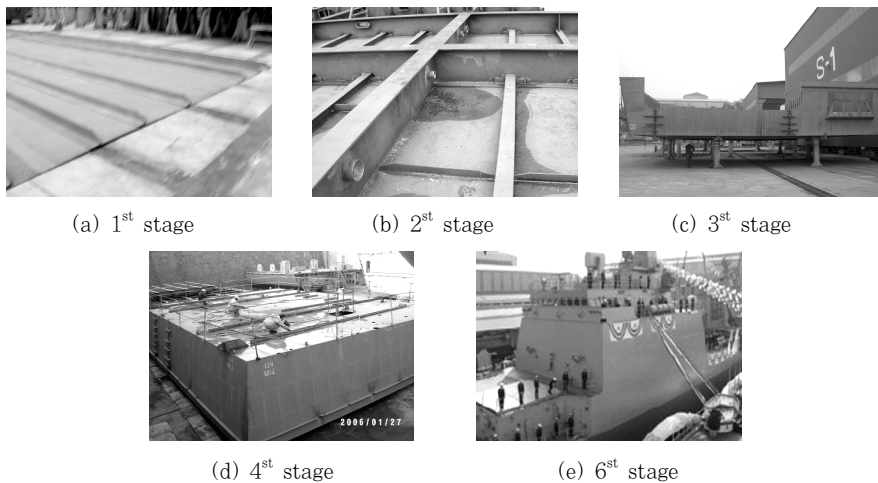


Fig. 1 Manufacturing procedure of the superstructure

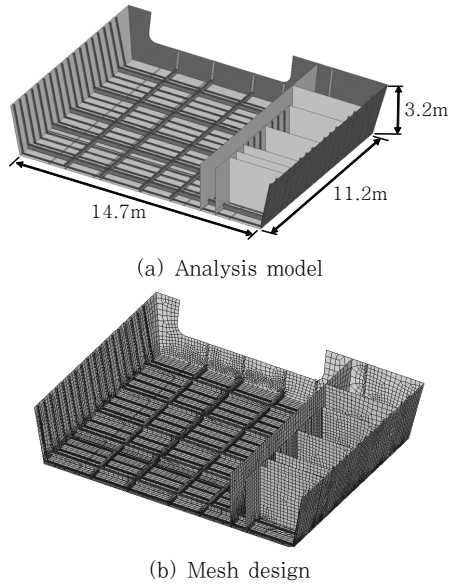


Fig. 2 Analysis model and mesh design used for FEA

Table 2 Variables used for FEA

t [mm]	Dimensions [mm]		Heat intensity [cal/mm]	
	Longi. stiffener	Girder & trans. stiffener	Fillet welding	Flame heating
5.0	75 × 75 × 5/7	300 × 9+ 150 × 12	258	503

방향으로 취부되어 있어 데크의 전 변형에 미치는 영향이 상대적으로 미미하기 때문이다. 그리고 보강재의 필릿 용접 및 화염을 이용한 열간 교정시 횡 수축 및 종 방향의 수축 하중은 기 개발된 단위 용접부의 변형 예측식³⁻⁵⁾을 토대로 등가 하중을 계산하고 이를 하중 경계 조건으로 부여하였다. 대상 블록의 크기는 폭과 길이가 각각 11.2m와 14.7m이며, 높이는 3.2m이다. Table 2는 해석시 사용된 대상 블록의 보강재 치수와 용접 및 교정시 입열 세기를 나타낸 것이다. 이때, 주판 데크의 두께는 5.0mm이며, 블록의 총 중량은 24.6ton이다.

3.2 유한요소해석 결과

본 논문에서는 박판 데크의 제작 공정중 전 변형 유발 주인자를 보강재 용접 및 열간 교정에 의한 횡 및 종 방향의 수축, 그리고 탑재 공정중 자중 처짐으로 규정하고 개별 공정에 대해 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 (a)와 같이 내업 공정에서 주판과 보강재간의 용접이 완료된 후 최대 변형은 데크의 중앙부(B) 인접 영역에서 보강재의 취

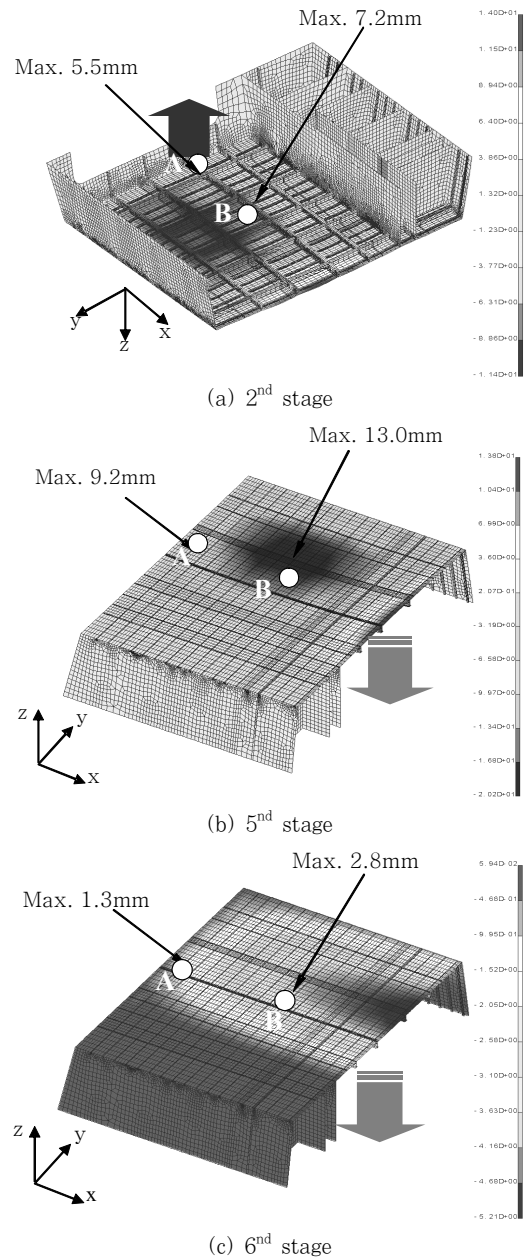


Fig. 3 Contours of global distortion of the deck in the superstructure after 2nd, 5th and 6th fabrication stage

부면으로 데크가 약 11.4mm 용기되는 변형이 발생하고 있다. 그리고 전 데크의 중앙부(B)와 선미부측 외판부의 데크 중앙부(A)에서는 각각 7.2mm와 5.5mm의 변형이 발생하였다. 내업 공정이 완료된 후 반출된 블록에서 화염을 이용한 선상 가열시 데크에서 발생한 최대 전 변형량은 Fig. 3의 (b)와 같이 약 20.2mm이며 “A”와 “B”에서 발생된 변형량은 각각 9.2mm와 13.0mm이다. 따라서 내업 공정 및 교정 공정에서 발생하는 누적 변형량은 최대 31.6mm이며, 관심 영역으로 선정된 데크의 중앙부(B)와 선미 외판부의 데크 중앙부(A)에서 발생하는 변형량은 각각 20.2mm와 14.7mm

Table 3 Predicted results of global distortion

Fabrication procedure	Global distortion [mm]		
	A	B	Locations
2 nd stage	5.5	7.2	
5 th stage	9.2	13	
6 th stage	1.3	2.8	
Residual distortion	16	23	

로 교정 작업 후 상부 구조물의 데크에서는 과다 전 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3의 (c)와 같이 탑재 단계에서 발생하는 변형량은 5.2mm이며 “A”와 “B” 영역에서 발생하는 변형량은 각각 2.8mm와 1.3mm 수준으로 용접 및 교정 영역에서 발생하는 변형량에 비하여 상대적으로 작음을 알 수 있다. Table 3은 박판 선체 상부 구조물에서 전 데크의 중앙부(B)와 선미측 외판 중앙부(A)에서 공정별 전 변형량 및 누적 변형량을 도시한 것이다.

3.3 타당성 평가

유한요소해석을 이용한 박판 선체 상부 구조물 데크의 전 변형 예측 결과의 타당성을 검증하기 위하여 3차원 계측기를 사용하여 유한요소해석 모델과 동일한 상부 구조물의 데크 중앙부에 대하여 제작 공정별 변형 거동 특성을 평가하고 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 여기서, (+)의 변형은 정규 상태에서 데크가 내부재 취부 이면으로 융기하였음을 의미하며, (-)의 변형은 내부재 취부 방향으로 데크가 함몰된 변형 양상을 나타낸다. Fig. 4와 같이 주판과 보강재간의 용접이 완료된 후 데크의 중앙부에서 계측된 변형량은 약 5mm이며 화염에 의한 교정 작업후 변형량은 15mm 그리고 탑재 후 계측된 잔류 변형량은 약 20mm 임을 알 수 있다. 그리고 계측된 변형량은 Table 3의 유한요소해석을 통하여 얻어진 예측된 변형량 23mm와는 약 15% 정도의 오차를 보이고 있다. 유한요소해석 모델의 구성시 각 프레임과 내부 격벽에서의 보강재를 고려하지 않았다는 점을 고려하면 예측 및 계측 결과와 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 수행한 STEM과 유한요소해석을 이용한 선루의 박판 데크에서 전 변형 예측 방법으로 타당함을 의미한다. 이상의 결과를 토대로 본 논문에서는 선루의 박판 데크에서 발생하는 전 변형을 제어하기 위하여 내업 조립 단계에서 데크에 최종 단계에서 유발되는 전 변형과 동일한 크기의 역 변형을 적용하는 것으로 결정하였다. 이때 역 변

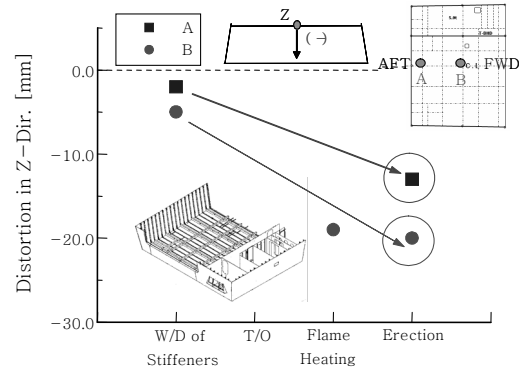


Fig. 4 Changes of the global distortion in the deck of the superstructure by 3D measuring instrument

형 시공량은 유한요소해석 결과를 토대로 결정하였다.

4. 전 변형 제어 방안의 타당성 평가

전 절의 박판 데크 제작시 공정별 전 변형 예측 결과를 토대로 데크의 선정된 역 변형 시공을 위하여 Table 4와 같이 내업 공정중 선미(AFT)측 외판 중앙부에 기 설계된 판 맞대기 용접부와 선폭 방향의 가장 자리에 핀 지그(pin jig)를 이용하여 블록의 중량을 지지토록 함으로써 데크 중앙부가 자중에 의하여 탄성 처짐이 발생하도록 하였다. 이때, 가장 자리의 핀 지그를 제외한 중앙부의 핀 지그는 Table 4와 같이 주판 데크가 적정 역 변형량에 준하는 캠버를 가지도록 초기 높이를 조정하여 셋팅하였다. 여기서 박판 데크의 전 변형 예측 기법을 통하여 “A”와 “B” 위치에서 설계된 역 변형량은 각각 16mm와 23mm이며, 실 구조물의 제작시 적용된 데크의 역 변형량은 17mm와 22mm이다.

Table 4 The amounts of reverse distortion for the deck of actual superstructure

Reverse distortion [mm]			Position
Type	A	B	
Design	16.0	23.0	
Actual	17.0	22.0	

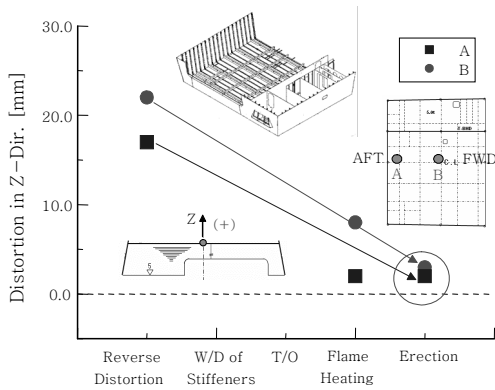


Fig. 5 Changes of global distortion in the deck of actual superstructure after the application of reverse distortion

Fig. 5는 내업 공정중 역 변형 시공을 통하여 박판 선체 블록의 제작시 공정별 데크의 전 변형 천이 거동을 3차원 변형 계측기를 이용하여 계측하고 그 결과를 도시한 것이다. Fig. 5와 같이 데크의 “A” 와 “B” 위치에서 탑재 후 최종 전 변형량은 각각 약 2mm 와 3mm 수준으로 탑재 후 데크 레벨의 변형 관리 기준인 ±5.0mm를 매우 잘 만족하고 있음을 알 수 있다. 이는 박판 선체 블록의 제작시 박판 데크의 전 변형을 효과적으로 제어하기 위하여 본 연구에서 제안한 역 변형 시공 방안이 타당함을 의미한다.

5. 결 론

박판 선체 상부 구조물의 제작시 제작 공정에 따른 박판 데크의 전 변형을 유한요소해석 및 실험을 통해 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 박판 선체 블록의 탑재 후 건조 공정 중 데크의 중앙부가 함몰하는 과도한 전 변형 양상은 단위 블록의 완성 단계 시점에서 중립축의 위치가 블록의 높이 방향으로 이동함으로써 거더 및 횡 보강재의 필릿 용접과 열간 교정시 주판 데크에 작용하는 횡 수축 및 종 방향의 수축 하중에 따른 굽힘 모멘트의 증가에 기인하다.
- 2) 박판 선체 데크의 구조 특성 및 작업 조건을 고려하여 제작 공정별 데크의 전 변형량을 유한요소해석과 3차원 계측 결과를 이용하여 예측하고 이를 토대로 박판 데크의 전 변형 제어를 위한 역 변형 시공량을 제안하였다.
- 3) 제안된 역 변형 시공 방안을 박판 데크에 적용한 결과 데크 레벨에 대한 전 변형량은 관리 기준을 만족하였다.

참 고 문 헌

1. Koichi Masubuchi : Analysis of Welded Structure, Pergamon Press (1980)
2. Terai, K. et. al. : Study on Prevention on Welding Deformation in Thin-skin Plate Structures, Kawasaki Technical Report, No. 61, 61-66 (1978)
3. Dong Ju Lee, Sang Beom Shin, Kyung Gyu Kim and Joong Geun Yoon : Evaluation Transitional Behavior of Welding Distortion at the Deckhouse during the Manufacturing Process, the 14th ICCTW proceedings (2004)
4. Yun Ki Park, Sang Beom Shin and Dong Ju Lee : A study on the Welding Deformation of Ship Structure using Simplified Thermo-elastic Analysis, Proceeding of 2001 Spring Annual Meeting of KWS, 274-276 (2001) (in Korean)
5. Dong Ju Lee, Sang Beom Shin and Kyung Gyu Kim : Control Technology for Global Bending Distortion of Hatch-cover in Container Carrier during Fabrication Process, the 7th ISOPE proceedings (2007)