

〈논 문〉

## L형 단면의 딥드로잉 가공에 대한 실험적 연구

김 상 진\* · 양 대 호\*\* · 서 대 교\*\*\*

(1996년 6월 10일 접수)

### Experimental Study on the Deep Drawing Process for L-shape Cross Section

Sang Jin Kim, Dae Ho Yang and Dae Gyo Seo

#### Abstract

Two kinds of blank shapes, optimum and square, are adopted to investigate formability. Optimum blank shape is determined to construct an L-shape cup with uniform height and without flange part. For this purpose, rigid-plastic FEM analysis is applied with backward tracing technique. Maximum cup depth and strain distribution are measured experimentally for the products of the two kinds of blank shapes, which are optimum and square. It is confirmed that deeper cup without severe thickness reduction can be obtained from the optimum shape.

**Key Words :** blank design(소재 형상 설계), L shape section(L형 단면), deep drawing process(딥드로잉 가공), rigid-plastic finite element method(강소성 유한요소법), optimum blank shape(최적 소재형상)

#### 1. 서 론

딥드로잉 가공에서 성형성을 증대시키기 위한 방안은 다각적으로 시도되고 있다. 본 연구에서는 L형상과 같은 비대칭이며, 오목한 면을 갖는 특수한 단면을 대상으로 하여, 이에 대한 소재형상설계가 성형성에 미치는 영향을 주로 고찰하고자 한다. 딥드로잉 가공에서의 소재형상 설계에 관한 연구로는 미끄럼 선 장법을 이용한 해석<sup>(2,3)</sup>, 유한요소법을 이용한 해석<sup>(4~8)</sup> 및 그 밖의 해석 방법 등이 있다. 최근에는 유한요소법을 이용한 소재형상 설계가 각광을 받고 있으나 'L', 'U'형등 오목 모양의 딥드로잉에 관해 해석한 연구는 미끄럼 선장법을 이용하여 소재형상을 설계한 T. Jimma의 연구<sup>(2,3)</sup>가 있었다. 그러나 미끄럼 선장법은 실제의 경우와 달리 두께의 변화를 무시한 평면 변형률 상태로 가정하고 문

제를 해석하므로 마찰, 소재 가압력 등 성형에 영향을 미치는 각종 인자들을 고려하지 못하고 오목 단면 해석이 불가능하다는 단점이 있다. 이로 인해 단면 형상이 복잡할수록 또 성형이 심화될수록 그 오차가 커지게 된다.

컵 딥드로잉은 복잡한 형상을 가진 제품의 드로잉 공정을 이해하는데 있어서 기본이 되는 공정이므로, 그에 따른 연구도 활발히 진행되고 있지만 아직까지도 오목 단면을 가지는 제품의 딥드로잉 가공등 특수한 모양의 경우는 그 연구예가 많지 않다. 본 연구에서는 L형 단면에 대하여 딥드로잉 공정만으로 높이가 균일한 제품을 얻도록 하는 초기 소재형상을 유한요소법을 이용하여 설계하고 실험을 통하여 검증하며 아울러 성형성도 고찰하였다.

#### 2. 이 론

본 연구의 대상인 L형 단면과 같은 경우 단순한

\*성균관 대학교 기계설계학과 대학원

\*\*성균관 대학교 기계설계학과

사각형 블랭크를 성형할 경우 높은 컵을 얻기가 곤란하리라는 것은 예상이 되므로 초기 소재형상이 관심의 대상은 되나 그 이론적 설계법이 용이하지 않다고 사료된다. 즉, 현재까지의 연구에는 Lange<sup>(1)</sup>와 Jimma<sup>(2,3)</sup>가 미끄럼 선장법에 근거하여 제안한 예가 있으나 L형과 같은 오목한 면에 대하여는 미끄럼 선장을 얻는다는 것이 이론상 문제점이 있다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 강소성 유한요소해석법으로 박막요소를 사용하여, 일축 응력-변형률 곡선을 n승 경화 곡선,  $\sigma = C\epsilon^n$ 이 성립하는 것으로 근사화하여 해석하였다. 닥드로잉 공정상 필연적으로 수반되는 굽힘과 되돌림 굽힘응력을 해당요소에 대하여 고려해 주고, 플랜지 부분의 요소에 대하여는 마찰응력을 고려해 줌으로써 박막 요소에서의 취약점을 보완하였다. 그 개요는 다음과 같다. 소성포텐셜로 가정된 범함수(functional)의 변분을 가상 일률의 원리로부터 유도하여 속도 성분의 변분  $\delta v_i$ 의 임의성(arbitrariness)으로부터 구해지는 강성방정식(stiffness equation)은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

$$\frac{\partial \Pi}{\partial v_i} = \sum_{m=1}^M \left( \frac{\partial \Pi}{\partial v_i} \right)_m$$

여기서 m은 요소의 번호이며 M은 요소의 총수이다.

위의 식은 테일러 전개 한 후 일반적인 유한요소 강성방정식의 형태로 아래와 같이 표현된다.

$$K \nabla V = f$$

여기서 K는 강성행렬이라 불리며 f는 절점력벡터의 잔류치이다.

이 식은 절점속도의 항으로 나타낼 수 있으며 요소 수준에서의 해를 구하고 이를 전체에 대해 수합(assemble)하여 문제의 해를 구하였다. 요소 방정식을 요소 수준에서 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial v_i} = \int_V \frac{\sigma}{\epsilon} P_{ij} v_{j,d} dV + \int_V K C_j v_j C_i dV - \int_{S_F} F_j N_j dS$$

편치 벽면으로 유입(drawing)되는 요소에 대하여

여는 다음과 같은 굽힘응력을 고려하였다.<sup>(10,11)</sup>

$$\sigma_B = \left( \frac{t_0}{4\rho} \bar{\sigma} \right) \exp(\mu\theta) + \frac{t_0}{4\rho} \bar{\sigma}$$

여기서  $t_0$ 는 재료의 초기 두께이고  $\rho$ 는 곡률,  $\theta$ 는 다이와의 접촉 각도,  $\mu$ 는 마찰계수이다. 식의 우변의 첫째 항은 굽힘응력이고 둘째 항은 되돌림 굽힘응력이다.

플랜지 영역에서 움직이는 요소들은 모두 소재가 압력과 윤활 상태에 따라 달라지는 마찰 저항을 쿠울름 마찰을 적용하여 다음과 같은 마찰응력을 고려하였다.<sup>(10)</sup>

$$\sigma_f = \frac{2\mu H}{t_0 l}$$

여기서 H는 소재 가압력이며 l은 요소의 단면 길이이다.

### 3. 소재형상 설계

초기 소재형상을 얻기 위하여 Fig. 1(A)와 같은 높이가 균일하며 플랜지 부분이 남지 않은 이상적인 L형 컵을 가정하였다. 이를 (B)와 (C)의 중간 단계를 거쳐서 (D)와 같이 컵을 완전히 펴기까지의 해석 과정을 수행함으로써 (A)와 같은 컵을 얻기 위한 초기 소재형상 (D)를 얻는 방법으로 소재형상 설계를 하였다. 이와 같이 완성된 제품으로부터 제품을 역으로 펴나가는 방법을 취하였다.<sup>(9,12)</sup>

(A) State 1은 계산시 입력 형태인 이상적인 완제품 형상을 도시한 것이며 일정한 간격으로 요소분할되어 있다. 빗금친 요소는 성형시 마지막으로 유입된 부분이며 유입되기 직전의 위치를 (B) State 2에 나타내었다. (C) State 3은 (B)의 전(前) 단계로 요소가 플랜지 내에서 이동하므로 소재 가압력에 의한 마찰 저항력만이 작용하는 것으로 보았다. (D) State 4는 위의 과정을 거쳐 얻은 초기 소재형상을 도시한 것이다.

계산에 사용한 입력 데이터 값은 Table 1과 같다.

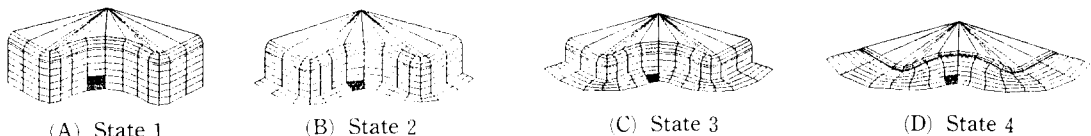
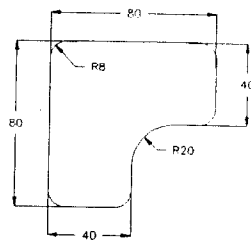


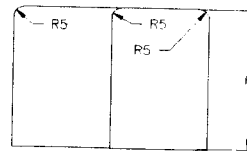
Fig. 1 Movement of marked element

**Table 1** Input data for calculation

|                       |                                 |                              |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Material conditions   | plastic coefficient (C)         | 50.81 (kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|                       | strain hardening exponent (n)   | 0.25                         |
|                       | thickness (t)                   | 0.7 (mm)                     |
| Frictional conditions | blank holding force (B. H. F.)  | 500 (kgf)                    |
|                       | friction coefficient ( $\mu$ )  | 0.18                         |
| Geometric conditions  | die profile radius (Rd)         | 5 (mm)                       |
|                       | clearance between die and punch | 1.7 (mm)                     |

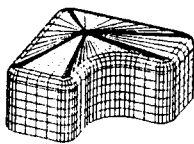


(a) Cross section of punch

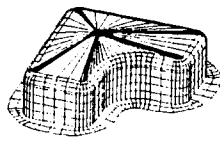


(b) Front view of punch

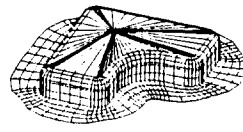
**Fig. 2** Geometry of punch for deep drawing process



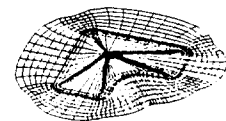
(a) H=30mm



(b) H=20mm



(c) H=10mm

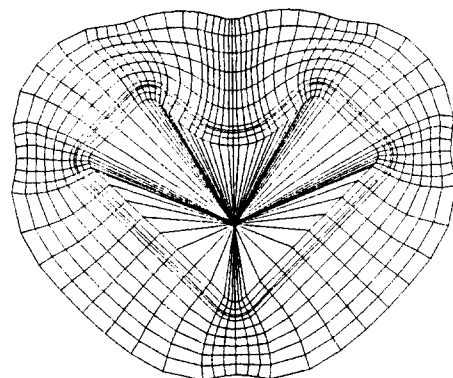


(d) H=0mm

**Fig. 3** Calculation of blank shape for deep drawing process (H=30mm)

단면을 잘랐을 때 오목한 모양이 들어가 있는 제품의 종류는 매우 다양할 것이다. 그 중에서 산업체의 프레스 성형 대상으로 비교적 자주 등장할 뿐만 아니라, 단면 형상이 비대칭이며, 오목한 면을 갖는다는 특수성 때문에 L형 모양을 택하였다. Fig. 2에 L형 단면 딥드로잉에 사용한 펀치의 기하학적 형상을 도시하였다. L형 단면의 경우에 컵의 높이를 H=25mm 부터 5mm씩 증가시켜 가며 소재형상을 설계하였다. Fig. 3에서는 H=30mm인 오목단면을 가지는 제품의 소재형상이 결정되는 중간 단계를 보여주고 있다. Fig. 4에서는 제품의 높이가 H=30mm일 때 계산을 수행한 결과 얻은 최초의 소재형상을 나타내었다. 구한 초기 소재형상에서 오목 들어간 부분에서의 소재가 유입되는 경로를 볼 수 있다. 이 결과를 십자형 단면 딥드로잉의 경우<sup>(13)</sup>와 비교하면, 그 1/4에 해당하는 단면이

L형이므로, L형 단면의 단면 및 오목한 부분에 대응되는 소재형상을 대칭으로 취하면, 십자형 단면에 대한 소재형상의 윤곽은 예측할 수 있음을 알



**Fig. 4** Calculated blank shape for deep drawing process (H=30mm)

수 있다. 그러나 장변에 대응되는 부분의 소재형상은 십자형의 경우로 부터는 예측이 불가능하므로 본 연구의 수행을 필요로 한다.

### 4. 실험

실험에 사용한 장치는 만능 시험기에 덮드로잉 실험장치를 설계 제작하여 사용하였으며, 실험중 소재가압력(blank holding force)을 임의로 조절할 수 있도록 유압펌프를 부착하였다. 사용한 재료는 자동차 차체 성형용으로 많이 쓰이는 아연 도금 유기피막강판(SPC 3J-3J/3J)을 사용하였다. 실험 중 윤활제는 사용하지 않았다. 성형성의 비교 고찰을 위하여 본 연구에서는 이론적으로 얻은 소재형상과 이에 외접하는 정사각형 소재형상 두 가지를 선택하여 성형성을 실험하였다. 먼저 성형한계를 비교하기 위하여 컵 높이를 25 mm에서 부터 5 mm씩 증가시키며 실험을 하였으며, 제품의 강도를 고찰하기 위하여 성형된 컵의 두께분포를 측정하여 비교하였다. Fig. 5는 실험에 사용한 두 가지의 소재형상을 취하는 방법과 모양을 보여준다. L형 단면

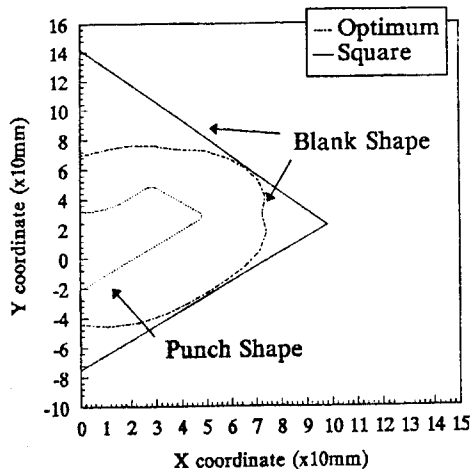


Fig. 5 Comparison of optimum and square blank shape

Table 2 Comparison of formability for two blank shapes

| Blank shape | H=25mm | H=30mm | H=35mm   |
|-------------|--------|--------|----------|
| Optimum     | 25mm   | 30mm   | 35mm     |
| Rectangular | 25mm   | 30mm   | fracture |

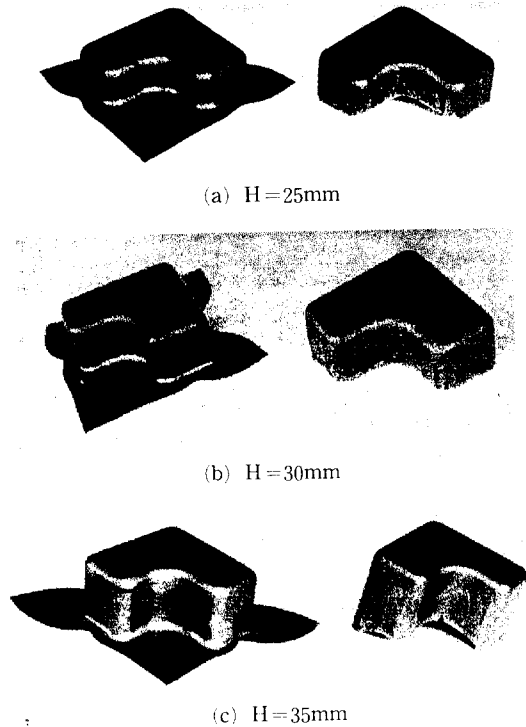


Fig. 6 Experimental results from optimum and square blanks

중 두번의 길이가 같은 경우를 선택하였으므로 사각형 소재형상은 계산된 소재형상의 대칭성 때문에 정사각형이 되었다.

Table 2은 두 가지 소재형상으로 성형할 수 있는 컵 높이의 한계를 비교한 것이다.

Fig. 6은 성형한 제품을 보여준다. 컵 높이가 25 mm와 30 mm에서는 두 가지 소재형상으로 모두 성형이 되었으나 사각형 소재의 경우는 플랜지(flange) 부분이 남게 된다. 따라서 제품의 두께분포에서 두께감소가 클것이 예상되어 두께분포도 측정하여 비교하였다.

### 5. 실험 결과

성형한 제품의 두께분포를 고찰하였다. 두께분포에서 취약한 부분은 모서리 부분이 될 것이 예상되므로 Fig. 7과 같이 세 가지 방향을 선택하여 측정하였다. 제품의 끝부분부터 3 mm간격으로 측정하여 강체라고 가정된 컵의 뚜껑까지 측정하였다. 오목 들어간 방향(A-line)과 모서리 방향(B-line),

그리고 또 다른 모서리 방향(C-line)을 측정하였다.

Fig. 8은 최적 소재형상으로 성형한 제품의 높이가 H=30 mm일 때의 측정 방향에 대한 두께 변형률분포이다. A-line은 비교적 완만하게 나타났으며, 가장 취약한 요소는 B-line상에 있으며 측정방향을 따라 거리가 약 24 mm 되는 부분이며, 펀치의 형상반경 주변의 위치이다. Fig. 9는 정사각모양 소재형상으로 성형한 제품의 높이가 H=30 mm일 때의 각 방향의 두께 변형률분포를 나타내고 있다. 이때는 C-line에 대한 두께분포가 비교적 완만하며 두께감소가 심한것은 역시 B-line을 따라서 나타났다. 가장 취약한 부분은 A-line의 제품 끝부분으로서 성형의 종료시점까지 플랜지가 소재가압력을 받고 있는데 기인한다고 볼 수 있다. 사각모양 소재형상으로 성형할 때 플랜지와 제품 사이가

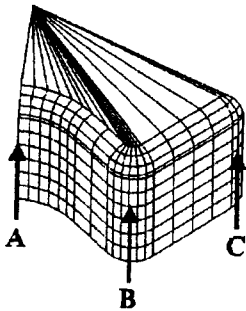


Fig. 7 Thickness measuring direction of product

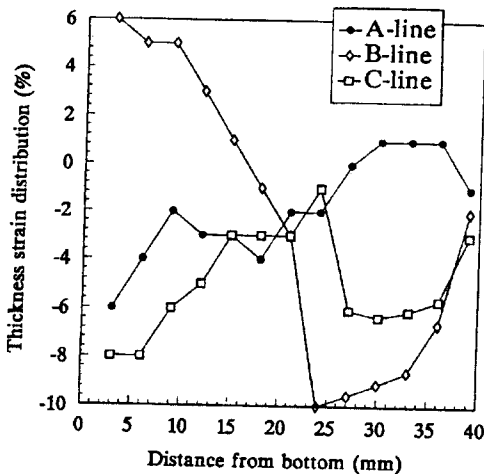


Fig. 8 Thickness strain distribution for optimum blank (H=30 mm)

파단될 가능성이 많음을 알 수 있다. 그러나 컵의 높이를 35 mm로 증가시켰을 때는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 B-line 상에서 파단되었다. 이는 Fig. 9에서의 최소두께요소는 A-line상에 있으나 컵의 높이를 증가시킬수록 B-line상의 최소두께요소의 두께 감소가 급격히 심하여져 파단에 이르고 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 10~Fig. 12는 세 방향으로의 두께분포를 두 가지 소재형상으로 높이 30 mm로 성형한 제품에 대하여 비교한 것을 보여준다. 여기서 계산결과는 제안된 최적소재형상에 대한 것이다. Fig. 10은 두께 감소가 가장 심한 요소가 펀치의 형상반경 근방임

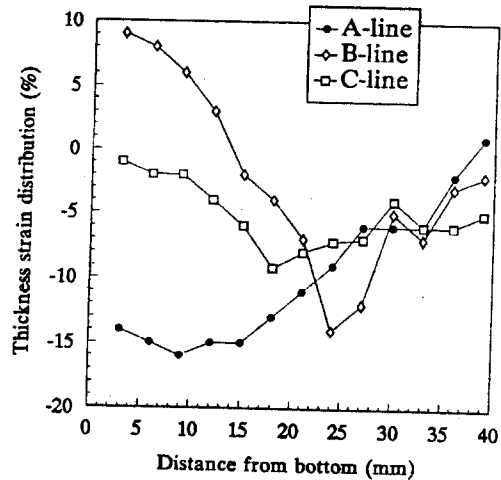


Fig. 9 Thickness strain distribution for square blank (H=30mm)

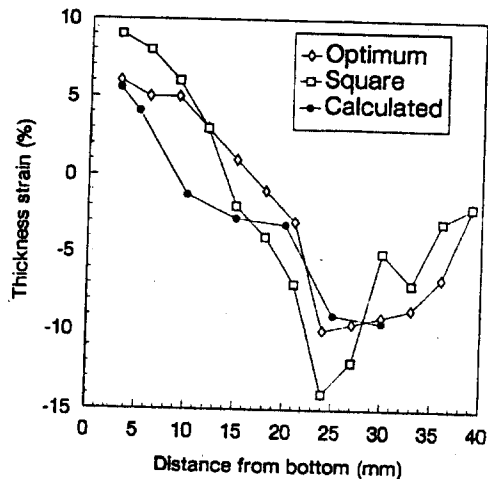


Fig. 10 Thickness strain distribution along B-line (H=30mm)

을 보여주고 있으며, 사각형 소재인 경우가 두께감소가 더 큼을 보여주고 있다. 또한 이러한 두께분포에 대한 근사적인 예측도 가능함을 계산 결과가 보여주고 있다. Fig. 11은 C-line에 대한 두께분포이며, 최소 두께인 요소의 위치가 소재형상에 따라 같지 않음을 알 수 있으며, 사각형 소재인 경우가 더 취약함을 알 수 있다. Fig. 12는 두 가지 소재형상에 대하여 A-line을 따라서 측정된 것이며, 사각형 소재형상인 경우가 훨씬 취약하며, 두께 변화도 매우 심하게 나타나고 있다. 이상에서 오목한 면이 있는 단면의 경우 초기소재형상을 적절히 설

계하여 성형함으로써 성형한계의 향상과 제품의 강도향상에 도움이 될 수 있음이 고찰되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 강소성유한요소법을 이용하여 L형 단면을 갖는 뒷드로잉 제품의 최적 소재형상을 설계하였다. 이러한 최적 소재형상과 이에 외접하는 정사각형의 소재형상을 이용하여 성형 실험을 함으로써, 성형한계와 두께 변형률분포를 측정, 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) L형 단면에서 성형성의 향상을 얻을 수 있는 최적의 소재형상을 제안하였다.
- (2) 제안된 소재형상은 관용적인 정사각형 소재형상과의 비교실험에서 더 큰 성형높이, 보다 완만한 두께분포 및 더 적은 두께감소등의 이점이 있음을 확인하였다.
- (3) 수치해석으로 예상된 두께 변형률분포는 전체적으로 세밀한 부분까지 예측은 불가능하였지만 그 경향이나 최소 두께요소의 위치 등의 예상은 가능하였다.

## 후기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- (1) H. Gloeckl, K. Lange, 1983, "Computer aided design of blanks for deep drawn irregular shaped components", Proc. 11th NAMRC. 243
- (2) T. Jimma, TKuwabara, S. C. Choi, 1984, "Researches on the deep drawing of reentrant contour shaell", Advanced Technology of Plasticity, Vol 11., pp. 1091~1096
- (3) T. Jimma, T. Kuwabara, 1985, "Deep Drawing of Cup with Re-entrant contour", Journal of the JSTP, Vol. 26., pp. 1195~1202
- (4) H. J. Kim, 1990, "Rigid-plastic finite element analysis of sheet metal forming considering planar anisotropy", Ph. D. Thesis, Seoul Univ.
- (5) H. Y. Jiang, D. Lee, 1992, "Numerical simula-

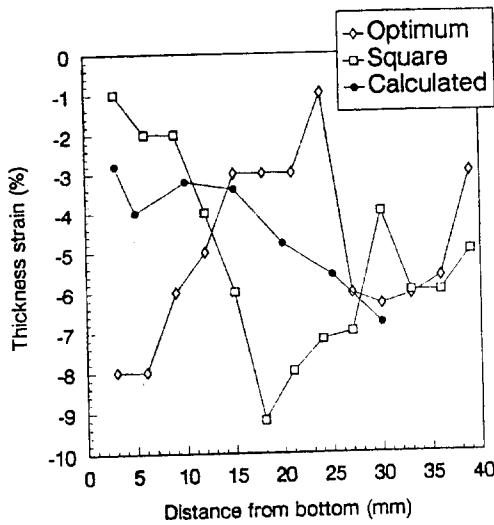


Fig. 11 Thickness strain distribution along C-line (H = 30mm)

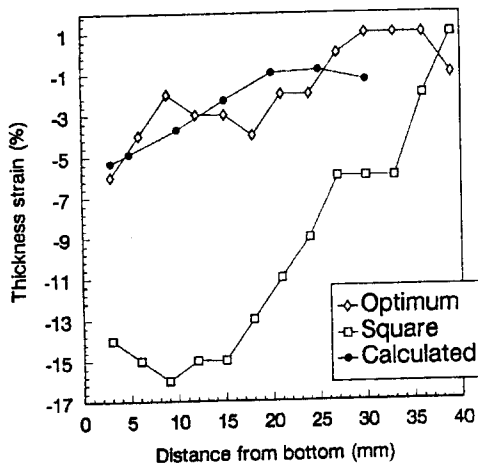


Fig. 12 Thickness strain distribution along A-line (H = 30mm)

- tion of sheet metal forming process based on large deformation shell elements”, NUMIFORM'92, pp. 485~489
- (6) E. Nakamach, 1992, “Anisotropic elastic-plastic finite element simulation of 3-D sheet forming process”, NUMIFORM '92, pp. 509~514
- (7) S. A. Majlessi, D. Lee, 1993, “Deep drawing of square-shaped sheet metal parts, Part 1: Finite Element Analysis”, Trans. ASME, vol. 116, pp. 102~115
- (8) Toshihiko Kuwabara, Hiroyuki Ichikawa, 1993, “A method for determining optimum blank shapes for convex polygonal cups by the combined use of slip-line field theory and rigid-plastic finite element method”, Advanced Tech. of Plasticity 1993, pp. 1679~1684
- (9) S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, 1989, “Metal forming and Finite element Method”, Oxford Univ. Press, New York
- (10) 전기찬, 1993, “박판금속의 성형(이론과 실제)”, 반도출판사, pp. 313~323
- (11) 김동원, 1995, “소성학”, 청문각, pp. 163~167
- (12) 김상도, 박민호, 서대교, 1995, “유한요소법을 이용한 임의의 단면 딥드로잉 제품의 소재 형상 설계”, 한국소성가공학회지, 제4권 제4호 12월호, pp. 302~321
- (13) 박민호, 김상진, 서대교, 1996, “오목형 단면 딥드로잉에서의 성형성”, 한국소성가공학회지, 제5권 제2호 6월호, pp. 138~144