

컨테이너 운반선 해치-커버 제작시 전 굽힘 변형 거동에 관한 연구

이 동 주*[†] · 김 경 규* · 신 상 범*

*현대중공업 산업기술연구소

Behavior of Global Bending Distortion of Hatch-cover in Container Carrier during Fabrication Process

Dong-Ju Lee*[†], Gyung-Gyu Kim* and Sang-Beom Shin*

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

[†]Corresponding author : djlee11@hhi.co.kr

(Received January 27, 2010 ; Revised March 2, 2010 ; Accepted March 19, 2010)

Abstract

The purpose of this study is to establish the control method of the global bending distortion caused by fabrication process of hatch-cover in a container ship. In order to do it, the transitional behavior of global bending distortion in the deck of hatch-cover during fabrication process was measured by 3-dimensional measuring instrument. From the results, the principal factor controlling the global bending distortion was identified as the bending moment associated with the longitudinal shrinkage force and transverse shrinkage caused by welding and flame heating and the change of the centroid axis of hatch-cover in each fabrication process. Therefore, in this study, with the predictive equations of the longitudinal shrinkage force and transverse shrinkage caused by welding and flame heating and the simplified thermo elastic method, the predictive method for the global bending distortion was established and verified by comparing with the measured result. Based on the results, the amount of reverse bending distortion of main stiffeners was determined to prevent the global bending distortion of hatch-cover.

Key Words : Welding distortion, Global bending distortion, Welding, Flame heating, Shrinkage, Finite element method(FEM)

1. 서 론

컨테이너 운반선 화물창의 해치 커버(hatch cover)는 상부에 최대 35TEU의 컨테이너가 적재되기 때문에 높은 구조 강도가 요구되지만 컨테이너 하역 크레인의 용량을 고려하여 중량이 45톤 이하로 제한된다. 따라서 제한된 중량으로 높은 구조 강도를 확보하기 위해 해치 커버는 대부분 8mm 두께의 주판에 다수의 종 및 횡 보강재를 용접하여 제작한다. 일반적으로 해치 커버와 같은 박판 판넬(panel) 용접 구조물 제작시 제작 공정 동안 발생하는 압축 하중에 의해 종 및 횡 보강재 사이의 주판 또는 주판의 끝단부를 따라 발생하는 좌굴 변

형¹⁻²⁾이 정도 관리 측면에서 가장 난해한 문제라 할 수 있다. 그러나 해치 커버의 경우 사용 환경 및 설계 조건을 고려할 때 좌굴 변형을 허용하지 않기 때문에 이를 방지하기 위하여 에그 크레이터 (egg crate) 기법³⁾을 적용하여 제작한다. 판넬 구조물 제작시 에그 크레이터 제작 기법은 종 및 횡 보강재를 한꺼번에 조립하여 주판에 탑재하고 용접을 하기 때문에 종 및 횡 보강재로 구분되는 주판 영역의 형상 비 개선과 더불어 구속도를 증가시킴으로써 좌굴 변형 제어에 상당한 효과를 가진다. 그러나 주판에서 발생하는 각변형은 제어할 수 없기 때문에 각변형을 교정하기 위해서 교정 작업이 반드시 수행되어야 한다. 이러한 일련의 용접 및 교정 공정은 해치 커버에 종 및 횡 방향 수축을 필연적으로

유발시키는데, 이는 각 제작 공정에서의 용접 및 가열부와 해치 커버의 도심과의 거리 차이로 인해 굽힘 모멘트(bending moment)를 유발 시킴으로써 전 굽힘 변형(global bending distortion)의 원인으로 작용한다. 해치 커버의 경우 구조적 특성상 제작 공정중에 발생하는 굽힘 모멘트의 크기에 비해 구조적 강성이 상대적으로 작아 전 굽힘 변형이 주요 문제가 되고 있다. 특히, 전 굽힘 변형의 경우 제작 공정에서 유발된 수축 하중과 용접부와 구조물의 도심과의 차이에 의해 발생하므로, 각 제작 공정에서 구조 강성의 변화와 입열량에 따라 변형량 및 변형 모드가 급격하게 천이되어 정도 기준을 만족시키기 위해 상당한 노력이 요구되기 때문에 제작시 발생하는 전 굽힘 변형을 효과적으로 제어하기 위한 방안이 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 컨테이너 해치 커버에 굽힘 모멘트를 유발하는 주요 인자인 용접 및 가열에 의해 발생하는 종 방향 수축 하중과 횡 수축 변형을 유한요소 해석과 실험을 통해 평가하고 이를 정식화하였으며, 해치 커버의 제작 공정별 전 굽힘 변형 거동 양상을 공정별 변형 계측을 통해 평가함으로써 전 굽힘 변형을 유발하는 주요 인자와 공정을 규명하였다. 그리고 종 및 횡 수축 예측 기법과 간이 열 탄성 해석 기법을 이용하여 실제 해치 커버 제작시 발생하는 전 굽힘 변형을 예측하고 이를 계측 결과와 비교 평가함으로써 제작 공정별 전 굽힘 변형의 예측 기법을 마련하였으며, 이를 토

대로 컨테이너 운반선 해치 커버 제작시 발생하는 전 굽힘 변형의 제어 기법을 제안하였다.

2. 해치 커버 제작 공정별 변형 특성

2.1 제작 공정

Fig. 1과 Table 1은 해치 커버의 제작 공정 및 공정별 작업 특성을 나타낸 것이다. Fig. 1과 Table 1과 같이 해치 커버 제작 공정은 주판과 보강재간 취부(fit-up) 공정(a), 주판과 보강재 간 FCA(flux cored arc) 필릿 용접(b), 보강재 간 FCA 용접(c), 다운 히

Table 1 Fabrication sequence and process of the hatch-cover

Seq.	Fabrication stage
1 st	Fit up of all stiffeners to deck plate
2 nd	Fillet welding between deck plate and stiffeners (FCA)
3 rd	FCA butt welding between primary stiffeners in 'MG'
4 th	Down heating of 'W' stiffener using flame heating
5 th	FCA fillet and SA butt welding for bottom plate
6 th	Flame straightening of deck plate

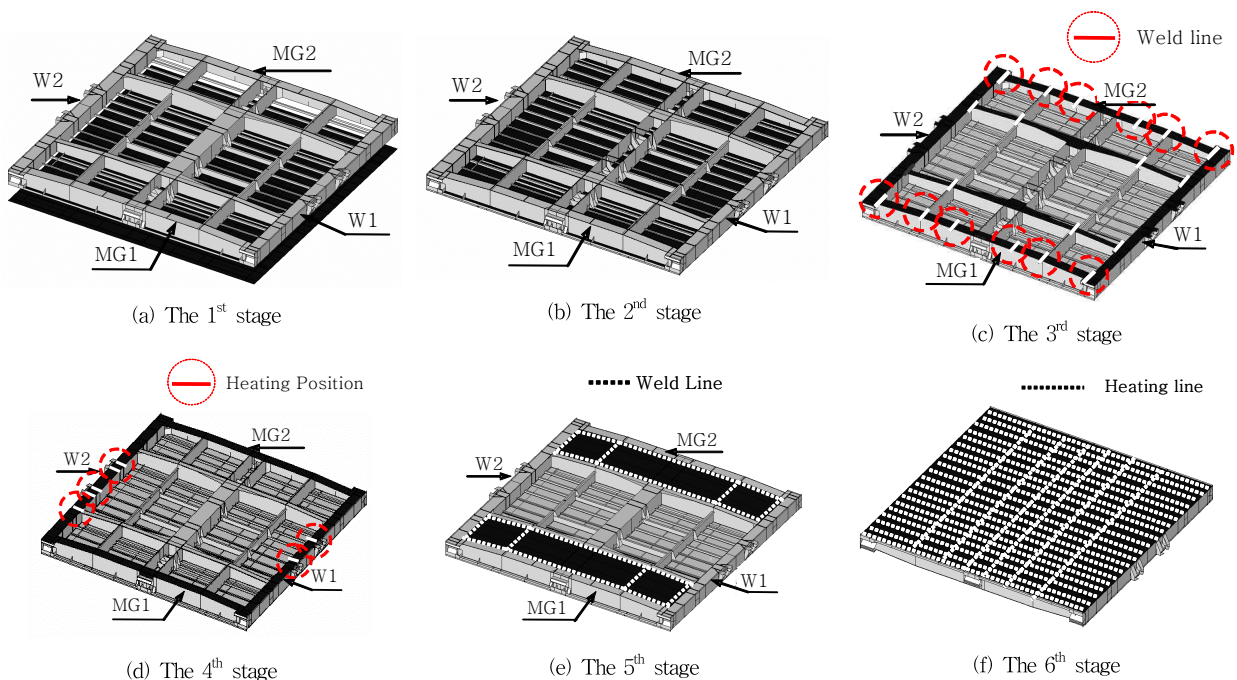


Fig. 1 Fabrication sequence of hatch cover

팅(down heating) 공정(d), 하부 판 용접(e) 그리고 턴 오버(turn-over) 후 화염 가열을 통한 최종 교정 작업(f)으로 총 6개의 공정으로 이루어져 있다. 여기서 Fig. 1 (d)의 다운 히팅 공정은 전 굽힘 변형을 교정하기 위한 부가적인 공정으로 'W' 보강재의 플랜지 부분을 화염을 이용하여 가열하는 공정이다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 Table 1의 각 제작 공정 및 작업 특성에 따른 전 굽힘 변형 거동 특성을 공정별 변형 계측 및 유한요소 해석을 통해 평가하였다.

2.2 제작 공정별 변형 계측 결과

해치 커버의 제작 공정별 전 굽힘 변형 양상을 3차원 변형 계측기를 이용하여 계측하였다. 변형 계측 지점은 Fig. 1에 도시한 해치 커버 외곽의 "MG2"와 "W2" 보강재 상부이다. Fig. 2는 해치 커버 제작 공정중 주판과 보강재간 필릿 용접(2nd 공정), 다운 히팅(4th 공정) 그리고 마지막 교정 공정 후에 'MG2'와 'W2' 보강재

상부에서 계측된 전 굽힘 변형 양상을 도시한 것이다. 여기서 (+) 변형은 주판의 보강재 취부 방향으로 용기된 변형을 나타내며, (-) 변형은 보강재 취부 이면 방향으로 발생한 변형이다. Fig. 2와 같이 'MG2'와 'W2' 보강재 모두 주판과 보강재 필릿 용접 공정인 두 번째 공정과 두 번째 공정에서 발생한 각변형을 교정하기 위한 여섯 번째 공정 이후에 (+) 방향의 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 전 굽힘 변형을 교정하기 위한 네 번째 공정인 다운 히팅 공정 이후에는 (-) 방향의 굽힘 변형이 발생하고 있다. 이는 각 공정에서 유발된 수축 하중 및 횡 수축과 해치 커버의 도심과의 차이에 기인하여 발생하는 굽힘 모멘트의 방향이 상이하기 때문이다. 즉, Fig. 1의 (b), (f)와 같이 주판에 입열이 가해진 경우의 제작 공정에서의 굽힘 모멘트는 (+)방향의 변형을 유발하지만, Fig. 1의 (c) ~ (e)와 같이 해치 커버의 도심을 기준으로 주판과 반대 편에 위치한 'W' 및 'MG' 보강재에 입열을 가하는 용접 및 교정 작업은 (-) 방향의 변형을 유발한다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 방법 및 절차

3.1.1 단위 용접 및 교정부의 역학 특성

공정별 변형 계측 결과로부터 해치 커버 제작시 발생하는 전 굽힘 변형을 유발하는 주요 인자는 각 공정에서 발생하는 횡 수축과 종 수축 하중이 용접 및 교정부와 해치 커버의 도심과의 차이로 인해 유발시키는 굽힘 모멘트임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 단위 시편에 대하여 유한 요소 해석 및 실험을 수행하여 해치 커버 제작시 용접 및 교정부에서 발생하는 횡 수축 및 종 수축 하중을 평가하였다. 단위 시편에 대한 유한요소해석은 비선형 과도 열 전달 해석 및 열 탄소성 해석을 수행하였다. 열 분포 해석 시 입열 모델은 균일 체적 열원 (volume heat source)을 사용하였으며, 준정상 상태 조건 (quasi-steady state condition)으로 가정하여 2차원 열 전달 해석을 수행하였다. 또한 열 분포 해석 시 용접부에서의 상 변화 및 용융지 내에서의 stirring 효과 등 용융지 내의 물리적 특성은 대한 용접 접합 학회의 강도 위원회에서 제정한 프로토콜⁴⁾에 준하여 해석을 수행하였다. 변형 및 잔류 응력 해석을 위한 열 탄소성 해석시 사용된 모재는 일반 선급용 A grade 강재이며, 열적 기계적 물성은 등방성으로 온도에 의존하는 것으로 가정하였으며, 항복 개시 조건으로 Von-mises 조건을 적용하였다. Table 2는 본 연구에서 수행된 단위 용접 및 교정부 특성 평가를 위해 사용

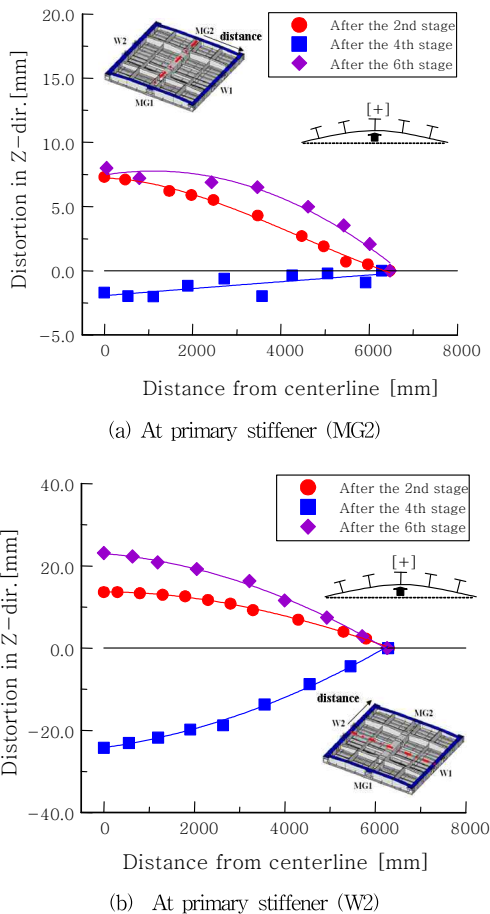


Fig. 2 Measured results of the global bending distortion after each fabrication stage of hatch-cover

Table 2 Welding and flame heating conditions used for FEA

		Heat intensity (cal/mm)		
Fillet		463~3250		
Butt	Backing	346~864		
	Finishing	367~864		
Flame straightening		Flow Rate (L/min)		Speed (mm/min)
		LNG	O ₂	
		11~12	12~14	

된 용접 및 교정 조건을 나타낸 것이다.

3.1.2 해치 커버 제작 공정별 변형

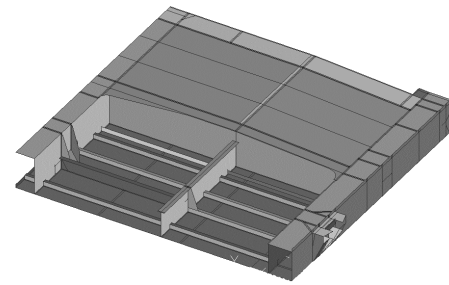
단위 용접 및 교정부에 대한 탄 소성 유한 요소해석 결과를 토대로 실제 해치 커버에 대한 공정 별 전 굽힘 변형 거동 특성을 저자들이 개발한 간이 열탄성 해석 기법(STEM, Simplified Thermo Elastic Method)⁵⁾을 이용하여 평가 하였다. 여기서 STEM은 단위 용접부의 역학적 특성 즉, 고유 변형도를 유효 열 하중으로 증가하여 대형 실 구조물의 용접 변형을 해석 하기 위한 유한요소해석 기법으로 실 구조물을 쉘(shell) 요소로 모델링 하고 일정 폭을 가지는 용접부의 상·하부 면에 다른 온도 구배를 부여하여 단위 용접부의 역학 특성을 실 구조물의 용접부에 사상함으로써 실 구조물의 용접 변형을 평가하는 방법이다. Fig. 3은 해치 커버 제작 공정별 전 굽힘 변형 평가를 위해 사용된 유한 요소 해석 모델과 유한 요소망을 도시한 것이다. Fig. 3 (b)와 같이 해석 모델의 유한 요소망은 4절점 등 매개 쉘 요소를 이용하여 구성하였으며, 해치 커버의 기하학적 대칭성을 고려하여 해석 모델의 1/4에 대해서만 요소망을 구성하였다. 해석시 Fig. 3 (b)와 같이 해석 모델의 대칭 면에는 대칭 조건을 부여하였으며 제작시 정반 조건을 고려하기 위해 접촉 조건을 부여하여 해석을 수행하였다.

이때 사용된 해치 커버의 주요 부재의 치수는 Table 3과 같다. Table 4는 해치 커버 제작 공정별 굽힘 변형 특성 평가를 위해 사용된 유한요소해석 조건으로 각 공정 에서의 입열량을 나타낸 것이다.

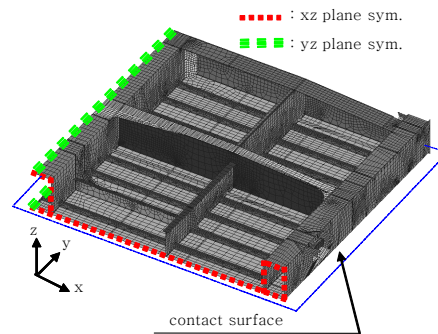
Table 4 Heat intensity in each fabrication stage of the hatch-cover

Fabrication Seq.	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th
Heat intensity [cal/mm]	225/328 (S/P)*	491/pass	12,374	455/741 (FC/SA)	510

* P : primary stiffener, S : secondary stiffener



(a) Analysis model



(b) Mesh design and boundary condition

Fig. 3 FE analysis model and condition

Table 3 Dimensions of the structural members of hatch-cover

Item	Dimension [mm]
Deck plate	12900×12500×8
Primary stiffener	860×8+80×8, 600×6+150×20
Secondary stiffener	100×75×7, 300×90×11/16

3.2 유한요소해석 결과 및 고찰

3.2.1 단위 용접 및 가열부 특성

I-butt SA 용접부 Fig. 4는 I-butt SA 용접시 유입되는 용접 입열량(Q₀) 및 면내 강성(D_i)의 비와 횡 수축량(δ_{TB})의 관계를 도시한 것이다. 그림과 같이 I-butt 용접부의 횡 수축량은 용접부의 입열량과 면내 강성의 비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 유한 요소해석 결과와 시험 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 I-butt SA 용접시 발생하는 횡 수축 예측 식은 식 (1)과 같이 유입된 총 용접 입열량에 대한 면

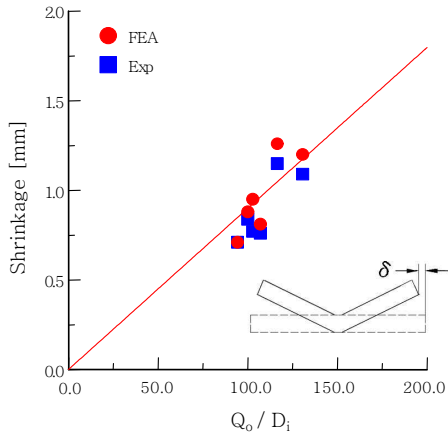


Fig. 4 Variation of transverse shrinkage with Q_0/D_i in the I-butt SA weldment

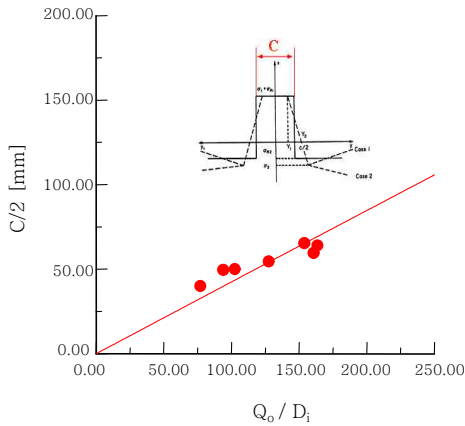


Fig. 5 Variation of the tensile residual stress zone with Q_0/D_i in the I-butt weldment

내 강성 비의 선형 함수로 정의할 수 있다.

Fig. 5는 I-butt SA 용접부의 입열량(Q_0)에 대한 면내 강성(D_i)의 비에 따른 유효 인장 잔류 응력 폭(C)의 변화를 도시한 것이다. 여기서 C는 I-butt SA 용접부에서 종수축 하중을 유발시키는 항복 응력 수준의 종 방향 인장 잔류 응력이 존재하는 영역의 폭을 나타낸다. Fig. 5와 같이 용접부의 입열량에 대한 면내 강성의 비가 증가함에 따라 유효 인장 잔류 응력 폭(C)도 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 본 고에서는 I-butt SA 용접부에 발생하는 종수축 하중(SF_{LB})을 식 (2)와 같이 입열량의 함수로 정식화하였다.

$$\delta_{TB} = f\left(\frac{Q_0}{D_i}\right) \tag{1}$$

$$SF_{LB} = f(Q_0) \tag{2}$$

FCA 필릿 용접부 Fig. 6은 FCA 필릿 용접부의 횡 수축량(δ_{TF})과 입열량(Q_0)에 대한 면내 강성 (D_i)의 비의 관계를 도시한 것이다. Fig. 6과 같이 FCA 필릿 용접부에 발생하는 횡 수축 역시 입열량에 대한 면내 강성의 비가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

Fig. 7은 필릿 용접부에 발생하는 종 수축 하중(SF_{LF})에 용접부 입열량(Q_0)과 주판 두께 (t)가 미치는 영향을 도시한 것이다. Fig. 7과 같이 FCA 필릿 용접부에 발생하는 종수축 하중은 입열량과 주판 두께가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 용접부 입열량과 주판 두께가 증가함에 따라 용접부의 불 균일한 온도 구배에 의한 소성 역(plastic zone)의 증가에 기인하는 결과이다. 그러나 Fig. 7과 같이 주판의 두께가 10mm 이상이 되는 경우 종 수축 하중의 증가율은 급격하게 감소함을 알 수 있다.

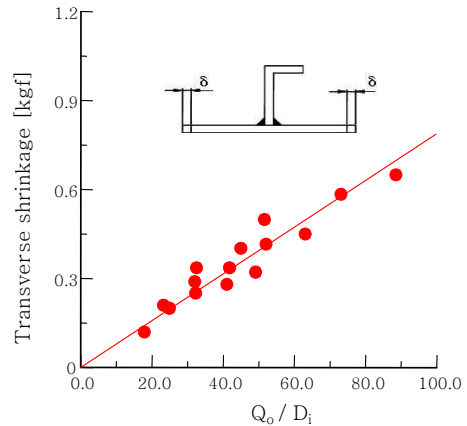


Fig. 6 Variation of the transverse shrinkage with the ratio of heat intensity(Q_0) to in-plane rigidity(D_i) in the FCA fillet weldment

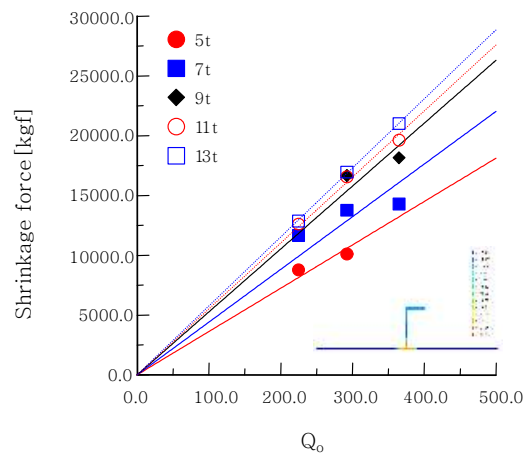


Fig. 7 Variation of the longitudinal shrinkage force with the heat intensity (Q_0) and plate thickness (t) in the fillet weldment

이상의 결과를 토대로 본 연구에서는 FCA 필릿 용접부의 횡 수축(δ_{TF}) 및 종 수축 하중 (SF_{LF})을 식 (3)과 (4)와 같이 각각 입열량에 대한 면내 강성의 비 그리고 입열량과 주판 두께의 함수로 정의하였다.

$$\delta_{TF} = f\left(\frac{Q_o}{D_i}\right) \quad (3)$$

$$SF_{LF} = f(Q_o, t) \quad (4)$$

화염 가열부 Fig. 8은 화염 가열을 통한 교정 작업시 발생하는 횡 수축 변형(δ_{TH})과 화염에 의한 입열량(Q_H)에 대한 가열부의 면내 강성(D_i)의 비의 관계를 도시한 것이다. Fig. 8과 같이 화염 가열을 통한 교정부의 횡 수축은 입열량에 대한 면내 강성의 비가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 식 (5)와 같이 각 변형의 교정부에서 발생하는 횡 수축을 입열량에 대한 면내 강성 비의 함수로 정식화 할 수 있음을 의미한다.

Fig. 9는 가열부 입열량(Q_H)과 주판 두께(t)에 따른 주판의 각 변형 교정부에서 발생하는 종 수축 하중 (SF_{LH})의 변화를 타나 낸 것이다. Fig. 9와 같이 입열량과 두께의 함수가 가열부에 발생하는 종 수축 하중과 선형 관계가 있음을 알 수 있다. 이로부터 화염 가열을 통한 각 변형 교정부에서 발생하는 종 수축 하중은 식 (6)과 같이 입열량과 가열부 두께의 함수로 정의할 수 있다.

$$\delta_{TH} = f\left(\frac{Q_H}{D_i}\right) \quad (5)$$

$$SF_{LH} = f(Q_H, t) \quad (6)$$

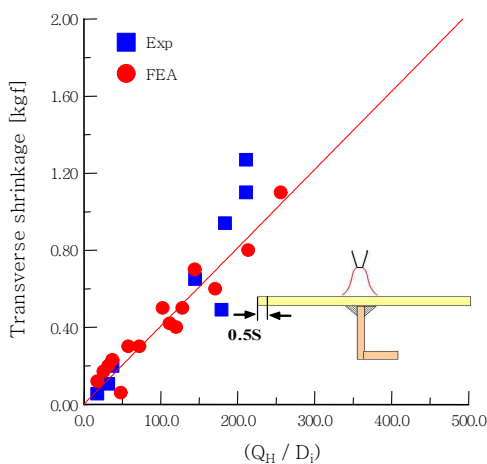


Fig. 8 Variation of the transverse shrinkage with Q_H/D_i in the fillet weldment caused by correction work

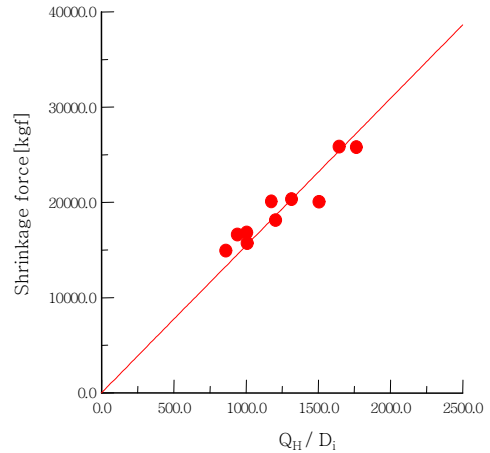


Fig. 9 Variation of the longitudinal shrinkage force with the function of Q_H and t in the fillet weldment

3.2.2 공정별 전 굽힘 변형 해석 결과

Fig. 10은 실제 해치 커버 모델에 대하여 STEM을 통해 평가된 해석 결과로 두 번째, 네 번째 그리고 여섯 번째 공정에서 발생하는 전 굽힘 변형 분포를 도시한 것이다. Fig. 10 (a)와 같이 보강재와 주판과의 필릿 용접 공정인 두 번째 공정에서 전 굽힘 변형은 (+) 방향으로 발생하고 있으며, 해치 커버 외곽의 종 방향 보강재인 ‘MG’ 보강재에 비해 횡 방향의 ‘W’ 보강재에서 더 큰 굽힘 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 두 번째 공정의 경우 종 수축 하중에 비해 횡 수축에 의해 발생한 굽힘 모멘트가 더 크다는 것을 의미한다. 네 번째 공정인 다운 히팅 공정의 경우 Fig. 10 (b)와 같이 변형 양상은 (-) 방향으로 바뀌며 최대 전 굽힘 변형은 ‘W’ 보강재에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 1 (d)에 도시한 바와 같이 다운 히팅 공정이 ‘W’ 보강재 상부에 국부적으로 수행되기 때문이다. 주판에 발생한 국부적인 각 변형을 교정하기 위한 여섯 번째 공정의 경우 가열 위치가 두 번째 공정과 동일하기 때문에 Fig. 10 (c)와 같이 두 번째 공정에서의 전 굽힘 변형과 유사한 양상의 전 굽힘 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10에 도시한 각 공정에서의 유한 요소해석 결과와 실제 계측을 통해 평가된 전 굽힘 변형을 비교하여 도시한 것이다. Fig. 11 (a)와 같이 두 번째 공정에서 해치 커버 외곽의 ‘W’ 및 ‘MG’ 보강재에서 발생하는 최대 전 굽힘 변형은 유한요소해석 결과와 실험 결과가 유사하며 각각 약 15.0mm와 7.0mm이다. 네 번째 공정의 경우 Fig. 1 (d)와 같이 ‘W’ 보강재 상부의 다운 히팅 개소를 5 곳 적용한 경우와 2 곳 적용한 경우를 비교하였다. 최대 전 굽힘 변형의 경우 Fig. 11 (b)와 같이 유한요소해석 결과와 계측 결과

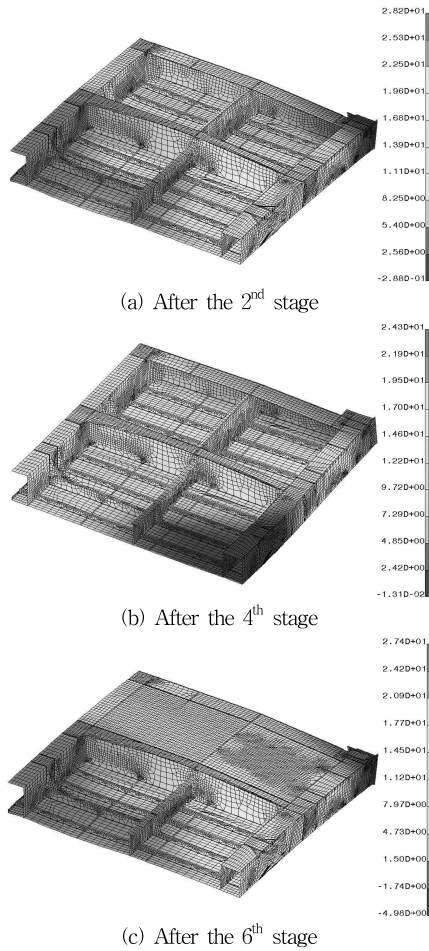


Fig. 10 Contour of the global bending distortion in the hatch-cover after the 2nd, the 4th and the 6th fabrication stage

모두 5 곳을 가열한 경우에는 약 -25.0mm의 변형이 발생하였으며, 2 곳을 가열한 경우에는 약 -10.0mm의 최대 변형이 발생하였다. 따라서 Table 4의 입열 조건으로 전 굽힘 변형을 교정하기 위해 다운 히팅을 수행하는 경우 1 곳 가열시 평균적으로 약 -5.0mm의 전 굽힘 변형이 유발됨을 알 수 있다. 각 변형 교정 공정인 여섯 번째 공정의 경우 역시 실험 결과와 유한요소 해석 결과는 잘 일치 하고 있으며 변형 유발 양상 역시 두 번째 공정과 유사함을 알 수 있다.

이상의 결과와 같이 유한 요소 해석을 통해 예측된 전 굽힘 변형의 양상과 값이 실측된 결과와 잘 일치한다. 이는 해치 커버의 제작 공정별 전 굽힘 변형을 예측하기 위해 본 연구에서 적용된 유한요소해석 기법이 타당함을 의미한다. 따라서 Fig. 11에 나타내지 않은 공정인 'MG' 보강재간 용접인 세 번째 공정과 하부 판 용접 공정인 다섯 번째 공정에 대하여도 동일한 해석 기법을 적용하여 전 굽힘 변형 거동을 예측하고, 이를 토대로 최종 단계에서 해치 커버에 잔류하는 전 굽힘

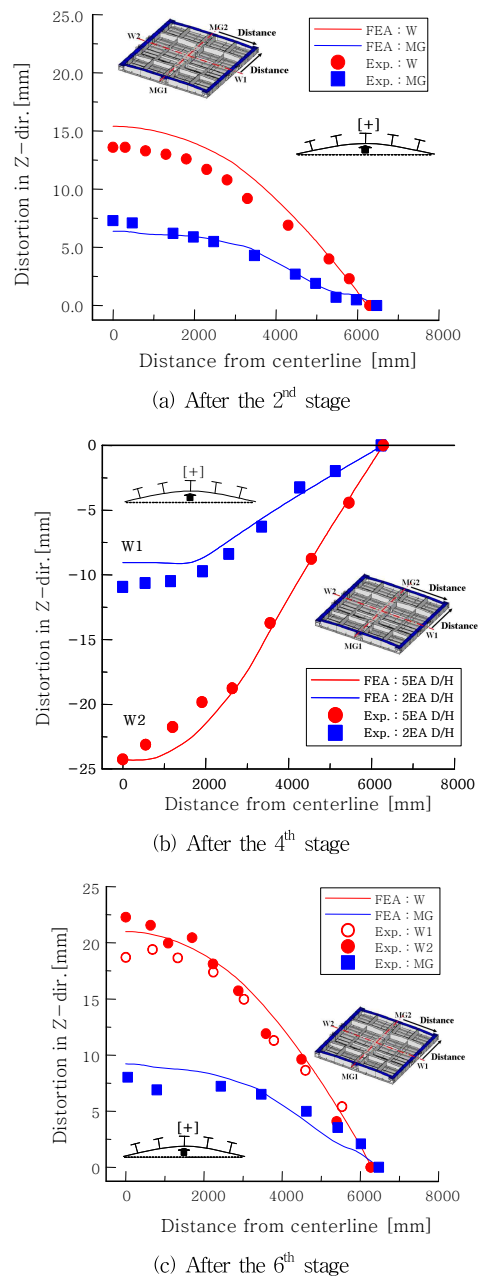


Fig. 11 Comparison results of the bending distortion obtained by FEA and experiment after each fabrication stage

변형량을 평가하였다.

4. 전 굽힘 변형 제어 방안

Fig. 12는 해치 커버 제작시 각 공정에서 'W'와 'MG' 보강재에 발생하는 최대 굽힘 변형량의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 12와 같이 최종 공정에서 잔류하는 전 굽힘 변형이 'W' 보강재에서는 5.0mm가 (+) 방향으로 발생하며, 'MG' 보강재의 경우 (-) 방향으로 4.0mm 발생한다. 이상의 결과로부터 Table 4의 작업

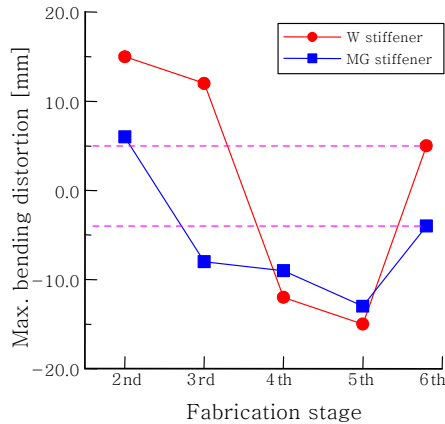


Fig. 12 Change of the global bending distortion in the primary stiffeners during fabrication process

조건으로 컨테이너 운반선의 해치 커버를 제작하는 경우 전 굽힘 변형을 효과적으로 제어하기 위해서는 'W' 보강재는 -5.0mm , 'MG' 보강재는 $+4.0\text{mm}$ 의 역변형을 시공해야 함을 알 수 있다.

5. 결 론

컨테이너 운반선 해치 커버 제작시 발생하는 전 굽힘 변형의 제어 기법을 마련하기 위해 각 제작 공정에서 발생하는 굽힘 변형 거동을 제작 공정별 변형 계측과 유한요소해석을 통해 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접 및 가열에 의해 용접부에 발생하는 종 수축 하중의 경우 용접부로 유입된 입열량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하며, 횡 수축은 유입된 입열량과 면내 강성의 비와 상관 관계가 있다. 따라서 종 수축 하중의 예측 기법은 입열량 그리고 횡 수축은 입열량과 면내 강성 비에 대한 선형 함수로 정식화하였다.

2) 해치 커버 제작시 전 굽힘 변형을 유발하는 주요

인자는 굽힘 모멘트이며, 이러한 굽힘 모멘트는 각 공정에서 유발된 종 및 횡 수축량과 용접 및 가열부와 해치 커버의 도심과의 거리 차이에 의해 결정되기 때문에 각 공정에서 발생하는 해치 커버의 전 굽힘 변형은 종 및 횡 방향으로 상이한 분포를 가진다.

3) 단위 용접부의 종 및 횡 수축 예측 기법과 간이 열 탄성 해석 기법을 통하여 해치 커버 실 구조물의 전 굽힘 변형 해석 기법을 제안하였으며, 제안된 해석 기법을 통해 평가된 해치 커버의 제작 공정별 전 굽힘 변형 거동이 계측 결과와 잘 일치하였다.

4) 제안된 해석 기법을 통해 평가된 각 제작 공정별 변형 거동 예측 결과를 통하여 컨테이너 운반선 해치 커버에 제작 완료 후 잔류하는 굽힘 변형을 제어하기 위한 프리 벤딩(pre bending) 기법을 제안하고 이를 위한 적정 역 변형량을 산출하였다.

참 고 문 헌

1. Koichi Masubuchi : Analysis of Welded Structure, Pergamon Press, 1980, 300-310
2. Dong Ju Lee, Sang Beom Shin and Kyung Gyu Kim : A Study on the Distortion Behavior of Hatch Cover during the Manufacturing Process, Proceeding of 2006 Spring Annual Meeting of KWJS, 86-88 (in Korean)
3. James R. Dydo, Harvey R. Castner and Kyle Koppenhoefer : Guideline for Control of Distortion in Thin Ship Structures, Report of EWI Project, 1999
4. Commission of Design, Analyses and Structural Strength of Welded Structures in KWS: Standardization for Temperature Distribution of the Arc Welding using FEA, Journal of KWS, 23-6 (2005), 497-508 (in Korean)
5. Yun Ki Park, Sang Beom Shin, Sung Youn Kim 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 (in Korean)