

〈論 文〉

유한요소법을 이용한 임의의 단면 딥드로잉 제품의 소재형상설계

김상도* · 박민호* · 서대교**

(1995년 4월 8일 접수)

Blank Design for the General Shaped Deep Drawing Products by F.E.M

Sang Do Kim, Min Ho Park and Dae Gyo Seo

Abstract

A method of determining an optimum blank shape for the non-circular deep drawing process is investigated. The rigid-plastic finite element method is introduced and the computer program code is developed. The ideal shape of a drawn cup with uniform wall height is assumed and metal flow is traced backward step by step to predict an initial blank shape of the ideal cup. For examples of the non-circular deep drawing products, three cases of drawn cup with quadrilateral punch shape are considered and optimum blank shapes for each case are proposed and compared with experimental results.

Key Words : Blank Design(소재형상 설계), Non-Circular(비원형 단면), Deep Drawing Process(딥드로잉 가공), Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Backward Tracing(역추적 기법)

1. 서 론

딥드로잉 가공은 박판금속을 이용한 프레스 가공중에서도 공정이 단순하고 대량생산이 가능하므로 자동차, 선박, 항공기 산업등에 광범위하게 쓰이고 있다. 이제까지 딥드로잉 가공에 대한 이론적, 실험적 연구가 많이 있었으며 특히 축회전 대칭인 원

형 단면에 대한 해석은 광범위한 범위에 걸쳐 많은 발전이 있었다. 그러나 실제로는 원형 단면 보다 비원형 단면을 가지는 경우가 훨씬 더 많으며 비원형 단면에 대한 해석은 아직 부족한 실정으로 산업현장에서 제품을 생산하는데 유용한 가공조건과 피가공물의 형상 및 크기 등을 모두 예측한다는 것은 어려운 일이다.

비원형 단면 딥드로잉 가공에서 성형성에 가장 큰 영향을 미치는 인자의 하나로 소재의 형상을 들 수 있다. 적절한 소재형상을 택함으로써 공정을 단순화 시킬 수 있

*성균관대학교 기계설계학과 대학원

**성균관대학교 기계설계학과

고 성형성을 증대시킬 수 있으며 또한 가공 후 다듬질 공정에서의 재료 및 시간등의 소모를 크게 줄일 수 있다. 원형 단면의 경우 그 소재형상 역시 원형으로 상사성을 보이거나 비원형 단면의 경우는 적절한 소재형상을 예측하기가 무척 어렵다.

디프드로잉 가공에서의 소재형상 설계에 관한 연구로는 미끄럼선장법을 이용한 해석(1,2,3), 기하학적 해석, 유체 근사법, 전기장 근사법과 경험적인 해석 방법 및 그 밖의 해석 방법(4,5) 등이 있다. 이러한 연구들은 대부분 두께의 변형을 무시한 평면 변형률을 가정하므로 실제의 변형과는 크게 차이가 있다. 따라서 이들의 해석 방법으로 설계한 소재형상으로 성형한 결과 귀가 생기는 현상이 발생하며 변형이 심할 수록 그 귀도 커지는 것으로 알려져 있다.

근래에는 계산기의 발달과 더불어 대용량의 컴퓨터를 이용한 유한요소해석(6~12)이 크게 발전하였으며 유한요소법을 이용한 소재형상 설계에 관한 연구(6,8,9,13,15)도 많이 발표되고 있다. 유한요소법을 이용한 소재형상 설계의 주된 장점으로는 실제 성형에 영향을 미치는 마찰, 소재 가압력등 많은 인자들을 고려할 수 있으며 따라서 더욱 근사한 변형특성을 알 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 비원형 단면 디프드로잉 가공에서의 소재형상 설계에 강소성 유한요소법을 이용하였다. 또한 종래의 소재형상 설계방법과 달리 가정된 이상적인 제품으로부터 초기의 소재형상을 찾아가는 역추적 기법을 사용하였다.

개발한 소재형상 설계 프로그램의 유용성을 보이기 위해 몇 가지 비원형 단면의 경우를 예를 들어 해석해 보았고 그 최적 소재형상을 제안했다. 또, 이론적으로 해석한 결과의 타당성을 입증하기 위해 실험을 수행했으며 역추적 시뮬레이션을 통해 성형에 영향을 미치는 몇몇 인자들의 영향을 고찰해 보았다.

2. 소재형상 설계

소재형상 설계의 목적은 한번의 공정으로 되도록 귀가 없고 높이가 균일한 이상적인 제품을 얻도록 하는 것이다. 본 연구에서는 높이가 균일한 이상적인 최종제품을 가정하고 이러한 제품을 얻기 위한 재료가 거치게 되는 경로를 역으로 추적하여 최적 소재형상을 찾도록 하는 역추적 기법을 사용하였다. 이러한 소재의 원형 설계에 강소성 유한요소법을 이용하였으며 임의의 단면 형상에 대한 소재형상을 설계할 수 있는 프로그램 코드를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램은 최종제품의 높이를 입력값으로 하며 가공시에 영향을 미치는 마찰, 플랭크 가압력, 가공여유 등을 모두 고려할 수 있도록 하였다. 역추적 기법의 장점은 소재형상 뿐 아니라 성형의 중간단계 까지도 비교적 정확하게 예측할 수 있다는 것이다. 즉, 플랜지부의 모양도 예측할 수 있으며 임의의 플랜지 형상을 가지는 컵의 소재형상도 설계할 수 있다. 또한 성형의 각 단계에서의 펀치력과 변형률 분포도 얻을 수 있다.

2.1 디프드로잉 성형 모델

Fig. 1 은 디프드로잉 성형의 초기 단계를 도시한 것이다. 플랜지 부분의 재료는 평면응력 상태로 가정할 수 있으며 펀치가 진행함에 따라 마찰에 의한 변형이 일어날 것이다. 재료가 다이 모서리를 지나면서 굽힘과 되돌림 굽힘을 받게 되며 유입된 후 벽면에서는 더 이상의 변형이 없이 펀치와 같은 속도로 진행하게 될 것이다. 따라서 소재형상은 주로 플랜지에서의 마찰에 의한 변형과 굽힘에 의한 변형에 의존한다고 볼 수 있다. 그림에서 A 영역은 성형의 초기에 펀치가 진행함에 따라 순수한 인장변형만을 한다고 보았으며 이때 플랜지에서 재료의 유입은 없다고 본다. 따라서 이 부분은 소

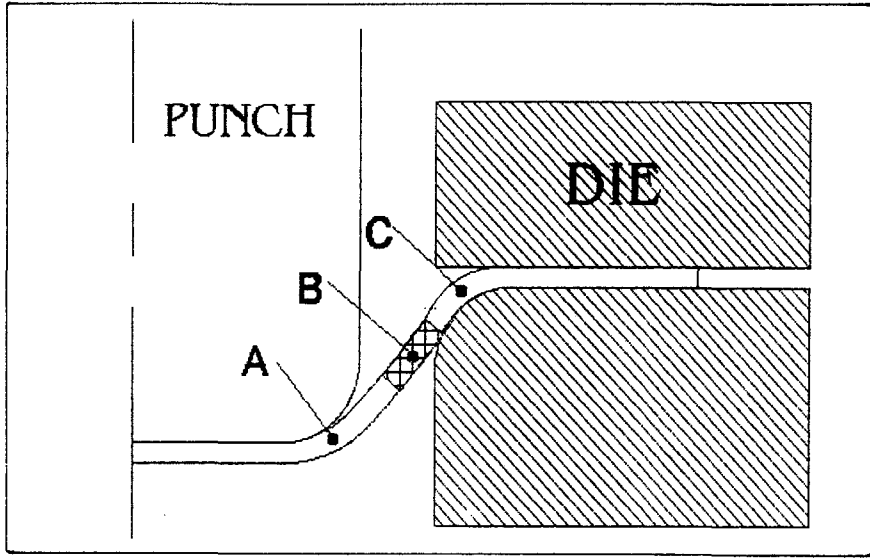


Fig. 1 Illustration of deep drawing process

재형상 설계에서 제외된다. 그림의 B 영역은 펀치와 다이 사이의 가공여유(clearance) 부분이며 펀치가 진행할 때 변형은 일어나지 않는다고 볼 수 있으나 성형 후 컵의 벽면에 위치하므로 소재형상 설계시 반드시 포함시켜야 할 부분이다. 실제로 변형이 생기는 플랜지 부분은 C 영역이 된다. 재료는 등방성을 간주하며 n승 경화특성을 가진다고 가정하였다.

2.2 강소성 유한요소 방정식의 구성

박판금속의 성형은 변형하는 재료의 폭에 비해 두께가 상대적으로 매우 작으므로 평면응력 문제로 생각하였으며 4개의 절점을 가지는 사변형 박막요소를 사용하였다. 요소 방정식은 소성포텐셜로 가정된 범함수의 변분으로 가상일률의 원리로 부터 유도되어 다음과 같이 표현된다(14).

$$\delta\Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon} v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0$$

(K : 벌칙상수,

$\dot{\epsilon}_v$: 체적변형률속도, F_i : 표면력)

유한요소 이산화과정에서는 절점속도 v와 그 변분 δv 로 위의 식을 표현하게 된다. 속도 성분의 변분 δv_i 의 임의성(arbitrariness)으로부터 구해지는 강성방정식(stiffness equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial v_i} = \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial \Pi}{\partial v} \right)_m, \quad M = \text{요소의 총수}$$

선형화시키기 위해 먼저 초기에 가정된 근사해 $v = v_0$ 에서 테일러 전개(Taylor expansion)한 후 일차항만을 취하면

$$\left[\frac{\partial \Pi}{\partial v_i} \right]_{v=v_0} + \left[\frac{\partial^2 \Pi}{\partial v_i \partial v_j} \right]_{v=v_0} \nabla v_j = 0$$

$$K \nabla V = f$$

평면응력 상태에서의 변형률 속도항은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_x \\ \dot{\epsilon}_y \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \end{Bmatrix} = Bv$$

여기서 변형률 속도 행렬 B는

$$B = \begin{bmatrix} X_1 & 0 & X_2 & 0 & \dots \\ 0 & Y_1 & 0 & Y_2 & \dots \\ Y_1 & X_1 & Y_2 & X_2 & \dots \end{bmatrix}$$

$$X_a = \frac{\partial q_a}{\partial x}, \quad Y_a = \frac{\partial q_a}{\partial y}$$

(q_a : α 번째 노드에서의 형상함수)

또 상당변형률속도는

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \{ \dot{\epsilon}_{ij} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \}^{\frac{1}{2}}$$

로부터

$$(\dot{\bar{\epsilon}})^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{v}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

요소 수준에서의 해를 구하고 이를 전체에 대해 수합(assembly)하여 문제의 해를 구한다. 요소 방정식을 요소수준에서 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

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

또 Π 의 2차 미분항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Pi}{\partial v_i \partial v_j} &= \int_V \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} P_{ij} dV + \\ &\int_V \left(\frac{1}{\dot{\bar{\epsilon}}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}} - \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}^2} \right) \\ &\frac{1}{\dot{\bar{\epsilon}}} P_{ik} v_k v_m P_{mj} dV \\ &+ \int_V K C_j C_i dV \end{aligned}$$

Π 의 1차 미분항은 강성방정식의 절점력의 항 f와 같고 Π 의 2차 미분항은 강성행렬 \mathbf{K} 를 나타내는 식이 된다. 또, 플랜지에서 컵 벽면으로 성형될 때 재료가 받게 되는 굽힘에 의한 응력은 다음과 같이 표현된다(16, 17).

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

여기서

t_0 : 초기두께, θ : 다이접촉각도,

ρ : 다이모서리반경, μ : 마찰계수

윗식의 우변의 첫째 항은 벨트 식을 이용한 굽힘응력이고 둘째 항은 되돌림 굽힘응력이다. 또 다음과 같은 마찰응력을 생각하여 요소의 절점값으로 대입하였다(15).

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

(H : 소재가압력, l : 요소의 단면길이)

굽힘응력은 변형의 각 단계에서 플랜지에서 유입되는 요소에 대해 절점값으로 대입하였고 마찰응력은 플랜지부에 있는 모든 요소의 절점에 대해 속도 벡터의 반대 방향으로 적용하였다. 즉 마찰응력에 의한 마찰력을 F 라 하고 X , Y 방향 속도벡터를 각각 V_x , V_y 라 하면 마찰 응력의 X , Y 성분은 다음과 같다.

$$F_x = -\frac{F V_x}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}$$

$$F_y = -\frac{F V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}}$$

2.3 소재형상 설계법(역추적 기법)

Fig. 2는 원통컵의 소재형상을 추적하는 모습을 나타낸 그림으로 그 1/4 만을 도시한 것이다. 컵의 바닥은 강체로 보았으므로 해석에서는 제외되었다. 먼저 (a) state 1은 완성된 이상적인 제품형상을 도시한 것이며 일정한 간격으로 요소 분할 되어있다. 빗금친 요소 A는 성형시 마지막으로 유입된 부분이며 유입되기 직전의 위치를 (b) state 2에 나타내었다. (b)에서 (a)로 성형될 때 컵 벽면의 법선 방향을 따라 초기 속도 벡터가 작용한다고 가정하였는데 이것은 펀치의 진행 방향이 플랜지에 대해 수직 방향이기 때문이다. 또 이때 플랜지에서 굽힘과 되돌림 굽힘에 의한 저항력이 속

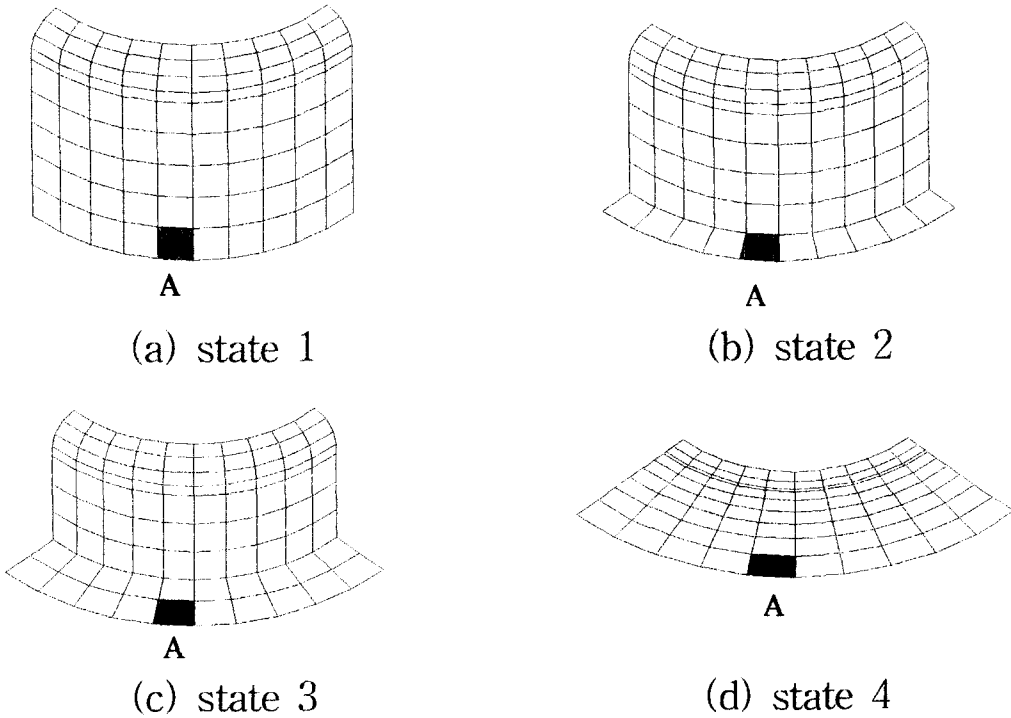


Fig. 2 Movement of marked element

도 벡터의 반대 방향으로 작용하며 소재 가압력에 의한 마찰 저항력도 작용한다고 본다. 따라서 이와같은 재료의 유동과정을 반대로 적용하면 (b) state 2 에서의 소재의 위치가 결정되어진다.

(c) state 3 는 (b) 의 전(前) 단계로 요소 A가 플랜지 내에서 이동하므로 속도 벡터는 알려져 있지 않고 절점력도 소재 가압력에 의한 마찰 저항력만이 작용한다. (d) state 4 는 위의 과정을 거쳐 얻은 초기 소재형상을 도시한 것이다. 주목할 점은 테두리 부분에서 안쪽으로 갈수록 요소의 크기가 작게 나타나 있으나 컵 벽면에 대응시키면 (a) 에서 보듯이 모두 같은 크기를 가진다. 즉 이것은 성형시 컵의 모서리 부분 벽면에서 심한 변형이 생기며 초기 소재의 두께는 일정하므로 체적 일정의 법칙으로 부터 모서리 부분 벽면의 두께가 얇아진다는 것을 알 수 있다.

컵의 모서리 부분을 제외한 벽면의 맨윗

줄 요소열은 펀치와 다이 사이의 가공여유에 의한 부분이며 변형이 거의 없으므로 두께 변화도 거의 없다.

3. 이론적 계산 결과

본 연구에서 개발한 유한요소 프로그램은 컵의 높이를 입력 값으로 하여 입력된 높이의 등고형 컵을 얻기 위한 소재 형상을 설계한다. 계산 수행시 고려된 입력 데이터로는 소재 가압력(BHF), 마찰계수, 소성계수, 가공경화지수, 다이 모서리 반경(Rd), 펀치 모서리 반경(Rp), 소재 두께(t0), 가공여유(CLR) 등이 있으며 Table 1. 에 입력 데이터 값을 보였다.

마찰계수와 소재 가압력이 소재형상 설계에 가장 큰 영향을 미치며 그 값이 클 수록 성형비(drawing ratio)가 작게 나타난다.

Fig. 3 에 실험장치의 기하학적 형상을 보였다.

Table 1 INPUT DATA

| BHF (kgf) | frictional coefficient μ | plastic coefficient C (kgf/mm ²) | strain hardening exponent n | die profile radius (mm) | thickness of sheet (mm) |
|-----------|------------------------------|--|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 500 | 0.1 | 47.765 | 0.25 | 5 | 0.7 |

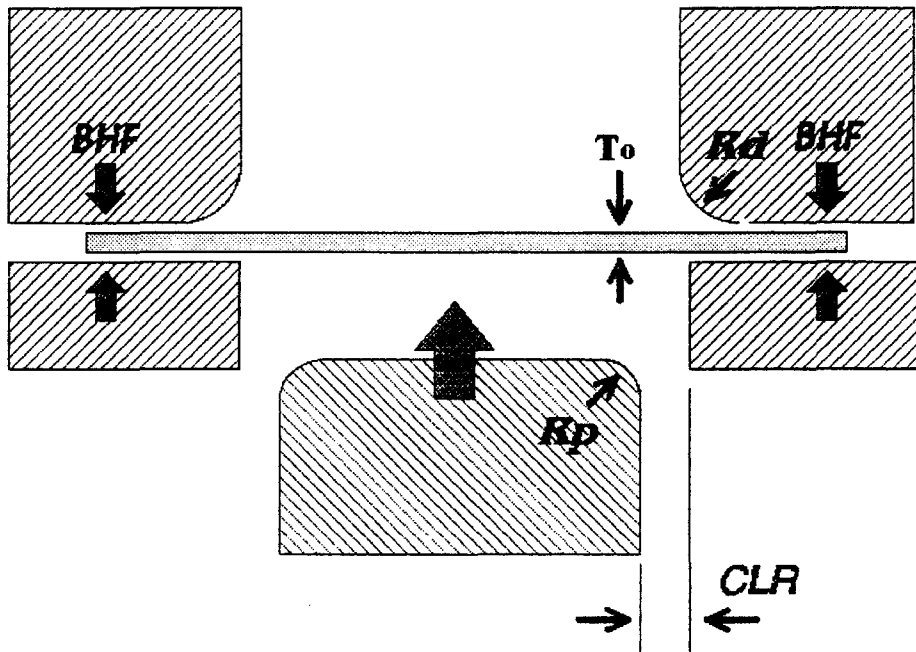


Fig. 3 The geometry of tools in deep drawing process

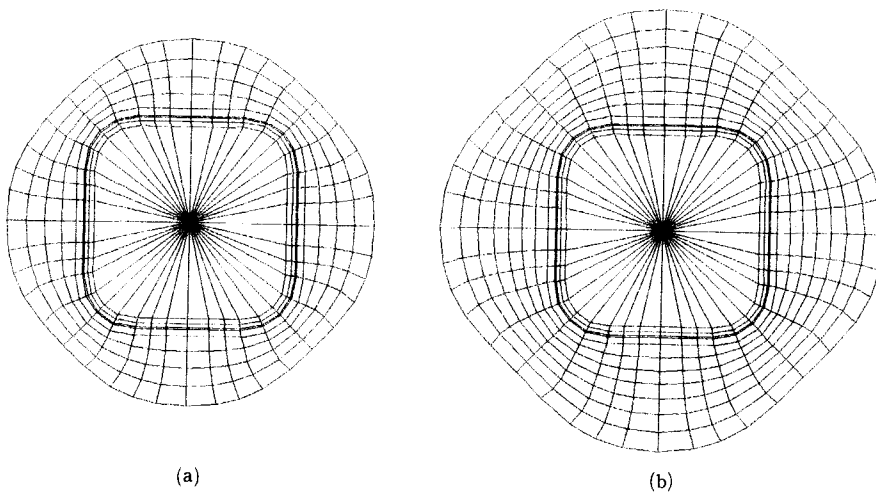
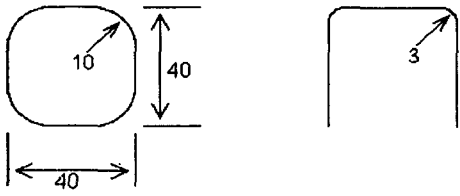
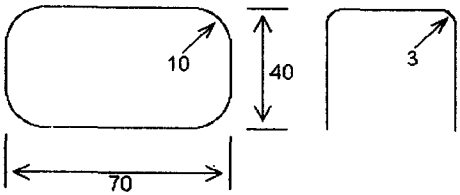
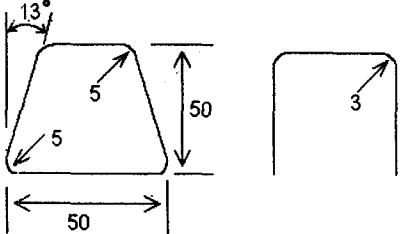


Fig. 4 Blank shapes for Case 1

Table 2 The selected punch shapes

| Case of section | Geometric shape (UNIT:mm) |
|--------------------------------|--|
| <p>Case 1. Square</p> |  |
| <p>Case 2. Rectangular</p> |  |
| <p>Case 3. Trapezoid</p> |  |

정사각형 (Case 1.), 직사각형 (Case 2.) 및 사다리꼴 단면 (Case 3.)의 펀치 형상을 가지는 경우에 대해 소재형상을 구하였으며 각각의 기하학적 형상을 Table 2. 에 도시하였다.

3.1 유한요소법을 이용한 소재형상 설계

Fig. 4 는 Case 1.에 대해 컵의 높이(H)가 각각 18mm, 30mm 일때 계산을 수행한 결과 얻은 소재형상을 나타내고 있다.

Fig. 5 는 Case 1.에 대해 각각 높이가 18 mm, 30mm 일때의 소재형상을 비교한 것이며 대칭성으로 인해 그 1/4 만 도시한 것

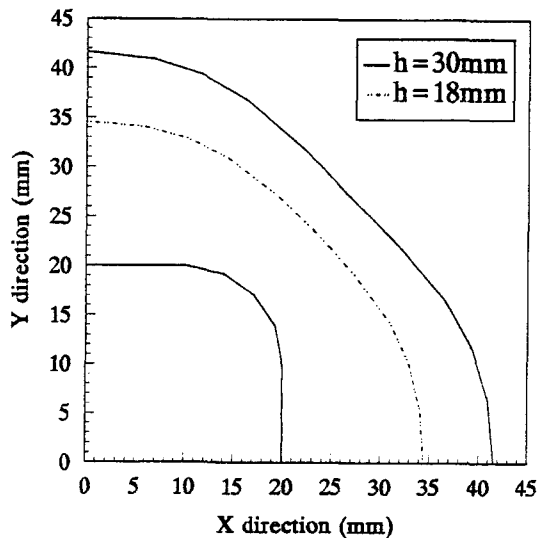


Fig. 5 Comparison of blank shape for Case 1

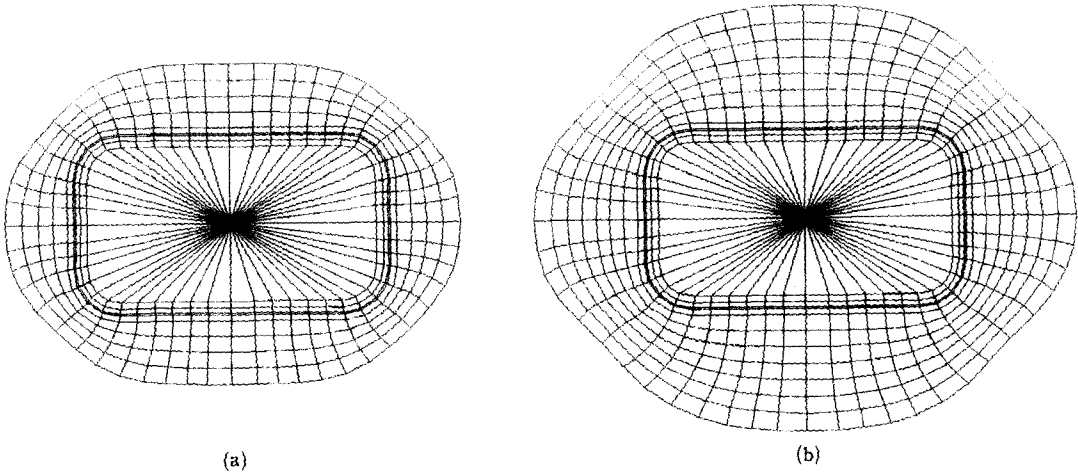


Fig. 6 Blank shapes for Case 2

이다. 펀치 벽면에서 변과 모서리까지의 거리를 비교해 보면 각각 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 변과 모서리 부분에서의 유동속도가 다르기 때문이며 따라서 제품의 높이에 따라 그 소재형상도 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 는 Case 2.에 대해 컵의 높이가 각각 18mm, 30mm 일때 계산을 수행한 결과 얻은 소재형상을 나타내고 있다. 코너 부분에서 압축이 일어나며 한계 성형비에 가까

울 수록 골목이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 7 은 Case 2. 에 대해 컵의 높이가 각각 18mm, 30mm 일때의 소재형상을 비교한 것이며 역시 대칭성으로 인해 그 1/4 만 도시하였다. 펀치 벽면과 모서리까지의 거리가 다를 뿐 아니라 장변과 단변에서의 거리도 다름을 알 수 있다. 따라서 단면 형상 변화에 따라 소재형상도 모두 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 8 는 Case 3. 에 대해 컵의 높이가 각각 15mm, 24mm 일때 계산을 수행한 결과 얻은 소재형상을 나타내고 있다. 장변과 단변의 소재형상의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9 는 Case 3. 에 대해 컵의 높이가 각각 15mm, 24mm 일때의 소재형상을 비교한 것으로 대칭성으로 인해 그 1/2 만 도시하였다. 역시 제품의 크기에 따라 소재형상이 차이를 보이고 있다.

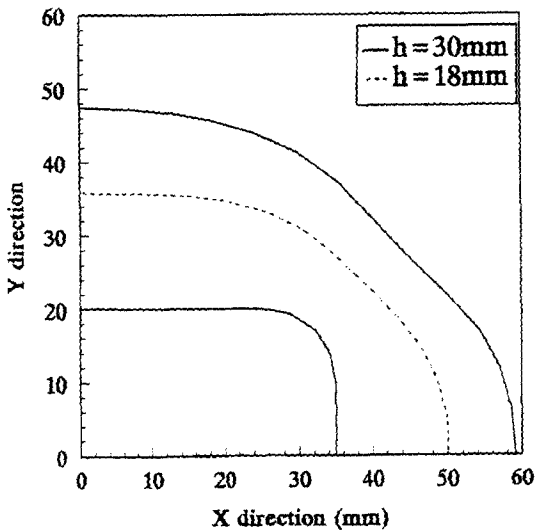


Fig. 7 Comparison of blank shape for Case 2

3.2. 유한요소법과 미끄럼선장법의 소재형상의 비교

전통적으로 사용되는 소재형상을 구하는 방법중에서 미끄럼선장법이 있을 수 있겠다. 미끄럼선장법은 평면변형을 상태의 소성변형을 해석하는데 있어서 수학적인 어려

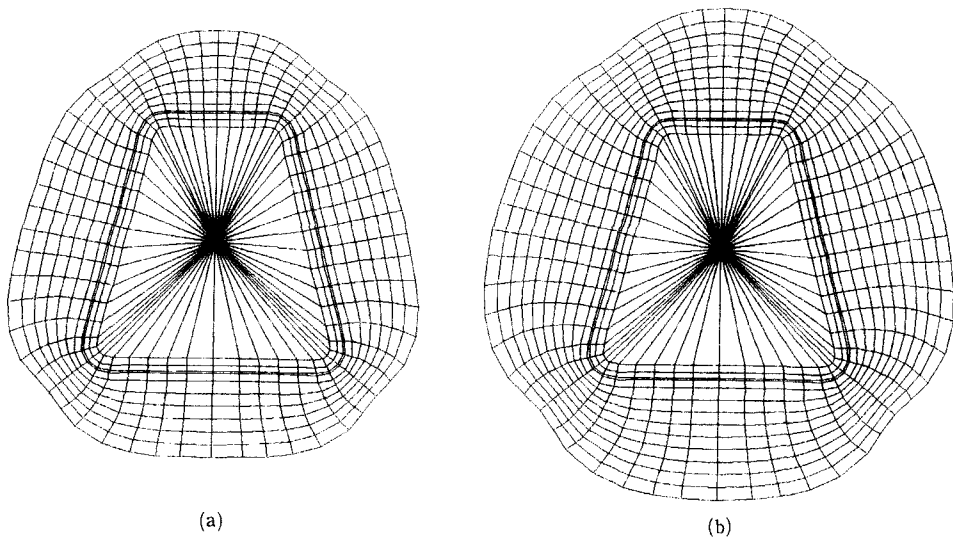


Fig. 8 Blank shapes for Case 3

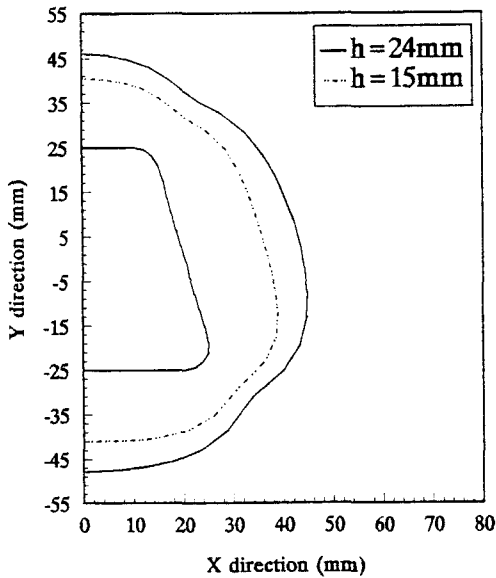


Fig. 9 Comparison of blank shape for Case 3

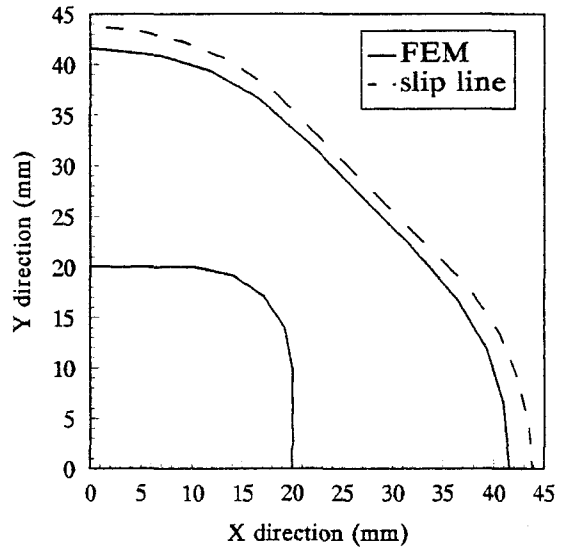


Fig. 10 Comparison of blank shape by FEM and SLFM for Case 1

움 없이 근사적인 해를 구하기 위하여 소성역에서 변형률의 탄성성분을 무시한 등방성 재료를 대상으로 한 해석수법이다. 또, 근래에는 F.E.M과 미끄럼선장법을 절충한 방법도 있었으나, 이러한 연구는 가공시에 영향을 미치는 마찰, 블랭크 가압력, 소요 성형력 등의 인자들을 무시하였으며 해석 결

과가 단순히 소재 형상 설계에 그치는 데 비해 해석 과정이 복잡하고 시간이 많이 소요되는 단점이 있었다.

본 연구에서 제안한 소재형상과 미끄럼선장법으로 설계된 소재형상을 Case 1., Case 2. 및 Case 3. 에 대하여 비교해 보았다.

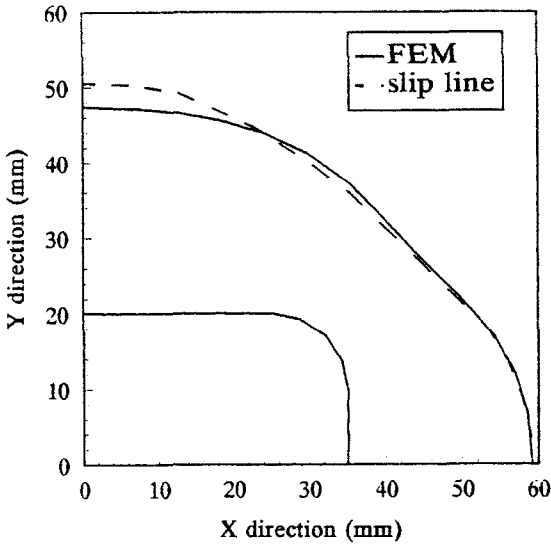


Fig. 11 Comparison of blank shape by FEM and SLFM for Case 2

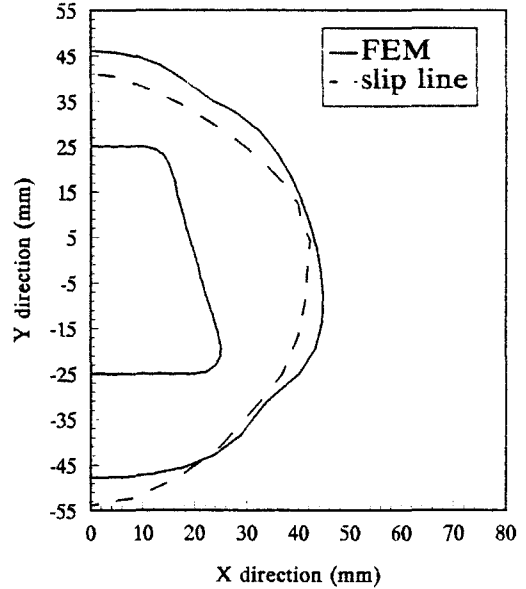


Fig. 12 Comparison of blank shape by FEM and SLFM for Case 3

Case 1. 의 경우에 대한 소재형상을 비교하여 Fig. 10 에 나타내었으며 대칭성으로 인해 1/4만을 도시하였다.

Fig. 11 은 Case 2. 의 경우에 대한 소재형상을 비교한 것이며 역시 그 대칭성으로 인해 1/4만을 도시하였다.

Fig. 12 는 Case 3. 의 경우이며 좌우대칭이므로 1/2 만을 도시하였다.

3.3 임의의 형상 플랜지를 가지는 제품의 소재형상

때때로 이상적인 제품형상이 임의의 형상의

플랜지부(flange part)를 가지는 경우도 있다. 즉, 정사각형 단면의 컵 부분을 가지고 원형 플랜지 부분을 가지는 제품이나 직사각형 단면의 컵 부분을 가지고 정사각형 플랜지 부분을 가지는 제품등을 말한다. 이런 경우에는 소재형상이 플랜지부를 가지지 않는 제품과 크게 다르게 된다. 본 연구에서는 플랜지부를 가지는 제품에 대해서도 소재형상을 설계할 수 있도록 프로그램을 확장하여 몇가지 경우에 대해 적용해 보았다.

먼저 정사각형 단면의 컵 부분을 가지는 제품에 대해 플랜지부의 형상이 원형인 경

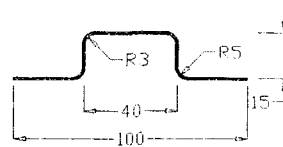
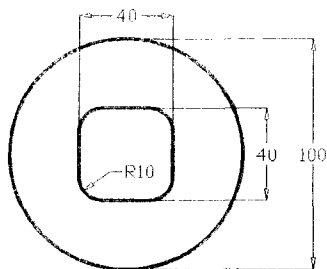


Fig. 13 Geometry of deep drawn product for Case 4

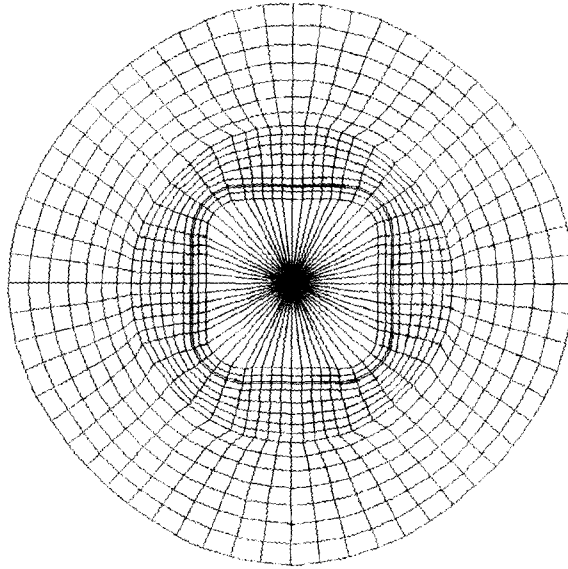


Fig. 14 Calculated blank shape for Case 4

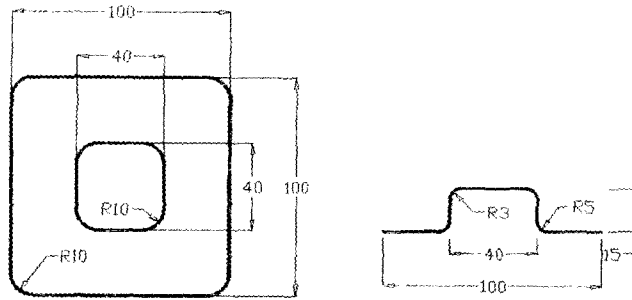


Fig. 15 Geometry of deep drawn product for Case 5

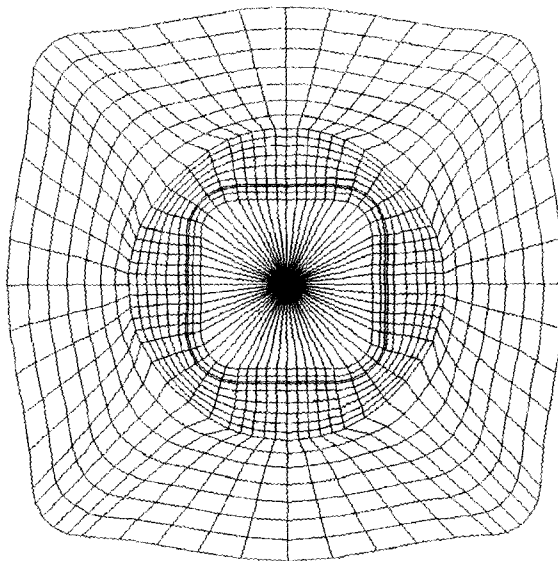


Fig. 16 Calculated blank shape for Case 5

우(Case 4.)와 같은 단면에 대해 플랜지부가 정사각형인 경우(Case 5.) 두가지에 대해 소재형상을 설계하였다. 또한 직사각형 단면의 킵 부분을 가지는 제품에 대해 지부의 형상이 원형인 경우(Case 6.)와 같은 단면에 대해 플랜지부가 정사각형인

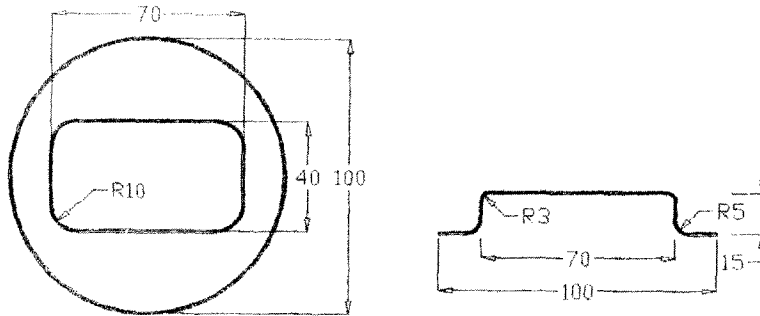


Fig. 17 Geometry of deep drawn product for Case 6

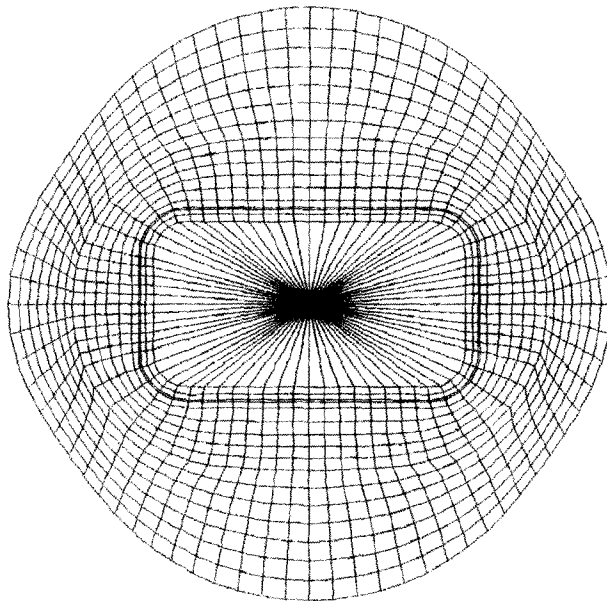


Fig. 18 Calculated blank shape for Case 6

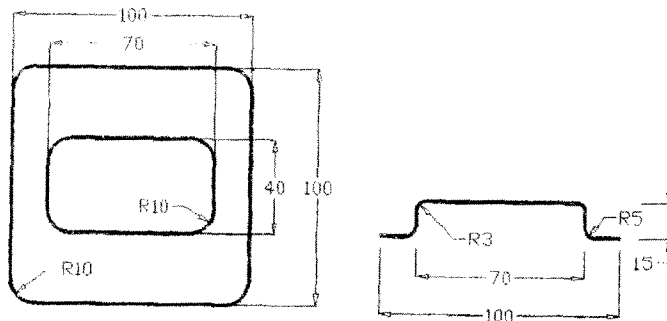


Fig. 19 Geometry of deep drawn product for Case 7

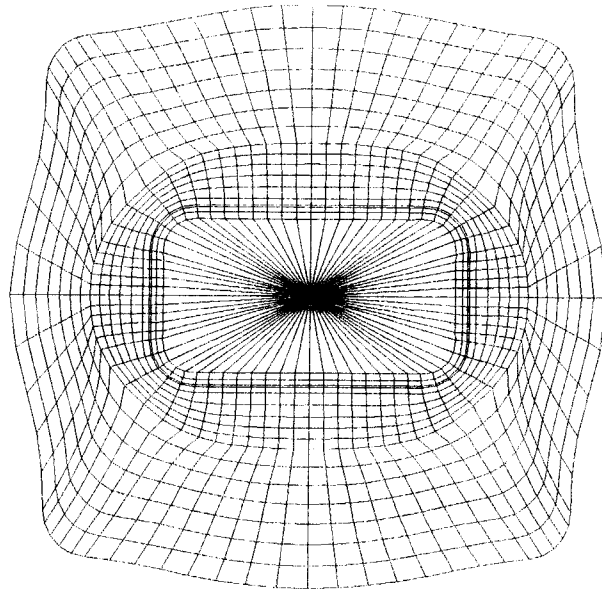


Fig. 20 Calculated blank shape for case 7

우(Case 7.)에 대해 소재형상을 설계해 보고 이를 고찰하였다.

Fig. 13은 원형의 플랜지부를 가지는 정사각형 단면의 컵에 대한 제품의 기하학적 형상을 나타내고 있으며 플랜지부의 크기는 지름이 100mm, 컵의 높이는 16mm이다. 이 형상을 입력하여 소재형상을 설계한 결과를 Fig. 14에서 보여주고 있다. 계산으로 구한 소재형상을 보면 성형시 플랜지부의 재료는 펀치 진행에 따라 안으로 유입되지 않고 다이와 블랭크 홀더 사이에서 이동했으므로 변형이 크게 일어나지 않으며 따라서 컵의 형태로 성형된 부분과는 뚜렷히 구분된다.

Fig. 15는 정사각형의 플랜지부를 가지는 정사각형 단면의 컵에 대한 제품의 기하학적 형상이다. 컵의 높이는 역시 16mm이며 플랜지는 반경이 10mm, 한변의 길이가 100mm의 크기를 가진다. 계산을 수행하여 얻은 소재형상은 Fig. 16에 나타내었다.

Fig. 17은 직사각형 단면과 원형의 플랜지를 가지는 제품의 기하학적 형상이다. 컵의 높이는 16mm이며 원하는 플랜지의 크

기는 Case 4.와 같은 지름 100mm이다. 소재형상은 Fig. 18에서 보여지고 있다.

Fig. 19는 정사각형의 플랜지를 가지는 직사각형 단면제품의 기하학적 형상이다. 컵의 높이는 16mm이며 플랜지의 크기는 반경 10mm를 가지며 한변의 길이가 100mm인 정사각형이다. 이러한 기하학적 데이터를 가지고 수행한 계산의 결과는 Fig. 20에 나타내었다.

4. 실험

4.1 등고형 제품을 얻는 실험

이론적으로 해석한 결과를 실험을 통하여 검증하였다. 각각의 단면 형상에 대한 소재형상으로 실험을 수행한 결과 등고성이 매우 양호한 결과를 얻을 수 있었다. Case 1., Case 2. 및 Case 3.에 해당하는 소재형상으로 성형한 결과를 Fig. 21에 나타내었다.

본 연구에서 개발한 프로그램은 완성된 이상적인 제품을 가정하여 성형전의 재료의 형상을 단계적으로 추적하여 최종적으로 소

유한요소법을 이용한 임의의 단면 덮드로잉 제품의 소재형성설계

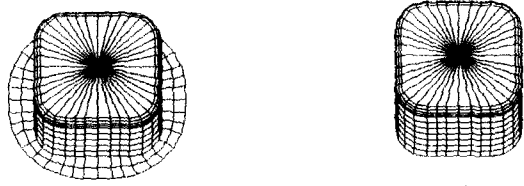


(a) $H=18\text{mm}$, $H=18\text{mm}$, $H=15\text{mm}$



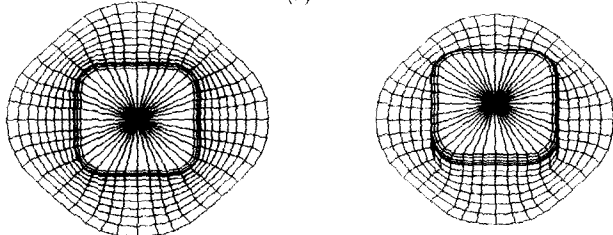
(b) $H=30\text{mm}$, $H=30\text{mm}$, $H=24\text{mm}$

Fig. 21 Experimental results



(a)

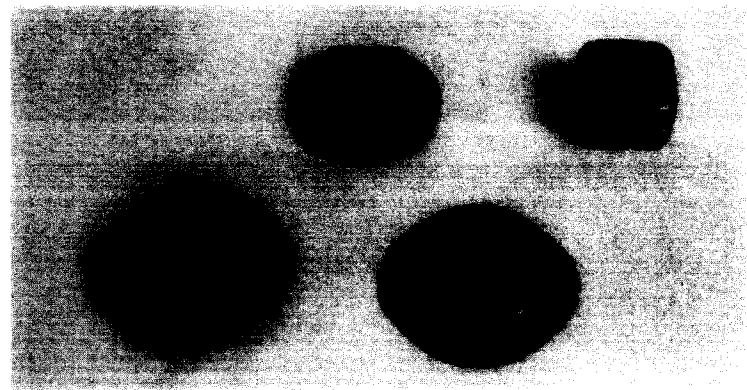
(b)



(c)

(d)

(a) theoretical



(b) experimental

Fig. 22 Middle stage shapes for Case 1

재형상을 구하도록 구성되었다. 성형의 중간 단계를 임의로 선택하여 출력하고 그 결과를 실험과 비교하였다.

Fig. 22, Fig. 23 및 Fig. 24 에 각각의 단면 형상에 대한 소재형상, 중간 단계의 형상 및 최종 제품 형상을 나타내었다. 장변과 단변 및 모서리에서의 재료의 유입 속도가 다를 수 있으며 실제로 실험한 결과 성형의 중간 단계에서의 형상이 이론적 해석과 매우 근사하게 나타남을 알 수 있다. 정량적으로 비교해 보면 이론적인 해석에서 Fig. 22의 (b)의 플랜지 크기는 블록

나온 부분의 길이가 60mm 이고 오목들어간 부분의 길이가 55mm 였다. 여기에 비해 실험치는 각각 63mm, 57mm 였다. 실험치가 좀 크게 나왔으며, 이 중간단계의 높이는 약 12mm 이다. 이론치 (c)의 플랜지의 크기는 블록나온 부분의 길이가 75mm 이고 오목들어간 부분의 길이가 70mm 였다. 실험치는 각각 78mm, 73mm 으로서 약간의 오차가 있다. 높이는 약 25mm 이다. Fig. 23의 중간단계는 4대칭이 아닌 관계로 단면방향의 플랜지길이와 장단면방향의 플랜지길이를 비교해 보았다. 먼저 Fig.23의

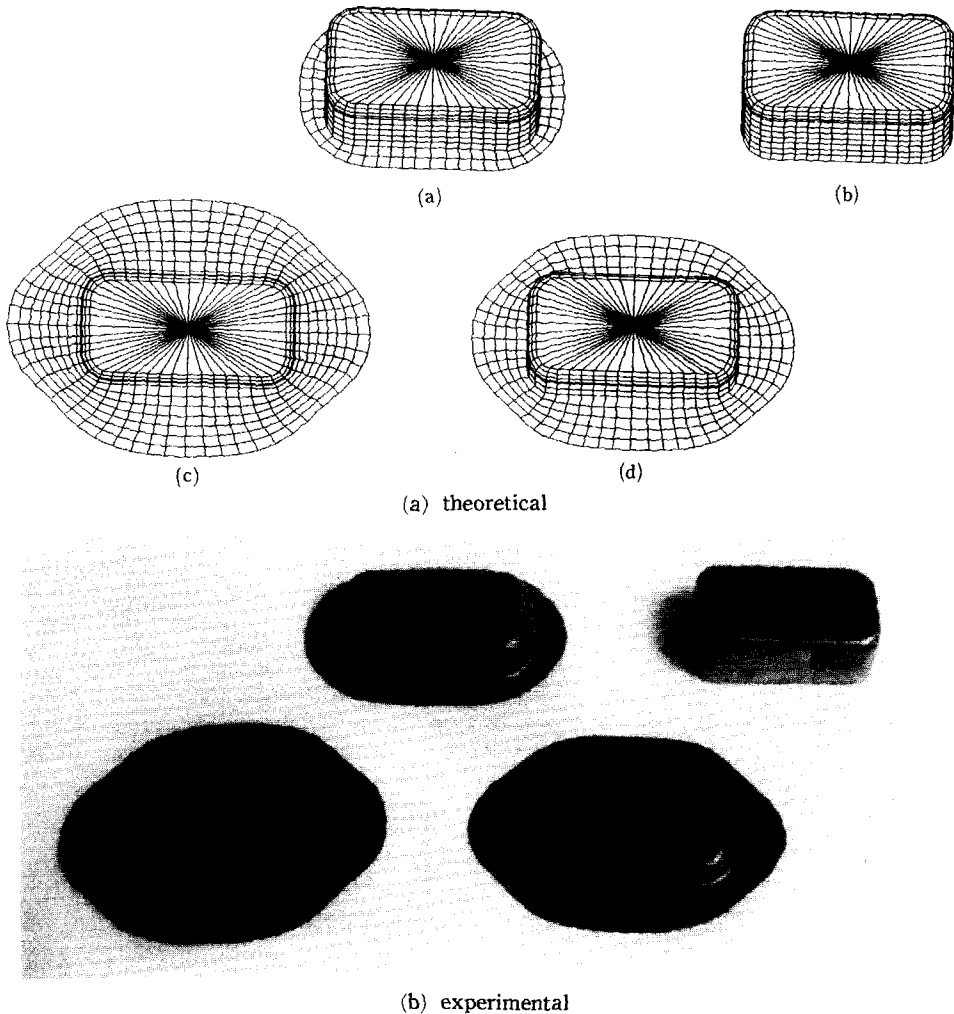


Fig. 23 Middle stage shapes for Case 2

(b)에서 이론치는 단단면방향의 플랜지길이가 79mm, 장단면방향의 플랜지길이가 107mm였고, 그에 대한 실험치는 각각 82mm, 110mm였다. 오차는 실험적인 오차에서 기인한다고 볼 수 있으며, 특히 실험할 때 중간높이의 정확한 제어가 힘들었다. 이 중간단계의 높이는 약12mm였다. (c)의 이론치는 각각 55mm, 86mm였고, 실험치

는 각각 58mm, 90mm였다. 높이는 25mm이다. 전체적으로 볼 때 실험값이 조금씩 크게 나왔다. 이것은 손으로는 블랭크의 모양을 일괄적으로 똑같이 따낼 수 없었고, 실험할 때 정확한 중간높이를 제어하지 못했는데 여기에 기인한 실험적 오차라 생각된다. 정확한 실험으로 오차를 조금더 줄이면, 실용성이 높아질 것으로 본다.

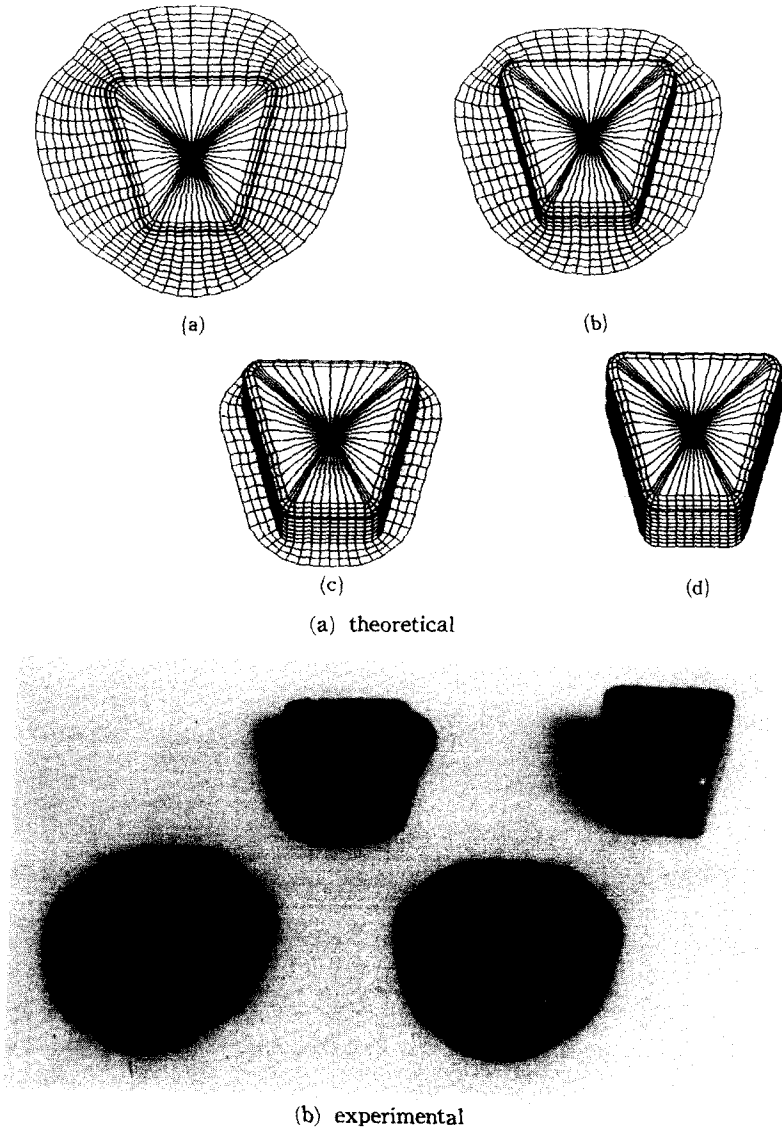


Fig. 24 Middle stage shapes for Case 3

4.2 임의 형상 플랜지를 가지는 제품의 실험

중간단계를 얻을 수 있음에 근거하여 임의의 형상 플랜지를 가지는 제품을 설계 및 실험해 보았다. Case 4., Case 5. 및 Case 6. 에 해당하는 설계된 소재형상을 이용하여 실험을 한 결과 초기에 가정한 제품의 형상과 대단히 유사한 제품을 얻을 수 있었다. 실험과의 양호한 일치로 제안된 소재형상의 유용성을 알 수 있다. Case 4. 에서 설계된 초기 소재형상과 이 소재형상으로

성형한 제품의 형상을 Fig. 25 에 나타내었다. 제품의 플랜지의 크기는 지름이 100 ± 1 mm 로서 초기에 설계한 플랜지의 크기와 별 차이가 없다. Case 5. 에 해당하는 초기 소재형상과 성형한 제품을 Fig. 26 에 나타내고 있다. 실제 성형한 제품의 크기는 단면의 길이가 97 ± 3 mm 로 초기에 설계한 플랜지의 크기보다는 좀작게 나왔으며, 모서리 부분은 설계는 반경 10mm 로 했고 실험 역시 반경이 약 10mm 로 잘 맞았다. Case 6. 의 경우는 Fig. 27 로 설계한 플랜지의

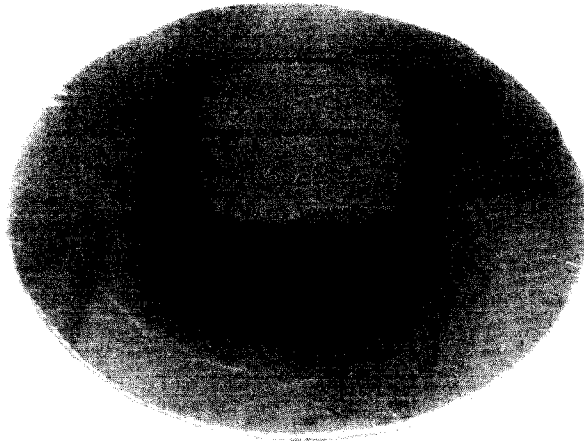


Fig. 25 Experimental result of Case 4

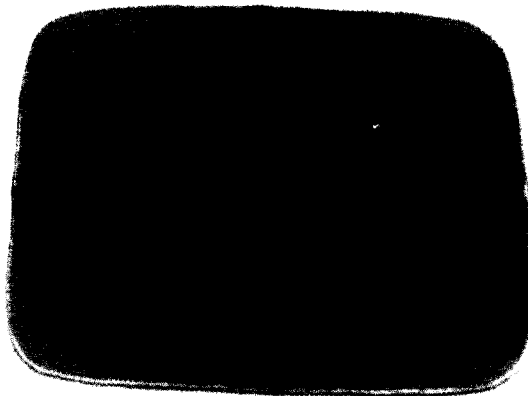


Fig. 26 Experimental result of Case 5

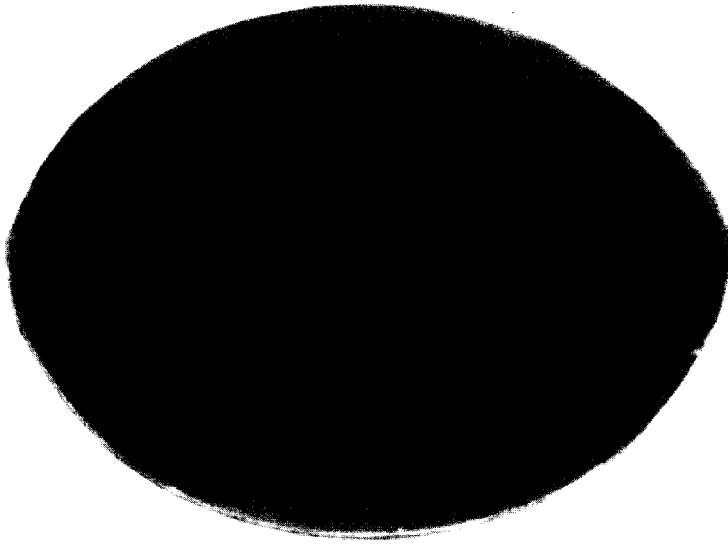


Fig. 27 Experimental result of Case 6

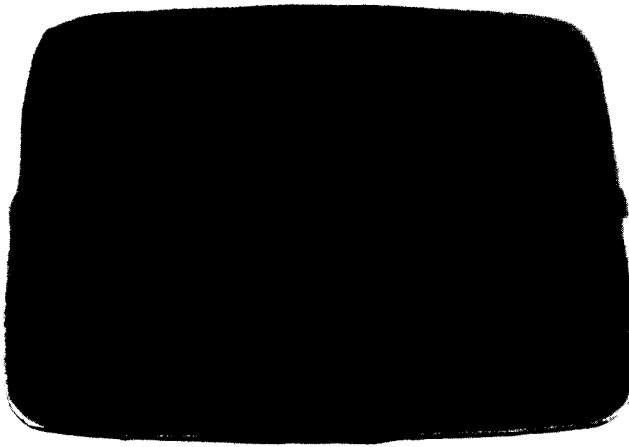


Fig. 28 Experimental result of Case 7

크기는 지름이 100mm 였고, 제품의 플랜지 크기는 103 ± 3 이었다. Case 7. 의 경우는 Fig. 28 에 나타내고 있으며, 실제 제품은 단면의 길이가 100 ± 1 mm 로 설계한 치수 100mm 와 별 차이가 없었고 모서리 부분도 역시 잘 맞았다. 대체로 시뮬레이션과 실험이 유사하였으며, 몇몇 실제 제품과 설계한 치수와의 약간의 오차를 발견할 수 있으나 충분히 실용성이 있는 것으로 생각된다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 강소성 유한요소해석을 통해 비원형 단면 딥드로잉 가공에 대해 최적의 소재 형상을 설계하는 방법을 제안하였고 여러 가지 경우에 대해 이를 실험과 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 즉, 다양한 단면 형상에 대해서 단지 입력 데이

터의 수정만으로 모두 해석이 가능하였으며 그 결과로 얻은 소재형상으로 등고성이 매우 양호한 제품을 얻을 수 있었다. 뿐만 아니라 성형의 중간 단계도 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 또, 동일한 단면을 가지는 경우에도 제품의 높이에 따라 그 최적 소재형상이 조금씩 다른 형태를 가짐을 알 수 있었다. 임의의 형상 플랜지를 가지는 제품의 성형에서도 설계된 초기형상으로 성형한 결과 초기에 가정한 형상과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

소재형상은 단면의 장변과 단변 및 코너 반경등의 변화에 따라 크게 달라지며 그 크기는 마찰계수와 소재 가압력에 민감한 경향을 보였다. 또한 계산 시간은 소형 컴퓨터 (IB Workstation RISC6000) 에서 각각의 단면에 대해 약 5~20 분 정도로 근사해로의 수렴이 매우 빠르므로 CAD/CAM 에 유용함을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구는 유한요소해석의 역추적 기법을 도입하여 비원형 단면 디프드로잉 공정에서의 소재형상 설계를 시도하였으며, 그 결과를 실험적으로 비교하여 그 유용성을 보여주고 있다. 이 결과를 종래까지 사용되어 온 미끄럼선장법에 의한 결과와도 비교하였으며, 본 연구에서의 설계법은 재료의 기계적 물성치를 고려할 수 있을뿐아니라 성형의 중간 단계에 대한 예측까지도 가능하므로 이는 미끄럼선장법에 비하여 상대적으로 우위에 있다고 사료되며 고찰된 내용을 종합하면 다음과 같다.

(1) 정사각형, 직사각형 및 사다리꼴의 세 가지 비원형 단면에 대한 디프드로잉 가공에서의 최적 소재형상을 설계하였으며, 그 결과의 타당성을 실험으로 입증하였다.

(2) 본 설계법은 성형의 임의의 중간 단계에 대한 소재형상의 예측도 가능하며 이

를 실험적으로 입증하였다.

(3) 임의 형상의 플랜지를 갖는 소재형상을 설계하여, 실험과 비교하여 그 유용성을 확인하였다.

(4) 초기 소재형상 결과를 미끄럼 선장법에 의한 결과와 비교하였다.

후 기

본 연구는 교육부 (과제 번호: ME94-E-08) 의 지원에 의하여 수행되었습니다. 지원하여주신데 대하여 감사드립니다.

참고문헌

- (1) H.Gloeckl, K. Lange, 1983 Computer aided design of blanks for deep drawn irregular shaped components, Proc. 11th NAMRC. 243.
- (2) 김민수, 신재현, 서대교, 1993 비원형 단면에 대한 판재 성형성 (Ⅱ), 대한기계학회 논문집, 제17권, 제12호, pp. 3074~3104.
- (3) T.Mori, N.Kawai, Y.Marumo, M. Senga, 1987 Square shell deep drawability of commercially pure aluminum sheets, Trans.J.JSME(C), 53-487, 771.
- (4) T.S.Noh, D.Y.Yang, 1987 An analysis of hydroforming for regular polygonal boxes, Int.J.Mech.Sci. 29, 139-148.
- (5) D.Y.Yang, T.S.Noh, 1990 An analysis of hydroforming of longitudinally curved boxes with regular polygonal cross-section, Int.J.Mech.Sci.32,877-890.
- (6) N.Kim, S.Kobayashi, 1986 Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method, J.Mach.Tool Des. Res. 26-2, 125.
- (7) J.H.Vogel, D.Lee, 1990 An analysis

- method for deep drawing process design, Int.J.Mech.Sci.vol.32, No.11, pp. 891-907.
- (8) K.Chung, O.Richmond, 1992 Sheet forming process design based on ideal forming theory, NUMIFORM'92, pp. 455-460.
- (9) H.Y.Jiang, D.Lee, 1992 Numerical simulation of sheet metal forming process based on large deformation shell elements, NUMIFORM'92, pp. 485~489.
- (10) E.Nakamach, 1992 Anisotropic elastic-plastic finite element simulation of 3-D sheet forming process, NUMIFORM'92, pp. 509~514.
- (11) D.Y.Yang, H.S.Lee, 1993 Analysis of three-dimensional deep drawing by the energy method, Int.J.Mech.Sci, vol.35, No.6, pp. 491~516.
- (12) 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.
- (13) 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, pp. 1679~1684.
- (14) S.Kobayashi, S.I.Oh, T.Alan, 1989 Metal forming and finite element method, Oxford Univ. Press, New York.
- (15) K.Bathe, 1982 Finite element procedures in engineering analysis, Prentice-Hall.
- (16) 전기찬, 1993 박판금속의 성형(이론과 실제), 반도출판사, pp. 313~323.
- (17) 김동원, 소성학, 청문각, pp. 163~167