

두께가 다른 두 용접판재 성형에 있어서 블랭크 설계 및 용접선 이동에 대한 유한요소법의 역추적 기법 적용

구태완, 최한호(부산대학교 대학원), 강범수(부산대학교)

Application of the Backward Tracing Scheme of Finite Element Method for the Tailored Blank Design and Welding Line Movement in Sheet Metal Forming with Two Different Thickness

Tae-Wan Ku, Han-Ho Choi(PNU Graduate School), Beom-Soo Kang(PNU)

ABSTRACT : Tailored-welded blanks are used for forming of automobile structural and skin components. Its main objective is to achieve weight and production cost reduction in manufacturing of the components. For successful application of tailored-welded blanks, design of initial welded blanks and prediction of welding line movement are critical. Here, the utilization of the backward tracing scheme of the finite element method shows to be desirable in design of initial welded blanks for net-shape production and in prediction of the welding line movement. First the design of initial blank in forming of welded thick sheet with isotropy is tried, and it appears successful in obtaining a net-shape stamping product. Based in the first trial approach, the backward tracing scheme is applied to anisotropic tailored blank. The welding line movement is also discussed.

1. 서론

성형분야에 있어서 용접판재를 이용한 박판성형이 최근 각광을 받고 있다. 자동차의 도어(door) 내부 판재 성형을 위한 용접판재에 대한 연구와 각 단계별 용접선의 위치를 결정하기 위한 두께가 다른 용접판재를 이용한 사이드 패널(side panel) 성형에 대한 연구가 국내에서 수행되었다.^[1] 실험 결과에 따른 몇몇의 시뮬레이션 방법론과 실험치를 비교하는 연구가 수행되었고, 레이저 용접판재의 성형특성에 관한 연구도 이루어 졌다.^[2]

최종 요구 형상으로부터 적절한 예비 성형체나 초기 소재를 역방향으로 추적하는 역추적 기법은 벌크(bulk) 성형에 있어서 예비 성형체 설계와 그의 여러가지 성형 과정을 성공적으로 수행하였다.^{[3][4]} 본 연구에서는 유한요소법(FEM)의 응용 분야인 역추적 기법을 3차원 변형에서의 두께가 다른 두개의 용접 후판 블랭크 설계에 적용하고자 한다. 실제 제품 생산시에 사용되는 여러가지 형상의 부품에 대한 스탬핑 공정을 위한 초기 블랭크 형상 설계의 연구도 병행하였다.

2. 이론적 배경

비압축성 벌칙함수와 극치 정리에 기초를 두고 있는 강소성재료 모델을 위한 범함수의 제1차 변분함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[5]

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta\dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_r} f_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} (\sigma_{ij} \sigma_{ij})^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, σ_{ij} 는 편차응력, f_i 는 표면외력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도이다.

일반적인 유한요소 분할화를 거치면, 절점속도벡터 \tilde{v} 에 대한 비선형 방정식은 식 (2)로 표현되어 진다.

$$\Omega(\tilde{v}) = K(\tilde{x}, \bar{\epsilon}, \bar{\epsilon})\tilde{v} - F(\tilde{x}, \tilde{v}) = 0 \quad (2)$$

여기서 K는 강성행렬(stiffness matrix), F는 힘 벡터(load vector), \tilde{x} 는 절점좌표 벡터이다.

본 연구에서는 유한요소 분할화 과정에서 3차원 8-절점 육면체요소(hexahedral element)를 사용하였다. 식 (2)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

전방하중과정 시뮬레이션과 마찬가지로 역추적 기법을 이용한 시뮬레이션 과정에서도 유한요소해석이 이용된다. 전방하중과정 시뮬레이션 ($t \geq t_0$)의 경우는 시간 $t = t_0$ 에서의 식 (2)의 해 \tilde{v}_0 가 다음 단계인 $t = t_{0-\Delta t} = t_0 - \Delta t$ 에서의 해를 구하는데 이용되나, 역추적($t \leq t_0$)의 경우는 시간 $t = t_{0-\Delta t} = t_0 - \Delta t$ 에

서의 \tilde{x}_{0-1} 과 $\tilde{\varepsilon}_{0-1}$ 는 식(2)와 함께 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\tilde{x}_0 - \tilde{x}_{0-1} = \tilde{v}_{0-1} \Delta t, \tilde{\varepsilon}_0 - \tilde{\varepsilon}_{0-1} = \tilde{\varepsilon}_{0-1} \Delta t \quad (3)$$

주어진 시간 증분에 대해서, 시간 t_{0-1} 에서 식(3)을 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$K(\tilde{v}_{0-1}, \tilde{x}_0, \tilde{\varepsilon}_0, \tilde{\varepsilon}_{0-1})\tilde{v}_{0-1} - F(\tilde{x}_0, \tilde{v}_{0-1}) = 0 \quad (4)$$

여기서 \tilde{x}_0 와 $\tilde{\varepsilon}_0$ 는 이미 알고 있는 값이며, $\tilde{\varepsilon}_{0-1}$ 은 \tilde{v}_{0-1} 의 함수이다. 따라서 식(4)는 시간 t_{0-1} 에서의 경계조건들이 주어진다면 \tilde{v}_{0-1} 에 대해서 풀 수 있다. 이러한 절차로 시간 t_{0-2}, t_{0-3}, \dots 에 대한 해를 구해나가면, 전 성형공정에 대한 변형전의 소재 형상을 유도할 수 있다.

3. 블랭크 형상 결정을 위한 역추적 기법의 적용

Fig. 1은 역추적 기법의 흐름을 보여주고 있다. 본 연구에서는 등방성 재료와 이방성 재료를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 후판의 용접 전·후의 재료적 특성은 일정하며, 재료의 두께만 다른 것으로 가정하였다. 사용된 소재는 6063 알루미늄 합금이며, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 56.5 \left(1 + \frac{-1.7}{11.78} \bar{\varepsilon} \right) \text{Mpa} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\varepsilon}$ 는 유효변형률이다.

3.1 등방성 소재에 대한 사각 스탬핑

본 논문에서는 Fig. 2에서와 같이 두께가 각각 1.5mm, 1.0mm인 직사각 용접판재를 용접선이 폭 방향의 중앙에 오도록 용접하여 전체적인 초기 형상이 폭 80mm, 길이 120mm인 소재를 가지고 전방하중 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3에서와 같이 전방하중 시뮬레이션의 최종 변형된 형상을 보면 코너부와 직선부의 소재 유입과 플랜지부의 작용응력의 차이로 인해 플랜지의 직선부는 코너부보다 많은 양의 소재가 안쪽으로 유입되어 있다.

전방하중 시뮬레이션의 최종 형상이 과다 변형을 보이고 있기 때문에 초기 블랭크를 수정할 필요가 있었다. 이에, Fig. 4에서와 같이 초기 블랭크 형상을 두께는 그대로 유지하고, 폭 80mm, 길이가 최대 132mm, 최소 120mm가 되도록 초기 형상을

수정하여 전방하중 시뮬레이션에 적용하였다.

전방하중 시뮬레이션의 과정을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(b)는 스탬핑과정에서 트리밍과정이 필요한 일반적인 변형 양상을 보여주고 있다. 트리밍과정을 거치지 않을 수 있는 최종 제품 형상을 만들기 위해 직선 플랜지형상을 갖도록 설계하였다.

Fig. 6(a)에서 나타난 소재의 최종 제품 형상을 이용하여 역추적 기법을 적용하였다. 이 역추적 기법의 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 Fig. 6(b)와 같은 형상의 초기 블랭크를 예측할 수 있었다. Fig. 6(b)에서 나타난 플랜지의 외형만을 이용하여 이를 초기 블랭크로 가정한 후 리메쉬(remesh)과정을 거친 후 다시 전방하중 시뮬레이션의 초기 블랭크로 이용하였다. 리메쉬과정을 거친 초기 형상을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7을 초기형상으로 가정하여 제 2차 전방하중 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 8에서는 제 2차 전방하중시뮬레이션의 과정을 보여주고 있는데, Fig. 8(b)에서 나타나는 바와 같이 플랜지의 외형이 직선에 아주 가까운 형상으로 나타남을 알 수 있었다. 우리가 원하는 스탬핑 공정에서의 최종 제품의 형상과 제 2차 전방하중 시뮬레이션에 의한 최종 형상과의 치수 최대 오차가 4.52%이내였다.

3.2 이방성 재료에 대한 사각 스탬핑

이방성 소재에 대한 초기 블랭크 형상을 예측하기 위해 Fig. 4의 초기 블랭크와 동일한 외형을 가지면서 단지 소재가 이방성의 효과를 가지는 용접판재를 사용하였다. Fig. 9는 제 1차 전방하중 시뮬레이션의 결과를 나타내고 있다. Fig. 9(b)에서 보여지는 바와 같이 최종 형상은 트리밍과정이 필요한 상태이다. Fig. 9(b)의 플랜지 부위를 직선이 되도록 Fig. 10(a)와 같은 형상으로 수정 후 역추적 기법을 적용하였다. 이 역추적 기법의 시뮬레이션 결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다. Fig. 10(b)에서 나타난 플랜지의 외형만을 이용하여 이를 초기 블랭크로 가정한 후 리메쉬 과정을 거친 후 다시 전방하중 시뮬레이션의 초기 블랭크로 이용하였다. 리메쉬 과정을 거친 근사화된 초기 형상을 Fig. 11에 나타내었다.

이 Fig. 11을 초기 형상을 가정하여 제 2차 전방하중 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 12에서는 제 2차 전방하중 시뮬레이션의 과정을 보여주고 있는데, Fig. 12(b)에서 나타나는 바와 같이 플랜지의

외형이 직선에 아주 가까운 형상으로 나타남을 알 수 있었다. 스탬핑 공정에서의 최종 제품의 설계 치수와 제 2차 전방하중 시뮬레이션에 의한 최종 형상과의 최대 오차가 3.68% 이내로 작게 나타났다

3.3 결과

등방성 소재와 이방성 소재에 대한 유효 변형률의 특이한 차이는 없으나 용접선이 위치한 플랜지 부위에서 두 소재 모두 변형이 큰 것으로 나타났다. 이는 변형과정에서 유입되는 소재의 조밀성으로 인한 결과라 생각할 수 있다. Fig. 13은 제 1, 2차 전방하중 시뮬레이션에서의 용접선 이동을 나타낸 것이다. 최종 설계된 초기 블랭크에서의 용접선의 위치에 따른 결과는 등방성 재료에 대한 블랭크 설계시의 용접선 위치는 플랜지 부에서의 용접선이 상대적으로 두꺼운 판재쪽으로 위치시켜야 하며, 이방성 재료의 경우 보다 얇은 판재쪽으로 용접선이 설계되어져야 함을 나타내고 있다.

4. 결론

강-소성 유한요소법을 이용한 역추적 기법은 후판성형에 있어서 최초로 등방성과 이방성 용접 판재의 형상설계에 각각 적용되었다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 역추적 시뮬레이션과 전방하중 시뮬레이션에 탁월한 능력을 가지고 있다. 이번 연구의 결과를 아래와 같이 요약하였다.

(1) 최종 제품이 직사각형의 외형을 가지기 위한 초기 블랭크의 스탬핑 공정은 정형의 블랭크 설계를 위해 수행되었다. 이는 전방하중 시뮬레이션을 동반한 역추적 시뮬레이션은 복잡한 후판 성형에 있어서 조금 더 일반적인 블랭크 형상에 적용될 수 있음을 의미한다.

(2) 등방성 후판 재료에 대해 결과를 도출한 후 이방성 재료에 대해 연구를 수행하였다. 또한, 본 연구에서 개발한 프로그램에서 육면체 요소를 사용하였기 때문에 아무런 어려움 없이 블랭크 고정력에 대한 제어를 할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국학술진흥재단 96년도 대학부설연구성과 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

[1] K.H.Kim, W.S.Choi, H.Y.Kim, "Development of Door

Inner with Tailored Blanking Technology," *KSTP, 2nd Sheet Metal Forming Symposium*, pp.95-101, 1998.

[2] J.M.Yi, Y.C.Choi, C.S.Choi and D.J.Yoo, "Applications to the Numerical Stamping Analysis of Tailored-Welded Blank," *KSTP, 2nd Sheet Metal Forming Symposium*, pp.110-120, 1998.

[3] B.S. Kang, J.H Lee and S.H Kim, "Development of a Methodology to Form Net-Shape Nosing Shells by the Backward Tracing Scheme of the Rigid-Plastic FEM," *Int. J. of Mach Tools and Manufact.*, Vol. 37, No.6, pp.737-750, 1997.

[4] H.H.Choi, M.S.Park and B.S.Kang, "Design of a piercing hole in coining process by the 3-dimensional backward tracing scheme of the FEM," *J. of Materials Processing Technology*, Vol.80, 1998.

[5] O.C.Zienkiewicz and P.N.Godbole, "A Penalty Function Approach to Problems of elastic Flow of Metals with Large Surface Deformation," *J. Strain Analysis*, Vol. 10, No.3, pp. 180-185, 1975.

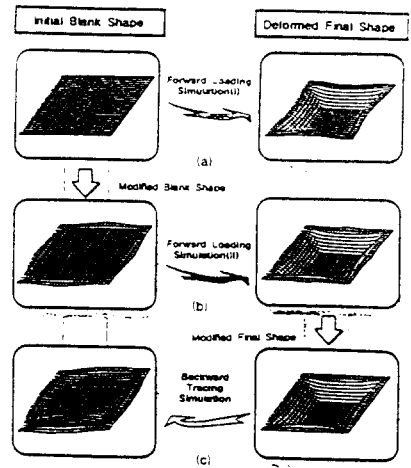


Fig. 1 The simulation example of forward loading and the backward tracing scheme

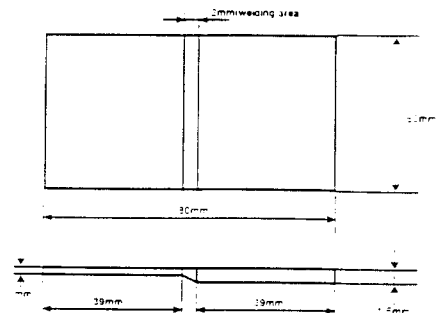


Fig. 2 Dimension of initial blank shape



Fig. 3 The first stamping 3D simulation for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 100%

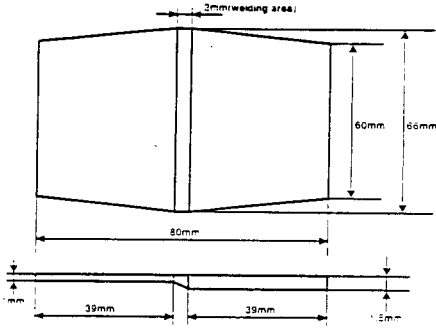


Fig. 4 Dimension of modified blank shape



Fig. 5 The first stamping 3D simulation of modified blank for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 100%

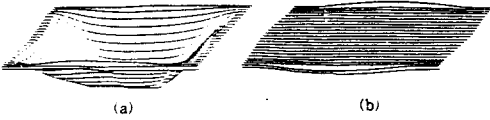


Fig. 6 The backward tracing simulation of modified blank for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = -100%

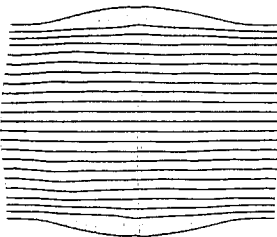


Fig. 7 The fine blank shape for second forward loading simulation



Fig. 8 The second stamping 3D simulation of modified blank for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 100%



Fig. 9 The first stamping 3D simulation of modified blank for the anisotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 100%

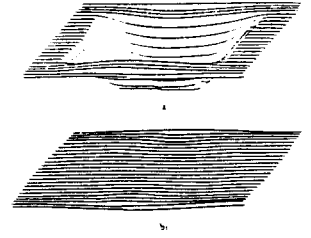


Fig. 10 The backward tracing simulation of modified blank for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = -100%

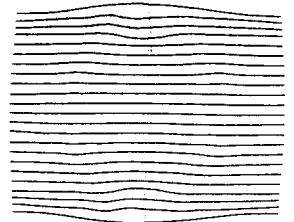
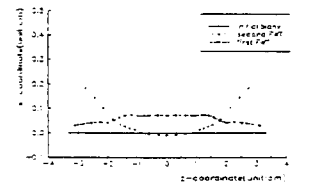


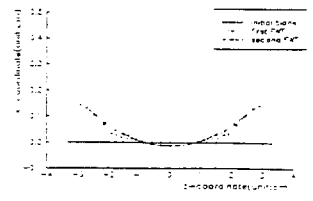
Fig. 11 The fine blank shape for second forward loading simulation



Fig. 12 The second stamping 3D simulation of modified blank for the anisotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 100%



(a) Simulation result for the isotropic material



(b) Simulation result for the anisotropic material

Fig. 12 Comparison to the analytical weld line movement