

타원형 다단계 디프드로잉 용기의 최적 예비형상 설계에 관한 연구

김 두 환*

(1998년 12월 16일 접수)

A Study on the Optimum Pre-form Design for Multistage Deep Drawing of Oval Shells

Doo Hwan Kim

Abstract

This paper discusses some techniques for the determination of optimum blank size and pre-form design for multi-stepped deep drawing of oval shell. The deep drawing process of oval shape has been regarded as more difficult than that of cylindrical shell because of its complicated behavior of plastic deformation. But there is insufficient information in this area to carry out successful deep drawing work of irregular products such as oval, rectangular, and square shapes. In order to find the optimum conditions, the drawing apparatus for two kinds of pre-form design are built, a series of drawing experiments performed, and thickness stain distributions measured. From the results of these suggested experiments, various optimum process variables are observed and discussed.

Key Words : Blank Size, Pre-Form Design, Oval Shell, Process Variables

1. 서 론

최근 판재성형(sheet metal process) 되고 있는 많은 제품들이 디프드로잉 성형공법에 의해 널리 생산되고 있다. 예를 들면, 자동차나 가전제품에 사용되는 모터 하우징(housing) 부품은 대개 디프드로잉 공법으로 생산되고 있으며 지금까지 최선의 공법으로 여기고 있다. 또한 그러한 제품들의 형상은 대체로 원통형 형상(circular shape)이 대부분이다. 그렇지만 제품의 용도, 상품 디자인의 모양새 그리고 장착공간의 제약 때문에 타원(oval shape), 또는 사각형상(square or rectangular shape)의 제품이 요구되고 있다.

지금까지 디프드로잉 공법에 관한 실험적으로 많은 연구^(1-7, 16)가 수행되어 왔으며, 생산현장에서 많이 이용되고 있다. 그러나 원통형과 간단한 사각 디프드로잉에 관한 연구가 대부분이다.

성형 메커니즘 측면에서 볼 때, 본 연구에서 제안된 이형(irregular shape) 디프드로잉의 변형경로는 원통형보다 훨씬 복잡하고 가공 난이도가 높기 때문에 시행착오를 많이 겪어야 하고 제품개발에 대한 비용도 많이 요구된다. 따라서 복잡한 사각형상이나 타원형상의 디프드로잉 성형에 대한 많은 관심이 집중되고 있으며 동 분야는 중요한 연구과제로 부각되고 있다.

본 실험적 연구에서는 타원형으로 다단계 디프드로잉 되

* 만도기계(주) 생산기술원

는 하나의 제품을 선정하여 성형실험을 실시하였다. 실험을 통하여 제안된 예비형상 및 공정변수에 대해 타당성과 유용성을 논의하고 검증하는 것을 본 연구의 목표로 하였다.

2. 예비형상에 대한 공정설계

Fig. 1은 본 실험적 연구에서 제안된 전형적인 타원형 제품이다. 이 제품의 몸통부 성형에 있어서 무엇보다도 중요한 것은 예비형상 설계이다. 그러므로 예비형상을 어떤 모양으로 결정하느냐에 따라 판재의 성형률과 공정 수 그리고 최종 제품에 대한 정도를 어느 정도 예측할 수 있으며, 때로는 타원형 디프드로잉 가공의 성패에도 큰 영향을 끼치는 중요한 설계인자이다.

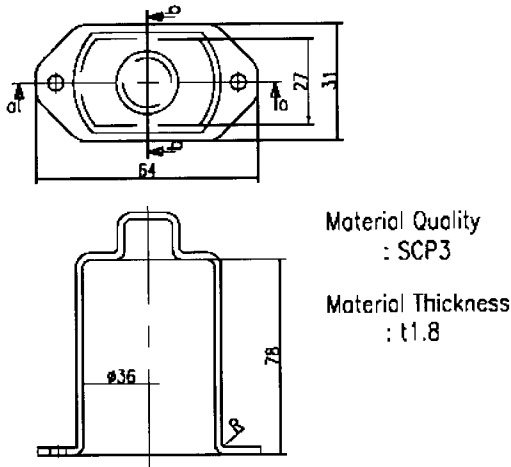


Fig. 1 Typical example of oval shape proposed by the experiments

2.1 블랭크 치수 (flat blank size) 결정

타원형의 최초 블랭크 형상은 원통형보다 복잡하고 치수결정에 있어서도 공정변수가 많다. 원통형의 경우, 소재가 다이 곡률반경(die shoulder radius)에 대해 균등하게 유입(drawing)되지만, 타원형은 소재 유입성이 원통형보다 훨씬 떨어지기 때문에 두께변형이 많이 일어나며 블랭크 치수에도 큰 영향을 미친다. 그러므로 타원형에 대한 최적의 블랭크 치수를 구하는 것이 디프드로잉 성공여부의 첫번째 요건이라고 볼 수 있다.

본 실험적 연구에서 제안된 Fig. 1의 제품에 대한 블랭크 치수계산 역시 원통형과 마찬가지로 표면적을 기준하여 구한다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 기준설정

가장 중요하다. 이 때 기준(a - a line, b - b line 또는 평균 직경)을 어떻게 설정하느냐에 따라서 치수가 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 각각 기준(Da-a, Db-b, Dm)에 따라 계산된 값(theoretical size)과 실험값(De)에 대해 실험을 통하여 비교하고자 한다.

2.2 공정변수(process variables) 조사

타원형의 다단계 드로잉(multistage drawing)에 대한 디프드로잉의 성형성(drawability)을 판단할 수 있는 가장 용이한 척도는 한계 드로잉률(limiting drawing rate, m),⁽⁸⁻¹¹⁾ 또는 한계 드로잉률의 역수인 한계 드로잉비(limiting drawing ratio, β)로 나타낸다. 이것을 간단한 경험식으로 표현하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_1 = d_1 / D, m_2 \sim m_n = d_2 / d_1 \sim d_n / d_{n-1} \quad (1)$$

$$\beta_1 = D / d_1, \beta_2 \sim \beta_n = d_1 / d_2 \sim d_{n-1} / d_n \quad (2)$$

$$D / d_n = \beta_{wr} = \beta_1 \times \beta_2 \sim \beta_n \quad (3)$$

여기서 m 은 한계 드로잉률이며, d 는 각 공정의 직경, n 은 공정 수, D 는 블랭크 직경이다. 또한 β_{wr} 는 각 공정별 β (드로잉비)를 곱한(product) 값으로 총합적인 드로잉비를 내는 경험식이다. 그러나 원통 드로잉과 같이 실험적인 연구로 발표된 것이 거의 없고 현장 기술자의 직관과 경험지식⁽⁶⁻¹³⁾이 대부분이다. 또한 원통형 드로잉의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 간단한 수식으로 나타낼 수 있지만,⁽¹¹⁾ 타원형일 때는 Fig. 1에서 보는 바와 같이

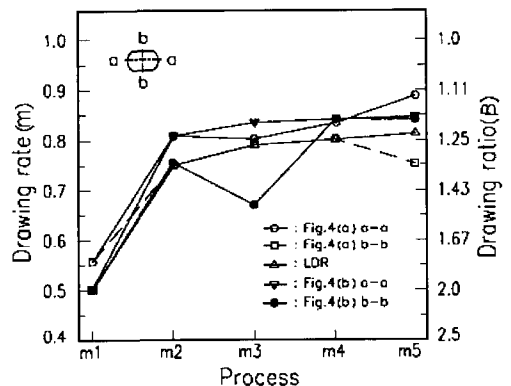


Fig. 2 Variation of drawing rate in each process for pre-forms proposed by the experiments

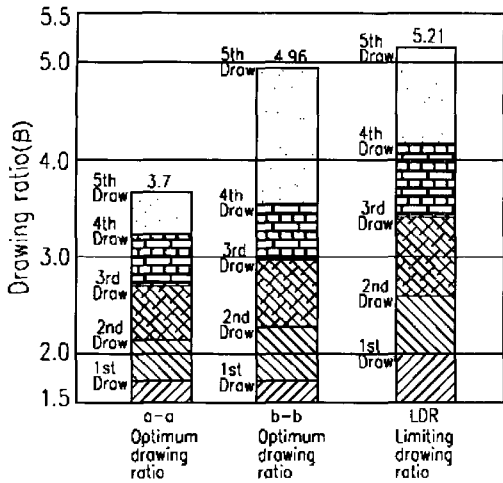


Fig. 3 Comparison of cumulative drawing ratio of optimum drawing ratio and limiting drawing ratio in each process for Fig. 4(a)

이형(irregular shape)이기 때문에, 사각부분을 원통형 조건 그대로 적용할 수가 없다. 이 경우 a - a line을 기준한 드로잉률과 b - b line을 기준한 드로잉률의 값을 서로 다르게 고려하여 최적 드로잉률을 결정해야 함이 타당할 것으로 보인다. 본 실험적 연구에서 제안된 타원형에 대한 초기 드로잉 및 재드로잉에 관한 드로잉률과 총합적인 드로잉비를 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 제안하였다.

두 번째로 원통형과 같이 타원형 디프드로잉 가공에서도 다이 곡률반경(die shoulder radius)이 성형에 큰 영향을 미치는 중요한 공정변수라고 생각된다. 이 경우 소재가 다이 곡률반경을 따라 다이 속으로 유입될 때, 소성변형거동이 원주형상의 각 위치 마다 서로 다르게 일어난다. 특히, 원통부와 직선부에서 주름이나 파단과 같은 성형결함이 예측된다. 따라서 그러한 결함을 방지하기 위하여 다이 곡률반경의 크기를 재료두께의 1~2배로 제한하여 재료의 흐름을 조정하도록 하였다.

마지막으로 고려해야 할 공정변수는 펀치-다이 틈새이다. 몸통부분을 성형 시킬 때, 직선부와 원통부를 동시에 성형하게 된다. 앞에서 언급한 바와 같이 다이 곡률반경을 따라 유입되는 소재가 타원형상에 대해 부드럽게 드로잉 되도록 할 수 없기 때문에, 원통부와 네 모서리부에서는 두께가 증가되고 반대로 측벽 직선부에서는 두께가 심하게 감소될 것으로 예측하여 펀치-다이 틈새에 대한 여유를 소재 두께의 약10% 정도 주어 공정변수를 결정하였다.

2.3 몸통부(body) 예비형상(pre-form) 결정

Fig. 4(a), Fig. 4(b) 및 Fig. 4(c)는 본 실험적 연구에 제안된 예비형상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 타원형 디프드로잉의 예비형상에 대한 공정설계를 3가지 형태로 분류하여 보았다. 첫번째 Fig. 4(a)에서 보여주고 있는 예비형상에 대한 블랭크 및 초기 드로잉의 예비형상은 원형으로 성형하고, 재드로잉의 예비형상에 대해서는 타원형으로 성형한 방법이다. 특히, 그림에서 보는 바와 같이 Fig. 1의 b - b line방향에 대한 예비형상을 타원 곡면으로 제안한 것이다. 두 번째 Fig. 4(b)는 Fig. 1의 b - b line 방향에 대해 예비형상을 최종 제품과 평행하게 직선으로 성형 되도록 제안한 방법이다. 마지막 Fig. 4(c)는 블랭크와 재드로잉 공정의 예비형상을 모두 원형으로 예비성형을 한 방법이다.

본 실험적 연구에서는 위에 언급한 예비형상 중 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b) 2종류에 대해 비교하고자 한다. 특히, 제안된 각각의 예비형상에 대해 최적 드로잉률, 다이 곡률반경 그리고 4모서리부의 두께변형률분포에 대한 펀치-다이 틈새를 고찰해보고자 한다.

Fig. 2와 Fig. 3은 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 대해 초기 드로잉 및 다단계 재드로잉에 관한 드로잉률과 총합적인 드로잉비를 각각 나타낸 것이다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 a5 방향에 대한 최적 드로잉률은 $0.27(K=d_{11}/D)$ 이다. 이 방향에 대한 드로잉률은 안전하게 성형시킬 수 있는 최적 값이라고 볼 수 있지만, 원통부는 오히려 직선부에 비해 가공여유가 많다. 그러나 b5 방향의 드로잉률을 살펴보면, 2종류 모두 한계에 이르고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서는 3차 공정에 대한 드로잉률이 2차 공정보다 무려12% 정도 낮다. Fig. 4(a)에서도 최종 몸통 성형공정에 대한 드로잉률이 한계 드로잉률 보다 훨씬 떨어지기 때문에 2종류 모두 두께변형이 많이 일어날 것으로 예측된다. 그렇지만, Fig. 2에서 보여주는 바와 Fig. 4(b)보다는 Fig. 4(a)의 드로잉률 변화가 비교적 균형을 이루고 있기 때문에 최적 예비형상에 가까운 공정설계라고 예측된다. 그러나 최종 성형 공정(m5)의 드로잉률이 Fig. 4(b)보다 낮기 때문에 어떤 문제를 초래하게 될지는 실험을 통해서 그 결과를 고찰해보기로 한다. 이상에서 언급한 바와 같이 각각의 주어진 드로잉률과 a - a line 방향의 R곡면 형상 및 직선의 예비형상에 대해 3절에서와 같이 실험을 하고 실험 결과를 비교하여 최적 드로잉에 적합한 조건들을 결정하기로 한다.

3. 실험방법

본 실험적 연구에서는 Fig. 1의 제품에 대해 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에서 보여주는 바와 같이 예비형상에 대한 성형공정을 5단계의 디프드로잉 공법으로 제안하여 실험을 실시하였다.

3.1 실험재료

실험재료는 두께 1.8 mm, 블랭크 직경 131 mm의 SCP3 재료를 디프드로잉 소재로 사용하였다. 사용된 소재의 특성은 다음과 같다.

재질 : SCP3, 초기 소재 두께 : 1.8 mm

T. S : 30 kg/mm², Elongation : 48%

수직이방성계수 : $r = 1.77$

3.2 실험방법

실험용 장비는 500t.f 기계식 트랜스퍼 프레스이며, 디프드로잉의 성형속도는 20s.p.m에서 실험을 실시하였다. 실험용 형 구조는 Kim^[4]이 발표한 측벽 두께감소를 최소화하기 위한 형 구조로 제안하였으며 드로잉에 대한 형 구조를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 이 구조는 측벽 두께감소의 영향을 줄이기 위하여 일반적인 드로잉 구조와 달리 제품의 위치를 결정해주는 슬리브 링(sleeve ring)과 킬러 핀을 사용하지 않고 평평한 블랭크 홀더에 높은 압력을 주어 다이 속에 제품을 강제로 밀어 넣는 방법(push back type)의 형 구조이다.

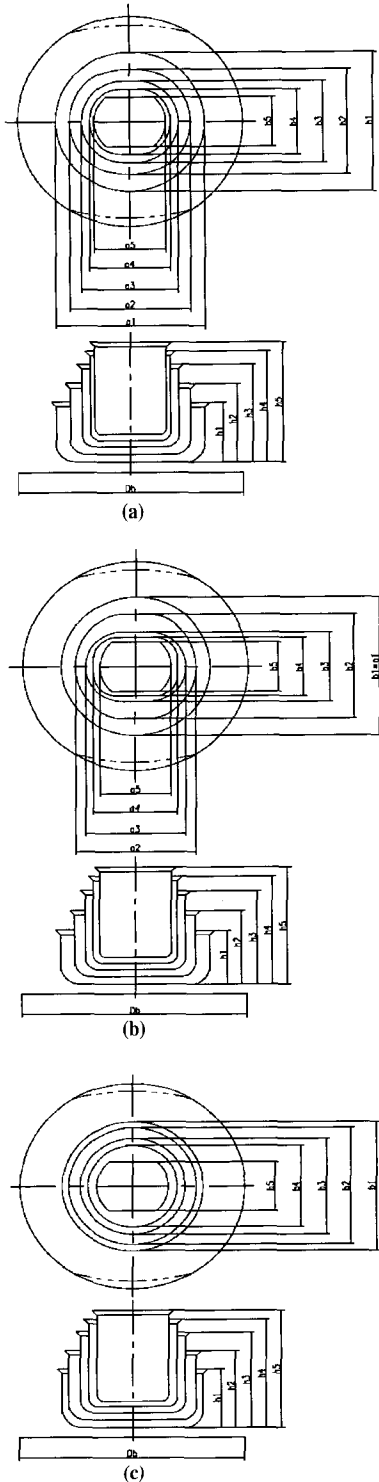


Fig. 4 Various pre-forms of body shape in each process proposed by the experiments

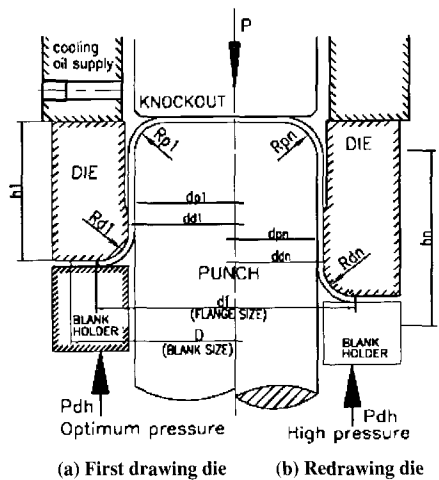


Fig. 5 Schematic view of pre-form for deep drawing process proposed by the experiments

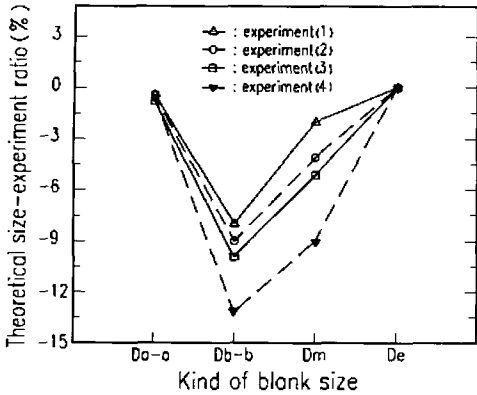


Fig. 6 Comparison of blank diameter of the theoretical methods and the experiments

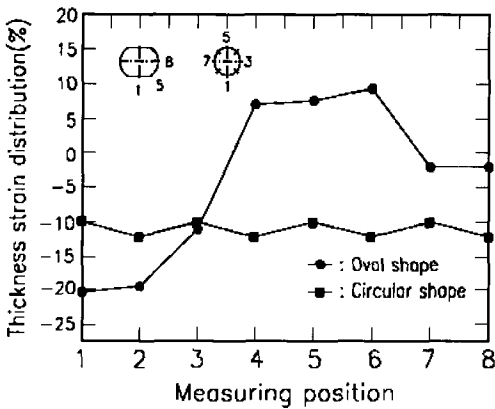


Fig. 7 Variations of thickness strain in the final products with respect to the pre-forms in Fig. 4(a)

각 공정별 다이 곡률반경은 Kim⁽¹⁵⁾이 제안한 R 형상 (radial type)으로 하였으며, 적합한 R의 가공 조건을 찾기 위하여 실험 값 보다 작게 만들어진 다이 곡률반경을 약간씩 늘려가면서 최적의 가공조건을 찾기 위한 실험을 실시하였다. 또한 편치-다이 틈새도 위의 실험방법과 동일하게 일련의 실험을 통해 최적의 가공조건을 얻기 위한 실험을 실시하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

블랭크 치수에 대해 이론적 치수와 실험을 통하여 얻은 실험 데이터를 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 이끌어

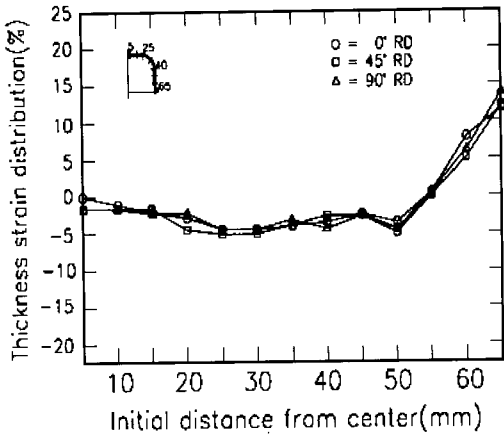
낼 수가 있었다.

(1) b - b line(Db-b)을 기준한 값이 가장 오차 범위가 넓고 치수가 크게 부족하였다.

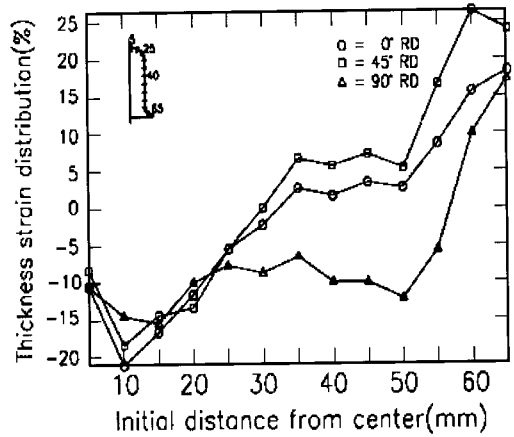
(2) 평균직경(Dm)으로 계산한 값 역시 치수가 부족하였으나 적정치수보다는 약간 적었다.

(3) Fig. 6에서 보는 바와 같이 a - a line(Da-a)을 기준한 값이 실험(De)과 가장 잘 일치하였다. 그러나 실험 데이터 보다 다소 크기 때문에 트리밍 여유(trimming allowance)를 신중히 고려해야 함을 알 수 있었다. 또한 드로잉성을 향상시키기 위해 b - b line 방향의 블랭크 형상을 타원형으로 하는 것이 타당하지만, 생산성 측면을 고려해 볼 때 원형으로 하는 것이 더 바람직함을 알 수 있었다.

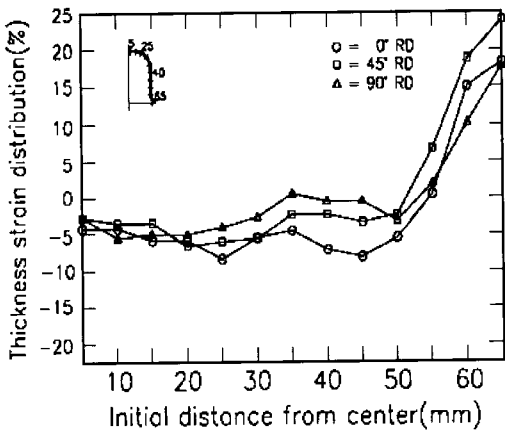
Fig. 4(a)의 드로잉 및 예비형상에 대한 공정변수에 관해 실험한 결과, Fig. 8과 같은 두께변형률분포의 결과를 얻을 수 있었다. 예측한 바와 같이 a - a line방향의 두께감소는 그다지 일어나지 않았지만, b - b line방향의 직선부는 크게 감소되었다. 특히, 측벽 중앙 하단부에서 두께감소 현상이 심하게 일어났음을 Fig. 8(e)에서 보여주고 있다. Fig. 7은 실험적 연구를 통해서 조사된 틈새와의 관련 측벽 두께변형률분포를 나타낸 것이다. 공정변수 조건에서 예측한 바와 같이 4모서리부 쪽으로 소재가 직선부보다 많이 유입되어 두꺼워진(thickness thickening) 것으로 보인다. Fig. 8(e)의 앞 공정 Fig. 8(d)에서도 같은 경향을 보이고 있다. 또한 그림에서 보여 주는 바와 같이 90° (b - b line)보다 0° (a - a line)방향의 측벽두께가 크게 두꺼워진 것은 직선부보다 소재가 원활히 잘 유입되었기 때문인 것으로 보이며, Fig. 8(e)의 연속 후 공정에도 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 8(e)의 90° RD(b - b line)에서 나타내는 바와 같이 원통부와 반대로 직선부 측벽에서는 두께감소(wall thickness thinning)가 심하게 일어났다. 이 현상은 직선부를 성형할 때, 측벽부에 주름이 발생치 않도록 다이 곡률반경을 원통부보다 작게 주었기 때문에 소재 유입이 부족하여 두께감소가 크게 일어난 것으로 고찰되었다. 또한 b - b line의 드로잉률에 대해 Fig. 2에서 언급한 바와 같이 한계 드로잉률 보다 낮기 때문에 다단계 드로잉성이 떨어져 두께변화에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 그런데 이러한 문제들은 타원형 디프드로잉에서 피할 수 없는 현상이라고 볼 수 있다. Fig. 9는 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 직선부에 대해 실험결과를 서로 비교하여 고찰해본 것이다. Fig. 4(b)가 Fig. 4(a) 보다 두께변형이 심하게 일어났다. 특히, Fig. 4(b)의 5공정에서 직선 하단부위가 국부적으로



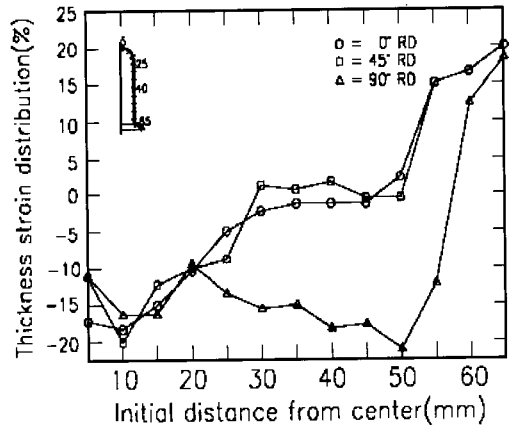
(a) First process



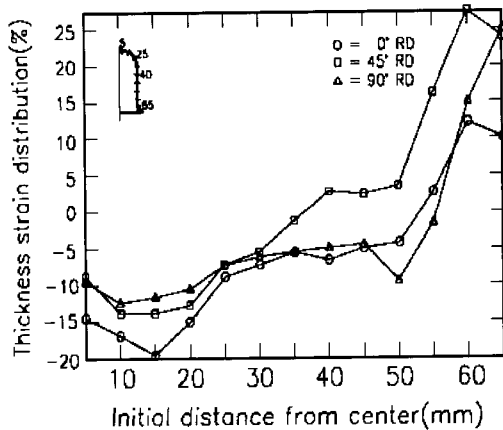
(d) 4th process



(b) Second process



(e) 5th process



(c) Third process

Fig. 8 Variations of thickness strain distribution in each process of deep drawing for oval shell, Fig. 4(a)

심한 넥킹이 일어나 측벽두께가 얇아졌으며, 또한 체적부족 현상이 발생하여 성형이 불가능하였다. 실험결과와 두께변형률분포는 Fig. 9에서 보여주는 바와 같다.

Fig. 4(c)에 대한 데이터는 생략하였지만, 역시 Fig. 4(b)와 같은 문제점들이 발생하였고 양호한 결과를 얻기까지 상당한 시행착오와 개발비용 그리고 시간이 소요되었기 때문에 이상적인 공법이라고 볼 수 없었다. 특히, 4공정에서 5공정으로 성형 시킬 때, 드로잉성이 크게 떨어지기 때문에 5공정의 다이 곡률반경 선택이 무엇보다도 중요하다 것을 고찰하였다. 그러나 경우에 따라 형 제작이 용이하기 때문에 종종 응용될 수 있는 형상이라고 볼 수 있다.

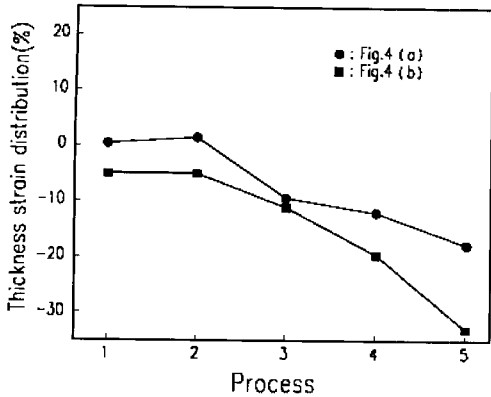


Fig. 9 Comparison of thickness stain distribution between Fig. 4(a) and Fig. 4(b)

이상과 같이 실험적 연구를 통해서 제안한 방법들을 여러 측면에서 고찰해 본 결과, Fig. 4(a)가 최적에 가까운 예비성형 형상이라고 볼 수 있으며, 최적 예비형상 설계가 타원형 디프드로잉의 성공여부에 크게 영향을 미치는 공정변수라는 것을 고찰할 수 있었다.

5. 결 론

본 실험적 연구를 통해서 제안한 타원형 디프드로잉의 예비형상에 대해 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

첫째, 블랭크 치수결정은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 장 방향을 기준(Da-a)으로 한 것이 실험(De)과 가장 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

둘째, 타원형은 장.단방향의 드로잉성 조건을 동일하게 할 수가 없다. 원통부는 드로잉성이 양호하지만, 직선부는 항상 드로잉성이 떨어지기 때문에 가능한 한 한계 드로잉률(limiting drawing rate, LDR) 보다 크게 적용하여 예비형상을 설계하는 것이 바람직하다.

세째, 다이 곡률반경과 편치-다이 틈새는 1회에 최적 조건을 찾을 수 없기 때문에, 가능한 최소값으로 만들어 실험을 통해 최적조건을 찾는 것이 가장 바람직하며 개발비용도 적게 소요됨을 알 수 있었다.

넷째, 다단계의 재드로잉에 대한 예비형상은 Fig. 4(a)와 같이 타원모양으로 설계하는 것이 가장 바람직하며, 위에서 언급한 바와 같이 공정 수가 증가하더라도 공정간 줄임양(percent of reduction)을 적게 하는 것이 생산성을

높이고 제품품질을 향상시킬 수 있는 좋은 공정설계라고 할 수 있다.

다섯째, 두께변형률분포에 대해 원통형과 비교해본 결과, 원통부는 원통형 드로잉보다 적게 감소되었지만, 직선부에서의 두께가 크게 감소되었음을 고찰할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) F. Liu and R. Sowerby, 1991, "The Determination of Optimum Blank Shapes When Deep Drawing Prismatic Cups", J. Materials Shaping Technology, Vol. 3, pp. 154~159.
- (2) S. A. Majlessi and D. Lee, 1993, "Deep Drawing of Square-Shaped Sheet Metal Parts, Part 1: Finite Element Analysis", Transactions of the ASME, Vol. 115, pp. 102~109.
- (3) J. H. Vogel and Lee, 1990, "An Analysis Method for Deep Drawing Process Design", J. Mech. Sci. Vol. 32, pp. 891~907.
- (4) T. Jimma and T. Kuwabara, 1989, "Analyses of Deep Drawing", Elsevier Applied Science, pp. 207~240.
- (5) Noritoshi IWATA, Masao MATSUI and MAN-ABU GOTOH, 1995, "Finite-Element Simulation of Deformation and Breakage in Sheet in Sheet Metal Forming", JSME International Journal, Vol. 38, No. 2, pp. 289~295.
- (6) Takaji MIZUNO and Daixi ER, 1997, "Experiment on Rectangular Cup Drawing of Sheet Metal", J. of the JSTP, vol. 38, No. 435, pp. 7~74.
- (7) Takaji MIZUNO and Daixin ER, 1997, "Deformation of Corner Region and Forming Limit in a Square Cup Drawing", J. of the JSTP, vol. 38, No. 440, pp. 70~72.
- (8) 太田 哲, 1990, "プレス加工と型技術", 日刊工業新聞社, pp. 69~72, pp. 121~153.
- (9) Romanowski, E., 1959, "Handbook of Blanking Technology (in Germany)", Berlin, VER Verlag Technik
- (10) 日刊工業新聞社 編集委員會 編, 1990, "新プレス加工データブック", pp. 233, pp. 260~267.

- (11) 김두환, 1998, “원통형 용기의 다단계 디프 드로잉 공정설계에 관한 사례 연구”, 한국소성가공학회 '98춘계학술대회 논문집, pp.160~167.
- (12) SCHULER CO. , 1962, “METAL FORMING”, pp.47~55.
- (13) 日本 塑性加工學會 編, 1994, コロナ社, “プレス絞り加工”, p. 259.
- (14) 김두환, 1998, “원통형 디프 드로잉 용기의 벽 두께 감소 최소화에 관한 실험적 연구”, 한국소성가공학회지, 제7권, 제4호, pp.393~399.
- (15) 김두환, 1999, “원통형 용기의 다단계 디프 드로잉에 대한 다이 곡률반경 및 틈새의 영향”, 한국소성가공학회지, 제8권, 제3호, pp.262~268 .
- (16) 김두환, 1998, “스테인리스 강 STS305의 디프 드로잉 가공에 관한 실험적 연구”, 한국소성가공학회지, 제7권, 제5호, pp. 439~444.