[논문] 한국소성가공학회지(2000), 제9권 제5호
Transactions of Materials Processing ***Vol. 9, No. 5, (2000)***

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

구태완* · 최한호* · 강범수**

(1999년 6월 4일 접수)

Application of the Backward Tracing Scheme of Finite Element Method to Tailored Blank Design and Welding Line Movement in Sheet Metal Forming

T. W. Ku, H. H. Choi and B. S. Kang

Abstract

Tailor-welded blanks are used for forming of automobile structural skin components. The main objective of this study is to achieve weight and cost reduction in manufacturing of components. For successful application of tailor-welded blanks, design of initial welded blanks and prediction of the welding line movement are critical. 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 the initial blank in forming of welded thick sheet with isotropy is tried, and it appears successful in obtaining a net-shape stamping product. Based on the first trial approach, the backward tracing scheme is applied to anisotropic tailored blanks. The welding line movement is also discussed.

Key Words : Tailor-Welded Blank, Backward Tracing Scheme, Sheet Metal Forming, Finite Element Method, Welding Line Movement

1. 서 론

금속성형은 제조업계에서 가장 중요한 성형 방법중의 하나이다. 성형 과정 동안 재료의 부분적인 손실이 없는 소성 변형이라 할지라도 박판 등의 재료에 대한 그 형상과 특성의 변화에 의한 영향은 고려되어져야 한다. 과거

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원
** 부산대학교 항공우주공학과

수 십년 동안 성형기술은 생산면에 있어서 최종 제품이 정형이거나 정형에 가깝고, 낮은 공구 비용, 기계적 특성의 개선, 재료와 에너지의 효과적인 절감, 고속의 성형속도를 가능하게 하는 중요한 역할을 수행하였다.

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 판넬(side panel) 성형에 대한 연구가 국내에서 수행되었다.[1,2] 스탬핑 공정 동안 얇은 판재의 용접선 주위에서의 다양한 변형 감소 거동이 유발하는 성형시 발생하는 문제점들에 대한 일반적인 효과들과 용접판재의 형상과 크기, 다이의 위치, 용접선의 위치 등과 같은 요소들을 어떻게 제어할 것인가에 대한 실험 결과에 따른 몇몇 해석적인 방법론과 실험치를 비교하는 연구가 수행되었고, 레이져 용접판재의 성형 특성에 관한 연구도 이루어 졌다.[3,4]

박판 금속의 성형과정에서의 거동을 예측하기 위한 신뢰할 수 있는 해석적 절차의 발전은 많은 문제들에 귀착되고 있으며, 재료의 비선형성과 공정 중에서의 불안정한 성질, 거대 변형, 공구와 재료 사이의 접촉과 마찰 효과의 복잡성 등과 같은 중요한 요소들은 복잡한 수학적 알고리듬과 대용량 컴퓨터를 사용하는데 있어서의 이 박판성형 해석을 정당화하는 스탬핑 공정에 관한 연구를 매우 어렵게 만드는 요소였다.[5]

최종 요구 형상으로부터 적절한 예비 성형체나 초기 소재를 역방향으로 추적하는 역추적 기법은 벌크(bulk) 성형에 있어서 예비 성형체 설계와 그 외의 여러가지 성형 과정은 성공적으로 연구되어졌다.[6~8]

본 연구에서는 유한요소법(FEM)의 응용 분야인 역추적 기법을 3차원 변형에서의 두께가 다른 두개의 용접 후판 블랭크 설계에 적용하고자 한다. 후판 성형에서 초기 블랭크 설계를 위해 본 연구에서 개발한 프로그램은 유한요소법에 의한 전방하중시뮬레이션과 역추적 시뮬레이션이 가능하며, 용접 판재에 대한 스탬핑 공정의 블랭크 설계에서 성형 후 기계적 처리 과정을 거치지 않고도 직선 외형을 가지는 정형의 최종 제품 형상을 만들어 낼 수 있는 초기 블랭크 형상을 설계할 수 있었다. 실제 제품 생산시에 사용되는 여러가지 형상의 부품에 대한 스탬핑 공정을 위한 초기 블랭크 형상 설계의 연구도 병행하였다. 역추적 기법에 의해 유도되어진 블랭크 형상은 제 2차 전방하중 시뮬레이션에 의해 그 적합성을 확인할 수 있었다. 판재 성형의 경우 탄성회복이 고려되어야 하므로 탄소성 유한요소법이 주로 사용되나, 본 연구에서는 후판 성형을 주로 다루며 연구의 목적이 초기 블랭크 설계에 있으므로 강소성 유한요소법을 사용하여도 바람직한 결과를 구할 수 있었다. 실제로 역추적 기법은 강-소성 유한요소법을 기초로 개발되었다.

2. 이론적 배경

2.1 강-소성 유한요소법

강-소성 유한요소법은 금속성형 과정을 시뮬레이션하는데 효율적인 알고리듬으로 폭 넓게 쓰이고 있다.[9~11]

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면 강-소성 재료 모델을 위한 범함수의 제 1차 변분함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[12]

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma}\,\delta\bar{\varepsilon}\,dV + K\int_V \dot{\varepsilon}_v\,\delta\dot{\varepsilon}_v\,dV - \int_{S_F} f_i\,\delta u_i\,dS = 0 \qquad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}=\sqrt{3/2}\,(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})^{1/2}$, $\bar{\dot{\varepsilon}}=\sqrt{2/3}\,(\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij})^{1/2}$ 그리고 σ'_{ij}, f_i, u_i, $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{\varepsilon}_v$는 각각 편차응력, 표면외력, 속도성분, 변형률 속도, 체적 변형률 속도이다.

금형-소재 접촉면 S_c상에서 표면외력은 경계면에서 접선방향으로 규정되고 속도는 수직방향으로 규정된다. 전역좌표계에 대한 경사면이나 임의의 곡면형상에 대하여 혼합경계조건(mixed boundary condition)을 부여하기 위해서는 x-y 전역좌표계를 t-n 경사계로 변환해야 한다. 2차원 좌표계에서 좌표변환행렬 $\mathbf{T}$는 다음과 같다.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

여기서는 θ는 전역좌표계의 x축으로부터 변환된 좌표계의 x′축으로 반시계방향으로 측정한다. S_c상에서 접선방향과 수직방향으로 변환된 속도벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{v}_t = \cos\theta\,\hat{v}_1 + \sin\theta\,\hat{v}_2 \qquad (2)$$

$$\hat{v}_n = -\sin\theta\,u_{d1} + \cos\theta\,u_{d2} = \mathbf{U}_d\,n \qquad (3)$$

여기서 $\hat{v}_n$은 S_c상에서의 속도경계조건이고 $\hat{v}_1$, $\hat{v}_2$는 S_c상의 절점의 전역좌표계에 대한 속도벡터이고 u_{d1}, u_{d2}는 금형의 속도이다. n은 S_c상에 수직인 단위벡터이

다. 일반적으로 접선방향의 미끄럼속도벡터는 규정할 수 없으므로 절점속도를 이용하여 변환되고, 수직속도벡터는 항상 일정하게 S_c에 수직으로 작용하므로 금형의 속도를 이용하여 변환된다.

소재와 금형의 접촉면 S_c에서의 마찰해석에 식 **f=mk**를 사용하면 상대운동이 없는 중립점의 존재로 특이성(singularity)이 발생하여 해석이 곤란하게 된다. 따라서 이의 해석을 위하여 Chen과 Kobayashi가 중립점에서의 특이성을 피할 목적으로 속도의존성 마찰응력의 사용을 제안한 다음의 식을 사용하여 수식화 하였다.[13]

$$f = -mk\left[\frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{|v_s|}{a}\right)\right] \qquad (4)$$

여기서 v_s는 금형에 대한 소재의 상대미끄럼속도이고, m 은 마찰계수, k 는 전단방향의 국소 유동 응력이며, a는 v_s에 비해 매우 작은 양수로 본 연구에서는 5×10^{-3}으로 하였다.

상대미끄럼속도 v_s는 다음과 같이 정의된다.

$$v_s = \sum_{i=1}^{2} H_i(\hat{v}_t - U_d t) \qquad (5)$$

여기서 H_i는 1차원 선형요소에 대한 형상함수이고 $\hat{v}_t$는 식 (2)에 정의되어 있는 접촉절점의 접선속도이며 t는 S_c상에 접하는 단위벡터이다.

금형과 재료의 마찰력, 변형률 속도의 옵셋 정도등을 고려하여 식 (1)에 대입하고, 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점 속도 벡터 $\tilde{v}$ 에 대한 비선형 방정식이 된다.

$$\Omega(\tilde{v}) = K(\tilde{x}, \bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}})\tilde{v} - F(\tilde{x}, \tilde{v}) = 0 \qquad (6)$$

여기서 K는 강성 행렬(stiffness matrix), F는 힘 벡터(load vector), $\tilde{x}$ 는 절점좌표 벡터이다. 또한, 유효 변형률 속도 $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 는 $\tilde{x}$ 와 $\tilde{v}$ 의 함수가 된다. .

본 연구에서는 유한요소 분할화 과정에서 3차원 8-절점 육면체 요소(hexahedral element)를 사용하였다. 식 (6)은 Newton-Raphson 반복계산법을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접반복계산법(direct iteration method)을 이용하여 구한다. 시뮬레이션 과정에서 사용되어진 판재의 층의 수는 1개이다.

2.2 역추적기법

초기 블랭크 설계에 이용되는 역추적 기법은 이미 알고 있는 현재 단계의 형상을 기초로 하여 역방향으로 단위 시간 증분에 의한 형상을 결정하는 접근 방법이고, 전체 시간 증분에 대한 과정의 반복을 통해 블랭크 형상이나 초기 조건을 결정할 수 있는 방법이다. 그러므로, 만약 경계조건이 역추적 과정에서의 각 시간 증분에 대해 정해지고 유한요소 프로그램내에서 그 과정이 실행되고 나면, 블랭크 설계 문제에 대한 적용은 곧바로 이루어지게 된다.

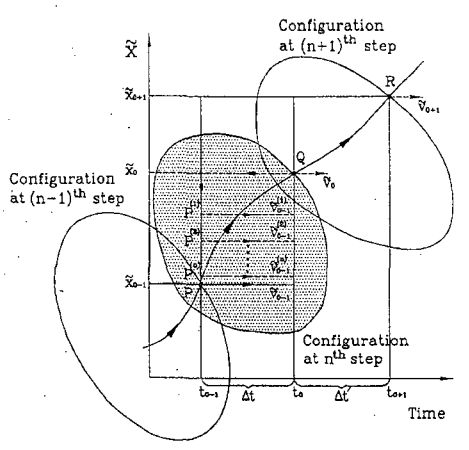


Fig. 1 Concept of the backward tracing scheme and update of the configuration during forward loading and backward tracing

Fig. 1은 전방하중 시뮬레이션과 역추적 시뮬레이션 과정에서의 형상의 변화와 역추적 기법의 개념을 도식적으로 나타내고 있다.

전방하중 시뮬레이션($t \geq t_o$)의 경우는 시간 $t = t_o$에서의 식 (6)의 해 $\tilde{v}_o$ 가 다음 단계인 $t = t_{o+1}$에서의 해를 구하는데 이용되어진다. 그러나, 역추적($t \leq t_o$)에서 시간 $t = t_{o-1} = t_o - \Delta t$에서의 $\tilde{x}_{o-1}$ 과 $\bar{\varepsilon}_{o-1}$ 는 식 (6)과 함께 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\tilde{x}_o - \tilde{x}_{o-1} = \tilde{v}_{o-1}\Delta t\,, \quad \bar{\varepsilon}_o - \bar{\varepsilon}_{o-1} = \dot{\bar{\varepsilon}}_{o-1}\Delta t \qquad (7)$$

주어진 시간 증분에 대해서, 시간 t_{o-1} 에서 식 (6)을

식 (7)에 대입하면 다음과 같다.

$$K(\tilde{v}_{o-1},\ \tilde{x}_o,\ \bar{\varepsilon}_o,\ \bar{\varepsilon}_{o-1})\tilde{v}_{o-1} - F(\tilde{x}_o,\ \tilde{v}_{o-1}) = 0 \quad (8)$$

여기서 $\tilde{x}_o$와 $\bar{\varepsilon}_o$는 이미 알고 있는 값이며, $\bar{\varepsilon}_{o-1}$ 은 $\tilde{v}_{o-1}$ 의 함수이다. 따라서 식 (8)은 시간 t_{o-1} 에서의 경계조건들이 주어진다면 $\tilde{v}_{o-1}$ 에 대해서 풀 수 있다. 이러한 절차로 시간 t_{o-2}, t_{o-3}, … 대한 해를 구해나가면, 전 성형공정에 대한 변형전의 소재 형상을 유도할 수 있다.

2.3 소성 이방성

Hill과 Kobayashi 등은 응력 구성요소 면에서 2차 방정식이 되는 항복 조건을 다음과 같이 가정하였다.[14][15]

$$2f(\sigma_{ij}) = f(\sigma_y-\sigma_z)^2+g(\sigma_z-\sigma_x)^2+h(\sigma_x-\sigma_y)^2 +2l\tau^2_{yz}+2m\tau^2_{zx}+2n\tau^2_{xy}=1 = 2\bar{\sigma}^2 \quad (9)$$

여기서 $f(\sigma_{ij})$ 는 소성 포텐셜, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, 그리고 식 (9)의 f, g, h, l, m, n는 재료의 특성에 따른 유효응력을 만족시키기 위한 이방성 특성 계수이다.

평면 응력 조건($\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{yz} = 0$)에서 식 (9)에 대한 변형률 속도는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_x &= \frac{\bar{\dot{\varepsilon}}}{2\bar{\sigma}}[(g+h)\sigma_x - h\sigma_y],\\
\dot{\varepsilon}_y &= \frac{\bar{\dot{\varepsilon}}}{2\bar{\sigma}}[(h+f)\sigma_y - h\sigma_x],\\
\dot{\varepsilon}_z &= -(\dot{\varepsilon}_x + \dot{\varepsilon}_y),\\
\dot{\gamma}_{xy} &= \frac{\bar{\dot{\varepsilon}}}{2\bar{\sigma}}(2n\tau_{xy})
\end{aligned} \quad (10)$$

그러므로, 식 (10)은 유효변형률 속도($\bar{\dot{\varepsilon}}$)로 표현될 수 있다.

$$\bar{\dot{\varepsilon}}^2 = 2\left[\frac{f\dot{\varepsilon}_x^2 + g\dot{\varepsilon}_y^2 + h\dot{\varepsilon}_z^2}{fg+gh+hf} + \frac{\dot{\gamma}_{xy}^2}{2n}\right] \quad (11)$$

앞서 언급되었던 이방성 계수(f, g, h, l, m, n)들은 변형률비(strain ratio, r)로 표현이 가능하다. 소재의 압연방향(x-방향)에 대한 변형률비는 식 (12)에서와 같이 나타내어질 수 있다.

$$r = (\dot{\varepsilon}_x\sin^2\beta + \dot{\varepsilon}_y\cos^2\beta - \dot{\gamma}_{xy}\sin\beta\cos\beta) / \dot{\varepsilon}_z \quad (12)$$

여기서 β 는 압연방향에 대한 평면상의 각도이다.

따라서, 식 (12)는 식 (10)을 이용하여 식 (13)과 같이 정리되어질 수 있다.

$$r = \frac{h + (2n - f - g - 4h)\sin^2\alpha\cos^2\alpha}{f\sin^2\alpha + g\cos^2\alpha} \quad (13)$$

이방성 계수의 결정은 변형률비와 이방성계수들과의 관계를 이용하여 계산하게 된다. 즉 단순 인장시험을 통해 각 방향별(0° , 45° , 90°) 변형률비를 구하고, 식 (13)의 관계에 따라 식 (14)에서와 같이 각각의 이방성 계수들을 결정하게 된다.

$$\frac{h}{g} = r_x,\ \frac{h}{f} = r_y,\ \text{and}\ \frac{n}{g} = (r_{45} + \frac{1}{2})(1 + \frac{r_x}{r_y}) \quad (14)$$

3. 초기블랭크 형상 결정을 위한 역추적기법의 적용

본 연구에서 개발한 3차원 역추적 기법을 스탬핑 공정에서의 초기 블랭크 설계에 적용하고자 한다. Fig. 2는 역추적 기법의 적용 예를 나타낸 것이다. 여기에서 Fig. 2는 역추적기법이 최초로 판재성형에 적용되어 성공적으로 블랭크 형상이 설계된 것을 보이며, 이는 단조공정에서와 마찬가지로 역추적기법의 유한요소 프로그램이 판재성형에서도 그 타당성이 있음을 보여준다. 즉, 역추적기법으로 설계된 초기 블랭크 형상이 목표인 정형의 제품을 성형할 수 있음을 보여주고 있으므로, 강-소성 유한요소법 자체의 알고리듬이 판재성형의 해석과 설계에 타당하다면 역추적기법 역시 그 타당성이 입증된다고 할 수 있다. Fig.3은 역추적 기법의 흐름을 보여주고 있다.[16] 이번 연구에서 쓰인 프로그램은 후판 성형 과정에서 최적의 초기 블랭크 형상을 예측하기 위해 사용되어졌다. 본 연구에서는 8-절점 육면체 요소를 등방성 재료, 이방성 재료 및 용접부에 사용하였으며, 3차원 강-소성 유한요소법은 전방 하중 시뮬레이션과 역추적 시뮬레이션에 적용되었다. 또한, 각 시뮬레이션 과정에서의 경계조건은 플랜지 부위에 두께방향으로 강제구속조건을 주어 유한요소해석을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 후판의 용접 전 · 후의 재료 특성

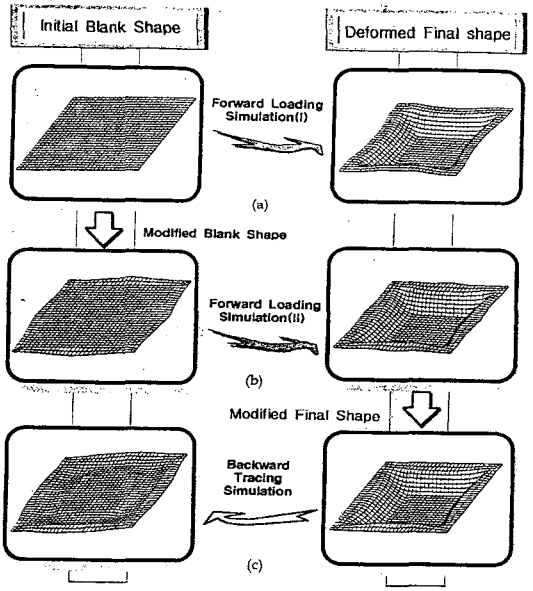


Fig. 2 The simulation example of forward loading and the backward tracing scheme

과 용접부의 재료 특성은 동일하며, 재료의 두께만 다른 것으로 가정하였다. 사용된 소재는 6063 알루미늄 합금이며, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\bar{\sigma}}{Y_0} = \left(1 + \frac{\bar{\varepsilon}}{0.051}\right)^{0.235} \qquad (15)$$

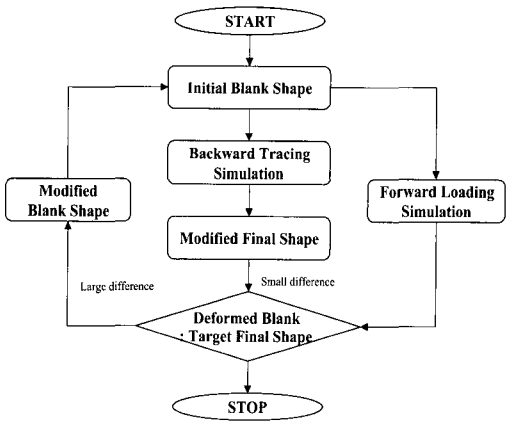


Fig. 3 The current process sequence of stamping

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력, $\bar{\varepsilon}$ 는 유효 변형률이다.

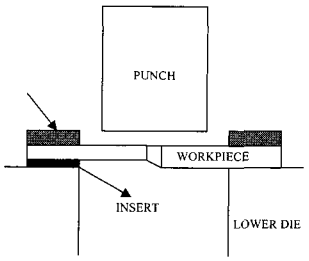


Fig. 4 Schematic view of stamping processes of TWB using insert

또한, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 판재의 두께 차이로 인한 경계조건을 고려하기 위해 insert를 판재와 lower die 사이에 고정되게 modeling하여 성형해석을 수행하였다.

3.1 등방성 소재에 대한 직선플랜지를 가지는 사각 스탬핑(I)

스탬핑 공정을 거친 제품은 불규칙한 플랜지 형상으로 인해 트리밍등의 후처리 과정을 거치게 되는데 이는기계적인 뒤틀림 현상등의 원인이 된다. 본 논문에서는 Fig. 5에서와 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.

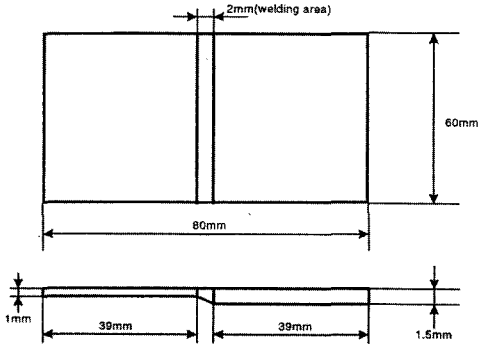


Fig. 5 Dimension of initial blank shape(unit:mm)

Fig. 6에서와 같이 전방 하중 시뮬레이션의 최종 변형된 형상을 보면 코너부와 직선부의 소재 유입과 플랜지부의 작용응력의 차이로 인해 플랜지의 직선부는 코너부보다 많은 양의 소재가 안쪽으로 유입되어 있다. 플랜지

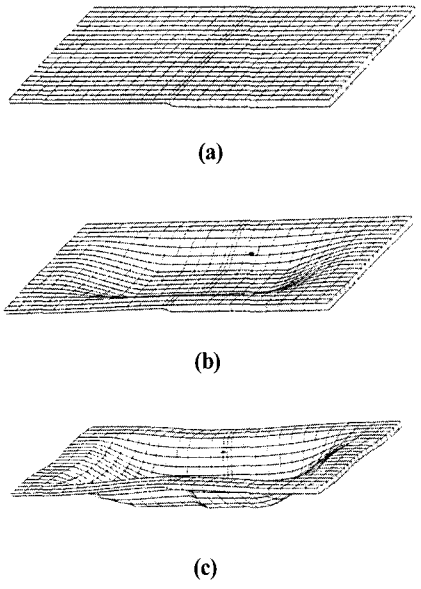


Fig. 6 The first stamping 3D simulation for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke=50% (c) stroke=100%

외곽을 직선으로 만들기 위해서는 트리밍 과정을 거쳐야 한다. 그러나, 초기 블랭크를 적절히 설계한다면 성형 후에 트리밍 과정을 거치지 않고도 우리가 원하는 정형의 직선 플랜지를 갖는 형상을 만들 수 있을 것이다.

3.2 등방성 재료에 대한 직선플랜지를 가지는 사각 스탬핑(II)

앞의 3.1절에서 전방하중 시뮬레이션의 최종 형상이 과다 변형을 보이고 있기 때문에 초기 블랭크를 수정할 필요가 있었다. Fig. 7에서와 같이 초기 블랭크 형상을

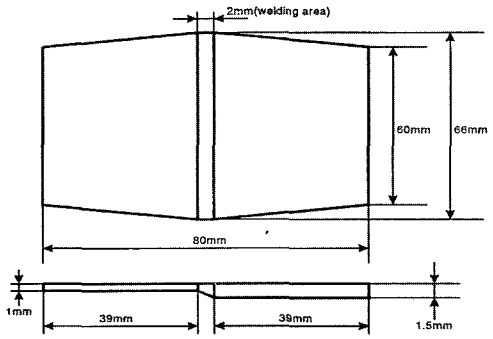


Fig. 7 Dimension of modified blank shape (unit:mm)

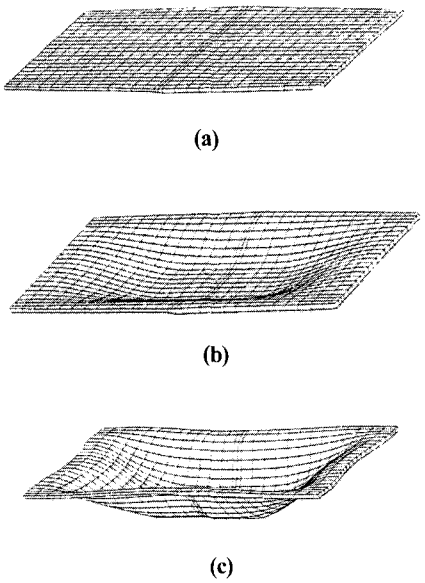


Fig. 8 The first stamping 3D simulation of modified blank for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke=50%
(c) stroke=100%

두께는 그대로 유지하고, 폭80mm, 길이가 최대 132mm, 최소 120mm가 되도록 초기 형상을 수정하여 전방하중 시뮬레이션에 적용하였다.

여기서 형상 설계의 주목적은 초기 용접판재의 최종 제품이 직선 플랜지를 가질 수 있는 초기 블랭크의 형상을 찾는데 있다.

전방하중 시뮬레이션의 과정을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(c)는 스탬핑 과정에서 트리밍 과정이 필요한 일반적인 변형 양상을 보여주고 있다. 이런 결과를 토대로, 트리밍 과정을 거치지 않을 수 있는 최종 제품 형상을 만들기 위해 Fig. 8(c)를 직선 플랜지 형상을 갖도록 설계하였다.

Fig. 9(a)에서 나타난 소재의 최종 제품 형상을 이용하여 역추적 기법을 적용하였다. 이 역추적 기법에서의 경계 조건과 변형률 분포를 전 단계인 전방하중 시뮬레이션의 최종 결과와 동일하게 적용하여 역추적 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 Fig. 9(c)와 같은 형상의 초기 블랭크를 예측할 수 있었다. Fig. 9(c)에서 나타난 플랜지의 외형만을 이용하여 이를 초기 블랭크로 가정한 후 재모델링을 한 후 다시 전방하중 시뮬레이션의 초기 블랭크로 이용하였다.

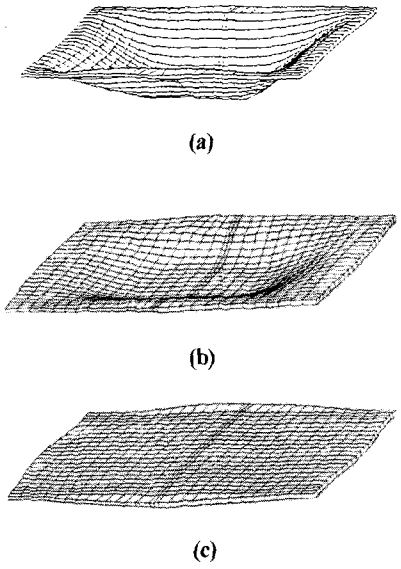


Fig. 9 The backward tracing simulation of modified blank for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = -50%
(c) stroke = -100%

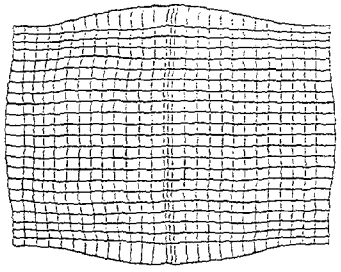


Fig. 10 The fine blank shape for *secondforward* loading simulation

Fig. 10을 초기 형상으로 가정하여 제 2차 전방하중 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 11에서는 제 2차 전방하중 시뮬레이션의 과정을 보여주고 있는 데, Fig. 11 (c)에서 나타나는 바와 같이 플랜지의 외형이 직선에 아주 가까운 형상으로 나타남을 알 수 있었다.

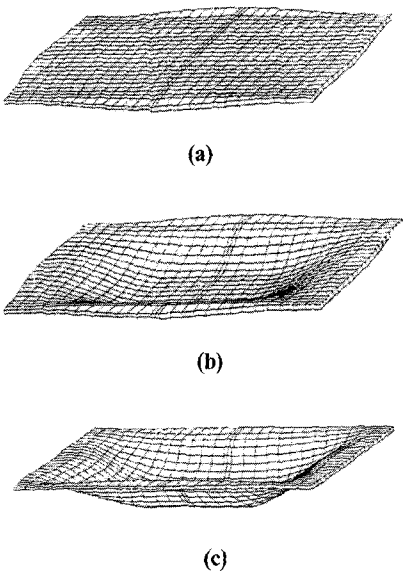


Fig. 11 The second stamping 3D simulation of modified blank for the isotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 50%
(c) stroke = 100%

3.3 이방성 재료에 대한 직선 플랜지를 가지는 사각 스탬핑

이방성 소재에 대한 초기 블랭크 형상을 예측하기 위해 앞절에서 사용한 초기 블랭크와 동일한 외형을 가지면서 단지 소재가 이방성의 효과를 가지는 용접판재를 사용하였다.

Fig. 12는 제 1차 전방하중 시뮬레이션의 결과를 나타내고 있다. Fig. 12(c)에서 보여지는 바와 같이 최종 형상은 트리밍 과정이 필요한 상태이다. 이 결과를 토대로 트리밍 과정을 거치지 않도록 하기 위해 Fig. 12(c)의 플랜지 부위를 직선이 되도록 Fig. 13(a)와 같은 형상으로 수정하였다. Fig. 13(a)에서 나타난 소재의 최종 제품 형상을 이용하여 역추적 기법을 적용하였다. 이 역추적 기법에서의 경계 조건과 변형률 분포를 전 단계인 전방하중 시뮬레이션의 최종 결과와 동일하게 적용하여 역추적 시뮬레이션을 수행하였다.

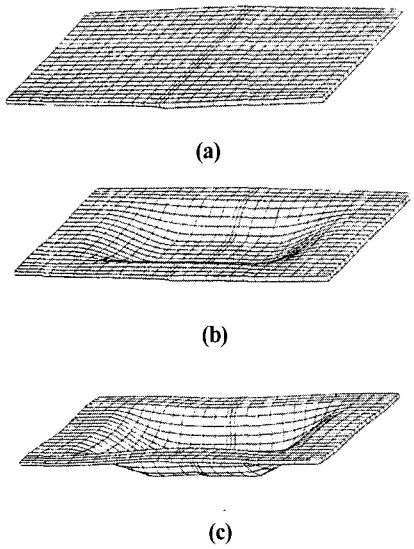


Fig. 12 The first stamping 3D simulation of modified blank for anisotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 50%
(c) stroke = 100%

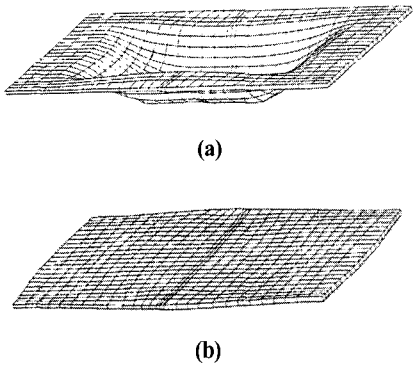


Fig. 13 The backward tracing simulation of modified blank for the anisotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = -100%

이 역추적 기법의 시뮬레이션 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 그 결과 Fig. 13(b)와 같은 형상의 초기 블랭크를 예측할 수 있었다. Fig. 13(b)에서 나타난 플랜지의 외형만을 이용하여 이를 초기 블랭크로 가정한 후 리메쉬(remesh) 과정을 거친 후 다시 전방하중 시뮬레이션의 초기 블랭크로 이용하였다.

재모델링 과정을 거친 초기 형상을 Fig. 14에 나타내었다.

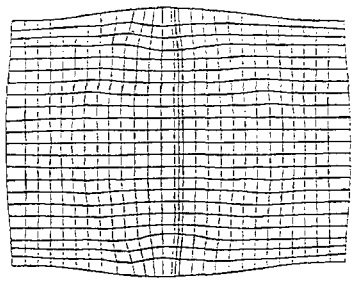


Fig. 14 The fine blank shape for second forward loading simulation

이 Fig. 14를 초기 형상을 가정하여 제 2차 전방하중 시뮬레이션을 수행하였다. Figure 15에서는 제 2차 전방하중 시뮬레이션의 과정을 보여주고 있는 데, Fig. 15(c)에서 나타나는 바와 같이 플랜지의 외형이 직선에 아주 가까운 형상으로 나타남을 알 수 있었다.

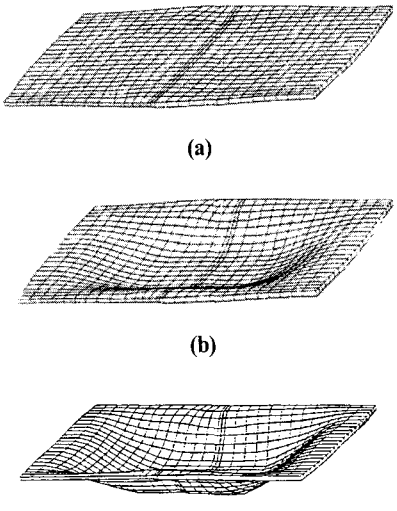
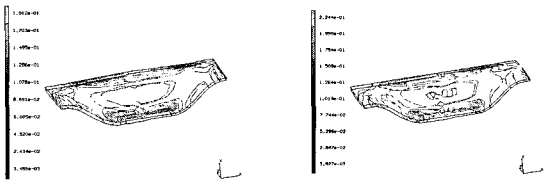


Fig. 15 The second stamping 3D simulation of modified blank for the anisotropic material
(a) initial workpiece (b) stroke = 50%
(c) stroke = 100%

3.4 결과

3.2절과 3.3절에서의 제 2차 전방하중 시뮬레이션에 의한 유효 변형률 분포를 Fig. 16에 나타내었다. 등방성 소재와 이방성 소재에 대한 유효 변형률의 특이한 차이는 없으나 용접선이 위치한 플랜지 부위에서 두 소재 모두 변형이 큰 것으로 나타났다. 이는 변형과정에서 유입되

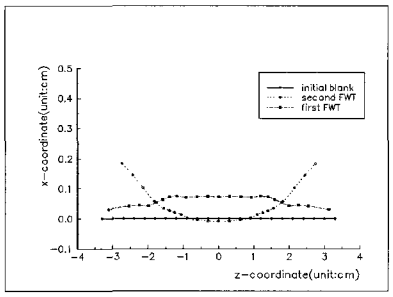


(a) (b)

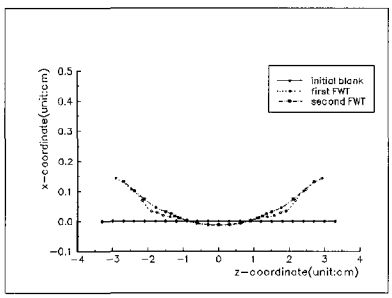
Fig. 16 Effective strain distribution of the final stamping (a) isotropic material (b) anisotropic material

는 소재의 조밀성으로 인한 결과라 생각할 수 있다.

Fig. 17은 Fig. 8과 Fig. 11, Fig. 12와 Fig. 15에서의 제 1, 2차 전방하중 시뮬레이션에서의 용접선 이동을 나타낸 것이다. 이들 그림에서 보여지는 결과로는 상대적으로 얇은 소재쪽으로 용접선이 이동하지만 등방성과 이방성 소재는 서로 다른 거동을 하고 있는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 17 Welding line movement during stamping processes

최종 설계된 초기 블랭크에서의 용접선의 위치에 따른 결과는 등방성 재료에 대한 블랭크 설계시의 용접선 위치는 플랜지 부에서의 용접선이 상대적으로 두꺼운 판재쪽으로 위치시켜져야 하며,
이방성 재료의 경우 보다 얇은 판재쪽으로 용접선이 설계되어져야 함을 나타내고 있다. 제2차 전방 하중 시뮬레이션에서의 용접선 이동량은 제 1차 전방하중 시뮬레이션의 이동량보다 작음을 알 수 있다. 즉 역추적 기법을 적용하게 되면 후판 성형에서의 정밀도를 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

강-소성 유한요소법을 이용한 역추적 기법은 후판성형에 있어서 등방성과 이방성 용접 판재의 형상설계에 각각 적용되었다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 역추적 시뮬레이션과 전방하중 시뮬레이션에 탁월한 능력을 가지고 있다. 이 기술의 적용은 단순한 직사각형 형상의 스탬핑 공정에서의 형상 설계 면에서 성공적인 결과를 나타내었다. 이번 연구의 결과를 아래와 같이 요약하였다.

(1) 용접판재를 사용한 직사각 스탬핑 제품은 역추적 기법에 의해 정형의 블랭크 설계가 가능하다. 성형 후 기계가공을 거치지 않고 정형의 제품을 제조할 수 있는 역추적 기법의 적용으로 인해 최종 제품의 직선 외형을 얻을 수 있었으며, 이는 후판 성형의 블랭크 설계에 있어서 그 타당성을 입증하고 있다.

(2) 최종 제품이 직사각형의 외형을 가지기 위한 초기 블랭크의 스탬핑 공정은 정형의 블랭크 설계를 위해 수행되었고, 이에 전방하중 시뮬레이션과 역추적 시뮬레이션은 만족할 수 있는 결과를 도출하였다. 이는 전방하중 시뮬레이션을 동반한 역추적 시뮬레이션은 용접판재의 성형에 있어서 초기 블랭크 설계에 적용될 수 있음을 의미한다.

(3) 역추적 기법을 적용하여 용접판재의 스탬핑용 초기 블랭크를 설계함으로써 용접선 이동에 관한 자세한 정보를 얻을 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Kim, K. H., Choi, W. S. and Kim, H. Y., 1999, "Development of Door Inner with Tailored Blanking Technology," KSTP, 2nd Sheet Metal Forming Symposium, pp.95~101.

(2) Kwon, J. W., Myoung, N. H., Baek, S. Y., Yin, J. J., Lee, K. D., You, S. Y. and Lee, Y. K., 1999, "Stamping of Side Panel Using the Tailored Blank," KSTP, 2nd Sheet Metal Forming Symp., pp.102~109.

(3) Yi, J. M., Choi, Y. C., Choi, C. S. and Yoo, D. J., 1999, "Applications to the Numerical Stamping Analysis of Tailored-Welded Blank," KSTP. 2nd Sheet Metal Forming Symposium, pp.110~120.

(4) Park, K. C., Han, S. S., Kim, K. S. and Kwon, O., 1998, "Forming Characteristics of Laser Welded Tailored Blanks," KSTP. 2nd Sheet Metal Forming Symposium, pp.121~130.

(5) Kang, B. S., Kim, N. S. and Kobayashi, S., 1993, "Computer-Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade", Int. J. Mech. Tool Des. Res., Vol.23, No.1, pp.71~79.

(6) Shi, M. F., Pickett, K. M. and Bhatt, K. K., 1993, "Formability Issue in the Application of Tailored Welded Blank Sheets," SAE paper No.930278.

(7) Choi, H. H., Park, M. S. and Kang, B. S., 1998, "Design of a piercing hole in coining process by the 3-dimensional backward tracing scheme of the FEM," J. of Mat. Proc. Tech., Vol.80.

(8) Kang, B. S., Lee, J. H. and Choi, H. H., 1997, "Extension of the Backward Tracing Scheme of the Rigid Plastic FEM in Three-Dimensional Deformation," ASME, Vol.119, pp.556~562.

(9) Park, J. J. and Kobayashi,S., 1994, "Three-dimensional Finite-Element Analysis of Block Compression," Int. J. Mech. Sci., Vol.26, pp.165~176.

(10) Mori, K., and Osakada, K., 1994, "Simulation of Three-Dimensional Rolling by the Finite Element Method," Int. J. Mech. Sci., Vol.26, pp.515~525.

(11) Kim, N. S., 1989, "Computer-Aided Preform Design in Metal Forming by the Finite-Element Method," Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

(12) Zienkiewicz, O. C., and Godbole, P. N.,1975, "A Penalty Function Approach to Problems of plastic Flow of Metals with Large Surface Deformation," J. Strain Analysis, Vol. 10, No.3, pp.180~185.

(13) Chen, C. C., and Kobayashi, S., 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression, Application of Numerical Methods to Forming Processes", ASME, AMD, Vol.28, pp.163~174.

(14) Hill, R., 1950, "Mathematical theory of Plasticity," Oxford University Press.

(15) Kobayashi, S., Caddell, R. M. and Hosford, W. F., 1995, "Examination of Hill's Latest Yield Criterion Using Experimental Data for Various Anisotropic Sheet Metals," Int. J. Mech. Sci., Vol.27, p.509.

(16) Choi, H. H., Ku, T. W., Hwang, S. M. and Kang, B. S., 1999, "Application of the Backward Tracing Scheme of the Finite Element Method to Design of Blanks in Sheet Metal Forming," NUMISHEET, 4th Int. Conference, Abs. No.2.