

자동차 YOKE 제품의 타원용기 성형에 관한 연구

박동환*, 배원락*, 박상봉**, 강성수***

A Study on Elliptical Cup Drawing of YOKE Products for Automobile

Dong Hwan Park*, Won Rak Bae*, Sang Bong Park** and Sung Soo Kang***

ABSTRACT

During the deep drawing process an initially flat blank is clamped between the die and the blank holder after which the punch moves down to deform the clamped blank into the desired shape. In general, sheet metal forming may involve stretching, drawing, bending or various combinations of those basic modes of deformation. The deformation problems of sheet metal working involve non-linearity in geometry and material. In this work, The punch load and thickness strain of electro-galvanized sheet steel (SECD) for elliptical deep drawing are examined under the various process conditions including, punch shape radius, die shape radius. The changes of punch load and thickness strain distribution of the deformed elliptical cup are affected by the size of each die shape radius.

Key Words : Elliptical cup(타원용기), Elliptical deep drawing(타원형 디프 드로잉), Punch load(펀치 하중), Thickness strain(두께 변형률)

1. 서론

디프 드로잉(deep drawing) 공정은 펀치 주위의 재료를 펀치의 하강과 함께 다이 속으로 끌고 들어가면서 성형시키는 것으로, 재료의 성형 조건이나 금형의 설계 조건이 적절하지 못하면 재료가 유입되면서 플랜지 부위에서 주름(wrinkling)이 발생하거나 펀치 어깨부에서 파단(fracture)이 일어나는 결함이 발생한다. 따라서 이러한 결함이 생기지 않는 작업 조건으로 설계할 필요가 있다^(1, 2).

금속 박판의 디프 드로잉에서 축대칭 형상의 성형에 대해서는 많은 연구가 이루어졌지만⁽³⁾, 비축대칭 타원형상의 성형에 대해서는 아직 연구가 미미하다^(4, 5). 디프 드로잉 공정이라 하면 일반적으로

축대칭 또는 원형의 디프 드로잉이라 하는데 여기서는 2축 대칭을 가지는 타원형 디프 드로잉 공정에 대해서 연구하였다. 비축대칭 형상의 성형일 때는 축대칭의 경우와 달리 성형 윤곽의 위치에 따라 변형상태가 다르고 재료의 유동이 불균일하다. 그로 인해 펀치 어깨의 하중을 부담하는 부분에서 파단균열이 발생하게 될 때에 인접부분에서 억제작용을 받는 효과가 나타나고, 플랜지부에서는 돌레방향으로 재료의 이동이 발생하여 변형의 완화가 이루어진다. 이러한 현상들은 성형성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다^(6, 7).

소재의 재질, 펀치 형상반경(R_p) 및 다이 형상반경(R_d), 윤활 조건, 가공속도, 블랭크 홀터력, 펀치와 다이의 클리어런스(clearance) 등 매우 많은 공정

2001년 2월 27일 접수
* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** 동의공업대학 금형설계과
*** 부산대학교 기계공학부

변수들이 영향을 미치는데, 이러한 공정변수 중에서 편치 및 다이 형상반경이 디프 드로잉 성형에 미치는 영향에 대해서 연구가 진행되고 있다⁽⁸⁻¹⁵⁾. 비축대칭의 타원형 디프 드로잉 제품이므로 블랭크 형상을 최적으로 결정하는 것도 중요하다. 여기서는 몇 번의 블랭크 설계와 시행착오를 통하여 최종 블랭크 형상을 결정하였다.

본 연구에서는 타원용기의 디프 드로잉 성형 후에 가장 큰 영향을 미치는 편치 및 다이 형상반경을 설계변수로 정하여 형상반경의 크기에 따른 두께변형률 분포 및 편치하중의 변화에 대해 비교 연구하였다.

2. 타원용기 편치하중의 이론적 배경

2.1 코너부 드로잉

타원용기의 디프 드로잉은 네 코너부에서 반경 방향 인장응력의 영향을 받으면서 다이 형상반경 (die shape radius)을 향하여 점차 드로잉 되고 계속적으로 감소하는 반경의 영향은 원주 압축응력을 유발하여 플랜지의 두께를 증가시킨다. 이러한 원주 압축응력으로 인해 주름(wrinkling)이 예상되며 이를 방지하기 위해 블랭크 홀더력(blank holding force)이 요구된다. 또한, 다이 위를 통과할 때 인장 응력을 받아 소성굽힘(bending)이 일어나며, 다시 편치와 다이 사이에서 타원형의 수직벽을 형성하기 위해 인장을 받아 소성펴짐(unbending)이 일어난다.

반경방향 미소요소의 평형방정식에서 블랭크 홀더에 의한 하중은 실제의 변형을 고려하여 블랭크 가장자리에만 압축 응력이 작용한다고 보면 평형방정식은 (1)과 같다. 재료는 가공경화를 받지 않았다고 가정하고 등가응력 대신 재료의 평균 항복 응력 (\bar{Y})을 사용하면 임의의 반경 r 에서 반경 방향 드로잉 응력 σ_r 은 (2)식과 같다^(6, 7). σ_θ 는 원주방향 응력이고, \bar{R} 는 수직 이방성 계수이다. r_0 는 등가 블랭크 반경이고, r_c 는 소재가 다이 윤곽을 벗어날 때의 반경이다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_r = \bar{Y} \sqrt{\frac{2+2\bar{R}}{1+2\bar{R}}} \ln \frac{r_0}{r_c} \quad (2)$$

만일 F 가 블랭크 홀더력이라면, 접촉면에서의 마찰저항을 이기기 위하여 요구되는 반경방향 마찰 응력 σ_f 는 다음과 같다. 다이 윤곽에서 마찰을 고려하기 위해 σ_r, σ_f 에 벨트장력 원리를 이용하여 $e^{\mu\alpha}$ 를 보정한다.

$$\sigma_f = \frac{2\mu F}{ct} \quad (3)$$

블랭크 소재가 다이 윤곽을 따라 굽힘을 받는데 필요한 응력 σ_b 는 다음과 같다.

$$\sigma_b = \frac{\bar{Y}t}{4R_d} e^{\mu\alpha} \quad (4)$$

블랭크 소재가 다이 윤곽을 떠날 때 굽힘을 펴는 응력이 발생하게 되며 굽힘을 펴는 응력 σ_u 는 다음과 같다.

$$\sigma_u = \frac{\bar{Y}t}{4R_d} \quad (5)$$

따라서 코너부 드로잉 작업하중 P_c 는 (2), (3), (4) 그리고 (5)식에서 다음과 같다. 여기서 C 는 코너부 길이이고, μ 는 마찰계수이다.

$$P_c = ct \sin \alpha [(\sigma_r + \sigma_f)e^{\mu\alpha} + \sigma_b + \sigma_u] \quad (6)$$

2.2 직선부 드로잉

타원형의 직선부는 코너부와 달리 플랜지가 다이를 통과할 때 압축을 받지 않는다. 타원형 직선부분의 금속유동은 먼저 소재가 가공경화를 받지 않고 크기도 변함없이 단순히 다이 윤곽을 향하여 미끄러져 들어가다가 다이 윤곽위를 통과하면서 굽힘변형을 받게된다. 또한, 타원형의 직선벽을 형성하기 위해 인장(stretching)을 받고 마지막으로 편치 윤곽위에서 굽힘을 받으면서 편치바닥으로 유동하게 된다. 타원형의 직선부분은 원주방향의 압축응력이 존재하지 않은 상태로 블랭크 홀더와 다이 사이의 마찰과 다이 윤곽을 전후하여 굽힘과 펴짐이

일어난다. 다이 윤곽의 마찰을 고려하면, 마찰응력은 (7)식과 같다. 여기서, α 는 다이와 소재의 접촉 각이고, b 는 직선부 길이이다.

$$\sigma_{sf} = \frac{2\mu F}{bt} e^{\mu\alpha} \quad (7)$$

블랭크 소재가 다이윤곽을 따라 굽힘을 받는데 필요한 응력은 코너부분의 굽힘응력과 같다.

$$\sigma_{sb} = \frac{\bar{Y}t}{4R_d} e^{\mu\alpha} \quad (8)$$

블랭크 소재가 다이윤곽을 떠날 때 굽힘을 펴는 응력이 발생하게 되며 이 또한 코너부분과 같다.

$$\sigma_{su} = \frac{\bar{Y}t}{4R_d} \quad (9)$$

따라서 직선부 드로잉 작업하중 P_b 는 (10)과 같다.

$$P_b = bt \sin\alpha (\sigma_{sf} + \sigma_{sb} + \sigma_{su}) \quad (10)$$

2.3 총 편치하중

타원형 디프 드로잉은 원호로 이루어진 장변부와 직선으로 이루어진 단변부 및 장변부와 단변부를 연결하는 코너부로 나눌 수 있다. 타원형 디프 드로잉에 대한 원리는 코너부분과 직선부분이 이웃에 연속해 있어서 독립된 직각굽힘과 네 코너부와 장변부를 합친 독립된 원통컵 드로잉의 조합으로 타원형 디프 드로잉을 고려할 수 있다. 총 편치하중은 네 코너부와 장변부를 원통으로 해석하여 구하고 이웃에 연속한 단변부의 굽힘을 조합하여 고려할 수 있다.

$$P = P_c + P_b \quad (11)$$

또한, 이 힘은 타원용기 성형중에 블랭크 소재가 진단되는 파단력보다 크면 성형중에 파단을 일으키게 된다. 여기서, 파단하중 P_F 는 용기가 파단되는 하중값이다. 전체 드로잉 길이 L 은 원형일 때 $L = \pi d$ 이다.

$$P < P_F \text{ (파단하중)} \quad (12)$$

$$P_F = Lt \sigma_s \quad (13)$$

식(13)의 파단하중은 실제보다 크게 나타나므로 용기가 파단되지 않고 성형되었다면 최대 인장강도에 도달하지 않았다는 것을 의미하므로 다음 식 (14)를 적용한다. 여기서 σ_Y 는 항복응력이고, σ_s 는 인장강도이다.

$$P = Lt \frac{\sigma_s + \sigma_Y}{2} \quad (14)$$

실러(Shuler)의 실험식에 의한 최대 편치하중을 구하는 식은

$$P_{\max} = 3(\sigma_s + \sigma_Y)(D - d_2 - R_d)t \quad (15)$$

여기서, P_{\max} : 최대 드로잉력, D : 블랭크 직경, d_2 : 다이의 구멍직경, R_d : 다이 형상반경이다.

3. 타원용기 실험

3.1 인장시험

실험에 사용된 재료는 자동차용으로 사용되는 1.6mm 두께의 디프 드로잉용 전기아연도금강판(SECD)이다. Fig. 1은 인장 시험한 시편으로써 압연 방향에 대해서 0° , 45° , 90° 방향으로 인장시험을 하였다. 이렇게 하여 얻은 소성변형비를 R_0 , R_{45} , R_{90} 등으로 표시한다. 소성 이방성 재료의 경우에는 R_0 , R_{45} , R_{90} 의 값을 측정하였을 경우 평균 소성변형비 \bar{R} 는 수직 이방성으로 다음과 같이 계산한다. $\bar{R} > 1$ 이므로 두께방향의 변형저항이 커서 디프 드로잉용 재료로서 유리하다.

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} = 2.64 \quad (16)$$

소성변형비의 평면 이방성은 디프 드로잉에서의 귀(ear) 높이 발생과 밀접한 관계가 있으므로 평

면 이방성 ΔR 는 다음과 같다. $\Delta R > 0$ 이므로 디프 드로잉시 $0^\circ, 90^\circ$ 에서 귀 발생을 짐작할 수 있다.

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} = 1.92 \quad (17)$$

소성변형비의 Rankford값 R 는 비압축성 조건 ($\epsilon_l + \epsilon_w + \epsilon_t = 0$)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \epsilon_w / \epsilon_t = -\epsilon_w / (\epsilon_l + \epsilon_w) = 2.96 \quad (18)$$

Table 1은 실험에 사용된 재료의 기계적 성질을 나타낸다.



Fig. 1 Tensile specimen

Table 1 Mechanical properties of SECD

Direction	Young's modulus [Gpa]	Yield strength [Mpa]	Tensile strength [Mpa]	Elongation [%]
0°	50.9	182	426	48.4
45°	54.5	200	433	41.4
90°	58.5	205	412	48.2
Average	54.6	195.7	423.7	46

3.2 실험장치

본 연구에서는 트랜스퍼(transfer) 금형을 이용하여 자동차 요크(yoke) 제품의 타원용기를 초드로잉, 제2 공정, 제3 공정에서 디프 드로잉으로 성형한다. 타원용기의 디프 드로잉 실험은 100ton 유압프레스에 금형을 장착하고, 유압펌프에 의한 다이 쿠션(die cushion)으로 블랭크 홀더력을 조절하면서

실험을 수행하였다. Fig. 2는 타원형 디프 드로잉 제품 성형을 위한 실험장치를 나타낸다. 이것은 블랭크 홀더력을 임의로 조절할 수 있는 다이 쿠션(die cushion)과 램(ram)의 공정별 행정(stroke)을 제어할 수 있는 위치 검출 장치를 갖추고 있다. Fig. 3은 프레스 내에 장착되어 있는 타원형 디프 드로잉 금형을 나타낸다. 프레스 기계의 램에 상형, 볼스터(bolster)에 하형을 프레스와 금형의 중심을 일치하게 하여 유압클램프에 의해 자동으로 클램핑하였다. 블랭크 홀더 압력이 너무 크면 컵이 성형되지 않고 찢어지는 현상이 나타나고, 작으면 주름이 발생되어서 적당한 블랭크 홀더 압력을 2kgf/mm^2 로 선정하여 실험하였다. 윤활제는 수용성 소성가공유로서 일반적인 드로잉유를 사용하였다.

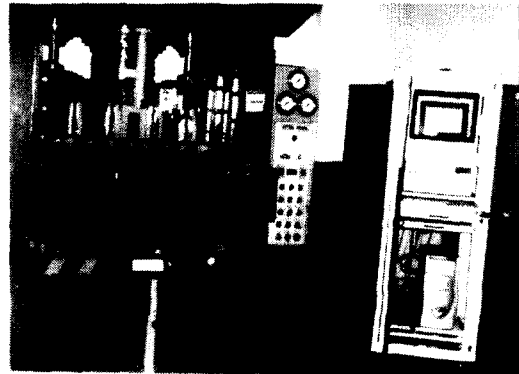


Fig. 2 Experimental equipment for deep drawing

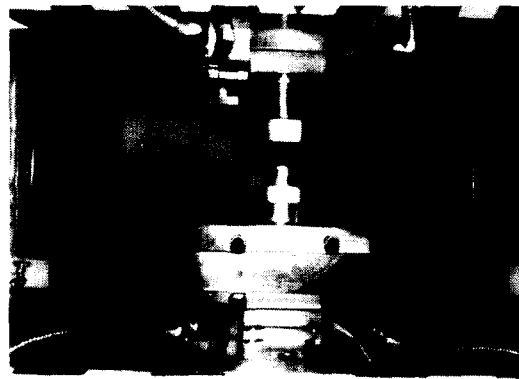


Fig. 3 Die of elliptical deep drawing

3.3 실험방법

타원형 디프 드로잉 공정에서 펀치 형상반경이 6.4이고, 다이 형상반경이 Table 2와 같이 초드로잉, 제2 공정, 제3 공정에서 총 8가지 실험을 수행하였다. Fig. 4는 타원형 디프 드로잉 급형의 펀치 및 다이의 형상을 도시하였다. Fig. 5는 타원형 디프 드로잉 공정의 블랭크 크기를 나타낸다. 이 타원형 블랭크는 장변의 길이가 122mm이고, 단변의 길이가 114mm로 몇 번의 시행착오를 통하여 최적의 블랭크 형상을 결정하였다. 특히, 초드로잉 공정에서 플랜지 끝단의 불연속부가 나타나지 않게 하였다.

Fig. 6은 성형된 타원형 디프 드로잉 제품의 공정순서를 나타낸다. (a)는 초드로잉, (b)는 제2 드로잉, (c)는 제3 드로잉 제품이다. Fig. 7은 초드로잉 제품의 플랜지 끝단을 보여주고 있다. 이와 같이 플랜지 끝단에서 불연속부가 없는 양호한 플랜지 형상을 보여주고 있다. Fig. 8은 타원형 디프 드로잉 제품의 세부적인 치수를 나타낸다. 타원형 디프 드로잉 제품은 원통형 디프 드로잉 제품과 달리 장변부와 단변부가 있어 재료의 유동이 복잡하다. 그러므로, 원통형의 드로잉틀을 적용하기보다는 좀더 완화된 드로잉틀을 적용하여 원만한 성형이 되도록 공정을 구성하였다.

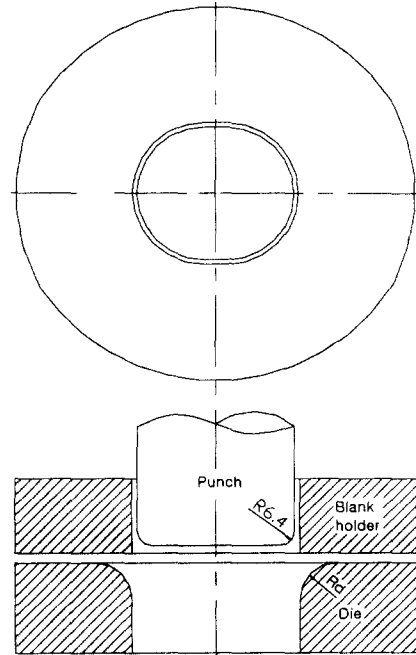


Fig. 4 Die geometry of elliptical deep drawing

Table 2 The experimental conditions of die shape radii(R_d)

First drawing R_{d1} (mm)	Second process R_{d2} (mm)	Third process R_{d3} (mm)
11.2	11.2	11.2
		16
	16	11.2
		16
16	11.2	11.2
		16
	16	11.2
		16

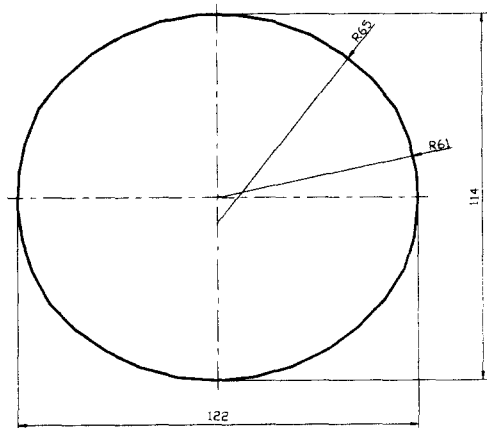


Fig. 5 Blank size designed by trial and error

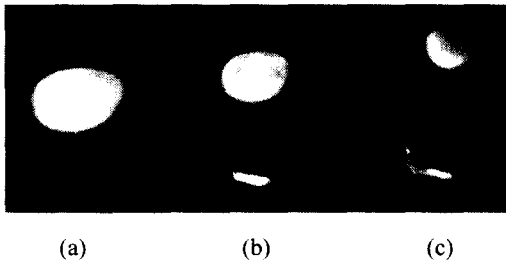


Fig. 6 Process sequence of elliptical deep drawing

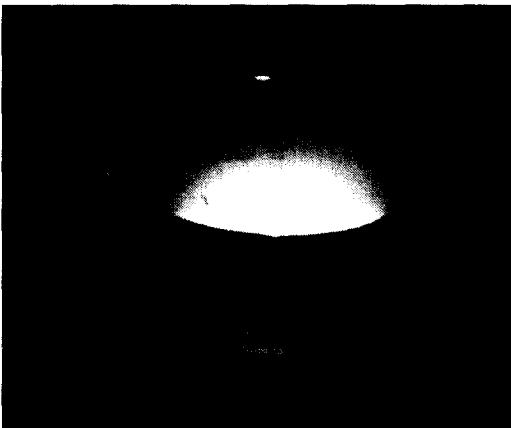


Fig. 7 Product of first deep drawing process

4. 실험결과 및 고찰

4.1 두께 변형률 비교

본 연구는 자동차 요크의 타원용기 디프 드로잉 가공 후 두께변형률 및 펀치하중의 최소화를 위한 방법을 결정하고자 부품 성형에 가장 큰 영향을 미치는 펀치 및 다이 형상반경을 설계 변수로 고려하였다. 기존의 원형 디프 드로잉 부품 설계 기준을 근거하여 결정하였다. 여기서, 펀치 형상반경은 $6.4(4t)$ 로 하고, 다이 형상반경은 $11.2(7t)$, $16(10t)$ 로 결정하여 각 공정별로 실험을 수행하였다. 일반적으로 펀치 형상반경은 다이 형상반경보다 작게 설계하는데, 작은 범위에서 펀치 형상반경을 결정하였다. 실험을 통하여 얻은 제품은 포인트 마이크로미터(point micrometer)를 사용하여 장변부와 단변부로 나누어서 제품의 중심으로부터 3mm 간격으로 플랜지까지 측정하였다.

Fig. 9는 초드로잉 공정의 장변부 두께변형률을 나타낸다. 즉, 타원형 디프 드로잉 성형에서 R_p 를 6.4로 정하고 R_d 를 6.4, 11.2, 16으로 하였을 때, 두께변형률을 나타내고 있다. 다이 형상반경이 16일 때 펀치 어깨부에서 플랜지(flange)까지 두께변형률이 최저 -0.08로 다른 것보다 양호한 두께 분포를 나타낸다. 반면에 다이 형상반경이 6.4일 때는 펀치 어깨부에서 국부적인 두께변형률이 -0.1로 다른 것보다 취약한 두께 분포를 나타낸다. 반면, 다이 형상반경이 11.2일 때는 펀치 어깨부에서 플랜지까지 16일 때와 유사한 두께 분포를 나타낸다.

Fig. 10은 초드로잉 공정의 단변부 두께변형률을 나타낸다. 여기서도 장변부와 마찬가지로 다이 형상반경이 6.4일 때 다른 것보다 취약한 두께변형률 분포를 나타낸다. 단변부일 경우는 다이 공(die cavity) 속으로의 재료유동이 장변부와 비교할 때 성형 완료시점에서 플랜지 끝단이 블랭크 홀더에 의한 하중 구속조건이 제거된다. 그러므로 장변부에 비해 단변부는 전체적으로 두께변형률이 높게 나타난다. 이것은 펀치 어깨부의 국부적인 두께감소의 제거가 가능하다고 사료된다.

Fig. 11은 다이 형상반경이 11.2, 16인 경우에 제 2 공정의 장변부 두께변형률을 나타낸다. 여기서 초드로잉 공정의 펀치 형상반경이 6.4이고, 다이 형상반경(R_{d1})은 11.2, 16이다. 초드로잉과 제2 공정의 조합으로 성형시의 두께변형률을 나타낸다. R_{d1} 이 11.2이고, R_{d2} 가 16일 때 측벽부에서 플랜지까지 두께변형률 증가가 다른 것보다 크게 나타난다. 이것으로 공정이 진행됨에 따라 다이 형상반경을 크게 하기보다는 작게 정형시켜 나가야 양호한 두께변형률을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 다이 형상반경이 11.2, 16인 경우에 제2 공정의 단변부 두께변형률을 나타낸다. 여기서 초드로잉 공정의 다이 형상반경(R_{d1})은 11.2, 16이다. 초드로잉과 제2 공정의 다이 형상반경이 16일 때 측벽부에서 플랜지까지 두께변형률 증가가 다른 것보다 크게 나타난다. 이것으로 공정이 진행됨에 따라 다이 형상반경을 크게 하는 것이 양호한 두께변형률을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12를 비교하면, Fig. 12의 단변부에서는 플랜지 끝단으로 갈 수록 Fig. 11의 장변부보다 급격한 두께증가가 나타난다. 이것은 Fig. 5의 블랭크의 크기에서 장변부는 122, 단변부는 114로 단변부의 길이가 작기 때문으로 판단된다.

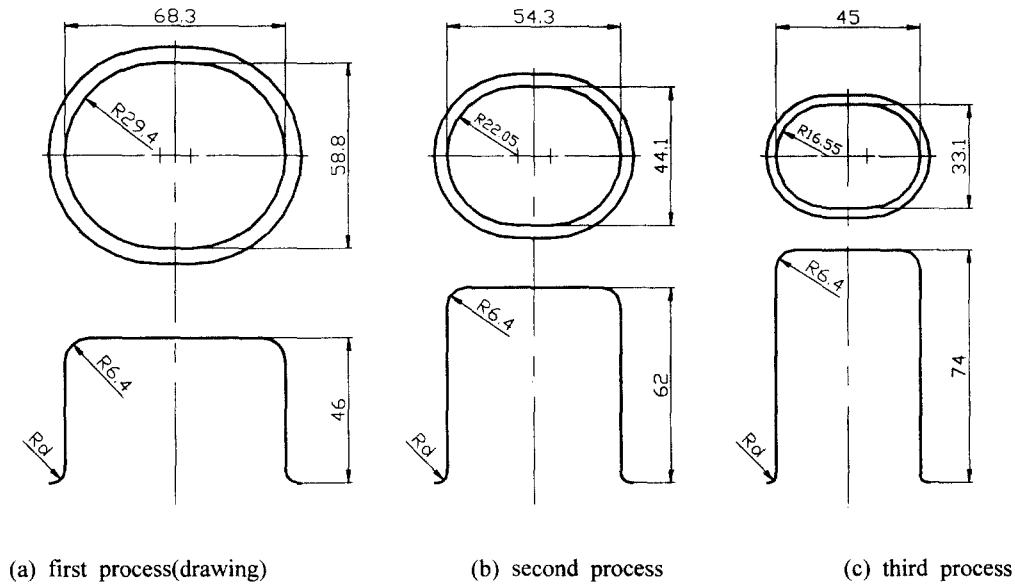


Fig. 8 Process sequence of elliptical deep drawing product

Fig. 13은 초드로잉의 R_d 가 11.2일 때 제3 공정에서의 장변부 두께변형률을 나타내고, Fig. 14는 단변부 두께변형률을 나타낸다. 장·단변부 모두 R_{d2} 가 16이고, R_{d3} 가 11.2일 때 두께변형률이 높게 나타나고, R_{d2} 와 R_{d3} 가 11.2일 때 두께변형률이 낮게 나타난다. 이것으로 다이 형상반경은 공정이 진행함에 따라 정형(net shape)이 되어야만 두께변형률 분포에서 양호하다는 것을 알 수 있다. Fig. 15는 초드로잉의 R_d 가 16일 때 제3 공정에서의 장변부 두께변형률을 나타내고, Fig. 16은 단변부 두께변형률을 나타낸다. 장·단변부 모두 R_{d2} 와 R_{d3} 가 16일 때 두께변형률이 높게 나타나고, 나머지는 약간의 두께변형률 차이가 나타난다. 여기서 다이 형상반경은 공정이 진행함에 따라 큰 값인 16에서 두께변형률 분포가 양호하다는 것을 알 수 있다. 또한, 단변부가 장변부보다 펀치 어깨부에서 측벽부까지 두께 감소가 크고, 플랜지에는 급격한 두께 증가가 나타난다. 두께변형률 분포에서 펀치 어깨부의 국부적인 두께감소가 작은 장변부가 양호함을 알 수 있다.

이상의 결과에서 다단계 타원용기의 디프 드로

잉 제품 성형시에 공정이 진행함에 따라 펀치 어깨부의 두께변형률을 비교하였다. 초드로잉, 제2 공정에서는 단변부가 장변부보다 펀치 어깨부의 두께변형률 분포가 양호하게 나타나지만, 제3 공정에서는 장변부가 단변부보다 펀치 어깨부의 두께변형률 분포가 양호하게 나타난다. 이것은 공정이 진행함에 따라 직선의 단변부에 재료 유동으로 인한 살 몰림에 의한 것이라고 판단된다.

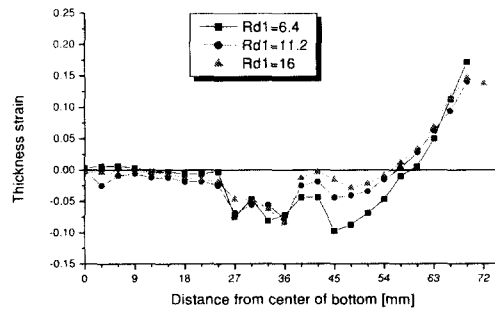


Fig. 9 Thickness strain of long side in first process

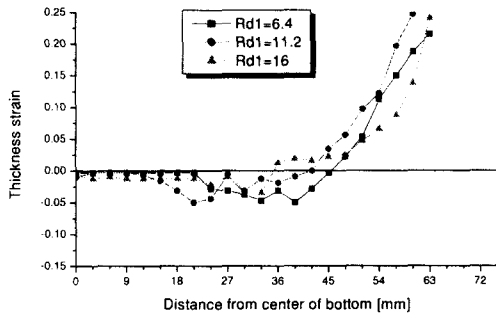


Fig. 10 Thickness strain of short side in first process

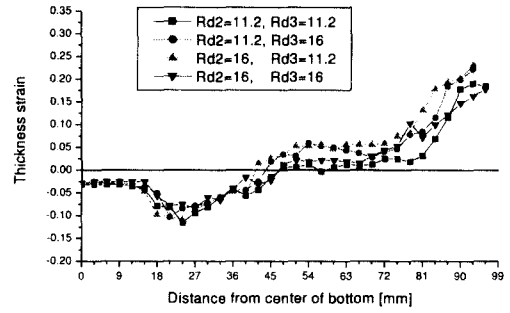


Fig. 13 Thickness strain of long side in third process ($R_{d1}=11.2$)

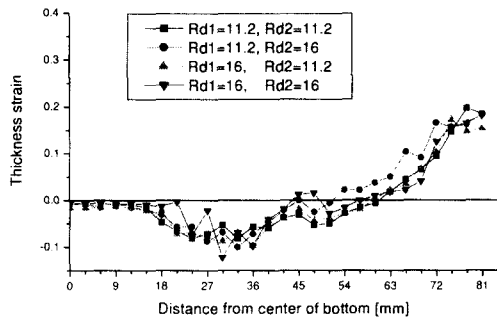


Fig. 11 Thickness strain of long side in second process

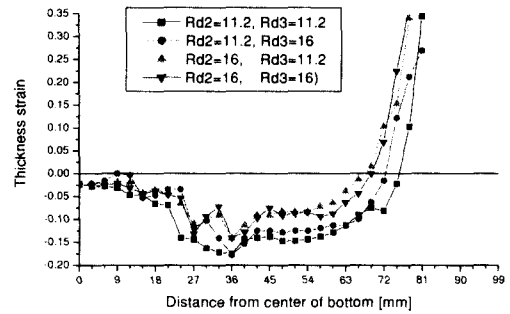


Fig. 14 Thickness strain of short side in third process ($R_{d1}=11.2$)

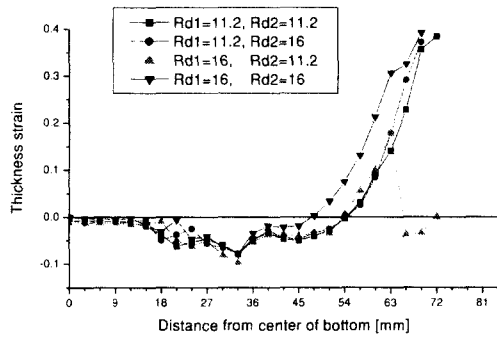


Fig. 12 Thickness strain of short side in second process

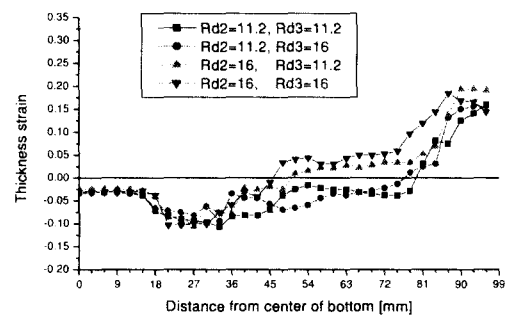


Fig. 15 Thickness strain of long side in third process ($R_{d1}=16$)

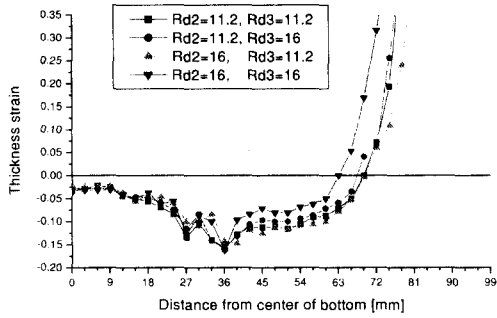


Fig. 16 Thickness strain of short side in third process (Rd1=16)

4.2 펀치 하중 비교

Fig. 17은 타원형 디프 드로잉 제품의 초드로잉 공정에서 R_p 가 6.4이고, R_d 가 11.2, 16일 때 펀치행정에 대한 펀치하중 곡선을 나타낸다. 초기에 펀치하중은 타원형 성형이 되므로 인하여 계속적으로 성형하중이 증가하여 최대 펀치하중에 이르고, 성형 완료시점까지 계속적으로 감소해 간다. 여기서, 드로잉 가공에 필요한 펀치하중은 블랭크를 눌러주는 블랭크 홀더의 압축력과 블랭크 홀더와 다이 사이에서 블랭크가 받는 마찰력 및 펀치와 다이의 모서리에서 블랭크가 받는 굽힘력의 합이라고 할 수 있다. 특히, 타원형상의 디프 드로잉 제품이므로 최대 펀치하중 값은 매우 중요하다. Fig. 17에서 최대 펀치하중은 펀치행정의 48-53% 위치에서 발생하였고, R_d 가 11.2일 때 13.1ton, 16일 때 11.6ton이 실제 측정되었다. 최대 펀치하중은 식 (11)에 의하여 초드로잉에서 R_d 가 11.2일 때 7.9ton, R_d 가 16일 때 6.8ton으로 실제 측정에 의한 최대 펀치하중보다 낮음을 알 수 있다. 즉, 식 (11)에 의한 이론값은 실험결과와 최대 펀치하중이 5ton 정도의 차이가 난다. 이것은 성형하중의 산출에 있어 이론식에서는 재료의 응력만을 고려하고 이방성 계수와 가공경화지수의 영향은 고려하지 않았기 때문이라고 판단된다. 이상의 결과에서 다이 형상반경이 점점 커질수록 펀치하중은 감소되어 감을 알 수 있다. 그러므로 최대 펀치하중의 감소는 작업 능력에 있어서 경제성과 원가 절감이 기대된다. 또한, 식 (12)에서 최대 펀치하중은 타원용기 성형중에 블랭크 소재가 전단

되는 파단력보다 크면 성형중에 파단을 일으키게 된다. 식 (13)에서 계산하면, 파단하중 P_F 는 14.5ton이다. 따라서, 최대 펀치하중은 14.5ton 이하가 되어야 한다. 여기서 드로잉 길이 L 은 타원용기에서 중립면 길이가 210mm이다.

$$P_F = 210(L) \times 1.6(t) \times 43.2(\sigma_s) = 14.5ton$$

식 (12)에서 용기가 파단되지 않고 성형되었다면, 최대 펀치하중이 최대 인장강도에 도달하지 않았다는 것을 의미하므로 근사적으로 식 (14)를 적용하여 계산하면 10.6ton이다. 식 (15)에서 실러의 실험식에 의한 최대 펀치하중을 계산하면 11.8ton이다. 초드로잉 공정에서 실제 측정에 의한 최대 펀치하중과 비슷한 일치를 보인다.

Fig. 18은 타원형 디프 드로잉 제품의 제2 공정에서 R_p 가 6.4이고, R_d 가 11.2, 16일 때 펀치행정에 대한 펀치하중 곡선을 나타내고 있다. 여기서는 R_{d1} 과 R_{d2} 가 11.2일 때 펀치하중이 최대로 나타난다. 초드로잉의 R_d 에 관계없이 R_{d2} 가 16일 때에 비슷한 펀치하중 분포를 나타내고 있다.

Fig. 19와 Fig. 20은 타원형 디프 드로잉 제품의 초드로잉, 제2 공정과 제3 공정에서 R_p 가 6.4이고, R_d 가 11.2, 16일 때의 펀치행정에 대한 펀치하중 곡선을 나타내고 있다. 여기서 R_{d1} 과 R_{d2} 가 11.2이고, R_{d3} 이 11.2일 때 펀치하중이 최대로 나타난다. 초드로잉과 제2 공정의 R_d 에 관계없이 R_{d3} 가 11.2, 16일 때에는 각각 비슷한 펀치하중 분포를 나타내고 있다. 또한, R_{d1} 이 16이고, R_{d2} 와 R_{d3} 이 11.2일 때 펀치하중이 최대로 나타나고, R_{d1} , R_{d2} 와 R_{d3} 이 16일 때 펀치하중이 최소로 나타난다. 초드로잉과 제2 공정의 R_d 에 관계없이 R_{d3} 가 11.2, 16일 때에는 각각 비슷한 펀치하중 분포를 나타내고 있다.

이상의 결과에서 최대 펀치하중은 공정이 진행됨에 따라 다이 형상반경이 작은 값에서 나타났고, 다이 형상반경이 큰 값에서는 전체적으로 펀치하중이 낮게 나타났다. 따라서, 최대 펀치하중은 두께변형률과는 달리 공정이 진행됨에 따라 다이 형상반경이 작은 값에서 나타남을 알 수 있었다. 이것은 펀치와 다이의 어깨부에서 굽힘반경의 크기에 따른 블랭크가 받는 굽힘력의 차이에 기인한다고 판단된다.

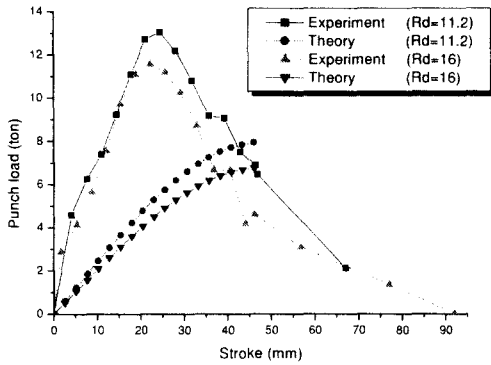


Fig. 17 Punch load-stroke curve of first process ($R_p=6.4$)

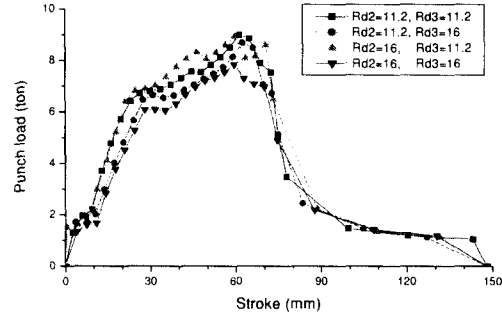


Fig. 20 Punch load-stroke curve of third process ($R_{d1}=16$)

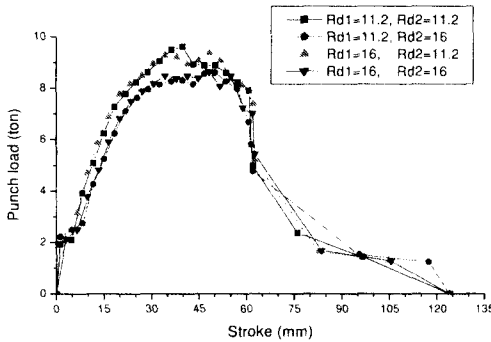


Fig. 18 Punch load-stroke curve of second process

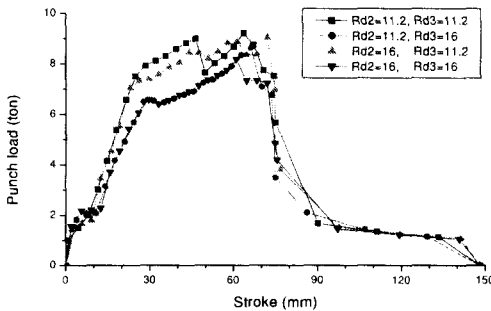


Fig. 19 Punch load-stroke curve of third process ($R_{d1}=11.2$)

5. 결론

본 연구에서는 자동차 YOKE 제품의 타원용기 성형을 위한 전기아연도금강판의 기계적 특성과 두께변형률 및 펀치하중에 관하여 실험을 수행하였다. 이러한 실험 결과에서 타원용기 성형 후 초드로잉, 제2 공정, 제3 공정의 펀치와 다이 형상반경에 따른 두께변형률 및 펀치하중이 최소화되는 다이 형상반경을 알 수 있었다. 타원형 디프 드로잉 성형에 있어서 타원형 블랭크를 최적으로 설계하여 다이 형상반경별로 성형성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다이 형상반경은 공정이 진행함에 따라 큰 값인 16에서 두께변형률 분포가 양호하다는 것을 알 수 있다. 또한, 단변부가 장변부보다 펀치 어깨부에서 측벽부까지 두께 감소가 크고, 플랜지에는 급격한 두께 증가가 나타난다. 두께변형률 분포에서 펀치 어깨부의 극부적인 두께감소가 작은 장변부가 양호함을 알 수 있다.
- (2) 다단계 타원용기의 디프 드로잉 제품 성형시에 공정이 진행함에 따라 초드로잉, 제2 공정에서는 단변부가 장변부보다 펀치 어깨부의 두께변형률 분포가 양호하게 나타나지만, 제3 공정에서는 장변부가 단변부보다 펀치 어깨부의 두께변형률 분포가 양호하게 나타난다.
- (3) 최대 펀치하중은 두께변형률과는 달리 공정이 진행됨에 따라 다이 형상반경이 작은 값에서 나타남을 알 수 있다. 또한, 최대 펀치하중은 초드로잉에서 펀치행정의 48-53%, 제2 공정에서 펀치행정

의 55-80%, 제3 공정에서 펀치행정의 85-100% 위치에서 나타남을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. David Alkire Smith, "Die Design Handbook," SME, 1990.
2. 太田哲, "프레스 絞り 加工工程設計," H刊工業新聞社, 1972.
3. 김진무, 유호영, "정사각용기 성형에서 변형률완화에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제2호, pp. 31-38, 1999.
4. 김상화, "사각컵 디프 드로잉 공정의 성형성에 관한 연구," 서울산업대학교 석사학위논문, 1999.
5. 박동환, 최병근, 박상봉, 강성수 "타원형 디프 드로잉 공정에서 블랭크 형상 최적화에 관한 실험적 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제10호, pp. 101-108, 1999.
6. 강명순 역, "소성공학," 청문각, 1993.
7. 이동녕, "소성가공학," 문운당, 1992.
8. 최선순, "사각통 디프 드로잉의 펀치하중 예측과 성형인자에 관한 연구," 부산대학교 석사학위논문, 1985.
9. Z. Marciniak, Warsaw, J. L. Duncan and Auckland "Mechanics of sheet metal forming," Edward Arnold, 1992.
10. S. Kapinski, "Analytical and experimental analysis of deep drawing process for bimetal elements," J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 60, pp. 197-200, 1996.
11. D. K. Min, B. H. Jeon, H. J. Kim and N. S. Kim, "A study on process improvements of multistage deep drawing by the finite element method," J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 54, pp. 230-238, 1995.
12. E. Ceretti, C. Giardini and G. Maccarini, "Theoretical and experimental analysis of non-axisymmetrical deep drawing," J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 54, pp. 375-384, 1995.
13. C. C. Tai and J. C. Lin, "The optimisation deep-draw clearance design for deep-draw dies," Int. J. Adv. Manuf. Tech., Vol. 14, pp. 390-398, 1998.
14. Daw-Kwei Leu, Tsung-Chia Chen and You-Min Huang, "Influence of punch shapes on the collar-drawing process of sheet steel," J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 88, pp. 134-146, 1999.
15. F. Vollertsen, R. Breede and K. Lange, "A method for deep drawing with multiple elastomer membranes," Annals of the CRIP, Vol. 48, pp. 221-226, 1999.