

V-개선 맞대기 용접변형에 대한 간이 예측 모델 개발

김상일†*

로이드선급협회 울산지부*

Development of Simple Prediction Model for V-groove butt welding deformation

Sang-Il Kim†*

Ulsan Office, Lloyd's Register Asia

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.

Systematic and quantitative theoretical works to clarify the effects of various factors on the welding deformation have rarely been found. Therefore, in this paper, the effects of various factors, such as welding process and gravity on the butt welding deformation have been investigated through a number of numerical analyses. In addition, this paper proposes a simplified analysis method to predict the butt welding deformation in actual plate structure. For this purpose, a simple prediction model for butt welding deformations has been derived based on numerical and experimental results through the regression analysis. Based on these results, the simplified analysis method has been applied to some examples to show its validity.

※Keywords: Welding deformation(용접변형), Geometric inaccuracy(기하학적 부정확성), Simple prediction model(간이 예측 모델), Regression analysis(회귀분석)

접수일: 2003년 5월 21일, 승인일: 2004년 3월 2일

† 주저자, E-mail: sikim703088@empal.com

Tel: 052-233-9445

1. 서 론

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 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.

용접변형은 형상 오차를 발생시키게 되는 면외 변형과 치수 오차를 유발하게 되는 면내변형으로 크게 구분할 수 있다. 면외변형은 횡굽힘변형인 각 변형, 종굽힘변형과 좌굴변형으로 나눌 수 있으며, 면내변형은 횡수축변형, 종수축변형과 회전변형으로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 이러한 용접변형 중에서 V-개선 맞대기 용접 시에 형상 오차를 유발하는 가장 큰 요인인 각변형과 횡수축변형을 정도 높게 예측할 수 있는 간이 예측 모델을 회귀 분석을 통해 정량적으로 유도하고자 하였다.

용접변형해석 방법으로는 유한요소법에 토대를 둔 열탄소성해석이 있으나(Fujita/Nomoto 1972, Ueda/Yamakawa 1973, 방한서 1990, Ueda et al. 1994, 장창두/서승일 1994, 김상일 1999, 장창두/이창현 2000, Kim et al. 2002, 김상일(a) 2003, 김상일(b) 2003), 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.

본 논문의 목적은 V-개선 맞대기 용접변형에 대한 간이 예측 모델을 유도하는 것이다. 이를 위하여 다수의 모델에 대하여 용접조건과 판 두께를 변화시켜 가면서 열탄소성해석을 수행하였고, 이러한

결과를 토대로 각변형과 횡수축변형을 정도 높게 예측할 수 있는 간이 예측 모델을 회귀분석을 통해 유도하였다. 또한 수치해석 결과의 타당성을 규명하기 위해서 다수의 실험 모델에 대한 용접변형실험을 수행하였고, 이 때 수치해석 결과는 실험 결과와 비교하여 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있었다.

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

2. 용접 현상의 역학적 특성

용접변형해석은 이론적으로 열전달문제와 열변형문제가 연성된 형태이나 변형량이 그다지 크지 않은 것으로 가정하면 구조물의 기하학적 형상 변화가 열전달문제에 영향을 주지 않는 것으로 간주할 수 있고, 따라서 열전달문제와 열변형문제를 분리하여 독립적으로 해석할 수 있다. 즉, 열전달해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행함으로써 용접변형을 계산하였다.

3. 용접변형에 대한 수치해석

본 장에서는 다층 V-개선 맞대기 용접에 대한 해석 모델을 만들어 먼저 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. 또한 수치해석 결과의 검증은 위하여 동일 모델에 대한 용접변형실험을 수행하였고, 그 결과를 비교하여 열탄소성해석법의 타당성을 검증하였다.

3.1 유한요소 모델링

기하학적 형상과 온도분포의 대칭성을 이용하여, 해석 모델은 전 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다. 또한 해석 시의 유한요소모델은 2차원 일반화된 평면 변형을 요소(two-dimensional generalized plane strain element)를 이용하였다.

열전달해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였으며, 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)의 효과를 고려하였다. 또한 외부로부터 유입되는 용접금속(weld metal)을 모델링하기 위해 요소 탄생법(element birth method)을 이용하였는데, 그 방법은 초기에 해석 모델 전체를 모델링하고, 해석이 시작되기 이전에 용접비드(weld bead) 부분의 요소들을 모두 삭제한 다음, 시간에 따라 비드요소(bead element)가 하나씩 생성되도록 하는 것이다. 경계조건으로는 해석 모델의 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대칭면에서의 열유동은 없는 것으로 가정하였으며, 대기의 온도는 20°C로 가정하였다.

용접비드가 쌓이는 현상을 수치적으로 모델링하는 방법은, 생성되는 요소에 표면열속을 가하는 방법, 체적열속을 가하는 방법, 절점온도를 주는 방법 등이 있는데, 본 해석에서는 생성되는 비드요소에 체적열속을 가하는 방법으로 온도분포의 시간 이력을 구하였다.

용접변형해석은 열전달해석의 결과를 토대로 출발하게 된다. 즉, 열전달해석을 통한 각 절점에서의 과도적인 온도분포가 열탄소성해석 시의 하중조건이 된다. 따라서 열탄소성해석 시에는 열전달해석 시의 요소 분할을 그대로 사용하였으며, 요소 탄생법 역시 동일한 방법을 이용하였다. 이 때에도 모든 기계적인 재료 특성치들이 온도에 따라 변하도록 모델링하였다. 해석 모델에 작용하는 외력은 불균일한 온도분포에 따른 열하중이며, 온도분포는 열전달해석에서의 절점온도 결과를 이용하였다. 경계조건으로는 해석 모델의 대칭면에서 수직 방향의 변형이 없도록 하였다.

3.2 열전달해석

대상 모델의 차원은 Fig. 1에 보인 바와 같으며, 용접조건은 Table 1에 정리하였다. 이 때의 용접조건은 다층 V-개선 맞대기 용접 시에 이용되는 실제 용접조건이며, 사용된 용접방법은 FCAW(flux cored arc welding)이고, 사용된 재료는 연강이다.

본 절에서는 Table 1에 있는 Model-VM2에 대한 열전달해석 결과를 다층 V-개선 맞대기 용접 시의 과도적인 온도분포의 전형적인 예로 제시하고자 하였으며, 용접층의 출발점인 원점에서 폭 방향과 모재 두께 방향으로의 좌표는 1, 2(x, y)로 정의하였다.

Fig. 2는 용접층 수의 변화에 따른 용접 중의 최고 온도 발생 시의 Model-VM2의 용접부 주위의 온도분포를 보여 주고 있는데, 본 열전달해석 절차는 V-개선 맞대기 용접 시의 용융부(fusion zone)와 열영향부(heat affected zone) 등과 같은 열전달 특성들을 합리적으로 잘 구현해 준다는 사실을 알 수 있다. Fig. 3은 Model-VM2의 마지막 용접층 시공 시의 폭 방향 및 모재 두께 방향으로의 과도적인 온도분포를 보여 주고 있는데, Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이, 두께 방향으로의 온도분포는 용접 초기에만 약간의 차이를 보일 뿐, 어느 정도 시

Table 1 Welding conditions for multi-pass butt welding models with V-groove

Model	Plate Thickness t (mm)	No. of Pass	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Transverse Area of Weld Metal A_w (mm ²)	Heat Input Parameter $p = A_w/t$
VM1	11	2	260	32	6.7	120.4	10.95
VM2	14	3	240	30	5.4	175.7	12.55
VM3	18	4	260	32	6.7	249.5	13.86

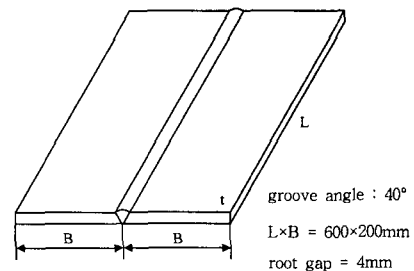


Fig. 1 Dimension of multi-pass butt welding model with V-groove

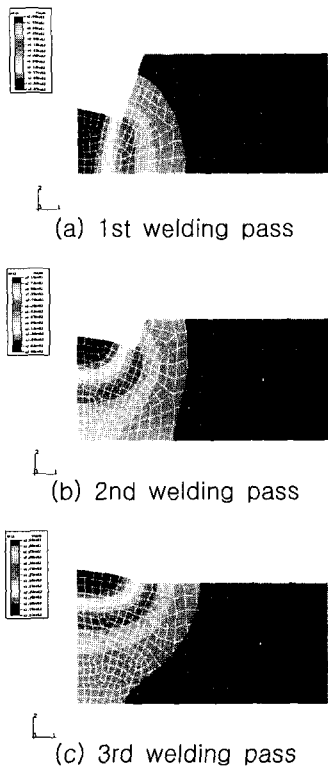


Fig. 2 Maximum temperature contour for Model-VM2 varying with welding pass

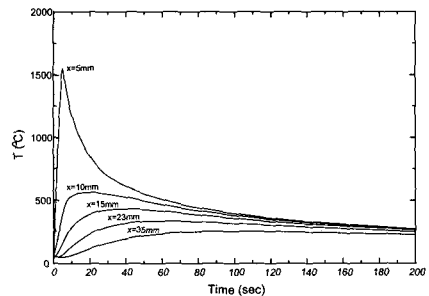
간이 경과하면 균일한 분포 형상을 보임을 알 수 있다

3.3 열탄소성해석

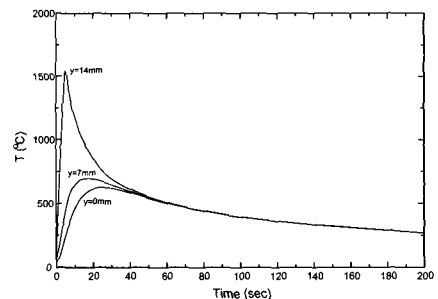
본 절에서는 수치해석 결과의 검증에 위하여 동일 모델에 대한 용접변형실험을 수행하였고, 그 결과를 비교하여 열탄소성해석법의 정당성을 확인하였다.

Fig. 4는 용접 후 정상 상태(20°C)일 때의 Model-VM2의 용접층 수의 변화에 따른 변형 형상을 보여 주고 있으며, Fig. 5는 Model-VM2의 용접층 수의 변화에 따른 각변형의 추이를 보여 주고 있다. Fig. 4와 5에서 알 수 있는 바와 같이, 초층 용접 시공 시에는 각변형이 거의 발생되지 않으며, 두 번째 용접층 시공 시부터 각변형은 급격히 커지게 된다. Table 2와 3은 Table 1에 있는 실험 모델에 대한 각변형과 횡수축변형에 대한 수치해석

결과와 실험 결과를 비교한 것인데, 열탄소성해석에 의한 수치해석 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며, 이로부터 본 2차원 맞대기 용접변형해석 절차의 유효성을 확인할 수 있다. 본 실험 결과와 수치해석 결과에서 알 수 있듯이, 판 두께가 두꺼워지면 용접금속의 양이 층수의 증가와 함께 증가하기 때문에 각변형과 횡수축변형은 오히려 커지게 된다.

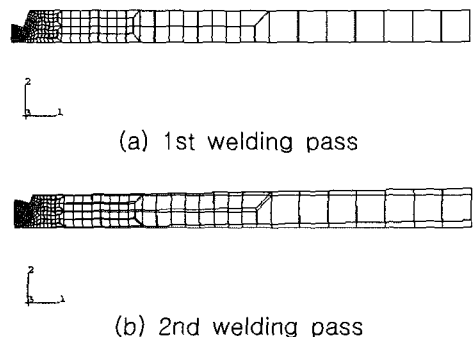


(a) several x-positions at y = 14mm



(b) several y-positions at x = 5mm

Fig. 3 Transient temperature distribution for Model-VM2 at the third welding pass





(c) 3rd welding pass

Fig. 4 Example of deformed shape for Model-VM2 according to the welding pass

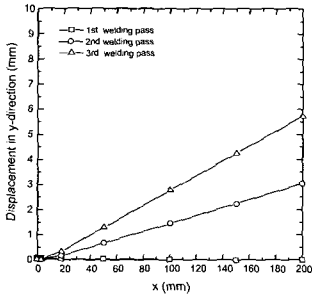


Fig. 5 Computed welding deflection for Model-VM2

Table 2 Angular distortions obtained from numerical simulation and experiment

Model	Experimental Results ($\times 10^{-2}$ rad)	Numerical Results ($\times 10^{-2}$ rad)	Ratio = $\frac{Exp.}{Num.}$
VM1	1.850	1.715	1.079
VM2	3.285	2.964	1.108
VM3	3.725	3.381	1.102

Table 3 Transverse shrinkages obtained from numerical simulation and experiment

Model	Experimental Results (mm)	Numerical Results (mm)	Ratio = $\frac{Exp.}{Num.}$
VM1	1.040	1.080	0.963
VM2	1.170	1.310	0.893
VM3	1.400	1.550	0.903

4. 간이 예측 모델

본 장에서는 3장에서 제시한 정도 있는 열탄소 성해석법을 토대로 V-개선 맞대기 용접변형에 대

한 대표적인 간이 예측 모델인 각변형과 횡수축변형 추정식을 구하였다. 또한 수치해석 결과와 간이 모델에 의한 결과를 비교하여 제시된 간이 예측 모델의 정당성을 확인하였다.

4.1 다층 V-개선 맞대기 용접

해석 모델의 크기는 3장의 Fig. 10에 보여진 바와 같으며, 용접조건과 용접변형해석 결과는 Table 4와 5에 열거된 바와 같다. 이를 토대로 다층 V-개선 맞대기 용접 시의 간이 예측 모델인 용접변형(각변형과 횡수축변형) 추정식을 회귀분석을 통해 구해 보면 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_f &= 0.145p \ (\times 10^{-2} \text{rad}) \ \text{for } p \leq 9.28 \\ &= -2.968 + 0.465p \ (\times 10^{-2} \text{rad}) \ \text{for } 9.28 \leq p \leq 15.40 \end{aligned} \quad (1)$$

$$s = 0.109p \ (\text{mm}) \ \text{for } p \leq 15.40 \quad (2)$$

여기서, ϕ_f : 각변형(rad)
 s : 횡수축변형(mm)
 p : 입열량 계수(mm)

A_w : 용착금속의 횡단면적(mm^2)
 t : 판 두께(mm)

수치해석 결과에 의거하여 유도한 횡수축변형 추정식 (2)로부터는 다층 V-개선 맞대기 용접으로 인한 횡수축 여유를 정량적으로 결정할 수 있으며, 수축치 관리에도 유용하게 적용될 수 있다.

Fig. 6은 각변형과 횡수축변형에 대한 간이 예측 모델에 의한 결과와 수치해석 결과를 비교한 것인데, 식 (1)과 (2)에 의한 결과는 수치해석 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

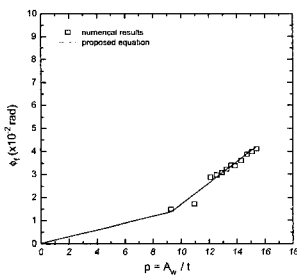
본 연구에서는 개선각이 달라지는 경우에도 광범위하게 적용할 수 있는 용접변형 추정식을 얻기 위하여 계수 p 정의 시에 용접금속의 횡단면적인 A_w 를 판 두께 t 와 함께 고려하였다.

Table 4 Welding conditions for multi-pass butt welding models with V-groove

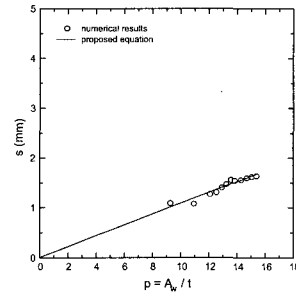
Model	t (mm)	No. of Pass	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Transverse Area of Weld Metal A_w (mm ²)
VM1	11	2	260	32	6.7	120.4
VM2	14	3	240	30	5.4	175.7
VM3	18	4	260	32	6.7	249.5
VM4	9	2	260	32	7.5	83.6
VM5	13	3	270	32	6.7	157.3
VM6	15	3	270	30	5.8	194.2
VM7	16	4	260	32	7.5	212.6
VM8	17	4	280	32	7.5	231.1
VM9	19	4	270	30	5.8	271.8
VM10	20	5	260	32	7.5	294.1
VM11	21	5	280	32	7.5	316.4
VM12	22	5	260	32	6.7	338.7

Table 5 Welding deformations by numerical simulation

Model	Heat Input Parameter $p = A_w/t$	Angular Distortion ϕ_f ($\times 10^{-2}$ rad)	Transverse Shrinkage s (mm)
VM1	10.95	1.715	1.080
VM2	12.55	2.964	1.310
VM3	13.86	3.381	1.550
VM4	9.28	1.493	1.090
VM5	12.10	2.878	1.275
VM6	12.94	3.067	1.405
VM7	13.26	3.223	1.472
VM8	13.59	3.401	1.558
VM9	14.31	3.606	1.560
VM10	14.71	3.872	1.603
VM11	15.07	3.983	1.623
VM12	15.40	4.116	1.642



(a) angular distortion



(b) transverse shrinkage

Fig. 6 Comparison of present proposed equations with numerical result

4.2 단층 V-개선 맞대기 용접

FGB 용접(flux glassfiber backing welding)을 이용한 단층 V-개선 맞대기 용접시의 횡수축량 추정식(Ijichi et al. 1985)은 아래의 식과 같다.

$$s = 0.6 + 0.04t \text{ (mm)} \quad (3)$$

Ijichi 등은 판 두께만을 고려하여 횡수축변형 추정식을 유도하였는데, 이의 단점으로는 개선각이 달라지는 경우에 광범위하게 적용하기 힘들다는 점을 들 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이의 한계성을 극복하기 위해 입열량 계수를 정의할 때 용접금속의 횡단면적을 판 두께와 함께 고려하였다.

해석 모델의 크기는 Fig. 7에 보여진 바와 같으며, 용접조건은 Table 6에 열거된 바와 같다. 이때의 용접조건은 단층 V-개선 맞대기 용접 시에 이용되는 실제 용접조건이며, 사용된 용접방법은 FGB 용접이다. Table 7은 각변형과 횡수축변형에 대한 수치해석 결과를 보여 주고 있으며, 이를 토대로 단층 V-개선 맞대기 용접 시의 간이 예측 모델인 용접변형(각변형과 횡수축변형) 추정식을 회귀분석을 통해 구해 보면 아래의 식과 같다.

$$\phi_f = 0.119p \text{ (}\times 10^{-2} \text{ rad)} \text{ for } p \leq 15.75 \quad (4)$$

$$s = 0.102p \text{ (mm)} \text{ for } p \leq 15.75 \quad (5)$$

횡수축변형 추정식 (5)로부터는 단층 V-개선 맞대기 용접으로 인한 횡수축 여유를 정량적으로 결

정할 수 있으며, 수축치 관리에도 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

Fig. 8은 각변형과 횡수축변형에 대한 간이 예측 모델에 의한 결과와 수치해석 결과를 비교한 것인데, 다층 V-개선 맞대기 용접의 경우와 마찬가지로 식 (4)과 (5)에 의한 결과는 수치해석 결과와 비교해서 전반적으로 잘 일치한다는 사실을 알 수 있다.

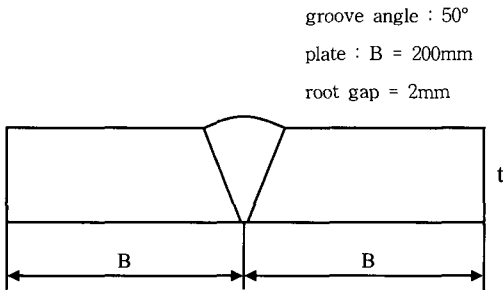


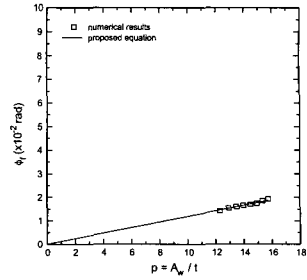
Fig. 7 Dimension of single-pass butt welding model with V-groove

Table 6 Welding conditions for single-pass butt welding models with V-groove

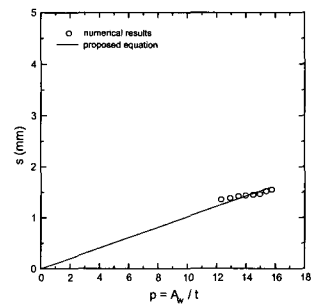
Model	t (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Transverse Area of Weld Metal A_w (mm ²)
VS1	15	860	32	4.5	184.3
VS2	16	910	34	4.3	206.7
VS3	17	950	32	3.7	229.2
VS4	18	980	34	3.7	251.6
VS5	19	1020	34	3.5	275.3
VS6	20	1040	36	3.5	299.0
VS7	21	1080	36	3.3	322.7
VS8	22	1100	38	3.3	346.4

Table 7 Welding deformations by numerical simulation

Model	Heat Input Parameter $p = A_w/t$	Angular Distortion ϕ_f ($\times 10^{-2}$ rad)	Transverse Shrinkage s (mm)
VS1	12.29	1.423	1.352
VS2	12.92	1.536	1.382
VS3	13.48	1.596	1.418
VS4	13.98	1.650	1.430
VS5	14.49	1.694	1.443
VS6	14.95	1.740	1.458
VS7	15.37	1.857	1.515
VS8	15.75	1.918	1.546



(a) angular distortion



(b) transverse shrinkage

Fig. 8 Simple prediction model for single-pass butt welding model

5. 결론

본 연구의 목적은 V-개선 맞대기 용접변형에 대한 간이 예측 모델을 유도하는 일인데, 이를 위하여 다수의 모델에 대하여 용접조건과 판 두께를 변화시켜 가면서 용접변형실험과 열탄소성해석을 수행한 결과, 아래와 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

1. 본 논문에서는 다수의 실험 모델에 대한 용접변형실험과 열탄소성해석을 수행하였고, 이로부터 맞대기 용접변형해석 절차의 타당성을 검증할 수 있었다. 한편 V-개선 맞대기 용접의 경우에는 판 두께가 두꺼워지면 용접금속의 양이 층수의 증가와 함께 증가하기 때문에 각변형과 횡수축변형은 오히려 크게 증가한다는 사실을 알 수 있었다.

2. 본 연구에서는 V-개선 맞대기 용접변형에 대한 대표적인 간이 예측 모델인 각변형과 횡수축변형 추정식을 열탄소성해석을 수행하여 구하였다. 또한 수치해석 결과 및 실험 결과와 간이 예측 모

델에 의한 결과를 비교하여 제시된 간이 예측 모델의 정당성을 확인하였다.

3. 본 논문에서 제시한 V-개선 맞대기 용접변형에 대한 간이 예측 모델은 향후 3차원 곡 블록의 용접변형 예측을 위한 간이 해석법의 하중조건을 산정하는데 유용하게 이용할 예정이며, 이의 장점으로서는 실제 현장에서 사용하는 용접방법과 용접조건을 기준으로 입열량 계수를 선정하여 용접변형 추정식을 유도하였다는 점을 들 수 있다.

참 고 문 헌

- 김상일, 1999, 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위 논문
- 김상일(a), 2003, “필릿 용접변형에 대한 간이 예측 모델 개발,” 대한조선학회 논문집, 제40권, 제1호, pp. 49-56.
- 김상일(b), 2003, “필릿 용접된 거더와 중통재 부재의 용접변형 예측,” 대한조선학회 논문집, 제40권, 제1호, pp. 57-62.
- 방한서, 1990, “유한요소법에 의한 2차원 비정상 열전도해석,” 대한조선학회 논문집, 제27권, 제4호, pp. 43-50.
- 장창두, 서승일, 1994, “용접 조립보의 변형 예측에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제31권, 제3호, pp. 145-153.
- 장창두, 이창현, 2000, “선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제37권, 제2호, pp. 127-136.
- 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.
- 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.
- Ijichi, M. et al. 1985, “Computer Application to Accuracy Control in Hull Construction,” Proceedings of ICCAS'85, pp. 475-484.
- 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., Murakawa, H., Gu, S., Okumoto, Y. and Ishiyama, M., 1994, “Simulation of welding deformation for accurate ship assembling(3rd report),” Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 176, pp. 341-350.



< 김 상 일 >