

유한요소 역해석을 이용한 Tailor Welded Blank의 용접선 설계

*이 충호, *허 훈, **한 수식
*한국과학기술원 기계공학과
**포항 제철 기술연구소 박판연구팀

Design of Weld Line of a Tailor Welded Blank by Inverse Finite Element Analysis

*Choong Ho Lee, *Hoon Huh and **Soo Sik Han

*Department of Mechanical Engineering, KAIST

**Sheet Products & Process Research Team, POSCO Technical Research Lab.

Abstract

Design of a weld line in a tailor welded blank is indispensable for good manufacturing of stamped parts as assigned, since the initial weld line is distorted severely with forming. The initial weld line has to be determined such that desired weld line in a formed part can be obtained. The initial weld line was predicted by inverse finite element analysis from the desired weld line in a formed part. The inverse approach is applied to the cylindrical and square cup drawing with tailor welded blanks. The applications demonstrates that the approach is useful for design of weld line of tailor welded blank.

Keywords : Tailor Welded Blank, Weld Line, Inverse Finite Element Analysis

1. 서 론

Tailor Welded Blank(TWB)는 서로 다른 판재를 레이저 용접에 의하여 일체화한 후 스탬핑하는 기술로서 생산성 향상, 경비절감, 경량화, 강성향상 등의 장점이 있다. 이와 같은 장점을 가지고 있기 때문에 일부 자동차 부품에 적용되고 있다. 그렇지만, TWB에 관한 성형은 단일재료로 된 판재를 성형하는 것보다 성형성이 떨어지기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행중이다. 지금까지 TWB에 관한 연구는 성형성 평가, 용접선 이동 등 주로 현상을 파악하는 데 집중되어 있다^(1,2,3). 그러나 성형된 제품에서 요구되는 용접선이 되기 위한 블랭크의 초기 용접선과 경계조건 등의 설계적인 관점의 연구는 거의 없는 실정이다. 초기 용접선에 관한 예측은 TWB 성형시 시행착오를 줄이고, 생산성 향상을 위하여 필수적이라고 할 수 있다.

한편, 유한요소 역해석은 Majlessi와 Lee⁽⁴⁾, Guo와 Batoz⁽⁵⁾, Chung과 Richmond⁽⁶⁾, Liu와 Karima⁽⁷⁾, Lee와 Huh⁽⁸⁾ 등에 의해 연구가 이루어졌다. 유한요소 역해석은 주로 초기 블랭크 형상과 변형률 분포 등을 매우 짧은 계산시간에 예측하는데 이용되었다. 본 논문에서는 유한요소 역해석을 이용하여 성형 후 요구되는 용접선이 되기 위한 블랭크의 초기 용접선을 예측하였다. 해석한 예제는 원형컵과 사각컵으로 초기 용접선에 관한 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 유한요소 역해석

2.1 소성변형 에너지

해석하고자 하는 형상의 최종상태와 초기상태가 유한요소로 분할되어 있을 때, 각 요소에 대한 소성변형 에너지의 총합은 대수변형률식과 구성 방정식을 이용하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_p(\mathbf{X}) = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega} \left(\int_{\epsilon_0}^{\epsilon_f} \boldsymbol{\sigma} : d\boldsymbol{\epsilon} \right) d\Omega = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega} \left(\int_0^{\epsilon_f} \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} D_{\alpha\beta} \epsilon_{\alpha} d\epsilon_{\beta} \right) t dA \quad (1)$$

식(1)은 초기상태에서 최종상태까지의 소성변형 에너지 값이며, 초기상태의 절점좌표 \mathbf{X} 의 함수이다.

2.2 경계조건

본 논문에서는 마찰과 블랭크 홀딩력 등의 경계조건을 다음과 같이 근사화 된 식으로 고려하였다.

$$W_f(\mathbf{X}) = \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_r} \left(\int_0^{u_r} \mathbf{t}_f \cdot d\mathbf{u} \right) d\Gamma = - \sum_{\text{node}_L} \left[\mu F_n \tanh \left(\alpha \frac{\|\mathbf{U}\|}{U_0} \right) \frac{\mathbf{U}}{\|\mathbf{U}\|} \right] \cdot \mathbf{U} \quad (2)$$

$$W_b(\mathbf{X}) = \sum_{e=1}^{E_b} \int_{\Gamma_b} \left(\int_0^{u_b} \mathbf{t}_b \cdot d\mathbf{u} \right) d\Gamma = - \sum_{\text{node}_L} \left[\mu F_b \tanh \left(\alpha \frac{\|\mathbf{U}\|}{U_0} \right) \frac{\mathbf{U}}{\|\mathbf{U}\|} \right] \cdot \mathbf{U} \quad (3)$$

식(2)는 마찰에 의한 외부일이며, 식(3)은 블랭크 홀딩력에 의한 일을 표현한 식이다. 비드력에 의한 일도 블랭크 홀딩력과 유사하게 나타낼 수 있다.

2.3 포텐셜 에너지의 최소화

본 논문에서는 소성변형 에너지와 등가 외부일의 차를 이용하여 다음과 같이 근사적인 포텐셜 에너지를 정의하여 수식화 하였다.

$$\begin{aligned} \min. \Psi(\mathbf{X}) = W_p(\mathbf{X}) - W_f(\mathbf{X}) - W_b(\mathbf{X}) - W_d(\mathbf{X}) = & \sum_{e=1}^E \int_{\Omega} \left(\int_{\epsilon_0}^{\epsilon_f} \boldsymbol{\sigma} : d\boldsymbol{\epsilon} \right) d\Omega \\ & - \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_r} \left(\int_0^{u_r} \mathbf{t}_f \cdot d\mathbf{u} \right) d\Gamma - \sum_{e=1}^{E_b} \int_{\Gamma_b} \left(\int_0^{u_b} \mathbf{t}_b \cdot d\mathbf{u} \right) d\Gamma - \sum_{e=1}^{E_d} \int_{\Gamma_d} \left(\int_0^{u_d} \mathbf{t}_d \cdot d\mathbf{u} \right) d\Gamma \end{aligned} \quad (4)$$

이때, $W_p(\mathbf{X})$ 는 소성변형 에너지이고, $W_f(\mathbf{X})$, $W_b(\mathbf{X})$, $W_d(\mathbf{X})$ 는 등가 외부일로서 각각 마찰에 의한 일, 블랭크 홀딩력에 의한 일, 비드력에 의한 일이다. 이때, 최종상태의 변형률 분포와 초기상태의 좌표는 포텐셜 에너지 최소화 과정으로 얻어진다. 식(4)를 최소화하기 위하여 식(5)와 같은 뉴턴-랩슨법을 사용하였다.

$$\left[\frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \right]_{(n)} \{d\mathbf{X}\} = - \{ \mathbf{R}(\mathbf{X}) \}_{(n)} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{X}) = \sum_{e=1}^E \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : \frac{\partial \boldsymbol{\epsilon}}{\partial \mathbf{X}} d\Omega - \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_r} \mathbf{t}_f \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} d\Gamma - \sum_{e=1}^{E_b} \int_{\Gamma_b} \mathbf{t}_b \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} d\Gamma - \sum_{e=1}^{E_d} \int_{\Gamma_d} \mathbf{t}_d \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} d\Gamma \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} = & \sum_{e=1}^E \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \mathbf{X}} : \frac{\partial \boldsymbol{\epsilon}}{\partial \mathbf{X}} + \boldsymbol{\sigma} : \frac{\partial^2 \boldsymbol{\epsilon}}{\partial \mathbf{X}^2} \right) d\Omega - \sum_{e=1}^E \int_{\Gamma_r} \frac{\partial \mathbf{t}_f}{\partial \mathbf{X}} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} d\Gamma - \sum_{e=1}^{E_b} \int_{\Gamma_b} \frac{\partial \mathbf{t}_b}{\partial \mathbf{X}} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} d\Gamma \\ & - \sum_{e=1}^{E_d} \int_{\Gamma_d} \frac{\partial \mathbf{t}_d}{\partial \mathbf{X}} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}} d\Gamma \end{aligned} \quad (7)$$

3. 수치해석 결과

Fig.1은 TWB를 사각킵으로 성형하였을 때, 용접선의 이동을 개략적으로 나타낸 그림이다. Fig.1(a)와 같이 직선인 용접선을 갖는 TWB를 성형하면, 킵의 윗면에서 보았을 때 직선이 아닌 비틀린 선이 된다. 그렇지만 성형에 의하여 비틀린 용접선은 일반적으로 원하지 않는 경우이다. Fig.1(b)는 성형 후 용접선이 직선이 되도록 블랭크의 용접선을 예측한 경우이다. Fig.1과 같이 성형 후 요구되는 용접선에 대응하는 블랭크의 초기 용접선의 형상을 예측한 예를 보이기 위하여 원형킵과 사각킵에 대한 해석을 수행하였다.

원형킵과 사각킵에 관한 해석을 하기 위하여 성형조건은 다음과 같다.

$\bar{\sigma} = 451(0.0004 + \bar{\epsilon})^{0.305}$ kgf/mm², $r = 1.98$, $t_0 = 0.8\text{mm}$ 와 1.6mm , $\mu = 0.1$, 블랭크 홀딩력 = 4,000 kgf. 이와 같이 재료의 물성치는 같은 값을 가지고, 단지 블랭크의 두께가 0.8mm와 1.6mm인 재료를 용접한 경우를 설정하였다. 이때, 두께의 차이는 있지만 다이면에서 동일한 블랭크 홀딩력을 받고 있는 조건으로 해석하였다. 원형킵과 사각킵의 높이는 모두 30mm인 형상이다. Fig.2는 원형킵에 대한 모델이며, 윗면에서 보았을 때 Y축으로 직선인 용접선을 갖는 형상이다. Fig.2와 같이 성형 후 용접선이 직선이 되기 위한 블랭크 형상과 초기 용접선을 유한요소 역해석으로 계산하면 Fig.3과 같다. Fig.3에서 용접선의 형상을 보면, 전체적으로 활 모양으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 즉, Y축을 기준으로 블랭크의 중앙에 있는 용접선은 오른쪽으로 이동하였고 블랭크 위와 아래의 용접선은 왼쪽으로 이동하였다. Fig.4는 사각킵에 대한 모델이며, 윗면에서 보았을 때 Y축으로 직선인 용접선을 갖는 형상이다. Fig.4에 대한 모델을 유한요소 역해석으로 계산하면 Fig.5와 같은 초기 블랭크 형상과 용접선을 얻을 수 있다. 사각킵 블랭크의 용접선도 원형킵 용접선과 유사하게 활 모양으로 되어 있는 것을 알 수 있다. 초기 용접선이 직선인 블랭크를 성형하면 Fig.1(a)와 같은 경향을 보이므로, 위의 Fig.3과 Fig.5의 결과는 타당한 경향을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 유한요소 역해석을 이용하여 원형킵과 사각킵에 관한 TWB문제를 해석하여 블랭크 형상과 초기 용접선의 모양을 예측하였다. 유한요소 역해석을 이용하면, 성형 후 요구되는 용접선에 대하여 블랭크의 초기 용접선의 모양을 빠르고 쉽게 계산할 수 있었다. 따라서, 원형킵과 사각킵의 해석결과로부터 TWB성형에 관한 용접선 설계에 유한요소 역해석이 효과적인 방법임을 알 수 있다.

REFERENCES

- (1) 홍주표, 김현영, 오수익, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.19-24, 1997.
- (2) Saunders, F.I. and Wagoner, R.H., *NUMIFORM*, pp.157-164, 1995.
- (3) Lee, A.P., Feltham, E. and Deventer, J., *SAE, SP-1134*, pp.91-102, 1996.
- (4) Majlessi, S.A. and Lee, D., *J. Mater. Shaping technol.*, Vol.6, No.1, pp.41-54, 1988.
- (5) Batoz, J.L., Guo, Y.Q., Duroux, P. and Detraux, J.M., *NUMIFORM'89*, pp.383-388, 1989.
- (6) Chung, K. and Richmond, O., *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.34, No.7, pp.575-591, 1992.
- (7) Liu, S.D. and Karima, M., *NUMIFORM'92*, pp.497-502, 1992.
- (8) Lee, C.H. and Huh, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.63, pp.645-650, 1997.

