

# 판구조물의 용접 변형에 미치는 잔류응력의 영향에 관한 연구

## A study on the effect of residual stress on welding deformations in thin plate structures

서승일\*

\* 한국철도기술연구원 고속철도사업단

**ABSTRACT** It has been known that out-of-plane deformation in thin plate structure is caused by the angular deformation of welded joint. However, experimental results show that conventional theory based on angular deformation is not appropriate for prediction of 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 out-of-plane deformation. The results by the proposed method show good agreement with the experimental results.

### 1. 서 론

구조물의 용접 시에는 국부적인 용융 수축에 의해 소성 변형도가 발생하고 냉각 후에도 잔류하여 용접 변형이 발생한다. 특히 박판구조물(thin plate structure)의 경우에는 용접 후에 형성된 변형이 상당히 심각하여 교정이 불가피한 경우가 많이 발생한다. 판구조물에서 흔히 발생하는 변형은 Fig. 1과 같은 면외변형(out-of-plane deformation) 이라고 할 수 있는데, 면외 변형은 판두께 방향의 잔류 소성변형도의 불균일에 의해 발생된 각변형(angular deformation)이 주요 원인으로 알려져 왔다<sup>1)</sup>.

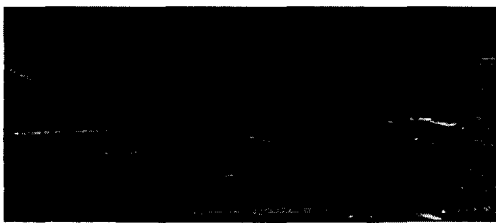


Fig. 1 Out of plane deformation in plate

판의 면외변형을 예측하고 추정하기 위해서 먼저 각변형을 추정하고, 각변형이 유발하는 면외 변형을 계산하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나 이 방법은 두께가 상당한 판구조물에 대해서는 정확성이 입증되었지만, 박판이 될수록 좌굴변형이 발생하지 않는 경우에도 현실과는 동떨어진 예측 결과를 제시하고 있다. 이는 판의 내부에 존재하는 잔류응력의 영향을 정확히 고려하

지 않았기 때문에 사료된다.

잔류응력은 용접부 수축에 의해 Fig. 2와 같이 용접선 인근에서 인장응력과 중앙에서 압축응력으로 존재한다.

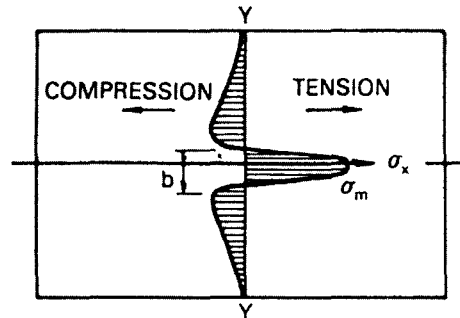


Fig. 2 Welding residual stress

압축 잔류응력은 굽힘 강성이 취약한 박판에서 판의 면외변형을 촉진시키고, 심지어 좌굴을 유발시킬 수 있으므로 그 영향을 명확히 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 기존의 판의 면외변형을 추정하는 이론에 대해 고찰하고, 박판에 적용할 경우의 문제점을 제시한 후에, 비선형 대변형 판이론을 사용하여 박판에서 잔류응력의 영향을 이론적으로 명확히 한 후에, 실용적인 박판 면외 변형 예측 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 판의 면외변형 해석 이론

Sato 등<sup>2)</sup>은 판의 면외변형은 각변형에서 유발된다고 가정하고, 실험 및 이론 해석 결과에 기초하여 연강(mild steel)에 대해 Fig. 3의 결

과를 얻었고, (1), (2)식과 같은 각변형 추정식을 제시하였다.

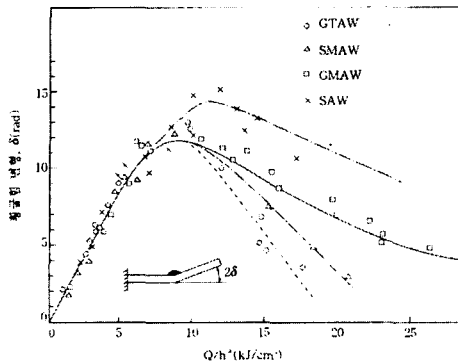


Fig. 3 Effect of heat parameters on angular deformation

$$\delta = 6 \times 10^{-6} \frac{Q}{h^2} \quad \left( \frac{Q}{h^2} \leq 2500 \text{ cal/cm}^3 \text{ 경우} \right) \quad (1)$$

$$\delta = -2.4 \times 10^{-6} \frac{Q}{h^2} + 0.021 \quad \left( \frac{Q}{h^2} > 2500 \text{ cal/cm}^3 \text{ 경우} \right) \quad (2)$$

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

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

여기서,  $\delta_r = \frac{1}{1 + 37.5C_r} \delta$

= Fig. 4와 같은 구속 판의 각변형

$C_r =$  구속계수

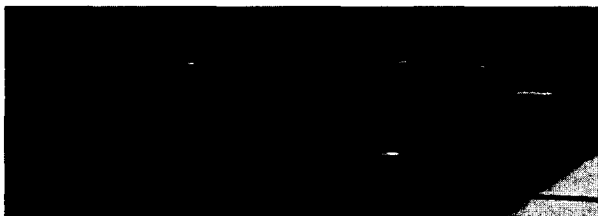


Fig. 4 Deformed stiffened plate

Sato의 방법에 따라 박판의 면외변형을 예측한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에는 Terai등<sup>3)</sup>이 박판의 용접 변형을 계측한 결과도 함께 표시되어 있다. Fig. 5에 따르면 Sato의 방법과 다른 변형 예측 결과는 실험 결과에 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 입열량이 증가하고 박판이 될수록 Fig. 3과 같이 각변형은 감소되고 이

에 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 말해준다. 따라서, 박판에서 면외변형은 잔류응력의 효과에 의해서 명확히 설명될 수 있다.

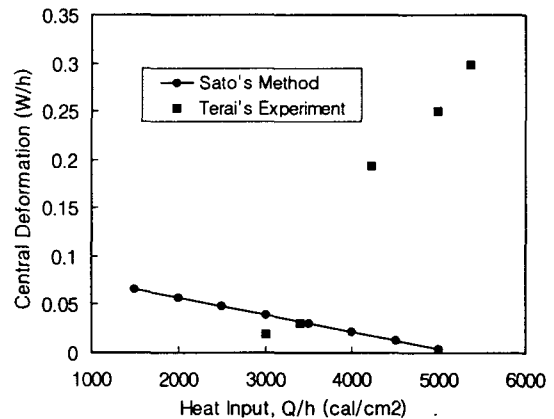
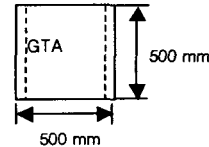


Fig. 5 Prediction of out-of-plane deformation

### 3. 잔류응력의 효과를 고려한 정식화

잔류응력과 같은 면내하중에 의해 유발되는 면외변형을 해석하기 위해 대변형 판이론이 필요하다. Fig. 2와 같이 분포하는 잔류응력을 부분적으로 균일한 응력이라고 가정하고 판의 거동에 영향을 미치는 압축응력만을 고려한다. Fig. 6와 같이 균일 압축응력을 받는 판의 대변형 적합조건식 및 평형방정식은 각각 (4) 및 (5)식과 같다. (4)식과 (5)식은 비선형 미분방정식이므로 일반해를 얻기는 곤란하고, 근사적인 방법으로 해를 얻을 수 있다. (6), (7)식과 같이 처짐형상을 가정한 후, (4)식에 대입하여 응력함수를 구하고, 다시 (5)식에 대입한 후, Galerkin법을 적용하면 잔류응력과 변형과의 관계식이 얻어진다.

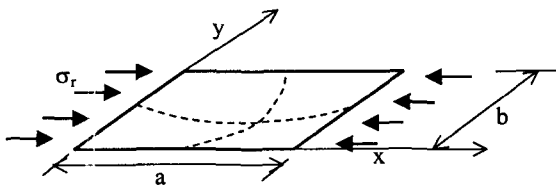


Fig. 6 Plate subjected to compressive stress

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

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

여기서,  $F$ =응력함수,  $w_0$ =초기변형  
 $D$ =판의 굽힘강성,  $h$ =판두께

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

$$w_0 = f_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (7)$$

$$c \frac{Q}{bh} = \frac{1}{16} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 (W_1^2 - f_1^2) \left[ \left( \frac{b}{a} \right)^2 + \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right] + \frac{1}{12(1-\nu^2)} \frac{\pi^2 E}{\sigma_Y} \left( \frac{h}{b} \right)^2 \times \left( 1 - \frac{f_1}{W_1} \right) \left( \frac{b}{a} + \frac{a}{b} \right)^2 \quad (8)$$

여기서,  $Q$ =입열량(cal/cm)  
 $c$ =잔류응력 환산 계수=0.005  
 $W_1 = \frac{f+f_0}{h}$ ,  $f_1 = \frac{f_0}{h}$

잔류응력이 입열량에 비해한다고 가정하면 입열량과 면외변형과의 관계가 (8)식과 같이 표현된다. (8)식을 그림으로 나타내 보면 Fig. 7과 같고, Terai 등<sup>3)</sup>의 실험 결과와 비교해 보면 상

당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 박판의 면외변형 해석 시에 잔류응력의 효과를 고려하는 것이 타당함을 확인할 수 있다. 용접조건이 주어지면 박판의 면외변형은 3차방정식의 근의 공식으로부터 계산할 수 있다.

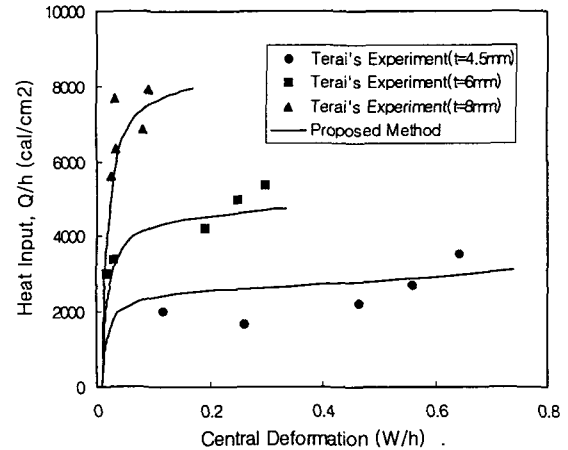


Fig. 7 Comparison of proposed method with experiment

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 박판 구조물의 면외변형의 주요 원인이 각변형 보다는 잔류응력임을 입증하였다. 초기변형이 존재하는 판에서 압축잔류응력이 면외변형을 증가시킴을 대변형 판이론을 이용하여 밝혔고, 실험 결과와의 비교를 통해 타당성을 입증하였다. 압축잔류응력은 면외변형을 증가시키고, 임계치 근처에서는 좌굴변형을 유발시킴으로 변형을 가속화시킨다는 사실을 이론 해석 및 실험을 통해 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. K. Masubuchi : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, (1980) 235-316.
2. K. Sato and T. Terasaki : Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Welded Structures, Journal of JWS, 45-2 (1976) (in Japanese).
3. K. Terai : Study on Prevention of Welding Deformation in Thin Skin Plate Structures, Kawasaki Technical Review, 61 (1978), 61-66 (in Japanese).