

용접부를 고려한 레이저 합체박판 성형공정의 3차원 유한요소 해석

구본영*, 금영탁**, 이경남***

3-D FEM Analysis of Forming Process for Laser Welded Blank Considering Welded Zone

B.Y.Ghoo*, Y.T.Keum** and K.N.Lee***

Abstract

The finite element formulation is developed for predicting strain distributions and weld line movements in the forming processes of laser welded blank. The welded zone(WZ) is modelled with several, narrow finite elements whose material characteristics are analytically obtained from those of base metals, based on the tensile tests. In order to show the reliability and effectiveness of weld element, the forming processes of hemispherical dome stretching and auto-body door inner panel stamping are simulated. FEM predictions show good agreements with experimental observations.

Key Words : 레이저 합체박판(Laser Welded Tailored Blank), 용접 요소(Weld Element), 용접부(Welded Zone:WZ), 박판 성형 공정(Sheet Metal Forming Process), 3차원 유한요소 해석(3-D FEM Analysis)

1. 서론

2. 용접부 물성

본 연구는 레이저 용접 합체박판의 용접부 강도계수(K), 가공경화지수(n) 및 소성변형률비(r)를 가정된 용접부 폭에 따라 계산하는 수식을 정식화하고 용접비드가 주인장축과 평행한 인장시험결과로부터 가정된 용접부 폭에 따른 용접부 물성값을 계산하였다. 또한, 계산된 용접부 물성값을 이용하여, 합체박판의 용접부를 모델링할 수 있는 용접요소를 개발하였다. 개발된 용접요소의 수치적 안정성과 유용성을 검토하기 위해, 내연적 방법을 이용한 3차원 유한요소 프로그램에 이를 도입하여 시편 폭이 40mm인 원형 돔 스트레칭과 자동차 도어 인너 패널의 성형공정을 시뮬레이션하였다.

시편이 Hollomon 가공경화 법칙을 따른다고 가정하고 각 변형단계에서 모재에 부가된 하중을 전체 하중에서 감하여 용접부가 받는 하중을 계산하였다. 모재1과 모재2에 부가되는 하중 P_1 과 P_2 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$P_1 = \sigma_1 \times A_1 = A_{01} \cdot K_1 \epsilon^{n_1} / \exp(\epsilon) \quad (1)$$

$$P_2 = \sigma_2 \times A_2 = A_{02} \cdot K_2 \epsilon^{n_2} / \exp(\epsilon) \quad (2)$$

여기서, A_i 는 단면적, K_i 는 강도계수, 그리고 n_i 는 가공경화지수를 각각 나타낸다. 금영탁 등^[1]의 인장시험 결과로부터 식(1)과 식(2)를 이용하여 가정된 용접부 폭에 따른 강도계수 및 가공경화지수를 계산하고 모재 평균값을 기준으로 백분율로 환산한 값을 Fig.1과 Fig.2에 각각 나타내었다.

* : 한양대학교 대학원

** : 한양대학교 기계공학부

*** : 대우자동차 기술연구소

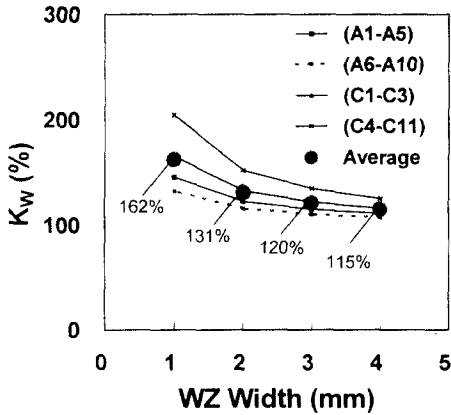


Fig.1 Percentage value of K_w associated with assumed welded zone(WZ) width.

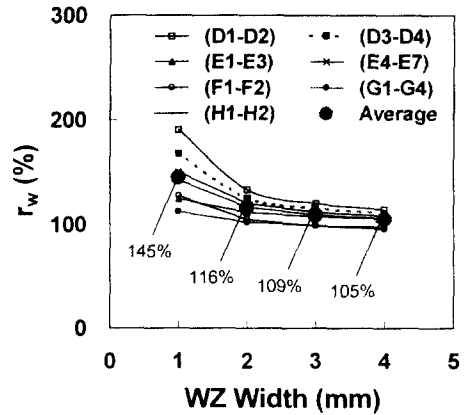


Fig.3 Percentage value of r_w associated with assumed welded zone(WZ) width.

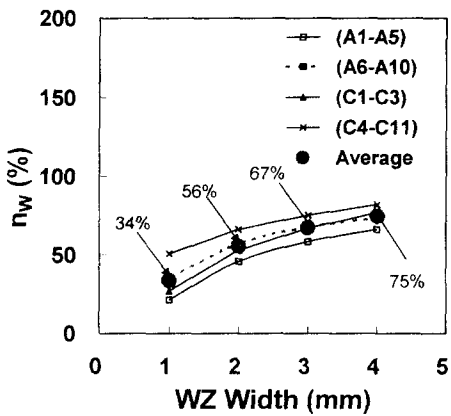


Fig.2 Percentage value of n_w associated with assumed welded zone(WZ) width.

시편 전체의 폭방향 변형은 모재 폭방향 변형과 용접부 폭방향 변형의 합이라고 가정하면, 용접부 소성변형률비, r_w 는 다음과 같다.

$$r_w = - \left\{ \frac{\epsilon_y}{\epsilon_y + \epsilon_x} \right\}_{WZ} \quad (3)$$

여기서, ϵ_x 와 ϵ_y 는 각각 길이방향과 폭방향 변형률이다. 급영탁 등⁽¹⁾의 인장시험 결과로부터 식(3)을 이용하여 가정된 용접부폭에 따른 소성변형률비를 계산하고 모재 평균값을 기준으로 백분율로 환산한 값을 Fig.3에 나타내었다.

3. 용접요소

본 연구는 내부에서 8개의 선형 삼각형 요소로 분할되는 2개의 선형 사각형 요소를 용접요소로 정의하고 용접부를 모델링 하였다. 용접요소의 강도계수와 가공경화지수는 모재의 평균값에 비해 강도계수의 경우 15% 높고 가공경화지수의 경우 25% 낮은 값으로 정의하였으며, 소성변형률비는 모재 평균값보다 5% 높은 값으로 정의하였다. 이는 가정된 용접부 폭이 4mm인 경우를 기준한 것이다. 용접요소의 물성은 용접부와 모재간의 급격한 물성변화를 방지하고 점진적인 물성변화를 얻기 위해 삼각형 근사화 방법으로 묘사하였다. Fig.4는 용접요소 내부에서 물성값들이 이루는 분포를 삼각형 분포로 근사한 것을 나타내는 그림이다. 내부에서 분할된 각각의 요소들은 사각형으로 표시된 크기의 물성값을 갖게 된다.

4. 수치해석

본 연구에서 개발된 용접요소의 유용성 및 타당성을 검증하기 위하여 시편 폭이 40mm인 합체박판의 원형 돔 스트레칭과 자동차 도어 인너패널 성형공정을 시뮬레이션 하였다.

4.1 원형 돔 스트레칭

모재는 180개의 절점과 280개의 선형 삼각형 요소로 모델링하였고, 용접부는 14개의 용접요소

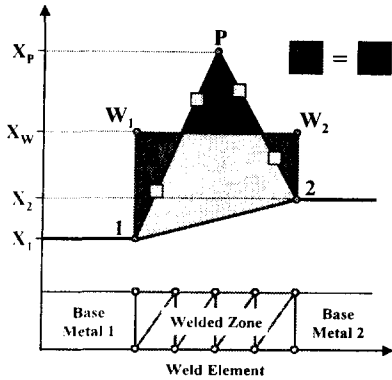


Fig.4 Triangular approximation method for defining the material properties in weld element.

로 모델링하였다. DDT조(Y-0.8t:D-1.5t) 시편의 용접선 변형을 분포를 Fig.5에 나타내었다. 실험 측정치와 용접요소를 이용한 해석의 주방향 변형률 크기 및 경향이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Fig.6은 용접선 이동량을 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 경우에 최대 1.18mm 두꺼운 모재(D-1.5t) 쪽으로 이동하였는데, 실험의 경우에도 같은 지점에서 두꺼운 모재 쪽으로 약 1mm 정도 이동한 것을 관찰할 수 있었다.

4.2 도어 인너 패널 스탬핑

유한요소 해석에 사용된 모재의 절점과 선형 삼각형 요소의 개수는 각각 1485개와 2816개이다. 용접부의 물성 및 성형특성을 해석에 반영하기 위하여 용접부를 32개의 용접요소로 모델링하였다.

Fig.7은 해석에 사용된 다이 금형의 형상이며, Y-0.8t, D-1.5t, 그리고 Welded Zone(WZ)이라고 표시된 부분은 금형이 합체박판의 각 부분과 접촉하는 부분을 표시한 것이다.

Fig.8은 펀치 높이 150mm에서 성형된 메쉬 형상이며, Fig.9는 DDT조 성형한계도^[2]에 해석된 변형률을 표시한 것이다. 용접부와 D-1.5t는 10%의 안전영역을 고려해도 변형률이 각각의 성형한계선 하부에 존재하지만, Y-0.8t의 경우에는 변형률이 Y-0.8t의 성형한계선 상부에 존재하는 것을 볼 수 있다. 도어 인너 패널을 성형한 경우에, Fig.8의 Region A 부분은 금형의 곡률이 작고 형상변화가 심하기 때문에 판재의 드로인이 원할

하지 않아 성형조건이 매우 취약한 부위로서 실제로 파단이 발생하였으며, 수치해석 결과를 성형한계도에 비교하여 파단을 예측한 결과와 잘 일치하였다.

합체박판은 용접부와 모재로 구성되며 각 부분의 금속 조직 및 물성이 매우 다르기 때문에, 본 연구와 같이 용접부와 모재를 독립적으로 모델링하여 성형해석하고 용접부 성형한계를 따로 도시한 성형한계도로 비교하는 것이 합체박판의 파단 예측에 보다 효과적이고 타당성이 있음을 알 수 있다.

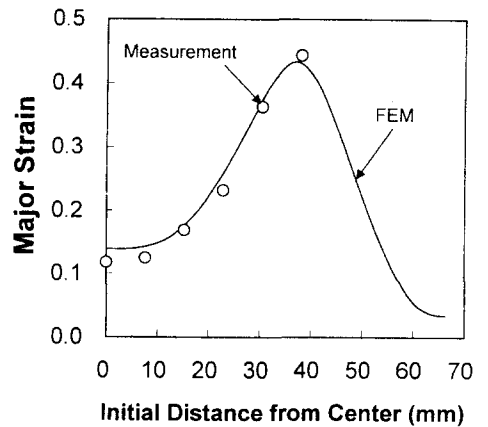


Fig.5 Comparison of the strains along the weld line between FEM prediction and measurement.

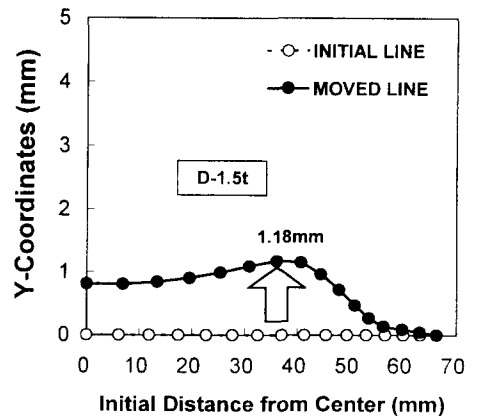


Fig.6 Prediction of the weld line movement.

5. 결론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 용접부 강도계수, 가공경화지수 및 소성변형률을 구하는 수식을 정식화하고 레이저 합체박판의 용접부 물성을 계산하였다.
- (2) 레이저 합체박판의 유한요소 해석에 효율적으로 이용할 수 있는 용접요소를 개발하고, 용접요소의 물성을 가장된 폭에 상응하는 값으로 정의하였다.
- (3) 개발된 용접요소를 내연적 3차원 성형해석 프로그램에 도입하여 시편 폭이 40mm인 둠 실험과 자동차 도어 내부 패널의 성형공정을 시뮬레이션한 결과, 해석된 변형률 분포와 용접선 이동량은 실제 패널을 관찰한 결과와 잘 일치하였고, 용접요소는 수치적 안정성을 보였다.
- (4) 용접부와 모재의 성형한계를 하나의 성형한계에 각각 표시한 합체박판 성형한계에 변형률을 도시한 결과, 용접부 특성을 고려하여 성형 해석하는 것이 합체박판의 과단 예측에 보다 효과적임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 구분영, 금영탁, "레이저 용접 테일러드 블랭크의 용접부 물성평가 및 박판성형 해석에 적용", 한국레이저가공학회 '99 춘계학술발표대회 초록개요집, pp.29-32, 1999.
- [2] 박승우, 구분영, 금영탁, 강수영, 유석중, "레이저 용접 합체박판의 성형한계평가 실험에 관한 연구", 한국소성가공학회 '97 추계학술대회 논문집, pp.72-75, 1997.
- [3] B. Y. Ghoo, S. J. Back, Y. T. Keun, and S. Y. Kang, "Finite Element Analysis of Tailored Sheet Forming Processes Considering Laser Welding Zone", Metals and Materials, Vol.4, No.4, pp.862-870, 1998.
- [4] F. I. Saunders, "Forming of Tailor Welded Blanks", Ph.D. Dissertation, Ohio State University, 1994.
- [5] 박승우, 구분영, 백승준, 금영탁, 강수영, "레이저 용접 합체박판의 물성 및 성형성에 관한 연구", 한국소성가공학회 '98 춘계학술대회 논문집, pp.32-35, 1998.

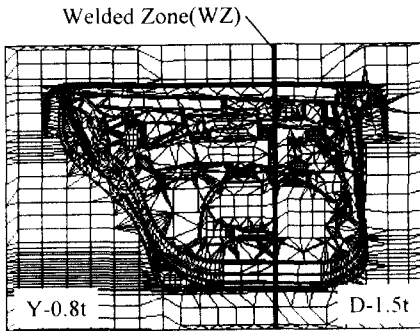


Fig.7 Wire-frame model of die for door inner panel.

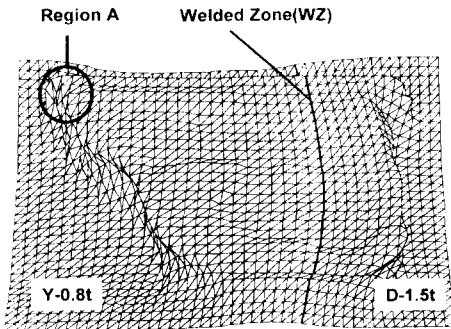


Fig.8 Formed mesh shape of door inner panel at the punch height of 150mm.

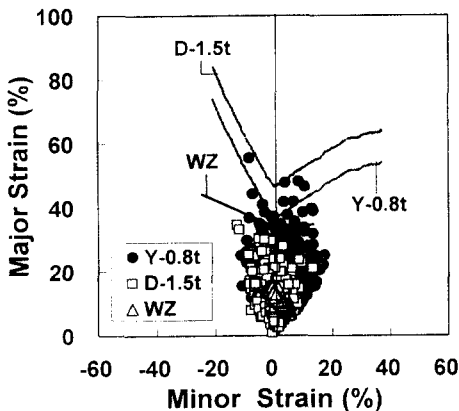


Fig.9 Predicted strains marked on the FLD of DDT tailored blank.