

**研究論文**

## 용접구조물의 변형 예측에 관한 연구

서 승 일\* · 장 창 두\*\*

### A Study on the Prediction of Deformations of Welded Structures

Seung Il Seo\* and Chang Doo Jang\*\*

**Key Words** : Welding Deformation (용접변형), Inherent Strain (고유변형도), Simplified Thermal Elasto-plastic Analysis (간이 열탄소성 해석), Elastic Finite Element Analysis (탄성 유한요소 해석), Equivalent Force (등가 하중)

#### Abstract

Deformations of structures due to welding appear much complicated and deformed modes are also complex. As parameters governing deformations are various and the effect of parameters on deformations is not well known, precise prediction of deformation due to welding has been a difficult problem. Until now, many research papers as to welding deformation have been published, but the research results can explain only one aspect of welding deformation and are hard to be used in reasonable prediction of welding deformations in complicated structures. In this study, based on the accumulated results concerning to welding deformations, a practical method to predict complicated welding deformations of large structures is proposed. A simplified model to estimate residual plastic strains is suggested and main parameters affecting residual plastic strains are shown to be heat input and joint restraints. Inherent strain theory and experimental data are combined with the finite element method and welding deformations of large structures are calculated by elastic analysis. Comparison of calculated results with experimental data shows the accuracy and validity of the proposed method.

---

※ 1997년 2월 10일 접수

\* 정희원, 한진중공업 산업기술연구소

\*\* 정희원, 서울대학교 조선해양공학과

## 1. 서 론

구조물의 용접 시에는 접합부의 용융을 위해 열이 가해지고 국부적인 용융과 열전도 과정에 따른 불균일한 온도 분포가 발생하게 된다. 이에 따라 열변형의 불균일이 발생하게 되고, 열응력이 유발되며, 소성변형도가 잔류하여 용접부의 냉각 후에 영구변형이 생성되게 된다. 용접변형은 구조물의 외관을 해치고, 좌굴강도를 심각하게 저하시킨다. 또한 구조물의 제작 과정에서 생성된 변형은 제작 과정의 공차를 유발하므로, 생산성 저해 요인이 된다. 구조물의 설계 단계에서 제작 과정에 따른 용접 변형량을 정확히 예측할 수 있으면, 구조물의 강도 저하분을 적절히 고려하여 설계할 수 있게 되므로 구조물의 안전성을 높일 수 있다. 또한, 제작 과정 중 용접에 따른 변형 오차도 예측할 수 있어 사전에 적절한 여유를 고려함으로써 제작 과정의 시행착오를 방지하게 되고 생산성 향상도 기할 수 있게 된다. 정밀한 구조물의 제작을 위해서 제작에 따른 오차를 줄여야 하고, 이를 위해서 용접 변형량의 정확한 예측과 사전 여유치 고려가 필수적이 된다.

용접변형은 용융과 냉각에 따른 열전도 과정, 불균일한 열변형과 열응력 생성 과정, 온도 변화에 따른 재료의 기계적 성질 변화 등의 복잡한 역학적 과정을 거쳐 형성된다. 변형 발생에 미치는 요인으로는 크게 용접열에 관련된 요인과 이음부의 구속상태와 관련된 요인으로 분류할 수 있다<sup>1)</sup>. 용접열에 관련한 요인은 다시 용접전압, 용접전류, 속도, 용접봉의 종류, 용접층수 등으로 세분할 수 있고, 구속상태와 관련한 요인도 다시 용접순서, 이음부 및 구속재의 형상과 배치 등으로 세분할 수 있다. 용접변형의 예측을 위한 많은 연구가 있었지만, 이러한 변형 생성 과정의 복잡함과 변형 생성에 미치는 다양한 요인으로 인해 정확하고 실용적인 예측 기법의 제시에는 한계가 있었다. 현재까지의 용접 변형에 관한 연구를 분류해 보면, 크게 실험적인 방법, 해석적 방법(analytic method) 및 수치적 방법(numerical method)으로 구분해 볼 수 있다. 실험적인 방법은 용접에 의해 발생되는 변형량을 계측하고, 실험 결과를 적절한 변수에 의해 정리하여 변형량과 용접 변형과의 관

계식을 구함으로 구조물의 해당되는 변형 모드에 대한 변형량을 예측하는 방법이다<sup>2)</sup>. 실험적 방법의 한계는 다양한 용접변형 형태와 변형에 영향을 미치는 다양한 요인을 어떻게 조합하여 정량적으로 변형량을 용접 변수로 표현할 수 있는가 하는 점이다. 실험에 의존하여 용접변수와 변형과의 정량적인 관계를 도출하기 위해서는 용접변수의 조합수가 너무 많고, 실제 구조물에 나타나는 복잡한 변형 양상은 간단한 구조물의 하나의 변형 양상에 대한 실험 결과를 통해 예측하기가 곤란하다.

해석적인 방법은 고전적인 탄성론 이론에 바탕을 둔 방법으로써 열전도 과정 및 열탄소성 과정을 생략하고, 최종적으로 잔류하는 소성변형도를 고유변형도(inherent strain)라 정의하여, 구조 전체가 초기 변형도가 존재하는 탄성 상태에 있다고 가정하여 탄성론적인 방법으로 변형을 예측하는 방법이다<sup>3,4)</sup>. 고유변형도의 영역과 크기는 실험에 의해 구하는 것이 일반적인 방법이었다. 이 방법은 탄성 해석만 수행되므로 해석의 간편성은 있지만 고유변형도의 크기를 정확히 결정해야 한다는 어려움이 있다. 수치적으로 용접 변형을 해석하는 방법으로는 유한요소법<sup>5,6)</sup>이나 경계요소법<sup>7)</sup> 등을 이용하여 컴퓨터 상에서 열탄소성 과정을 시뮬레이션하는 방법을 들 수 있다. 특히 유한요소법에 의한 열탄소성 시뮬레이션 방법은 현재 ABAQUS<sup>®</sup>나 ANSYS<sup>®</sup> 등과 같은 상업용 유한요소 해석 소프트웨어의 보급으로 인해 일반화되어 가는 추세이다. 더욱이 SYSWELD<sup>10)</sup>와 같은 용접 전용 유한요소 해석 소프트웨어의 등장은 용접 변형 해석을 좀더 간편하게 해주고 있다. 그런데 유한요소법에 기초한 정밀 열탄소성 해석을 컴퓨터 상에서 실현하는 데에는 계산 시간이 막대하다는 난점이 존재한다. 간단한 용접구조물에 대해서도 열탄소성 해석을 수행하는 데에 슈퍼컴퓨터 상으로도 수백초 이상이 소요되고, 워크스테이션을 활용한다면 수일 이상이 소요되므로 실용 상으로 정밀 열탄소성 해석은 그다지 유용하지 못하다. 더욱이 선박이나 해양구조물 등과 같은 복잡한 구조물의 용접 변형 해석 시에는 정밀 열탄소성 해석 기법의 활용은 불가능하게 된다. 따라서 복잡한 구조물의 용접에 따른 구조적 거동을 파악하여 생산 효율을 높이기 위해서는 새로운 방법의 모색이 절대적으로 필요하다.

본 연구에서는 대형 용접구조물의 변형 예측을 목표로 현재까지 개발된 방법의 문제점들을 극복하고자 실험적 방법 및 고유변형도 이론, 탄성 유한요소법을 조합한 방법을 제시하고자 한다. 고유변형도 이론을 활용하여 복잡한 열탄소성 과정을 생략하고, 탄성론에 입각하여 효율적으로 변형을 예측하고자 하였고, 고전적인 고유변형도 이론의 한계를 극복하고자 유한요소법을 접목시켜 대형 구조물의 구조해석을 통해 변형을 예측하는 방법을 적용하고자 한다. 또한 간단한 실험을 통해 얻어진 결과를 토대로 본 연구에서 제시한 기법의 정확성을 확인하고자 하였다.

## 2. 용접시 열탄소성 과정을 나타낼 수 있는 간이 모델

고전적인 고유변형도 이론의 한계는 대형구조물에서 기본적인 용접 변형 모드가 조합되어 나타나는 변형 양상을 정확히 고려할 수 없다는 점과 용접변형에 영향을 미치는 다양한 용접변수의 효과를 충분히 고려할 수 없다는 점이었다. 그런데 上田<sup>11)</sup> 등은 구조물 내부의 고유변형도가 유발할 수 있는 등가의 하중을 계산하는 방법을 제시하여 고유변형도 이론을 탄성유한요소해석 기법과 결합할 수 있는 기초를 마련하였다. 이 방법에서는 고온역에서 대부분의 용접변형이 형성된다는 사실을 간과하고 있으므로, 실온의 탄성상태에서 구해진 등가하중은 실제보다 과도할 수가 있다는 제한점이 있다. 또한 구속상태에 따라 고유변형도가 달라진다는, 실험에서 얻어진 결론을 적절히 반영할 수 없다는 취약점이 있다.

고유변형도법과 탄성 유한요소해석 기법을 결합하여 구조물의 용접변형을 해석하는 것이 본 연구의 목적인데, 실험을 통해 나타나고 있는 현상 중에서 기존의 고유변형도 이론이 반영할 수 없는 부분을 주목하고, 고유변형도 이론을 개량하여 정확한 용접변형 해석이 가능할 수 있도록 시도하였다. 이를 위해 용접변형이 형성되는 과정을 먼저 간이 모델을 통해 고찰해 보고, 고유변형도 이론에 용접 과정 중의 효과를 고려할 수 있는 방안을 모색해 본다.

Fig. 1은 변형 발생 과정을 간단하게 나타내기

위해 용접부와 인근 영역을 분리하고 인근 영역은 용접부의 거동을 구속하는 스프링으로 표시하였다. 용접부는 용접에 의해 투입되는 열에 의해 먼저 급격한 온도 상승이 발생하고 인근에 열이 전도되면서 온도하강을 경험하게 된다. 인접영역은 열이 전도되면서 온도가 상승하여 가는데, 열응력은 용접부와 인접영역의 온도차에 기인한 불균일 열변형에 의해서 유발된다. 초기에 투입된 용접열에 의해 용접부는 용융온도까지 온도가 급격히 상승하고 용융온도에서 재료가 변형에 저항하는 능력은 없으므로 이때 발생하는 열변형도는 모두 소성

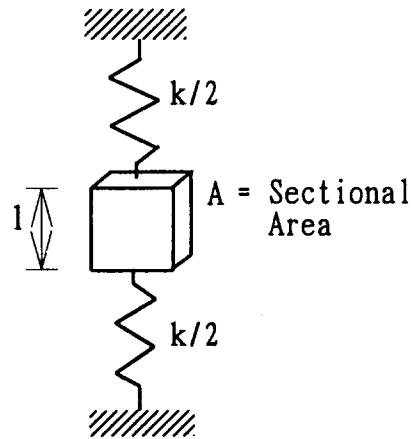


Fig 1. Simplified model for describing welding process

변형도가 된다. 즉

$$\epsilon_{p1} = \alpha T_m \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{p1}$  = 온도상승 과정의 용접부의 소성변형도

$\alpha$  = 재료의 선팽창계수

$$T_m = T_{\max} - T_0$$

$T_{\max}$  = 재료가 변형에 저항하는 능력을 상실하는 온도, 강의 경우 870 °C

$T_0$  = 상온

온도하강 과정에서는 용접부의 열이 인접영역으로 전파되면서 탄소성 과정을 겪게 된다. 용접부와 인접영역 사이의 힘의 평형 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma A + F = 0 \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$  = 용접부의 응력  
 $A$  = 용접부의 단면적  
 $F$  = 인접영역의 반력

용접부의 응력-변형도 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma = E(\epsilon - \alpha T - \epsilon_{p2}) \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon$  = 용접영역의 전체 변형도  
 $E$  = 용접부의 영률 (Young's modulus)  
 $T$  = 용접부의 온도 변화량  
 $\epsilon_{p2}$  = 온도하강 과정에서 용접부의 소성변형도

스프링의 반력은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$F = k \epsilon l \quad (4)$$

여기서,  $k$  = 인접영역의 스프링 상수  
 $l$  = 용접영역의 길이

용접영역에서 항복이 발생한 경우에 응력은 항복응력이 된다. 즉,

$$\sigma = -\sigma_y \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_y$  = 항복응력

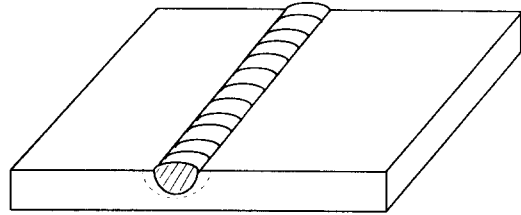
(2), (3), (4) 및 (5) 식으로 부터 소성변형도는 다음과 같이 구해진다.

$$\epsilon_{p2} = -\alpha T + \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_y A}{kl} \quad (6)$$

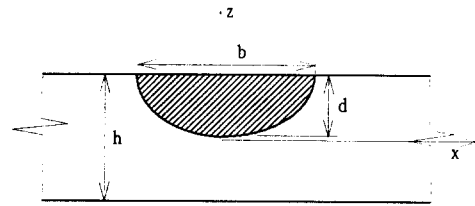
최종적으로 잔류하는 소성변형도는 온도상승 과정과 온도하강 과정에서 발생한 소성변형도의 합으로 볼 수 있으므로 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_p = \epsilon_{p1} - \epsilon_{p2} = -[\alpha(T_m - T) + \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_y A}{kl}] \quad (7)$$

(7) 식을 통해서 잔류하는 고유변형도는 온도분포, 재료특성 및 구속효과에 따라 결정됨을 알 수 있다.



(a) Welded plate



(b) Section of welded plate

Fig 2. Definition of inherent strain region

### 3. 고유변형도의 영역 및 크기 결정

소성변형도가 잔류하는 영역은 고유변형도 영역이라 정의할 수 있는데, 재료가 변형에 저항하는 능력을 잃게 되는 온도(한계온도라고 정의)에서는 재료의 변형이 바로 소성변형이 되게 된다. 한계온도 이상으로 온도가 상승하는 영역은 소성변형이 발생하는 영역이 된다. 한계온도 이하로 온도가 상승하는 영역에서도 소성 변형이 발생할 수는 있으나, 소성변형의 대부분이 한계온도 이상의 영역에서 발생하므로 해석을 간단하게 하기 위해 Fig. 2와 같이 한계온도 이상의 영역을 고유변형도 영역이라 정의한다. 이론 및 실험을 통해 얻어진 한계온도의 등온도 곡선 형상은 타원에 가까운데, 열전도 이론에 따라 얻어진 온도분포 곡선을 통해 고유변형도 영역을 결정할 수도 있으나 다음과 같은 열평형 관계로부터 간략히 고유변형도 영역을 구할 수 있다.

$$c \rho \frac{\pi}{4} b d T_m = f Q \quad (8)$$

여기서,  $c$  = 재료의 비열

$\rho$  = 재료의 밀도

$b$  = 고유변형도 영역의 폭

$d$  = 고유변형도 영역의 깊이,  $b = 2d$ 로 가정.

$f$  = 고유변형도 영역의 온도 상승에 필요한 투입 열량의 비율, 0.4로 가정.

(Q) = 용접에 의해 투입되는 단위길이당 열량

(8) 식으로부터 고유변형도 영역의 면적은 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\pi}{4}bd = \frac{fQ}{c\rho T_m} \quad (9)$$

### 4. 등가의 하중 계산 방법

용접선에 따른 고유변형도 영역을 분리하여 보면 Fig. 3과 같다. 고유변형도에 의해 구조물에서 발생하는 변형을 유한요소해석을 통해 구하기 위해서는 고유변형도에 의한 수축에 등가하는 하중을 계산하는 것이 편리하다. 고유변형도에 의해 유발되는 등가의 하중은 Fig. 3과 같이 용접선에 수직한 방향으로 작용하는 힘과 모멘트 및 용접선과 평행하게 작용하는 힘과 모멘트로 분리할 수 있다. 고유변형도 영역의 길이 방향으로 단위 길이 만큼을 분리하여 고려하면, 소성변형도 계산식으로부터, 띠판 모델에 대해 다음 식으로 등가의 단위 길이당 하중을 구할 수 있다.

$$f_x = E_{\alpha} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{b} \zeta_y dz = E_{\alpha} \left( \alpha T_c + \frac{\sigma_{yx}}{E_{\alpha}} + \frac{\sigma_{yx} h}{k_x b} \right) \frac{\pi}{4} d \quad (10)$$

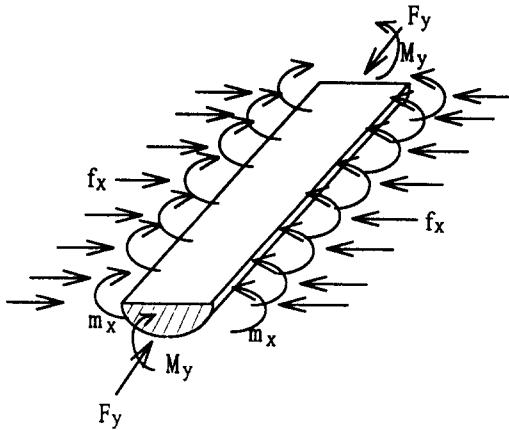


Fig 3. Shrinkage forces of the inherent strain region

여기서,  $\zeta_y = b(z)\epsilon_{py}$

$\epsilon_{py} = y$  방향의 잔류 소성변형도

즉, 용접에 의한 등가하중  $f_x$ 는, 용접부가 특정 온도까지 냉각된 상태에서 구조물에 작용한다고 볼 수 있는 하중이나, 이를 용접부의 평균하중으로 가정하여 설정하였다. (10)식에서  $T_c$ 는 온도상승 과정에서의 고유변형도 영역과 인접영역의 온도구배와 온도하강 과정에서의 고유변형도 영역과 인접영역의 온도구배의 차이를 나타내는 것으로 다음 식으로 구해질 수 있다.

$$T_c = T_m - T_m \frac{\pi}{4} \frac{d}{h} \quad (11)$$

여기서, 온도 하강시는 고유변형도 영역의 온도가 판두께에 걸쳐 평균치에 도달하였을 때의 온도구배이다.

$E_{\alpha}$ 는 고유변형도 영역에서 용접선에 수직한 방향의 탄성계수인데, 변형 생성은 고유변형도 영역이 고온인 상태에서 발생하고, 이때의 탄성계수는 상온 상태에 비해 상당히 저하된 값이 된다. 고온 상태에서 변형이 발생하는 점을 고려하여 실험결과 등을 참고로<sup>1)</sup> 고유변형도 영역의 탄성계수는 상온 상태의 1/25로 취하였다. 즉

$$E_{\alpha} = \frac{E}{25} \quad (12)$$

여기서, E = 상온에서의 탄성계수 (Young's modulus)

(10) 식 중의  $\frac{\sigma_{yx}}{E_{\alpha}}$ 는 항복응력과 탄성계수의 비로서, 고온상태에서는 탄성계수 뿐만 아니라 항복응력도 저하되기 때문에 상온상태에서의 비를 그대로 활용하였다.  $k_x$ 는 인접영역의 강성을 나타내는 상수인데, 구조물에서의 강성은 단위하중을 가하여 얻은 영향계수를 통해서 구할 수 있다. 강성은 판두께 및 위치별로 다를 수 있는데, 고유변형도 영역의 강성을 대표하는 판의 표면에서 강성을 구하여 고유변형도 영역의 대표 강성으로 취할 수 있다. 고유변형도 영역의 판두께의 중앙에 단위 힘을 가하였을 때

의 변위를  $e_1$ , 단위 모멘트를 가하였을 때의 회전각을  $e_2$ 라고 하면 강성은 다음과 같이 계산된다.

$$k_x = \frac{1}{e_1 + \frac{h^2}{4}e_2} \quad (13)$$

고유변형도 영역의 등가의 단위 길이당 수축모멘트  $m_x$ 는 다음식과 같이 계산된다.

$$m_x = E_{ix} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1}{b} z \zeta_y dz = E_{ix} \left( \alpha T_c + \frac{\sigma_{yx}}{E_{ix}} + \frac{\sigma_{yx} h}{k_x b} \right) \frac{\pi}{4} d \frac{h}{5} \quad (14)$$

(14)식에서 고유변형도 영역의 중심은 계산의 편의와 실험적으로 얻어진 결과를 반영하기 위해  $h/5$ 를 취하였다.

용접선의 길이 방향과 평행하게 작용하는 고유변형도 영역의 등가의 힘과 모멘트도 마찬가지로 구할 수 있다. 길이 방향으로 작용하는 힘과 모멘트는 집중하여 양단에 작용하게 되는데, 다음식으로부터 구해진다.

$$F_y = E_{iy} \int_{-h/2}^{h/2} \zeta_x dz = E_{iy} \left( \alpha T_{cy} + \frac{\sigma_{yy}}{E_{iy}} + \frac{\sigma_{yy} h}{k_y b} \right) \frac{\pi}{4} bd \quad (15)$$

여기서,  $\zeta_x = b(z)\epsilon_{px}$

$\epsilon_{px} = x$  방향의 잔류 소성변형도

(15)식 중의  $E_{iy}$ 는 고유변형도 영역의 용접선 길이 방향의 탄성계수인데, 용접선에 수직인 방향의 탄성계수와는 다른 값이다. 용접선에 수직인 방향으로 발생하는 변형은 판의 두께 방향 온도구배가 중요한 원인이 되고 이에 저항하는 영역도 판의 두께 방향 강성이 대부분이므로 용접에 따라 열이 투입되면 고유변형도 영역과 저항 영역 모두 고온 상태에 도달하고 고온 상태에서 변형이 주로 발생하게 된다. 그러나 용접선 길이 방향의 변형에 영향을 미치는 주요 요인인 고유변형도 영역과 인근한 판 전체의 온도구배는 두께 방향의 온도구배에 비해 상당히 크게 된다. 고유변형도 영역 이상온 상태에 근접할 때까지 열은 계속 판전체로 전파되

로 온도구배는 계속 발생하게 되고 용접선에 평행한 변형은 고유변형도 영역이 상온 상태에 도달할 때까지 지속적으로 발생하게 된다. 이와 같은 점에서 본 연구에서는 용접선 길이 방향의 탄성계수를 상온 상태 탄성계수의 절반으로 가정하였다. 즉

$$E_{iy} = \frac{E}{2} \quad (16)$$

가 된다. 용접선에 수직인 단면에서 온도구배 차이도 다음 식으로 계산된다.

$$T_{cy} = T_m - T_m \frac{\pi}{4} \frac{bd}{hB} \quad (17)$$

여기서, B = 판전체의 폭

인접영역의 강성  $k_y$ 는 (13)식과 같은 방법으로 구할 수 있는데, 용접선 길이 방향으로 용접부가 연속되어 있으므로 단위길이를 취하여 계산하게 된다. 또한 고유변형도 영역 내에서 분포 스프링의 강성계수를 사용하므로 폭을 곱하여 집중 스프링의 강성계수로 활용하게 된다. 등가의 모멘트도 다음 식으로 계산된다.

$$M_y = E_{iy} \int_{-h/2}^{h/2} z \zeta_x dz = E_{iy} \left( \alpha T_{cy} + \frac{\sigma_{yy}}{E_{iy}} + \frac{\sigma_{yy} h}{k_y b} \right) \frac{\pi}{4} bd \frac{h}{5} \quad (18)$$

## 5. 계산 및 고찰

지금까지 전개한 고유변형도 이론과 유한요소법을 활용하여 구조물의 용접변형을 예측하는 과정을 요약해 보면 Fig. 4와 같다.

고유변형도 영역은 (9)식에 의해 구해지게 되고 각 방향으로의 고유변형도 크기는 (7)식에 기초해서 구해지게 된다. 고유변형도 영역의 재료상수는 x방향 및 y방향으로 다르게 되므로 고유변형도 영역에 해당하는 요소는 직교이방성 재질로써 모델링된다. 고유변형도의 크기는 온도 분포 뿐 아니라 인접 영역의 구속상태에 따라서도 달라지게 되므로 단위하중을 가하여 고유변형도 주위의 강성

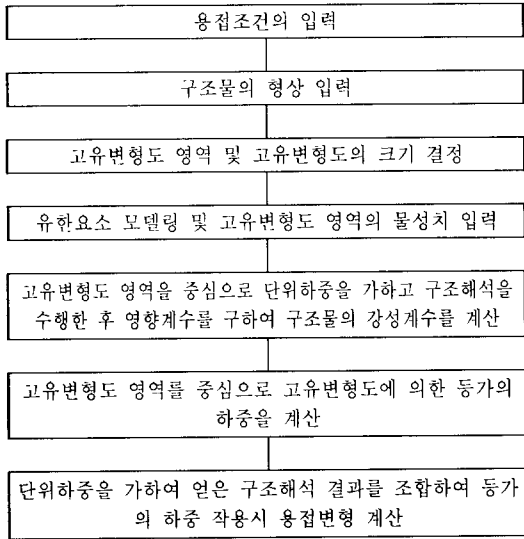


Fig 4. 용접변형 계산 절차

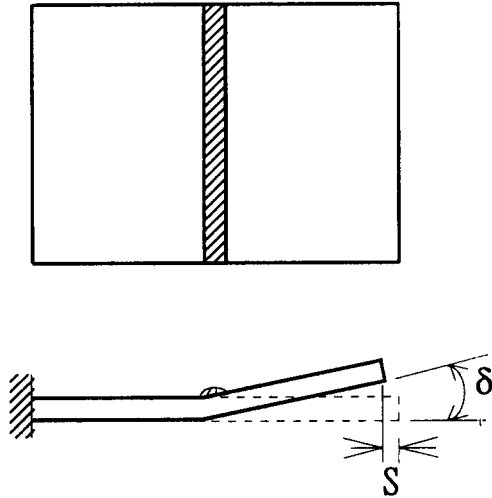


Fig 5. Deformation of bead-on-welded plate

계수를 (13) 식과 같이 구한다. 고유변형도를 적분한 (10), (14), (15) 및 (18)식을 이용하여 등가의 하중을 계산하게 된다. 최종의 용접변형량은 등가의 하중을 가하여 구조해석을 다시 수행하여 얻어진 수 있으나, 선형계에 대한 중첩의 원리를 적용하여 단위하중 작용 시의 계산 결과를 조합함으로써 최종 변형을 구할 수 있게 된다.

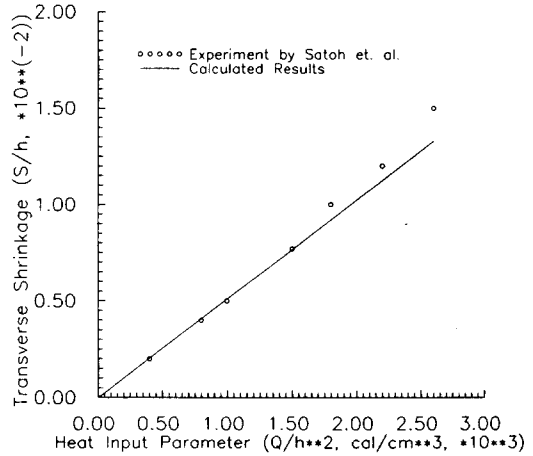


Fig 6. Transverse shrinkage of bead-on-welded plates

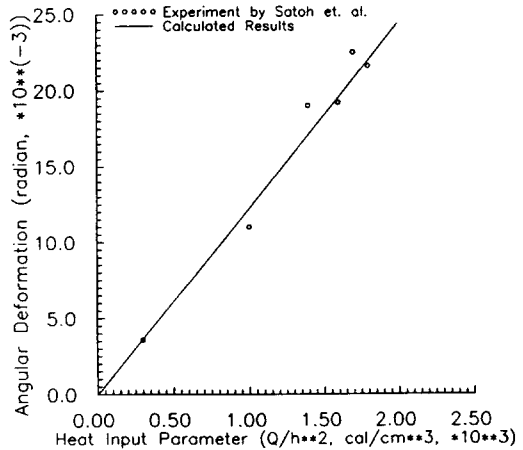


Fig 7. Angular deformation of bead-on-welded plates

가장 간단한 구조물로서 Fig. 5와 같은 평판에 대해 Fig. 4의 과정을 따라 용접변형을 계산한 결과는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. Fig. 6 및 Fig. 7의 결과를 통해 본 연구에서 제시한 모델이 실험 결과 및 실험에서 나타난 용접변수를 적절히 고려할 수 있음을 알 수 있다<sup>2)</sup>.

Fig. 8과 같이 주변이 구속된 판에 대해서 외부 구속의 효과를 파악하기 위해 해석을 실시해 보면 Fig. 9과 같다. Fig. 9에서 구속계수(restraining factor) C는 판 주변 부재의 구속 효과를 나타내는 계수로서, Fig. 8과 같은 판구조물의 경우 다음과

같이 정의된다.

$$C = \frac{1}{l_2} \left[ \frac{\pi^4}{48} \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^3 + \frac{(1-\nu)}{2} \pi^2 \left( \frac{l_1}{l_2} \right) \right] \quad (19)$$

각변형의 비  $\frac{\delta_0}{\delta_f}$  는 구속상태의 각변형과 자유상태의 각변형의 비를 나타낸다. 즉,

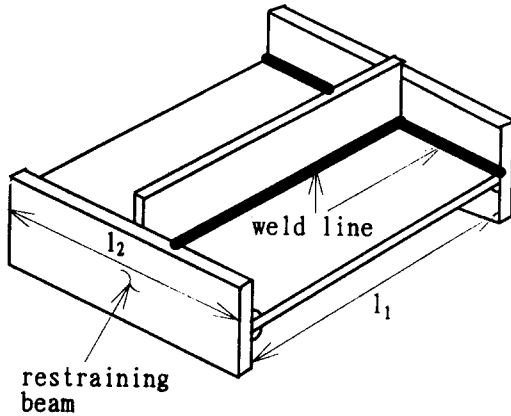


Fig 8. Plate with restraining beams

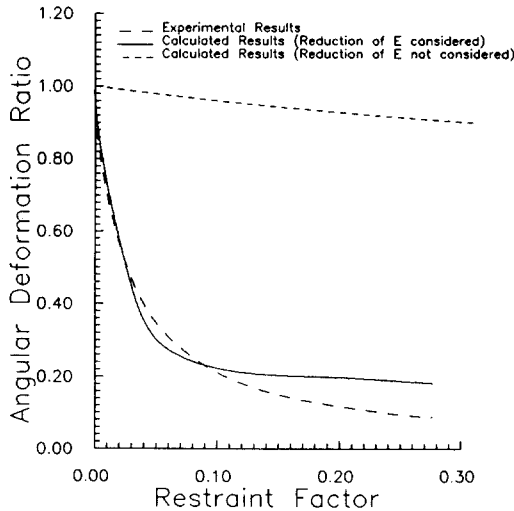


Fig 9. Angular deformation ratio of restrained plates

$\delta_0$  = 구속 상태에서의 각변형

$\delta_f$  = 자유 상태에서의 각변형

고유변형도의 크기가 외부구속에 의해 영향을 받지 않는다고 가정하면 Fig. 9에서 각변형비는 구속계수에 따라 일정한, 거의 직선에 가까운 형태가 된다. 또한 고유변형도 영역의 탄성계수가 인접영역의 탄성계수와 동등하다고 본 경우의 결과는 Fig. 9에 나타난 경우와 같이 구속계수에 영향을 크게 받지 않는다. 따라서 Fig. 9을 통해 고유변형도의 크기는 외부구속에 의해 영향을 받고 있고, 판의 굽힘변형은 고온영역에서 발생하므로 고유변형도 영역의 탄성계수는 인접영역보다 저하됨을 고려해야 된다는 사실을 알 수 있고, 본 연구에서 제시한 방법은 실험에서 나타난 현상을 충분히 반영할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10과 같이 용접선이 긴 조립부재에서 나타나는 종변형을 계산해 보면 Fig. 11과 같다. Fig.

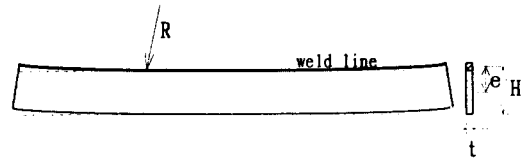


Fig 10 Longitudinal bending deformation of the long welded beam

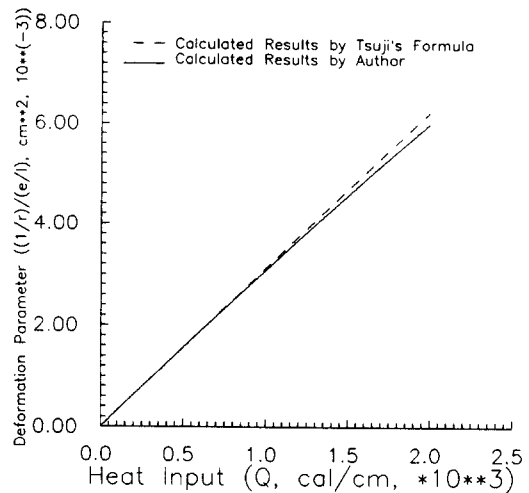


Fig 11. Longitudinal deformation parameters of the edge welded beams



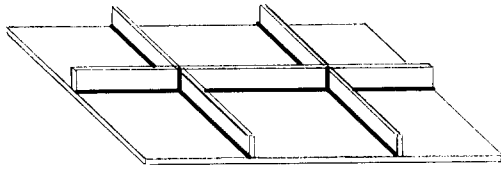


Fig 12. Shape of the stiffened plate structure

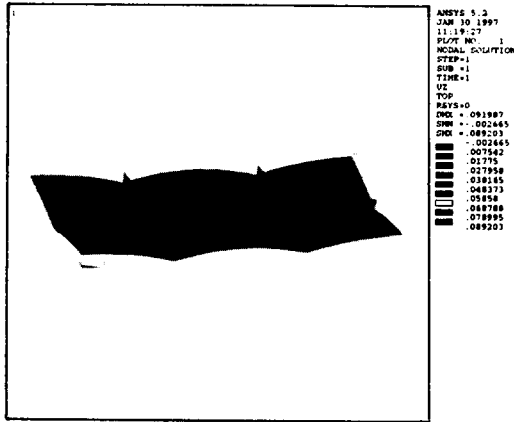


Fig 13. Deformed shape of the stiffened plate structure

11에서 辻勇이 실험 및 이론 해석을 통해 제시한 식은 다음과 같다<sup>12)</sup>.

$$\frac{1}{r} = 0.4 \frac{\alpha}{c_p} \frac{e}{l} Q \quad (20)$$

여기서, r = 종변형의 곡률 반경  
 l = 보의 단면 2차모멘트  
 e = 보의 중립축에서 용접선 중심까지의 거리

Fig. 11을 통해서 본 연구에서 제시한 변형 예측 기법은 종변형 해석에도 적용될 수 있음을 확인할 수 있다.

최종적으로 각종 변형 양상이 중첩된, Fig. 12와 같은 일반적인 선체의 한 블록에 대해 변형을 계산해 보면 Fig. 13와 같다. Fig. 13의 경우, 범용유한요소 해석 소프트웨어 ANSYS<sup>®</sup>의 SHELL 63요소를 활용하였다. 고유변형도 영역을 하나의 요소로 모델링하고, 용접선 길이 방향에 수직한 하중의 경우는 등가의 분포하중을 계산한 후, 고유변형도

영역의 요소 절점마다 요소의 길이를 고려한 후 절점하중으로 배분하여 가하였다. 용접선 길이 방향과 평행한 하중의 경우는 서로 상쇄되는 효과를 고려하여 용접선 양 끝에 집중하중으로 작용시킨다. 고유변형도 요소의 재료특성치는 직교 이방성 재질의 특성치로 입력하였다. Fig. 13을 통해 본 연구에서 제시한 변형 예측 기법은 복잡한 구조물에 존재하는 복합적인 변형을 모두 고려하여 예측할 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

구조물의 용접변형은 기본적인 변형 양상이 다양하게 조합되어 나타나는 복합적 형태이고 변형을 지배하는 요인들 또한 다양하므로 변형의 정확한 예측은 오랜 숙제였다. 현재까지의 많은 연구 성과에도 불구하고 용접변형에 관련한 다양한 요인들을 하나의 이론에 모두 수용하여 실용적인 해법을 얻기에는 많은 난점들이 존재하고 있다. 본 연구에서는 현재까지의 연구 성과를 바탕으로 복잡한 구조물의 다양한 용접 변형 형상을 실용적인 방법으로 해석하기 위한 한 방법을 제시하였다. 고유변형도 이론과 실험적 방법을 토대로 유한요소법을 접목시킴으로 대형구조물의 용접변형 예측을 목표로 삼았다. 고유변형도 자체가 입열량 뿐만 아니라 구조물의 구속상태에 따라 달라진다는 사실을 간단한 구조 모델을 통해 보였으며, 고유변형도 영역의 탄성계수를 인접영역과는 달리 고려해야 한다는 사실도 규명하였고, 이러한 사실을 실험 결과와의 비교를 통해서 검증하였다. 본 연구에서 제시한 변형 예측 방법은 현재 사용되는 범용 유한요소해석 소프트웨어와 조합하여 판구조로 이루어진 용접구조물의 변형 예측에 긴요하게 활용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 渡變正紀, 佐藤邦彦 : 溶接力學とその應用, 朝倉書店 (1965), pp. 367 - 411.
2. 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 (1976).
3. Watanabe, M. and Satoh, S. : "Effect of Welding Conditions on the Shrinkage Distorsion in Welded Structures", Welding Journal, Vol. 40 (1961).
  4. 藤本二男 : "固有ひずみの概念による溶接残留應力および溶接變形の解析法", 日本溶接學會誌, Vol. 39, No. 4 (1970).
  5. 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).
  6. Masubuchi, K. : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press (1980), pp. 148 - 188.
  7. Moshaiov, A. and Vorus, W. S. : "The Mechanics of the Flame Bending Process: Theory and Applications", Journal of Ship Research, Vol. 31, No. 4 (1987).
  8. "ABAQUS User s Manual", Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (1993).
  9. "ANSYS User s Manual", SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, INC. (1992).
  10. "SYSWELD Technical Description", FRAMASOFT+CSI (1995).
  11. Ueda, Y., Nakacho, K. and Moriyama, S. : "Compressive Ultimate Strength of Rectangular Plates with initial Imperfections due to Welding (4th Report)", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 159 (1986).
  12. 辻勇, 山口喜久次 : "縁を溶接した帯板に生ずる應力と縦曲り變形", 西部造船會會報, Vol. 42 (1967).