

## 박판구조물의 용접 면외변형에 대한 이론 해석적 접근

서승일<sup>†\*</sup>

한국철도기술연구원<sup>\*</sup>

### Theoretical Approach to Welding Out-of Plane Deformations in Thin Plate Structures

Sung Il Seo<sup>†\*</sup>

Korea Railroad Research Institute<sup>\*</sup>

#### Abstract

The out-of-plane deformation in thin plate structure has been a serious quality problem. It has been known that the out-of-plane deformation is caused by the angular deformation of welded joint. However, experimental results show that the conventional theory based on angular deformation is not appropriate for prediction of the out-of-plane deformation in thin plate structure. In this study, large deformation plate theory is introduced to clarify the effect of residual stress on the out-of-plane deformation. A simple equation is proposed to predict the out-of-plane deformation. The results by the proposed method show good agreement with the experimental results.

\*Keywords: Nonlinear analysis(비선형 해석), Out-of-plane deformation(면외변형), Residual stress(잔류응력), Thin plate, Welding(박판, 용접)

#### 1. 서론

구조물의 용접 시에는 용접열에 의한 용융부를 중심으로 국부적인 팽창과 수축이 발생하여 소성 변형도가 유발되고 냉각 후에도 잔류하여 용접 변형이 발생한다. 판구조물의 경우에는 용접 변형이 심각하여 구조물의 제작 상에 공차 문제를 유발하

고, 초기 결함으로 작용하여 강도 및 미관상 문제 점을 발생시킨다. 특히 판구조물의 면외변형의 경우, 심할 때에는 용접변형으로 인해 제작이 완료된 구조물에 교정이 필요한 상황이 자주 발생하여 비용 상승의 원인이 되기도 있다. 판구조물의 용접변형에 대한 대책 수립을 위해서는 정확한 현상의 파악과 현상을 기술할 수 있는 이론적 해석 기법의 개발이 필수적이다.

용접 변형을 유형적으로 분류하면, 용접선을 중심으로 종수축(longitudinal deformation), 횡수축(transverse deformation), 각변형(angular

접수일: 2005년 3월 28일, 승인일: 2005년 7월 1일

† 주저자, E-mail: siseo@krri.re.kr

Tel:031-460-5623

deformation), 회전변형(rotational deformation), 좌굴변형(buckling deformation) 등(Masubuchi 1980)과 같은데, 판구조물의 경우에는 기본적인 용접변형이 중첩되어 복합적인 양상을 띄게 되어 이론적 접근을 어렵게 한다. 고전적인 연구에서는 개별적인 용접 변형에 대한 실험 결과와 탄성학(theory of elasticity)에 근거한 고유변형도 이론을 적용하여 용접 변형을 해석하였고, 이런 방법은 판구조물의 면외변형 문제에도 적용되었다(장창두와 이창현 2000). 근래에는 컴퓨터를 활용한 열탄소성 시뮬레이션에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고, 컴퓨터 성능 향상의 도움으로 적용 범위를 넓혀 가고 있다(이창현과 신중계 2002). 그러나 열탄소성 시뮬레이션도 용접 변형의 각 개별적인 유형에 대한 적용이 주류를 이루고 있고, 모델링 및 해석 방법의 차이에 따라 해석 결과의 차이가 심하며, 계산 효율 등의 문제로 인해 대형 구조물의 변형 해석 시에는 어려움이 따른다. 근래에는 대형 구조물의 용접 변형 해석을 위해 열탄소성 시뮬레이션 보다는 간이 열탄소성 해석 방법에 의한 탄성 해석적 접근 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있고, 효율성을 발휘하고 있다(Seo and Jang 1999). 판구조물의 면외변형과 같이 변형 유형이 복합된, 재료적인 비선형성(material nonlinearity)과 기하학적인 비선형성(geometrical nonlinearity)이 포함된 문제에 대해 시뮬레이션 방법을 적용하는 것은 계산 효율성과 정확성 측면에서 문제가 있어 단순한 구조물 이외에는 적용의 한계성이 있다. 최근에는 열탄소성 시뮬레이션 시에 포함되어야 하는 재료적 비선형성을 제외하고 기하학적 비선형성만 고려하여 유한요소법을 적용한 박판구조물의 좌굴변형에 대한 연구(양진혁 등 2004)가 수행되고 있으나, 용접조건과 판의 기하학적 효과 및 잔류응력과 같이 변형에 영향을 미치는 변수들의 효과적인 정량적 분석에 어려움이 있게 된다.

본 연구에서는 박판구조물의 용접에 의한 면외 변형을 대상으로, 복합적인 변형을 해석할 수 있는 효율적이고 간편한 이론적인 방법을 제시하고자 한다. 각 변수들의 영향을 직접적으로 파악하고, 효율적으로 변형을 해석하기 위해 수치적인

방법(numerical method)을 피하고 고전적인 역학적 이론에 기초하여 기존 연구의 문제점을 분석하고, 대안을 제시하고자 한다.

## 2. 판의 면외변형 해석 이론에 대한 고찰

판구조물의 용접 시에는 Fig. 1과 같은 면외변형(out-of-plane deformation)이 발생하고, 그 원인은 판두께 방향의 잔류 소성변형도의 불균일에 의해 발생된 각변형(angular deformation)이라고 알려져 왔다(Masubuchi 1980).

판의 면외변형을 예측하고 추정하기 위해서 먼저 각변형을 추정하고, 각변형이 유발하는 면외변형을 계산하는 것이 일반적인 방법이었다. Satoh and Terasaki(1976)는 판의 면외변형은 각변형에서 유발된다고 가정하고, 실험 및 이론 해석 결과에 기초하여 연강(mild steel)에 대해 Fig. 2의 결과를 얻었고, (1), (2)식과 같은 각변형 추정식을 제시하였다.

$$\delta = 1.43 \times 10^{-3} \frac{Q}{h^2} \left( \frac{Q}{h^2} \leq 10.5 J/mm^3 \right) \quad (1)$$

$$\delta = -0.57 \times 10^{-3} \frac{Q}{h^2} + 0.021 \left( \frac{Q}{h^2} > 10.5 J/mm^3 \right) \quad (2)$$

각변형에 의한 최대 면외변형량  $w_{max}$ 은 다음 식으로 계산된다.

$$w_{max} = \frac{3\delta \cdot b}{8} \quad (3)$$



Fig. 1 Out of plane deformation in plate

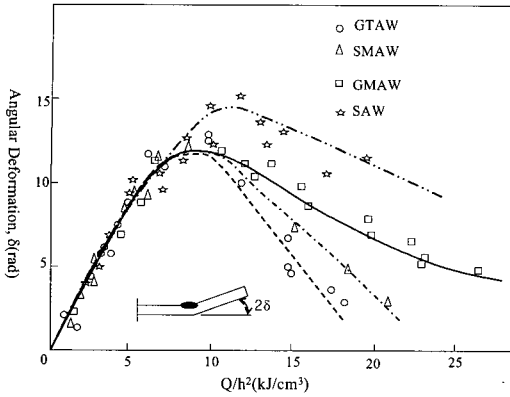


Fig. 2 Effect of heat parameters on angular deformation(Satoh and Terasaki 1976)

여기서,

$$\delta_r = \frac{1}{1 + 375 C_r} \delta$$

=Fig. 3와 같은 구속 판의 각변형

$$C_r = \text{구속계수} (\text{mm}^{-1})$$

$$= \frac{1}{L_1} \left\{ 1.5 + 1.975 \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^2 + 0.927 \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^4 \right\}$$

Satoh and Terasaki(1976)의 방법에 따라 박판의 면외변형을 예측한 결과는 Fig. 4와 같다. Terai(1978)는 박판에 대한 용접변형 계측 실험을 실시하여 결과를 얻었는데, Fig. 4는 Satoh and Terasaki(1976)의 방법에 의한 용접변형 예측 결과와 Terai(1978)에 의한 실험 결과를 함께 나타내고 있다. Fig. 4에 따르면 Satoh의 방법에 따른 변형 예측 결과는 실험 결과에 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 입열량이 증가하고 박판이 될수록 Fig. 1과 같이 각변형은 감소하고 이에 따라 면외변형도 감소하는 것으로 예측되지만 실제 변형 계측 결과는 이와는 반대로 입열량이 증가하고 박판이 될수록 면외변형은 증가하는 결과가 얻어졌기 때문이다. 예측 결과와 실험 결과의 차이는 결국 박판에서 면외변형을 유발하는 주요 원인은 각변형으로 설명될 수 없음을 말해 준다.

박판이 될수록 구조물의 용접 시에는 Fig. 5와 같은 좌굴변형이 발생하는 경우가 많고, 좌굴변형

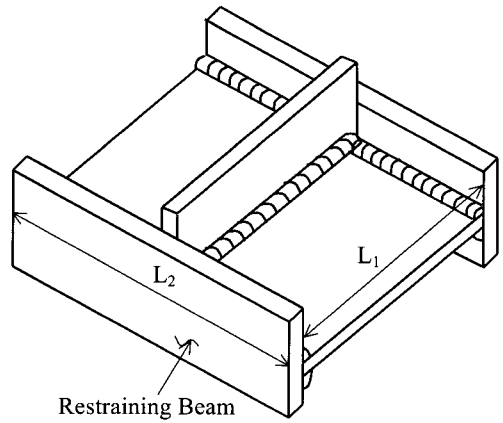


Fig. 3 Restrained plate

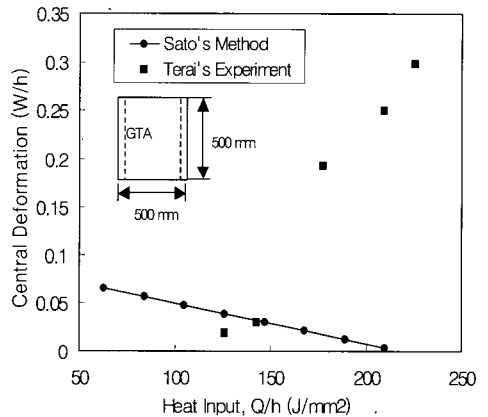


Fig. 4 Prediction of out-of-plane deformation

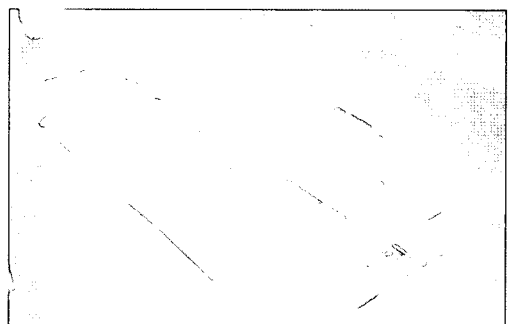


Fig. 5 Buckling deformation of plate due to welding

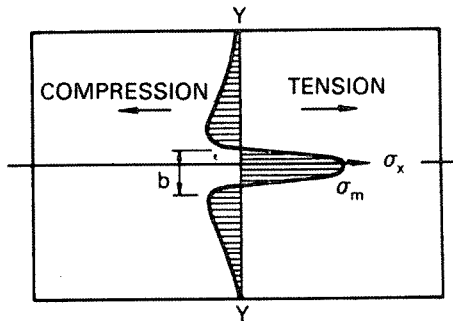


Fig. 6 Welding residual stress

이 발생하지 않는 경우에도 예측 결과가 현실과는 동떨어진 경우가 많다. 이는 각변형 이외에 박판 구조물의 용접 변형에 미치는 요인을 적절히 고려하지 않았고, 역학적 거동을 해석할 수 있는 이론이 적절치 못하였기 때문으로 판단된다.

잔류응력은 용접부 수축에 의해 Fig. 6와 같이 용접선 인근에서 인장응력과 중앙에서 압축응력으로 존재한다. 압축 잔류응력은 굽힘 강성이 취약한 박판에서 판의 면외변형을 촉진시키고, 심지어 좌굴을 유발시킬 수 있으므로 박판의 면외변형에 영향을 미친다. 또한 기존의 선형 이론에서는 잔류응력과 같은 면내하중(in-plane load)이 유발하는 면외변형을 적절히 해석할 수 없으므로 잔류응력에 의한 면외변형 해석을 위해 비선형 이론의 도입이 불가피하다. 따라서 본 연구에서는 비선형 대변형 판이론(nonlinear large deformation plate theory)을 사용하여 박판에서 잔류응력의 영향을 이론적으로 명확히 한 후에, 실용적인 박판·면외변형 예측 방법을 제시하고자 한다.

### 3. 잔류응력의 효과를 고려한 정식화

잔류응력과 같은 면내하중이 유발하는 면외변형을 해석하기 위해 대변형 판이론에 의해 본 문제를 정식화하였다. Fig. 6과 같이 분포하는 잔류응력을 부분적으로 균일한 응력이라고 가정하고 판의 거동에 영향을 미치는 압축응력만을 고려하였다. Fig. 7과 같이 균일 압축응력을 받는 판의 대

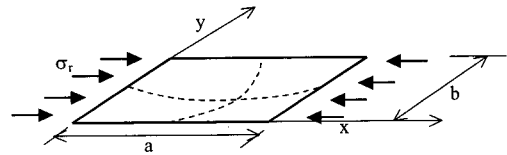


Fig. 7 Plate subjected to compressive stress

변형 적합조건식 및 평형방정식은 각각 (4) 및 (5) 식과 같다.

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = E \left[ \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{h}{D} \left[ \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

여기서,

$F$ =응력함수

$w$ =판의 변형

$w_0$ =초기변형

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  =판의 굽힘강성

(4)식과 (5)식은 비선형 미분방정식으로서 일반해를 얻기는 곤란하고, 근사적인 방법으로 해를 얻을 수 있다. (6), (7)식과 같이 처짐 형상을 가정한 후, (4)식에 대입하여 응력함수를 구하면 다음의 (8)식이 얻어진다.

$$w = f \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (6)$$

$$w_0 = f_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \tag{7}$$

여기서,  
 $a$ =판의 길이  
 $b$ =판의 폭

$$F = -\frac{\sigma_x}{2} y^2 + \frac{E}{32} (f^2 + 2ff_0) \left( -\frac{a^2}{b^2} \cos \frac{2\pi x}{a} + \frac{b^2}{a^2} \cos \frac{2\pi y}{b} \right) \tag{8}$$

여기서,  
 $\sigma_x$ =잔류응력

(8)식을 다시 (5)식에 대입한 후, Galerkin법을 적용하면 잔류응력과 변형과의 관계식이 얻어진다. 용접에 의한 수축하중이 입열량에 비례하고, 수축하중에 의한 압축잔류하중이 판에 분포한다고 가정하면, 입열량과 면외변형과의 관계는 (9)식과 같이 표현된다. (9)식의 유도 과정에서 잔류응력과 입열량과의 관계를 (10)식과 같이 가정하였다.

$$c \frac{Q}{bh} = \frac{1}{16} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 (W_1^2 - f_1^2) \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 + \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right] + \frac{1}{12(1-\nu^2)} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 \left( 1 - \frac{f_1}{W_1} \right) \left( \frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2 \tag{9}$$

여기서,  
 $c$ =잔류응력 환산 계수=1.2

$$W_1 = \frac{f + f_0}{h}, \quad f_1 = \frac{f_0}{h}$$

$\sigma_Y$  = 항복응력

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_Y} = c \frac{Q}{bt} \tag{10}$$

(9)식은 판의 기하학적 형상과 용접 입열량을 알면 면외변형을 예측할 수 있는 간략화된 계산식으로서, Satoh and Terasaki(1976)가 박판 변형 예측으로 제시한 (2)식의 적용 범위에서 활용될 수 있다. (9)식은 (11)식과 같이 표현되는 3차 방정식이므로, 다음과 같이 근의 공식을 사용하여

입열량이 주어진 경우의 변형량을 계산할수 있다.

$$AW_1^3 + BW_1^2 + CW_1 + D = 0 \tag{11}$$

여기서,

$$A = \frac{1}{16} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 + \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right]$$

$$B = 0$$

$$C = -\frac{1}{16} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 f_1^2 \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 + \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right] + \frac{1}{12(1-\nu^2)} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 \left( \frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2 - c \frac{Q}{bh}$$

$$D = -\frac{1}{12(1-\nu^2)} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 f_1 \left( \frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2$$

(11)식의 해는 다음 식으로 구해진다.

$$W_1 = \sqrt[3]{\frac{-q + \sqrt{q^2 + 4p^3}}{2}} + \sqrt[3]{\frac{-q - \sqrt{q^2 + 4p^3}}{2}} - \frac{B}{3A} \tag{12}$$

여기서,

$$p = \frac{1}{3} \left( \frac{C}{A} - \frac{B^2}{3A^2} \right)$$

$$q = \frac{2B^3}{27A^3} - \frac{BC}{3A^2} + \frac{D}{A}$$

(12)식에 의한 변형량 계산 결과를 Terai(1978)의 실험 결과와 비교해 보면 Fig. 8과 같다. Fig. 8을 통해 실험 결과와 본 연구에서 제시한 변형 예측식이 상당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 박판의 면외변형 해석 시에 잔류응력의 효과를 고려하는 것이 타당함을 확인할 수 있다. Fig. 8을 보면 입열량이 작은 경우에는 면외변형이 선형적으로 증가하다가 어느 한도를 초과하면 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 잔류응력이 임계치를 초과하여 좌굴변형이 발생하고 있는 경우라고 할 수 있다. Fig. 8의 해석 결과는 초기변형은 판두께의 1%로 가정하고 얻어진 것이다.

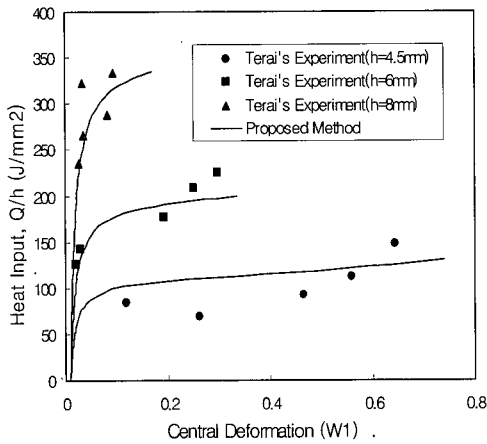


Fig. 8 Comparison of proposed method with experiment

중형비가 큰 박판의 경우에는 파형(wave form)의 변형이 발생하게 되므로, 파형의 파수에 따라 중형비가 1에 근접하도록 등가의 길이를 계산하면 된다(장창두와 서승일 1993). 즉 중형비  $\frac{a}{b}$ 가 3인 판의 경우에는 파수(wave number)  $m$ 를 3으로 취하면 등가의 길이  $a'$ 은 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$a' = \frac{a}{m} \tag{13}$$

여기서,

$a'$  = 등가의 길이,  $m$  = 좌굴 파수

중형비가 정수가 아닌 경우에도 같은 방법에 따라 중형비에 가장 근접한 정수의 파수를 취하여 등가의 길이를 구할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 박판구조물의 면외변형을 해석할 수 있는 이론적인 기법을 제시하였고, 실험 결과와의 비교를 통해 타당성을 입증하였다. 비선형 대변형 판이론을 도입하여 박판구조물의 면외변형 문제를 정식화하였고, 해를 도출하였으며 실험 결

과와 비교하였다. 본 연구의 결과로 다음의 결론이 얻어졌다.

1) 박판 구조물에서 면외변형은 각변형에 의한 초기변형과 잔류응력이 조합되어 발생함을 알 수 있었다.

2) 대변형 판이론의 적용을 통해 판의 면외변형에 미치는 잔류응력의 영향을 효과적으로 해석할 수 있다.

3) 용접 조건과 판의 기하학적 정보를 기초로 면외변형을 추정할 수 있는 간략화된 계산식을 제시하였다.

#### 참 고 문 헌

- 양진혁, 강성수, 장경복, 조시훈, 장태영, 2004, "박판 용접의 좌굴 간이해석법," 대한용접학회 춘계학술발표대회 개요집, pp. 276-278.
- 이장현, 신종계, 2002, "비드의 용융상태를 고려한 가스메탈 아크용접의 3차원 열탄소성 변형 해석," 대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 1호, pp. 49-60.
- 장창두, 서승일, 1993, "용접된 보강판의 압축 최종강도의 간이 해석법," 대한조선학회 논문집, 제 30권, 제 2호, pp. 141-154.
- 장창두, 이창현, 2000, "선체 블록의 용접변형 예측 및 제어를 위한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 2호, pp. 127-136.
- Masubuchi, K., 1980, Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, pp. 235-316.
- Satoh, K. and Terasaki, T., 1976, "Effect of Welding Conditions on Residual Stresses and Welding Deformations in Welded Structures," Journal of Japanese Welding Society, Vol. 45, No. 1, pp. 42-50.
- Seo, S.I. and Jang, C.D., 1999, "A Study on the Prediction of Deformations of Welded Ship Structures," Journal of Ship Production, Vol. 15, No. 2, pp. 73-81.
- Terai, K., 1978, "Study on Prevention of Welding Deformation in Thin Skin Plate Structures," Kawasaki Technical Review, Vol. 61, pp. 61-66.