

〈논 문〉

다단계 딥드로잉 가공에 대한 실험적 연구

박민호* · 김상진** · 서대교***

(1996년 6월 10일 접수)

Experimental Study on the Multi-stage Deep Drawing Process

Min Ho Park, Sang Jin Kim and Dae Gyo Seo

Abstract

A method of determining an optimum blank shape for non-circular deep drawing process is extended to the multi-stage deep drawing process. As an example, concentric two-stage square deep drawing process is considered, and the ideal blank shape, with uniform cup height and without flange part after the process, is constructed by the backward tracing of rigid plastic FEM. The conventional square blank shapes are also adopted for the comparison of two cases. As a result, it is confirmed that the drawn products with better thickness strain distribution and deeper cup depth could be obtained by the suggested ideal blank shapes.

Key Words : blank design(소재 형상 설계), multi-stage(다단계), deep drawing process(딥드로잉 가공), rigid-plastic finite element method(강소성 유한요소법), optimum blank shape(최적 소재 형상)

1. 서 론

딥드로잉 가공에 대한 연구는 광범위하게 이루어지고 있는데, 그중 하나로 소재 형상 설계에 관한 연구를 들 수 있다.^(2,4,7) 적절한 소재 형상을 결정하여 산업 현장에 응용하는 것은 매우 어려운 일로 보통 경험적인 방법에 의존해 왔으며 대부분의 산업 현장에서는 단순한 사각형의 소재 형상을 이용하고 있다. 딥드로잉 가공에서의 소재 형상 설계에 관한 연구로는 미끄럼 선장법을 이용한 해석⁽¹⁾, 유한요소법을 이용한 해석^(3,4) 및 그 밖의 해석 방법⁽⁹⁾ 등이 있다. 그 중에서 미끄럼 선장법은 고전적인 방법으로 이제까지의 소재 형상 설계에 가장 유용한 방법이었다. 연구의 예로 오일팬 형상의

다단계딥드로잉에 관해 해석한 T. Jimma 등의 연구⁽¹⁾가 있었다. 그러나 미끄럼 선장법은 실제의 경우와 달리 두께의 변화를 무시한 평면 변형을 상태로 가정하고 문제를 해석^(5,6)하므로 근본적인 오차를 지니게 된다. 본 연구에서는 다단계 딥드로잉 공정의 기본형이라고 할 수 있는 이단계 동심형의 정사각형 단면을 대상으로 하여 초기 및 중간 단계의 소재 형상을 이론적으로 예측하였고, 비교를 위하여 일반적으로 사용되는 정사각형의 소재 형상도 채택하여, 두 가지 경우에 대한 실험을 수행하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 이 론

이론 해석 과정에서는 다음과 같은 가정을 함으로써 근사 해석을 하였다.

(1) 판재 성형시 변형하는 재료의 폭에 비해 두께가 상대적으로 매우 작으므로 두께 방향의 응력

*대우전자(주)

**성균관대학교 기계설계학과 대학원

***성균관대학교 기계설계학과

의 변화를 무시할 수 있다. 이러한 평면응력 상태가 가공의 전 단계에 걸쳐 유지되는 것으로 가정하는 박막 이론을 사용하였다.

(2) 닥드로잉과 같은 대변형 문제의 해석시 탄성영역은 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 본 연구에서는 재료의 유동을 강소성체(rigid-plastic body)와 같이 가정하고 그 단축응력-변형률 곡선을 다음과 같은 일반적 형태로 표현하였다.

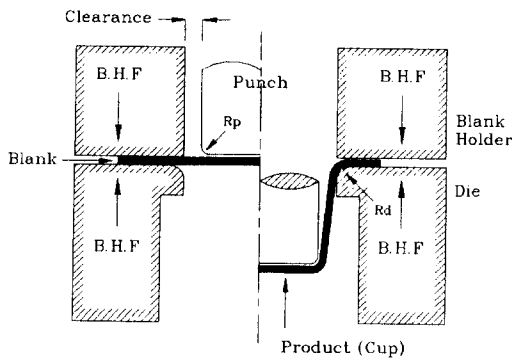
$$\sigma = C\epsilon^n$$

(3) Fig. 1에 다이와 블랭크 홀더, 펀치 및 시편의 형상을 나타내었다. 실제로 성형될 때 시편 내부의 재료의 유동은 복잡하지만 해석을 위해 몇 가지 합당한 가정을 세워 단순화시키기로 한다. 먼저 성형시 펀치 밑바닥 부분에 위치한 재료는 변형이 거의 없으므로 강체로 볼 수 있다. 펀치가 진행할 때 플랜지 부분에서 유입되는 재료는 굽힘과 마찰에 의해 인장되며 유입한 후 더 이상의 변형이 없이 펀치와 같은 속도로 진행한다고 본다.

유한요소법에서 기초 방정식을 유도하는 방법은 여러 가지가 있으나 일반적으로 변분원리로부터 유도해 내는 방법이 많이 쓰인다. 변분법에서는 범함수를 구해야 하나 구하는 과정은 알려져 있지 않다. 그러나 많은 경우에 소성포텐셜을 범함수로 하여 문제를 해석한다. 소성포텐셜로 가정된 범함수(functional)의 변분은 가상 일률의 원리로부터 유도되어 다음과 같은 형태로 표현된다.⁽⁵⁾

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

(K : 벌칙 상수, $\dot{\epsilon}_v$: 체적변형률속도, F_i : 표면력)



(a) Initial state (b) In Processing

Fig. 1 Illustration of deep drawing process

요소 방정식을 요소수준에서 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

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

또 Π 의 2차 미분항은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial v_i \partial v_j} = \int_V \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} P_{ij} dV + \int_V \left(\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \epsilon} - \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon^2} \right) \frac{1}{\epsilon} P_{ik} v_{kj} P_{mj} dV + \int_V K C_j C_i dV$$

닥드로잉 가공시 플랜지 부분에 있던 재료는 펀치가 진행함에 따라 컵 벽면으로 성형될 때 굽힘을 받게 된다. 따라서 펀치 벽면으로 유입(drawing)되는 요소에 대해서는 다음과 같은 굽힘응력을 고려하였다.⁽⁶⁾

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

여기서 t_0 는 재료의 초기 두께이고 ρ 는 곡률, θ 는 다이와의 접촉 각도, 또 μ 는 마찰계수이다. 식의 우변의 첫째 항은 벨트식을 이용한 굽힘응력이고 둘째 항은 되돌림 굽힘응력이다.

닥드로잉 가공과 같이 재료의 체적에 비해 마찰이 일어나는 면이 큰 경우에는 쿠울롬 마찰을 적용시킬 수 있다.⁽⁸⁾ 플랜지 영역에서 움직이는 요소들은 모두 소재가압력과 윤활 상태에 따라 달라지는 마찰 저항을 받게 되는데 이러한 마찰응력은 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽⁶⁾

$$\sigma_f = \frac{2\mu H}{l_0 l}$$

여기서 H 는 소재 가압력이며 l 은 요소의 단면 길이이다.

마찰응력은 플랜지부에 있는 모든 요소의 절점에 대해 속도 벡터의 반대 방향으로 작용하는 절점력으로 처리하였다. 즉 마찰응력에 의한 마찰력을 F 라하고 X, Y 방향 속도 벡터를 각각 V_x, V_y 라 하면 마찰 응력의 X, Y 성분은 다음과 같다.

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

3. 소재형상 설계

닥드로잉 가공시 소재 형상에 영향을 미치는 부

분은 주로 플랜지 부분이다.⁽⁹⁾ 플랜지 부분에 있는 재료는 성형시 마찰에 의한 저항력을 받아 변형을 하게 되며 다이 프로파일(die profile)을 지나는 순간 굽힘과 되돌림 굽힘을 받게 되며 이때 다시 변형이 생기게 된다. 이 과정을 가정된 제품 형상에 적용하여 역으로 계산을 진행하면 결국 초기 소재 형상이 얻어진다고 보았다.^(5,10) 계산에는 강소성 유한요소법을 이용하였으며, 제품의 단면 형상에 관계없이 거의 해석이 가능하다고 사료된다.

Fig. 2는 동심 이단의 정사각형 단면 컵의 초기 소재 형상을 추적하는 모습을 나타낸 그림이다. 컵

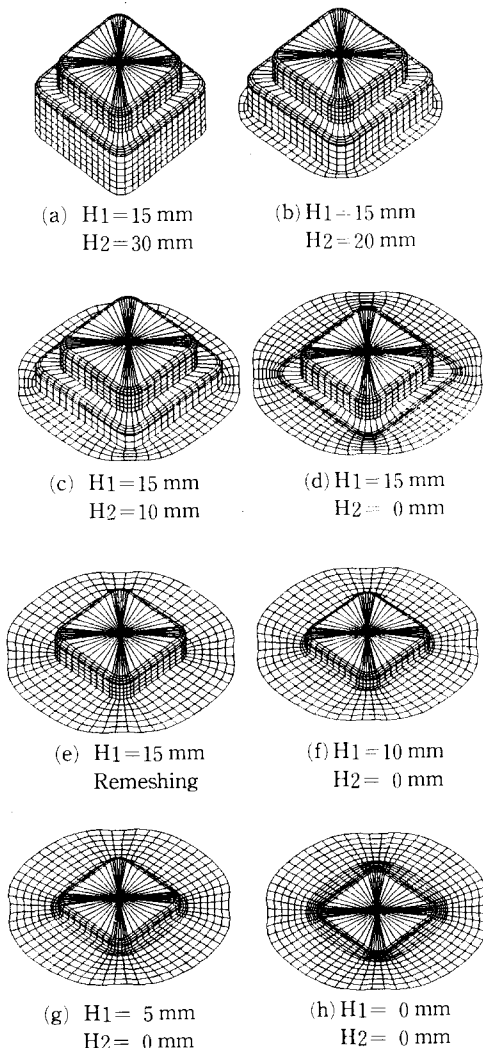


Fig. 2 Calculation of blank shape for multi-stage deep drawing (H1=15 mm, H2=30 mm)

의 뚜껑은 강체로 보았으므로 해석에서는 제외되었다. 먼저 (a)는 계산시 입력 형태인 이상적인 완제품 형상을 도시한 것이며 일정한 간격으로 요소 분할되어 있다. (b)는 성형시 마지막으로 (a)로 유입되기 직전의 상태를 나타내고 있다. 이와 같이 하여 H2=30 mm 부분이 모두 퍼졌을 때의 상태가 (d)이다. (b)에서 (a)로 성형될 때 유한요소해석에 필요한 초기 속도 벡터는 컵벽면의 법선 방향을 따라 작용한다고 가정하였는데 이것은 펀치의 진행 방향이 플랜지에 대해 수직 방향이기 때문이다. 또 이때 플랜지에서 굽힘과 되돌림 굽힘에 의한 저항력이 속도 벡터의 반대 방향으로 작용하며 소재가 압력에 의한 마찰 저항력도 작용한다고 본다. 따라서 이와 같이 재료의 유동 과정을 반대로 적용하여 (d)에서의 상태가 결정될 수 있다. 여기에서 H1=15 mm 부분을 계속 커나가기 위하여 요소 재구성이 필요하며, 이 때는 (a)-(d) 과정과 차이가 있다. 즉, (d)까지 퍼진 상태가 초기 상태이므로 어떤 모양의 플랜지(flange) 형상을 갖는 컵이 된다. 따라서 임의 형상의 플랜지를 갖는 컵에 대하여 역으로 커나가는 과정이 가능하여야 마지막 (e)-(f) 과정이 진행될 수 있다. 이와 같이하여 이단계의 컵을 모두 편 최종 상태가 (h)이며, 이 형상이 컵 (a)을 얻을 수 있는 초기 소재 형상으로 보았다. (h)의 평면도가 Fig. 3이다.

본 연구에서 개발한 유한요소 프로그램은 컵의 높이를 입력 값으로 하여 입력된 높이의 등고형 컵을 얻기 위한 소재형상을 설계한다. 이를 최적 소

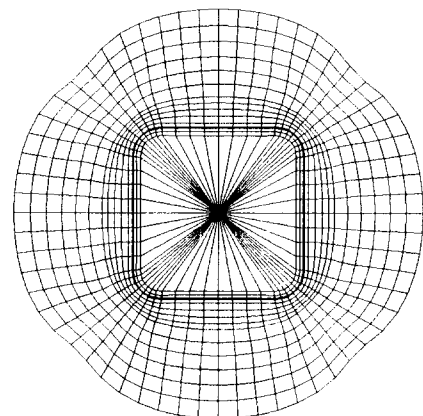


Fig. 3 Calculated blank for multi-stage deep drawing (H1=15 mm, H2=30 mm)

Table 1. Input data for calculation

Material conditions	plastic coefficient (C)	50.81 (kgf/mm ²)
	strain hardening exponent (n)	0.25
	thickness (t)	0.7 (mm)
Frictional conditions	blank holding force (B.H.F.)	2000 (kgf)
	friction coefficient (μ)	0.18
Geometric conditions	die profile radius (Rd)	5 (mm)
	clearance between die and punch	1.7 (mm)

재 형상으로 보았으며, 계산 수행시 고려된 입력 데이터로는 소재 가압력(BHF), 마찰계수, 소성계수, 가공경화지수, 다이 모서리 반경(Rd), 펀치 모서리 반경(Rp), 소재 두께, 가공여유(clearance) 등이 있으며 Table 1에 계산에 사용된 입력 데이터 값을 보였다. 계산은 소형컴퓨터(IBM Workstation RISC system / 6000 320H)를 사용하였으며 전처리(preprocessing)와 후처리(post-processing)는 Personal Computer를 사용하였다.

4. 실험

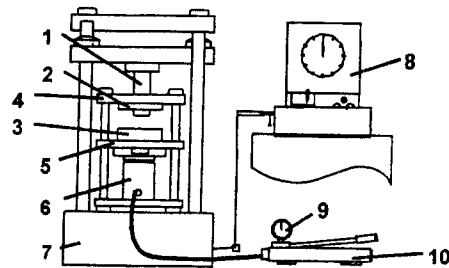
본 연구에서 제안한 소재형상 설계법을 실험을 통해 검증하고 성형성을 고찰하였다. 재료는 자동차 차체 성형용으로 많이 쓰이는 아연 도금 유기피막강판(SPC 3J-3J/3J)을 사용하였다. 닥드로잉 실험 장치는 직접 고안 제작한 것으로 그 형상과 재원은 Fig. 4와 같다. 운할은 무운할로 실험하였으며 가공 속도의 영향은 무시하였다. 최적 소재 형상과 실제 산업 현장에서 많이 쓰이는 사각형 소재 형상을 대상으로, 박판을 절단기와 연삭기를 이용하여 절취하여 그 소재 형상을 닥드로잉 실험 장치로 성형하였다. Fig. 2의 계산과 실험에 사용된 펀치의 형상은 Fig. 5와 같다.

소재 형상은 앞에서 설계한 최적 소재 형상과 실제 산업 현장에서 많이 쓰이는 사각모양의 소재 형상을 사용하였다. 다듬질 작업을 거친다고 가정하고, 다듬질 작업 후의 제품의 크기가 최적 소재 형상의 제품의 크기와 같게 크기를 정하였다. Fig. 6은 사각모양의 소재 형상의 크기를 결정하는 방법을 보여주고 있다.

다단계 닥드로잉을 위해 펀치와 다이 세트를 제작하였으며, 작은 펀치와 다이세트와 큰 펀치와 다

이세트 두 가지가 필요하였다. 다단계제품을 가공하기 위한 펀치와 다이세트는 설계 제작하였다.

성형하는 과정은 Fig. 7에서 보여주고 있다. 50 mm의 펀치와 다이 세트로 1차 성형 후에 80 mm의 펀치와 다이 세트로 2차 성형하는 순서로 다단계 컵을 얻었다. 높이는 소재 형상을 설계한대로 큰 컵의 높이를 H2=30 mm로 고정시키고 작은 컵의 높이를 H1=15 mm 부터 5 mm씩 증가시켜 가며 실험하였으며, 또한, 큰 컵의 높이를 H2=20 mm로 고정시키고 작은 컵의 높이를 H1=15 mm 부터



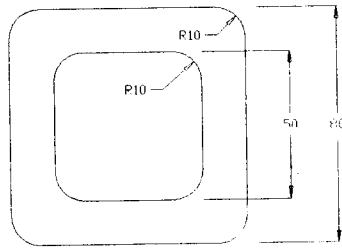
Name list for experimental apparatus

No.	Name	No.	Name
1	punch	6	ram
2	blank holder	7	universal testing machine
3	die	8	load gage
4	blank holder supporter	9	holding pressure gage
5	die supporter	10	hand oil pump

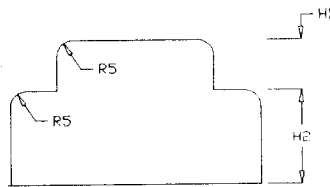
Fig. 4 Experimental apparatus for deep drawing

Table 2. Comparison of formability of each blank shape for multi-stage deep drawing process

Blank shape	H2=20 mm					H2=30 mm			
	H1=15 (mm)	H1=19 (mm)	H1=20 (mm)	H1=21 (mm)	H1=25 (mm)	H1=15 (mm)	H1=17 (mm)	H1=19 (mm)	H1=20 (mm)
Optimum	15 mm	19 mm	20 mm	21 mm	fracture	15 mm	17 mm	19 mm	fracture
Square	15 mm	19 mm	fracture			15 mm	fracture		



(a) Cross section of punch



(b) Front view of punch

Fig. 5 Geometry of punch for multi-stage deep drawing

5 mm씩 증가시켜 가며 실험하였다.

성형의 높이와 성형 여부를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보듯이 H2=20 mm에서는 최적 소재 형상이 H1=21 mm까지 성형되었고, 사각 모양 소재 형상은 H1=19 mm까지 성형되었다. 사각 모양 소재 형상이 실험시 마지막까지 플랜지부분이 남아 있어 최적 소재 형상보다 일찍 파단되었다. H2=30 mm에서는 최적 소재 형상은 H1=19 mm까지 성형되었고, 사각형상은 H1=15 mm까지 성형되었다. H2=30 mm이기 때문에 1단계 성형시 플랜지로 남는 부분이 H2=20 mm일 때 보다 많아 일찍 파단되었다. 전체적으로 최적 소재 형상이 사각모양 소재형상보다 4 mm가량 더 높이가 성형되었다.

앞에서 설계한 최적 소재 형상과 사각모양 소재형상으로 실험한 결과로 얻은 제품의 형상을 Fig. 8에서 보여주고 있다. 플랜지가 없는 제품이 최적

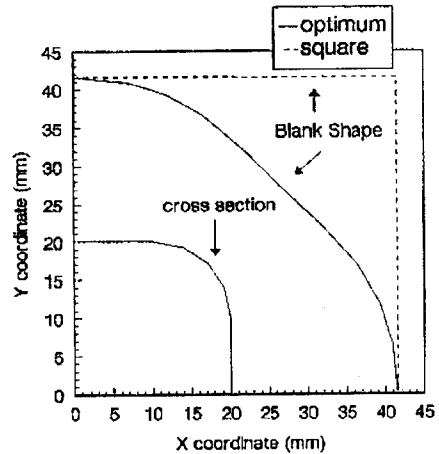


Fig. 6 Comparison of optimum and square blank shapes

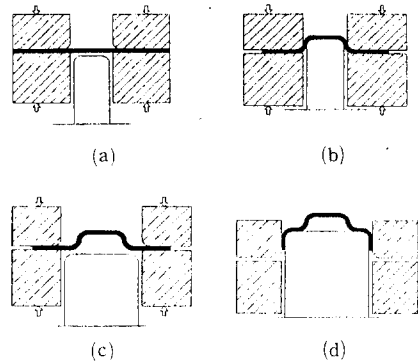


Fig. 7 Geometry of multi-stage deep drawing process

소재 형상으로 성형한 제품이며, 플랜지가 달린 것이 사각모양 소재형상으로 성형한 제품이다. 최적 소재형상으로 성형한 제품의 형상이 이론 해석에서 가정한 이상적인 제품형상과 매우 유사한 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안한 소재형상의 타당성을 입증하는 것이라고 사료된다.

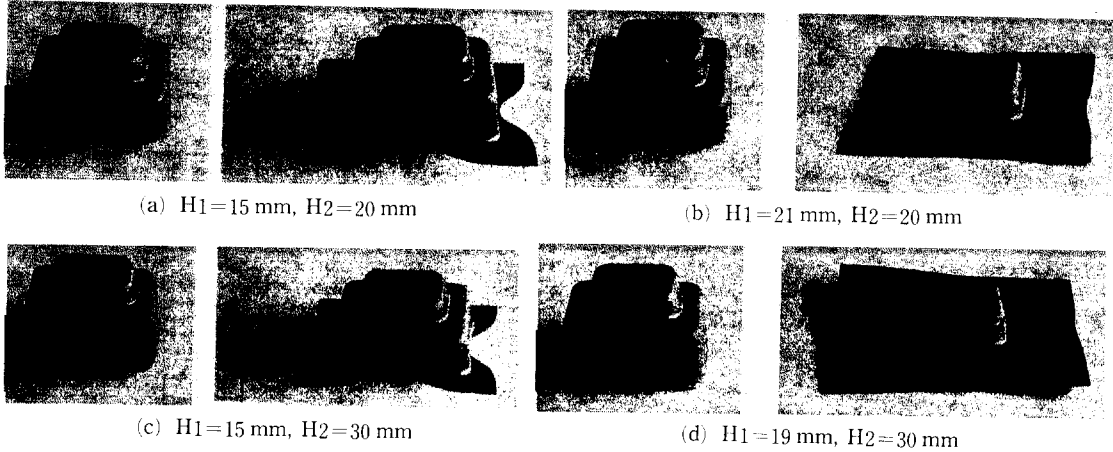


Fig. 8 Comparison of the products from two blank shapes

5. 실험 결과의 비교 및 고찰

실험을 통해 얻은 제품들의 두께 변형률을 측정해 보았다. 마이크로 포인트게이지를 사용하여 측정하였으며, 두께분포는 Fig. 9에서와 같이 단면방향(a-line)과 모서리 방향(b-line)을 측정하였다. 이때 제품의 끝부분부터 3mm간격으로 측정하여 강제라고 가정한 컵의 두께까지 측정하였다. a-line 또는 b-line의 측정된 두께 분포는 두께 변형률분포로 환산하여 비교하였다.

사각모양 소재형상으로 성형한 제품은 뾰족한 플랜지가 달리는데, 측정시에는 이 부분은 다듬질된다고 보고 제품으로서 유효한 부분의 두께만을 측정하였다.

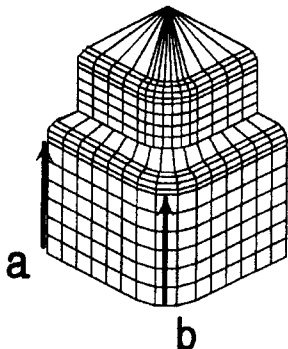


Fig. 9 Measuring direction of thickness distribution

5.1 높이에 따른 비교 및 고찰

높이를 변화시켜 가며 실험해 보았으며, 높이에 따른 두께 변형률분포를 비교해 보았다.

Fig. 10은 H2는 20 mm이고, H1은 15 mm, 20 mm, 21 mm일 때의 두께 변형률분포를 비교해 보았다. 최적 소재형상으로 성형한 제품의 두께 변형률분포이며, 단면방향(a-line)으로 측정된 것이다. H1의 높이가 높아질수록 취약했으며, 취약해지는 부분들이 비슷한 경향을 보였다. 30 mm까지는 완만하다가 1단의 모서리 부분에 이르러서 급격히 취약해지는 경향을 보였는데, 이는 1단의 편치의 크기가 상대적으로 2단의 편치 크기보다 작고 소재형상의 크기는 상대적으로 크기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 11는 역시, 단면방향(a-line)으로 측정하였으며, 최적 소재형상으로 성형한 제품의 두께

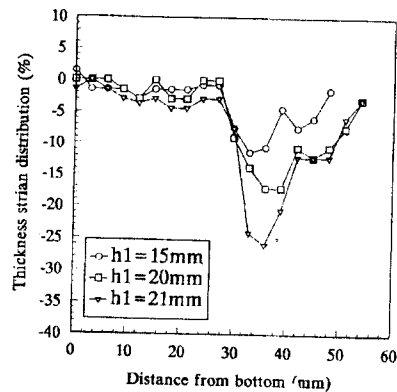


Fig. 10 Thickness strain distribution along a-line for optimum blank

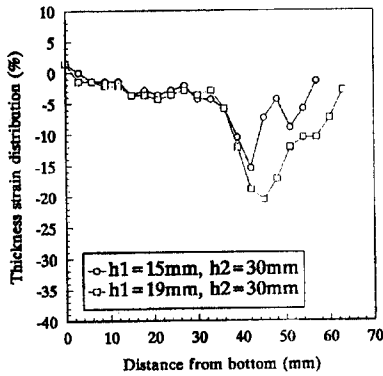


Fig. 11 Thickness strain distribution along a-line for optimum blank ($H_2=30$ mm)

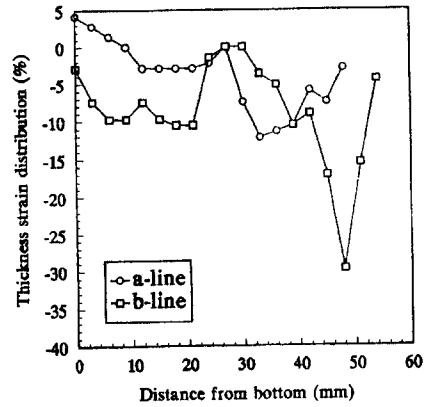


Fig. 13 Thickness strain distribution for square blank ($H_1=15$ mm, $H_2=20$ mm)

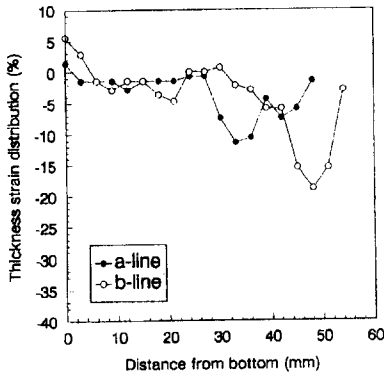


Fig. 12 Thickness strain distribution for optimum blank ($H_1=15$ mm, $H_2=20$ mm)

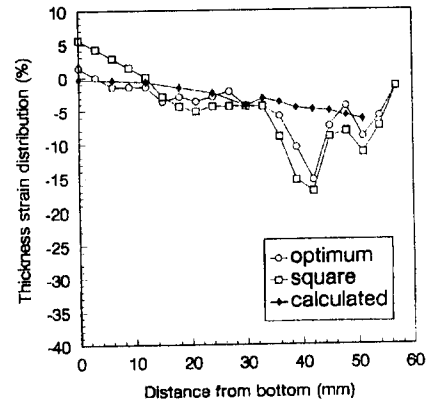


Fig. 14 Thickness strain distribution along a-line ($H_1=15$ mm, $H_2=30$ mm)

변형률분포이다. 높이는 H_2 가 30 mm, H_1 는 15 mm, 19 mm이다. 앞과 마찬가지로 H_1 의 높이가 높아질수록 취약했으나, 경향은 비슷하였다.

5.2 측정방향에 따른 비교 및 고찰

제품의 두께측정 방향은 단면방향 (a-line)과 모서리방향(b-line)의 두 가지 방향으로 정하였으며, 방향에 따른 두께 변형률분포를 알기 위해 비교해 보았다.

Fig. 12에서는 최적 소재형상을 사용하고, H_1 는 15 mm, H_2 는 20 mm 인 제품의 두 가지 방향에 따른 두께 변형률분포를 나타내었다. a-line이 완만히 전개되다가 2단 모서리부분에서 조금 취약해진 반면, b-line은 1단 부근과 2단 부근이 모두 급격히 취약해지는 경향을 나타내었다. 이는 사각형과 같은 튀어나온 모서리를 가지고 있는 펀치로 성형

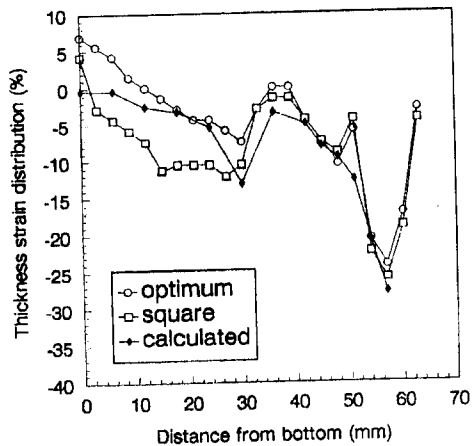


Fig. 15 Thickness strain distribution along b-line ($H_1=15$ mm, $H_2=30$ mm)

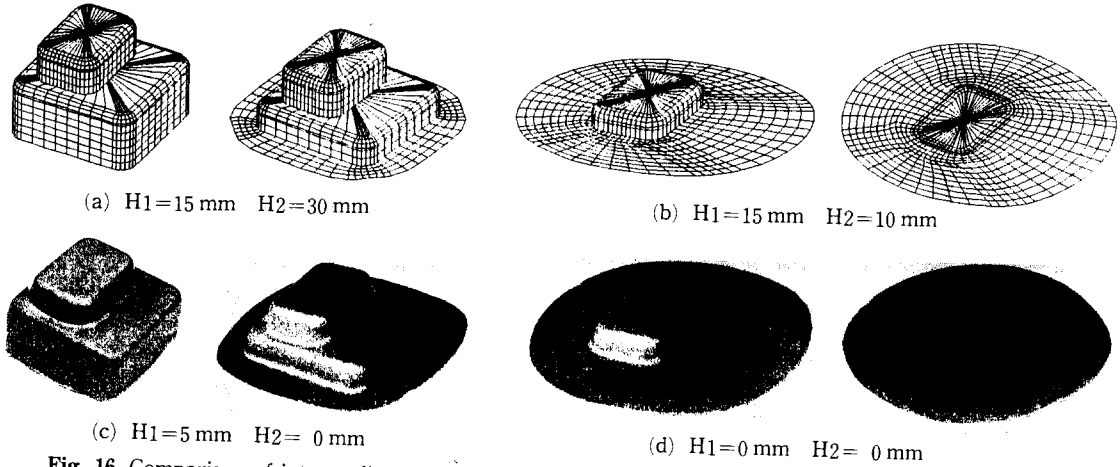


Fig. 16 Comparison of intermediate stages by simulation and experiment ($H_1=15$ mm, $H_2=30$ mm)

할 경우에 다른 어느곳 보다도 모서리 부근이 취약함을 나타내는 것이다. Fig. 13은 높이는 Fig. 12와 같고 소재형상을 사각모양 소재형상을 사용하여 실험한 제품의 두께 변형률분포를 보여주고 있다. 앞의 그림보다는 경사가 져고, 모서리부분이 각 단마다 급격히 취약해짐을 알 수 있다.

5.3 이론적 변형률분포와 소재형상에 따른 비교 및 고찰

소재형상을 변화시켜 가며 실험해 보았다. 앞에서 설계한 최적 소재형상과 사각모양 소재형상을 이용하여 제품을 성형하고, 두께 변형률분포를 측정하여 비교하였다. 또한, 설계된 최적 소재형상으로 제품을 성형하였을 때, 제품이 가지는 두께 변형률분포를 수치해석을 통하여 예측해 보았다.

Fig. 14는 $H_1=15$ mm, $H_2=30$ mm일 때 a-line을 따라 각 제품의 두께 변형률 분포를 측정하고, 예측해 본 것이다. 역시, 각 단마다 취약해짐을 알 수 있으며, 전체적으로 사각모양 소재형상으로 성형한 제품이 최적 소재형상으로 성형한 제품보다 취약했다. 특히 2단 부분에서 좀더 취약함을 알 수 있었다. 수치해석으로 예측한 두께 변형률분포는 실험 측정치와 비슷한 크기를 나타내었으며, 1단의 취약한 부분은 예측이 가능했으나, 2단의 취약해지는 부분은 예측이 곤란하였다. 전체적으로 수치해석으로는 세밀한 부분까지는 예측하지 못하였다. 이는 수치해석 자체가 많은 가정하에서 이루어졌기 때문이라고 생각된다. Fig. 15의 높이는 앞의 Fig. 14와 같고 b-line을 따라 각 제품의 두께 변형률

분포를 측정하고, 예측해 본 것이다. 제품에서 가장 취약한 부분인 모서리 부분의 측정이므로 앞의 a-line보다 훨씬 취약하다. 역시, 사각모양 소재형상의 제품이 최적 소재형상의 제품보다 취약했다. 수치해석으로 예측해 본 두께 변형률분포는 대체적인 경향과 크기는 일치하였다.

5.4 기타의 실험 예

이상과 같은 결과가 보다 일반적인 경우에도 유사한 성과가 얻어질 수 있는지를 확인하기 위하여, 실험적인 연구를 추가로 진행하였다. Fig. 16은 앞의 경우와는 달리 1단계 성형단면이 직사각형일 뿐만 아니라, 그 단면의 중심이 2단계 성형단면(정방형)의 중심과 편심되어 있는 경우에 대하여 실험과 이론결과와의 비교를 보여준다. 이 경우에 대하여도 앞의 경우와 거의 같은 방법으로 사각형의 소재형상도 선택하여 비교 고찰하였다. 전반적인 결과의 줄거리는 앞의 경우와 대등하므로 실험상의 자세한 내용은 생략할 수 있다고 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 강소성유한요소법을 이용하여 다단계 덮드로잉 제품의 최적 소재형상을 설계하였다. 이러한 최적 소재형상과 사각모양 소재형상을 이용하여 성형하고 두께 변형률분포를 측정·비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다단계의 형상을 가지는 제품형상을 선택하여 최적 소재형상을 설계할 수 있었으며, 실험 결과

등고성이 우수한 제품을 얻을 수 있었다.

(2) 사각모양 소재형상과 최적 소재형상의 비교 실험 결과 최적 소재형상에 의한 제품이 성형성에서 우월함을 알 수 있었다.

(3) 성형된 제품의 두께 변형률분포를 측정된 결과, 최적 소재형상으로 성형된 제품이 사각모양 소재형상으로 성형된 제품보다 두께 변형률분포에서 우수하였다.

(4) 수치해석으로 예상된 두께 변형률분포는 전체적으로 세밀한 부분까지 예측은 불가능하였지만 그 경향의 예측은 가능하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) T. Jimma, T. Kuwabara, 1986, Deep drawing of shells with bi-level bottoms, *Advanced Technology of Plasticity*, Vol 11., pp. 1159~1164
- (2) N. Kim, S. Kobayashi, 1986, Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method, *J. Mach. Tool Des. Res.* 26-2, 125
- (3) E. Nakamach, 1992, Anisotropic elastic-plastic finite element simulation of 3-D sheet forming process, *NUMIFORM '92*, pp. 509~514
- (4) Li Shunping, 1993, A study on the determination of blank shapes for deep-drawn parts, *Advanced Tech. of Plasticity 1993*, pp. 1567~1572
- (5) S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, 1989, *Metal forming and Finite Element Method*, Oxford Univ. Press, New York
- (6) 김동원, 1986, 소성학, 청문각, pp. 163~167
- (7) 이충호, 허훈, 1995, 박관급속성형공정에서의 블랭크 설계 및 변형률예측, *춘계학술대회 논문집(I)*, pp. 451~456
- (8) 김영식, 최원집, 1994, 컵드로잉에 의한 판재의 마찰특성 평가, *한국자동차 공학회 논문집*, 제2권 제1호, pp. 96~105
- (9) 정명철, 최정호, 한영호, 1994, 밑면에 단이 있는 사각형 용기의 디프트로잉에 대한 실험적 연구, *추계학술대회논문집(I)*, pp. 761~765
- (10) 김상도, 박민호, 서대교, 1995, 유한요소법을 이용한 임의의 단면 딥드로잉 제품의 소재형상 설계, *한국소성가공학회지*, 제4권 제4호, pp. 302~321