

필릿 용접변형에 대한 간이 예측 모델 개발

김상일^{†*}

대우조선해양(주) 선박해양구조연구팀*

Development of Simple Prediction Model for Fillet Welding Deformation

Sang-Il Kim*

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

Abstract

The welding deformation of a hull structure in the shipbuilding industry 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 is aimed at deriving the simple prediction model for fillet welding deformations. For this purpose, the thermal elasto-plastic analysis varying the welding conditions and plate thickness has been performed. On the basis of numerical results, the formulae for angular distortion and transverse shrinkage have been derived through the regression analysis. Experimental work has been also carried out to clarify the validity of numerical results. It has been found that the numerical results show a good agreement with those of experiments.

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

용접 후 그 크기를 줄이는 비용이 큰 비중을 차지하고 있다.

조선산업에 있어서 향후 숙련공들의 감소와 3-D 작업 기피 현상으로 인한 노동력의 부족을 타파하기 위해서는, 자동화와 기계화를 가속화시키는 것이 매우 중요하다. 선박의 블록 조립 자동화와 기계화를 실현하기 위해서는, 어떤 임계 한계 내에서 블록의 허용 오차(tolerance)를 유지하는 것이 반드시 필요하다. 따라서 선행 조립 단계에서의 고수준의 정도 제어가 매우 중요하게 된다.

현재 선박의 블록 조립 공정은 절단, 굽힘, 용접, 응력 완화 및 곡직 공정으로 구성되어 있어, 공정 대부분이 가열 및 냉각을 수반하는 열공정을 포함하고 있다. 이러한 열공정들 중에서도 용접으로 인한 잔류변형은 조립 단계 별로 반드시 발생하게 되는데, 각 조립 단계에서 발생하는 이러한 기하학적 부정확성은 자동화와 기계화의 도입을 방해하고 있으며, 다음 조립 단계에서의 취부 작업 시 부가적인 교정 작업을 초래하여 전체 취부 작업 공수를 증가시키는 요인이 된다.

컴퓨터의 급속한 발달로 인해서, 과거 수십년 동안 주로 연구용으로 사용된 열탄소성해석(thermal elasto-plastic analysis)이 실제 용접문제의 해결에 있어서 유용한 도구가 되고 있다. 이것의 주된 내용은 온도분포와 잔류응력 및 변형의 계산이다. 용접문제에서 열탄소성문제는 주로 유한요소법의 수치해석법을 이용하여 다루어 왔으며(Fujita 등 1972, 방한서 1990, Ueda 등 1992, 장창두 등 1994, 김상일 1999, 장창두 등 2000, Kim 등 2002). 만일 수치해석이 위에서 언급된 여러 열공정들로 인한 변형을 예측하는데 유용한 도구라는 것이 입증된다면, 용접변형을 최소화할 수 있는 최적의 방법이 다양한 수치시뮬레이션을 통해서 각 조립 단계 별로 제시될 수 있을 것이다.

본 논문의 목적은 필릿 용접변형에 대한 간이 예측 모델을 유도하는 것이다. 이를 위하여 다수의 모델에 대하여 용접조건과 판두께를 변화시켜 가면서 열탄소성해석을 수행하였고, 이러한 결과를 토대로 각변형과 횡수축변형을 정도 높게 예측할 수 있는 간이 예측 모델을 회귀분석을 통해 유

도하였다. 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

용접 중에 일어나는 현상을 이론적으로 파악하기 위해서는 열탄소성문제를 풀어야 한다. 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 인자들이 있어서, 이들의 효과를 반영하여 해석하기에는 방대한 계산 시간이 필요하다.

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, 열전달 해석을 통하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 각 time step에서 계산한 다음, 이 결과를 열하중으로 입력하여 열탄소성해석을 수행함으로써 용접변형을 계산하였다.

3. 용접변형에 대한 수치해석

본 장에서는 필릿 용접에 대한 해석 모델을 만들어 먼저 열전달해석을 수행하였고, 그 결과인 온도분포를 하중조건으로 하여 열변형해석을 수행

하였다. 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 검증에 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 3차원 고체 요소를 이용하였다.

열전달해석 시에는 모든 열전달 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였으며, 상변화가 일어나는 동안의 열전달 현상을 구현할 수 있는 잠열(latent heat)의 효과를 고려하였다. 경계조건으로는 해석 모델의 모든 면에서 대류로 인한 열손실이 있다고 가정하여 대류경계조건을 부가하였고, 대기의 온도는 20℃로 가정하였다.

용접비드가 쌓이는 현상을 수치적으로 모델링하는 방법은, 생성되는 요소에 표면열속을 가하는 방법, 체적열속을 가하는 방법, 절점온도를 주는 방법 등이 있는데, 본 해석에서는 생성되는 비드면에 표면열속을 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 사용하였다. 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 같으

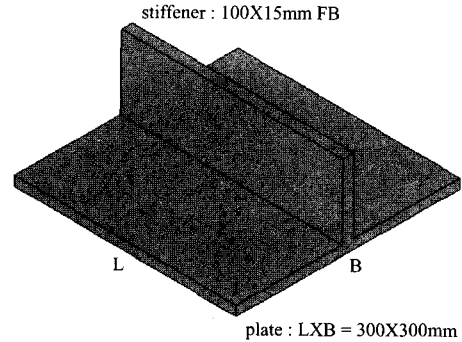


Fig. 1 Dimension of fillet welding model

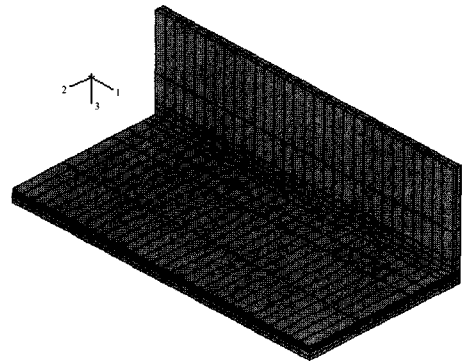


Fig. 2 Finite element model for Model-F5

Table 1 Welding conditions

Model	t (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Heat Input Q (cal/mm)	Heat Input Parameter $p \approx Q/t^{1.5}$
F1	7	250	28	7.8	214.5	11.6
F2		290	30	5.8	357.9	19.3
F3	8	260	30	6.7	280.8	12.4
F4		280	32	5.8	368.6	16.3
F5	13	280	32	6.7	322.6	6.9
F6	15	260	32	6.7	299.5	5.2
F7		270	32	5.8	355.5	6.1
F8	18	260	32	6.7	299.5	3.9
F9		280	32	6.7	322.6	4.2
F10		270	32	5.8	355.5	4.7

며, 용접조건은 Table 1에 열거된 바와 같다. 이 때의 용접조건은 4~4.5mm의 각목을 유발하는 용접조건이며, 사용된 용접방법은 FCAW(flux cored arc welding)이고, 사용된 재료는 연강이다.

본 절에서는 Table 1에 있는 Model-F5에 대한

열전달해석 결과를 필릿 용접 시의 과도적인 온도 분포의 전형적인 예로 제시하고자 하였으며, 열원의 출발점인 원점에서 용접선 방향, 폭 방향 및 모재 두께 방향으로의 좌표는 각각 1, 2, 3(x, y, z)으로 정의하였다.

Fig. 2는 Model-F5의 유한요소모델을 보여 주고 있으며, Fig. 3은 여러 time step에 대한 용접 비드를 따라서의 과도적인 온도분포를 보여 주고 있는데, 열원이 원점에 위치해 있는 초기에는 단부 효과로 인하여 최고 온도가 2270°C에 가까운 과도적인 응답을 보이고 있으나, 열원이 해석 모델의 중앙부 쪽으로 이동하게 되면 거의 동일한 형태의 온도분포를 유지하는 정상 상태를 나타낼 수 있다. 정상 상태에서의 최고 온도는 약 1510°C 정도이다. 열원이 판의 끝단에 도달하게 되면, 초기 상태와 마찬가지로 단부 효과로 인하여 과도적인 응답을 보인다. Fig. 4는 판의 중앙부인 x=150mm에서 time step=12, 24, 36sec에 대한 y-방향으로의 과도적인 온도분포를 보여 주고 있는데, time step=24sec일 때의 폭 방향으로의 온도 편차는 꽤 크지만, 열원이 지나간 후인 time step=36sec에서의 폭 방향으로의 온도분포는 용접부 근방에서만 약간의 차이를 보일 뿐 거의 균일한 분포 형상을 보인다. Fig. 5는 x=150mm에서 time step=12, 24, 36sec에 대한 z-방향으로의 과도적인 온도분포를 보여 주고 있는데, 열원이 지나간 후인 time step=36sec에서의 두께 방향으로의 온도는 250°C 정도로 거의 일정하다. 이것은 판 두께가 모델의 폭과 길이에 비하여 상대

적으로 작기 때문이다. Fig. 6은 Model-F5의 3차원적인 온도분포를 보여 주고 있는데, 필릿 용접으로 인한 열영향부는 용접선을 중심으로 상대적으로 좁은 범위에 한정되어 있음을 알 수 있다.

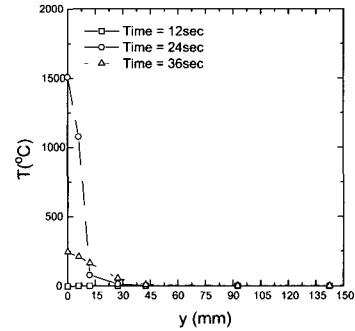


Fig. 4 Transient temperature distribution in y-direction

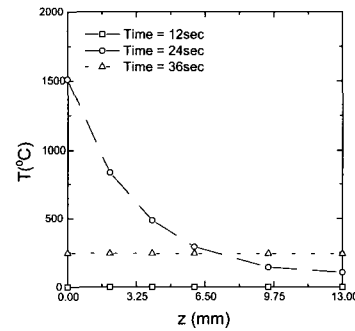


Fig. 5 Transient temperature distribution in z-direction

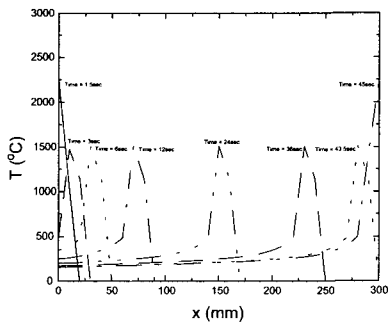
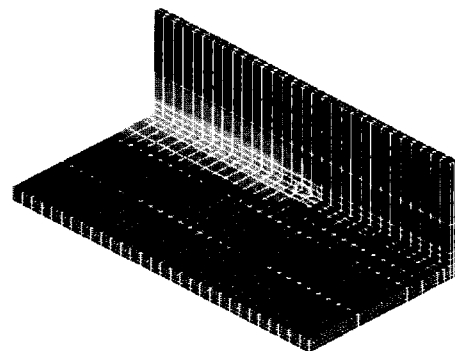
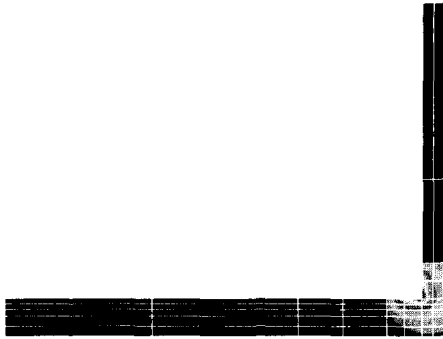


Fig. 3 Transient temperature distribution in x-direction



(a) overall temperature contour



(b) temperature contour at x=150mm

Fig. 6 Temperature contour for Model-F5 at time=24sec

3.3 열탄소성 해석

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

Fig. 7과 8은 용접 후 정상 상태(20°C)일 때의 Model-F5의 3차원 변형 형상과 최종적인 용접변형의 분포를 보여 주고 있는데, 최대 변위는 2.85mm로 나타났으며, 최대 각변형이 발생하는 횡단면의 위치는 용접선의 끝단이다. Table 2는 Table 1에 있는 실험 모델에 대한 각변형에 대한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교한 것인데, 열탄소성해석에 의한 수치해석 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하며, 이로부터 본 3차원 필릿 용접변형 해석 절차는 타당성이 있다는 사실을 알 수 있다. 본 실험 결과와 수치해석 결과에 의하면, 각변형이 최대로 발생하는 입열량 계수의 값은 $p = 12.5$ 인데, 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 입열량을 일정하게 유지하고 판 두께를 변화시키면서 필릿 용접을 할 때, $p > 12.5$ 의 경우에는 판 두께가 얇아 두께 방향으로의 온도 구배가 작아지므로 각변형은 감소하고, $p < 12.5$ 의 경우에는 판 두께가 두꺼워 두께 방향으로의 온도 구배는 크지만 상대적으로 변형에 대한 저항력이 증가하기 때문에 각변형은 감소한다. 즉, 필릿 용접으로 인한 각변형은 입열량과 판 두께의 상관관계에 따라 그 크기가 결정된다는 것을 알 수 있으며, 변형이 문

제가 되는 용접 구조물에서는 각변형이 최대로 발생하는 조건($p = 12.5$)을 피하여 용접시공조건을 결정할 필요가 있다는 사실을 알 수 있다.

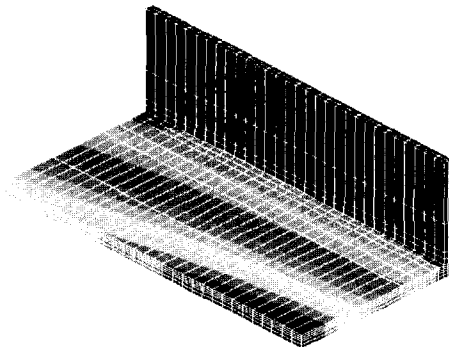
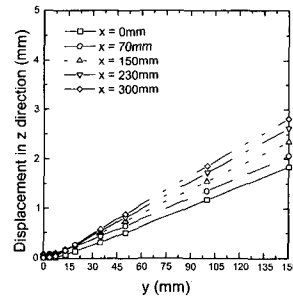
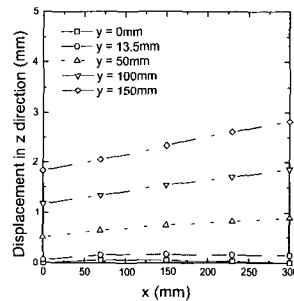


Fig. 7 Simulation result for Model-F5



(a) transverse section



(b) longitudinal section

Fig. 8 Computed out-of-plane deformation for Model-F5

Table 2 Comparison of numerical result with experimental result

Model	Experimental Results ($\times 10^{-2}$ rad)	Numerical Results ($\times 10^{-2}$ rad)	Ratio = Exp./Num.
F1	2.210	1.790	1.235
F2	1.585	1.421	1.115
F3	2.255	1.819	1.240
F4	1.965	1.672	1.175
F5	1.750	1.613	1.085
F6	1.245	1.195	1.042
F7	1.365	1.428	0.956
F8	0.830	0.847	0.980
F9	0.935	0.961	0.973
F10	0.915	1.054	0.868

Exp. : Experimental Result, Num. : Numerical Result

4. 간이 예측 모델

본 장에서는 3장에서 제시한 정도 있는 열탄소 성해석법을 토대로 필릿 용접변형에 대한 대표적인 간이 예측 모델인 각변형과 횡수축변형 추정식을 구하였다. 또한 수치해석 결과 및 실험 결과와 간이 예측 모델에 의한 결과를 비교하여 제시된 간이 예측 모델의 정당성을 확인하였다.

Gravity 용접을 이용한 1층 필릿 용접 시의 각변형 추정식(Watanabe 등 1956)은 아래의 식과 같다.

$$\phi_f = 0.36 \cdot m^{1.6} \cdot \exp(-2.8m) \text{ (rad)} \quad (1)$$

여기서, $m = \frac{I}{t^2 v} (\times 10^{-3})$: 입열량 계수

I : 아크전류(A)
 v : 용접속도(cm/sec)
 t : 판 두께(cm)

이로부터 입열량 계수의 함수로 1층 필릿 용접 시의 각변형 추정식의 표현이 가능하다는 사실을 알 수 있으며, 그 함수 형태 또한 미리 짐작할 수 있다. 하지만, 입열량 계수를 정의할 때 용접조건

Table 3 Welding deformations by numerical simulation

Model	Angular Distortion ϕ_f ($\times 10^{-2}$ rad)	Transverse Shrinkage s (mm)
F1	1.790	0.238
F2	1.421	0.492
F3	1.819	0.320
F4	1.672	0.458
F5	1.613	0.302
F6	1.195	0.244
F7	1.428	0.298
F8	0.847	0.200
F9	0.961	0.228
F10	1.054	0.252

중에서 아크전압을 고려하지 못했는데, 본 논문에서는 이의 단점을 보완하기 위해 입열량 계수 정의 시에 모든 용접조건을 고려하여 각변형 추정식을 유도하였다.

본 해석 모델의 크기는 Fig. 1에 보여진 바와 같으며, 이 때의 용접조건은 Table 1에 열거된 바와 같다. Table 3은 각변형과 횡수축변형에 대한 수치해석 결과를 보여 주고 있으며, 이를 토대로 1층 필릿 용접 시의 간이 예측 모델인 용접변형 추정식을 회귀분석을 통해 유도해 보면 아래의 식과 같다.

$$\phi_f = 1.243 \cdot p^{1.894} \cdot \exp(-0.165p) \quad (\times 10^{-3} \text{ rad}) \quad (2)$$

$$\frac{s}{t} = 0.330p (\times 10^{-2} \text{ mm/mm}) \quad (3)$$

여기서, ϕ_f : 각변형(rad)
 s : 횡수축변형(mm)

$$p = \frac{Q}{t^{1.5}} \text{ : 입열량 계수}$$

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

I : 아크전류(A)

V : 아크전압(V)
 v : 용접속도(mm/sec)
 t : 판 두께(mm)

식 (2)와 (3)은 기존의 용접변형 추정식들 (Watanabe 등 1956, Satoh 등 1976)과 그 경향 측면에서 유사한 형태를 갖는다는 사실을 알 수 있다. 한편 수치해석 결과에 의거하여 유도한 횡수축변형 추정식 (3)으로부터는 필릿 용접으로 인한 횡수축 여유를 정량적으로 결정할 수 있으며, 수축치 관리에도 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

Fig. 9는 각변형과 횡수축변형에 대한 간이 예측 모델에 의한 결과와 수치해석 결과를 비교한 것인데, 식 (2)와 (3)에 의한 결과는 수치해석 결과와 비교해서 매우 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 10은 3.3절의 Table 2에 있는 실험 결과와 각변형에 대한 간이 예측 모델을 비교한 것인데, 식 (2)에 의한 결과는 실험 결과와 비교해서도 전반적으로 좋은 추정 결과를 준다는 사실을 알 수 있다.

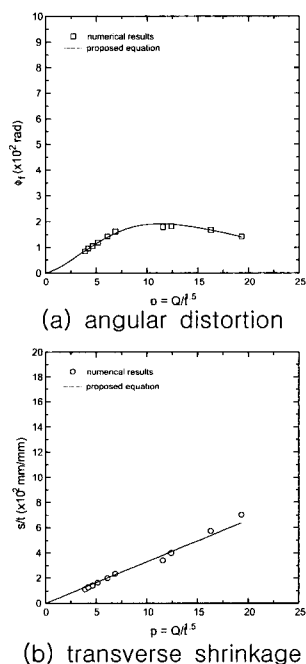


Fig. 9 Comparison of present proposed equations with numerical results

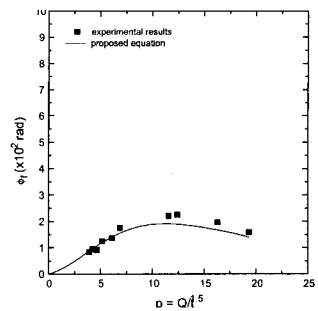


Fig. 10 Comparison of present proposed equations with experimental results

저자에 의해 제시된 추정식은 최근에 고능률 용접법으로 선박 및 각종 철구조물에 널리 적용되고 있는 FCAW를 사용하여 입열량과 판 두께를 변화시켜 가면서 수행한 열탄소성해석 결과를 토대로 $Q/t^{1.5}$ 를 입열량 계수로 하여 유도한 것이다. 이때 입열량 계수 p 를 이렇게 선택한 이유는 판 두께 t 의 승수가 1.5일 때의 각변형 ϕ_f 와 계수 p 사이의 상관관계가 가장 좋기 때문이다.

5. 결론

본 연구의 목적은 필릿 용접변형에 대한 간이 예측 모델을 유도하는 일인데, 이를 위하여 다수의 모델에 대하여 용접조건과 판두께를 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 용접변형해석 절차의 타당성을 검증할 수 있었다. 한편 필릿 용접의 경우에는 각변형이 최대로 발생하는 입열량 계수의 값이 $p=12.5$ 인데, 이는 변형이 문제가 되는 용접 구조물에서는 각변형이 최대로 발생하는 조건($p=12.5$)을 피하여 용접시공조건을 결정할 필요가 있다는 사실을 의미한다.
2. 본 연구에서는 필릿 용접변형에 대한 대표적인 간이 예측 모델인 각변형과 횡수축변형 추정식을 열탄소성해석을 수행하여 구하였다.

- 또한 수치해석 결과 및 실험 결과와 간이 예측 모델에 의한 결과를 비교하여 제시된 간 이 예측 모델의 정당성을 확인하였다.
3. 본 논문에서 제시한 간이 예측 모델은 향후에 실구조물의 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

- 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
- 방한서, 1990, 유한요소법비정상 열전도해석, 대한조선학회논문집, 제27권, 제4호, pp.43-50
- 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
- 장창두, 서승일, 1994, 용접 조립보의 변형 예측에 관한 연구, 대한조선학회논문집, 제31권, 제3호, pp.145-153
- 김상일, 1999, 선체 구조의 용접변형 제어법 개발, 울산대학교 공학박사 학위 논문
- 장창두, 이창현, 2000, 선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구, 대한조선학회논문집, 제37권, 제2호, pp.127-136
- 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
- Watanabe, M. and Satoh, K., 1956, Control of angular distortions due to welding conditions in T-fillet welding joints—shrinkage distortion in welded joints(2nd report)—, Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 25, No. 6, pp.343-348
- Satoh, K. and Terasaki, T., 1976, Effect of welding conditions on residual stress distributions and welding deformations in welded structural materials, Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 45, No. 1, pp.42-53



< 김 상 일 >