

자동차용 알루미늄 합금 정형의 스탬핑 부품 성형을 위한 CAE 기법 개발

최한호*, 구태완*, 황상문**, 강범수***

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

Han Ho Choi*, Tae Wan Ku* , Sang Moon Hwang**, and Beom Soo Kang***

ABSTRACT

An optimum blank design technology is required for near-net or net-shape cold forming using sheets. Originally, the backward tracing scheme has been developed for preform design in bulk forming, and applied to several forming processes successfully. Its key concept is to trace backward from the final desirable configuration to an intermediate preform or initial blocker. 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.

Key Words : backward tracing scheme (역추적 기법), forward loading simulation (전방하중과정 시뮬레이션), finite element analysis (유한요소 해석), initial blank shape (초기블랭크 형상), sheet metal forming (박판성형)

1. 서론

자동차 박판 성형 부품의 제작과정에서 플래쉬나 칩, 잉여소재 등이 유발되지 않는 정형의 가공을 추구하려는 노력도 진행되고 있다. 자동차 박판

부품의 성형에서 성형후 트리밍과정등 후처리과정에서 유발되는 잉여소재량을 감소시키기 위한 최적의 초기블랭크 형상설계를 위한 연구가 필요하다. 이것은 잉여소재량을 줄임으로서 제품의 단가를 낮출 뿐 아니라 환경문제에도 크게 기여 할 것이다.

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계공학부
*** 정회원, 부산대학교, ERC/NSDM

수치해석과 컴퓨터의 성능향상과 더불어 박판 성형에서의 초기블랭크 형상 결정을 위한 연구는 활발히 이루어져 왔다. Karima등은 미끄럼선장법 (slip-line method)을 이용하였고^[11], Vogel, Chen 등은 평면응력특성(characteristic of plane strain)을 사용하였고^{[12][13]}, Sowerby등은 기하학적 맵핑방법(geometric mapping)을 이용한 초기블랭크형상 설계를 수행하였다^[4]. 그러나 이러한 방법들은 재료의 거동을 고려하지 않았다는 한계를 지니고 있다. Majlessi등은 Levy의 이론을 확장하여 축대칭 다단계 닥드로잉에 적용하였으며^[15], Chung 등은 최소소성일(minimum plastic work)을 가지는 가상의 중간 블랭크형상설계를 수행하였다^[6]. Lee와 Huh는 역유한요소해석(Inverse Finite Element)^[7], 최근 손기찬 등은 민감도해석법^[8]을 이용한 초기블랭크설계를 제안하였다.

본 연구에서는 역추적기법(backward tracing scheme)을 이용한 초기블랭크형상 설계를 수행하였다. 역추적기법은 강소성 유한요소법을 바탕으로 하여 실제로 펀치나 금형의 속도를 역방향으로 이동하여 각각의 스텝마다 재료의 소성유동 조건 및 재료의 거동을 만족시킬 수 있기 때문에 보다 정확한 해석을 수행할 수 있다. 역추적기법에서는 원하는 스텝마다 응력, 변형률 분포, 재료유동상태 등을 역추적해석 동안에도 중간과정을 관찰할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 기존의 사각형 컵 드로잉 제품의 정형화를 위하여 개발된 유한요소 프로그램에 역추적 기법을 추가하여 돌출부물 가지는 사각형 컵 드로잉 제품에 적용하였다.

2. 이론적 배경

여기에 사용된 수치해법은 강소성 유한요소법에 대한 이론과 이를 바탕으로한 역추적기법을 사용하였다^[9]. 역추적기법의 이론은 2차원 단조공정설계의 적용을 통해 계속 발전되어 왔으며^{[10][11]}, 최근 3차원으로 확장하여 코이닝 공정설계와 같은 3차원 단조공정설계에도 적용되었다^{[12][13]}. 이러한 이론을 바탕으로 박판성형에서의 초기 블랭크형상 설계를 위한 역추적프로그램을 개발하였으며, 본 논문의 완전한 구성을 도모하기 위하여 여기에 사용된 역추적기법에 대하여 간단히 언급한다.

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수 (penalty function) K를 도입하면, 강소성 재료에

대한 1차 변분 범함수는 다음과 같다.

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

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

금형과 재료의 마찰력, 변형률 속도의 옅셋 정도 등을 고려하여 식(1)에 대입하고, 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점속도벡터 \dot{v} 에 대한 비선형 방정식이 된다.

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

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

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

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 ($t \geq t_0$)의 경우는 시간 $t = t_0$ 에서의 식(2)의 해 \dot{v}_0 가 다음 단계인 $t = t_{0+1} = t_0 + \Delta t$ 에서의 해를 구하는데 이용되나, 역추적 ($t \leq t_0$)의 경우는 시간 $t = t_{0-1} = t_0 - \Delta t$ 에서의 \dot{x}_{0-1} 과 $\bar{\epsilon}_{0-1}$ 는 식(2)와 함께 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\dot{x}_0 - \dot{x}_{0-1} = \dot{v}_{0-1} \Delta t, \quad \bar{\epsilon}_0 - \bar{\epsilon}_{0-1} = \bar{\epsilon}_{0-1} \Delta t \quad (3)$$

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

$$K(\dot{v}_{0-1}, \dot{x}_0, \bar{\epsilon}_0, \bar{\epsilon}_{0-1})\dot{v}_{0-1} - F(\dot{x}_0, \dot{v}_{0-1}) = 0 \quad (4)$$

여기서 \dot{x}_0 와 $\bar{\epsilon}_0$ 는 이미 알고 있는 값이며, $\bar{\epsilon}_{0-1}$ 은 \dot{v}_{0-1} 의 함수이다. 따라서 식(4)는 시간

t_{0-1} 에서의 경계조건들이 주어진다면 v_{0-1} 에 대해서 풀 수 있다. 이러한 절차로 시간 t_{0-2}, t_{0-3}, \dots 내한 해를 구해나가면, 전 성형공정에 대한 변형진의 소재 형상을 유도할 수 있다.

3. 초기 블랭크형상 결정을 위한 역추적기법의 적용

본 연구의 최종목적은 주어진 성형부품에 대한 최적의 초기 블랭크를 설계하는데 역추적 프로그램을 활용하는 것이며, 이는 실제 생산현장에서 매우 중요한 분야이다. 등방성재료의 성질을 사용하였으며, 8절점의 육면체요소를 사용하였다. 사용된 소재는 6063 알루미늄 합금이고, 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

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

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

역추적기법을 이용한 초기블랭크 형상설계를 위한 과정이 Fig. 1에 나타나 있다. 우리가 원하는 최종제품이 정해지면 대략적인 초기블랭크의 형상을 결정하고 전방하중과정 해석을 수행한다.

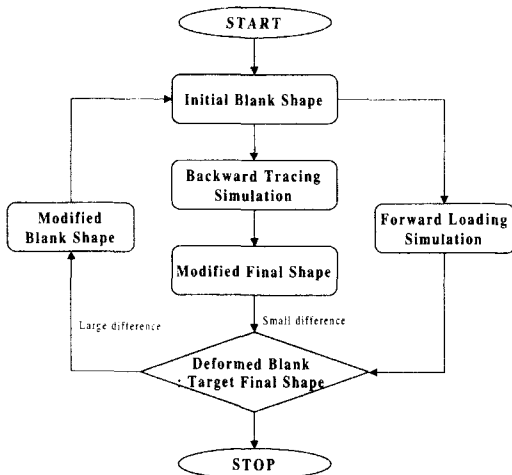


Fig. 1 Flow chart of the blank design

해석후 변형된 형상과 원하는 최종형상을 비교하여 그 차이가 클 경우(5% 이상)에는 다시 기하학적인 방법으로 초기형상을 재 설계하여 전방하중과정해석을 수행한다. 이때 다시 최종제품과 비

교하게 되고 그 차이가 감소할 경우 변형된 해석 결과에서 그 차이를 조정하여 원하는 최종제품의 형상으로 수정한다. 이 최종제품으로 역추적해석을 수행하여 초기블랭크 형상을 결정하게 된다. 개발된 역추적 프로그램의 타당성을 검증해보기 위해 성형후 트리밍공정을 거치지 않고서도 플랜지의 외곽선이 직선이 되도록 하는 사각형 컵과 사각 돌출형 플랜지 형상을 가지는 드로잉컵을 만들기 위한 초기 블랭크 형상설계를 수행하였다.

3.1 직선 플랜지를 가지는 사각드로잉

플랜지를 가지는 일반적인 사각컵 드로잉공정에서는 사각형상의 블랭크를 이용하여 성형을 한다. 그 과정을 Fig. 2 맨 위의 그림인 전방하중과정시뮬레이션(1)로 나타내었다. 이때 사용된 초기형상은 가로, 세로의 길이가 100mm인 정사각형상이며 두께는 0.5mm이다. 최종 변형된 형상을 보면 코너부와 직선부의 소재유입과 플랜지부의 작용응력의 차이로 인해 플랜지의 직선부는 코너부보다 많이 안쪽으로 유입 되어있다. 플랜지 외곽을 직선으로 만들기 위해서는 트리밍과정을 거쳐야만 한다. 그러나 적절한 초기 블랭크형상을 결정한다면 성형후 트리밍과정을 거치지 않고서도 우리가 원하는 형상을 만들 수도 있을 것이다.

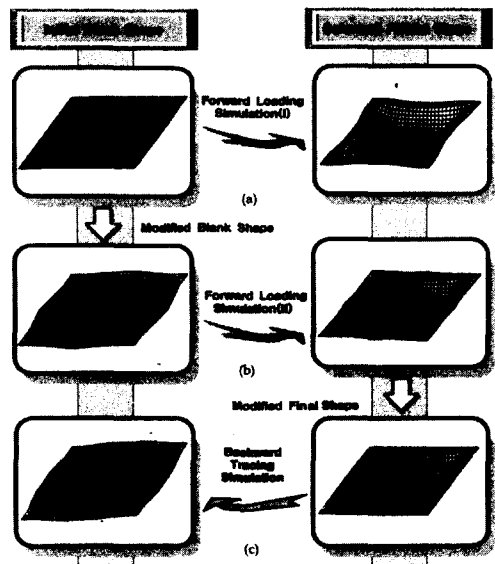


Fig. 2 Simulation of the forward loading and the backward tracing for square cup

Fig. 2의 가운데 그림은 전방하중과정 시뮬레이션(I)의 결과를 토대로 플랜지 외곽을 직선 이되게 성형하기 위한 초기블랭크형상을 설계한 것이다. 소재가 많이 유입된 부분의 면적만큼 초기 블랭크 면적을 추가하여 설계하였다. 이러한 방법은 가장 간단하면서도 현장에서 경험을 토대로 하여 많이 사용되어지고 있다. 그러나 이러한 방법은 블랭크 형상과 크기가 달라짐으로 인해 소재의 유동특성이 바뀌기 때문에 원하는 정확한 형상을 얻을 수는 없다.

Fig.2의 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 맨 아래 오른쪽 그림이다. 이 그림은 역추적기법을 이용하기 위한 초기 모델링 형상이며 전방하중과정 시뮬레이션(II)의 결과를 원하는 형상으로 수정하여 만들어졌다. 여기에는 전방하중과정 시뮬레이션(II)의 소재 변형정보들을 가지고 있으며 이러한 정보들은 역추적해석 과정동안 사용된다. Fig.2 맨 아래 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. 최종 변형된 블랭크형상의 그림에서 P1점과 P6점의 s방향으로의 차이가 전체 사각형컵의 한 직선 변의 길이에 대한 오차가 0.04% 정도로 매우 작은값을 보이고 있다.

3.2 사각 돌출형 플랜지 형상을 가지는 드로잉 제품

자동차나 운송장비 등에는 차체나 프레임 등에 볼트 또는 용접으로 고정시키기 위해 어떤 임의의 플랜지 형상을 가지는 박판 제품들이 많이 사용되고 있다. 그러므로 임의의 플랜지형상을 만

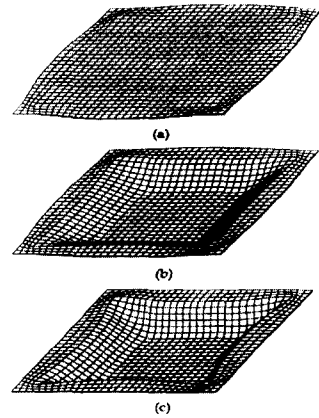


Fig. 3 Deformed shape of square cup obtained from optimum blank
(a) initial blank (b) stroke = 50%
(c) stroke = 100%

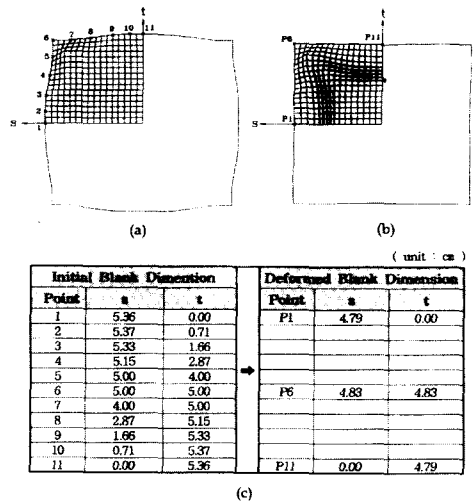


Fig. 4 Dimensions of the optimum blank and deformed blank
(a) initial blank (b) deformed shape
(c) dimensions of the initial blank and the deformed shape

들 수 있는 초기블랭크의 형상설계가 필요하다.

본 연구에서는 간단한 사각 돌출형 플랜지를 가지는 드로잉 제품을 역추적기법을 이용하여 초기블랭크 형상설계를 수행하였다. 이때 사용되는

편차 형상은 Fig. 5 (a)의 왼쪽그림으로 양끝의 반경 R이 20mm이고 장변의 길이가 80mm이다. 편차의 최종하강 행정은 12mm이다. Fig. 5 (a)의 오른쪽그림은 만들고자하는 최종형상이며 Fig. 5 (b)는 그 지수를 나타낸 그림이다. 성형후 트리밍과정 없이 원하는 플랜지 형상을 가지는 것이 연구의 목적이다.

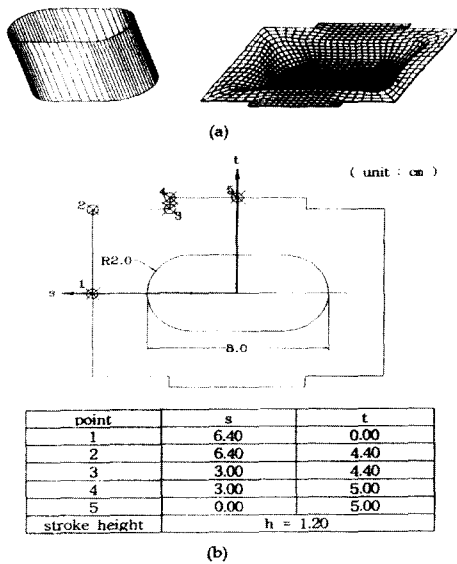


Fig. 5 Desired final shape of the cup with flange and the punch deformed blank
(a) the punch and the final shape of the cup
(b) dimension of the cup

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

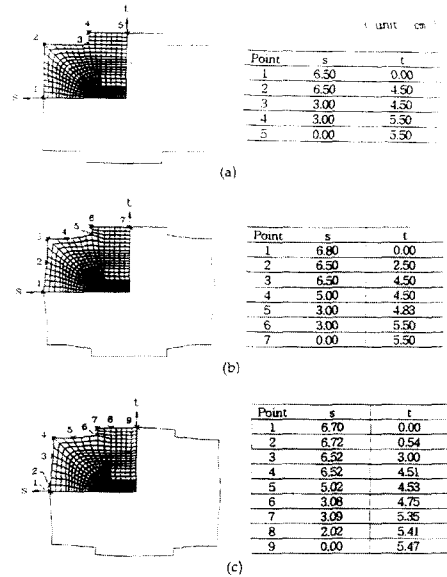


Fig. 6 Initial blank shape for forward loading simulations
(a) initial blank for the simulation (S-I)
(b) initial blank for the simulation (S-II)
(c) initial blank for the simulation (S-III)

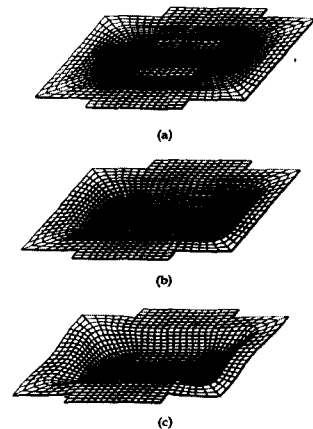


Fig. 7 Forward loading simulation (S-I)
(a) initial blank (b) stroke = 50%
(c) stroke = 100%

Fig. 9 (a)가 수정된 최종형상이며 역추적해석을 위한 초기 모델링이다. 소재의 응력, 변형정보들은 2차 전방하중과정 시뮬레이션의 결과를 간

적하고 있으며, 이것은 역추적해석의 자료로 사용되어 진다. Fig. 9는 실제 역추적해석 과정을 보여 주고 있으며, 그 중간과정의 계산도 유한요소법의 알고리즘을 바탕으로 하기 때문에 보다 정확한 계산을 수행할 수 있다.

Fig. 9 (c)는 역추적해석을 수행하여 얻은 초기블랭크의 형상이다. 그 타당성을 검증하기 위해, 얻은 블랭크의 형상으로 재모델링하여 다시 3차 전방하중과정 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 사용된 초기형상은 Fig. 6 (c) 이며, 그 수행 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

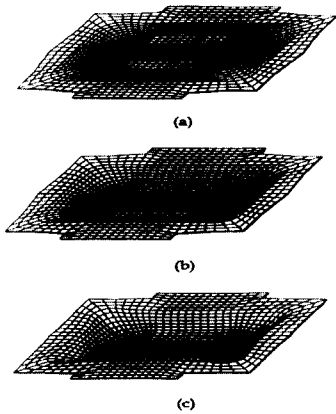


Fig. 8 Forward loading simulation (S-II)
 (a) initial blank (b) stroke = 50%
 (c) stroke = 100%

역추적해석을 통해 얻은 초기 블랭크를 이용하여 성형한 최종형상과 실제 원하는 형상과의 차이를 Fig. 11에 나타내었다. X축은 소재의 외곽선을 따라 정의되었으며, 그 방향과 좌표는 Fig. 11 (a)에 점1에서 점25로 증가하는 방향으로 표시하였다. 사이즈(size)는 원하는 형상보다 크면 양수로 작으면 음수로 표시되어지며, 그 크기는 외곽선의 법선 방향으로 측정하였다. 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. 몇 점을 제외하고는 원하는 형상과의 차이가 매우 작게 나타나고 있다. 점1과 점7의 부분에서도 다른 초기블랭

크보다도 좋은 결과가 나왔지만, 약간의 차이가 발생한 것은 역추적해석에서 얻은 초기블랭크 외곽형상을 바탕으로 재모델링하는 과정에서 생긴 오차로 생각된다. 재모델링 과정을 좀더 정밀하게 수행하지 못한 결과이다.

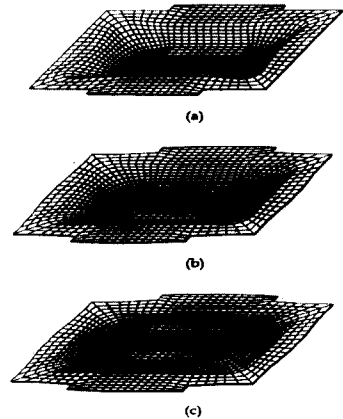


Fig. 9 The results of the backward tracing simulation
 (a) initial blank of backward tracing simulation
 (b) stroke = -50% (c) stroke = -100%

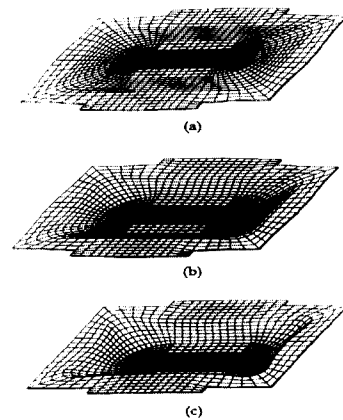


Fig. 10 The results of the final forward loading simulation (S-III)
 (a) initial blank (b) stroke = 50%
 (c) stroke = 100%

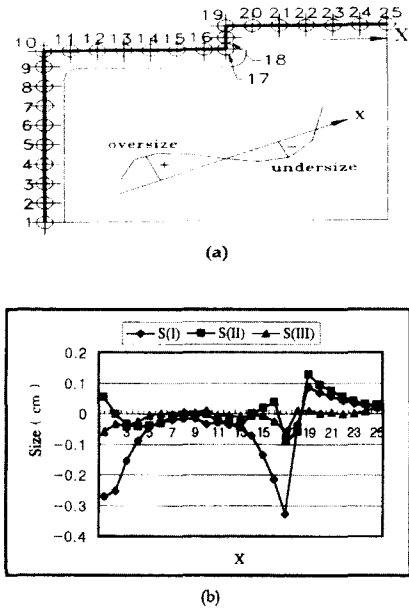


Fig. 11 The difference of desired final shape
(a) coordinates (b) shape difference of S-I, S-II, S-III

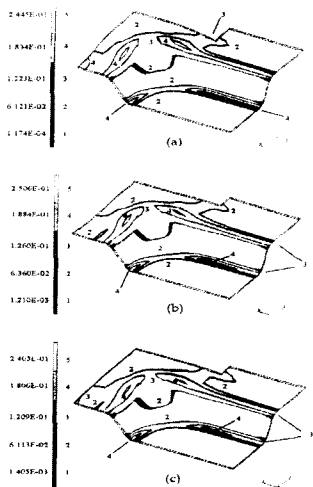


Fig. 12 Comparison of effective strain distributions
(a) S-I case (b) S-II case (c) S-III case

Fig. 6 (c)는 역추적해석에서 얻은 초기블랭크 형상을 대략 9개의 점으로 선형적으로 표시하였기 때문에 실제 얻은 형상과 약간의 차이를 보

였다. Fig. 12는 세 가지의 초기블랭크를 사용한 전방하중과정 시물레이션 후의 변형된 소재의 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 큰 차이는 발생하지 않지만 역추적해석을 통해 얻은 초기블랭크를 이용하였을 때 소재의 유효변형률의 최대값은 다른 경우보다 작게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 박판성형에서의 초기블랭크 형상 설계를 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. 이 프로그램으로 전방하중과정 해석후 변형된 소재가 원하는 형상과 다른 경우 원하는 형상으로 수정하여 초기블랭크 형상을 찾게되며, 실제로 유한요소법의 이론을 바탕으로한 역추적 시물레이션을 수행함으로써 중간의 소재의 변형거동을 관찰할 수 있다.

(2) 사각형컵드로잉에서 플랜지 외곽형상이 직선이 되도록 하는 초기블랭크형상을 얻었으며, 그 타당성을 검증해보기 위해 얻은 초기블랭크로 전방하중과정 해석을 수행하였으며, 이때 원하는 형상과의 오차는 0.04%로 나타났다.

(3) 임의의 플랜지형상을 가지는 박판제품의 초기블랭크 설계의 적용예로 사각 돌출형 플랜지 형상을 가지는 드로잉컵의 초기블랭크 형상설계를 수행하였다. 그리고 검증을 위한 전방하중과정 해석도 수행하였으며, 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 방법은 자동차의 복잡한 플랜지 형상을 가지는 박판제품의 초기블랭크를 결정하는데 많은 시행착오를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 대학 부설연구소 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Karima, M., "Blank Development and Tooling Design for Drawn Parts Using a Modified Slip Line Field Based Approach," J. 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. Sowerby, R., Duncan, J. L. and Chu, E., "The Modelling of Sheet Metal Stamping", Int. J. Mech. Sci., Vol. 28 No. 7, pp. 415~430, 1986.
5. Majlessi, S. A. and Lee, D., "Further Development of Sheet Metal Forming Analysis Method," J. of Eng. for Industry, ASME, Vol. 109, pp. 330~337, 1989.
6. 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.
7. Lee, C. H. and Huh, H., "Blank Design and Strain Prediction of Automobile Stamping Parts by an Inverse finite Element Approach," J. of Materials Processing Technology, Vol. 63 pp. 645~650, 1997.
8. 손기찬, 심현보, 전성문, "임의 형상 컵 디프드로잉에서의 최적 blank에 관한 연구," 한국소성가공학회 추계학술대회논문집, pp. 37~40, 1998.
9. Kobayashi, S., Oh, S. I. and Altan, T., *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford Univ. Press., 1989.
10. Kang, B. S., Kim, N. S. and Kobayashi, S., "Computer-Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 30, No. 1, pp. 43~52, 1990.
11. Lee, L. H. and Kang, B. S., "Development of a Methodology to form Net-Shape Nosing Shells by the Backward Tracing Scheme of the Rigid-Plastic FEM," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, No. 6, 1997.
12. Kang, B. S., Lee, L. H. and Choi, H. H., "Extension for the Backward Tracing Scheme of the Rigid-Plastic FEM in Three-Dimensional Deformation," J. of Manufac. Sci. and Eng., ASME, Vol. 119, pp. 556~562, 1997.
13. Choi, H. H., Park, M. S., and Kang, B. S., "Design of a Piercing Hole in Coining Process by the Three Dimensional Backward Tracing Scheme of the FEM," J. of Materials Processing Technology, Vol. 81, 1998.