

〈논 문〉

오목형 단면 딥드로잉에서의 성형성

박민호* · 김상진** · 서대교***

(1996년 1월 24일 접수)

Formability of deep drawing process for reentrant cross section

Min Ho Park, Sang Jin Kim and Dae Gyo Seo

Abstract

The differences of formability with maximum cup depth of drawn product and thickness strain distribution are compared for two kinds of blank shapes which are suggested optimum shape and conventional square shape. The suggested blank is determined by backward tracing technique of rigid-plastic FEM. The deeper cup without wrinkle and flange part could be obtained from the suggested blank shape, however, the cross section cup from the square blank could not be kept smooth thickness strain distribution and defended those phenomena.

Key Words : Blank Design(소재형상 설계), Reentrant Cross Section(오목형 단면), Deep Drawing Process(딥드로잉 가공), Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Optimum Blank Shape(최적 소재형상)

1. 서 론

비원형 단면에 대한 판재 성형 시에 적절한 소재 형상을 설계할 필요성은 있으나 적절한 설계법을 찾지 못한 채 상당한 기간이 지나면서 70년대에 이르렀다. 이 때 Jimma⁽¹⁾가 미끄럼선장법으로 소재형상을 구하는 방법을 발표함으로써 이 분야의 연구가 활발하기 시작하였다. 이어서 Lange⁽²⁾와 Jimma⁽³⁾에 의하여 많은 연구가 발표되었고, 이들은 L형이나 ㄷ형과 같은 오목형을 갖는 단면에 대하여도 연구하였다. 그러나 오목한 부분에 대한 미끄럼선장을 구한다는 것은 논리상 어려움이 있기 때문에 이 방법에 의한 연구는 한계가 있었다. 그 후 Kobayashi⁽⁴⁾에 의하여 FEM으로 이러한 연구가 수행됨으로써 소재형상 설계도 이론적으로 무

한한 가능성이 있음을 예측하게 하였다. 그 후 많은 연구들이 발표되었으며^(5~11) 대부분 정사각형 등의 볼록형 단면이었다.

본 연구에서는 오목한 부분이 있는 판재 성형도 산업 현장에서는 가끔 있는 일이기 때문에 이에 관심을 갖고 그 첫단계로 오목한 부분을 가지나 그 단면형상이 대칭인 십자형 단면을 연구 대상으로 선정하였다. 비록 근사적 접근이긴 하나 강소성 유한요소법에 의한 역추적 방법을 초기 소재 형상을 설계하는 이론적 방법으로 택하여 수행하였으며, 그 과정과 결과를 소개하고자 한다.

2. 이 론

사각형 단면이나 기타 비원형 단면의 판재 성형을 엄밀히 해석하는 것은 난해한 문제를 많이 포함하고 있다. 더욱이 오목한 형상을 갖는 단면인 경우는 그러한 어려움이 더 추가될 수 있다고 생각된다. 따라서 본 연구와 같이 초기 소재 형상을 설계

*대우전자(주)

**성균관대학교 기계설계학과 대학원

***성균관대학교 기계설계학과

하여 그 성형성을 고찰하는 문제에 관한 한 문제를 단순화하여도 유용한 결과를 얻는 데에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 예측하여, 몇가지 가정을 취하였다. 즉, 재료는 강소성체이며, 해석 과정에서 박막 이론을 따른다고 가정하였다.

성형시 펀치 밑바닥 부분의 재료도 변형이 없는 것으로 보았으며, 프랜지 부분에서 유입되는 재료는 굽힘과 마찰 응력을 받으며 유입되나, 유입된 후는 더 이상의 변형이 없이 펀치와 같은 속도로 진행한다고 보았다. 이러한 가정하에서는 굽힘 응력과 마찰 응력을 다음과 같이 표시할 수 있다.⁽¹²⁾

굽힘 응력, σ_B 는

$$\sigma_B = \left(\frac{T_0 \bar{\sigma}}{4\rho} \right) \exp(\mu\theta) + \frac{T_0}{4\rho} \bar{\sigma}$$

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.

마찰 응력, σ_f 는

$$\sigma_f = \frac{2\mu H}{T_0 l}$$

여기서 H 는 소재 가압력이며 l 은 요소의 단면 길이이다.

굽힘 응력은 벽면으로 유입되는 요소에 대하여, 마찰 응력은 프랜지부에 있는 모든 요소의 절점에 대하여 속도 벡터의 반대 방향으로 작용하는 절점력으로 처리하였다.

기타의 관련 이론은 강소성 유한요소방정식의 기본 이론⁽¹³⁾을 적용하였다.

3. 초기 소재 형상 설계 및 실험

본 연구에서는 초기 소재 형상을 결정하는 방법 중 최종 제품의 상태에서부터 초기 소재 형상의 상태로 성형 공정을 역추적하는 방법을 선택하였다.

Fig. 1은 그 과정을 보여준다. 예를 들어 십자형 단면의 컵높이, $H=24$ mm인 경우를 예시하였다. (a)는 초기 소재 형상을 적절히 선정하여 성형하였을 때, 제품에 주름이나 프랜지(flange) 부분이 남지 않는 이상적인 제품을 보여준다. (b)와 (c)는 조금씩 퍼나갈 때의 과정을 보여주며, (d)는 완전히 퍼졌을 때의 상태며, 이것이 곧 (a)를 얻을 수 있는 초기 소재 형상이라 보았다. 이 때

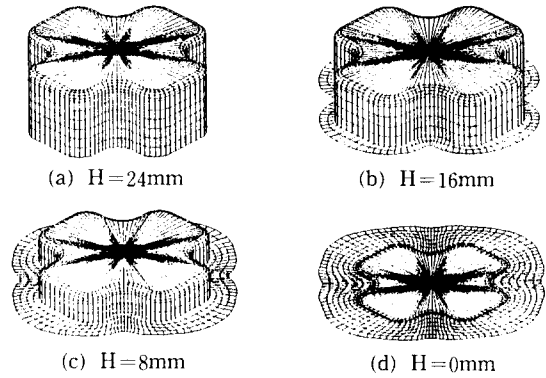


Fig. 1 Calculation of blank shape for deep drawing process ($H=24$ mm)

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)

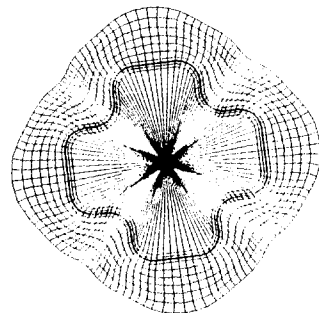


Fig. 2 Calculated blank shape for deep drawing process ($H=24$ mm)

계산에는 실험적으로 얻은 재료의 물성치 등을 사용하였으며, Table 1은 그 값을 보여준다. 재질은 아연 도금 유기 피막 강판을 사용하였다. Fig. 2는 초기 소재 형상의 평면도이며, 이와 같이 시험편을 잘라서 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 실험에 사용한 펀치의 형상을 보여준

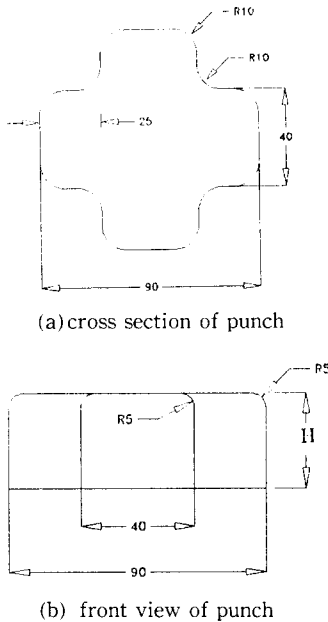


Fig. 3 Geometry of punch for deep drawing process

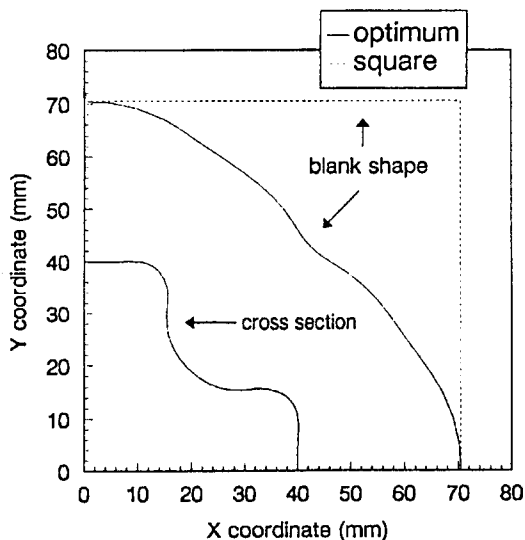


Fig. 4 Comparison of optimum and square blank shape

다. 실험 결과의 비교를 위하여 Fig. 2의 초기 소재 형상에 외접하는 정사각형 단면의 시험편을 Fig. 4와 같이 채취하여 비교 실험을 하였다. 실험 장치는 소재가압력을 임의로 조절할 수 있는 유압 펌프가 부착된 장치를 설계, 제작하여 만능 시험기에 설치한 후 실험하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

앞에서 설계한 소재형상을 편의상 최적소재형상이라 부르기로 한다. 최적소재형상과 이에 외접하는 정사각형 소재형상, 두 가지로 컵높이 $H=15$ mm부터 3~5 mm씩 높이를 증가시켜가며 성형성을 고찰하였다. 그 결과 사각형 소재의 경우는 컵높이가 24 mm를 초과하면서 주름이 생기기 시작하였으며, 이를 억제하기 위하여 소재가압력을 크게 할 경우는 파단되는 결과를 초래하였다. 반면 최적소재형상의 경우는 컵높이 $H=44$ mm까지는 성형이 가능하였으며, 주름과 프랜지(flange)가 거의 없는 대체로 균일한 높이의 제품을 얻을 수 있었다.

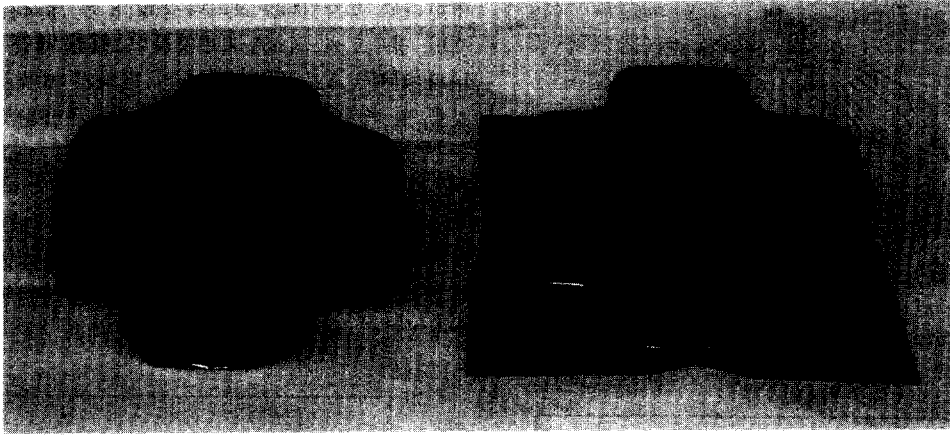
Table 2는 이러한 실험 결과를 보여주며, Fig. 5는 몇가지 경우의 제품 사진이다.

성형된 제품이라 하더라도 두께 분포에 따라 제품의 강도 차이가 있기 때문에 이를 측정하여 비교, 고찰하였다. 두 가지 형상의 소재에 대하여, 각각 컵높이에 대하여, 측정 위치에 대하여, 그리고 이들 측정 위치에서의 두가지 소재형상에 대한 비교 및 이론치를 고찰하였다.

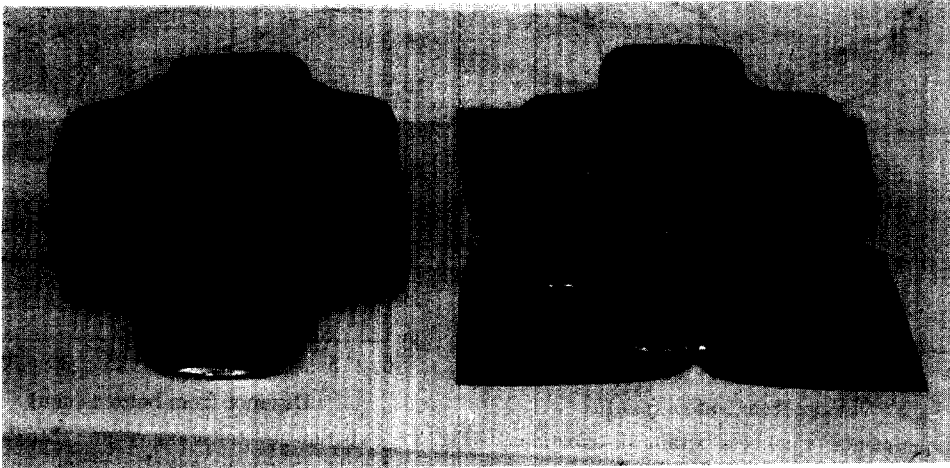
Fig. 6은 제품의 두께 변형률을 측정된 위치 및 방향이다. Fig. 7은 제품의 높이에 따른 두께 분포로써, 단면의 오목한 모서리 부분에 대하여 최적소재형상을 대상으로 측정된 것이다. 최소두께변형률의 큰 변화가 없음을 알 수 있고, 이는 성형중 소재가 비교적 고르게 원활히 유입되고 있음을 반

Table 2 Comparison of formability for two blank shapes

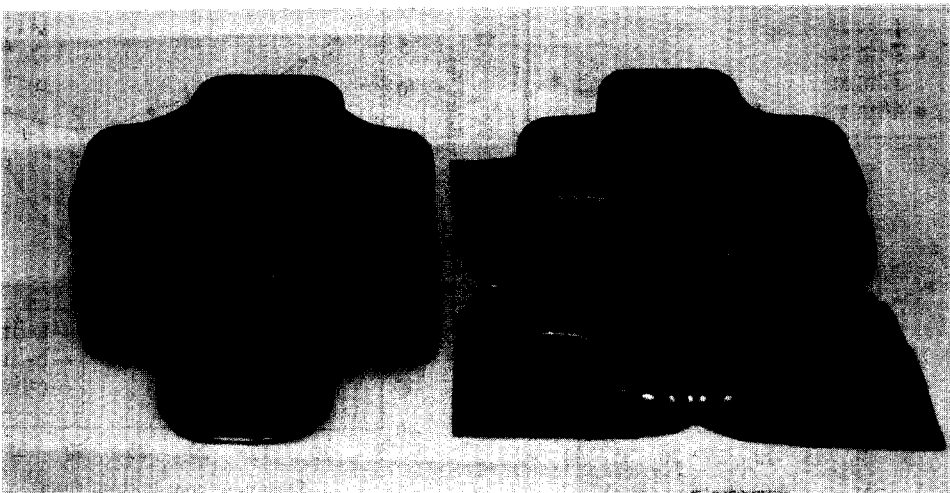
Blank shape	H=24 (mm)	H=32 (mm)	H=40 (mm)	H=44 (mm)	H=48 (mm)
Optimum	24mm	32mm	40mm	44mm	fracture
Square	24mm	27mm (wrinkle)	30mm (wrinkle)	fracture	



(a) $H=24\text{mm}$



(b) $H=32\text{mm}$



(c) $H=40\text{mm}$

Fig. 5 Experimental results from optimum and square blanks

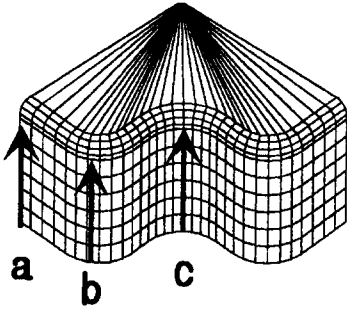


Fig. 6 Lines to measure thickness strain of the product

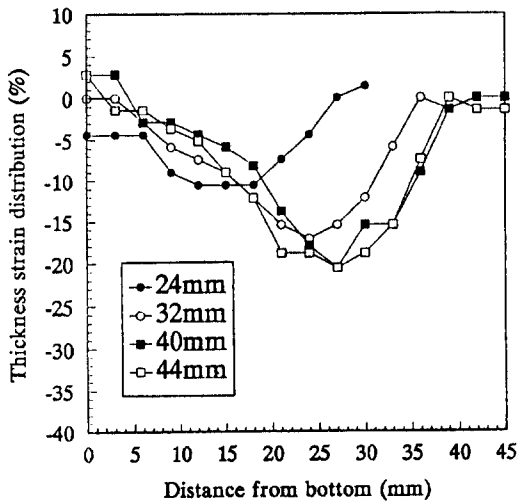


Fig. 7 Experimental thickness strain distributions along c-line for the optimum blanks

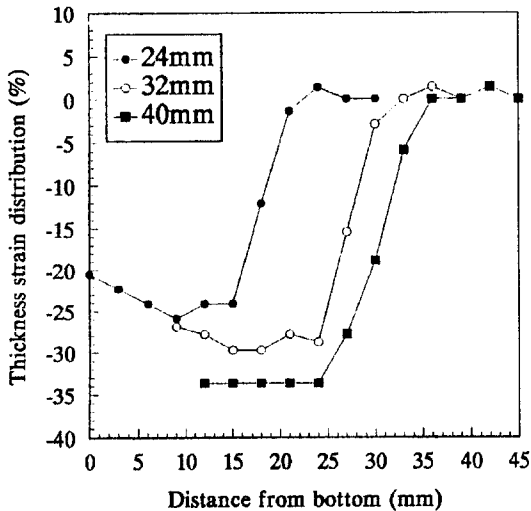


Fig. 8 Experimental thickness strain distributions along c-line for the square blanks

영한다고 생각된다. 그러나 Fig. 8 은 정사각형 소재인 경우로써 최소두께변형률이 훨씬 적을 뿐 아니라 전체적으로 두께변형률의 변화가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 성형중 소재유입을 저해하는 영향을 크게 받고 있음을 반영한다고 사료된다. Fig. 9~Fig. 10 은 각각의 소재형상에 대하여 각각의 측정 위치에 대한 두께변형률분포의 비교이다.

최적소재형상에 비하여 정사각형 소재형상인 경우가 최소두께변형률의 크기가 더 적을 뿐 아니라, 측정방향에 대한 두께변형률의 변화도 더 심하며

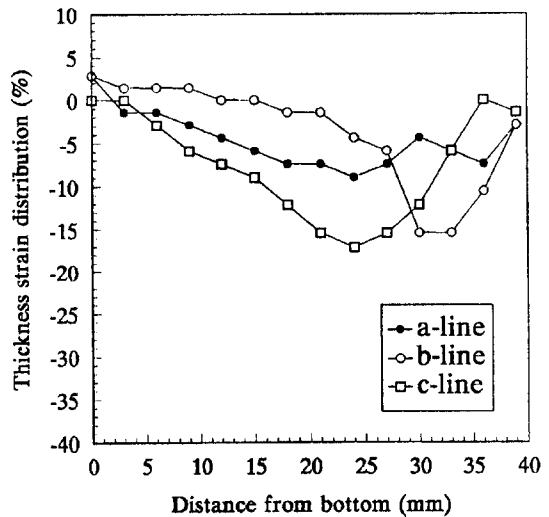


Fig. 9 Experimental thickness strain distributions for the optimum blank (H=32mm)

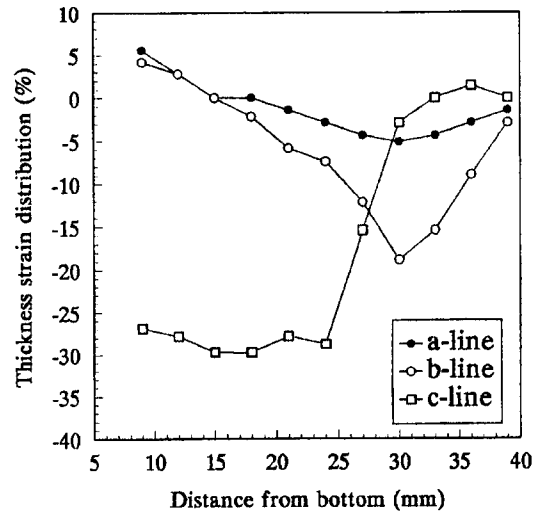


Fig. 10 Experimental thickness strain distributions for the square blank (H=32mm)

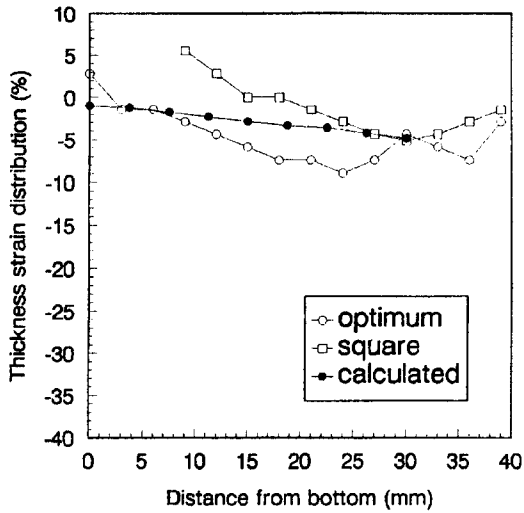


Fig. 11 Comparison of thickness strain distributions along a-line (H=32mm)

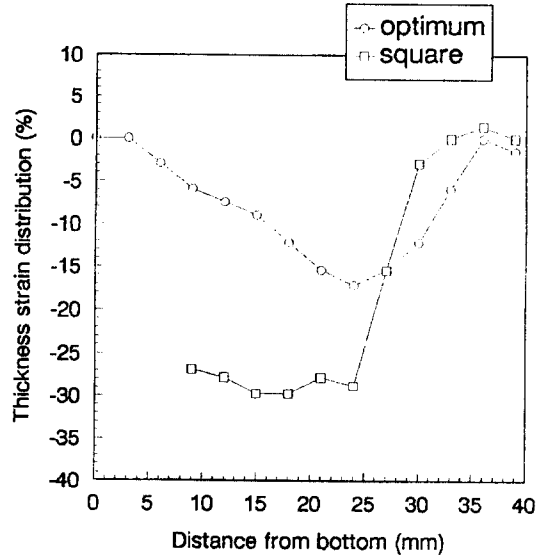


Fig. 13 Thickness strain distributions along c-line (H=32mm)

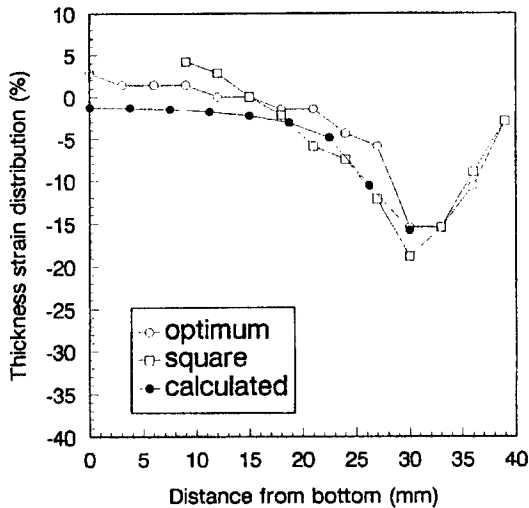


Fig. 12 Comparison of thickness strain distributions along b-line (H=32mm)

이들 현상은 앞의 Fig. 7~Fig. 8의 경우와 유사한 현상임을 알 수 있다.

Fig. 11~Fig. 13은 각각의 측정방향에 대한 두 가지 소재형상에 대한 두께변형률 및 이론치의 비교를 보여준다. 제품의 높이가 32 mm인 경우에 대한 것으로서 이는 성형 한계에 가까운 높이가 아니다. 따라서 Fig. 11~Fig. 12의 a 및 b방향의 두께 변형률은 두 가지 소재형상에서 큰 차이가 없으며 이론치도 실험치에 근사적으로 접근함을 알 수 있

다. 즉, 두께변형률분포의 경향이나 최소두께부위의 위치 등의 예측은 가능함을 보여준다. 그러나 Fig. 13에서, 즉, 제품의 오목한 모서리부위에 대한 두께변형률은 앞의 경우처럼 정사각형 소재인 경우가 두께변형률의 크기가 훨씬 작을뿐 아니라 그 변화도 심하게 나타남을 알 수 있다. 이상의 고찰에서 전반적으로 최적소재형상은 성형시 재료유입이 비교적 원활하며, 그 결과로 두께변화률의 변화도 상대적으로 완만한 반면, 정사각형 소재형상인 경우는 성형중 재료유입을 억제하는 저항을 크게 받으며, 그 결과로 두께변형률의 크기도 더 작을뿐 아니라 그 변화도 심하게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 강소성유한요소법을 이용하여 오목한 단면을 갖는 딥드로잉 제품의 최적소재형상을 설계하였다. 이러한 최적 소재형상과 정사각형 소재형상을 이용하여 성형하고 두께 변형률을 측정, 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오목형 단면을 가지는 제품형상을 선택하여 최적 소재형상을 설계하였고, 실험 결과 등고성이 우수한 제품을 얻을 수 있었다.

(2) 정사각형 소재형상과 최적 소재형상의 실험

결과, 최적 소재형상에 의한 제품이 성형성에서 우월함을 알 수 있었다.

(3) 최적 소재형상으로 성형된 제품이 정사각형 소재형상으로 성형된 제품보다 두께 변형률분포에서 우수하였다.

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

후 기

본 연구는 한국과학재단(과제번호 : 951-1005-076-1)의 지원에 의하여 수행되었습니다. 지원하여 주신데 대하여 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Takashi, Jimma, 1970, "Deep Drawing of Convex Polygon Shells", J. of JSTP. Vol. 11.No. 116., pp. 653~660.
- (2) H. Gloeckl, K. Lange, 1983, "Computer aided design of blanks for deep drawn irregular shaped components", Proc. 11th NAMRC. 243., pp. 243~251.
- (3) T. Jimma, T. Kuwabara, S. C. Choi, 1984, "Researches on the deep drawing of reentrant contour shell", Advanced Technology of Plasticity, Vol. 11., pp. 1091~1096.
- (4) C. H. Toh and Shiro Kobayashi, 1985, "Deformation analysis and blank design in square cup drawing", I. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 25.No. 1., pp. 15~32.
- (5) T. S. Noh, D. Y. Yang, 1987, "An analysis of hydroforming fo regular polygonal boxes", Int. J. Mech. Sci. 29., pp. 139~148.
- (6) 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., pp. 877~890.
- (7) N. Kim, S. Kobayashi, 1986, "Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method", J. Mach. Tool Des. Res. 26-2., p. 125.
- (8) 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.
- (9) K. Chung, O. Richmond, 1992, "Sheet forming process design based on ideal forming theory", NUMIFORM'92, pp. 455~460
- (10) H. Y. Jiang, D. Lee, 1992, "Numerical simulation of sheet metal forming process based on large deformation shell elements", NUMIFORM'92, pp. 485~489
- (11) Li Shunping, 1993, "A study on the determination of blank shapes for deep-drawn parts", Advanced Tech. of Plasticity, pp. 1567~1572.
- (12) 김동원, 1986, "소성학", 청문각, pp. 163~167.
- (13) S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, 1989, "Metal forming and Finite Element Method", Oxford Univ. Press, New York.