

롤백방법을 이용한 박판금속성형공정에서의 블랭크 설계

김종엽* · 김낙수* · 허만성**

(1999년 2월 9일 접수)

Blank Design in Sheet Metal Forming Process Using the Rollback Method

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

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 the deformed blank contour and the target contour shape into account. The minimization object function R is proposed. Based on the method, a computer program composed of blank design module, FE-analysis module and mesh generation module is developed. The rollback method is applied to square cup, reentrant cross section, L-shaped 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 blank shape after several modifications. Good agreements are recognized between the numerical results and the published experimental results for initial blank shape and thickness strain distribution. It is concluded that the rollback method is an effective and convenient method for an optimum blank shape design.

Key Words : Blank Design, Sheet Metal Forming, Finite Element Method, Rollback Method

1. 서론

최근 들어 컴퓨터 성능의 향상과 수치 해석적인 기법의 발전으로 자동차의 복잡한 부품에 대한 해석이 가능하게 되었으며, 이를 토대로 공정설계 및 공정개선에 응용하는데 이르렀다. 그러나 대부분의 수치해석은 공정변수가 주어진 상태에서 성형공정을 해석하기 때문에 공정변수를 결정하는 문제에 이용하려면 전문가에 의한 수치적인 시행착오를 거쳐야 되고 일반적으로 많은 시간과 경비가 소요된다. 따라서, 이러한 경우 해석과정에 있어서 성형에

영향을 미치는 여러 가지 인자들을 고려하여 최적의 공정 변수를 결정할 수 있어야 한다. 그러한 과정 중에 가장 중대한 영향을 미치는 인자로 초기블랭크의 형상⁽¹⁻²⁾을 들 수 있다. 적절한 소재의 형상을 택함으로써 성형성을 증대시켜 성형하중과 성형 후 변형률 분포를 크게 개선할 수 있으며, 가공후 처리(trimming)작업에서 재료의 손실을 줄여 원가절감에도 기여할 수 있다.

블랭크 형상을 결정하기 위하여 Jimma⁽³⁾, Hazek과 Lange⁽⁴⁾, Karima⁽⁵⁾는 미끄럼선장해석을 이용하였고, Vogel과 Lee⁽⁶⁾, Chen과 Sowerby⁽⁷⁾는 평면응력 특성을

* 서강대학교 기계공학과
** (주) 화신 기술연구소

이용하였으며, Sowerby와 Duncan 등⁽⁸⁾은 성형전후의 그리드 면적의 일치조건을 이용하는 기하학적인 맵핑방법을 이용하였다. 그러나 이런 방법은 기하학적인 제한이 있거나 재료의 거동을 고려하지 않았다. Majlessi와 Lee⁽⁹⁾는 Levy등의 이론을 확장하여 축대칭 성형 및 축대칭 단면 딥드로잉등에 적용하였으며, Guo와 Batoz 등⁽¹⁰⁾은 일반적인 형상에 적용할 수 있게 수식화하였는데, 블랭크의 계산과 더불어 최종상태에서의 플랜지 모양을 예측하기도 하였다. Chung과 Richmond⁽¹¹⁾는 마찰조건을 고려하지 않은 상태에서 블랭크를 설계하고 최종형상과 계산된 초기형상을 이용하여 가상의 중간형상을 구하였다. Lee와 Huh⁽¹²⁾, Kim과 Seo등⁽¹³⁾은 강소성 유한요소해석의 역해석을 통하여 블랭크를 전개하여 초기형상을 구하였다. 그 외에 Toh와 Kobayashi⁽¹⁴⁾는 강소성 유한요소법(rigid-plastic FEM)을 이용하여 초기형상을 구하였으며, Zhaotao와 Bingwen⁽¹⁵⁾은 플랜지면에서의 재료유동을 평면변형하의 포텐셜유동으로 간주하고, 경계요소법⁽¹⁶⁾을 이용하여 최적 블랭크형상을 구하였다.

본 연구에서는 최적의 초기블랭크 형상을 설계하기 위하여, 성형하고자 하는 제품의 외곽선을 나타내는 목표 외곽선(target contour)과 임의의 초기소재로부터 성형된 블랭크 외곽선과의 관계를 고려하여 새로운 블랭크의 외곽선을 묘사하는 방법인 롤백방법(rollback method)을 제안하고자 한다. 기존의 방법은 달리 각종 공정변수 등을 고려한 해석결과를 토대로 블랭크를 설계하며, 재료의 거동과 형상이 복잡한 제품에 대하여 적용이 가능하다. 제안된 방법에 따라 블랭크설계 모듈, 성형해석 모듈, 자동유한요소생성 모듈을 연결하여 통합된 프로그램을 개발하였으며, 타당성을 검증하기 위하여 사각컵형상, 오목형 단면 형상, L형 단면 형상 성형공정에 적용하였다. 임의의 형상을 가지는 초기블랭크로부터 시작하여 수차례의 수정을 거친 후 최적의 초기블랭크 형상을 구하였다. 해석결과를 검증하기 위하여 기존의 논문들과 비교하여 블랭크 형상과 두께 변형을 분포의 정확성을 검증하였다.

2. 블랭크 형상 설계

2.1. 기본 정의

본 연구에서는 성형후 제품 외곽 전체에 걸쳐 균일한 플랜지를 남기도록 초기 블랭크 형상을 설계하는 롤백방법(rollback method)을 제안하고자 한다. 먼저, 균일한 플

랜지를 묘사하도록 제품의 외곽선으로부터 등거리(equi-distance)만큼 떨어진 위치에 목표외곽선(target contour)⁽¹⁷⁾을 설정한다. 임의의 형상을 가진 블랭크를 성형하여, 블랭크 외곽선을 구성하고 있는 각 절점의 변형경로와 계속적으로 성형되었을 때 예측할 수 있는 변형경로를 구한다. 성형된 블랭크 위에 목표외곽선을 투영시킨 후 변형경로를 따라서 초기블랭크 상의 위치로 되돌아키면 수정된 블랭크의 외곽선을 구할 수 있다. 최적의 초기블랭크 형상은 이와같은 반복설계를 통하여 목표외곽선에 성형된 블랭크의 외곽선을 근사시켜 편차면적이 수렴조건 이내로 들어오는 블랭크로 정의한다. 관계의 변형경로는 초기상태와 최종상태간의 경로를 10단계로 나누어 고려하였으며, 성형해석은 판재성형해석 상용프로그램인 PAM-STAMP를 이용하였다.

2.2 롤백방법(rollback method)에 의한 블랭크 설계 제안된 방법은 먼저 제품의 외곽 전체에 걸쳐서 성형 후 남기고자 하는 만큼의 적절한 플랜지 길이를 결정한 후 그 길이만큼 등거리로 떨어진 목표외곽선을 설정한다. 변형경로와 교차점을 얻어내는 계산에 이용하기 위하여 블랭크를 구성하고 있는 요소와 동일한 수준의 길이를 가지는 일련의 빔요소(beam element)로 목표외곽선을 구성한다. Fig. 1은 초기블랭크 외곽선상 임의의 한 점 $P(X, Y)$ 가 성형과정을 거쳐 점 $p(x, y)$ 까지 이동한 변형경로와 계속적으로 성형이 이루어지는 경우의 예측된 변형 경로를 나타내고 있다. 예측된 변형경로는 각 단계

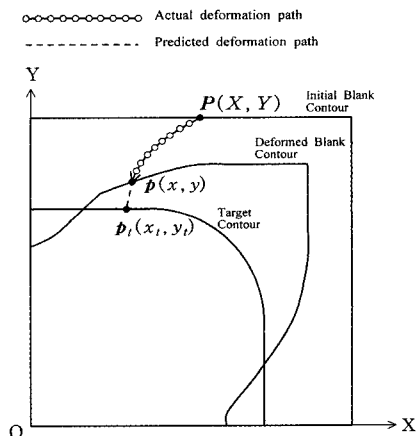


Fig. 1 Movement of material point along the deformation path

에서 변형경로의 방향을 정의하는 기울기의 1차 도함수에 오일러 공식을 적용하였으며, 예측된 방향으로 목표 외곽선까지 선형화된 변형경로를 설정하였다. 각 단계에서의 기울기 $s(x_i, y_i)$, 기울기의 시간에 대한 1차 도함수를 $s'(x_i, y_i)$ 라 하면 $s(x_{i+1}, y_{i+1})$ 는 다음과 같이 이루어진다.

$$\begin{aligned} s'(x_{i+1}, y_{i+1}) &= s'(x_i, y_i) + s''(x_i, y_i)dt \\ s(x_{i+1}, y_{i+1}) &= s(x_i, y_i) + s'(x_{i+1}, y_{i+1})dt \end{aligned} \quad (1)$$

점 $p_i(x_i, y_i)$ 는 이와같은 변형경로를 따라서 목표외곽선 위에 위치하는 점을 나타내고 있으며, 롤백방법을 적용하기 위하여, 성형된 블랭크를 구성하고 있는 요소들 중 점 $p_i(x_i, y_i)$ 와 가장 가까운 거리에 위치하고 있는 요소를 고려한다. 블랭크의 이산화에 사용된 요소는 4절점 선형요소이며, 평면 요소 내에서 $p_i(x_i, y_i)$ 를 기술하기 위하여 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\begin{aligned} x_i &= a_1 + a_2\xi + a_3\eta + a_4\xi\eta \\ y_i &= b_1 + b_2\xi + b_3\eta + b_4\xi\eta \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 각 절점의 좌표인 $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4$ 의 향으로 a_i 및 b_i 를 풀면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{1}{4}[(1-\xi)(1-\eta)x_1 + (1+\xi)(1-\eta)x_2 \\ &\quad + (1+\xi)(1+\eta)x_3 + (1-\xi)(1+\eta)x_4] \\ y_i &= \frac{1}{4}[(1-\xi)(1-\eta)y_1 + (1+\xi)(1-\eta)y_2 \\ &\quad + (1+\xi)(1+\eta)y_3 + (1-\xi)(1+\eta)y_4] \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 점 $p_i(x_i, y_i)$ 는 성형된 블랭크의 한 요소 내에서 형상함수(shape function)와 각 절점의 좌표로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i(\xi_i, \eta_i) &= \sum_{\alpha} N_{\alpha}(\xi_i, \eta_i) x_{\alpha} \\ y_i(\xi_i, \eta_i) &= \sum_{\alpha} N_{\alpha}(\xi_i, \eta_i) y_{\alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 2는 점 $p_i(x_i, y_i)$ 를 성형 전 블랭크의 동일한 요소로 되돌이켜, 수정된 블랭크의 외곽선을 묘사하는 $P(X, Y)$ 를 구하는 과정을 나타내고 있다. 수정 전 블랭크를 i 번째로 표현하고, 수정 후 블랭크를 $i+1$ 번째로 표현하면, 수정된 블랭크의 외곽선을 묘사하는 한 점은 식 (4)에서 구하여진 ξ_i, η_i 를 이용하여 다음과 같은 식으로 표현된다.

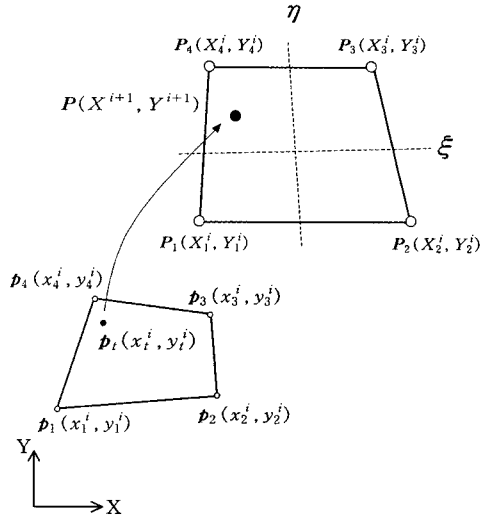


Fig. 2 Illustrating the process of defining the modified point from deformed element to initial element using the rollback method

$$\begin{aligned} X^{i+1}(\xi_i, \eta_i) &= \sum_{\alpha} N_{\alpha}(\xi(x_i, y_i), \eta(x_i, y_i)) \cdot X_{\alpha}^i \\ Y^{i+1}(\xi_i, \eta_i) &= \sum_{\alpha} N_{\alpha}(\xi(x_i, y_i), \eta(x_i, y_i)) \cdot Y_{\alpha}^i \end{aligned} \quad (5)$$

이와 같은 과정을 블랭크 외곽선 전체에 걸쳐서 적용하면 Fig. 3과 같이 수정된 블랭크 외곽선을 묘사하는 점들을 얻어낼 수 있게 된다.

목표외곽선과 성형된 블랭크 외곽선과의 편차면적을 최소화시키는 과정에 적용되는 최소화 목적함수(mini-

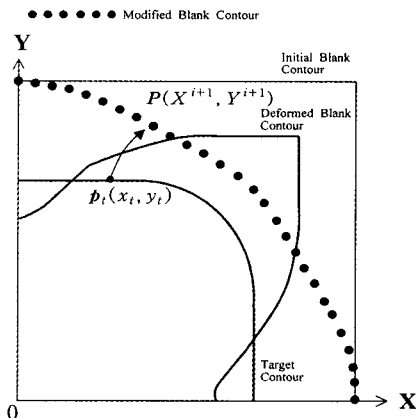


Fig. 3 Moment of material point using the rollback method

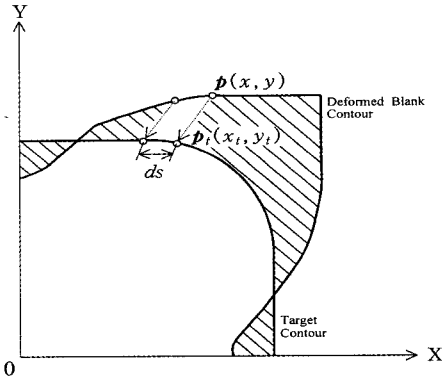


Fig. 4 Calculation of the difference area between the target contour and the deformed blank contour

mization object function)는 다음과 같다. 최소화 목적 함수 R 은 Fig. 4에 나타난 것과 같이 목표외곽선과 성형된 블랭크 외곽선과의 편차면적을 구한후, 초기블랭크 면적 A 로 나눈 값으로 정의한다.

$$R = \frac{1}{A} \int_{contour} (p - p_i) ds \quad (6)$$

R 의 수렴판정 값으로 10^{-2} 를 사용하여, 편차면적이 블랭크 면적의 1%이내가 되었을 때 최적의 초기블랭크로 결정한다.

2.3 블랭크 형상 설계 프로그램 SGDOB 개발

최적의 초기블랭크 형상을 결정하기 위하여 앞에서 설명한 과정과 롤백방법을 이용하여 블랭크 형상 설계 프로그램 SGDOB(SoGang tool for Design of Optimum Blank shape)를 개발하였다. 이 프로그램은 성형해석 모듈, 블랭크 설계 모듈, 요소망 생성 모듈 그리고 최적화 여부를 판단하여 재해석용 입력파일을 만들고 각 모듈을 연결하는 전체 프로그램으로 구성되어 있으며 Fig. 5에 개략적인 순서도를 나타내었다. 성형해석 모듈은 앞서 언급한 대로 관계성형해석 상용프로그램인 PAM-STAMP를 사용하였으며, 블랭크 설계 모듈은 롤백방법을 알고리즘화하여 포트란을 사용하여 프로그래밍 하였다. 요소망 생성 모듈은 수정된 블랭크 외곽선을 묘사하는 점들의 정보를 받아들여 자동적으로 4절점 선형요소로 이산화하는 역할을 수행하게 된다. 전체 프로그램은 입력으로 초기블랭크 형상과 목표외곽선을 입력으로 받아들여 각 모듈들

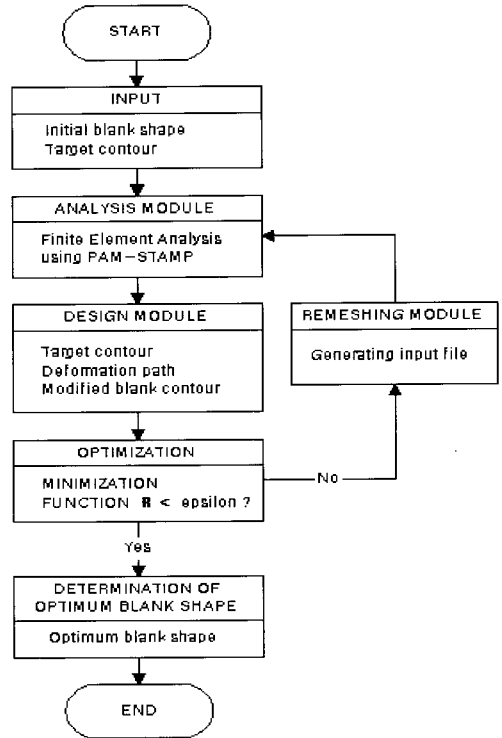


Fig. 5 Block diagram of the optimum blank design program SGDOB

을 실행시킨 후 해석결과를 토대로 최적화 여부를 판단한다. 재설계가 요구되면 요소망 생성 모듈을 실행하여 새로운 성형해석용 입력파일을 생성한다. 최종단계에서는 최적의 초기블랭크 외곽선 정보를 판재재단용 레이저 절단기로 정보를 전달하기 위하여 DXF양식으로 출력하고 전체 블랭크 설계 과정을 종료하게 된다.

3. 블랭크 설계 방법의 적용 및 검증

3.1 사각컵의 블랭크 설계

앞에서 제안한 블랭크형상설계 방법의 타당성을 검증하기 위하여 사각컵 성형공정에 롤백방법을 적용하였다. 블랭크 형상설계에는 지난 십수년간 많은 연구가 진행되었는데 그 중에서 이충호 등이 연구한 일련의 논문^(18~19)을 선정하여 사각컵 성형 결과를 비교하여 보았다.

실험 및 수치해석을 위한 금형의 배치 및 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 사용된 재료는 자동차 차체용 냉연강판이며, 재료의 성질 및 가공조건은 다음과 같다.

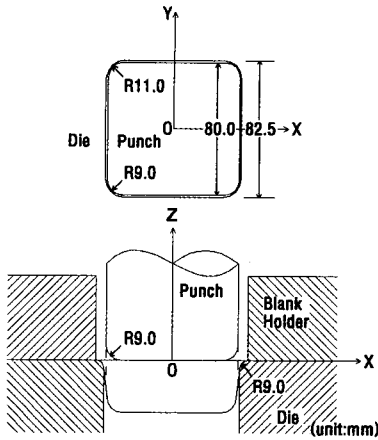


Fig. 6 Geometry description of the tooling for deep drawing of a square cup

응력-변형률 관계 : $\bar{\sigma} = 58.78(0.000903 + \bar{\epsilon})^{0.274}$
(kgf/mm²)

이방성 계수 : $\bar{R} = 1.679$

초기블랭크 크기 : 사각블랭크 (160 mm × 160 mm)

초기 박판두께 : $t_0 = 0.69$ mm

마찰계수 : $\mu = 0.123$

블랭크 홀딩력 : 4,000 kgf

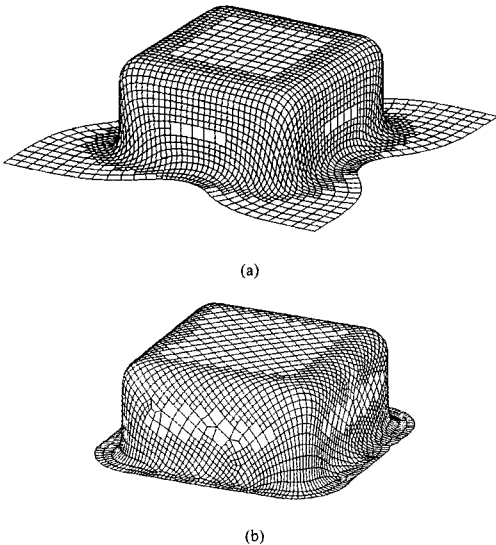


Fig. 7 Deformed shape of square cups with FE-mesh geometry (cup height=40 mm);(a) square cup obtained from initial square blank (b) square cup with the flange of uniform size around its periphery

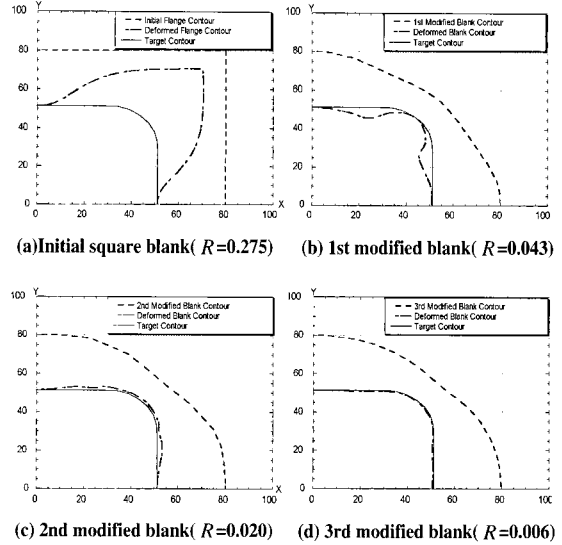


Fig. 8 Comparison between the initial blank contour and the deformed blank contour in deep drawing of square cup

Fig. 7(a)는 사각블랭크를 초기블랭크로 사용하여 딥드 로잉 해석 후 사각컵으로 성형된 블랭크 형상을 나타낸 것이다. Fig. 7(b)는 제품 외곽 전체에 걸쳐 길이 5 mm의 균일한 플랜지를 가지는 높이 40 mm의 사각컵 형상을 유한요소로 분할하여 나타내고 있다.

본 연구에서는 성형 후 높이가 40 mm이고 플랜지 폭이 5 mm로 일정한 사각컵 성형에 사용될 초기블랭크를 결정하고자 하였다. 따라서, 제품 외곽 전체에 걸쳐 5 mm만큼 떨어진 목표외곽선을 설정하고 범요소로 구성하여 이용하였다.

Fig. 8은 룰백방법을 사용하여 최적블랭크를 설계하는 각 단계에서의 초기블랭크 외곽선과 변형된 블랭크 외곽선을 나타낸다. 재설계과정을 3회 반복 후 Fig. 8(d)와 같이 변형된 블랭크 외곽선이 목표외곽선에 근사하는 초기블랭크 형상을 얻어낼 수 있었다. 이때 목표외곽선과의 편차는 126.70 mm²이고 최소화 대상함수 R 은 0.006을 얻어내어 수렴판정 값을 만족하였다.

Fig. 9는 초기블랭크와 각 단계에서 재설계된 블랭크에 대하여 편치행정에 대한 하중의 변화를 나타낸 것이다. 블랭크 지지압을 받는 면적에 비례하여 하중의 최대값이 변화하며, 블랭크 설계가 반복됨에 따라 재설계 전후의 하중-변위 곡선의 차가 줄어들어 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.

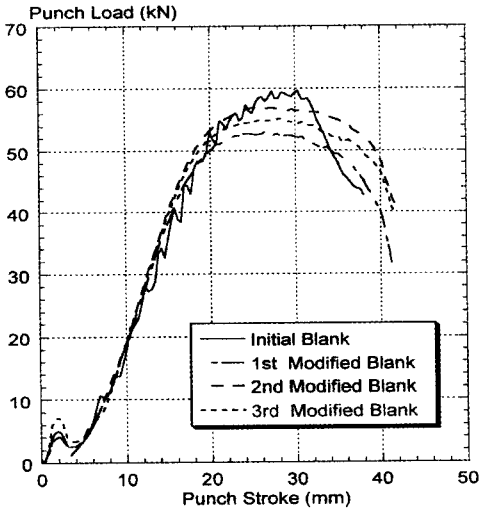


Fig. 9 Load-displacement curves in deep drawing of square cup with various blank shapes

Table 1 Result of optimum blank design for square cup drawing

	Blank Area (mm ²)	Difference Area (mm ²)	Max. Punch Load (tonf)	Object Function R
Initial blank	25600	6584.15	5.987	0.257
1st mod. blank	18883	815.91	5.336	0.043
2nd mod. blank	19966	400.19	5.720	0.020
3rd mod. blank	19495	126.70	5.577	0.006

각 단계에서 사용되었던 블랭크 면적, 편차면적, 편치하중 최대값 그리고 최소화 대상함수 R 은 다음과 같다.

사각컵의 블랭크 설계 결과를 검증하기 위하여 이충호 등이 수행한 연구결과와 비교하여 보았다. Fig. 10에 롤백방법을 사용하여 얻어진 초기블랭크 외곽선과 이충호 등의 연구 결과로 얻어진 초기블랭크 외곽선을 나타내었다. 두 결과를 비교하면 롤백방법을 이용한 최적의 초기블랭크 형상이 압연방향에 대하여 수직인 방향으로서는 3%정도 크게, 대각선 방향으로서는 2.4%정도 작게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이충호 등의 연구결과를 보면, 블랭크 형상에 관하여 압연방향의 0°, 90° 방향으로서는 실제보다 작게, 45° 방향으로서는 실제보다 크게 예측하고 있으며, 정확한 블랭크 형상을 예측하기 위해서는 블랭

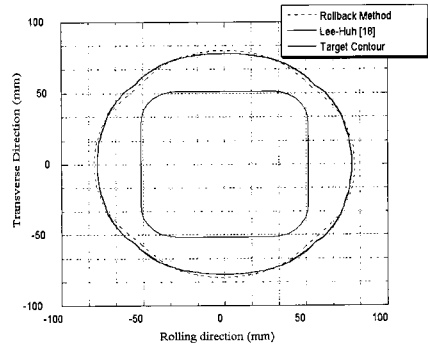
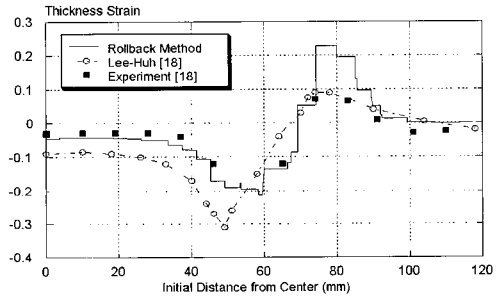
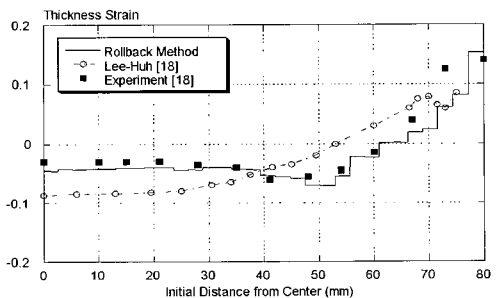


Fig. 10 Comparison of the initial blank contour between the rollback method and the Lee-Huh method



(a)



(b)

Fig. 11 Thickness strain distribution with square blank; (a) diagonal direction (b) transverse direction

크 지지력이나 마찰 등의 경계조건과 변형이론에 대한 수정이 필요하다고 밝히고 있다. Fig. 11에 사각블랭크의 성형결과 얻어진 두께 변형률을 비교하였는데, 롤백방법의 결과가 실제 두께 변형률 분포를 정확하게 예측함을 알 수 있다. Fig. 12에는 최적의 초기블랭크의 성

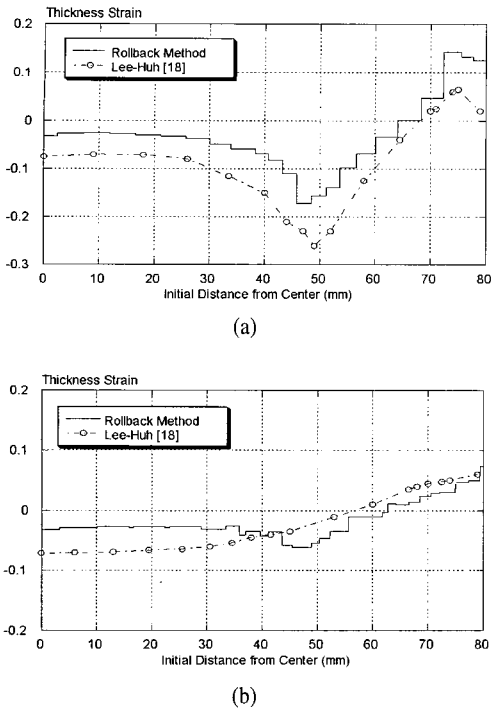


Fig. 12 Thickness strain distribution with optimum blank; (a) diagonal direction (b) transverse direction

형결과 얻어진 두께 변형률 분포를 나타내었다. 이충호 등의 연구에서는 변형률식을 단지 좌표의 함수로 표현할 수 있지만, 요소내부의 변형률이 일정하여 정확한 변형률을 얻고자 할 때는 많은 요소가 필요한 선형 삼각형 박막요소를 사용하였기 때문에 두께변형률이 실제와 차이가 있다.

따라서, 롤백방법이 초기블랭크 형상과 두께 변형률 분포를 실제와 근사하게 예측하고 있음을 알 수 있으며, 이로써 제안한 블랭크 형상설계 방법이 유용한 방법임을 검증하였다.

3.2 오목형 단면 형상의 블랭크 설계

강소성 유한요소법에 의한 역추적 방법(backward tracing scheme)을 이용하여 오목형 단면 형상의 블랭크 설계를 수행한 결과⁽²⁰⁾와 비교하여 보았다. 실험 및 수치해석을 위한 제품의 형상을 Fig. 13에 나타내었다. 사용된 재료는 자동차 차체 성형용 아연도금 유기피막강판이며, 재료의 성질 및 가공조건은 다음과 같다.

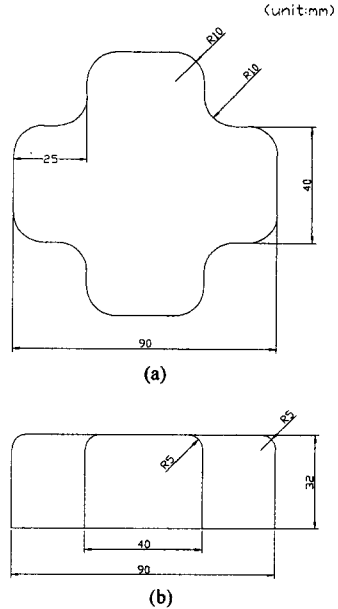


Fig. 13 Geometry of product for deep drawing with reentrant cross section;(a) cross section (b) front view of product

- 응력-변형률 관계 : $\bar{\sigma} = 47.765 \bar{\epsilon}^{0.25}$ (kgf/mm²)
- 초기블랭크 형상 : 사각 블랭크 (75 mm×75 mm)
- 초기 박판두께 : $t_0 = 0.7$ mm
- 마찰계수 : $\mu = 0.1$
- 블랭크 지지력 : 500 kgf

성형 후 높이가 32 mm이고 플랜지의 폭이 제품의 벽면에서 5 mm로 일정한 오목형 단면 형상의 초기블랭크를 결정하고자 하였다. 성형에 사용된 초기블랭크는 가로, 세로의 길이가 각각 75 mm인 사각블랭크이며 SGDOB를 이용하여 블랭크형상을 설계하였다.

Fig. 14는 사각블랭크를 초기블랭크로 사용하여 성형 후 블랭크 외곽선의 위치를 나타내고 있으며, 목표외곽선 밖으로 플랜지가 많이 남아있는 것을 확인할 수 있다. 7회 수정 후에 Fig. 14(b)와 같이 변형된 블랭크 외곽선이 목표외곽선에 거의 근사하는 초기블랭크 형상을 얻어낼 수 있었다. 이때의 편차면적은 105.14 mm²을 나타내었으며, R이 수렴판정값을 만족하는 0.007을 나타내었다. 오목형 단면 형상의 블랭크 설계에서는 설정되어진 목표 외곽선의 폭이 좁고, 첫 번째 성형해석에 사용한 사각블랭크의 성형결과 편차면적이 너무 커서 반복횟수가 많아지게 되었다.

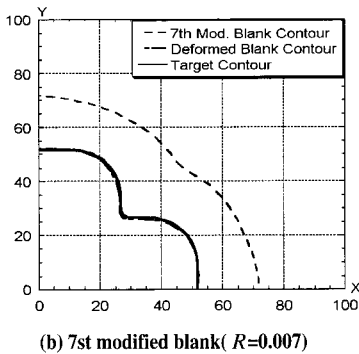
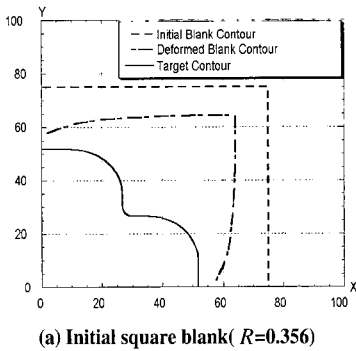


Fig. 14 Comparison between the initial blank contour and the deformed blank contour in deep drawing of reentrant cross section

Table 2 Result of optimum blank design for reentrant cross section

	Blank Area (mm ²)	Difference Area (mm ²)	Max. Punch Load (tonf)	Object Function R
Initial blank	25500	8017.77	5.466	0.356
1st mod. blank	14134	1149.99	3.600	0.081
2nd mod. blank	16900	1886.69	4.721	0.112
3rd mod. blank	14779	648.11	3.802	0.044
4th mod. blank	15702	592.91	4.281	0.038
5th mod. blank	15017	250.90	4.111	0.017
6th mod. blank	15026	179.71	4.147	0.012
7th mod. blank	15020	105.14	4.123	0.007

Fig. 15는 오목형 단면 형상에 대하여 롤백방법을 사용하여 얻어진 초기블랭크 외곽선과 역추적 방법을 사용하여 얻어진 초기블랭크 외곽선을 나타내고 있다. 롤백방법

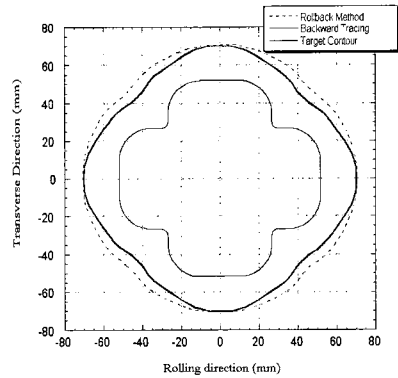


Fig. 15 Comparison of the initial blank contour between the rollback method and the backward tracing scheme⁽²⁹⁾

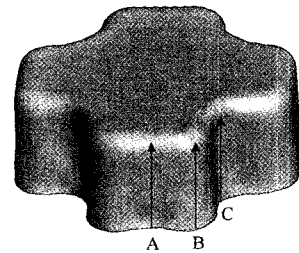
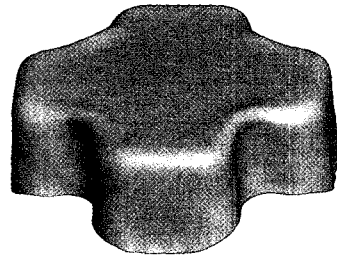


Fig. 16 Comparison of the deformed blank sharpe; (a) simulation result using the backward tracing scheme (b) simulation result using the rollback method

을 사용하여 설계한 최적의 초기블랭크에 대해서는 소재가 금형 공동부 안으로 전부 유입될 때까지 성형하여 높이가 균일한 제품을 얻어내었다.

두 결과를 비교하면 압연방향에 대하여 수직인 방향으로 동일한 결과를 나타낸다. 그러나 대각선 방향으로 역추적 방법으로 설계한 블랭크의 결과가 롤백방법으로 설계한 블랭크에 비하여 약 5.8 mm 정도 작은 값을 나

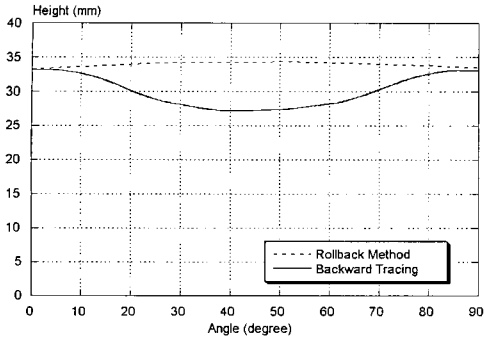


Fig. 17 Comparison of the cup height between the rollback method and the backward tracing scheme

타내고 있다. 이러한 차이는 오목형 단면 형상에서 나타나는 복잡한 변형이력 때문에 발생하는 것으로써, A line과 B line으로는 판재의 플랜지부가 외곽선에 평행한 방향의 압축력 만을 받으면서 유입되나, C line에서는 압축력을 받으며 유입되다가 오목한 형상을 가진 위치에서 다시 인장력을 받으며 다이 공동부 안으로 유입되기 때문이다. 따라서 역추적 기법을 사용한 블랭크의 형상은 이러한 복잡한 변형이력을 고려하지 못함을 알 수 있다. 실제 실험에서는 제품의 높이가 24 mm, 32 mm, 40 mm인 경우에 대하여 초기블랭크 형상을 예측하였는데 성형깊이가 깊어질수록 C line을 따르는 위치에서 오차가 누적되어 균일한 높이를 가지는 제품을 얻어내지 못하였다. 제품의 높이가 32 mm인 경우에 대하여 역추적기법을 이용하여 설계되었던 블랭크의 성형결과와 롤백방법을 이용하여 설계되었던 블랭크의 해석결과를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 17에 성형 후 컵의 높이를 비교하였는데, 롤백방법을 이용한 컵의 높이가 일정함을 알 수 있다.

3.3 L형 단면 형상의 블랭크 설계

변형경로를 따르는 민감도를 구하여 L형 단면 형상의 블랭크 설계를 수행한 결과⁽²¹⁾와 비교하여 보았다. 실험 및 수치해석에 사용된 금형의 형상을 Fig. 18에 나타내었다. 사용된 재료는 냉간 압연강판이며, 재료의 성질 및 가공조건은 다음과 같다.

$$\text{응력-변형률 관계} : \bar{\sigma} = 51.4(0.001 + \bar{\epsilon})^{0.2} \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

초기블랭크 크기 : 지름 120 mm 원형블랭크

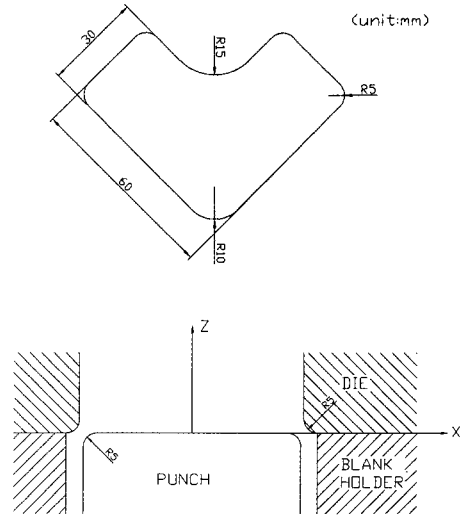


Fig. 18 Geometry description of the tooling for L-shaped cup drawing

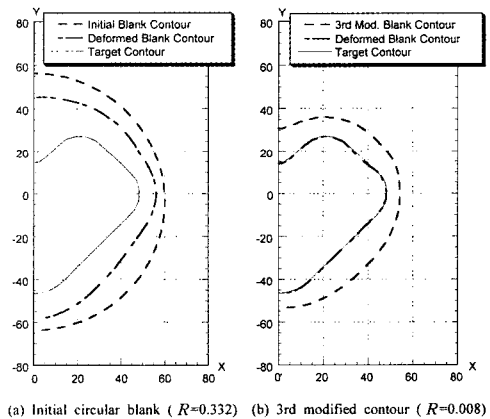


Fig. 19 Comparison between the initial blank contour and the deformed blank contour in deep drawing of L-shaped cup

이방성 계수 : $\bar{R} = 1.377$

초기 박판두께 : $t_0 = 0.76 \text{ mm}$

마찰계수 : $\mu = 0.24$ (punch/sheet),

$\mu = 0.12$ (die & holder/sheet)

블랭크 홀딩력 : 500 kgf

본 연구에서는 성형 후 높이가 20 mm이고 플랜지의 폭이 2 mm로 일정한 L형 단면 형상의 초기블랭크를 결

Table 3 Result of optimum blank design for L-shaped cup drawing

	Blank Area (mm ²)	Difference Area (mm ²)	Max. Punch Load (tonf)	Object Function <i>R</i>
Initial blank	11301	3748.58	4.929	0.332
1st mod. blank	7400	389.51	3.363	0.053
2nd mod. blank	7868	219.63	3.598	0.028
3rd mod. blank	7678	61.09	3.437	0.008

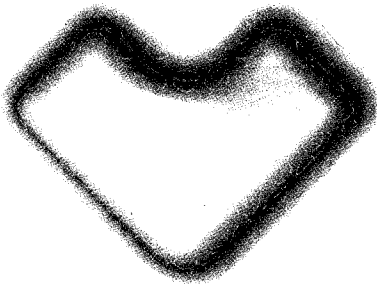


Fig. 20 Simulation result using the rollback method

정하고자 하였다.

Fig. 19(a)는 원형블랭크를 초기블랭크로 사용하여 성형후 블랭크 외곽선 위치를 나타내고 있으며, Fig. 19(b)는 3회 수정된 블랭크의 성형해석 결과를 나타내고 있다. 이때의 편차면적은 61.09 mm²을 나타내고 있으며, *R*은 수렴판정값을 만족하는 0.008을 나타내었다.

손기찬 등은 성형해석을 수행한 후 변형경로를 따라 민감도를 구하여 부족하거나 남는 플랜지의 면적을 가감하는 수식을 제안하였다.⁽²¹⁾ L형 단면 형상에 적용하여 3회 반복 설계한 후 최적의 초기블랭크 형상을 결정하였다. Fig. 20은 롤백방법으로 3회 수정후 설계된 블랭크의 성형 결과를 나타내고 있으며, 제품 외곽에 걸쳐 균일한 플랜지를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 박판성형과정에서 중요한 공정 변수인 초기블랭크 형상을 설계하는 방법을 제안하였다. 변형경로를 고려하여 목표외곽선상의 점을 초기블랭크상의 점으로 되돌이켜 수정된 블랭크의 외곽선을 묘사하는 롤백방법을 사용하여 전문가가 아니더라도 설계 가능하도록 프로그램

을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 롤백 방법을 적용하여 기존 방법들이 가지는 한계를 해결하고 여러가지 공정변수를 고려하여 복잡한 형상에 대해서도 초기블랭크 형상설계가 가능함을 보였다.

(2) 사각컵 형상, 오목형 단면 형상, L형 단면 형상에 대하여 롤백방법을 적용하여, 성형 후 목표외곽선에 성형된 판재의 외곽선을 근사시켜 그 편차를 최소화하는 초기블랭크 형상을 결정하였다. 각각 다른 블랭크 설계방법을 적용한 결과와 비교하여 롤백방법의 타당성을 검증하였다.

(3) 오목한 형상을 가지는 변형경로가 복잡한 제품에 대해서도 초기블랭크 형상을 설계하였으며, 대표적인 초기소재 설계방법인 역추적 방법에 의한 결과보다 향상된 결과를 얻어내었다.

(4) 변형경로 방향으로 민감도를 고려한 면적 가감법과 동일한 횟수의 재설계를 통하여 제품외곽에 걸쳐 균일한 플랜지를 얻어냄을 확인하였다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단(과학기술기초중점연구지원)에 의해 지원된 연구결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (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) H. Iseki and T. 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. Hazek 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) Karima 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, p. 891.
- (7) X. Chen and R. Sowerby, 1992, "The Development of Ideal 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) J.L. Batoz, Y.Q. Guo, P. Duroux, and J.M. Detraux, 1989, "an efficient Algorithm to Estimate the Large Strains in Deep Drawing", NUMIFORM'89, pp. 383~388.
- (11) K. Chung and O. Richmond, 1992, "Ideal Forming-I. Homogeneous Deformation with Minimum Plastic Work", Int. J. Mech. Sci., Vol. 34, No. 7, pp. 575~591.
- (12) C.H. Lee and H. Huh, 1997, "Blank Design and Strain Prediction for Automobile Stamping Parts by an Inverse Finite Element Approach", J. of Mater. Process. Technol., Vol. 63, pp. 645~650.
- (13) S. Kim, M. Park, D. Yang and D. Seo, 1996, "Blank Design for Non-Circular Deep Drawing Process by the Finite Element Method", Proc. of 5th Int. Conf. on Tech. of Plasticity, Vol. 2, pp. 695~698.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 박기철, 김영석, 1992, "경제요소법을 이용한 디이프드로잉 가공의 최적 블랭크 형상 결정", 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회논문집(I), pp. 398~401.
- (17) 박상후, 윤정환, 양동열, 김용환, 이상희, 1997, "이상적 변형이론을 이용한 박판 초기형상 설계에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제4호, pp. 207~218.
- (18) 이충호, 허훈, 1995, "박판급속성형공정에서의 블랭크설계 및 변형률 예측", 대한기계학회 춘계학술대회논문집(I), pp. 451~456.
- (19) 허훈, 한수식, 1994, "개량박막 유한요소법에 의한 두가지 블랭크로부터의 사각컵 딥드로잉 성형해석", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제10호, pp. 2653~2663.
- (20) 박민호, 김상진, 서대교, 1996, "오목형 단면 딥드로잉에서의 성형성", 한국소성가공학회지, 제5권, 제2호, pp. 138~144.
- (21) 손기찬, 심현보, 전성문, 1998, "임의 형상 컵 딥드로잉에서의 최적 blank에 관한 연구", 한국소성가공학회 '98 추계학술대회 논문집, pp. 37~40.