

필릿 용접된 Girder와 Stringer 구조의 용접변형 예측

Prediction of Welding Deformation for Fillet Welded Girder & Stringer Structure

김 상일^{(1)*}, 한 종환⁽²⁾

(1) 대우조선공업(주) 시험평가연구팀

(2) 대우조선공업(주) 시험평가연구팀

1. 서언

1.1 연구 배경

5년 전 VLCC 선종의 이중구조블록(double structure block) 제작시에 Girder와 Stringer 구조의 과도한 변형으로 인해 Dock 단계에서의 Block Joint 작업시 상하 및 좌우 방향으로 단차가 발생되어, 이의 수정 작업에 많은 공수가 소요되었다. 이를 해결하기 위해 Girder와 Stringer 끝단부에 변형 방지용 Vertical Stiffener를 신설하였으나, 전 선종의 Girder와 Stringer 구조에 무분별하게 적용함으로써 추가적인 자재비와 공수가 소요되고 있는 실정이다. 따라서, 현재 모든 선종에 적용 중인 변형 방지용 Vertical Stiffener는 판 두께와 폭에 따라 그 적용 범위가 재검토되어야 한다.

1.2 연구 내용

선박·해양구조물의 제작 및 조립시 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 규제되어, 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.

용접변형해석 방법으로는 유한요소법에 토대를 둔 열탄소성해석이 있으나, 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 해석시에 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 논문에서는 용접 후 잔류변형에 대한 기본적인 물리적 현상에 기초하여 필릿 용접시에 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 평블록 구조의 조립시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다.

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

본 논문에서는 고유변형이론(inherent deformation theory)을 이용한 용접변형해석을 통하여 Girder와 Stringer 구조의 판 두께와 폭에 따른 최대 굽힘 변형량을 보강재의 수에 따라 정량적으로 정립하였고, 이를 토대로 곡직 작업 실시 여부에 따른 변형 방지용 Vertical Stiffener의 적용 범위를 선종별로 구체적으로 제시하였다.

2. 간이 예측 모델

용접변형해석 결과를 토대로, FCAW(flux cored arc welding)를 이용한 1층 필릿 용접시의 간이 예측 모델인 용접변형(각변형과 횡수축변형) 추정식을 회귀분석을 통해 유도해 보면 아래의 식과 같다.

$$\phi_f = 1.243 \cdot p^{1.894} \cdot \exp(-0.165p) (\times 10^{-3} rad) \quad (1)$$

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

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 용접시의 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 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Girder와 Stringer 구조의 필릿 용접시에 발생하는 변형 발생 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 평블록을 대상으로 하여 조립시에 발생하는 복잡한 용접변형 형상을 실용적인 방법으로 해석하기 위한 하나의 방법을 제시하고자 한다.

용접으로 인해 구조물에는 각변형, 횡수축변형, 종굽힘변형과 증수축변형이 복합적으로 발생하게 되는데, 본 논문에서는 이러한 용접변형 중에서 형상 오차의 가장 큰 요인인 각변형과 횡수축변형만을 고려하여 Girder와 Stringer 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 Girder와 Stringer 구조의 조립시에 발생하는 용접변형을 예측하였다.

경계조건으로는 실구조물의 최종적인 변형 상태를 면밀히 조사한 결과를 토대로, 판과 보강재의 접합 지점에 단순지지조건을 부여하였다. 하지만 정반과 블록 사이의 마찰력은 고려하지 않았다.

3.2 실구조물의 적용 예

본 절에서는 간이 해석법을 이용하여 Cargo Hold 구역의 블록 중에서 용접변형이 문제가 되는 대표적인 블록인 Girder와 Stringer 구조의 조립시에 발생하는 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다.

대상 모델의 크기와 용접조건은 Table 1에 열거된 바와 같으며, Fig. 2와 3은 Table 1에 있는 Model-B Series의 3차원 변형 형상과 Joint Line을 따르서의 굽힘 변형량 분포를 보여

주고 있는데, 본 간이 해석법에 의한 수치해석 결과는 계측 결과와 비교해서 전반적으로 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table 1에 있는 Model-B Series의 동일 각목 시공시 용접방법(FCAW와 Gravity 용접)에 따른 굽힘 변형량의 차이를 보여 주고 있는데, 동일 각목 시공시에는 Gravity 용접의 경우가 FCAW의 경우보다 모재에 더 높은 입열량이 가해지기 때문에, Gravity 용접 적용시의 각변형이 FCAW 적용시보다 훨씬 더 크게 나타나며, 이는 현재의 변형 방지용 Vertical Stiffener의 부착 기준을 재검토해야 한다는 사실을 의미한다.

Table 2와 3은 Girder와 Stringer 구조의 판 두께와 폭에 따른 최대 굽힘 변형량을 정량적으로 보여 주고 있으며, 이를 토대로 곡직 작업 실시 여부에 따른 변형 방지용 Vertical Stiffener의 적용 범위를 Table 4에 선종별로 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 Vertical Stiffener를 적용하지 않아도 된다.

4. 결론

본 연구의 목적은 Girder와 Stringer 구조의 필릿 용접시에 유발되는 변형 발생 양상을 정량적으로 규명하는 일인데, 이를 위하여 실구조물을 대상으로 다양한 수치해석을 수행한 결과, 다음과 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

- (1) 본 논문에서는 간이 해석법을 이용하여 용접방법에 따른 굽힘 변형량의 차이를 정량적으로 규명하였고, 이로부터 동일 각목 시공시에는 Gravity 용접의 경우가 FCAW의 경우보다 모재에 더 높은 입열량이 가해지기 때문에, Gravity 용접 적용시의 각변형이 FCAW 적용시보다 훨씬 더 크게 나타나며, 이는 현재의 변형 방지용 Vertical Stiffener의 부착 기준을 재검토해야 한다는 사실을 의미한다.
- (2) 본 연구에서는 Girder와 Stringer 구조의 판 두께 폭에 따른 최대 굽힘 변형량을 정량적으로 정립하였고, 이를 토대로 곡직 작업 실시 여부에 따른 변형 방지용 Vertical Stiffener의 적용 범위를 선종별로 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 Vertical Stiffener를 적용하지 않아도 된다.

Table 1 GIR & STR plate models for measurement and welding conditions

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

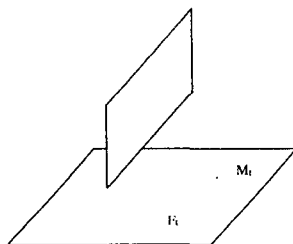


Fig. 1 Simplified model of fillet welding process

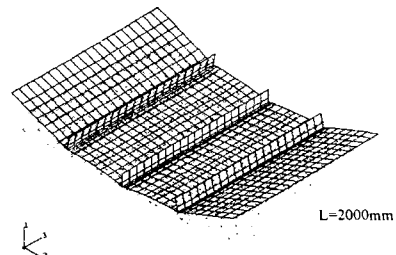


Fig. 2 Simulation result for Model-B series

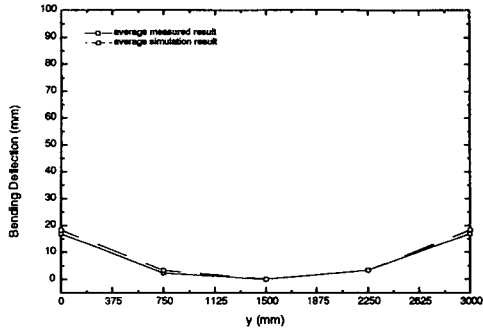


Fig. 3 Bending deflection along joint lines for Model-B series

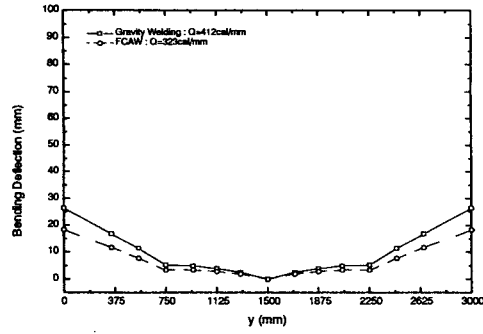


Fig. 4 Bending deflection according to the welding process for Model-B series

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

B (mm) \ t (mm)	1650 ($l_s=550$ mm)	1800 ($l_s=600$ mm)	2100 ($l_s=700$ mm)	2250 ($l_s=750$ mm)	2550 ($l_s=850$ mm)	2640 ($l_s=880$ mm)
10	17.6	18.7	19.8	20.9	21.3	21.2
12	15.9	17.0	18.1	19.5	20.4	20.5
14	13.5	14.4	15.5	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

B (mm) \ t (mm)	3000 ($l_s=750$ mm)	3200 ($l_s=800$ mm)	3400 ($l_s=850$ mm)	3520 ($l_s=880$ mm)	3680 ($l_s=920$ mm)	4000 ($l_s=1000$ mm)
12	24.2	21.3	19.8	15.8	15.9	15.7
14	22.8	21.2	19.7	15.2	13.8	13.9
16	19.8	18.6	17.5	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

Table 4 Application range of vertical stiffener for GIR & STR plate with straightening work

선종	구분	구조	관 폭 (mm)	관 두께 (mm)	보강재 수 (개)	Vertical Stiffener의 적용 여부
COT	442K	GIR	3300	18.5~22.5	2~3	미적용
		STR	3900	15.0~18.0	3	미적용
	300K	GIR	3000	15.0~17.0	3	일부 적용(15mm ≤ t ≤ 17mm)
		STR	3520	14.0~15.0	3	미적용
	158K	GIR	2550	15.0~18.0	2	미적용
		STR	2640	12.0~15.0	2	미적용
	98K	GIR	2300	13.5~15.0	2	미적용
		STR	2060	12.5	2	미적용
	65K	GIR	2040	14.0	2	미적용
		STR	2075	12.0~14.0	2	미적용
CONT.	2400TEU	GIR	1650	11.0~13.5	2	미적용
		STR	2200	10.0~20.0	1~2	일부 적용(15mm ≤ t ≤ 20mm)
	Deck		2200	35.0	2	미적용
		GIR	2000	14.0~16.0	2	일부 적용(15mm ≤ t ≤ 16mm)
		STR	2050	10.0~15.0	1	미적용
		Deck	2050	55.0	2	미적용
B/C	173K	GIR	2500	13.0~18.0	2	일부 적용(15mm ≤ t ≤ 18mm)
	75K	GIR	1700	12.0~18.0	2	일부 적용(15mm ≤ t ≤ 18mm)
O/C	175K	GIR	3700	18.0~20.0	3~4	미적용
	LNG	138000	GIR	3200	12.5~18.5	3
		STR	2211	12.0~14.0	2	미적용