

우물정(井)자형 Sub-frame의 블랭크 설계

김종엽^{*} · 김낙수^{*} · 허만성^{**}

^{*}서강대학교 기계공학과

^{**}(주)화신 기술연구소

Optimum Blank Design of Automobile Sub-Frame

Jong-Yop Kim, Naksoo Kim and Man-Sung Huh

Abstract

A new blank design method is proposed to predict the optimum initial blank shape in the sheet metal forming process. The rollback method for blank shape design takes the difference between final deformed shape and target contour shape into account. Based on the method, a computer program composed of blank design module, FE-analysis program and mesh generation module is developed. The rollback method is applied to square cup drawing process with the flange of uniform size around its periphery to confirm its validity. The optimum initial blank shape is obtained from an arbitrary square blank after three modifications. Good agreements are recognized between the numerical results and the published results for initial blank shape and thickness strain distribution. The optimum blank shape for two parts of automobile sub-frame is designed. The thickness distribution and the level of punch load is improved. Also, the method is applied to design the weld line in the tailor-welded blank. It is concluded that the rollback method is an effective and convenient method for an optimum blank shape design.

Key words : Blank Design(소재형상설계), Sheet Metal Forming(박판성형가공), Finite Element Method(유한요소법), Rollback Method(롤백방법)

1. 서론

최근 들어 컴퓨터 성능의 향상과 수치해석적인 기법의 발전으로 자동차의 복잡한 부품에 대한 해석이 가능하게 되었으며, 이를 토대로 공정설계 및 공정개선에 응용하는데 이르렀다. 이러한 경우, 해석과정에 있어서 성형에 영향을 미치는 여러 가지 인자들을 고려해야 한다. 그러한 과정중에 가장 중대한 영향을 미치는 인자로 소재(블랭크)의 형상을 들 수 있다.¹⁾²⁾ 적절한 소재의 형상을 택함으로써 성형성을 증대시킬 수 있고, 가공후 처리(trimming)작업에서 재

료의 손실을 줄일 수 있다. 적절한 블랭크 설계는 성형중 파단의 예방, 두께의 균일분포, 성형하중 감소등에 도움을 주며, 이를 위해서는 특히 성형완료후 일정한 플랜지 폭을 남기는 블랭크의 형상이 바람직하다.

블랭크 형상을 결정하기 위하여 Jimma³⁾, Hasek와 Lange⁴⁾, Karima⁵⁾등은 미끄럼선장해석을 이용하였고, Vogel과 Lee⁶⁾, Chen과 Sowerby⁷⁾등은 평면응력 특성을 이용하였으며, Sowerby와 Duncan⁸⁾은 성형전후의 그리드 면적의 일치 조건을 이용하는 기하학적인 맵핑방법을 이용하였다. 그러나 이런 방법은 기하학적인 제한이 있

거나 재료의 거동을 고려하지 않았다. Majlessi와 Lee⁹⁾는 Levy 등의 이론을 확장하여 축대칭 성형 및 축대칭 다단계 딥드로잉등에 적용하였으며, Chung과 Richmond¹⁰⁾는 마찰조건을 고려하지 않은 상태에서 블랭크를 설계하고 최종형상과 계산된 초기형상을 이용하여 가상의 중간형상을 구하였다. Lee와 Huh¹¹⁾는 강소성 유한요소해석의 역해석을 통하여 블랭크를 전개하여 초기형상을 구하였다. 그 외에 Toh와 Kobayashi¹²⁾는 강소성 유한요소법(rigid-plastic FEM)을 이용하여 초기형상을 구하였으며, Zhaotao등¹³⁾은 플랜지면에서의 재료유동을 평면변형하의 포텐셜유동으로 간주하고, 경계요소법을 이용하여 최적 블랭크형상을 구하였다.

본 연구에서는 기존의 연구와는 달리 공정변수등을 고려하여 복잡한 형상을 가지는 제품의 초기 블랭크 형상을 결정하는 방법을 제시하고자 한다. 기존의 연구는 일반적인 형상에 적용하기에 어려우며, 단면해석을 통한 방법은 재료의 거동이 복잡한 경우 전체적인 블랭크설계에 있어 한계를 가지게 된다. 자동차부품에서는 많은 경우 점용접을 위한 플랜지부가 필수이며 이를 위하여 성형후 제품 전반에 걸쳐 균일한 플랜지를 가지도록 초기블랭크 설계가 되어야 하며, 최적의 초기 블랭크 형상의 설계는 재료절감의 측면과 공정개선의 측면에서 파급효과가 클 것으로 기대된다.

2. 최적블랭크 형상 설계

최적의 블랭크 형상은 균일한 플랜지를 나타내는 외곽선에 성형된 판재의 외곽선을 근사시켜 그 편차를 최소화하는 것으로 정의하였다. 이러한 형상을 찾아 내기 위하여 먼저 제품의 외곽선으로부터 등간격을 가지는 목표외곽선(target contour)¹⁴⁾을 설정하고, 수치해석을 통하여 나온 결과에 제안한 방법을 적용하여 새로운 블랭크 형상을 설계하였다. 이 과정에서 공정해석은 상

용 유한요소 해석프로그램인 PAM-STAMP를 이용하였고, 새로운 블랭크를 설계하고 결과를 확인할 수 있는 프로그램을 작성하여, 사각집과 자동차 sub-frame 부품 성형에 적용하여 보았다.

2.1 블랭크형상 설계방법

제안된 방법은 먼저 제품의 외곽선으로부터 등간격을 가지는 목표외곽선을 정의하는 데에서부터 시작된다. 제품의 외곽선을 따라 남기고자 하는 만큼의 적절한 플랜지 길이를 결정 한 후 그 길이만큼 옅셋시켜 만들어진 목표외곽선을 일련의 beam element로 구성하였다.

최적의 블랭크를 설계하는 과정을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 해석을 위하여 준비된 임의의 블랭크형상의 요소망을 나타내고 있다. Fig. 1(b)는 성형해석후 얻어진 블랭크의 요소망과 제품의 목표외곽선을 나타내고 있다. 우선 블랭크와 목표외곽선의 관계는 목표외곽선 밖으로 블랭크가 나와 있는 부분과 안으로 들어가 있는 부분으로 나뉘어 진다. 밖으로 블랭크가 나와 있는 부분은 가공후 처리에서 제거되어야 할 부분이며, 안으로 블랭크가 들어가 있는 부분은 초기블랭크 형상의 미비로 인하여 제품을 형성하고 있지 못한 부분이다. 따라서 수정된 블랭크 형상은 성형후 제품의 외곽선을 제대로 형성하도록 재설계되어야 한다. Fig. 1(c)는 rollback방법을 사용하여 재설계된 블랭크의 외곽선과 초기블랭크 형상을 나타내고 있다. Fig. 1(d)는 재설계된 블랭크의 외곽선에 해석을 위하여 생성시킨 유한요소망을 나타내고 있다.

블랭크형상을 재설계하는 방법은 다음과 같다. Fig. 2(a)는 제품 플랜지부의 요소망과 목표외곽선의 일부를 나타내고 있는데, 앞에서 설명한 것과 같이 플랜지가 남은 부분과 모자라는 부분으로 나뉘 수 있다. Fig. 2(b)는 영역A의 블랭크 재설계과정을 나타낸다. 성형된 블랭크의 요소망중 목표외곽선에 걸려있는 사각요소 IJKL을 찾아내어 절점 J와 K사이를 m:n의 비율로

내분하는 점 Q_{in} 의 위치를 찾아낸다. 이 점을 초기블랭크의 요소망으로 가져가, 초기블랭크에서의 동일한 절점 J' 과 K' 사이를 $m:n$ 으로 내분하는 점 Q'_{in} 을 지정한다. 이와같은 과정을 목표외곽선에 걸려있는 성형된 블랭크의 모든 요소에 대하여 수행하여 수정된 블랭크의 외곽선을 묘사하는 점의 위치를 구하여 낸다. 절점 J, K 의 좌표를 각각 $J(x_1, y_1), K(x_2, y_2)$, 절점 J', K' 의 좌표를 각각 $J'(x'_1, y'_1), K'(x'_2, y'_2)$ 이라 하면 Fig. 2(a)를 참조하여

$$m:n = \frac{|JQ|}{|JK|} : \frac{|QK|}{|JK|} \quad (1)$$

가 되고, 같은 비율로 내분되는 점 Q'_{in} 의 좌표는 다음과 같다.

$$Q'_{in} \left(\frac{mx'_2 + nx'_1}{m+n}, \frac{my'_2 + ny'_1}{m+n} \right) \quad (2)$$

Fig. 2(c)는 영역B의 블랭크 재설계과정을 나타낸다. 성형된 블랭크의 요소망중 블랭크 바깥 방향으로 나가는 직선이 목표외곽선과 교차하는 요소 MNOP를 찾아내어 절점 OP를 $m:n$ 의 비율로 외분하는 점 Q_{out} 를 찾아낸다. 이 점을 초기블랭크의 요소망으로 가져가 초기블랭크에서의 동일한 절점 O' 와 P' 사이를 외분하는 점 Q'_{out} 를 정한다. 즉, O, P 의 좌표를 각각 $O(x_1, y_1), P(x_2, y_2)$, O', P' 의 좌표를 각각 $O'(x'_1, y'_1), P'(x'_2, y'_2)$ 이라 하면,

$$m : n = \frac{|OQ|}{|OP|} : \frac{|QP|}{|OP|} \quad (3)$$

가 되고, 같은 비율로 외분되는 점 Q'_{out} 의 좌표는 다음과 같다.

$$Q'_{out} \left(\frac{mx'_2 - nx'_1}{m-n}, \frac{my'_2 - ny'_1}{m-n} \right) \quad (4)$$

이와 같은 과정을 수행하여 수정된 블랭크의 외곽선을 묘사하는 점의 위치를 구하여 낸다. 위의 두경우에 대하여 얻어진 점을 연결하여 수정된 블랭크의 외곽선을 묘사할 수 있다. 이상의 과정을 흐름도를 나타내면 Fig. 3과 같다.

2.2 블랭크 형상 설계 프로그램 (Blank

Shape Design Program) 개발

초기 블랭크형상을 최적화시키기 위하여 앞에서 설명한 방법과 과정을 따라 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 블랭크형상 설계 프로그램외에도, 수정된 블랭크의 유한요소망 생성 프로그램, 공정해석을 위한 상용 프로그램 및 이를 연결하는 프로그램으로 구성되어 있으며, 전체적인 블랭크형상 설계과정을 Fig. 4에 나타낸 것과 같다.

블랭크의 재설계 과정을 수행하기 위해서는 공정해석 프로그램과 블랭크설계 프로그램을 연결하는 하는 프로그램이 필요하다. 이 프로그램은 블랭크 형상 설계를 위하여 해석결과를 읽어들이는 기능, 해석결과와 목표외곽선을 비교하는 기능, 수정된 블랭크 형상으로 공정해석을 수행하기 위한 PAM-STAMP 입력파일을 생성하는 기능을 갖도록 개발되었다.

3. 블랭크형상 설계 및 응용

3.1 사각형컵의 블랭크형상 설계 및 타당성 검증

앞에서 제안한 블랭크형상설계 방법의 타당성을 검증하기 위하여 사각형컵 성형공정에 rollback방법을 적용하였다. 블랭크 형상설계에는 지난 수십년간 많은 연구가 진행되었는데, 그 중에서 이충호등이 연구한 일련의 논문(15)(16)(17)을 선정하여 결과를 비교하여 보았다. 실험 및 수치해석을 위한 금형의 형상은 Fig. 5에 나타내었다. 사용된 재료는 자동차 차체용 냉연강판이며, 재료의 성질 및 가공조건은 다음과 같다.

응력-변형률 관계 :

$$\bar{\sigma} = 58.78 \times (0.000903 + \bar{\epsilon})^{0.274} \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

이방성 계수 : $\bar{R} = 1.679$

초기블랭크 크기 : 160 mm × 160 mm

초기 박판두께 : $t = 0.69$ mm

마찰계수 : $\mu = 0.123$

블랭크 홀딩력 : 4,000 kgf

실험에 사용된 초기블랭크는 가로, 세로 길이가 160 mm인 정사각형이며, Fig. 6(a)는 딥드로잉해석후 사각컵의 형상을 유한요소망으로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 성형후 높이가 40 mm이고 플랜지의 폭이 5 mm로 일정한 사각컵 성형에 사용될 초기블랭크를 결정하고자 하였다. Fig. 7은 롤백방법을 사용하여 최적블랭크를 설계하는 각 단계에서의 결과를 나타낸다. Fig. 7(a)는 가로,세로 160 mm인 사각형블랭크를 초기블랭크로 사용하여 사각컵성형후 블랭크의 외곽선 위치를 나타내고 있다. Fig. 7(b)는 블랭크 설계과정을 거쳐 얻어진 변경된 블랭크의 성형 해석 결과를 나타내고 있으며, 목표외곽선과의 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 재설계과정을 두번 더 거쳐 Fig. 7(d)에서 보여주는 것과 같이 플랜지폭이 균일한 사각컵을 얻어낼 수 있었으며, 최종적으로 얻어진 블랭크형상을 Fig. 8에 나타내었다. 이중호등의 결과와 비교하면, rollback 방법을 사용하여 얻어진 블랭크의 형상이 수직방향에서는 조금 더 크고, 대각선방향으로는 조금 작음을 알 수 있으나 전체적인 형상이 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 9는 초기블랭크와 각 단계에서 재설계된 블랭크에 대하여 편치행정에 대한 하중의 변화를 나타낸 것이다. 반복회수가 많아질수록 재설계 전후의 하중-변위 곡선의 차가 줄어들음을 알 수 있다. 1차재설계 후에는 블랭크의 크기가 작아지면서 최고하중이 감소하였고, 3차 재설계 후에는 최고하중이 사각블랭크와 1차블랭크의 중간정도 값을 나타내고 있다. 재설계과정을 수회 반복후 최적 블랭크형상을 결정하였으며, 그 최적블랭크 형상에 대한 성형해석결과를 다른 연구결과와 비교하였다. Fig. 10(a)는 대각선방향의 두께변형률을, Fig. 10(b)는 수직방향으로의 두께변형률을 나타낸다. 대각선방향으로의 두께변형률에서 롤백방법

을 사용하여 구해진 블랭크의 해석결과와 이중호등의 결과가 약간의 차이가 있으나 전체적인 분포양상이 매우 유사함을 알 수 있으며, 제안된 블랭크 형상설계가 매우 유용한 방법임을 검증하였다.

3.2 Left member의 성형해석 및 블랭크 형상설계

자동차 서스펜션의 판재부품처럼 형상이 복잡한 제품에 대한 블랭크 설계는 경험자라 하더라도 그리 용이하지 않다. 우물정(井)자형 자동차 sub-frame의 각 부품에 대하여 성형해석을 수행하고 성형후에 일정한 폭의 플랜지를 남기는 블랭크 형상설계를 하였다. sub-frame의 부품중 깊이는 얇으나 복잡한 형상을 가지는 left member를 해석대상으로 선정하였다. Fig. 11은 해석에 사용된 상형다이, 블랭크홀더, 펀치 및 초기블랭크 형상을 나타낸다. Sub-frame의 left member는 성형자체의 향상 외에도 상판과 하판을 용접하기 위하여 균일한 폭을 가지는 플랜지가 요구된다. 해석에서는 플랜지의 폭을 30mm로 잡아, 제품의 외곽선으로부터 균일하게 30mm만큼 떨어진 위치에 목표외곽선을 정의한 후 일련의 beam element로 구성하여 해석에 이용하였으며 Fig. 12에 나타내었다.

육각모양의 블랭크를 초기블랭크로 하여 3번의 재설계과정을 거친후 최적의 초기블랭크 형상을 결정하였다. Fig. 13은 성형해석에 사용된 블랭크별 편치하중-변위의 관계를 나타내고 있으며, Fig. 14는 성형전후 블랭크 외곽선의 위치를 나타내고 있다. 재설계가 반복되면서 편치하중이 감소하고, 블랭크의 외곽선이 동시에 목표외곽선에 도달하게 되는 최적블랭크 형상이 얻어진다. Fig. 15는 각 단계별 성형후 두께분포를 나타내고 있으며, 두께분포가 점차적으로 개선됨을 확인하였다.

3.3 No. 2 member의 성형해석 및 블랭크 형상설계

Sub-frame부품 중 복잡한 형상을 가지면서 성형깊이가 깊은 No.2 member에 대하여 성형 해석을 수행하고 성형후 일정한 폭의 플랜지를 남기는 블랭크의 형상 설계를 하였다. Fig. 16은 No.2 member 성형해석을 위한 상형다이, 홀더, 펀치 및 초기 블랭크 형상을 나타낸다. No.2 member는 성형깊이가 깊으므로, 블랭크 초기 위치 혹은 형상에 따라 성형과정중 편심이 발생하여 성형이 불가능한 경우도 있기 때문에 제품 외곽선으로부터 균일하게 40 mm 떨어진 위치에 목표외곽선을 Fig. 17에 나타낸 것처럼 정의하였다.

사각모양의 블랭크를 초기블랭크로 하여 세 번의 재설계과정을 거친 후 최적의 초기블랭크 형상을 결정하였다. Fig. 18은 성형해석에 사용된 블랭크별 펀치 하중-변위의 관계를 나타내며, Fig. 19는 성형전후의 블랭크외곽선의 위치를 나타낸다. Fig. 20은 초기블랭크의 성형후 두께분포를 나타내고, Fig. 21는 결정된 최종블랭크의 성형후 두께분포를 나타낸다. 제품의 수직면과 곡률이 심한 부분에서의 두께분포가 개선되었다.

3.4 No. 2 Member의 TWB 성형해석 및 용접선 설계

Sub-frame No.2 member의 최적블랭크 형상을 설계한후 TWB(tailor-welded blank)에 대한 해석을 수행하였다. Sub-frame의 구조해석 결과를 토대로 경량화효과를 얻어내기 위하여 응력집중도가 낮은 부위에 얇은 두께의 판재를 사용하였다. 따라서 성형후 이와같은 제품을 얻어낼 수 있는 초기블랭크 설계가 요구된다. 두께가 다른 판재로 구성되는 TWB성형에서는 재료 거동이 단일판재의 재료거동과는 상이하기 때문에 용접선의 위치를 설계하기가 어렵다. 따라서 롤백방법을 응용하여 용접선의 위치를 설계하였으며 성형후 용접선의 위치를 확인하였다.

성형후 용접선이 No.2 member 중심에서 좌

우로 120 mm만큼 떨어진 부분에 위치하여야 하므로, 이 위치를 목표위치로 지정하고 일련의 beam element로 구성하여 해석에 이용하였다. Fig. 22는 TWB 성형전후 외곽선과 용접선의 위치를 나타내고 있으며, Fig. 23, Fig. 24에 해석결과를 나타내었다. 해석결과 용접선을 목표 위치에 근접시킬수 있었으나 Fig. 25에 나타나 있는 판재의 두께분포를 보면 제품의 상단부에 두께가 매우 얇은 부분이 있음을 볼 수 있다. 이는 두께가 다른 두 판재로 구성된 TWB 원형컵성형에서 과단이 원형컵 바닥부 용접선에 평행하게 일어나는 결과¹⁸⁾와 동일하다고 할 수 있다. 따라서 성형깊이와 두 종류의 판재 두께사이의 조합에서 성형가능한 범위를 찾아내어야 함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초기블랭크를 설계하는 방법을 제안하고, 프로그램을 개발하여 성형공정에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 사각컵 성형에 적용하여 귀생김현상을 없애고, 플랜지의 외곽선이 목표외곽선에 동시에 도달하게 하였으며, 타 논문과 비교하여 타당성을 검증하였다.

2) 우물정(井)자형 sub-frame부품에 적용하여 최적의 블랭크 형상을 찾아내어, 두께분포 개선과 하중개선 효과를 얻어내었으며, 복잡한 형상에도 적용가능함을 보였다.

3) 우물정(井)자형 sub-frame No.2 member의 용접판재(tailor-welded blank) 성형해석을 수행하여 초기블랭크의 용접선을 설계하고 용접선의 위치와 두께분포를 확인하였다.

참고문헌

- (1) N. Kim and S. Kobayashi, 1986, "Blank Design in Rectangular Cup Drawing by an

Approximate Method", *Int. J. Mech. Tool Des. Res.*, Vol. 26, No. 2, pp.125-135.

(2) Hideo Iseki and Tadao Murota, 1986, "On the Determination of the Optimum Blank Shape of Non-axisymmetric Drawn Cup by the Finite Element Method", *Bulletin of JSME*, Vol. 29, No. 249, pp.1033~1040.

(3) T. Jimma, 1970, " Deep Drawing Convex Polygon Shell Researches on the Deep Drawing of Sheet Metal by the Slip Line Theory. 1st Report.", *Japan Soc. Tech. for Plasticity*, Vol.11, No.116, pp.653~670.

(4) V.V. Hasek and K. Lange, 1979, "Use of Slip Line Field method in Deep Drawing of Large Irregular Shaped Components.", *Proc. of 7th NAMRC*, Ann Arbor, Michigan, pp.65~71.

(5) M. Karima, 1989, "Blank Development and Tooling Design for Drawn Parts Using a Modified Slip Line Field Based Approach.", *ASME Trans : J. of Engineering for Industry*, Vol.111, pp.345~350.

(6) J.H. Vogel and D. Lee, 1990, "An Analysis Method for Deep Drawing Process Design", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.32, pp.891.

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

(8) R. Sowerby, J.L. Duncan and E. Chu, 1986, "The Modelling of Sheet Metal Stamping", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.28, No.7, pp.415~430.

(9) S.A. Majlessi and D. Lee, 1987, "Further Development of Sheet Metal Forming Analysis Method", *ASME Trans : J. of Engineering for Industry*. Vol.109, pp.330~337.

(10) K. Chung and O. Richmod, 1992, "Ideal Forming-I. Homogeneous Deformation with

Minimum Plastic Work", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 34, No. 7, pp.575~591.

(11) C.H. Lee and H. Huh, 1997, "Blank Desing and Strain Prediction fo Automobile Stamping Parts by and Inverse Finite Element Approach", *J. of Mater. Process. Technol.*, Vol. 63, pp. 645~650.

(12) C.H. Toh and S. Kobayashi, 1985, "Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing", *Int. J. Mech. Tool Des. Res.*, Vol. 25, No. 1, pp.15-32.

(13) Z. Zhatao and L. Bingwen, 1986, "Determination of Blank Shapes for Drawing Irregular Cups Using and Electrical analogue Methods", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 28, No. 8, pp.499~503.

(14) 박상후, 윤정환, 양동열, 김용환, 이장희, 1997, "이상적 변형이론을 이용한 박판 초기형상 설계에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제4호, pp.207-218.

(15) 허훈, 한수식, 1994, "개량박막 유한요소법에 의한 두가지 블랭크로부터의 사각컵 딥드로잉 성형해석", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제10호, pp.2653~2663.

(16) 이충호, 허훈, 1996, "박판금속성형공정에서의 블랭크 설계 및 변형률 예측", 대한기계학회논문집, 제20권, 제6호, pp.1810 -1818.

(17) 이충호, 허훈, 1997, "박판금속성형의 초기블랭크 최적설계를 위한 삼차원 다단계 역해석", 대한기계학회 논문집(A), 제21권, 제12호, pp.2055~2067.

(18) M.A. Ahmetoglu, D. Brouwers, L. Shulkin, L. Taupin, G.L. Kinzel, T. Altan., 1995, "Deep Drawing of round cups from Tailored-Welded Blanks", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 53, pp.684-694, 1995.

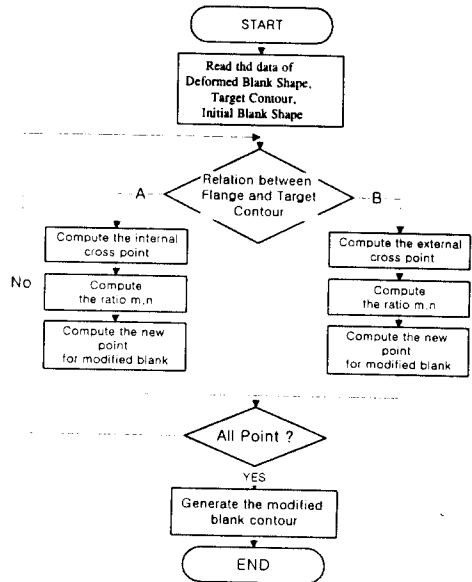
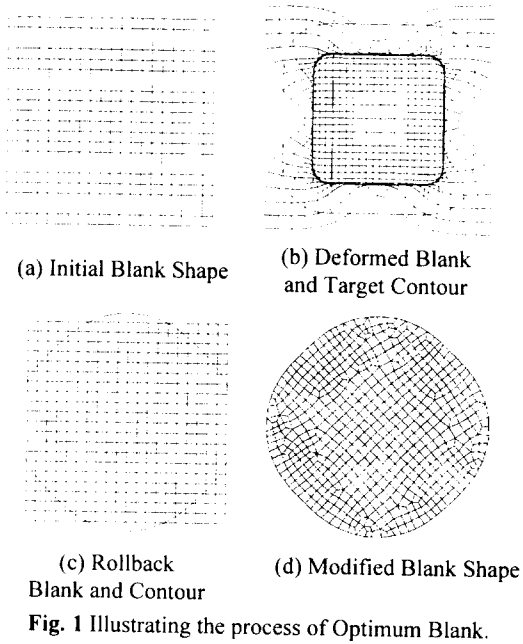


Fig. 3 Flow chart of the Blank Design Module.

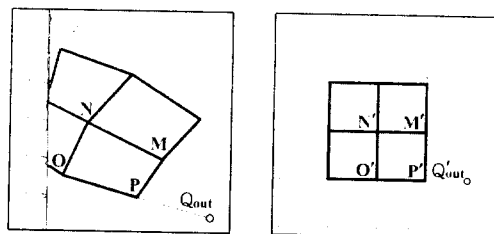
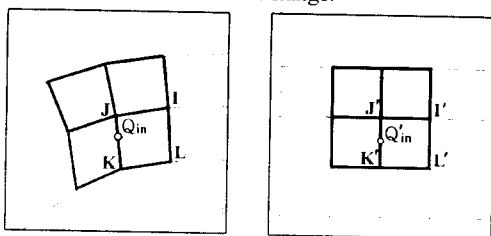
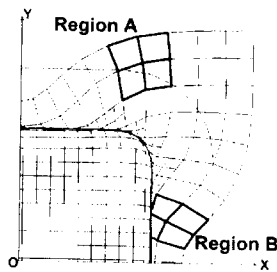


Fig. 2 The rollback process of a mesh located on the surface of flange.

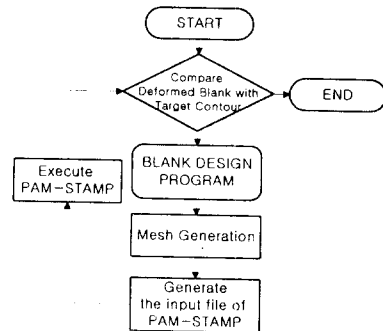
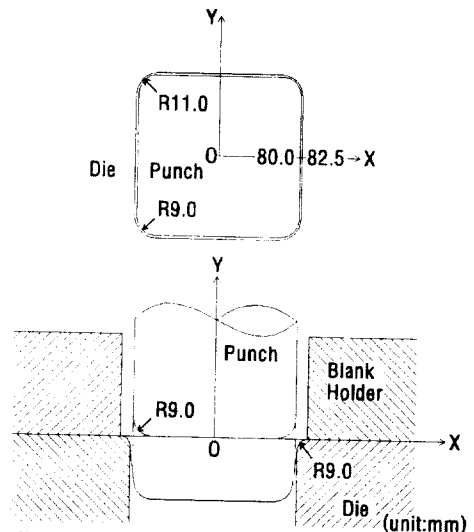
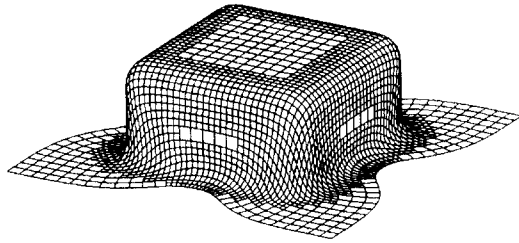
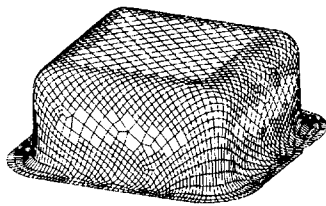


Fig. 4 Flow Chart of the Main Program.





(a) Deformed shape of square cup obtained from initial blank.



(b) Deformed shape of square cup obtained from optimum blank.

Fig. 6 Deformed shape of square cups with FE-mesh geometry : cup height=40mm.

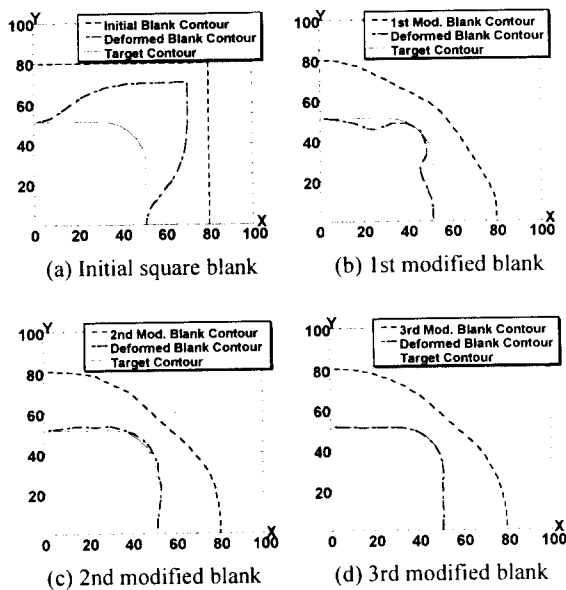


Fig. 7 Comparison of the initial flange shapes and the deformed flange shapes.

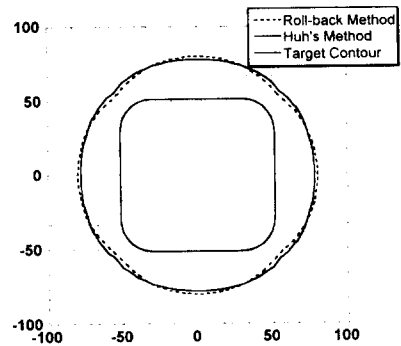


Fig. 8 Comparison of the initial blank contour between the rollback method and Huh's method.

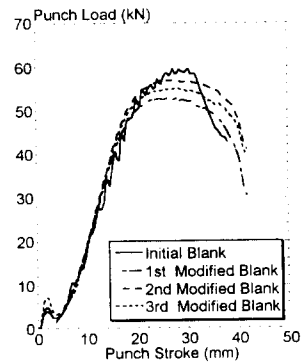


Fig. 9 Load-displacement curves in square cup drawing process with various initial blank shapes.

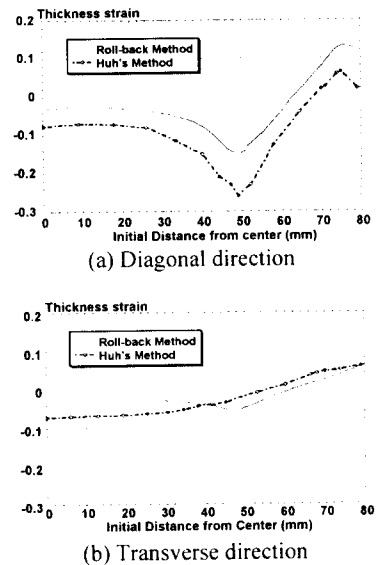


Fig. 10 Thickness strain distributions in square cup.

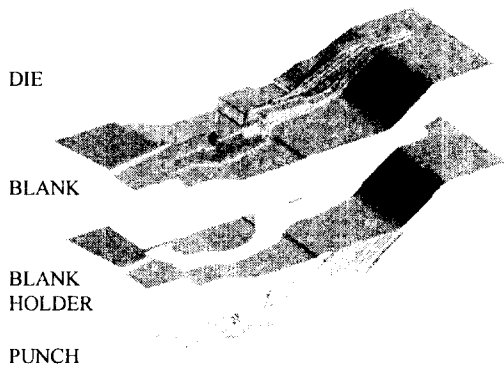


Fig. 11 The FE-model for sub-frame left member.

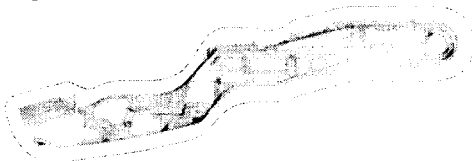


Fig. 12 The target contour for left member.

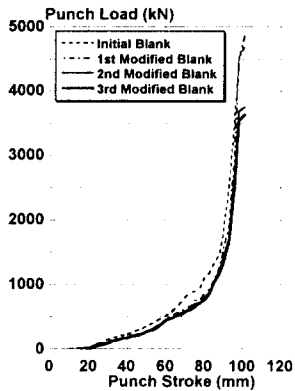


Fig. 13 Load-displacement curves in left member drawing process with various blank shapes.

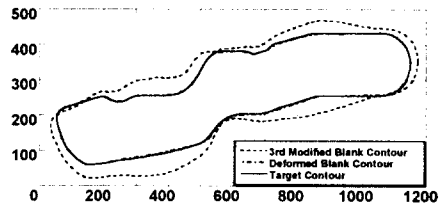
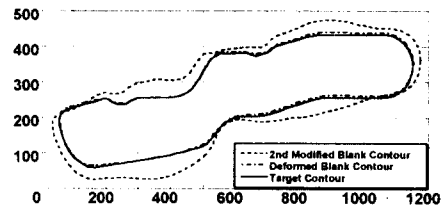
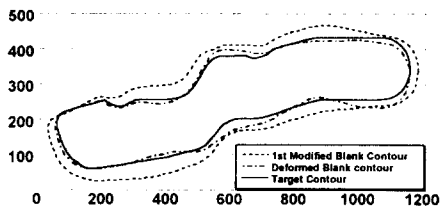
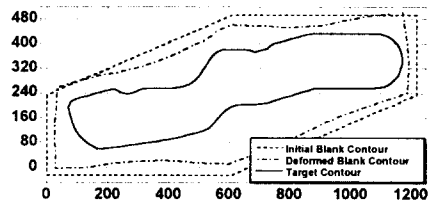


Fig. 14 Comparison of the initial flange shapes and the deformed flange shapes.

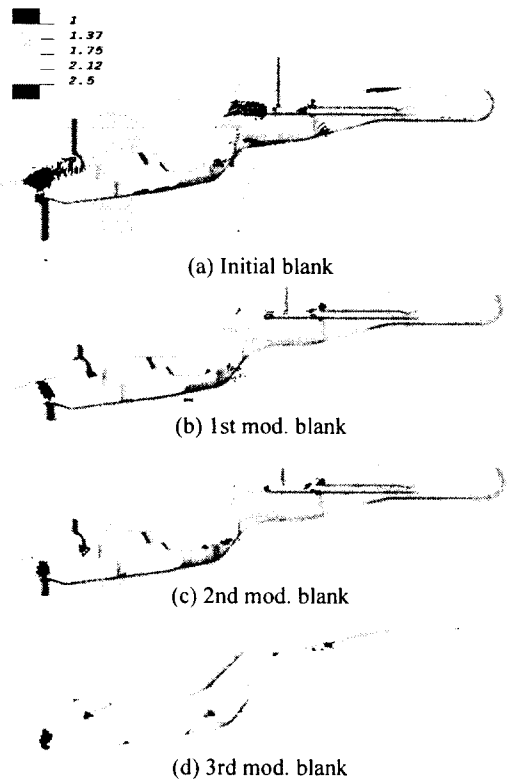


Fig. 15 Thickness distribution with various blank shapes (unit:mm).

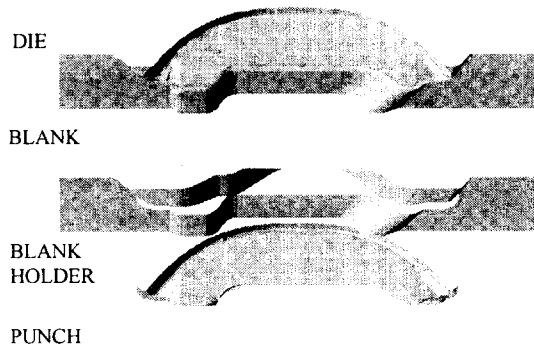


Fig. 16 The FE-model for sub-frame left member.

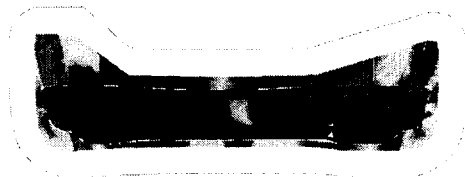


Fig. 17 The target contour for No.2 member.

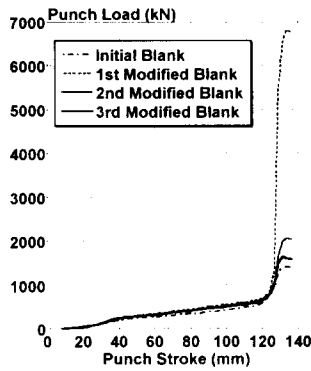


Fig. 18 Load-displacement curves in No.2 member drawing process with various blank shape.

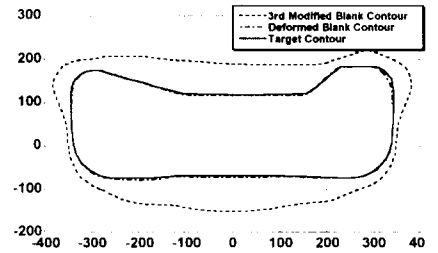
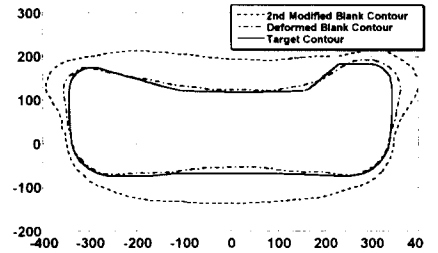
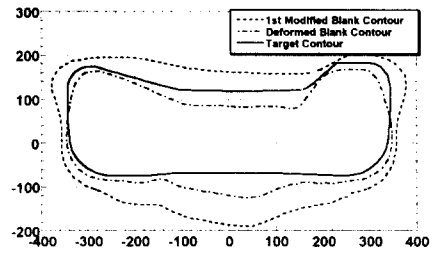
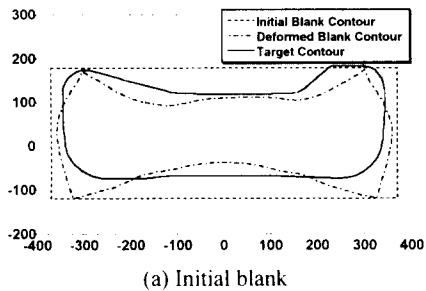


Fig. 19 Comparison of the initial flange shapes and the deformed flange shapes.

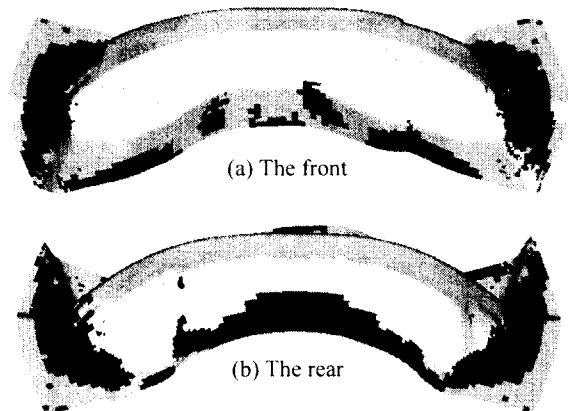


Fig. 20 Thickness distribution with initial blank shape (unit:mm).

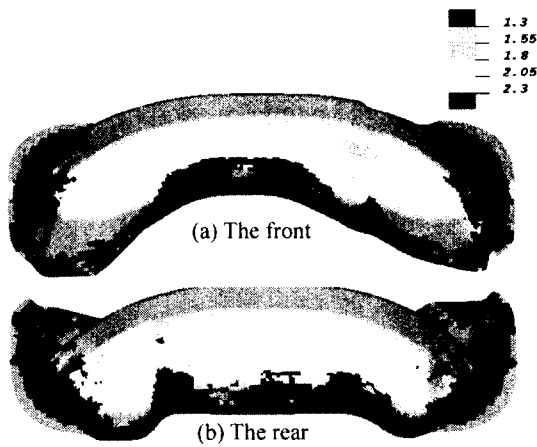


Fig. 21 Thickness distribution with optimum blank shape (unit:mm).

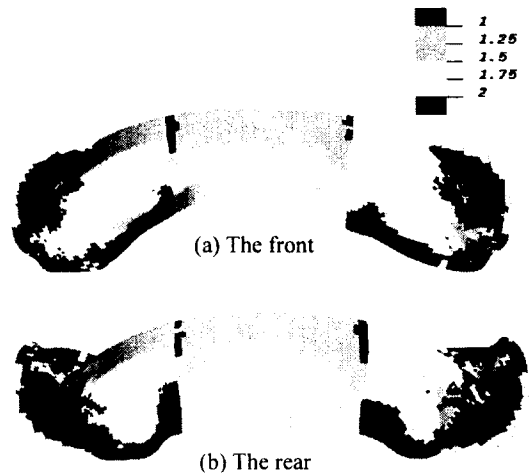


Fig. 25 Thickness distribution with Tailor-welded blank (unit:mm).

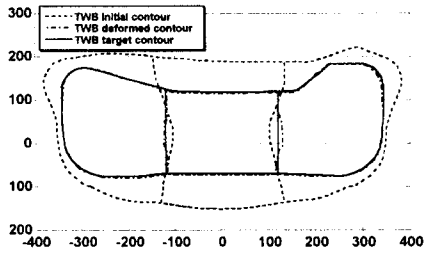


Fig. 22 Comparison of the weld line between the initial blank shape and the deformed blank shape.



Fig. 23 Deformed shape of No.2 member with Tailor-welded Blank.

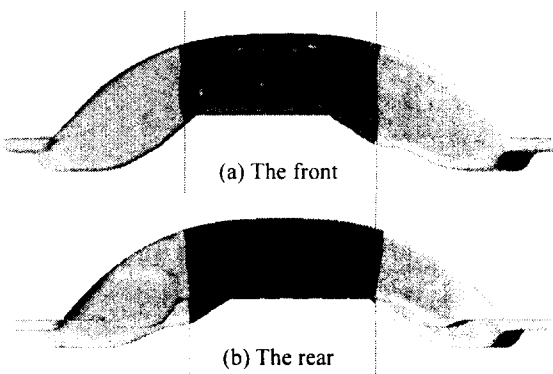


Fig. 24 Deformed shape of No.2 member with Tailor-welded blank.