

단일원형비드 및 환저비드의 인출 특성에 관한 연구

김 참만¹, 임 영석¹, 이 항수², 전 기찬², 서 대교¹

* 성균관대 기계설계학과

** Kia 자동차(주)

Restraining Characteristics for Single Circular and Round Drawbead

Chang Man Kim¹, Young Seok Im¹, Hang Soo Lee², Ki Chan Jeon², Dae Gyo Seo¹

* Dept. of Mechanical Design, Sung Kyun Kwan University

** Kia motors

Abstract

The drawbead restraining forces for the various radius of drawbead and die corner are analyzed by the belt theory, and they are compared with the experimental results. During this procedure, the drawing angles are also varied from 0° to 60° , and the near part of the drawn die corner are divided into four steps for the theoretical analysis. The stress distributions through the sheet thickness for these steps are also suggested theoretically. The wide range of experimental data of the drawing forces and strain distributions for the various dimension and blank holding forces are presented. It is concluded that the theoretical assumption for the restraining force analysis is very useful from the comparison with the experimental results.

Key words: blank holding force, restraining forces, single circular drawbead, round drawbead, drawing angle, neutral axis, die corner radius

1. 서 론

국가의 기간산업이라 할 수 있는 자동차 공업을 비롯하여 항공기 산업, 중소 산업에 이르기까지 프레스 성형은 큰 비중을 차지하고 있으며, 판재 성형률을 향상시키기 위한 여러

가지 방법 중에서도 드로오비드의 설치는 매우 중요한 의의를 갖고 있다.

이러한 드로오비드의 본격적인 연구는 1978년 H.D. Nine^{[1][2]}에 의해 단일원형비드에 대한 연구를 시작으로 해서 1982년 Neng Ming Wang^[3]은 단일원형비드의 수학적 모델로 인출력을 유도하였다.

1982년 H.D. Nine은 단일원형비드 흡에 우레탄을 삽입하여 실험해 본 결과에 의하면 인출력이 20%정도 증가함을 밝힌 바가 있다^[4]. 1983년 B.S. Levy는 드로오비드 인출력과 이방성 영향, strain rate등을 가상일의 원리로 예측할 수 있는 방법을 제안^[5]하였으며, 1984년 J. M.Yellup^[6]과 M. J. Painter^[7]등은 좁은 드로오비드 시스템을 컴퓨터 모델화하여 비드흡 진입 깊이에 따른 인출력을 예측해 보았으며 1986~87년 B.Maker와 S.K. Samanta^{[8][9]}등은 인출력과 변위 분포 선도 등을 탄소성 셀 모델로 해석한 후 사각형, Round, Flat형등의 비드 실험으로 이론 해석을 검증한바가 있다.

1988년 K. J. Weinmann^[10]등은 단일원형비드부를 기하학적으로 Roller라 가정하고 모델링하여 드로오비드 해석을 수행한바 있으며 Thomas B.Stoughton^[11]은 재료의 굽힘 효과, 드로오비드 인출력, 블랭크 가압력등을 마찰계수와 관련지어 실험과 이론의 타당성 여부를 연구한 바가 있다. 白田松男^[12]외에도 M,Usuda와 Y.Ishii등^[13]은 드로오비드를 통과한후의 유동응력과 재료의 성질을 평가한바 있다.

1988년 이후 S.Ujihara, T.Sakamoto와 T.Frubayashi^{[14][15]}등은 공구 다이 모서리 부에서 재료가 변화하는 과정의 해석을 벨트(belt)식과 관련지어 근사적으로 드로오비드 인출력과 변형률을 구하였다. 최근 구미 각국의 자동차 회사들은 복합 비드에 관한 연구^[16]도 꾸준히 진행하고 있다.

본 연구에서는 실제 자동차 판넬 성형시 가장 널리 설치되고 있는 단일원형비드(Single circular bead)와 환저비드(Round bead)를 대상으로 인출 각도를 0° 부터 10° 간격씩 60° 까지 7단계로 구분하여 얻은 인출 결과와 벨트(belt)식에 의한 해석결과를 고찰하였다.

2. 이론 해석

1) 박판재 굽힘

1-1) 굽힘 모멘트

강소성 대변형문제에 있어서 굽힘모멘트는 다음과 같이 가정하였다.^[16] 굽힘 모멘트에 의해 판재가 굽힘발생 후에도 평면 변형 상태가 유지되며 폭방향의 변형률 (ϵ_w)은 무시한다. 굽힘변형률(ϵ_θ)은 중립 축에 대칭성을 가지며 중립축 이동은 소재에 작용하는 인장에 기인하며 판재를 굽히는데 필요한 판재 표면의 수직 압축응력은 무시한다. 또한 굽힘방향에 수직한 전단응력은 무시하며 소재는 소성변형이론을 따른다고 가정한다.

Fig. 1에의한 접선 방향의 변형률 ϵ_θ 는 아래 (1)식과 같고 초기 소재의 곡률 반경은 R_c 이며 R_n 은 중립축의 반경이며 z 는 시편의 센터 라인에서 중립축까지의 길이 이다.

$$\epsilon_\theta = \ln \left\{ \frac{R_c + z}{R_c - z} \right\} \quad (1)$$

소재는 아래와 같이 n승 경화 법칙을 따른다고 가정한다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \tag{2}$$

K:소성계수, **n**:가공경화지수, $\bar{\sigma}$:상당응력, $\bar{\epsilon}$:상당변형률

강소성재료가 평면 변형 상태일 때 (1)식과 (2)식을 1948년 Hill의 항복조건과 r값(Lankford 값)으로 접선응력 σ_{θ} 을 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta} = K \cdot \left[\frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \right]^{n+1} \cdot \left[\ln \left\{ \frac{R_c + z}{R_c - c} \right\} \right]^n \tag{3}$$

단위폭을가지는 판재의 굽힘모멘트는 다음 (4)식으로 나타낼수있다.

$$M = \int_{-\eta_0}^{\eta_0} \sigma_{\theta} \eta d\eta \tag{4}$$

여기에서 η_i, η_0 은 중립 축에서 판재의 상하면까지의 거리이다.

1-2) 중립면 위치 결정

판재의 굽힘에서 일반적으로 굽힘을 받는 면에서는 압축변형이, 굽힘을 받는 외부에서는 인장 변형이 발생한다. 비드 인출특성상 재료는 굽힘변형과 더불어 인장변형을 수반하기 때문에 중립면의 이동과 공구다이 모서리에서 두께가 변하게 된다. 중립면의 이동은 아래의 식에 의해 구할수 있다.

$$\sigma_t \cdot t = \int \sigma_{\theta} \eta d\eta \tag{5}$$

초기 소재의 곡률 반경을 R_c 라 하면 체적 일정의 법칙을 도입하여 소재의 초기두께(t_0)에서 미소하게 줄어든 두께(t)변화를 다음과 같이 구할수 있다.

$$c = \left[\frac{t_0 - t}{t} \right] R_c \tag{6}$$

2) 인출력

Fig. 2 (a)와 Fig. 3에서 처럼 소재 가압력 (Blank holding forces)을 B_f 라하고 시편폭이 W 일때 플랜지(Flange)부(영역 A-B)에 작용하는 응력은 힘의 평형조건에 의해서 (7)식과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_b = \frac{2\mu B_f}{Wt_0} \tag{7}$$

μ :마찰계수, t_0 :시편 초기두께

비드좌측 모서리부(영역 B-C)에서 B점의 굽힘 모멘트에 의한 굽힘 응력이 작용하고 점 C에서는 굽힘되돌림 응력이 작용한다.

또한 비드 좌측 모서리에서 소재가 공구의 곡률을 타고 유동(영역 B-C)하는데, 이러한 소재의 유동을 Fig. 3에서 처럼 벨트가 풀리를 따라 돌아가는 것으로 가정하여 벨트식 (T2

= $T_1 \exp(\mu \theta)$ 을 도입함으로써 마찰에 의한 응력 변화를 계산하였다. 따라서 B 점에서의 굽힘응력을 $\sigma_{b,1}$, C 점에서의 되돌림 응력을 $\sigma_{unb,1}$, C 점에서의 응력을 σ_c 라고 하면 각각 아래식과 같다.

$$\sigma_{b,1} = \frac{M_1}{R_{1eff} t_0} \quad (8)$$

$$\sigma_{unb,1} = \frac{M_{u1}}{R_{1eff} t_0} \quad (9)$$

$$\sigma_C = (\sigma_B + \sigma_{b,1}) \exp(\mu \theta_1) + \sigma_{unb,1} \quad (10)$$

여기에서 M_1 은 굽힘 모멘트며 M_{u1} 은 굽힘되돌림 모멘트 성분들이며 θ_1 는 Fig. 3에서의 소재와 공구와의 비드 좌측 모서리에서의 접촉 각도를 나타낸다. 접촉 각도에 대한 부분(Fig. 4)은 뒤에서 별도로 언급하였다. 또한 R_{1eff} 은 소재의 곡률반경으로서 소재가 굽힘 후 인출되면서 다이의 곡률반경과 다소 다른 값을 가지게 되는 데, 이는 일반적으로 비드 전진 깊이가 얕을수록 즉 접촉각도가 작을 수록 더 큰 값을 가지며 소재의 곡률반경은 아래식과 같이 접촉각도의 함수 형태^[11]로 표시할 수 있다.

$$R_{1eff} = \frac{R_1}{\sin \theta_1} \quad (11)$$

소재는 다시 비드부(영역 D-E)와 비드우측모서리를 통과하면서 각각 2차 굽힘응력과 2차 되돌림응력 및 3차 굽힘응력과 3차 되돌림응력을 받게된다.

결국 소재가 비드부를 통과하여 공구다이 모서리부(영역 H-K)를 통해서 유동되기 위해서는 네번의 굽힘과 되돌림응력을 받게 되며, 그때의 각도별($\theta_4=0^\circ - 60^\circ$) 인출응력 σ_p 는 다음과 같다.

$$\sigma_P = (\sigma_b + \sigma_G + \sigma_{b,4}) \exp(\mu \theta_4) + \sigma_{unb,4} \quad (12)$$

3) 변형률

비드 시험편의 변형률을 구하기 위하여 Fig. 1을 참고로 다음과 같은 몇가지 가정을 한다. 소재의 인출시 체적일정의 법칙을 만족하며 평면변형률과 전변형률이론을 이용하면 다음과 같다.

$$\overline{\epsilon} = \overline{\epsilon^p} + (\overline{\epsilon^e} = 0) = \overline{\epsilon^p} \quad (13)$$

탄소성 응력-변형률 관계식에 반경방향 변형률과 원주방향 변형률은 아래의 식으로 표현된다.

$$\epsilon_r = \left[\sigma_r - \frac{1}{2}(\sigma_\theta + \sigma_z) \right] \frac{\overline{\epsilon}}{\sigma} \quad (14)$$

$$\epsilon_\theta = \left[\sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_z) \right] \frac{\overline{\epsilon}}{\sigma} \quad (15)$$

(14), (15)식을 평면변형률 조건에 적용하면 (16)식과 같이된다.

$$\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_r = \frac{\overline{\varepsilon}}{\sigma} \left[\frac{\sigma_{\theta} + \sigma_r}{2} - \sigma_z \right] = 0 \quad (16)$$

(16)식에서 상당변형률과 상당응력은 0 일수가 없으므로 다음의 (17)식이 된다.

$$\sigma_z = \frac{\sigma_{\theta} + \sigma_r}{2} \quad (17)$$

(17)식을 상당응력식에 대입하여, 정리한후, σ_{θ} 에 비해 σ_r 이 상대적으로 매우 작다고 $\sigma_r \approx 0$ 라두면 (17)식은 (18)식이 된다.

$$\overline{\sigma} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_{\theta} \quad (18)$$

상당변형률($\overline{\varepsilon}$)식에 전변형률이론과 평면변형률 조건 및 (2)식을 적용하면 비드인출시의 변형률은 아래 (19)식과 같이 된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \left[\frac{\sigma_p}{[K(2/\sqrt{3})]^{n+1}} \right]^{1/n} \quad (19)$$

(단, $\sigma_{\theta} = \sigma_p$, $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\theta}$)

σ_p : 인출응력

ε_0 : 비드성형시의 초기변형률

4) 마찰계수

마찰 계수를 측정하기 위해 Fig. 3에서의 고정 비드가 설치되었던 위치에 롤러를 설치하여 인출력, 가압력을 측정할수 있을때 컬롬 마찰 법칙을 적용하여 아래 (20)식과 같이 마찰계수를 구할수 있다^[1]

$$\mu = \frac{\tau}{p} = \frac{F}{N} = \frac{\left[\frac{D_{d+f}}{A} - \frac{D_d}{A} \right]}{\left[2 \frac{\pi}{2} \frac{C_{d+f}}{A} \right]} = \frac{(D_{d+f} - D_d)}{(\pi C_{d+f})} \quad (20)$$

τ : 전단응력 p : 수직응력 C_{d+f} : 고정비드 사용시 가압력

D_{d+f} : 고정비드 사용시 인출력 D_d : 롤러 사용시 인출력

5) 접촉 각도

Male 비드의 표면이 비드 시험편과 접촉 상태에 있다가 블랭크 가압력에 의해 점점 비드 홈으로 전진함에 따라 Male비드와 소재간 또는 Female비드 좌우 모서리와 소재간의 접촉 각도가 변화하게 된다. Fig. 4와 같이 접촉 각도는 비드 전진 깊이(B_d)나 Clearance(B_c)에 의해 변화된다. O_1 에서 O_2 까지의 거리를 R 이라고 하면 아래와 같다.

$$\overline{O_1O_2} = R = \sqrt{(R_1 + R_2 + B_c)^2 + (R_1 + R_2 - B_d)^2} \quad (21)$$

또한 기하학적으로 $\angle CO_1B$ 와 $\angle O_2O_1D'$ 의 각도는 (22), (23)식이 되며 실제 구하려는 접촉각도($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)는 (24)식이 된다.

$$\angle CO_1B = \theta_C = \cos^{-1}\left(\frac{R_1}{L_1}\right) \quad (22)$$

$$\angle O_2O_1D' = \theta_B = \cos^{-1}\left(\frac{R_1+R_2+B_c}{R}\right) \quad (23)$$

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \frac{\pi}{2} - (\theta_B + \theta_C) \quad (24)$$

3. 실험

본 실험에 사용된 재료는 두께 0.65mm의 자동차 프레스 판재용인 아연 도금 유기 피막 강판을 사용하였다. 본 소재의 소성계수(K)는 50.81Kg/mm²이고 가공경화지수값(n)은 0.25였다. 비드시험편의 치수는 길이 600mm, 폭 50mm, 두께 0.65mm의 크기로 절단기를 이용해 절단한 후 모아레 무늬입힘장치에 의해 시험편의 길이 200mm가량을 직경 2.4mm크기의 격자 무늬를 입힌 후 비드시험기의 비드 부에 시험편을 삽입하고 정해진 인출 각도로하여 50mm/min속도로 160mm가량 인출 하였다.

실제 판재 성형시 편치가 전진함에 따라 공구 다이 모서리 부에서 접촉 각도가 증가하는 점을 착안하여 비드시험기에서 인출 각도를 0°부터 10°간격씩 60°까지 7단계로 인출했다.

비드시험기에서 인출된 시험편은 386PC와 연결된 공구 현미경으로 변형률을 측정하였으며 특히 인출 각도에 따른 마찰계수 측정은 고정 비드가 설치되었던 동일한 위치에 롤러를 9개 설치하여 (20)식으로부터 각도별 마찰계수를 7가지 구하여 지수 함수로 $\mu = 0.105601 \exp(0.00282963 * \theta)$ 와 같이 구하였다. 블랭크 가압력은 Enerpac 제품(모델: RC-256)의 25ton 잭에 의해 가압했으며 인출시 잭유압의 역류를 방지하기 위해 check valve를 사용하여 시험편의 인출시 블랭크 가압력은 일정하게 유지된다고 가정하였다. 비드 set는 S45C강으로 가공한 후 연마하여 사용하였으며 비드형상 변화에 따른 인출 특성을 살펴보기 위하여 비드 좌우 반경, 비드 반경, 공구 다이 모서리 반경을 5mm, 2.5mm바뀌가며 실험하였으며, 블랭크 가압력 변화에 따른 인출 특성을 알아보기 위해 333Kgf, 499.5Kgf 두가지 경우로 가압한 후 인출해 보았다. 상부 비드와 하부 비드사이의 틈새(Clearance)는 1.3mm로하여 실험했으며 단일 원형 비드와 환저비드 모두 동일한 시험편 크기와 동일실험조건과 방법으로 실험을 수행하였으며, 비드 형상과 비드의 치수는 Fig. 2a(단일원형비드), Fig. 2b(환저비드)와 같다.편의상 비드 좌측 반경을 R₁, 비드 반경을 R₂, 비드 우측 반경을 R₃, 공구 다이 모서리 반경을 R₄로 표시하였으며 단일원형비드(상부 비드)는 폭(w) 10mm, 높이(h) 10mm, 비드반경(R₂)은 5mm 크기로 하여 실험했으며 환저비드의 경우 단일원형비드의 인출 특성과 비교해 보기 위해 폭(w)은 10mm로 고정하고 높이(h)를 9mm와 8mm로 줄여 가며 실험을 실시하였다.

비드시험기에서의 실험 절차는 먼저 원형 격자무늬를 입힌 시험편을 비드부에 삽입(160mm)한후 잭으로 원하는 가압이나, 혹은 계획한 비드 깊이로 가압한 다음 인출하려는 인출 각도로 시험기를 고정한 후 시험편의 선단을 U.T.M에 물리고 상온에서 무윤활 상태로 인출하였으며 무마찰로 가정한 롤러사용시의 마찰계수 측정 방법도 동일한 방법과 절차로 수행하였다.

가압력과 인출력 및 변형률의 측정 절차는 먼저 고정된 드로오비드가 시험편을 성형할때의 가압력(C_{d+f})을 측정하고 다시 시험편을 인출 하여 U.T.M의 게이지를 통해 인출력(D_{d+f})을 측

정 하였고, 다음으로 고정된 드로오비드가 설치되었던 동일위치에 잘 구르는 롤러를 설치하여, 시편을 성형할때의 가압력(C_d)을 유압잭 게이지로 측정하고 시편을 인출하여 인출력(D_d)을 측정 한후, (20)식을 이용해서 마찰 계수를 구했으며, 시편 길이 방향의 변형률측정은 인출된 시편을 공구현미경을 통해 측정하고, 결과들을 인터페이스를 거쳐 컴퓨터에 저장하는 방법으로 측정을 수행 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 60° 의 인출각도로 소재가 공구다이 모서리 반경(R_4)을 통과할 때의 과정을 네 가지 step으로 구분하여 본 그림이다. 소재가 플랜지부위를 빠져 나올 때가 step1이며, step2에서는 소재가 굽힘모멘트를 받기 시작하는 지점이고, step3에서는 소재가 공구의 곡률을 타고 유동하며 굽힘 인장을 받고 있는 단계를 나타낸다. 또한 step4에서는 되돌림 모멘트를 받으면서 소재가 공구다이 끝 부분을 통과하여 인출되는 과정이다.

Fig. 6은 소재가 인출될 때 소재의 두께와 진응력 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 보면 Fig. 5의 step1에서 step4까지의 과정을 거치면서 인출되는 동안 중립축의 위치와 응력분포가 변화됨을 보여주는 그림이다.

Fig. 7은 인출각도별($0^\circ - 60^\circ$) 마찰계수를 나타낸 실험결과 그림이며, 공구다이 모서리 반경(R_4)의 접촉각도가 증가되면서 마찰계수도 미소하게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8에서는 단일 원형 드로오비드 시험편을 인출각도 0° 로 하여 블랭크가압력을 7가지로 각각 달리하여 인출했을 때 블랭크 가압력이 커질때 인출력도 비례해서 선형적으로 증가함을 보여주고 있는 그림이며, Fig. 9에서는 블랭크 가압력의 증가에 따라 드로오비드 시험편에서 공구현미경으로 측정한 최대변형률도 또한 증가하는 현상을 보여주고 있다.

Fig. 10은 단일 원형 드로오비드의 인출각도 변화에 따른 인출력의 실험결과와 (12)식을 이용한 이론결과를 비교한 그림으로서 실험결과에 비해 이론결과가 약간 과소 평가됨을 알 수 있으며, 인출각도 증가에 따라 인출력도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 11은 블랭크 가압력이 499.5Kgf 이고 단일 원형 드로오비드 반경,드로오비드 좌우 모서리 반경,공구다이 모서리 반경이 모두 5mm일때의 인출각도 증가에 따른 최대변형률의 실험결과와 (19)식을 이용한 이론선도로서 인출각도가 60° 부근에서는 실험과 다소 차이가 있으며 실험결과에서 보면 인출 각도가 커질수록 인출각도에 따른 변형률이 증가함을 보여 주고 있다.

Fig. 12는 블랭크 가압력을 499.5Kgf로 두고, 단일 원형 드로오비드반경 (R_2)과 공구다이 모서리 반경(R_4)은 5mm로 두고 단일 원형 드로오비드의 좌우 모서리 반경(R_1, R_3)변화에 따른 실험 결과와 이론결과의 비교선도 이며 단일 원형 드로오비드의 좌우 모서리 반경(R_1, R_3)이 5mm일때 보다 2.5mm가 인출각도에 따른 인출력이 보다 큼을 알수 있다.

Fig. 13은 단일 환저 드로오비드에서 비드폭을 10mm, 비드높이는 9mm, 비드 좌우 반경 (R_1, R_3)과 공구다이 모서리 반경(R_4)을 5mm로 두고, 블랭크 가압력을 333Kgf와 499.5Kgf로 달리하여 실험한 인출각도에 따른 인출력의 실험결과와 (12)식의 이론결과를 비교한 그림으로서 블랭크가압력이 커질수록 인출각도에 따른 인출력이 증가함을 알수 있다.

Fig. 14는 단일 환저 드로오비드에서 비드좌우 반경(R_1, R_3)은 5mm, 블랭크가압력은 499.5Kgf, 비드폭과 높이비는 0.9로 두고 공구다이 모서리 반경(R_4)을 5mm와 2.5mm로 하

여 실험한 인출력 결과와 이론결과의 비교 그림으로서 공구다이 모서리 반경(R_4)이 줄어들수록 인출각도에 따른 인출력이 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 15는 단일 환저 드로오비드에서 비드좌우 반경(R_1, R_3)은 5mm, 블랭크가압력은 499.5Kgf, 공구다이모서리 반경(R_4)을 5mm로 두고, 비드폭과 높이비를 0.9와 0.8로 실험한 인출력결과와 이론결과의 비교 그림으로서 비드폭과 높이비가 커질수록 인출각도에 따른 인출력이 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 16은 단일 원형 드로오비드인 경우 비드좌우 반경(R_1, R_3), 비드반경(R_2), 공구다이 모서리 반경(R_4)을 5mm로 두고 단일 환저 드로오비드인 경우 비드좌우 반경(R_1, R_3), 공구다이모서리 반경(R_4)을 5mm, 비드폭과 높이비를 0.9로 두고 실험한 결과와 이론결과의 비교 그림으로서 단일 원형 드로오비드가 단일 환저 드로오비드보다 인출각도에 따른 인출력이 더 큼을 보여주고 있다.

이상과 같이 드로오비드의 몇가지 대표적인 경우에 대한 이론 및 실험결과의 비교에서 알 수 있듯이, 본 연구에서의 이론적 해석방법은 실험에 의한 인출력이나 그때의 변형률 분포를 예측하기에 충분한 유용성을 갖는다고 사료된다. 추가적으로 여러가지 인출조건에 대한 실험을 수행하였으며, 그 종합적인 결과가 Table 1과 Table 2 이다.

5. 결 론

본 연구에서는 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 단일원형비드와 환저비드를 대상으로 하여 드로오비드 시편의 인출각도를 $0^\circ - 60^\circ$ 7가지로 하여 인출했을때의 인출력과 변형률의 실험 결과와 이론치를 비교해 보았다. 그리고 실제 판재성형시 편치가 전진함에 따라 공구다이 모서리 부에서 접촉각도가 점점 증가하는 점을 착안하여 인출각도를 달리하여 공구다이 모서리 부에서의 응력 분포를 알아보았으며, 블랭크가압력, 비드좌우 반경(R_1, R_3), 비드 반경(R_2), 공구다이 모서리 반경(R_4)등을 각각 달리하면서 이러한 인자들의 변화에 따른 인출특성을 알아본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 드로오비드 인출력과 변형률은 블랭크가압력과, 드로오비드 폭과 높이비가 커질수록, 인출각도가 커질수록, 그리고 비드좌우 반경과 공구다이 모서리 반경이 감소할수록 증가하였다.
- 2) 환저비드와 단일원형비드의 인출각도에 따른 인출력과 변형률을 비교해볼때 단일원형비드의 인출력과 변형률이 더 큼을 알 수 있었다.
- 3) 인출각도에 따른 인출특성에 있어서 벨트식에 근거한 이론결과가 실험결과에 비해 다소차이는 있으나, 블랭크 가압력, 인출각도, 드로오비드 형상 변화나 공구다이모서리반경 변화등에 따른 인출특성을 근사적으로 예측할수 있음을 알았다.
- 4) 판재의 성형률을 향상 시키기 위해 가장 적합한 형상의 드로오비드를 선택하기 위해서는 각종 드로오비드형상에 따른 인출 특성 결과들을 DATA BANK화 하는 일이 시급한 점을 고려하여, 다양한 종류의 드로오비드를 대상으로 하여 차후에도 계속 실험과 이론 해석을 병행할 필요가 있다고 사료된다.

* 후기

본 연구는 한국 과학 재단 (과제번호:93-10-00-04-3)의 지원과 기아 자동차(주)의 협력에 의하여 수행 중에 있으며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] H.D. Nine, 1978, "Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", Mechanics of Sheet Metal Forming, pp.179 - 211.
- [2] H.D. Nine, 1982, "The Applicability of Coulomb's Friction Law to Drawbeads in Sheet Metal Forming", J. of Applied Metal Working, Vol.2, no.3, pp.200 - 210.
- [3] Neng Ming Wang, 1982, "A Mathematical Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", J.of Applied Metal Working., Vol.2, no.3, pp.193 - 199.
- [4] H.D. Nine, 1982, "New Drawbead Concepts for Sheet Metal Forming, J.of Applied Metal Working", Vol.2, no.3, pp.185 - 192.
- [5] B.S. Levy, 1983, "Development of a Predictive Model for Draw Bead Restraining Force Utilizing Work of Nine and Wang, J. of Applied Metal Working", Vol.3, no.1, pp.38 - 44.
- [6] J.M. Yellup, 1984, "Modelling of Sheet Metal Flow Through a Drawbead", 13th IDDRG, pp. 166 - 177.
- [7] J.M. Yellup, 1985, "The Prediction of Strip Shape and Restraining Force for Shallow Drawbead Systems", J. of Applied Metal Working, Vol.4, no.1, pp.30-38.
- [8] N. Triantafyllidis, B. Maker, and Shyam S.K.Samanta, 1986, "An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming : Part I - Problem Formulation", J. of Eng. Materials and Technology, Vol.108, pp.321 - 327.
- [9] N. Triantafyllidis, G. Grab, B. Maker, and Shyam S.K.Samanta, 1987, "An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming : Part II - Experimental Verification", J. of Eng.Materials and Technology, Vol.109, pp.164 - 170.
- [10] L.R. Sanchez, K.J.Weinmann, 1988, "A General Computer Model for Plane Strain Sheet Flow and its Application to Flow between Circular Drawbeads", 15th IDDRG, pp.217 - 226.
- [11] Thomas B.Stoughton, 1988, "Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming", 15th IDDRG, pp.205 - 215.
- [12] 臼田松男, 石井良男, 1985, "薄板成形における破断豫测", 第 36回 塑性加工 聯合講演會, pp.321 - 324.
- [13] M. Usuda, Y.Ishii, 1988, "Estimation of Flow Stress in Secondary Deformation of Prestrained Sheet Steels", 15th IDDRG, pp.155 - 161.
- [14] T.Furubayashi, S.Ujihara and T.Sakamoto, 1988, "Simulation of Forming Severity on Autobody Panels using a CAD system - Analysis of Drawbead and its Control", 15th IDDRG, pp.243 - 250.
- [15] T.Furubayashi, S.Ujihara, T.Sakamoto, 1989, "自動車用 パネル の成形性豫测 と 絞り ビード 役割", 塑性 と 加工, Vol.30, no.337, pp. 206 - 211.

[16] A. Makinouchi, R.H.Wagoner, 1993, "NUMISHEET '93", Proceeds of The 2nd International Conference, pp.337 - 344, pp.523- 530.

Table 1 Experimental results for circular drawbead (Fig. 2(a))

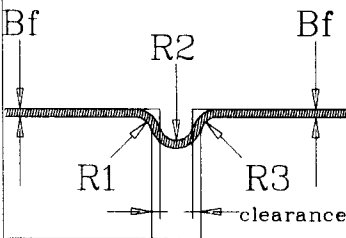
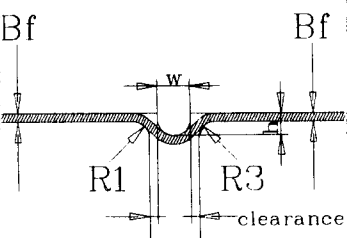
single circular drawbead	drawing angle	drawbead dim. (mm)	holding force (Kgf)	restraining force (Kgf)	strain (ϵ_{max})	
	$\theta = 0^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=5$	499.5	385	0.064	
			333	330	0.0567	
		$\theta = 10^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=2.5$	499.5	390	0.0808
				333	287.5	0.0486
	$R_1=R_3=2.5, R_2=R_4=5$		499.5	547.5	0.1318	
			333	300	0.0514	
	$\theta = 20^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=5$	499.5	390	0.068	
			333	345	0.0579	
		$R_1=R_2=R_3=5, R_4=2.5$	499.5	407.5	0.0823	
			333	300	0.0514	
	$\theta = 30^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=5$	499.5	412.5	0.073	
			333	360	0.0583	
		$R_1=R_2=R_3=5, R_4=2.5$	499.5	420	0.0847	
			333	310	0.0531	
	$\theta = 40^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=5$	499.5	597.5	0.1401	
			333	435	0.08	
		$R_1=R_2=R_3=5, R_4=2.5$	499.5	450	0.0885	
			333	385	0.0595	
	$\theta = 50^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=5$	499.5	450	0.0885	
			333	325	0.0551	
		$R_1=R_2=R_3=2.5, R_4=5$	499.5	625	0.1531	
			333	452.5	0.0892	
	$\theta = 60^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=5$	499.5	417	0.0598	
			333	475	0.0953	
$R_1=R_2=R_3=5, R_4=2.5$		499.5	482.5	0.0945		
		333	447.5	0.0645		
$\theta = 70^\circ$	$R_1=R_2=R_3=2.5, R_4=5$	499.5	340	0.0644		
		333	390	0.0755		
	$R_1=R_3=2.5, R_2=R_4=5$	499.5	650	0.1599		
		333	672.5	0.1726		
$\theta = 80^\circ$	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=5$	499.5	492.5	0.099		
		333	475	0.069		
	$R_1=R_2=R_3=5, R_4=2.5$	499.5	550	0.114		
		333	425	0.0851		
$R_1=R_3=2.5, R_2=R_4=5$	499.5	705	0.1865			
	333	425	0.0851			

Table 2 Experimental results for round drawbead (Fig. 2(b))

single round drawbead	drawing angle	drawbead dim. (mm)	holding force (Kgf)	restraining force (Kgf)	strain (ϵ_{max})
	$\theta = 0^\circ$	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.9$	499.5 333	340 270	0.06 0.0499
		$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.8$		315	0.0567
		$R_1=R_3=2.5, R_4=5, h/w=0.9$	499.5	477.5	0.0991
		$R_1=R_3=5, R_4=2.5, h/w=0.8$		350	0.0762
	$\theta = 10^\circ$	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.9$	499.5 333	357.5 282.5	0.0638 0.0543
		$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.8$		345	0.0606
		$R_1=R_3=2.5, R_4=5, h/w=0.9$	499.5	495	0.1081
		$R_1=R_3=5, R_4=2.5, h/w=0.9$		362.5	0.0781
	$\theta = 20^\circ$	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.9$	499.5 333	372.5 290	0.0715 0.0567
		$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.8$		352.5	0.0677
		$R_1=R_3=2.5, R_4=5, h/w=0.9$	499.5	515	0.1141
		$R_1=R_3=5, R_4=2.5, h/w=0.9$		385	0.0819
	$\theta = 30^\circ$	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.9$	499.5 333	392.5 315	0.075 0.0587
		$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.8$		362	0.0704
		$R_1=R_3=2.5, R_4=5, h/w=0.9$	499.5	527.5	0.1178
		$R_1=R_3=5, R_4=2.5, h/w=0.9$		415	0.0858
	$\theta = 40^\circ$	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.9$	499.5 333	415 345	0.0808 0.0598
		$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.8$		380	0.0792
		$R_1=R_3=2.5, R_4=5, h/w=0.9$	499.5	565	0.1307
		$R_1=R_3=5, R_4=2.5, h/w=0.9$		450	0.09
	$\theta = 50^\circ$	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.9$	499.5 333	432.5 370	0.0854 0.0606
		$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.8$		407.5	0.0831
		$R_1=R_3=2.5, R_4=5, h/w=0.9$	499.5	595	0.1372
		$R_1=R_3=5, R_4=2.5, h/w=0.9$		500	0.099
$\theta = 60^\circ$	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.9$	499.5 333	450 385	0.0912 0.0618	
	$R_1=R_3=R_4=5, h/w=0.8$		427.5	0.086	
	$R_1=R_3=2.5, R_4=5, h/w=0.9$	499.5	622.5	0.1462	
	$R_1=R_3=5, R_4=2.5, h/w=0.9$		532.5	0.1043	

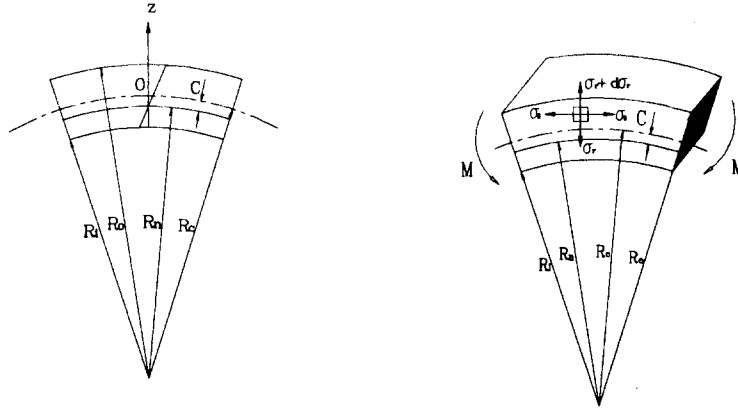
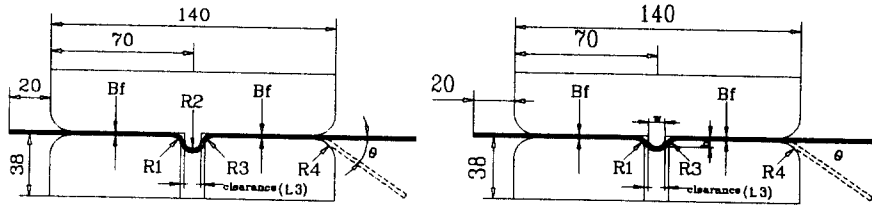


Fig. 1 Deformed geometry of sheet



(a) circular drawbead

(b) round drawbead

Fig. 2 Schematic view of drawbead set

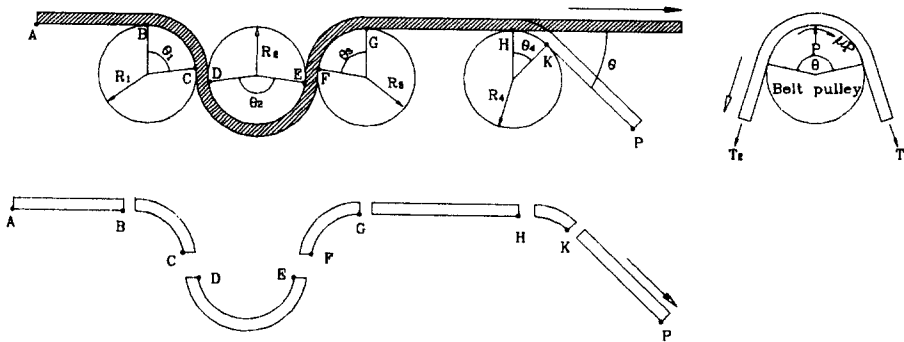


Fig. 3 Detail of drawing phenomena

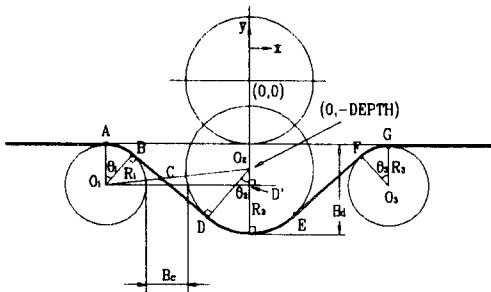


Fig. 4 The contact model of drawbead

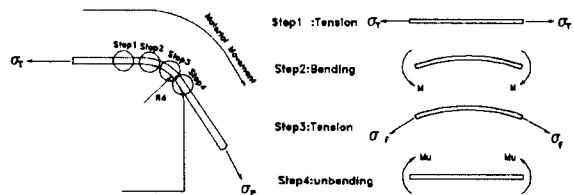


Fig. 5 Bending and unbending model during drawing processes

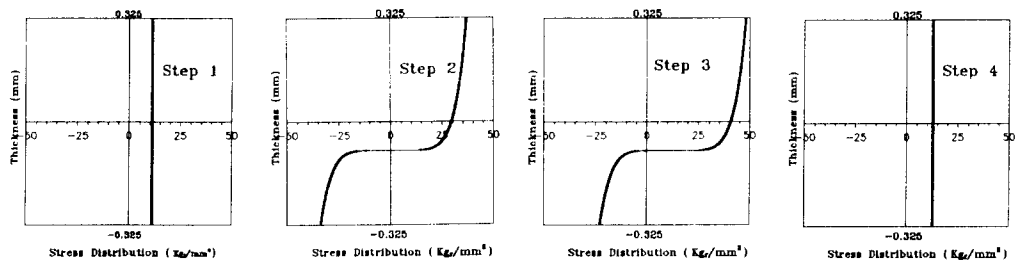


Fig. 6 Calculated results of stress distribution

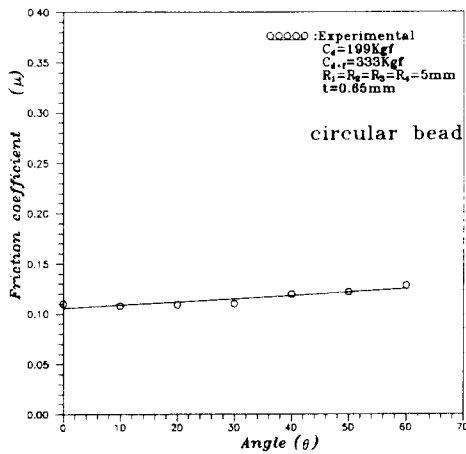


Fig. 7 Friction coefficient versus drawing angle (θ)

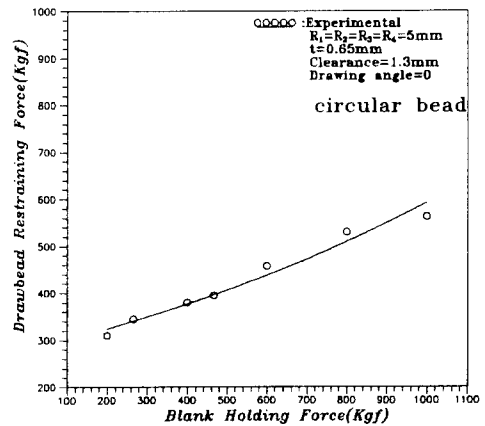


Fig. 8 Restraining force versus blank holding force ($\theta = 0^\circ$)

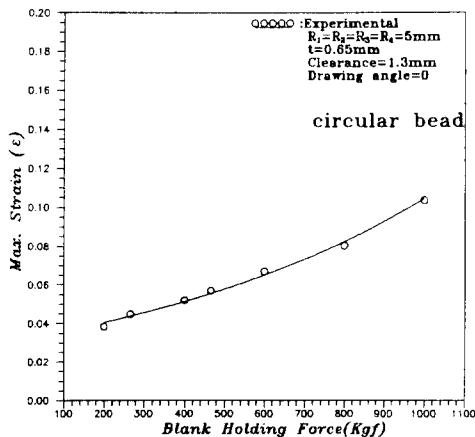


Fig. 9 Max. strain versus blank holding force ($\theta = 0^\circ$)

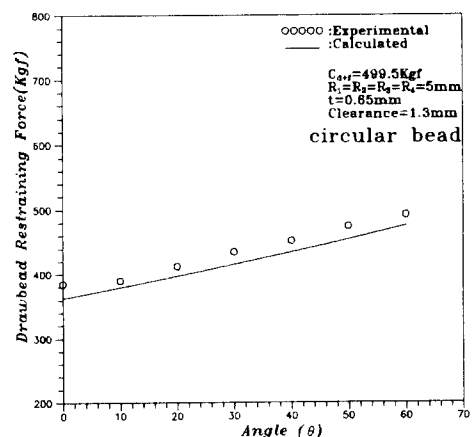


Fig. 10 Drawbead restraining force versus drawing angle (θ)

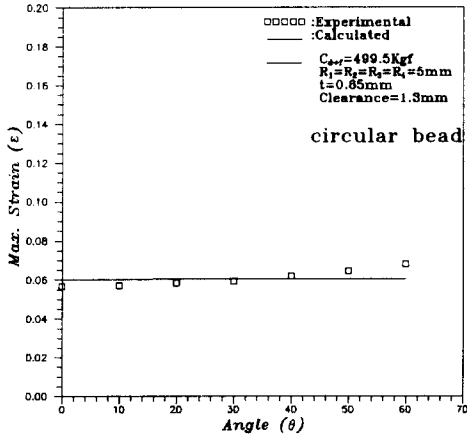


Fig. 11 Max. strain versus drawing angle (θ)

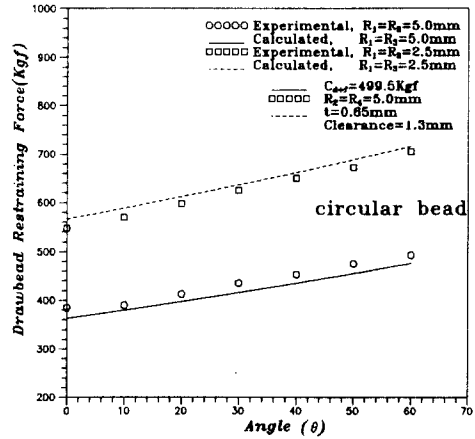


Fig. 12 Restraining force versus drawing angle for different R_1 and R_3

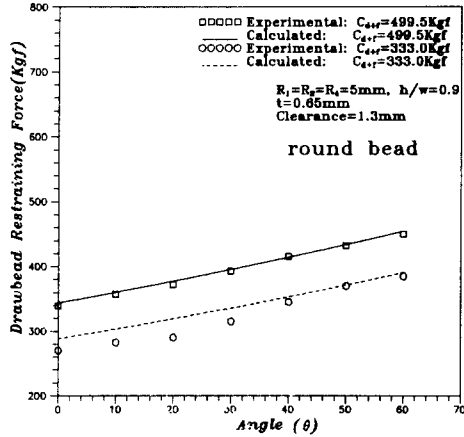


Fig. 13 Restraining force versus drawing angle for two blank holding forces

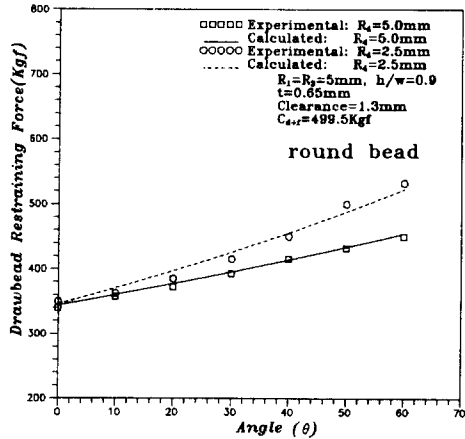


Fig. 14 Restraining forces versus drawing angle for different R_4

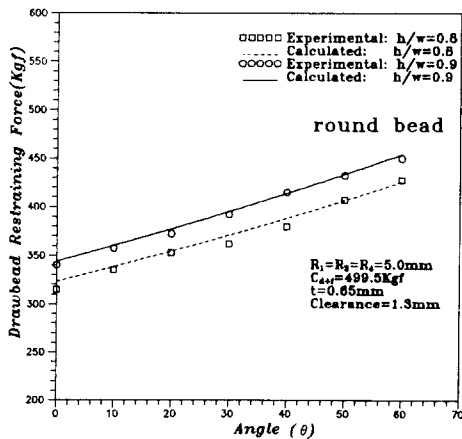


Fig. 15 Restraining force versus drawing angle for different h/w

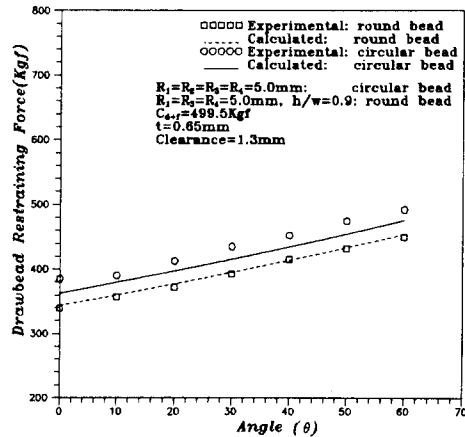


Fig. 16 Restraining force versus drawing angle for different shape drawbeads