

# 등가하중법을 이용한 선체구조의 용접변형 예측 시스템

## Prediction System of Welding Deformation of Ship Structures using Equivalent Load Method

박정웅\*, 이재원\*, 전민성\*\*

\* 삼성중공업 거제조선소 용접도장연구

\*\* 삼성중공업 거제조선소 구조연구

### 1. 서론

최근 고스트 절감, 자동화장비 도입에 의한 생산성향상을 위해 선각의 정도가 절실히 요구되고 있다. 선각의 정도는 크게 현장의 작업조건과 용접변형에 의해 영향을 받는다. 정도에 미치는 현장의 작업조건은 부재의 이동, Turn-Over, 적재조건, B/H조건 등이며 이러한 것은 현장에서 꾸준한 개선 활동을 통해 방지 및 교정이 이루어지고 있다. 한편 용접에 의한 변형은 용접법, 용접조건, 용접순서, 구속상태 등에 의해 다르게 나타나므로 정도에 영향을 받는다. 따라서 이러한 용접에 의한 변형을 예측하기 위해 초기에는 실험적 연구와 해석적연구 [1]가 진행되었다. 그러나 이러한 연구는 다양한 용접조건에 의한 변형을 예측하기 위해 많은 실험이 요구되며, 복잡한 형상이나 외적구속에 대한 고려를 할 수 없다는 단점이 있다. 한편, 컴퓨터의 발전과 함께 용접현상을 열탄소성해석 [2]을 통해 용접변형과 잔류응력을 예측하게 되었다. 이러한 수치해석적 방법은 고도의 해석기술과 과도한 계산시간 소요되며, 특히 대형구조물인 경우 Super Computer를 사용하여도 현실적으로 적용하지 못할 정도의 많은 시간이 요구되는 문제점이 있다. 따라서 최근 실험에 의한 변형량 및 고유변형도법으로부터 용접에 의해 발생하는 등가하중을 유도하여 탄성해석법 [3]을 이용한 용접변형 예측방법이 발표되고 있다. 등가하중법은 실험에 의해 구한 최종 변형량으로부터 용접변형을 발생시키는 등가하중을 구해 탄성해석으로 용접변형을 예측하는 방법이다. 또한 고유변형도법은 용접시 발생하는 열탄소성 과정을 생략하고 최종상태의 소성변형도를 고유변형도로 정의하고 이를 이용하여 탄성해석으로 변형을 예측한다. 이방법은 탄성해석을 수행하므로 대형구조물과 같은 부재에도 적용이 가능하다. 그러나 실제 용접현상을 생략하고 최종상태의 값(변형량 및 고유변형도)을 이용하고, 용접에 의한 열탄소성거동시 외적구속에 대한 고려를 하지 않으므로 해석결과의 신뢰성에 문제가 대두되고 있다. 그래서 저자는 전보 4]에서 용접시 발생하는 열탄소성거동에 미치는 구속의 영향을 고려한 각변형을 예측하는 등가하중방법을 제시하였고 그 신뢰성을 실험을 통해 검증하였다.

본 연구에서는 전보4]에 이어 용접에 의해 발생하는 횡수축에 대해 구속도를 고려한 등가하중법을 제시하고 실Block에 대해 적용하여 실제측값과 비교하여 그 신뢰성을 검증하였다. 또한 용접전 취부 과정을 수치해석으로 표현하여 실제 현장에 맞도록 하였다.

### 2. 용접부 역학적 모델링 및 횡수축 구속계수

#### 2.1 용접부 역학적 모델링

구속이 없는 상태인 경우 용접에 의해 발생하는 변형의 크기는 역학적문제에 있어서 외력에 상당하는 온도분포에 의해 결정된다. 이러한 온도분포는 구조물이 임계크기이상 되면 용접에 의해 발생하는 온도분포가 준정상상태를 이루어 발생하는 용접변형의 크기도 일정한 값을 갖는다. 따라서 실험에 의해 구한 용접변형량을 등가하중으로 치환하여 용접변형을 재현할 수 있다.

Fig.1은 Butt용접시 용접변형을 유발시키는 등가하중을 적용한 Mechanical Model을 보여 주고 있다. Fig.1(a)과 같이 모재, 용접금속 그리고 열영향부(HAZ)로 구성되어 있는 실제 용접부를 Fig.1(b)와 같이 열영향부의 양끝단에 등가하중을 적용하므로 변형을 재현할 수 있다. 이것은 Fillet용접의 경우도 동일하게 적용된다.

용접에 의한 횡수축에 관한 하중과 변형량의 관계를 식(1)에, 각변형에 대한 굽힘모멘트와 각변형량과의 관계를 식(2)에 보여 주고 있다.

$$F_y = K_\delta \cdot \delta_y \quad \text{-----(1)}$$

$$= E \cdot t \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right) \cdot \delta_y$$

$$M_x = K_\theta \cdot \theta_x \quad \text{-----(2)}$$

$$= \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{L_1}{L_2}\right) \cdot \theta_x$$

여기서  $F_y$ : 등가 횡수축력(N),  $K_\delta$ : 용접부 수축강성(N·mm),  $\delta_y$ : 횡수축량(mm),  $M_x$ : 등가 굽힘모멘트 (N·mm),  $K_\theta$ : 용접부 굽힘강성 (N·mm),  $\theta_x$ : 각변형량 (radian), E: 영계수 (N/mm<sup>2</sup>), t: 부재두께(mm)

이와 같이 자유상태의 구조물인 경우 실험에서 구한 변형량으로부터 등가하중을 구해 용접에 의한 변형은 재현할 수 있다. 그러나 실제 구조물의 경우 용접변형은 동일 용접조건을 사용하더라도 구조물의 크기, 형상, 및 용접순서에 따른 외적구속의 변화에 의해 다르게 나타난다. 따라서 다양한 형상의 구조물에 대해 외적구속도를 고려한 등가하중의 크기를 예측하는 방법이 요구되고 있다.

## 2.2 횡수축 구속계수

여기서는 복잡한 구조물에서 다양한 구속상태가 용접변형에 미치는 영향을 구속계수로 유도하기 위해 실험과 탄성FEM해석을 수행하였다. 전보에서 각변형에 대한 구속계수를 유도하여 소개하였으므로 여기서는 횡수축에 대한 구속계수 유도과정을 소개한다. 각변형에서와 같이 실험에서는 자유상태의 시험편에서 발생하는 횡수축량과 구속재가 있는 시험편에서 발생하는 횡수축량으로부터 구속이 횡수축에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한 탄성FEM해석에서는 시험에 사용한 구속재를 가진 부재를 모델링하여 열영향부 양단에 단위하중을 부가하여 발생한 횡수축량(해석)과 자유상태의 시험편 모델에서 열영향부 양단에 단위하중을 부가하여 발생한 횡수축량(식1)을 비교하였다. 위의 실험과 탄성 FEM 해석을 통해 구한 횡수축량과 구속에 의한 횡수축량을 비교분석하여 횡수축에 미치는 구속의 영향을 구속계수(Fig.2)로 유도하였다. 전보의 각변형에 대한 구속계수와 같이 동일 시험편에 대해 종축은 구속상태의 시험편에서 측정된 횡수축량( $\delta c$ )을 자유상태의 시험편에서 측정된 횡수축량( $\delta f$ )으로 나눈 값이고, 횡축은 동일 구속시험편을 Modelling하여 용접부에 단위하중을 가해 수치해석하여 구한 횡수축량( $\delta uc$ )을 식(1)에 의해 구한 자유상태의 단위하중에 의한 횡수축량( $\delta uf$ )으로 나눈 값이다.

## 3. BLOCK 변형 예측 및 고찰

Fig.3 에 Block의 형상 및 크기를, Fig.4 에 Block을 구성하는 부재의 두께를 보여 주고 있다. 해석시 재료의 물리적 성질인 영계수(E)는, 21000kg/mm<sup>2</sup>, 포아송의 비는 0.3으로 하였다. 경계조건은 해석시 부재의 강제변형이 발생하지 않도록 설정하였다. 등가하중 결정은 Table 1 의 자유상태의 변형량으로부터 결정하였다. 단, 용접선(종)방향 등가하중 계산의 경우 현장의 측정DATA를 이용하여 구하였다.

해석은 용접순서 및 작업순서에 따른 총 5단계로 나누어 실시하였으며 각 단계별 형상을 Fig.5 에 보여 주고 있다. 해석결과와 측정결과를 비교하여 Table 2 에 보여 주고 있다. 폭방향의 결과를 비교하여 보면 중조단계의 변형은 해석결과와 측정결과가 잘 일치하고 있다. 단, 측정결과와 경우 수/미의 구조가 동일함에도 불구하고 다르게 발생(5.5/3.4)하여 측정의 오차가 있다고 생각된다. 또한 대조단계의 변형은 해석결과와 측정결과가 0.9-1.4mm의 차이를 보이고 있으나 대체로 잘 일치한다고 판단된다.

길이방향의 결과를 비교하여 중조단계의 변형은 해석결과와 실험결과와 차이가 0.2mm로 비교적 잘 일치하고 있다. 대조단계에서의 변형은 보면 그 발생량이 작고 해석결과와 측정결과와 차이 ± 0.2mm 이내로 잘 일치한다고 판단된다.

이상으로부터 본 프로그램은 실BLOCK과 같은 크기에서도 적용 가능성을 보여 주었으며 중조단계에서의 수축량은 최대 5.5mm로 발생하고 대조단계의 수축량이 최대 1.4mm 발생하여 중조단계의 수축량 예측 및 관리가 중요하다고 판단된다.

#### 4. 결론

임의의 구속상태에서 용접에 의해 발생하는 변형을 예측하기 위한 구속계수를 고려한 등가하중 결정방법을 제시하고, 실Block에 적용가능성을 검토한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 구속상태의 시험편을 용접했을 때 발생하는 횡수축량과 동일 시험편을 Modelling하여 열영향부 끝단에 단위하중을 가하여 구한 횡수축량과의 상관관계로부터 구속계수를 유도하고 이를 고려한 횡방향 등가하중 결정방법을 제안하였다.
- 2) 본 연구에서 제안한 구속도를 고려한 등가하중 결정방법에 의한 실BLOCK의 해석결과와 실험결과가 잘 일치하여 제안한 등가하중 결정방법이 타당함을 보여 주었다.

#### 참고문헌

- [1] Watanabe, M. and Satoh, S.: Effect of welding conditions on the shrinkage distortion in welded structural materials, Journal of the Japanese welding Society, Vol.40, No.4, 1961.
- [2] Ueda, Y. and Yamakawa, T.: Analysis of thermal elastic-plastic behavior of metals during welding by finite element analysis method, Journal of the Japanese Welding Society, Vol. 42, No.6, 1973.
- [3] Nomoto, T., Takechi, S. and Aoyama, K.: Basic Studies on Accuracy Management System Based on Estimating of Weld Deformations, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 181, 1997.
- [4] 박정웅, 이재원, 고대은: 용접각변형에 미치는 구속도의 영향, 대한용접학회 2000년 추계 학술강연 및 발표개요집, Vol.36

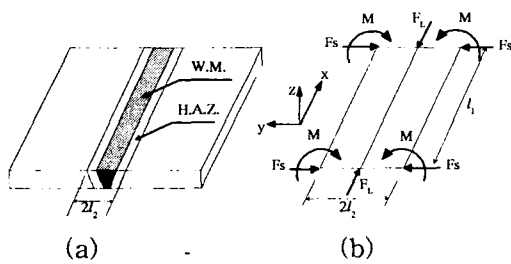


Fig.1 용접부 역학적모델

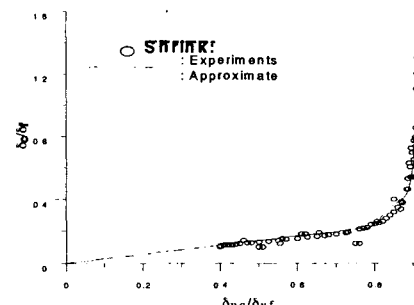


Fig. 2 Butt의 횡수축 구속계수

Table 1 자유상태의 변형량

	각변형량(Rad)	횡수축량(mm)	종방향 변위(mm/m)
Fillet용접	0.0114	0.3	0.193

Table 2 변형결과 및 부재 정보

		중 조 - 초 기 (mm)		대 조 - 초 기 (mm)		골 제 수	각 장 (mm)
		측 정 값 / 해 석 값		측 정 값 / 해 석 값			
폭	수	-5.5	-5.3	-7.3	-5.9	20	6.0
	미	-3.4	-5.2	-5.1	-6.0		
길 이	내 . 상	-4.0	-3.8	-4.5	-4.7	4	6.0 ~ 9.0
	외 . 하	-3.9	-3.8	-5.0	-4.7		

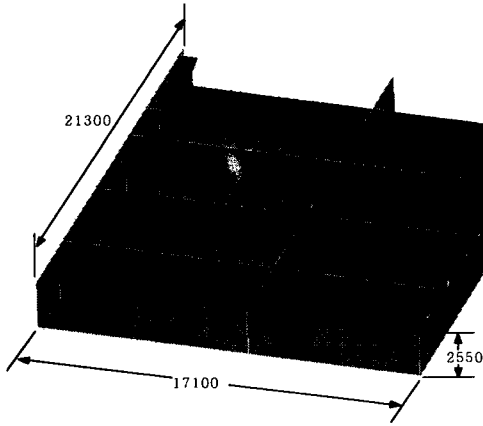


Fig.3 Block 형상 및 치수

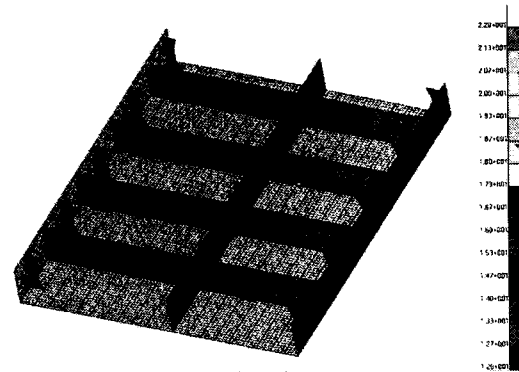


Fig.4 Block의 두께

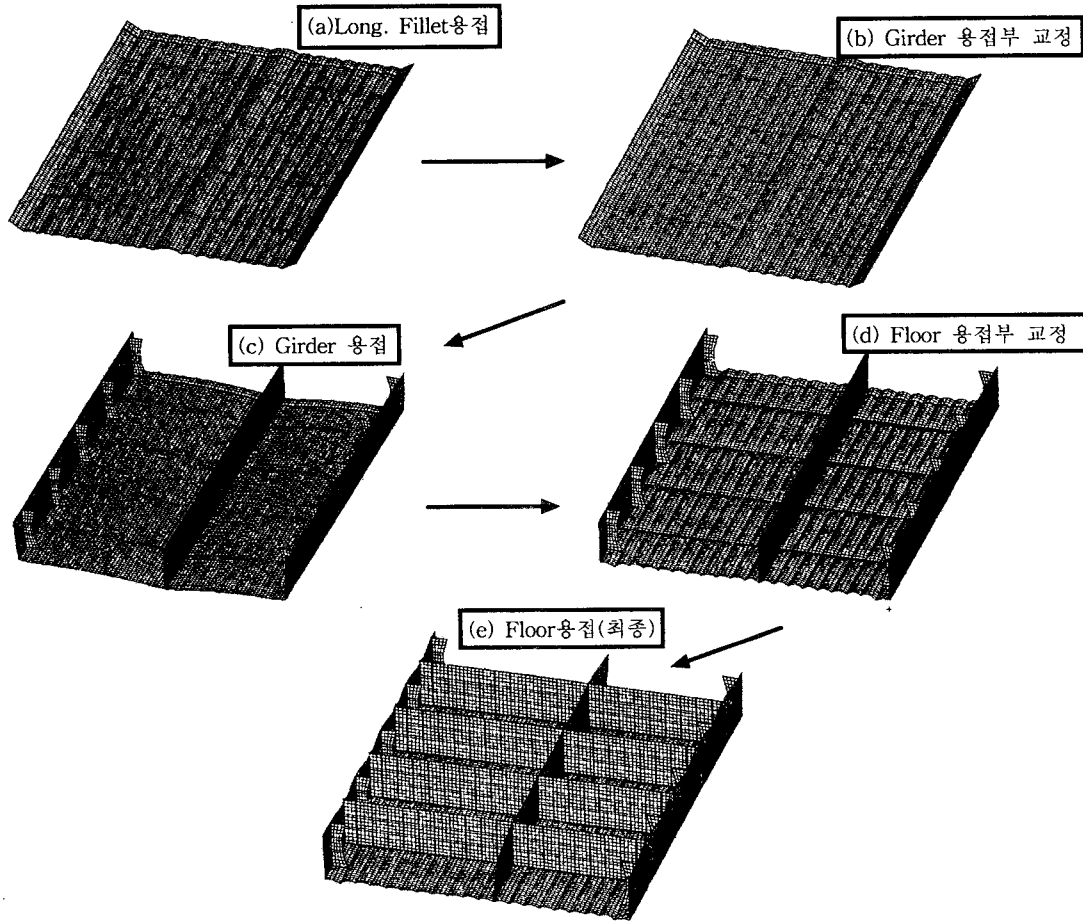


Fig.5 용접순서에 의한 변형 형상