

## 선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구

장창두\*, 이창현\*\*

### A Study on the Prediction and Control of Welding Deformations of Ship Hull Blocks

by

C.D. Jang\* and C.H. Lee\*\*

#### 요 약

선박 건조 시 발생하는 용접변형은 블록의 정도를 떨어뜨리고 교정작업으로 인한 생산성 저하의 요인이 되고 있다. 따라서 설계 단계에서 변형을 최소화 할 수 있는 작업기준을 마련한다면 생산성 증대는 물론 품질의 향상을 가져올 수 있을 것이다. 여기에는 먼저 블록의 조립과정에 따른 변형을 예측할 수 있는 정확하고 효율적인 방법이 마련되어야 한다.

본 논문에서는 고유변형도 이론과 유한요소 해석을 결합한 효율적인 변형예측 기법을 제안하였다. 고유변형도는 간이 열탄소성 해석 결과 최고온도 분포와 구속도에 의해 결정된다. 따라서 용접 열전도 해석과 구조물의 조립과정에 따른 구속도 계산을 수행하여 실제 구조물에 발생하는 고유변형도를 정확히 구하고자 하였다. 이를 이용하여 보강판의 변형 예측을 구현하였고 간단한 선체 블록에 적용할 수 있음을 확인하였다.

#### Abstract

Welding deformations reduce the accuracy of ship hull blocks and decrease the productivity due to correction work. Preparing an error-minimizing guide at the design stage will lead to a high quality as well as high productivity. And a precise method to predict the weld deformation is an essential part of it.

This paper proposes an efficient method to predict complicated weld deformations based on the inherent strain theory combined with the finite element method. The

접수일자 : 2000년 2월 29일, 재접수일자 : 2000년 4월 10일

\*정회원, 서울대학교 조선해양공학과

\*\*정회원, 서울대학교 대학원 조선해양공학과

inherent strain is determined by the highest temperature and the degree of restraint. In order to calculate the inherent strain exactly, it is considered that the degree of restraint becomes different according to the fabrication stages in real structures. A simulation of a stiffened plate shows the applicability of this method to simple ship hull blocks.

## 1. 서론

선체 건조에 있어서 정도관리는 부재가공, 조립, P/E 및 도크 작업에 이르는 일련의 흐름을 원활하게 하는 핵심 기술이다. 특히 도크 내에서의 작업 효율은 블록의 정확성에 좌우되는데, 조립 과정에서 누적되는 여러 가지 변형오차를 교정하기 위한 작업들로 인해 생산성이 저하되고 있다.

이 중 용접변형은 블록의 조립 시 필연적으로 발생하는 것으로서 변형 오차의 가장 큰 원인이 될 뿐 아니라 좌굴 강도를 심각하게 저하시킨다. 따라서 설계단계에서 용접변형을 예측하고 이를 최소화 할 수 있는 작업기준을 마련해야 하는데, 다음과 같은 조건을 만족하는 변형 예측 기법이 필수적으로 요구된다.

- i) 단순 시편의 실험결과와 잘 일치해야 한다.
- ii) 블록의 조립과정에 따른 형상 및 강성의 변화를 고려해야 한다.
- iii) 계산 시간 면에서 효율적이어야 한다.

본 연구에서는 고유변형도 이론과 탄성 유한요소 해석을 결합하였으며, 구조물의 조립 과정에 따른 영향과 기존의 실험결과를 반영함으로써 정확하고 효율적인 변형 예측을 시도하였다.

고유변형도법은 용접 시 일어나는 복잡한 열탄소성 과정을 생략하고 최종적으로 잔류하는 소성 변형도를 고유변형도로 정의하고, 이를 초기 변형도로 가정하여 탄성적으로 변형을 예측하는 방법이다[1]. 이 방법은 탄성 해석만 수행하므로 선체 블록과 같은 대형 구조물의 해석에 이용될 수 있는데, 이를 위해서는 먼저 고유변형도의 크기와 분포를 정확히 결정해야 한다.

고유변형도를 구하기 위해 Murakawa 등[2]은 간이 해석모델을 이용하였고, 최고 온도와 구

속도의 함수로 표현하였다. 그러나 구속도 계산에 있어서 단순 부재의 열탄소성 해석 결과에 의존하므로, 복잡한 구조물에 적용하기에는 한계가 있다. 장 등[3]은 고유변형도 영역을 가정하고 간이 열탄소성 해석에 의해 역학적 용융온도와 구속도의 함수로 표현하였으며, 서 등[4]은 구속도 계산 시 단위 하중법을 이용함으로써 대형 구조물의 변형 해석을 시도하였다.

이러한 기존의 연구를 바탕으로 본 연구에서는 가장 기본적인 블록의 형태인 보강판의 용접변형 예측을 구현하였다. 각 보강재의 용접 시 발생하는 고유변형도는 최고 온도와 구속도에 의해 결정되는데, 보강재가 부착될 때마다 구속도는 변하게 되므로, 이를 고려하기 위해서 각 조립 단계마다 구속도를 계산하였다. 또한 단순 시편에 대한 기존 실험과의 비교를 통해 정확성을 검증하고자 하였다.

## 2. 용접 시 발생하는 고유변형도

용접변형을 유발시키는 고유변형도에는 용접부 근방의 모재에 생기는 잔류 소성변형도(residual plastic strain)와 용접 비드의 수축변형도가 있다. 모재의 경우 용접 열원 근방에서는 온도 상승과 하강을 경험하며 압축의 소성변형도가 발생하고, 용접 비드의 경우는 용융된 상태로 모재에 가해지므로 온도 하강만을 경험하고 이 과정에서 수축변형도가 발생하여 고유변형도 성분이 된다.

일반적으로 용접에 의해 발생하는 고유변형도에는 방향에 따라 6개의 성분이 있지만, 선체 구조물과 같이 판두께에 비해 길이의 치수가 크고, 용접선을 중심으로 대칭인 경우는  $\epsilon_x^*$ 에 의한 종수축, 종굽힘 변형 및  $\epsilon_y^*$ 에 의한 횡수축과 각변형

이 가장 중요한 용접변형이다(Fig.1).

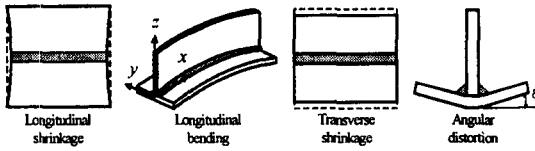


Fig. 1 Types of welding deformations

2.1 고유변형도 계산을 위한 간이 해석 모델  
 용접변형의 발생 과정은 Fig.2와 같은 간이 열탄소성 해석 모델을 통해 간략화 할 수 있는데 [2][4], 고유변형도가 발생하는 용접부는 용접열에 의한 급격한 팽창과 수축을 경험하는 영역으로서 이를 봉으로 모델링하고, 용접부의 변형을 억제하는 인근 영역은 스프링으로 모델링한다.

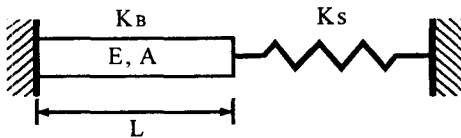


Fig. 2 Simplified elasto-plastic analysis model

봉의 온도 상승과 하강에 따른 팽창과 수축, 이를 구속하는 스프링과의 관계를 따라 발생하는 소성변형도의 이력은 일반적으로 Fig.3과 같이 네 구간으로 구분된다. 1,2구간은 온도 상승기로서 봉의 열팽창을 억제하는 스프링으로 인해 봉에는 압축 응력이 발생하고, 온도가  $T_{y1}$  일 때 압축 항복되어 2구간에서 압축의 소성변형도가 증가한다. 3,4구간은 온도 하강기로서 봉은 수축하므로 인장 응력이 발생하고,  $T_{y2}$  일 때 인장 항복되어 4구간에서 인장 소성변형도가 증가하게 된다. 결국 봉에는  $\epsilon_p^*$  만큼의 압축 소성변형도가 잔류한다.

잔류 소성변형도의 크기는 위와 같이 봉의 온도 이력에 따른 열변형과 이를 구속하는 스프링과의 평형방정식 및 기본적인 구성방정식과 변형도 관계식에 의해 구할 수 있으며 [2], 봉이 도달하는 최고 온도와 구속도의 함수로 표현된다. Fig.4는 최고온도와 구속도의 크기를 변화시켜가며 잔류

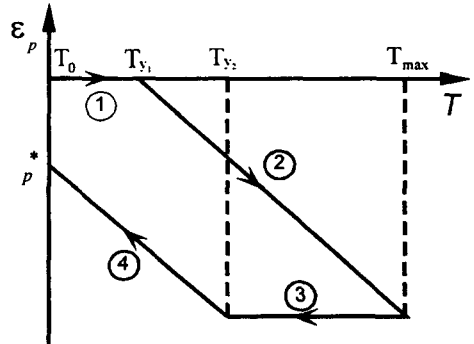


Fig. 3 Thermal history of plastic strain

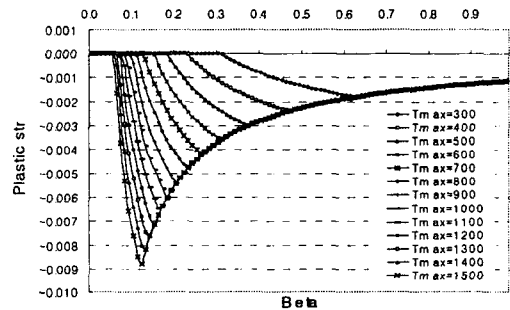


Fig. 4 Residual plastic strain

소성변형도를 계산한 결과이다. 여기서 구속도 (degree of restraint,  $\beta$ )는 봉과 스프링의 강성에 의해 식(1)과 같이 정의되는 계수로서, 구속의 크기가 클수록 1에 가깝다.

$$\beta = \frac{K_S}{K_S + K_B} \quad (1)$$

where,  $K_S$ : 스프링의 강성

$K_B$ : 봉의 강성

변형도 관계식:  $\epsilon = \epsilon_{th} + \epsilon_e + \epsilon_p \quad (2)$

where,  $\epsilon$ : 총변형도(total strain)

$\epsilon_{th}$ : 열변형도(thermal strain)

$\epsilon_e$ : 탄성변형도(elastic strain)

$\epsilon_p$ : 소성변형도(plastic strain)

구성 방정식:  $\sigma = E\epsilon_e \quad (3)$

평형 방정식:  $F_B = F_S \quad (4)$

where,  $F_B$ : 봉이 스프링에 가하는 힘

$F_S$ : 스프링이 봉에 가하는 힘

따라서 용접부에 발생하는 고유변형도는 최고온도 분포와 구속도에 의해 결정된다는 것을 알 수 있고, 이를 위해 다음과 같이 열전도 해석과 구속도 계산을 수행하였다.

2.2 최고 온도 분포

최고 온도 분포를 계산하기 위해 Fig.5와 같이 용접선에 수직한 단면을 취하여 2차원 열전도 해석을 수행하였다. 선체 구조물과 같은 대형 구조물의 경우 용접선 양단에서 발생하는 온도 분포의 천이 현상은 무시할 수 있으므로 2차원 해석모델을 이용하였다. 용접 열원은 정규 분포를 갖는 이동 열속으로 가정하였고, 열원이 단위 길이를 통과하는 동안 단면상의 각 절점에서 경험하는 최고 온도를 구하였다. Fig.6은 비드온 용접에 대한 계산 예이다.

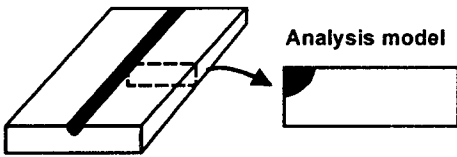


Fig. 5 Thermal conduction analysis model

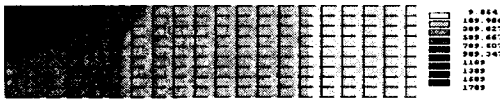


Fig. 6 Highest temperature distribution

2.3 구속도 계산

구속도는 용접부의 열변형을 억제하는 정도를 정량적으로 나타낸 수치로서, 간이 해석모델의 경우 식(1)과 같이 정의된다. 즉, 온도 변화를 경험하는 봉의 강성과 이를 억제하는 스프링의 강성의 조합으로 정의되는데, 이를 용접 구조물에 적용하면 고유변형도가 발생하는 영역의 강성이  $K_B$ , 이 부분을 구속하는 인근 영역의 강성이  $K_S$ 가 된다.

구속도를 계산하는 방법으로는 단위하중법이 있는데[4][6], 이는 고유변형도 영역에 단위 하중을 분포시키고 탄성해석을 수행하여 얻은 변위를

이용하여 강성을 계산하는 방법이다. 구속도는 방향성에 따라 용접선 방향의 구속도( $\beta_x$ )와 용접선에 수직한 방향의 구속도( $\beta_y$ )가 있고, 각각  $\epsilon_x^*$ 와  $\epsilon_y^*$ 를 구하는데 이용된다.

본 연구에서는 선체 블록의 조립과정과 실험적 연구의 결과 등을 고려하여 다음과 같이 구속도 계산을 수행하였다.

첫째, 고유변형도의 크기와 분포는 외적 구속에 의해 달라진다는 실험결과를 반영하였다. 용접부의 변형을 억제하는 역할을 하는 것으로는 모재 자체의 강성에 의한 내적 구속과 이미 부착된 다른 부재들에 의한 외적 구속이 있다. Fig.16과 같이 양단이 부재에 의해 구속된 상태에서 필렛용접을 수행할 경우 발생하는 고유변형도는 동일 용접 조건하에서 구속부재가 없는 경우와는 크게 다르다. 이는 고유변형도가 대부분 고온 상태에서 발생하고, 이 때의 탄성계수는 상온일 때보다 상당히 저하되기 때문이므로, 고유변형도 영역의 탄성계수를 저하시킨 상태에서 구속도를 계산하였다. 탄성계수 결정의 기준이 되는 온도로는 열영향부 영역에서 판두께 방향 온도 구배가 0이 되는 온도로 가정하였다.

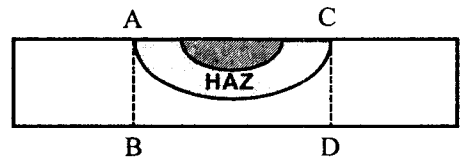


Fig. 7 Shape of heat affected zone

$$T_{eq} = \frac{q}{c\rho A}$$

where,  $T_{eq}$ : 열영향부에서 판두께 방향의 온도 구배가 0이 되는 온도  
 $q$ : 단위 길이당 입열량  
 $c$ : 비열  $\rho$ : 밀도  
 $A$ : □ABCD의 면적

둘째, 선체 블록의 조립단계에 따른 구속도 변화를 고려하였다. 선체 블록과 같이 조립순서에 따라 부재들이 부착되어 가는 경우 구속도는 조립

단계별로 계속 변하게 된다. 따라서 새로운 부재를 동일한 용접조건으로 부착하더라도 구속도가 다르므로, 고유변형도의 크기와 분포 양상은 이전 부재의 경우와 차이가 나게 된다. 본 연구에서는 조립 순서에 따른 외적 구속의 변화를 고려하기 위해 구조물의 조립 단계별로 단위 하중 해석을 수행하여 각각의 구속도를 계산하였다.

3. 고유변형도에 의한 등가 하중

용접부에 분포하는 고유변형도를 이용하여 복잡한 구조물의 변형을 계산하기 위해서는 고유변형도에 등가하는 하중을 구하여 유한 요소 해석을 이용하는 방법이 있다[7].

고유변형도에 의한 등가하중은 용접선에 수직으로 작용하는 하중( $f_y, m_y$ )과 용접선과 평행하게 작용하는 하중( $f_x, m_x$ )으로 분리한다(Fig.8).

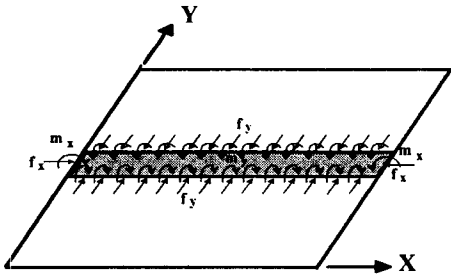


Fig. 8 Equivalent loads of inherent strain

본 연구에서는 모재에 분포하는 고유변형도와 비드의 고유변형도에 의한 등가하중을 각각 계산하였다. 먼저 모재에 발생된 잔류 소성변형도에 의한 등가하중 계산은 다음과 같다.

용접선에 수직한 방향의 하중을 구하기 위해 Fig.9와 같이 두께방향으로 요소분할 된 단면에서 각 층(layer)을 하나의 봉으로 가정한다. 봉의 수축량은 위에서 구한  $\epsilon_x^*$ 에 의해 계산되며, 수축량에 해당하는 하중을 구할 수 있다. 이와 같이 각 층의 수축하중을 구한 후 이를 적분하면 식 (6),(7)과 같이  $f_y, m_y$ 를 구할 수 있다. 이 하중은 단위 길이 당 하중이므로 용접변형 계산 시

에는 해당 절점에서의 요소 길이를 곱한 값을 가한다. 용접선에 평행한 방향의 하중은 식 (8),(9)와 같이 단면상에 분포하는  $\epsilon_x^*$ 를 적분하여 구할 수 있고, 용접선 양단에 집중하중으로 가한다.

$$f_y = \sum_{i=0}^N f_i \tag{6}$$

$$m_y = \sum_{i=0}^N f_i y_i \tag{7}$$

where,  $N$  : 두께방향의 요소분할 개수

$y_i$  : 판의 중심에서 하중점까지의 거리

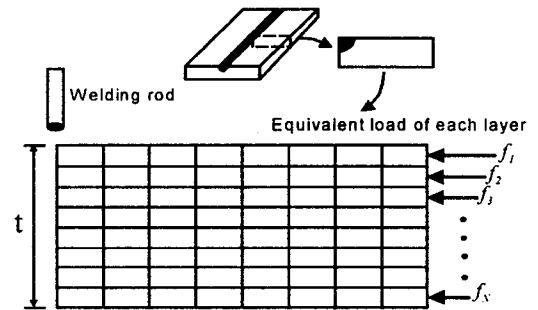


Fig. 9 Equivalent loads calculation

$$f_x = \int_A E \epsilon_x^* dA \tag{8}$$

$$m_x = \int_A E \epsilon_x^* y dA \tag{9}$$

용접 비드에 발생하는 고유변형도는 이전의 연구에서는 고려되지 않았으나, 용융된 비드가 유입되면서 용접부 근방에 용융지를 형성하고, 비드와 모재의 혼합이 일어난다는 점에서 비드의 수축 변형도 역시 용접변형의 발생 원인으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 비드의 형상을 Fig.10과 같이 비드온 용접의 경우 원호로, 필렛 용접의 경우 삼각형으로 가정하였다. 비드의 수축 변형도는 용융 온도에서 상온까지의 온도 하강에 의한 총변형도로서 간이 해석 모델을 통해 식 (10)과 같이 구할 수 있다. 비드의 고유변형도에 의한 등가 하중도 모재의 경우와 같이 각 층(layer)의 수축량에 해당하는 수축하중을 적분하여 계산하였다.

$$\epsilon_{bead}^* = -\frac{K_B}{K_S} \frac{\sigma_Y}{E} \quad (10)$$

where,  $\sigma_Y$  : yield stress

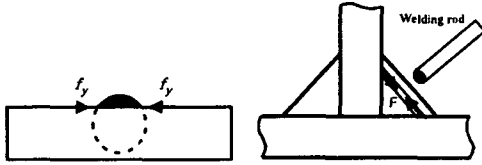


Fig. 10 Bead shape

4. 보강판의 용접변형 시뮬레이션

지금까지 전개한 고유변형도 이론과 유한요소법을 활용하여 보강판의 용접변형 예측을 위한 시뮬레이션을 구현하였다. 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS의 APDL(ANSYS Parametric Design Language)를 이용하였고, 그 과정은 다음과 같다.

먼저 판과 보강재의 치수, 용접 순서, 용접 조건 등의 데이터를 받아들인 후, 각 보강재의 단면에 대한 2차원 열전도 해석을 수행하여 최고 온도 분포를 구한다. 고유변형도 결정의 또 다른 인자인 구속도를 구하기 위해 셸(shell)요소를 이용한 구조 해석 모델을 만든다. 조립 순서를 고려하기 위해 보강재를 하나씩 생성시키면서 각각 단위 하중법에 의해 구속도를 계산한다. 이 때 온도 상승 효과를 고려하여 용접부의 탄성계수를 저하시킨다. 각각의 보강재에 대한 최고 온도 분포와 구속도가 구해지면, 등가하중을 구하고 이를 분포시킴으로써 최종 용접변형을 구하게 된다.

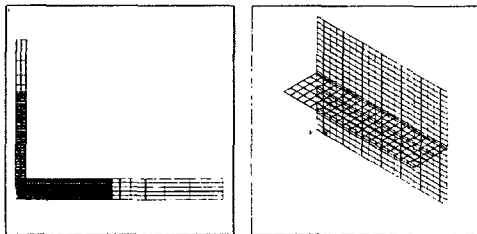


Fig. 11 FE model for heat conduction(L) and degree of restraint(R)

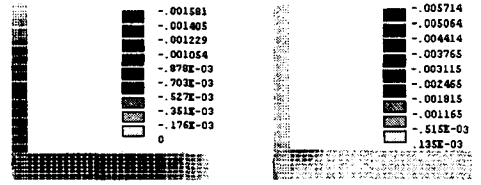


Fig. 12 Distribution of  $\epsilon_x^*$  (L) and  $\epsilon_y^*$  (R)

Fig.11은 보강재가 하나인 경우의 온도 분포 해석 및 구속도 계산을 위한 유한요소 모델을 각각 나타낸 것이고, Fig.12는 용접부 주위에서 고유변형도  $\epsilon_x^*$ ,  $\epsilon_y^*$ 의 분포이다.

5. 계산 결과 및 고찰

5.1 단순 용접 부재의 변형

가장 단순한 용접 부재인 비드온 플레이트 용접과 필렛용접의 각변형에 대해 실험 결과와 비교함으로써, 정확성을 검증하였다.

비드온 용접은 Terasaki(8)의 실험 중 연강의 GMAW(gas metal arc welding) 결과와 비교하였다. Fig.13에서 실선은 실험 결과를 회귀분석한 결과이고, 여러 가지 판두께에 대한 계산 결과는 마크를 이용하여 표시하였다. 회귀분석에 이용된 용접 변수는  $Q/t^2$  으로서, Q는 단위 길이당 입열량, t는 판두께이다.

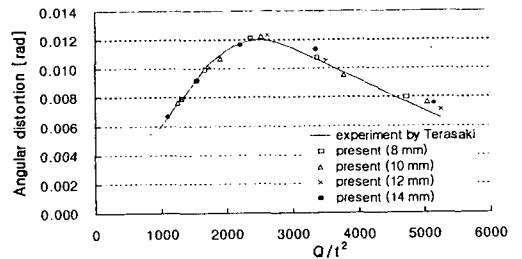
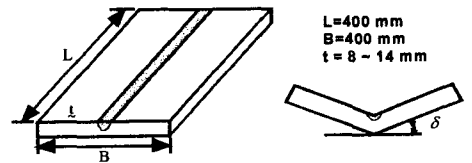


Fig. 13 Angular distortion results of bead-on welded plates

필렛용접은 이 등(9)의 CO<sub>2</sub>용접 실험과 비교하여, Fig.14에 회귀분석한 실험식을 실선으로, 계산 결과를 마크로 표시하여 나타내었다.

이상의 결과를 통해 본 연구의 용접변형 예측 기법이 단순 부재의 경우 넓은 범위의 용접 조건에 대해 실험 결과를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

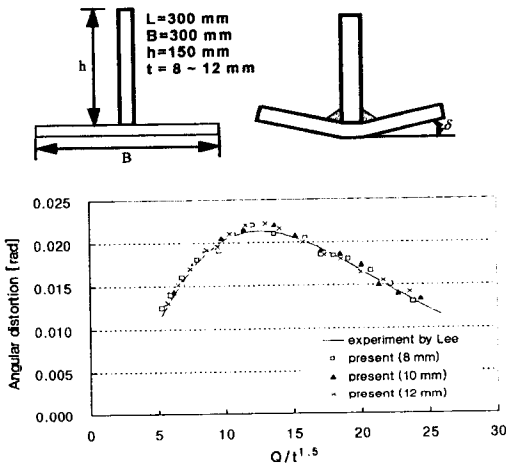


Fig. 14 Angular distortion results of fillet welded plates

5.2 구속된 평판의 필렛용접

본 연구에서는 구속도 계산 시 조립 단계에 따른 외부 구속의 변화와 용접부의 온도 상승에 의한 탄성계수 변화를 Fig.15와 같이 고려했는데, 다음과 같은 실험을 통해 그 필요성을 확인할 수 있다. Fig.16과 같이 양단이 구속된 상태에서 필렛용접을 수행할 경우, 각변형은 구속계수(restraining factor) C에 비례하여 줄어들게 된다. 구속계수는 외적 구속 효과를 나타내는 계수로서, 이 모델의 경우 다음과 같이 정의된다(10).

$$C = \frac{1}{L_2} \left\{ \frac{\pi^4}{48} \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^3 + \frac{(1-\nu)\pi^2}{2} \left( \frac{L_1}{L_2} \right) \right\} \quad (11)$$

이 모델에 대해 다음과 같이 세 가지 경우에 대한 계산을 수행하여 실험 결과와 비교하였다. 즉, 외적 구속의 영향을 고려하지 않은 경우(case1), 외적 구속을 고려하되 용접부의 온도 상승은 고려

하지 않은 경우(case2), 외적 구속과 온도 상승을 모두 고려한 경우(case3)에 대해 각각 C를 변화시켜가면서, 각변형의 비율  $\delta_r / \delta_f$  를 계산하였다. 여기서  $\delta_f$ 는 자유 상태,  $\delta_r$ 는 구속 상태일 때의 각변형이다.

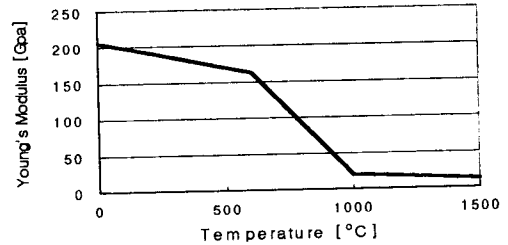


Fig. 15 Young's modulus

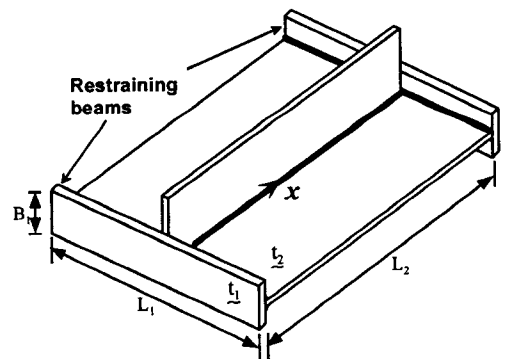


Fig. 16 Fillet welding restrained by edge plates

Fig.17에서 볼 수 있듯이 case3의 경우가 구속 계수에 따른 효과를 가장 잘 반영하고 있는데, 이는 구속도의 분포와 그에 따른 등가 하중의 분포에 의해 기인한다.

Fig.18과 Fig.19는 각각의 경우에 대해 구속도와 휨굽힘 모멘트의 분포를 나타낸 것으로, case1의 경우는 외적 구속을 고려하지 않으므로 구속도와 모멘트가 일정하고, case2, case3의 경우는 구속 부재가 있는 곳에서 구속도가 증가하고 모멘트는 줄어들게 된다. 그러나 case2의 경우는 외적 구속의 효과를 충분히 반영하지 못하여 휨굽힘 모멘트가 실제보다 과도하게 나타나고 있다.

실험 결과와의 비교를 통해 용접변형의 원인이 되는 고유변형도는 외적 구속에 의해 영향을 받고, 고온역에서 발생하므로 고유변형도 영역의 탄성계수 저하를 고려해야 된다는 사실을 알 수 있다.

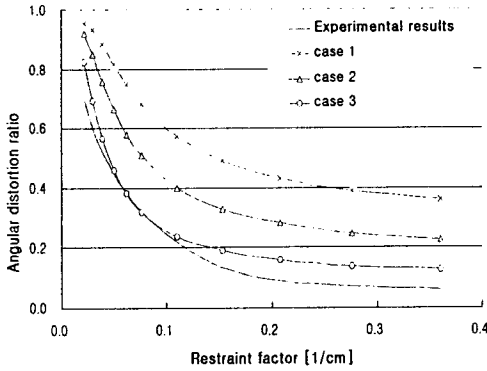


Fig. 17 Comparison of angular deformation ratio

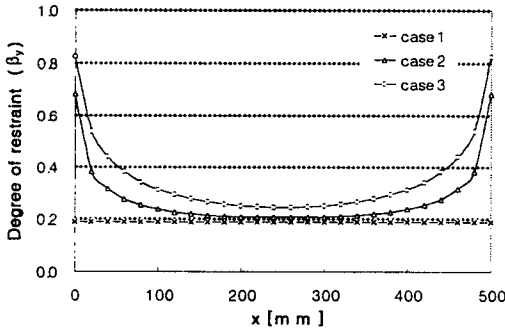


Fig. 18 Distribution of degree of restraint along weld line

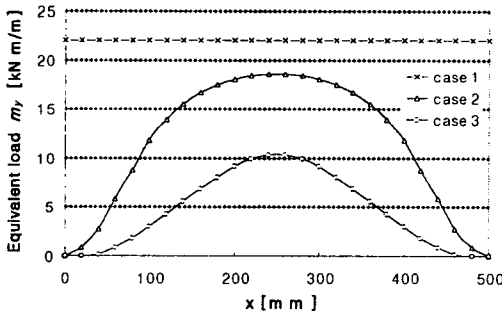


Fig. 19 Distribution of equivalent moment along weld line

5.3 조립 순서에 따른 보강판의 변형 해석  
조립 순서에 따른 변형량의 차이를 알아보기 위해, Fig.20과 같은 보강 평판을 대상으로 세 가지의 조립 순서에 대해 고찰하였다. 모재 및 각 보강재의 치수와 용접 조건은 Table 1과 같다. 종부재의 간격은 500mm, 횡부재의 간격은 1000mm이고, 조립 순서는 Table 2와 같다.

Case1과 case2는 보강재를 하나씩 붙여가는 것이고, case3는 모든 보강재를 모재에 가용접한

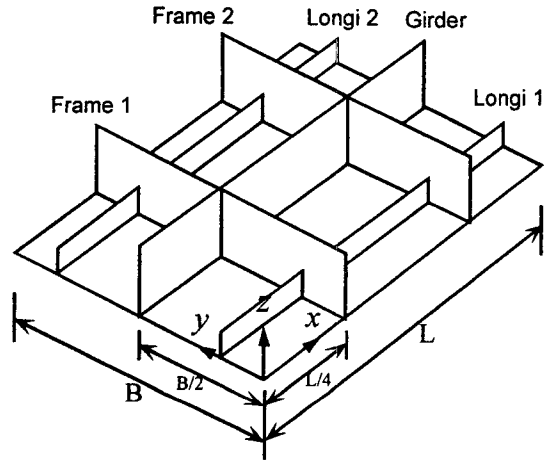


Fig. 20 Shape of a stiffened plate

Table 1 Size and welding condition

	Size [mm]	Welding condition		
		V [V]	I [A]	Velocity [cm/min]
B/P	2000×1500×12			
Girder	2000×400×12	30	300	36
Longi.	2000×150×10	30	260	36
Frame	1500×400×12	30	300	36

(B/P:base plate)

Table 2 Cases of fabrication sequence

	Fabrication sequence
Case 1	G→L1→L2→F1→F2
Case 2	F1→F2→G→L1→L2
Case 3	모든 보강재 가용접→본용접

(G: girder, L:longitudinal, F:frame)



후 동시에 본용접을 실시하는 것이다. 구속도의 관점에서 보면 case1, case2는 이전 단계까지 부착되어 있는 보강재들에 의한 구속을 받지만, case3는 모든 보강재가 서로 구속하게 된다. Fig.21과 Fig.22는 case1과 case3의 조립과정을 나타낸 것이다.

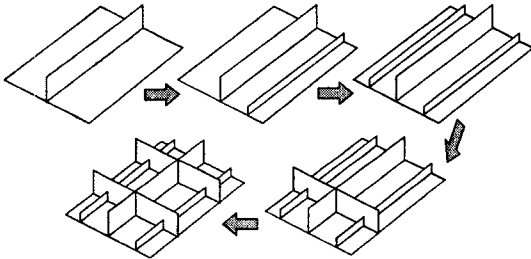


Fig. 21 Fabrication sequence of case 1

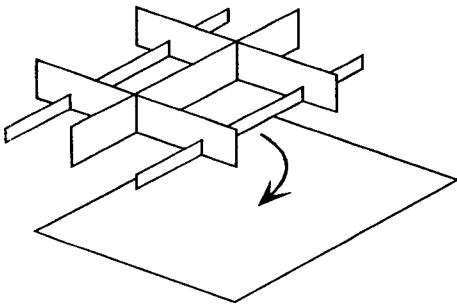


Fig. 22 Fabrication sequence of case 3

Fig.23은 case1의 조립 단계에 따른 변형을 해석한 결과인데 step4, step6는 횡부재(frame)를 부착하기 전에 강제 변위를 주어 용접선을 펴주는 작업을 모델링한 것이다.

Fig.24와 Fig.25에는 계산된 수직 변위를 Fig.20에 표시된 x축과 y축을 따라가며 나타내었다. x축 상에서는 case2가 y축 상에서는 case1의 경우가 변형이 크게 나왔는데, 이는 조립 순서에 따른 구속도의 차이에 의한 것으로, 가장 큰 구속을 받는 case3는 양쪽 모두 변형이 최소로 나왔다.

보강판의 변형 해석을 통해, 본 연구에서 제안한 방법은 조립 순서에 따른 변형의 양상과 현장에서 수행되는 작업 조건을 반영할 수 있으며, 조립 순서 및 작업 조건의 변화를 통해 변형 감소

방안을 마련하는데 활용될 수 있는 해석법임을 알 수 있다.

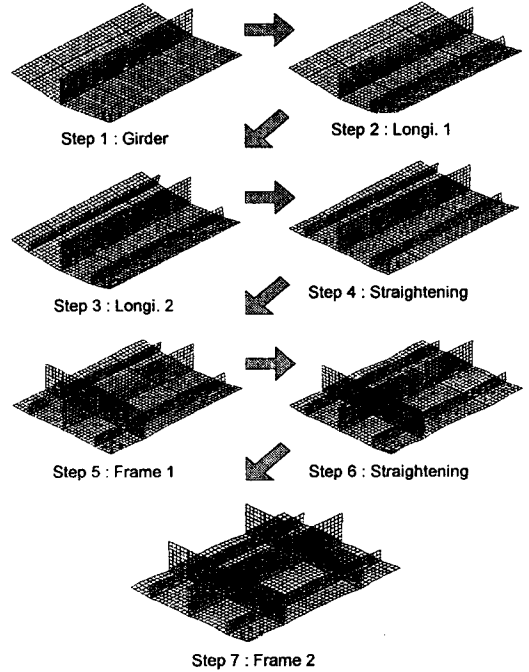


Fig. 23 Welding deformation of each fabrication step (case1)

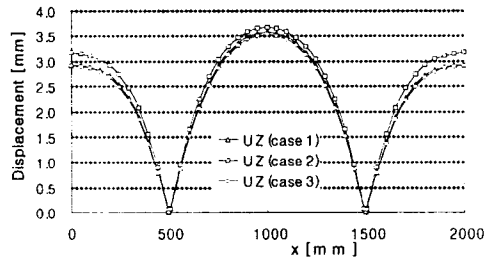


Fig. 24 Vertical displacement along x-axis

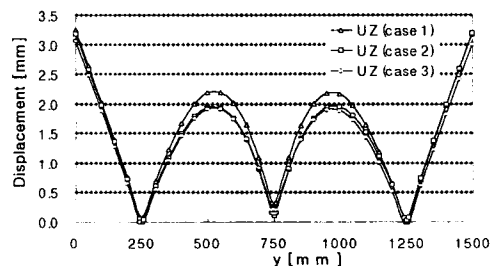


Fig. 25 Vertical displacement along y-axis

## 6. 결 론

본 논문에서는 선체 블록과 같은 대형 구조물에서 발생하는 다양한 형태의 용접변형을 예측하기 위한 기법을 제안하였다. 간이 해석 모델의 결과 고유변형도는 최고 온도와 구속도에 의해 결정된다는 사실을 바탕으로, 용접부의 열전도 해석과 구속도 계산을 수행하는 시뮬레이터를 개발하였다. 특히, 고유변형도는 구조물의 형상과 용접부의 온도 상승 효과에 따라 변한다는 실험 결과로부터, 선체 블록의 경우 조립 단계별로 구속도를 구해야 정확한 고유변형도를 구할 수 있다는 것을 제안하였다. 선체 건조에 있어서 블록은 높은 수준의 정도가 유지되어야 하므로, 용접변형의 예측은 정확성이 보장되어야 하는데, 본 연구에서는 단순 시편에 대한 실험 결과와의 비교를 통해 정확성을 검증하였다. 또한 선체가 대형 구조임을 고려할 때 계산 시간 면에서 효율적이어야 하므로 탄성 해석에 의한 변형 예측을 구현하였다. 선체 중앙 평행부에 가장 널리 이용되는 보강판의 용접 변형 시뮬레이션을 통해 조립 순서와 실제 현장에서 수행되는 작업 조건을 반영할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- [1] Watanabe, M. and Satoh, S., "Effect of Welding Conditions on the Shrinkage Distortion in Welded Structures", *Welding Journal*, Vol.40, pp.377-384, 1961
- [2] Murakawa, H., Luo, Y. and Ueda, Y., "Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain", *Journal of the society of naval architects of Japan*, Vol.180, pp.739-751, 1996
- [3] 장창두, 서승일, "용접 조립보의 변형 예측에 관한 연구", *대한조선학회논문집*, 제31권, 제3호, pp.145-153, 1994
- [4] 서승일, 장창두, "용접구조물의 변형 예측에 관한 연구", *대한용접학회지*, 제15권, 제5호, pp.64-73, 1997
- [5] Ueda, Y., Fukuda, K. and Tanigawa, M., "New Measuring Method of Three Dimensional Residual Stresses Based on Theory of Inherent Strain", *Transactions of the Japanese welding research institute*, Vol.8, No.2 pp.249-256, 1979
- [6] Masubuchi, K., "Analysis of Welded Structures", Pergamon Press, pp.239-243
- [7] Ueda, Y., Nakacho, K. and Moriyama, S., "Compressive Ultimate Strength of Rectangular Plates with Initial Imperfections due to Welding", *Journal of the society of naval architects of Japan*, Vol.159, pp.282-294, 1986
- [8] Satoh, K. and Terasaki, T., "Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structural Materials", *Journal of the Japanese welding society*, Vol.45, No.4, pp.302-308, 1976
- [9] 김상일, 이주성, "필렛이음의 용접변형에 대한 간이예측법 개발", *대한조선학회 춘계 연구발표회*, pp.265-270, 1996
- [10] 渡邊正紀, 佐藤邦彦, "溶接力學とその應用", 朝倉書店, pp.367-411, 1965