

간이 해석법을 이용한 실구조물의 맞대기 용접변형 예측
Prediction of Butt Welding Deformation in Actual Plate Structure
Using Simplified Analysis Method

김 상일^{(1)*}, 조 용관⁽²⁾

(1) 대우조선공업(주) 시험평가연구팀

(2) 대우조선공업(주) 생산혁신팀

1. 서언

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.

용접변형은 형상 오차를 발생시키게 되는 면외변형과 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 각변형, 횡수축변형만을 고려하여 실구조물의 맞대기 용접시에 발생하는 변형을 정량적으로 예측하고자 하였다.

본 연구에서는 용접 후 잔류변형에 대한 기본적인 물리적 현상에 기초하여 맞대기 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 실구조물의 조립시에 발생하는 맞대기 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다.

본 논문에서는 실제 현장에서 사용하는 용접방법과 용접조건을 기준으로 하여 유도한 간이 예측 모델을 이용하여 대상 모델에 대한 하중조건을 산정하였고, 이를 토대로 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 실구조물의 다층과 단층 V형 홈 맞대기 용접시에 발생하는 변형 양상을 정량적으로 규명하였다.

2. 간이 예측 모델

2.1 다층 V형 홈 맞대기 용접

용접변형해석 결과를 토대로, FCAW(flux cored arc welding)를 이용한 다층 V형 홈 맞대기 용접시의 간이 예측 모델인 용접변형(평균 각변형과 횡수축변형) 추정식을 회귀분석을 통해 구해 보면 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_{f_0} &= 0.145p (\times 10^{-2} rad) \quad \text{for } p \leq 9.28 \\ &= -2.968 + 0.465p (\times 10^{-2} rad) \quad \text{for } 9.28 \leq p \leq 15.40 \end{aligned} \quad (1)$$

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

여기서, ϕ_{f_0} : 평균 각변형량(rad)

s : 횡수축량(mm)

$p = \frac{A_w}{t}$: 입열량 계수(mm)

A_w : 용착금속의 횡단면적(mm²)

t : 판 두께(mm)

수치해석 결과에 의거하여 유도한 횡수축변형 추정식 (2)로부터는 다층 V형 홈 맞대기 용접으로 인한 횡수축 여유를 정량적으로 결정할 수 있으며, 수축치 관리에도 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

2.2 단층 V형 홈 맞대기 용접

용접변형해석 결과를 토대로, FGB(flexible glassfiber backing) 용접을 이용한 단층 V형 홈 맞대기 용접시의 간이 예측 모델인 용접변형(각변형과 횡수축변형) 추정식을 회귀분석을 통해 유도해 보면 아래의 식과 같다.

$$\phi_f = 0.119p (\times 10^{-2} rad) \text{ for } p \leq 15.75 \quad (3)$$

$$s = 0.102p (mm) \text{ for } p \leq 15.75 \quad (4)$$

횡수축변형 추정식 (4)로부터는 단층 V형 홈 맞대기 용접으로 인한 횡수축 여유를 정량적으로 결정할 수 있으며, 수축치 관리에도 효과적으로 적용될 수 있다.

3. 용접변형 예측을 위한 간이 해석법

본 장에서는 2장에서 기술한 맞대기 용접변형에 대한 간이 예측 모델을 이용하여 대상 모델에 대한 하중조건을 산정하였고, 이를 토대로 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 실구조물의 다층과 단층 V형 홈 맞대기 용접시에 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 평블록을 대상으로 하여 조립시에 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 실구조물의 맞대기 용접변형을 정량적으로 예측하고자 하였다. 두 개의 부재가 맞대기 용접되는 과정은 Fig. 1에 보인 바와 같이 간략화된 등가하중이 작용하는 모델로 치환할 수 있는데, 본 연구에서는 이러한 용접변형을 유발하는 등가하중인 용접선에 수직한 방향으로 작용하는 횡굽힘 모멘트와 횡수축력을 하중조건으로 하여 해석 모델에 작용시키고, 이와 함께 해석 모델의 자중을 고려하여, 선형 탄성 유한요소해석을 수행함으로써 실구조물의 조립시에 발생하는 맞대기 용접변형을 예측하였다.

경계조건으로는 실구조물의 맞대기 용접이 정반 위에서 이루어진다는 사실에 착안하여, 이를 구현하기 위해 해석 모델의 아래 부분에 Rigid Surface를 이용하여 정반(ground)을 모델링하였고, 강체운동(rigid body motion) 방지를 위해서는 해석 모델의 용접 시·종단부 양 끝단을 약한 스프링으로 잡아주었다.

3.2 실구조물의 적용 예

3.2.1 다층 V형 홈 맞대기 용접변형 해석

기하학적 형상의 대칭성을 이용하여, 해석 모델은 대상 모델의 1/2 부분에 대해서만 모델링하였다. 대상 모델의 차원과 유한요소모델은 Fig. 2에 보여진 바와 같으며, 용접조건은 Table 1에 열거된 바와 같은 FCAW가 이용되었다.

Fig. 3은 아래보기 자세 용접시의 자중 고려 여부에 따른 변형 발생 추이를 보여 주고 있는데, 자중을 고려한 경우의 최대 굽힘 변형량의 발생 위치는 $x=850\text{mm}$ 지점이며, 최종적인 변형 형상은 자중 고려 여부에 따라 크게 달라진다는 사실을 알 수 있다.

3.2.2 단층 V형 홈 맞대기 용접

대상 모델의 차원과 유한요소모델은 Fig. 2에 보여진 바와 같으며, 용접조건은 Table 2에 열거된 바와 같은 FGB 용접이 이용되었다.

Fig. 4는 아래보기 자세 용접시의 자중 고려 여부에 따른 변형 발생 추이를 보여 주고 있는데, 자중을 고려한 경우의 최대 굽힘 변형량의 발생 위치는 $x=650\text{mm}$ 지점이며, 최종적인 변형 양상은 다

층 V형 홈 맞대기 용접의 경우와 마찬가지로 자중 고려 여부에 따라 크게 달라진다는 사실을 알 수 있다. Fig. 5는 아래보기 자세 용접시의 용접방법에 따른 변형 발생 추이를 보여 주고 있는데, 용접 변형 측면에서는 FGB 용접을 이용한 단층 V형 홈 맞대기 용접이 FCAW를 이용한 다층 V형 홈 맞대기 용접에 비해 유리하다는 사실을 확인할 수 있다. Fig. 6은 저자에 의한 간이 해석 결과를 Ueda 등에 의한 열탄소성해석 결과와 비교한 것인데, 저자에 의해 추정된 변형 발생 양상은 Ueda 등에 의한 결과와 그 경향 측면에서는 유사하나, 양적으로는 조금 작게 평가된다는 사실을 알 수 있다. 이의 이유로는 용접방법의 특성 차이[Ueda : 다전극을 이용한 FCB(flexible copper backing) 용접, 저자 : 단전극을 이용한 FGB 용접]로 인한 전체 입열량의 차이를 들 수 있다.

4. 결론

본 연구의 목적은 실구조물의 V형 홈 맞대기 용접시에 발생하는 변형 양상을 정량적으로 규명하는 일인데, 이를 위하여 실구조물을 대상으로 다양한 수치해석을 수행한 결과, 다음과 같은 몇 가지 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

- (1) 본 논문에서는 V형 홈 맞대기 용접변형에 대한 대표적인 간이 예측 모델인 각변형과 횡수축변형 추정식을 용접변형해석 결과를 토대로 회귀분석을 통해 유도하였다.
- (2) 본 연구에서 제시한 V형 홈 맞대기 용접변형에 대한 간이 예측 모델은 향후 3차원 곡블록의 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.
- (3) 본 논문에서는 실구조물의 맞대기 용접변형 예측을 위한 간이 해석법을 제시하였다. 이를 토대로 실구조물의 V형 홈 맞대기 용접시에 발생하는 변형 양상을 정량적으로 규명하였는데, 다층과 단층 V형 홈 맞대기 용접시의 최종적인 변형 형상은 자중 고려 여부에 따라 크게 달라진다는 사실을 알 수 있다. 하지만, 용접변형 측면에서는 FGB 용접을 이용한 단층 V형 홈 맞대기 용접이 FCAW를 이용한 다층 V형 홈 맞대기 용접에 비해 유리하다는 사실을 확인할 수 있다.

Table 1 Welding conditions for multi-pass butt welding model

Welding Process	Plate Thickness t (mm)	Groove Angle (degree)	No. of Pass	Root Gap (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Heat Input Q (cal/mm)
FCAW	16	40	4	4	260	32	7.5	266

Table 2 Welding conditions for single-pass butt welding model

Welding Process	Plate Thickness t (mm)	Groove Angle (degree)	No. of Pass	Root Gap (mm)	I (A)	V (V)	v (mm/sec)	Heat Input Q (cal/mm)
FGB	16	50	1	2	910	34	4.3	1714

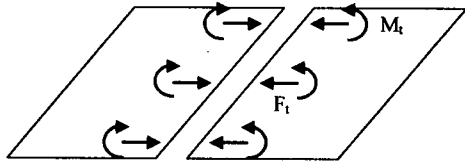


Fig. 1 Simplified model of butt welding process

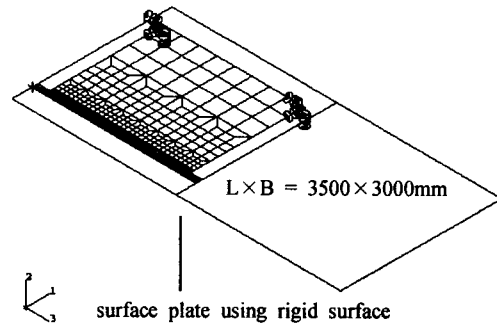


Fig. 2 Finite element model for butt welding model

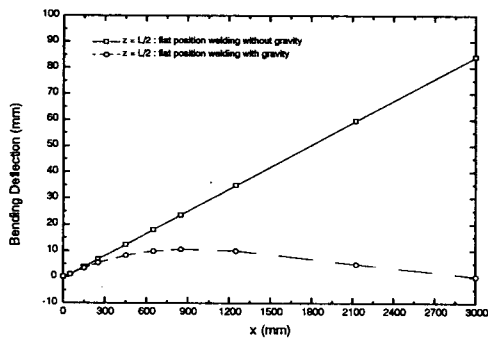


Fig. 3 Bending deflection according to the gravity

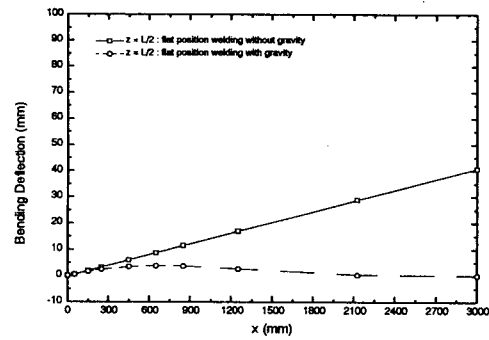


Fig. 4 Bending deflection according to the gravity

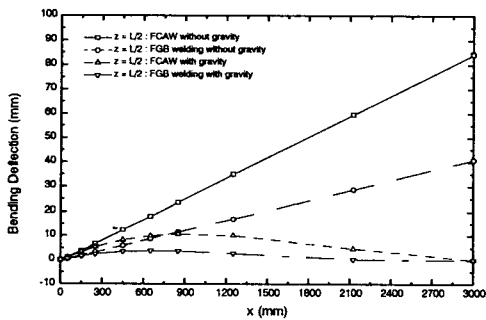


Fig. 5 Bending deflection according to the welding process

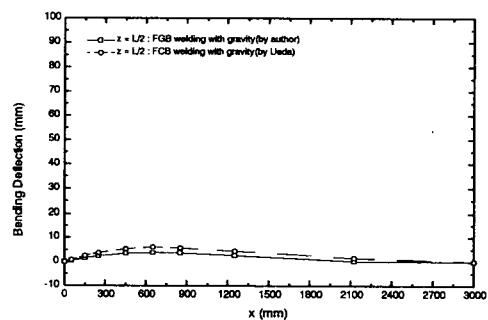


Fig. 6 Comparison of numerical results by Ueda with those by author