한국소성가공학회 '99춘계학술대회 논문집 pp.45~48

자동차용 알루미늄 합금 정형의 스탬핑 부품 성형을 위한 CAE 기법 개발

구 태 완, 최 한 호(부산대학교 대학원), 강 범 수(부산대학교)

A CAE Approach for Net-Shape Automobile Stamping Components of Aluminum Alloy

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

ABSTRACT : A program for initial blank design in sheet forming which contains the capabilities of forward loading simulation by the finite element method and backward tracing simulation, has been developed and proved the effectiveness by applying to a square cup stamping process. In the blank design of square cup stamping, the backward tracing program can produce an optimum blank configuration which forms a sound net-shape cup product without machining after forming. Another general application appears in the blank design of a cup stamping with protruding flanges, one of typical automobile components. The blank configurations derived by backward tracing simulation have been confirmed by a series of loading simulations. The approach for decision of an initial blank configuration presented in this study will be a milestone in fields of sheet forming process design.

1. 서 론

수치해석과 컴퓨터의 성능향상과 더불어 박판 성형에서의 초기블랭크 형상 결정을 위한 연구는 활발히 이루어져 왔다. Karima등은 미끄럼선장법(slip-line method)을 이용하였고[1], Vogel, Chen 등은 평면응력특성(characteristic of plane strain)을 사용하였다[2][3]. 그러나 이러한 방법들은 재료의 거동을 고려하지 않았다는 한계를 지니고 있다. Majlessi등은 Levy의 이론을 확장하여 축대칭 다단계 딥드로잉에 적용하였으며[4], Chung등은 최소소성일(minimum plastic work)을 가지는 가상의 중간 블랭크형상설계를 수행하였다[5]. Lee와 Huh는 역유한요소해석(Inverse Finite Element)을 이용한 초기블랭크설계를 제안하였다[6].

본 연구에서는 역추적기법(backward tracing scheme)을 이용한 초기블랭크형상 설계를 수행하였다. 기존의 사각형 컵 드로잉 제품의 정형화를 위하여 개발된 유한요소 프로그램에 역추적 기법을 추가하여 돌출부를 가지는 사각형 컵 드로잉 제품에 적용하였다.

2. 이론적 배경

비압축성 조건을 만족시키는 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면, 강소성 재료에 대한 1차 변분범함수는 다음과 같다.

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

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

본 연구에서는 유한요소 분할화 과정에서 3차원 8절점 육면체요소(hexahedral element)를 사용하였다.

역추적 기법은 최종 제품의 형상과 공정조건이 주어져 있을 경우, 변형과정에 있어서 임의 단계에서의 제품형상을 예측하는 것이다. 전방하중과정 시뮬레이션과 마찬가지로 역추적 기법을 이용한 시뮬레이션 과정에서도 유한요소해석이 이용된다. 전방하중과정 시뮬레이션($t \geq t_o$)의 경우는 시간 $t=t_o$에서의 해 $\tilde{v}_o$가 다음 단계인 $t=t_{o+1}=t_o+\Delta t$에서의 해를 구하는데 이용되나, 역추적($t \leq t_o$)의 경우는 시간 $t=t_{o-1}=t_o-\Delta t$에서의 $\tilde{x}_{o-1}$과 $\bar{\varepsilon}_{o-1}$는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\tilde{x}_o-\tilde{x}_{o-1}=\tilde{v}_{o-1}\Delta t,\ \bar{\varepsilon}_o-\bar{\varepsilon}_{o-1}=\dot{\bar{\varepsilon}}_{o-1}\Delta t \qquad (2)$$

이러한 절차로 시간 $t_{o-2}, t_{o-3}, \cdots$에 대한 해를 구해나가면, 전 성형공정에 대한 변형전의 소재 형상을 유도할 수 있다.

3. 블랭크형상 결정을 위한 역추적기법의 적용

본 연구에서는 등방성 재질의 6063 알루미늄 합금이고, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 56.5\left(1+\frac{\bar{\varepsilon}}{11.78}\right)^{1.7}\ \text{Mpa} \qquad (3)$$

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

역추적기법을 이용한 초기블랭크 형상설계를 위한 과정이 Fig. 1 에 나타나 있다.

3.1 직선 플랜지를 가지는 사각드로잉

플랜지를 가지는 일반적인 사각컵 드로잉공정에서는 사각형상의 블랭크를 이용하여 성형을 한다. 그 과정을 Fig. 2 맨위의 그림인 전방하중과정 시뮬레이션(I)로 나타내었다. 이때 사용된 초기형상은 가로, 세로의 길이가 100mm인 정사각형상이며 두께는 0.5㎜이다. 최종 변형된 형상을 보면 코너부와 직선부의 소재유입과 플랜지부의 작용응력의 차이로 인해 플랜지의 직선부는 코너부보다 많이 안쪽으로 유입 되어있다. 그러나 적절한 초기블랭크형상을 결정한다면 성형후 트리밍과정을 거치지 않고서도 우리가 원하는 형상을 만들 수도 있을 것이다.

Fig. 2 의 가운데 그림은 전방하중과정 시뮬레이션(I)의 결과를 토대로 플랜지 외곽을 직선이 되게 성형하기 위한 초기블랭크형상을 설계한 것이다. 소재가 많이 유입된 부분의 면적만큼 초기 블랭크 면적을 추가하여 설계하였다.

Fig.2 의 가운데 그림인 전방하중과정 시뮬레이션(II)의 결과를 보면 전방하중과정 시뮬레이션(I)보다는 플랜지의 외곽선이 직선에 많이 가까워졌지만 직선부의 중간지점에 튀어나온 돌기를 볼 수 있으며 아직 후가공이 필요하다. 원하는 최종형상은 Fig.2 맨아래 오른쪽 그림이다. 이 그림은 역추적기법을 이용하기 위한 초기 모델링 형상이며 전방하중과정 시뮬레이션(II)의 결과를 원하는 형상으로 수정하여 만들어졌다. Fig.2 맨아래 왼쪽그림은 역추적해석을 통해 얻은 결과이며 이것은 플랜지 외곽이 직선이 되게 성형될 수 있는 초기블랭크의 형상이다.

역추적해석을 이용하여 얻은 초기블랭크의 형상이 타당한지를 알아보기 위해 얻은 결과의 외곽선을 이용하여 다시 재모델링하여 전방하중과정해석을 수행하였다. 그 해석과정은 Fig. 3에 나타나 있다. 이때 사용된 초기블랭크형상은 Fig. 4 (a)이며, 최종 변형된 블랭크의 형상은 Fig. 4 (b)에 나타나 있다. Fig. 4 (c)는 각각의 치수를 좌표로 나타낸 것이다.

3.2 사각돌출형 플랜지 형상을 가지는 드로잉 제품

본 연구에서는 간단한 사각 돌출형 플랜지를 가지는 드로잉 제품을 역추적기법을 이용하여 초기블랭크 형상설계를 수행하였다. 이때 사용되어지는 펀치 형상은 Fig. 5 (a)의 왼쪽그림으로 양끝의 반경 R이 20mm이고 장변의 길이가 80mm이다. 펀치의 최종하강 행정은 12mm이다. Fig. 5 (a)의 오른쪽그림은 만들고자하는 최종형상이며 Fig. 5 (b)는 그 치수를 나타낸 그림이다.

Fig. 6을 초기형상으로 하여 1차 전방하중과정 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 시뮬레이션 과정과 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 6의 점 1, 3 지점의 소재부분이 큰 유입량을 보였다. 그래서 이 부분의 블랭크 사이즈를 크게하여 2차 전방하중과정 시뮬레이션을 수행하였으며, 이때 사용된 초기블랭크형상은 Fig. 8이며, 성형과정 및 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 1차 시뮬레이션보다는 원하는 형상에 많이 접근한 것을 볼 수 있다. 그러나 보다 정확한 초기블랭크 형상설계를 위하여 2차 전방하중과정 시뮬레이션에서 나온 변형형상으로부터 원하는 최종형상으로 수정하여 역추적해석을 수행하였다. Fig. 10 (a)가 수정된 최종형상이며 역추적해석을 위한 초기 모델링이다.

Fig. 10 (b)는 역추적해석을 수행하여 얻은 초기블랭크의 형상이다. 그 타당성을 검증하기 위해, 얻은 블랭크의 형상으로 재모델링하여 다시 3차 전방하중과정 시뮬레이션을 수행하였고, 이때의 초기 형상은 Fig. 11에, 그 수행 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

역추적해석을 통해 얻은 초기 블랭크를 이용하여 성형한 최종형상과 실제 원하는 형상과의 차이를 Fig. 13에 나타내었다. X축은 소재의 외곽선을 따라 정의되었으며, 그 방향과 좌표는 Fig. 13 (a)에 점1에서 점25로 증가하는 방향으로 표시하였다. S(III)으로 표시된 것이 역추적해석을 통해 얻은 초기블랭크 형상을 이용하여 전방하중과정 시뮬레이션을 수행한 것이다. 1차 전방하중과정 시뮬레이션 S(I)과 2차 전방하중과정 시뮬레이션 S(II)와 비교하여 볼 때 좋은 결과를 보여 주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 박판성형에서의 초기블랭크형상설계를 위한 역추적 프로그램을 개발하였으며, 그 적용 예로 성형후 트리밍공정을 거치지 않고서도 플랜지의 외곽선이 직선이 되도록 하는 사각형 컵과 사각 돌출형 플랜지 형상을 가지는 드로잉컵을 만들기 위한 초기 블랭크 형상설계를 수행하였다. 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 3차원 강소성 유한요소법을 바탕으로 하는 초기 블랭크형상 설계용 역추적프로그램을 개발하였다. 유한요소법의 이론을 바탕으로한 역추적 시뮬레이션을 수행함으로 중간의 소재의 변형거동을 관찰할 수 있다.

(2) 사각형 컵드로잉에서 플랜지 외곽형상이 직선이 되도록 하는 초기블랭크형상을 얻었으며, 그 타당성을 검증해보기 위해 얻은 초기블랭크로 전방하중과정 해석을 수행하였다. 또한, 임의의 플랜지 형상을 가지는 초기블랭크 설계에 적용하였다.

이러한 방법은 자동차의 복잡한 플랜지 형상을 가지는 박판제품의 초기블랭크를 결정하는데 많은 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 사료되어진다.

후기

본 연구는 한국학술진흥재단 96년도 대학부설연구소 과제지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Karima, M., "Blank Development and Tooling Design for Drawn Parts Using a Modified Slip Line Field Based Approach," Journal of Engineering for Industry, ASME, Vol. 111, pp. 345~350, 1989.

2. Vogel, J. H. and Lee, D., "An Analysis Method for Deep Drawing Process Design," Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, pp. 891~897, 1990.

3. Chen, X. and Sowerby, R., "The Development of Ideas Blank Shapes by the Method of Plane Stress Characteristics," Int. J. Mech. Sci., Vol.34, No.2, pp.159~166, 1992.

4. Majlessi, S. A. and Lee, D., "Further Development of Sheet Metal Forming Analysis Method," Journal of Engineering for Industry, ASME, Vol. 109, pp. 330~337, 1989.

5. Chung, K. and Richmond, O., "Ideal Forming-I Homogeneous Deformation with Minimum Plastic Work," Int. J. Mech. Sci., Vol. 34 No. 7, pp. 575~591, 1992.

6. Lee, C. H. and Huh, H., "Blank Design and Strain Prediction of Automobile Stamping Parts by an Inverse finite Element Approach," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 63 pp. 645~650, 1997.

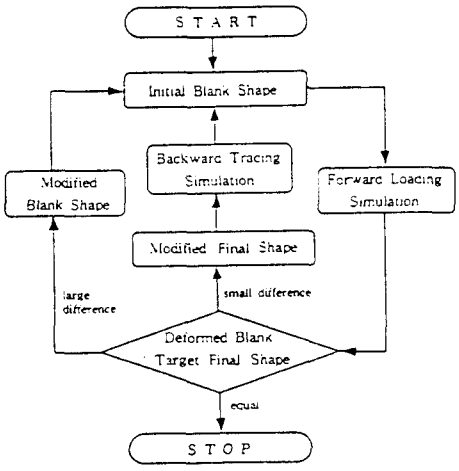


Fig.1 Flow chart of the blank design.

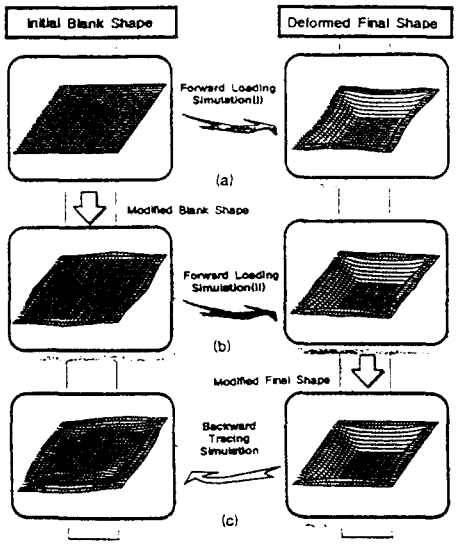


Fig.2 Simulations of the forward loading and the backward tracing for a square cup.

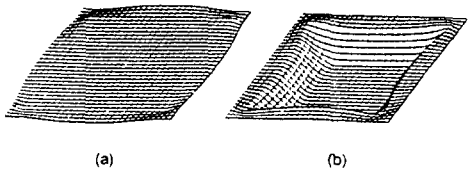
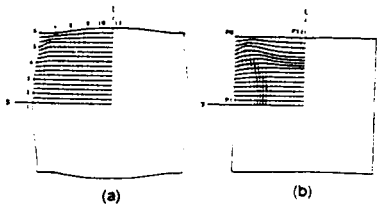


Fig.3 Deformed shape of square cup obtained from optimum blank ; (a) initial blank (b) stroke = 100%.



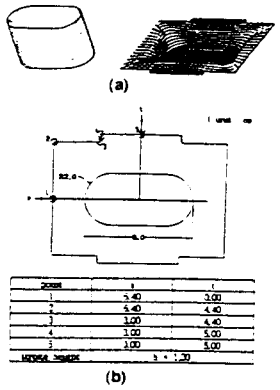
(a) (b)

Initial Blank Dimension		
Point	s	t
1	5.36	0.00
2	5.37	0.71
3	5.33	1.66
4	5.15	2.87
5	5.00	4.00
6	5.00	5.00
7	4.00	5.00
8	2.87	5.15
9	1.66	5.33
10	0.71	5.37
11	0.00	5.36

Deformed Blank Dimension		
Point	s	t
P1	4.79	3.00
P6	4.83	4.83
P11	0.00	4.79

(c)

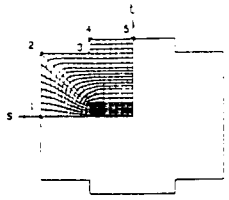
Fig.4 Dimensions of the optimum blank and deformed blank ; (a) initial blank (b) deformed shape (c) dimensions of the initial blank and the deformed shape.



(a)

(b)

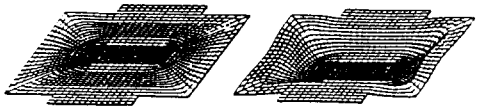
Fig.5 Desired final shape of the cup with flange and the punch ; (a) the punch and the final shape of the cup (b) dimension of the cup.



(unit: cm)

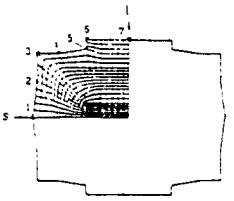
Point	s	t
1	6.50	0.00
2	6.50	4.50
3	3.00	4.50
4	3.00	5.50
5	0.00	5.50

Fig.6 The first trial blank shape and its dimension.



(a) (b)

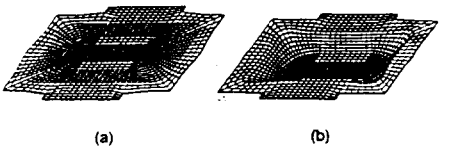
Fig.7 Forward loading simulation of the first trial blank ; (a) initial blank (b) stroke = 100%.



(unit: cm)

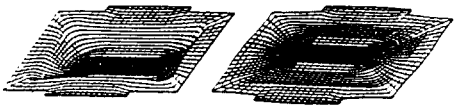
Point	s	t
1	6.80	0.00
2	6.50	2.50
3	6.50	4.50
4	5.00	4.50
5	3.00	4.83
6	3.00	5.50
7	0.00	5.50

Fig.8 The modified blank shape and its dimension.



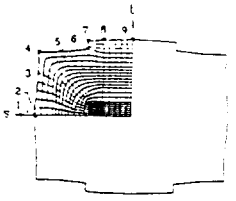
(a) (b)

Fig.9 Forward loading simulation of the modified blank ; (a) initial blank (b) stroke = 100%.



(a) (b)

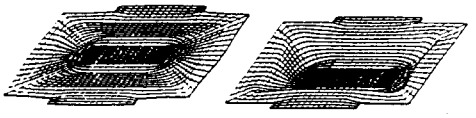
Fig.10 The results of backward tracing simulation ; (a) initial blank of backward tracing simulation (b) backward stroke = 100%.



(unit: cm)

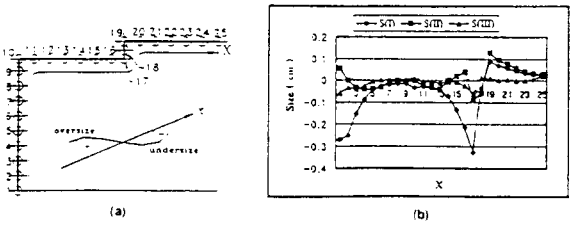
Point	s	t
1	6.70	0.00
2	6.72	0.54
3	6.52	3.00
4	6.52	4.51
5	5.02	4.53
6	3.08	4.75
7	3.09	5.35
8	2.02	5.41
9	0.00	5.47

Fig.11 The blank shape derived from backward tracing.



(a) (b)

Fig.12 The results of the forward loading simulation for Confirmation ; (a) initial blank (b) stroke = 100%.



(a) (b)

Fig.13 Precise comparison of the three final products . (a) assumed coordinates for checking of straightness (b) deviation of edge configuration in the final products.