

필릿 용접된 거더와 종통재 구조의 용접변형 예측

김상일^{†*}

대우조선해양(주) 선박해양구조연구팀*

Prediction of Welding Deformation for
Fillet Welded Girder and Stringer Structure

Sang-Il Kim*

Ship & Marine Structure R&D Team, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.*

Abstract

The block assembly of ship consists of a certain type of heat processes such as cutting, bending, welding, residual stress relaxation and fairing. The residual deformation due to welding is inevitable at each assembly stage. The geometric inaccuracy caused by the welding deformation 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 deformation. The validity of the prediction method must be also clarified through experiments.

This paper proposes a simplified analysis method to predict the welding deformation of panel block structure. For this purpose, a simple prediction model for fillet welding deformations has been derived based on numerical and experimental results through the regression analysis. On the basis of these results, the simplified analysis method has been applied to some examples to show its validity.

※Keywords: 용접변형(Welding deformation), 기하학적 부정확성(Geometric inaccuracy), 간이 해석법(Simplified analysis method), 회귀분석(Regression analysis)

1. 서론

접수일: 2003년 2월 18일, 승인일: 2003년 3월 27일

† 주저자, E-mail : sikim703088@yahoo.co.kr

Tel: 011-594-2756

선박해양구조물의 제작 및 조립 시 발생하는 용접변형은 용접금속과 모재 사이에 가열과 냉각 사이클의 전 과정을 통한 불균일한 팽창과 수축으로 인하여 발생된다. 이러한 변형은 구조물의 강도 저하나 외관상의 문제 등으로 엄격히 규제되

어, 용접 후 그 크기를 줄이는 비용이 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 선체 구조물의 용접변형은 기본적인 변형 양상이 다양하게 조합되어 나타나는 복합적인 형태를 띠고 있으며, 변형에 영향을 미치는 인자들 또한 매우 다양하므로, 이의 정확한 예측은 오랜 숙제였다.

용접변형은 형상 오차를 발생시키게 되는 면외 변형과 치수 오차를 유발하게 되는 면내변형으로 크게 구분할 수 있다. 면외변형은 횡굽힘변형인 각변형, 종굽힘변형과 좌굴변형으로 나눌 수 있으며, 면내변형은 횡수축변형, 종수축변형과 회전변형으로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 이러한 용접변형 중에서 형상 오차를 유발하는 가장 큰 요인인 각변형과 횡수축변형만을 고려하여 실제 거더와 종통재 구조의 필릿 용접 시에 발생하는 변형을 정량적으로 예측하고자 하였다.

용접변형해석 방법으로는 유한요소법에 토대를 둔 열탄소성해석이 있으나(Fujita 등 1972, Ueda 등 1973, Ueda 등 1992, 김상일 1999, Kim 등 2002), 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 인자들로 인해서 해석 시에 과도한 계산 시간을 필요로 한다. 특히, 선체 구조와 같이 복잡한 구조 형상을 갖는 용접 구조물을 해석한다는 것은 슈퍼 컴퓨터를 사용한다 하더라도 현실적으로 많은 어려움이 따른다.

따라서 본 연구에서는 용접 후 잔류변형에 대한 기본적인 물리적 현상에 기초하여 필릿 용접 시에 발생하는 각변형에 있어서는 용접선 근방에 이러한 각변형을 일으키는 횡굽힘모멘트가 작용하는 것으로, 횡수축변형에 있어서는 용접선 근방에 횡수축변형을 일으키는 횡수축력이 작용하는 것으로 열탄소성문제를 횡굽힘모멘트와 횡수축력에 의한 변형 문제로 치환하여 모델링함으로써 실제 평 블록 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다. 이러한 모델링은 필릿 용접된 판의 용접변형 예측에 기 적용된 바 있다 (Nomoto 등 1997, Kim 등 1996, 노재규 등 1999, 장창두 등 2000).

본 논문에서 제시한 간이 해석법을 이용한 용접 변형 예측은 용접 구조물의 특성을 단순화시키고 지배적인 주요 인자들만을 고려함으로써 실현될 수 있는데, 위에서 언급한 열탄소성해석의 한계성을 극복할 수 있는 가능성있는 길임을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 실제 현장에서 사용하는 용접방법과 용접조건을 기준으로 하여 유도한 간이 예측 모델을 이용하여 대상 모델에 대한 하중조건을 산정하였고, 이를 토대로 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 실제 거더와 종통재 구조의 판 두께와 폭에 따른 최대 굽힘 변형량을 보강재의 수에 따라 정량적으로 정립하였고, 이를 토대로 곡직 작업 실시 여부에 따른 변형 방지용 수직 보강재(vertical stiffener)의 적용 범위를 선종 별로 구체적으로 제시하였다.

2. 간이 예측 모델

참고문헌(김상일 1999)에 있는 용접변형해석 결과를 토대로, FCAW(flux cored arc welding)를 이용한 1층 필릿 용접 시의 간이 예측 모델인 용접변형(각변형과 횡수축변형) 추정식을 회귀분석을 통해 유도해 보면 아래의 식과 같다.

$$\phi_f = 1.243 \cdot p^{1.894} \cdot \exp(-0.165p) \quad (1)$$

($\times 10^{-3} \text{ rad}$)

$$\frac{s}{t} = 0.330p \quad (\times 10^{-2} \text{ mm/mm}) \quad (2)$$

여기서, ϕ_f : 각변형(rad)

s : 횡수축변형(mm)

$p = \frac{Q}{t^{1.5}}$: 입열량 계수

$Q = 0.239 \frac{IV}{v}$: 단위길이당 입열량
(cal/mm)

I : 아크전류(A)

V : 아크전압(V)

v : 용접속도(mm/sec)

t : 판 두께(mm)

수치해석 결과에 의거하여 유도한 횡수축변형 추정식 (2)로부터는 필릿 용접 시의 횡수축 여유를 정량적으로 결정할 수 있으며, 수축치 관리에도 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

3. 용접변형 예측을 위한 간이 해석법

본 장에서는 2장에서 기술한 필릿 용접변형에 대한 간이 예측 모델을 이용하여 대상 모델에 대한 하중조건을 산정하였고, 이를 토대로 실제 거더와 종통재 구조의 필릿 용접 시에 발생하는 변형 양상을 정량적으로 규명하였다.

3.1 개요

선체 구조물의 용접변형은 기본적인 변형 양상이 다양하게 조합되어 나타나는 복합적인 형태를 띠고 있으며, 변형에 영향을 미치는 인자들 또한 매우 다양하므로, 이의 정확한 예측은 오랜 숙제였다. 따라서, 본 연구에서는 선체 구조물 중에서 용접변형이 문제가 되는 평 블록을 대상으로 하여 조립 시에 발생하는 복잡한 용접변형 형상을 실용적인 방법으로 해석하기 위한 하나의 방법을 제시하고자 한다.

용접으로 인해 구조물에는 각변형, 횡수축변형, 종굽힘변형과 종수축변형이 복합적으로 발생하게 되는데, 본 논문에서는 이러한 용접변형 중에서 형상 오차의 가장 큰 요인인 각변형과 횡수축변형만을 고려하여 실제 거더와 종통재 구조의 필릿 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다. 두 개의 부재가 필릿 용접되는 과정은 Fig. 1에 보인 바와 같이 간략화된 등가하중이 작용하는 모델로 치환할 수 있는데, 본 연구에서는 이러한 용접변형을 유발하는 등가하중인 용접선에 수직인 방향으로 작용하는 횡굽힘모멘트와 횡수축력을 하중조건으로 하여 해석 모델에 작용시키고, 이와 함께 해석 모델의 자중을 고려하여, 선형 탄성 유한요소해석을 수행함으로써 실제 거더와 종통재 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하였다.

경계조건으로는 실구조물의 최종적인 변형 상태를 면밀히 조사한 결과를 토대로, 판과 보강재의

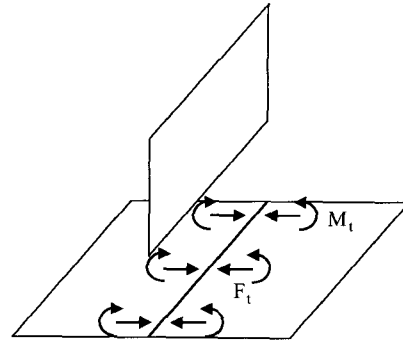


Fig. 1 Simplified model of fillet welding process

접합 지점에 단순지지조건을 부여하였다. 하지만 정반과 블록 사이의 마찰력은 고려하지 않았다.

3.2 실구조물의 적용 예

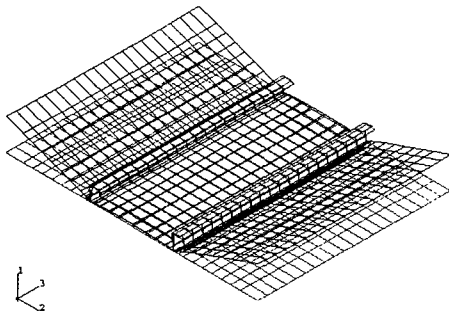
본 절에서는 화물창(cargo hold) 구역의 블록 중에서 용접변형이 문제가 되는 대표적인 블록인 거더와 종통재 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다.

대상 모델의 크기와 용접조건은 Table 1에 열거된 바와 같으며, Fig. 2는 Table 1에 있는 대상 모델의 3차원 변형 형상을 보여 주고 있는데, 최종적인 변형 발생 양상은 보강재의 수에 따라 다르게 나타난다는 사실을 알 수 있다. Fig. 3은 대상 모델의 수치해석 결과를 실물 계측 결과와 비교한 것인데, 본 간이 해석법에 의한 수치해석 결과는 계측 결과와 비교해서 전반적으로 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 확인할 수 있다.

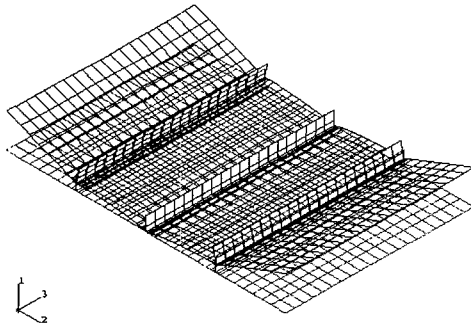
Fig. 4는 대상 모델의 자중 고려 여부에 따른 굽힘 변형량의 차이를 보여 주고 있는데, 최종적인 변형 발생 양상은 자중 고려 여부에 따라 크게 달라진다는 사실을 알 수 있다. Fig. 5는 대상 모델의 동일 각목 시공 시 용접방법(FCAW와 gravity 용접)에 따른 굽힘 변형량의 차이를 보여 주고 있는데, 동일 각목 시공 시에는 gravity 용접의 경우가 FCAW의 경우보다 모재에 더 높은 입열량이 가해지기 때문에, gravity 용접 적용 시의 각변형이 FCAW 적용 시보다 훨씬 더 크게 나타나며, 이는 현재의 변형 방지용 수직 보강재의 부

Table 1 GIR & STR plate models and welding conditions

Model	Size of GIR & STR Plate		Stiff. Space a (mm)	No. of Stiff.	Heat Input Q (cal/mm)	Throat Thickness t_w (mm)
	Plate L×B×t (mm)	Longi. Stiffener h×t _s (mm)				
A1	2000×2460×15	150×90×12(A)	880	2	323	4.5
A2						
A3						
B1	2000×3000×17	150×13	750	3	323	4.5
B2						
B3						

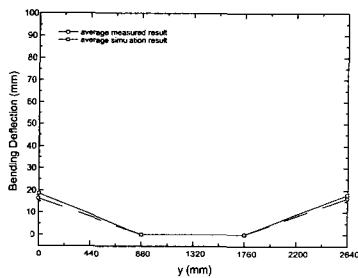


(a) Model-A series

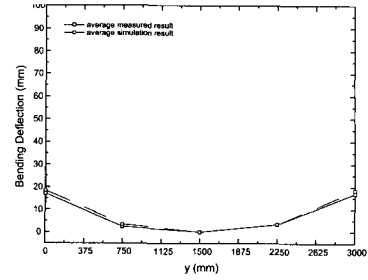


(b) Model-B series

Fig. 2 Simulation result for GIR & STR plate model

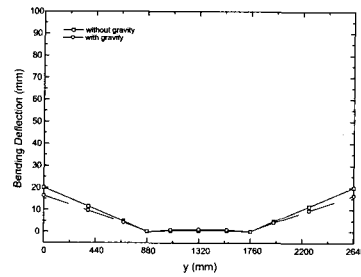


(a) Model-A series

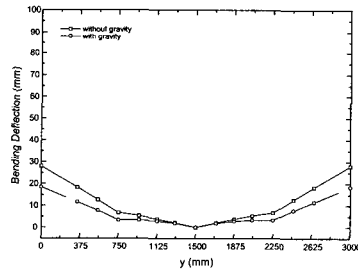


(b) Model-B series

Fig. 3 Comparison of simulation result with measured result

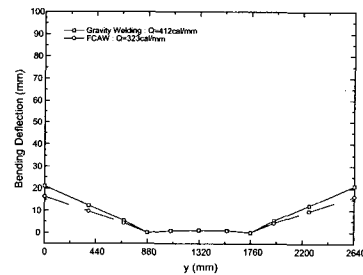


(a) Model-A series

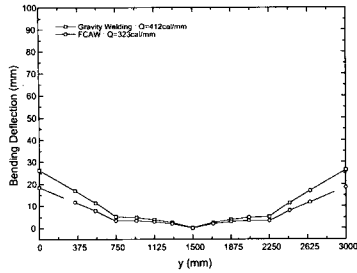


(b) Model-B series

Fig. 4 Bending deflection according to the gravity



(a) Model-A series



(b) Model-B series

Fig. 5 Bending deflection according to the welding process

Table 2 Maximum bending deflection for GIR & STR plate model with two stiffeners, δ_w in mm

t (mm)	Ei (mm)					
	1650 (a=550mm)	1800 (a=600mm)	2100 (a=700mm)	2250 (a=750mm)	2550 (a=850mm)	2640 (a=880mm)
10	17.6	18.7	20.4	20.9	21.3	21.2
12	15.9	17.0	18.8	19.5	20.4	20.5
14	13.5	14.4	16.1	16.7	17.7	17.9
16	11.1	11.9	13.3	13.9	14.8	14.9
18	9.10	9.80	10.9	11.4	12.2	12.3
20	7.50	8.00	9.00	9.40	10.0	10.2

Table 3 Maximum bending deflection for GIR & STR plate model with three stiffeners, δ_w in mm

t (mm)	B (mm)					
	3000 (a=750mm)	3200 (a=800mm)	3400 (a=850mm)	3520 (a=880mm)	3680 (a=920mm)	4000 (a=1000mm)
12	24.2	21.3	17.1	15.8	15.9	15.7
14	22.8	21.0	18.3	16.2	13.8	13.9
16	19.8	18.6	16.7	15.0	12.8	11.7
18	16.7	15.8	14.4	13.2	11.4	9.70
20	13.8	13.2	12.1	11.2	9.70	8.00
22	11.5	10.9	10.0	9.30	8.00	6.60

착 기준을 재검토해야 한다는 사실을 의미한다.

Table 2와 3은 거더와 종통재 구조의 판 두께와 폭에 따른 최대 굽힘 변형량을 정량적으로 보여 주고 있으며, 이를 토대로 곡직 작업 실시 여부에 따른 변형 방지용 수직 보강재의 적용 범위를 Table 4와 5에 선종 별로 구체적으로 제시하였다. 이는 최대 굽힘 변형량이 15mm 미만이고, 곡직 작업이 15mm 이하의 판 두께에 대하여 수

행되는 경우를 기준으로 평가한 결과이다. 단, 모든 판 두께에 대하여 곡직 작업이 수행되는 경우에는 수직 보강재를 적용하지 않아도 된다.

Table 4 Application range of vertical stiffener for GIR & STR plate without straightening work

Ship Type	Structure	B (mm)	t (mm)	No. of Stiff.	Yes or No of Application of Vertical Stiff.	
COT	442K	GIR	3300	18.5 ~ 22.5	2 ~ 3	No
		STR	3900	15.0 ~ 18.0	3	No
	300K	GIR	3000	15.0 ~ 17.0	3	Yes
		STR	3520	14.0 ~ 15.0	3	Yes
	158K	GIR	2550	15.0 ~ 18.0	2	No
		STR	2640	12.0 ~ 15.0	2	Yes
98K	GIR	2300	13.5 ~ 15.0	2	Yes	
	STR	2060	12.5	2	Yes	
65K	GIR	2040	14.0	2	Yes	
	STR	2075	12.0 ~ 14.0	2	Yes	
CONT.	2400TEU	GIR	1650	11.0 ~ 13.5	2	Yes(t≤12mm)
		STR	2200	10.0 ~ 20.0	1 ~ 2	Yes(t≤15mm)
	6750TEU	Deck	2200	35.0	2	No
		GIR	2000	14.0 ~ 16.0	2	Yes(t≤14mm)
		STR	2050	10.0 ~ 15.0	1	Yes
		Deck	2050	55.0	2	No
B/C	173K	GIR	2500	13.0 ~ 18.0	2	Yes(t≤15mm)
	75K	GIR	1700	12.0 ~ 18.0	2	Yes(t≤13mm)
O/C	175K	GIR	3700	18.0 ~ 20.0	3 ~ 4	No
LNG	138000	GIR	3200	12.5 ~ 18.5	3	Yes
		STR	2211	12.0 ~ 14.0	2	Yes

Table 5 Application range of vertical stiffener for GIR & STR plate with straightening work

Ship Type	Structure	B (mm)	t (mm)	No. of Stiff.	Yes or No of Application of Vertical Stiff.	
COT	442K	GIR	3300	18.5 ~ 22.5	2 ~ 3	No
		STR	3900	15.0 ~ 18.0	3	No
	300K	GIR	3000	15.0 ~ 17.0	3	Yes (15mm≤t≤17mm)
		STR	3520	14.0 ~ 15.0	3	No
	158K	GIR	2550	15.0 ~ 18.0	2	No
		STR	2640	12.0 ~ 15.0	2	No
98K	GIR	2300	13.5 ~ 15.0	2	No	
	STR	2060	12.5	2	No	
65K	GIR	2040	14.0	2	No	
	STR	2075	12.0 ~ 14.0	2	No	
CONT.	2400TEU	GIR	1650	11.0 ~ 13.5	2	No
		STR	2200	10.0 ~ 20.0	1 ~ 2	Yes (15mm≤t≤20mm)
	6750TEU	Deck	2200	35.0	2	No
		GIR	2000	14.0 ~ 16.0	2	Yes (15mm≤t≤16mm)
		STR	2050	10.0 ~ 15.0	1	No
		Deck	2050	55.0	2	No
B/C	173K	GIR	2500	13.0 ~ 18.0	2	Yes (15mm≤t≤18mm)
	75K	GIR	1700	12.0 ~ 18.0	2	Yes (15mm≤t≤18mm)
O/C	175K	GIR	3700	18.0 ~ 20.0	3 ~ 4	No
LNG	138000	GIR	3200	12.5 ~ 18.5	3	Yes (15mm≤t≤18.5mm)
		STR	2211	12.0 ~ 14.0	2	No

4. 결 론

본 연구의 목적은 거더와 증통재 구조의 필릿 용접 시에 유발되는 변형 발생 양상을 정량적으로 규명하는 일인데, 이를 위하여 실구조물을 대상으로 다양한 수치해석을 수행한 결과, 아래와 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

1. 본 논문에서는 필릿 용접변형에 대한 간이 예측 모델을 이용하여 대상 모델에 대한 하중조건을 산정하였고, 이를 토대로 선형 탄성 유한요소해석을 수행함으로써 거더와 증통재 구조의 조립 시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 실물 계측 결과와 수치해석 결과를 비교하여 고유변형이론을 이용한 용접변형해석 절차의 타당성을 검증하였다.
2. 본 연구에서는 간이 해석법을 이용하여 자중 고려 여부와 용접방법에 따른 굽힘 변형량의 차이를 정량적으로 규명하였고, 이로부터 최종적인 변형 발생 양상은 자중 고려 여부에 따라 크게 달라진다는 사실을 알 수 있다. 또한 동일 각목 시공 시에는 gravity 용접의 경우가 FCAW의 경우보다 모재에 더 높은 입열량이 가해지기 때문에, gravity 용접 적용 시의 각변형이 FCAW 적용 시보다 훨씬 더 크게 나타나며, 이는 현재의 변형 방지용 수직 보강재의 부착 기준을 재검토해야 한다는 사실을 의미한다.
3. 본 논문에서는 거더와 증통재 구조의 판 두께와 폭에 따른 최대 굽힘 변형량을 정량적으로 정립하였고, 이를 토대로 곡직 작업 실시 여부에 따른 변형 방지용 수직 보강재의 적용 범위를 선종 별로 구체적으로 제시하였다. 이는 최대 굽힘 변형량이 15mm 미만이고, 곡직 작업이 15mm 이하의 판 두께에 대하여 수행되는 경우를 기준으로 평가한 결과이다. 단, 모든 판 두께에 대하여 곡직 작업이 수행되는 경우에는 수직 보강재를 적용하지 않아도 된다.

참 고 문 헌

- 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
- 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. et al., 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
- 김상일, 1999, 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위 논문
- 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
- Nomoto, T., Aoyama, K. and Tachechi, S., 1997, Basic studies on accuracy management system for shipbuilding, Proceedings of ICCAS-1997, pp.323-338
- 김상일, 이주성, 1996, 필릿 이용의 용접변형에 대한 간이 예측법 개발, 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp.265-270
- 김상일, 조용관, 이주성, 1996, 간이 해석법을 이용한 평 블록의 용접변형 예측, 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp.271-276
- 노재규, 신중계, 1999, 자중과 용접변형을 고려한 평 블록 조립 시뮬레이션, 대한조선학회논문집, 제36권, 제3호, pp.122-133
- 장창두, 이창현, 2000, 선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구, 대한조선학회논문집, 제37권, 제2호, pp.127-136