

자동차용 타원형 디프 드로잉 제품의 다이 반경에 관한 연구

허영민*·박동환**·강성수***

(2002년 2월 15일 접수)

Study on the Influence of Die Corner Radius for Deep Drawing of Elliptical Product of Automobile

Y. M. Huh, D. H. Park and S. S. Kang

Abstract

The circles deform into various shape during deformation, the major and minor axes of which indicate the direction of the major and minor principal strains. Likewise, the measured dimensions are used to determine the major and minor principal strain magnitudes. This circular grid technique of measuring strains can be used to diagnose the causes of necking and fracture in industrial practice and to investigate whether these defects were caused by material property variation, changes in lubrication, or incorrect press settings. In non-axisymmetric deep drawing, three modes of forming regimes are found: draw, stretch, plane strain. The stretch mode for non-axisymmetric deep drawing could be defined when the major and minor strains are positive. The draw mode could be defined when the major strain is positive and minor strain is negative, and plane strain mode could be defined when the major strain is positive and minor strain is zero. Through experiments the draw mode was shown on the wall and flange are one of a drawn cup, while the plane strain and the stretch mode were on the punch head and the punch corner area respectively. We observed that the punch load of elliptical deep drawing was decreased according to increase of die corner radius and the thickness deformation of minor side was more large than major side.

Key Words : Non-Axisymmetric Shapes, Die Radius, Elliptical Deep Drawing, Scribe Circle Test

1. 서론

디프 드로잉^(1~2)이란 탄피, 자동차 관널등 겹형상의 제품을 박판으로부터 성형하는 급속가공이다. 즉 적절한

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
** POSCO 기술연구소
*** 부산대학교 기계공학부

크기의 평판을 다이 위에 올려놓고 펀치로 누르면서 재료를 다이 안으로 끌어들이는 공정이다. 이 때 주름현상(wrinkling)을 방지하기 위하여 블랭크를 잡아주는 블랭크 홀더(blank holder)⁽³⁾가 필요하다. 디프 드로잉에서 공정을 좌우하는 인자는 많지 않지만 그들이 서로 복잡한 영향을 미친다. 박판 성형품에 나타나는 대표적인 결함에는 파단, 국부적인 네킹과 혹은 두께 감소, 주름현상 등이 있다. 판재의 성형은 굽힘(bending), 드로잉(drawing), 스트레칭(stretching), 및 아이어닝(ironing)등과 같은 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐 아니라, 동일한 소재 내에서도 각각의 성형부위에 따라서 응력상태와 변형량이 서로 다르다. 그리고, 항복강도, 탄성계수, 가공경화지수, 이방성계수 등과 같은 재료의 고유 물성치와 금형, 소재의 두께, 클리어런스, 윤활상태 등의 공정변수도 소재의 변형에 영향을 미친다. 특히, 자동차 파워윈도우(power window)의 모터 프레임과 같이 형상이 복잡한 제품의 경우 연속적인 판재 성형공정을 수행함으로써 제품의 파단, 주름, 치수불량 등의 문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 본 연구는 자동차용 타원형 디프 드로잉 제품에서 다이 반경이 성형성⁽⁴⁻⁷⁾에 미치는 영향을 파악하기 위하여 원형 그리드 실험(Scribed Circle Test)을 실시하여 나타나는 3가지 변형모드에 대해서 연구하였다.

2. 소재 시험 및 블랭크 설계

2.1 인장시험

본 실험에서는 20 μ m의 아연도금된 1.6mm 두께의 디프 드로잉용 전기아연도금강판(SECD)을 사용하였다. 디프 드로잉 공정은 다이반경에서 굽힘, 측면부에서 꺾임과 인장 등의 복잡한 성형 메커니즘을 가지고 성형된다. 따라서 이러한 복잡한 성형 메커니즘의 특성에 의해 성형성이 달라지게 되고, 윤활조건이나 소재의 인장 특성에 따라 성형성이 달라지게 되므로 기본적으로 인장시험을 통해 SECD의 기계적 성질을 평가하였다. SECD의 물성을 파악하기 위해 KS시험편을 제작하여 압연방향에 대해서 0°, 45°, 90° 방향으로 인장시험을 하였으며, 인장시험결과는 Table 1과 같다. Fig. 1은 인장시험 후의 시편을 나타낸다.

2.2 블랭크 설계

Fig. 2는 본 연구에서 제안된 타원형 블랭크⁽⁹⁾의 크기를 나타낸다. 이 타원형 블랭크는 장변의 길이가 122mm이고, 단변의 길이가 114mm로 산업현장에서 시행착오법에 의한

여러 번의 실험결과 반경이 61mm인 원과 중심선에서 8mm 아래에 위치한 반경이 65mm인 원으로 설계하여 최종 결정하였다.

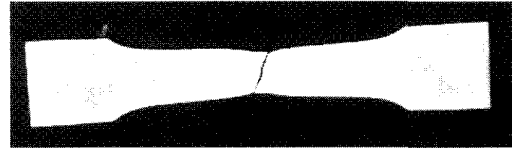


Fig. 1 Tensile specimen

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	46.0

Fig. 2 The shape of elliptical blank

3. 디프 드로잉 실험

Fig. 3과 같이 본 실험에 사용된 장비는 100ton 유압식 프레스이다. 이 시험기는 블랭크 홀더를 임의로 조절할 수 있는 다이쿠션(die-cushion)과 상형 램의 공정별 행정(stroke)을 제어할 수 있는 위치 검출 장치(limit S/W)를 갖추고 있다. 이 시험기로 성형을 할 때 펀치하중(punch load)과 펀치행정(punch stroke)을 측정할 수 있도록 LVDT(linear variable differential transformer)가

장착된 컴퓨터를 연결하여 실험하였다. 블랭크 홀더력이 너무 높으면 드로잉력이 증가하고 블랭크와 블랭크 홀더, 블랭크와 다이의 마찰이 대단히 크게 되고 블랭크가 받는 반경방향의 인장력이 증가하여 컵이 성형되지 않고 찢어지는 현상이 나타나고, 낮으면 주름이 발생하므로 주름이 발생하지 않는 최소한의 힘을 블랭크 홀더에 작용시키기 위하여 블랭크 홀더력은 실험을 통하여 9.8kN으로 부과하여 실험하였다. 윤활제는 수용성 소성가공유로 일반적인 드로잉유를 사용하였다. Fig. 4는 타원용기의 최종 제품을 AutoCAD 환경에서 3차원 모델링한 형상을 나타낸다.

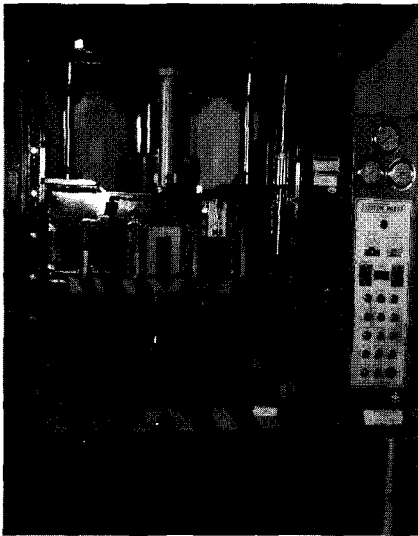


Fig. 3 Experimental equipment for deep drawing

본 연구에서는 자동차용 타원형 디프 드로잉 제품의 다이 반경⁽¹⁰⁾에 따른 소재의 성형성을 평가하기 위하여 초드로잉 공정에서 펀치 반경(R_p)은 6.4mm로 고정하였고, 다이 반경(R_d)은 6.4mm, 11.2mm, 16mm의 3종류로 제작하여 실험하였다. Fig 5는 이 실험에서 사용된 타원형 디프 드로잉 금형의 형상을 나타낸다. 펀치 및 다이 반경은 기존의 원형 디프 드로잉 제품의 설계 기준을 근거하여 결정하였다. 또한 소재가 성형되는 동안 재료흐름과 변형집중부의 변형량을 알아내어 소재의 성형성을 평가하기 위하여 직경 10mm의 원형 그리드를 블랭크 표면에 입혔다. 일반적으로 전해부식에 의한 그리드 예칭방법이 현장에서 많이 사용되고 있으나, 1.6mm의 박관율을 예칭을 할 경우 예칭면의 윤활성과 예칭깊이의 영향으로 변형량을 정확하게 파악할 수 없게 된다. 그리하여 본 실험에서는 그리드용 특수 잉

크를 사용하여 Fig. 6과 같이 블랭크 표면에 원형 그리드를 입혀 실험하였다.

Fig. 7 (a)와 (b)는 변형 전 후의 원형 그리드를 나타낸다. 변형된 그리드는 타원 형태로 변형하므로 타원의 주변형량과 부변형량을 측정 후, 식 (1)에서 주변형률(ϵ_1)을, 식 (2)에서 부변형률(ϵ_2)을 구하였다. 여기서 d_0 는 변형 전의 원형 그리드 직경을 나타내며, d_1 과 d_2 는 원형 그리드의 변형 후 주변형량(major strain)과 부변형량(minor strain)을 나타낸다.

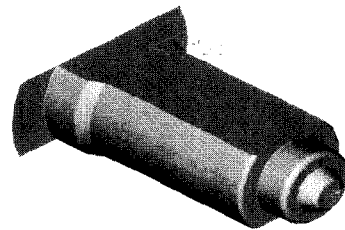


Fig. 4 Final shape of product

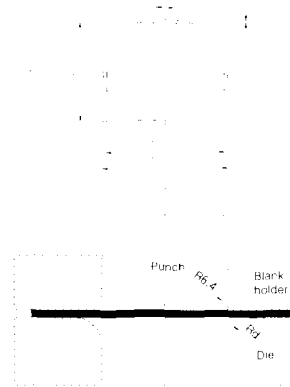


Fig. 5 Die geometry of elliptical deep drawing

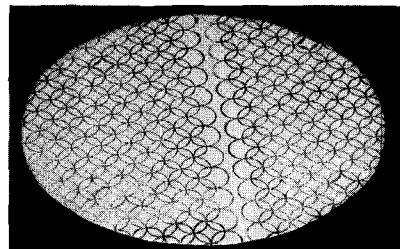


Fig. 6 cicula grid before deformation

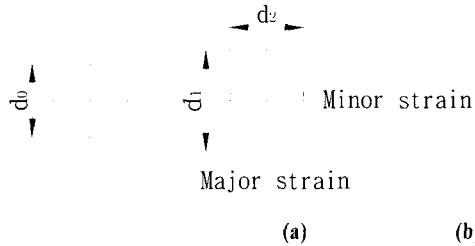


Fig. 7 Circular grid of before and after deformation
(a) before deformation
(b) after deformation

$$\epsilon_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \quad (2)$$

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 원형 그리드 실험

원형 그리드 실험에서 사용된 자동차용 타원형 디프 드로잉 제품의 타원형 블랭크 형상은 2축 대칭이므로 전체 형상 1/4 표면의 원형 그리드에 번호를 표시하여, 제품 성형 후 변형된 그리드의 주·부변형량을 측정하였다. Fig. 8은 블랭크 전체형상 1/4표면에 번호가 표시된 원형 그리드를 나타내고 있다. Fig. 9는 드로잉 성형 후 주·부변형률의 3가지 변형 모드를 나타내고 있다. 변형된 그리드는 변형전의 원형 그리드 크기를 기준으로 하여, 주변형률이 양(positive)이고 부변형률이 0(zero)인 평면 변형 모드(plane strain mode), 주·부변형률이 모두 양(positive)으로 되는 스트레치 모드(stretch mode) 그리고 주변형률이 양(positive)이고 부변형률이 음(negative)인 드로우 모드(draw mode)의 3가지 변형 모드가 관찰되었다. 주로 제품의 펀치 머리부(punch head, I, II)에서는 평면 변형 모드, 코너부(corner, III)에서는 스트레치 모드, 벽부(wall, IV)에서는 드로우 모드가 나타남을 알 수 있다. Fig. 10, 11 그리고 12은 가공된 제품의 펀치 머리부, 장변부(major axis) 그리고 단변부(minor axis)에서 변형된 그리드의 상태를 보여주고 있다. 실험을 통하여 얻은 제품은 포인트 마이크로미터(point micrometer)를 사용하여 변형된 그리드 중심의 두께를 측정 후 두께 변형률을 구하였다. 또한 측정된 원형 그리드의 변형률은 모두 3번 측정을 하여 얻은 값들의 평균값이다.

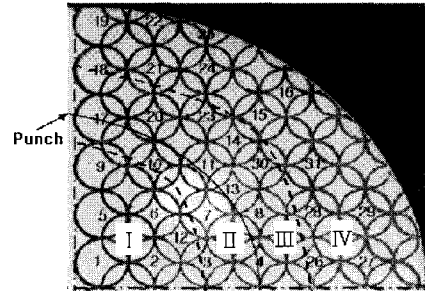


Fig. 8 Circular grid mark of elliptical blank

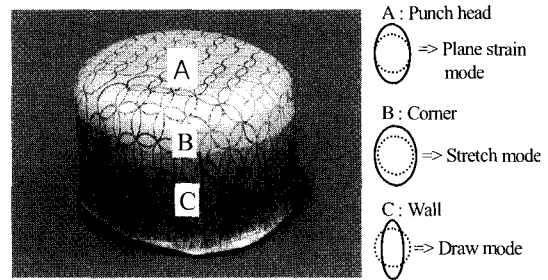


Fig. 9 Three deformation modes of major and minor strains

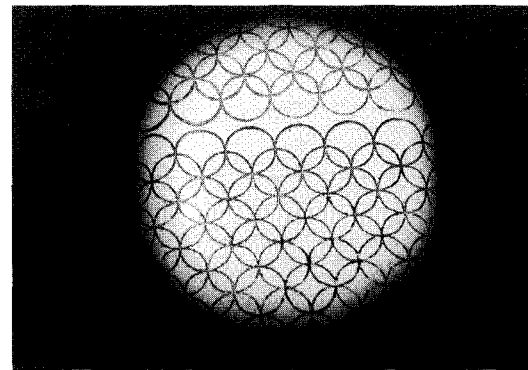


Fig. 10 Circular grid on the top portion after deformation

Fig. 13은 초드로잉 공정의 펀치 및 다이 반경이 6.4mm 일 때 블랭크에 표시한 원형 그리드 번호의 주·부변형률을 측정하여, 제품의 각 위치에 분포한 주변형률과 부변형률을 그래프로 도시하였다. 여기서 다이 반경이 6.4mm인 경우 펀치 머리 중심부(I)에서는 주·부변형률이 거의 없는 원형 그리드가 나타났으며, 이를 제외한 펀치 머리부(II) 일부분에서 평면 변형 모드가 관찰되었다. 이는 원주 방향에서는 매우 미소한 인장력이 발생하였고, 그에 비해

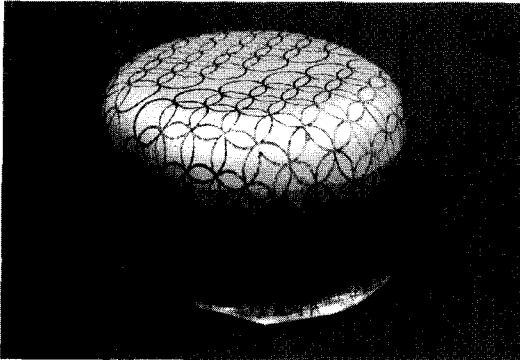


Fig. 11 Cicula grid of major axis after deformation

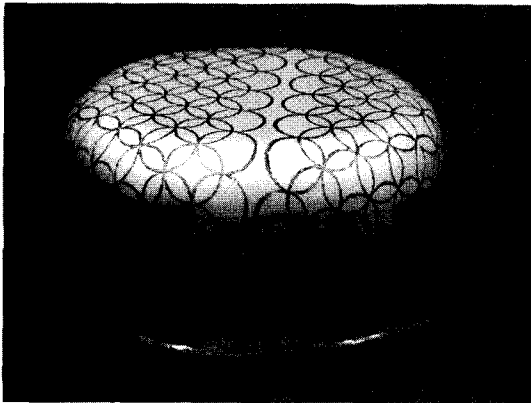


Fig. 12 Circula grid of minor axis after deformation

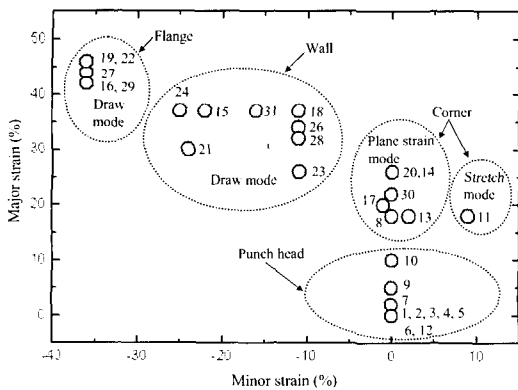


Fig. 13 Major and minor strain distribution after the first drawing ($R_p=6.4\text{mm}$, $R_d=6.4\text{mm}$)

반경방향에 대해서는 높은 인장응력이 높게 발생하여 그리드 번호 9, 10에서는 부변형량이 0 이고, 주변형량이 각각 0.05, 0.09인 평면변형모드가 나타났다. 코너부(III)에서도 대부분 평면 변형 모드가 나타났고, 11번 그리드에서는 스트레치 모드가 관찰되었다. 즉 타원형 블랭크의 장변부(major axis)와 단변부(minor axis)의 중심에 위치한 11번 그리드는 소재가 다이 속(die cavity)으로 유입되면서 반경방향과 원주방향으로 인장력이 작용하여 나타난 변형임을 알 수 있다. 벽(wall)부와 플랜지(flange)부(IV)에서는 전반적으로 드로우 모드를 형성하였다. 벽부에서는 주변형률이 26~36% 증가하였고 부변형률은 10~25%로 감소되었으며, 플랜지부에서는 주변형률이 40%이상 증가하였고, 부변형률은 35%이상 감소되어 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14는 초드로잉 공정의 펀치 반경이 6.4mm, 다이 반경이 11.2mm일 때 블랭크에 표시한 원형 그리드 번호의 주·부변형량을 측정하여, 제품의 각 위치에 분포한 주변형률과 부변형률을 그래프로 도시하였다. 다이 반경이 11.2mm인 경우 펀치 머리 중심부(I)에서는 주·부변형량이 거의 없는 원형 그리드가 나타났으며, 이를 제외한 펀치 머리부(II)에서는 다이 반경이 6.4mm인 경우와 비교하여 평면 변형 모드와 스트레치 모드가 함께 관찰되었다. 이는 다이 반경이 6.4mm일 때 보다 11.2mm인 경우 소재가 다이 속으로 유입될 때, 다이 반경의 완만한 곡률 반경으로 인해 원주방향과 반경방향으로 인장력이 동시에 작용하였음을 알 수 있다.

Fig. 15는 초드로잉 공정의 펀치 반경이 6.4mm, 다이 반경이 16mm일 때 블랭크에 표시한 원형 그리드 번호의 주·부변형량을 측정하여, 제품의 각 위치에 분포한 주변형률과 부변형률을 그래프로 도시하였다. 다이 반경이 16mm인 경우 펀치 머리 중심부(I)의 일부분에서만 주·부변형량이 거의 없는 원형 그리드가 나타났으며, 다이 반경이 6.4mm, 11.2mm와 비교하여 펀치 머리부(I, II)에서 스트레치 모드가 나타났다. 이는 블랭크를 잡아주는 블랭크 홀더와의 접촉면적이 감소되어 성형중에 원활한 재료의 유동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 코너부(III)에서는 다이 반경이 6.4mm, 11.2mm와 비교하여 평면 변형 모드보다 스트레치 모드의 분포가 많음을 알 수 있다. 벽부와 플랜지부(IV)에서는 전반적으로 드로우 모드가 형성되었고, 주변형률은 장변부 주위에서 높게 나타남을 알 수 있다. 타원형 디프 드로잉 제품의 초드로잉 공정에서 다이 반경이 클수록 주변형률 감소와 부변형률이 양호하게 분포되었음을 파악하였다. 또한 다이 반경이 클수록 펀치 머리부와 코너부에서 스트레치 모드가 나타남을 알 수 있었다.

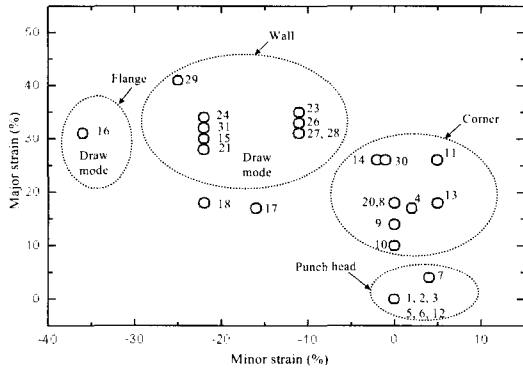


Fig. 14 Major and minor strain distribution after the first drawing (Rp=6.4mm, Rd=11.2mm)

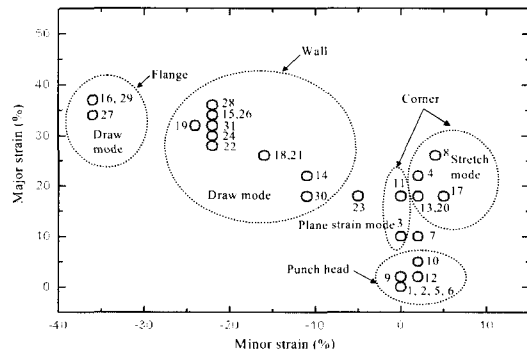


Fig. 15 Major and minor strain distribution after the first drawing (Rp=6.4mm, Rd=16mm)

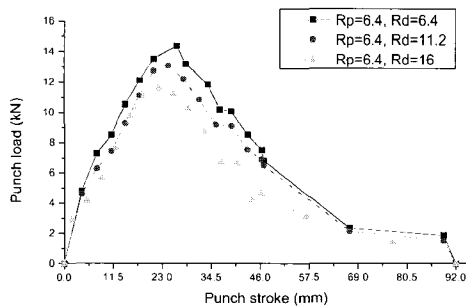


Fig. 16 Punch load stroke curve of the first drawing

Fig. 16은 초드로잉 공정에서 타원형 블랭크의 펀치하중을 비교하였다. 펀치 반경은 6.4mm로 고정하였고, 다이 반

경은 6.4mm, 11.2mm, 16mm의 3가지 조건으로 실험하였다. 다이 반경이 6.4mm일 때 초기 펀치하중은 11.2mm와 16mm에 비해 높은 하중이 필요함을 알 수 있다. 이것은 블랭크 홀더의 접촉면적 차이로 인한 펀치의 성형하중이 증가한 것으로 사료된다. 초기에 펀치하중은 소재가 다이 공동(die cavity) 속으로 유입됨에 따라 원형과 달리 장·단변부의 유입저항으로 인해 급격히 증가하여 펀치행정의 50~60%에서 최대펀치하중이 발생하였다. 이것은 펀치 행정이 진행함에 따라 변형량이 증가하고 그에 따라 소재의 가공경화가 일어나기 때문인 것으로 사료된다.

4.2 두께변형률 비교

본 연구는 다이 반경에 따른 자동차용 타원형 디프 드로잉 제품의 초드로잉 공정에서 타원형 블랭크 전체형상의 1/4표면에 원형 그리드에 번호(grid no.)를 표시하여 가공 후 장변부와 단변부 그리고 코너부에서 변형된 그리드 중심의 두께변형률을 측정하였다.

Fig. 17, 18은 펀치 반경을 6.4mm로 고정하고 다이 반경을 6.4mm, 11.2mm, 16mm로 하였을 때, 초드로잉 공정에서 변형된 그리드의 장변부(major axis), 및 단변부(minor axis) 두께분포를 나타낸다. 장변부의 최대 두께변형률은 -0.085, 단변부의 최대 두께변형률은 -0.08로 장변부의 두께가 -0.005의 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 블랭크의 기하학적 특징상 비축대칭이며, 단변부 주위에서 많은 부분이 블랭크 홀더를 벗어나 소재 유입이 원활하지만 장변부 모서리에서 블랭크가 이탈하지 못하고 이로 인해 장변부의 두께 감소가 나타나는 원인으로 사료된다.

다이 반경에 따라 장변부와 단변부의 두께변형률을 비교하면 대체적으로 두께변형이 단변부에서 적게 일어난다. 다이 반경이 클수록 두께변이 많이 일어난다. 이는 전반적으로 단변부 주위에서 많은 부분이 블랭크 홀더를 벗어나 소재 유입이 원활하지만, 장변부 주위에서 블랭크가 벗어나지 못하고, 이로 인해 장변부의 두께변형이 많이 일어난다고 판단된다. 마찬가지로 다이 반경이 클수록 블랭크 홀더의 접촉면적이 작아지기 때문에 블랭크 홀더에 의한 하중 구속 조건이 제거되므로 두께변형이 적게 나타난다고 사료된다.

Fig. 19는 장변부와 단변부 사이에 위치한 코너부의 변형된 그리드의 두께분포를 나타내고 있다. 다이 반경이 클수록 두께변형이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 다이 반경이 6.4mm일 때 그리드 번호(grid no.) 14에서 국부적인 두께 변형률이 -0.11로 다른 것 보다 취약한 두께 분포를 나타내므로, 차후 공정을 고려할 경우 이 부분에서 제품의

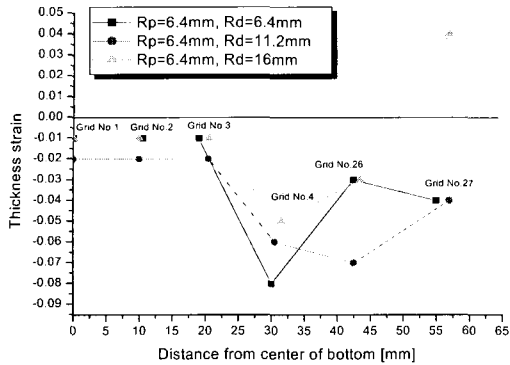


Fig. 17 Thickness strain of major axis in first drawing

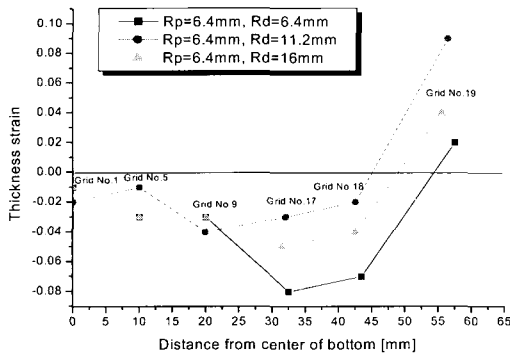


Fig. 18 Thickness strain of minor axis in first drawing

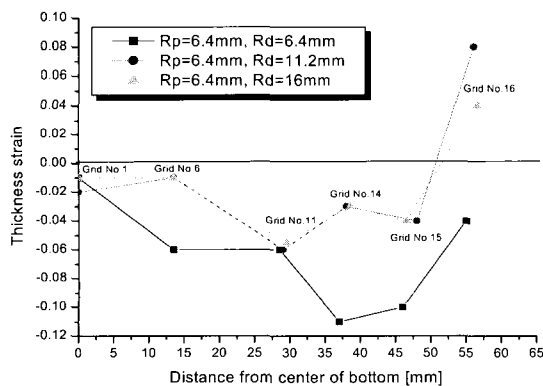


Fig. 19 Thickness strain of corner direction in first drawing

결합이 발생하리라 사료된다.

Table 3은 다이 반경에 따른 블랭크의 전체적인 두께변형률 평균을 계산하여 나타낸 것이다. 여기서 다이 반경이 6.4mm일 때 -0.043, 11.2mm 일 때 -0.023, 16mm일 때 -0.014로써 다이 반경이 클수록 소재가 변형되는 두께변형이 적게 나타남을 알 수 있고, 두께변형률 분포가 양호함을 알 수 있다.

Table 3 Total mean of thickness strain according to die radii

	Die radii		
	6.4mm	11.2mm	16mm
Total mean of thickness strain	-0.043	-0.023	-0.014

4.3 체적변형률 비교

이론적으로 체적변형률의 합은 0 이어야 한다. 본 논문에서는 원형그리드의 주·부 변형률을 측정하였고 두께변형률은 원형 그리드내의 소재가 모두 동일한 두께로 변형되지 않았기 때문에 5곳을 선정하여 측정한 후 평균값을 내어 변형률을 산출하였다. 이렇게 측정한 총변형률의 합은 0이 아닌 최대 0.15의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 그리드내의 전체적인 소재 두께 변형률의 평균값을 측정할 수 없었기 때문에 나타나는 차이로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 타원형 디프 드로잉 제품 성형에 가장 큰 영향을 주는 다이 반경에 따른 전기아연도금관관의 기계적 특성과 초드로잉 공정에서 원형 그리드를 이용한 주·부 변형률과 펀치하중 및 두께변형률에 관하여 실험을 수행하였다. 이러한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원형 그리드 실험에서 주·부 변형률의 크기에 따라 3가지 모드 즉, 평면 변형 모드, 스트레치 모드, 드로우 모드가 나타났고, 주로 제품의 펀치 머리부(punch head, I, II)에서는 평면 변형 모드, 코너부(corner, III)에서는 스트레치 모드, 벽부(wall, IV)에서는 드로우 모드가 나타남을 알 수 있었다.

(2) 제품 코너부의 주·부 변형률은 다소 높게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 초드로잉 공정에서 다이

반경을 결정할 때 다이 반경을 작게 하면 장변부와 단변부의 중간에서 파단이 발생할 가능성이 더욱 큼을 알 수 있다.

(3) 타원형 디프 드로잉 편치하중은 다이 반경이 클수록 낮게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

(4) 장변부와 단변부의 두께변형률을 비교하면 대체적으로 두께변형률은 단변부에서 높게 나타나고, 다이 반경이 클수록 두께변형률 분포가 양호하게 나타남을 알 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 김두환, 1998, "원통형 딥드로잉 용기의 벽 두께 감소 최소화에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제 7권 제4호, pp. 393~399.
- (2) 박민호, 김상진, 서대교, 1996, "다단계 딥드로잉 가공에 대한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제5권 제4호, pp. 288~296.
- (3) 정동원, 양동열, 1995, "딥드로잉에서 박판두께를 고려한 불랭크홀딩력을 가하는 개선된 방법", 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp. 89~96.
- (4) 최영, 이규호, 고대철·김병민·최재찬, 1998, "성형 한계를 고려한 디프드로잉 공정설계에 대한 유한요소 해석", 한국소성학회지, 제7권 제6호, pp. 562~569.
- (5) T. C. Hsu, S. Y. Lee, 1977, "On the drawability of sheet metal in noncircular cups", ASME J. of Eng. for Industry, pp. 615~619.
- (6) 박동환, 배원락, 박상봉, 강성수, 2001, "자동차 YOKE 제품의 타원용기 성형에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제18권 제8호, pp. 182~192.
- (7) 박동환, 2002, "Computer-aided process planning system and formability of sheet metal for non-axisymmetric elliptical deep drawing", 부산대학교 박사학위논문.
- (8) Ernst rabinowicz, 1995, "Friction and wear of materials", John Wiley & Sons. Inc, 2nd. pp. 254~261.
- (9) S. A. Majlessi, D. Lee, 1993, "Deep drawing square-shape sheet metal parts, part : Finite Element Analysis", ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 115, pp. 102~109.
- (10) 김두환, 1999, "원통형 용기의 다단계 디프드로잉에 대한 다이 곡률반경 및 틈새의 영향", 한국소성가공학회지, 제8권 제3호, pp. 262~268.