

원통드로잉 성형에 있어서 Puckering 억제조건과 FEM-Simulation 해석

後藤 學, 林 哲 錄*, 鄭 泰 勳

岐阜大學工學部 機械工學科

On the Critical Tension Force and Analysis by the FEM for Puckering
in the Cylindrical Cup- Drawing

Manabu Gotoh, Cheal-rok Lim, Tae-hoon Chung

Department of Mechanical Engineering, Gifu University, Yanagido
1-1, Gifu 501-11, Japan

ABSTRACT

As for axisymmetric sheet metal forming, a kind of pick-up apparatus for body-wrinkling is devised. Experiments with both hemispherical and flat headed punches, with various clearances between punch and die, with respect to three kinds of materials each of which has two thicknesses, are performed. Firstly the process of evolution of body-wrinkling is observed. Then the critical blank-holding force (or meridional tensile force) for suppression of body-wrinkling at a specified punch-stroke is measured for all cases mentioned above. An empirical formula for it is proposed. Deformation patterns and stress distributions are analysed by the use of FEM. A simplified critical condition for body-wrinkling is formulated and introduced into the FEM program. And its effectiveness is checked by comparison with the experimental results. Using this FEM system, the governing factors of body-wrinkling are cleared up.

Key Words : Sheet Metal Forming, Puckering, Body-Wrinkling, Axisymmetric Forming, Critical Meridional Tension, Critical Blank-holding Force, FEM Analysis

1. 서론

판재의 프레스 성형에 있어서 주요한 불량 현상으로서, 재료가 남는 부분에 생기는 좌굴에 의한 Buckling과 Puckering이 있고, 재료가 부족한 부분에 생기는 파단이 있다. 그러나, 이 좌굴을 분류하면, 변형 과정중의 Flange 부에 생기는 Flange-Wrinkling 및 몸통부분에 생기는 Puckering 으로 나눌수가 있다. 종래 Flange-Wrinkling에 대해서는 많은 연구자에 의해 이론, 실험의 양면으로 상세히 연구되어져 왔다. (예를들면, 宮川^{[1],[2],[3-5]}, 河合 등) 또, 최근에는 원통 및 각통 드로잉에 대해서 後藤·林^[6]에 의해 한계 좌굴 억제 조건 산정법 등을 보고했다. 한편, Puckering에 대해서는 Flange-Wrinkling에 비하여 아직 연구가 깊지않고, 현재까지 그다지 정리된 연구가 없다는 것이 현 상황이다. 따라서, 본 논문에서는 주로 Puckering에 중점을 두고 그 발생에 큰 영향을 주는 몇개의 인자 (Punch force, Clearance, 재질, 시험편의 판두께 등)를 선택하여 그것들에 관한 실험을 하였다. 이러한 이유로서는 Puckering의 정의가 일반적으로 아직 확실치가 않고, 그 종류와 발생원인, 재료적 성질과의 관련등이 확실하

지 않기 때문이다. 이번 실험은 축대칭성형에 한정을 두고, 먼저 Puckering의 검출방법을 고안하고, Puckering 검출기를 설계, 제작했다. 그리고, 많은 예비적 실험을 통해서, Puckering 발생을 인정하는 실험상의 기준을 명확히 했다. 이러한 측정방법과 검출기에 의해, 각종 Clearance, 3종류의 재질에 대하여 각각 두 종류의 판두께의 소판을 준비하고, Puckering의 발생상태를 상세히 관찰하고, Puckering 발생을 없앨수 있는 억제조건을 실험적으로 구했다. 한편, 최근에는 제품의 다품종 소량생산과 고정도화가 급속히 발전해 있고, 그것들의 상황변화에 대응할 필요가 있다. 그때문에 실험에 있어서 시행착오의 회수를 감소시키는 것이 중요과제로 되기 때문에, Simulation의 필요성이 있다. 또, 성형을 기본적인 형상으로 한정하고, 각종 인자의 효과를 반정량적으로도 사전에 파악하기 위해, 수치 Simulation이 필요 불가결이라 생각한다. 본 논문에서는 이러한 것에 대응하기 위해, 이미 개발되어져 있는 Code GOLDA^{(7),(8)}를 이용하여, 이것에 Puckering 발생 유무를 판정하는 서브루틴을 구성하여 해석했다. 그리고, 이것에 의한 결과와 실험결과를 비교하고 고찰했다.

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 재료

본 실험은, 동경시험기 제작소에서 제작한, Deep-Drawing 시험기를 사용했다. 그리고 Multi-pen recoder를 이용하여 Punch force와 Punch Stroke 및 Blank holding force를 자동 기록했다. 또 Puckering의 유무에 대해서는 회전식 Puckering 측정장치를 별도 고안, 제작하여 사용했다. 재료는, 시판의 공칭판두께 0.2mm, 0.3mm의 대표적인 Deep-Drawing용 Aluminum과 황동 (60/40) 및 판두께 0.3mm, 0.4mm의 Deep-Drawing용 강판 (SPCE, SPCC)를 사용했다. 재료의 인장특성을 Table.1에 나타냈다. 이번연구는, Drawing성형의 기본이 되는 축대칭 성형 (원형소판을 이용한 원통 Drawing 성형)에 대해서만 실험했다. 더우기, 시험편의 크기는 $\phi 86\text{mm}$ 로 했다.

2.2 실험조건

Punch속도는 1mm/s 이하의 저속으로 일정하게 설정했다. 또, Die면과 Blank holder force에는 액체윤활제 Spindle oil (三菱 다이아몬드 루브 R032) 을 사용했다. 또, Punch와 시험편은 무윤활 상태로 했다. 본 실험은 Clearance 차이에 의한 Puckering의 발생 상태를 비교하는 것이 하나의 목적이다. 그 때문에 Die Bore diameter를 일정 ($\phi 55\text{mm}$)하게 하고, Punch diameter를 각각 Table-2와 같이 변화시켜 실험했다.

본 실험은 항온실에서 행하고, 年間을 통해 실온은 $20^{\circ}\text{C} \pm 1$ 로 설정했다. 가공조건은 Table.3에 나타냈다. Puckering 발생을 체크 하기위해 본연구에서는 Punch 스트로크를 11.5mm로 했다.

2.3 Blank Holding Force 및 Puckering 발생유무의 판별기준

Deep-drawing 과정에서 생기는 Flange-wrinkling은 원주방향 응력 σ_{θ} 에 의한 것이 크다. 단지, Punch 반경과 Die 반경이 크거나, Clearance가 클 경우에는 Puckering이 발생한다. 본 연구는 Puckering에 주안을 두고 실험을 하기위해 Blank Holding Force에 대해서는 Flange-wrinkling이 발생하지 않을 정도의 최저 값을 사용하는 실험을 하였다. Puckering의 유무에 대해서, Puckering의 존재가 애매모호 할 경우에 대해서는, 이번 실험을 위해 제작한 회전식 Puckering 측정 장치를 이용하여 Puckering의 유무를 결정했다. 이 판단기준은 다음과 같이 정했다. 즉, 빛을 이용해서 주름이 보이지 않는 시험편을 몇개 선택하여 이 장치로 Puckering을 측정 한 결과 $\pm 0.05\text{mm}$ 의 진폭이 존재했기 때문에 그 이상의 진폭이 있는 것에 대해서는, Puckering이 존재한다고

판정했다.

2.4 Puckering 높이 측정장치

먼저 Fig.1에 Puckering 높이 측정장치의 배치도를 나타냈다. 즉, 이것은 측정부(A)와 기록부(B)로 나누어지고, (A)는 Puckering 높이 측정을 위한 변위계, 시험편의 중심을 잡기위한 장치, 회전장치 본체, 회전각 검출장치, (B)는 전원장치, 앰프, X-Y Recorder로 구성되어져 있다. X-Y 레코더는 변위를 종축(측정精度 4 μ m)과, 회전각 검출기에 의한 회전각을 횡축으로 기록했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Puckering의 특성

본 연구를 통하여, Puckering은 파장이 길은 것과 짧은 것이 있음을 알았다. Fig.2(a)-(c)에 Puckering 높이를 측정한 곡선의 예를 나타내었다. 그림(a)-(c)는 황銅 0.2mm, ϕ 40의 Flat headed Punch(F.H.P)의 경우의 Puckering 높이를 측정한 곡선이지만, 그림(a)는 Puckering이 존재하지 않는 것으로 판정한 경우이고, 이 정도의 시험편은 사람의 오감으로는 판정불가능 하다고 말하여진다. (b),(c)는, Puckering이 존재한다고 판정한것이다. 그림(b)의 측정곡선을 이번에 규정한 기준에 따라 보면, 어느면에서 Puckering이 존재하지 않는것 같이 판단되지만, 실제로 실물에 접하면 Puckering이 확실히 존재한다는 것이 확인되었다. 따라서, 파장에 대한 Puckering 높이의 비에 따라 Puckering의 유무를 판단하는 것이 필요하다는 것을 알았다. 이와같이 Puckering 판정은 대단히 곤란하다는 것을 알았다. 본래, 이번에 제작한 장치는, Puckering이 존재하는유무의 한계부근에서 사용할 목적으로 만든것으로 그림(c)와 같은 경우는 측정불가능하다. 그러나 엄밀히 측정하면, 파장이 긴 완만한 좌굴과 섬세한 좌굴이 섞이어 발생하고, 더우기, 여기서의 Puckering 는 국소적으로 집중해있다. 축대칭이라고 하지만, Puckering의 발생상태가 반드시 주기적으로 발생하는 것은 아니다.

3.2 각종 클리어런스에 대한 임계 Punch force와의 관계

Fig.3은 각각의 각종 클리어런스에 대한 임계 Punch force를 나타냈다. (a)(b)는 시험편 ϕ 86mm에 대하여, Punch stroke를 11.5mm로 했을때 얻은 결과이다. 각각의 그림을 보고 알수 있듯이, punch와 die사이의 클리어런스가 증가함에 따라 임계 Punch force가 거의 직선적으로 하강하고 있다. punch stroke를 어떤점에서 일정하게 하면, 당연히 편치 직경이 작게 될경우 드로잉량이 적게 되고, Punch force는 드로잉량에 비례한다고 말하여 지므로 당연한 결과라고 말할수 있다. Flat Headed Punch 보다는 Hemispherical Punch(H.H.P)쪽이 임계 Punch Force가 낮게되는 것을 그래프를 보아 알수있지만, 같은 직경의 Punch와 같은 Clearance에 대해서, F.H.P와 H.H.P를 동일 Punch Stroke로 했을 경우에도 드로잉 양의 차이가 있기 때문이다.

3.3 임계장력과 Body경사각의 관계

Puckering을 제거하기 위해서는, Body部 장력(T)를 증가시키면 된다. 따라서, 이번 실험에서 얻어진 Data를 장력으로 바꾸어 고찰했다. 먼저, Body部的 장력은 Fig.4 관계에서 Punch Force (P)와 다음식의 관계로 풀수있다. 따라서, Body경사각 ψ 를 구하면 장력을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{P}{\sin \psi} \quad (1)$$

여기서, Body 경사각 ψ 의 값이 필요하지만 이것은 기하학적으로 다음의 두개의 식을

ψ 에 대해 풀음으로서 얻어진다. 단지, 이경우의 Body部를 직선(원추)로 가정했다.

$$S = C \tan \psi + (\rho_p + \rho_d)(1 - \cos \psi), \quad C = C + (\rho_p + \rho_d)(1 - \sin \psi) \quad (2)$$

이번 실험은 stroke(s)를 11.5mm로 했고, 위의 식으로 부터 구해진 ψ 를 Table.4에 나타낸다.

3.4 임계장력과 Clearance

Fig.5에 임계장력과 Clearance의 결과를 나타냈다. F.H.P와H.H.P는 모두 Clearance가 클수록 임계장력이 낮고, Puckering이 발생하기 쉬운것을 나타내고있다. Puckering의 발생원인은 Body部에서의 압축응력 σ_θ 에 있다고 생각되어지므로, 본실험에서 Puckering의 발생은 주로 Body부의 자유도의 크기 (Clearance가 크고, 넓히면 넓힐수록 자유도가 크다)와 판 두께(얇을수록 Puckering 발생에 대한 저항이 낮다)에 주로 의존한다고 하는 실험결과가 얻어 졌다고 말할수 있다. 다음에, F.H.P보다도 H.H.P쪽이 역시 임계 Punch Force가 낮고, H.H.P쪽이 Puckering이 발생하기 쉽다. 이것은 H.H.P쪽이 공구와 접하지 않은 자유로운 Body部가 동일 Clearance에 대해서도 크게 되기 때문이다. 또 판두께가 얇을수록 임계장력이 낮게되며, Puckering이 발생하기 쉬운것은 예상한 바와 같다. 그러나, 강판에 대해서는 이러한 경향과는 다르지만 이러한 이유는 재질이 다른데서 온다고 생각되었다.

3.5 Puckering 억제조건

이번에 얻어진 실험 Data를 이용하여 고안한 이 Puckering억제조건을 여기서 나타내었다. Flange-wrinkling를 억제할 수 있는 조건으로서는 B.H.F를 제시하였다.^{[1-6],[9-14]} Puckering에 대해서는 이미 3장에서도 서술한 바와 같이 장력이 중요하기 때문에, 억제조건으로서 임계장력을 생각하기로 하였다. 즉, 실험식으로서 다음식을 제안한다.

$$T_{cr} = 1.05 \times (Y_p + U.T.S) \times n^{4n} \times (2\pi r_i t_0) \times (\sin \psi) \quad (3)$$

여기서, 위의 식의 기호는 각각 다음과 같은 의미가 있다.

n ; 材料의 n 値 [-] C ; 材料의 C 値 [MPa]
 t_0 ; 재료의 두께 [m] ψ ; Die 와 시험편의 접촉각도 [°]
 (Body부를 직선으로 생각함)

r_i ; Die hole radius + Die Profile radius [m]

위의 식의 유래는 다음과 같다. 즉, 이번 실험결과를 통해서, 이하에 나타내는 4개의 인자가 임계장력에 크게 영향을 주는 것을 알았다.

- ① n 값의 영향이 크다.
- ② 인장강도의 영향이 크다. 즉, 재료의 변형저항이 이 억제조건에 크게 영향을 준다.
- ③ 판두께의 영향이 크다.
- ④ Clearance,stroke의 영향도 크지만 이것은 접촉각 ψ 로 고려할 수 있다.

이상을 고려하고, 한편으로는 시험결과를 감안하여 계수를 정해서 위의 (3)식을 유도했다. 단지, r_i 를 본실험에서는 일정하게했다. $2\pi r_i t_0$ 는 대체 판재의 하중부담면적에 상당하는 것으로 이 항을 넣었다. Fig.6에 이 조건식의 값과 실험값과의 비교를 나타낸다. 단지 Puckering 를 억제한다고 하는 입장으로 생각하면 장력을 가능한한 증가시키면 좋다. 그러나 장력은 flange部의 이동저항을 증가시키는 것을 의미 하기 때문에, 너무나 강한 장력은 성형품의 가장 약한부분인 Punch Profile 부분에서 하중부담능력을 넘어, 파단이라하는 불량성형을 일으킨다. 이러한 것을 생각하면 이 장력이라

하는 것도 최소한의 필요한 힘이 요망되어진다. 횡축에 실험으로 부터 얻은 임계장력을, 종축에 이번에 제안한 억제식에 의한 값을 나타내었다.

전반적으로 계산값이 실험값에 비해 조금 높아있다. 식(3)과 같은 Puckering 억제조건은 종래에 전혀 제안 되지않았다. 이러한 의미에서 이번에 제안한 식은 의미가 있다고 생각되어 진다.

4.유한요소법에 의한 Simulation

본해석은 이미 개발되어진 유한요소법GOLDA를 써서, 새로운 축대칭 성형을 이용한 분기조건을 삽입하여 행했다.

4.1 분기의 간이 판정법

판재의 미소요소에 관해서 다음식이 유도 되어진다.

Euler의 좌굴식으로 부터

$$(-\sigma_{\theta})_{cr} \propto \pi^2 \bar{E} / \lambda^2 \quad (1)$$

$$\lambda = \text{細長比} = l/k \quad ; \quad k = \text{平均回轉半徑}$$

$$I = k^2 A \quad ; \quad I = \text{단면 2차 모멘트}$$

$$I = bt^3 / 12 \quad ; \quad A = bt$$

$$\therefore k = t / \sqrt{12}$$

이것을 축대칭으로 적용하면

$$l = 2\pi \bar{r}$$

$$\lambda = 2\pi \bar{r} / (t / \sqrt{12}) = 2\sqrt{12}\pi (\bar{r} / t)$$

$$\therefore (-\sigma_{\theta})_{cr} \propto 1 / 12 \bar{E} (t / \bar{r})^2 \quad (2)$$

$$\bar{E} = \bar{E} t = d\bar{\sigma} / d\bar{\sigma} \quad (3)$$

$$(-\sigma_{\theta})_{cr} = \frac{\alpha}{12} \cdot \left(\frac{t}{\bar{r}}\right)^2 \cdot \frac{n\bar{\sigma}}{(\varepsilon + \varepsilon_a)} \quad (4)$$

α 는 실제 좌굴이 발생하는 것에 대한 주변으로부터의 구속효과를 나타내는 계수이다. 여기서는 주로 H.H.P : $\alpha = 5000$

$$\text{F.H.P} : \alpha = 8000 \text{ 으로했다.} \quad (5)$$

변형시의 응력은 판두께와 요소 형상으로 부터 $t=0.5\text{mm}$, 100分割(一層)의 계산값을 사용했다. 이러한이유는 어느정도 판두께가 얇을때 (실험에서는 0.2-0.4mm)의 응력분포의 차이는 그다지 있지않는 것으로, 계산값의 안정을 위해 (分割數를 일정하게 하고 판두께를 작게하면, 당연히 정밀도가 떨어짐)서 이다. 그때, B.H.F(H)는 판두께 비에 따라 조정했다. 예를들면, $t^*(\text{mm})$ 에 대한 응력 분포가 필요할때는

$$H = (0.5 / t^*) H^* \quad (6)$$

로했다. (여기서, H^* 는 T^* 에 대한 B.H.F)이것은 外周마찰효과를 생각할때 마찰에 대한 원주 응력은 ((B.H.F)/(판두께))에 비례하기 때문이다. t^* 에 대한 Punch force(P^*)는 $t=0.5\text{mm}$ 에 의한 계산값 P 로 부터

$$P \times (t^* / 0.5)^{1/2} \quad (7)$$

로해서 구했다. (2.3차레의 시행착오에 의해 이렇게 정함) 물론 식(4)는 $t = t^*$ 로해서 적용했다. 또 σ_{θ} 의 값으로서는 Die 표면의 값을 모든 경우에 사용했다. Die profile부

근에서 복수 요소의 σ_{θ} 가 식(4)보다 작을때, 분기발생(Puckering 발생)이라 판정했다.
식(5)의 α 의 값은

Al, 0.3mm^t ϕ 40 (H.H.P)

Al, 0.3mm^t ϕ 30, $\rho_p = 6$ (F.H.P)의 2개의 실험값에 맞추어 정하였지만, 다른 모든 조건(재료,판두께등)에도 일률적으로 이 값을 사용했다.

4.2 계산 조건

다음은 계산에서 사용한 조건이다.

소판의 크기 : ϕ 86mm

재 질 : Al, Brass, Steel

판 두께 : 0.2mm, 0.3 mm, 0.4 mm

공구 형성에 대해서는 Table.2에 나타내고, 材料定數에 대해서는 Table.5에 나타낸다.

4.3 계산 결과 및 고찰

4.3.1 변형 형상

먼저 변형 형상에 대해서는 Fig.7(a)에 알루미늄 0.3mm의 H.H.P드로잉의 process를 나타낸다.알루미늄은 stroke 20mm 까지 드로잉하고 황동은 스트로크 30mm까지 드로잉 했다. ①은 스트로크 11.5mm일때의 형상이다.그림(b)에 실험에서 실제로 성형한 제품의 외형도를 나타내었다.(a)가 알루미늄 0.3mm^t의 스트로크 11.5mm의 때이다. 그림(a)의 ①과 (b)를 비교해 보아 알수 있듯이 대단히 좋은 일치를 나타내고 있다.변형이 다소 틀리기는 하지만 이것에 대해서는 실제의 변형형상은 하중을 제거한 상태이고, 한편 이번 simulation에서는 스프링 백의 영향을 전혀 고려하지 않았기 때문에 이러한 차이가 발생했다고 생각되어 진다.

4.3.2 응력 분포

Fig.8에 수치해석에 의해 얻어진 원주 방향의 응력분포도를 나타낸다.(a)의 그림이 임계장력을 주었을 때의 것이고 (b)의 그림은 약 85%의 하중을 주었을때의 그림이다.(재질은 황동으로 판두께 0.2mm의 ϕ 40mm의 H.H.P 드로잉) 이 그림으로 puckering 발생 유무를 직접 판단하는 것은 불가능하지만 두 그림을 비교하면 응력의 正負가 反轉하는 중립위치가 약 7mm정도인데 flange로부터 떨어져 있다. 이 puckering 발생에 큰 영향(말을 바꾸면 puckering을 제거 할 수 있음)을 준다. 그밖의 조건에 대해서, 정도의 차이는 있지만 같은 결과가 얻어졌다.

4.3.3 실험과 계산에 의한 Puckering Force 와 임계 스트로크와의 비교

이번에 얻어진 실험값과 계산에 의한 결과를 Table.6에 나타냈다.실험에서는 스트로크를 11.5mm로 일정하게 했다. 4.1에서 설명한것 같이 좌굴이 발생하는 것에 대한 주 변으로부터 구속조건은 H.H.P에 대해서 $\alpha=5000$, F.H.P에 대해서 $\alpha=8000$ 으로 했다.그러나 SPCE,SPCC 의 F.H.P의 몇군데의(*)은 H.H.P의 구속조건을 채용했다.계산의 임계 스트로크를 보면,차이는 있지만 실험치와 상당히 근접한 것을 알 수있다. 또 Punch Force를 보면 대부분의 실험값이 계산값보다 다소 작지만 거의 일치했다고 생각되어진다.

4.3.4 B.H.F 와 장력에 의한 분기 발생 관계

Fig.9는 Al, 0.3mm, ϕ 30mm의 H.H.P의 예이다. 이 그림에서는 B.H.F 와 장력에 대해서 나타냈다.B.H.F 가 작을 수록 분기발생이 빠르게 발생하고 ,장력이 클수록 분기

발생이 늦게 발생하는 것을 알았다.

4.3.5 n값과 분기 발생의 관계

Fig.10은 n값 효과에 대해서 나타냈다. n값이 작을 수록 puckering이 발생하기 쉽고 말할수 있다.일반적으로 n값이 작을 수록 puckering이 발생하기 쉽다는 것을 이번 계산 결과로 확실히 알 수 있었다.

4.3.6 판두께 효과에 의한 분기 발생 관계

Fig.11은 Al 0.3mm, ϕ 20mm의 H.H.P 의 결과이다. 이것은 B.H.F를 일정하게 하여 판두께 효과를 얻은 결과이다.판두께가 얇을 수록 puckering 발생에 대한 저항이 낮으므로 그림을 보아 알 수 있듯이 판두께가 작을 수록 puckering 이 발생하기 쉽다는 것을 알 수 있었다.

4.3.7 초기 항복응력에 의한 분기 발생 관계

Fig.12에 초기 항복응력과 임계 스트로크의 관계를 나타냈다.초기 항복응력이 작을 수록 puckering 이 발생하기 쉽다는 것을 알았다.

5. 결 론

본 실험은, 원통드로잉 성형에 있어서 Puckering 발생에 크게 영향을 주는 몇개의 인자에 대해서 실험 및 해석을 하였고, Puckering 발생과 그 성질에 관한 여러 지식을 얻었다. 이하에 그것을 요약한다.

(1) Puckering 발생에 관한 판재의 자오선 방향의 임계장력이 Puckering 발생의 직접적인 원인이다. 즉, 임계장력이 작을수록 Puckering 발생이 쉽다는 것을 의미한다.

(2) 임계 Punch force 또는 임계장력은 Clearance의 증가에 따라 감소한다.

(3) 판두께가 작을수록 임계장력은 감소하고, Puckering이 발생하기 쉽다.

(4) n값의 감소와 함께 임계장력도 감소하고, Puckering이 발생하기 쉬워진다.

(5) Body 경사각(ϕ)가 증가함에 따라 임계장력이 증가한다. 이것은 주로 Clearance가 감소하기 때문이다.

(6) 임계장력의 실험식을 제안하고, 실험과 비교해서 그 유효성을 확인했다.

(7) Puckering은 드로잉을 시작하면서 바로 발생하는 것이 아니고, 발생하더라도 어느 임의의 펀치스트로크에서 발생한다.

(8) 한번 발생한 Puckering은 성형의 진행과 함께 Puckering 수가 증가한다.

(9) Puckering은 축대칭 성형에 대해서 주기적으로 발생한다고는 말할 수 없다.

(10) Clearance가 클수록 파장이 긴 Puckering이 발생하기 쉽다.

(11) F.H.P 펀치는 파장이 짧은 Puckering이 되기 쉽고, H.H.P 펀치는 파장이 긴 Puckering이 되기 쉽다.

(12) 성형조건이 같을때, F.H.P 펀치 보다 H.H.P 펀치 쪽이 Puckering이 발생하기 쉽다.

(13) 탄소성 유한 요소법 코드 GOLDA에 분기판정 서브루틴을 삽입하여, Version up 했다. 이것으로 드로잉과정을 수치 시뮬레이션하고, 또 Puckering 발생의 유무를 판정했다. Puckering이 발생함에 대한 주변으로부터의 구속조건 α 를 도입함으로써, 실험에서의 Puckering 발생점이 어느정도 예측 가능하다는 것을 알았다. 또, B.H.F, 장력(T), n값, 판두께 및 초기 항복응력 효과가 예측한대로 시험결과와 일치하는 것을 알았다.

마지막으로 본실험하는데 있어 다수의 조언을 준 山下實 조교 및 실험에 협력을 준 碩士課程 및 學部 學生 모두에게 감사한다.

참 고 문 헌

- 1) 宮川：機論,23-130(1957),390.
- 2) 宮川：同上,23-130(1957),390.
- 3) Kawai.N.：Bulletin of JSME,4-13(1961),169.
- 4) Kawai.N.：ibid.,4-13(1961),175.
- 5) Kawai.N.：ibid.,4-13(1961),182.
- 6) 後藤·林：機論,58-556(1992),299.
- 7) 後藤 學：日本機械學會論文集(A編),54-500 (1988-4),777-785.
- 8) 後藤 學：日本機械學會論文集 (A編),54-504(1988) ,1579-1587.
- 9) Siebel.E.,Stahl und Eisen,74(1954),155.
- 10) 福井·吉田,圓筒容器の深絞り加工における寸法効果
(第2報),理工學研究所報告,8-1,(1954),23.
- 11) 福井·ほか3名,新刊塑性加工とプレス作業,オーム社 ,(1966),103.
- 12) 福井·吉田,圓筒容器の深絞り加工における寸法効果
(第1報),理工學研究所報告,8-1,(1952),23.
- 13) 中川·ほか2名,薄板のプレス加工,實教出版社,(1977),110.
- 14) 橋本,プレス絞り加工,日刊工業新聞社,(1964),11.

Tables and Figures

Table.1 Tensile properties of tested sheets

| Material | Thick ¹ (mm) | K ² (MPa) | n ² value | r value | U.T.S ³ (MPa) | Y _p ⁴ (MPa) | T.E ⁵ (%) |
|----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Al | 0.2 | 188.9 | 0.259 | 1.331 | 105.1 | 33.5 | 30.3 |
| | 0.3 | 159.6 | 0.272 | 1.056 | 87.5 | 24.5 | 46.1 |
| Brass | 0.2 | 768.9 | 0.389 | 0.957 | 379.3 | 168.8 | 48.1 |
| | 0.3 | 778.4 | 0.422 | 0.909 | 363.8 | 154.6 | 50.4 |
| SPCE | 0.3 | 412.6 | 0.152 | 0.867 | 412.6 | 359.4 | 30.3 |
| SPCC | 0.4 | 548.8 | 0.201 | 1.276 | 325.4 | 190.5 | 42.6 |

- 1) Thickness
- 2) $\sigma = K \varepsilon^n$ (work-hardening property)
- 3) Ultimate tensile strength
- 4) Proof stress at 0.2% off-set strain
- 5) Total elongation

Table.2 Dimension of punch profiles

| | | | | | |
|--------------------|---------------------|----|------|----|----|
| F. P ¹⁾ | D (mm) | 40 | 35 | 30 | 20 |
| | R _o (mm) | 8 | 7 | 6 | 4 |
| H. P ²⁾ | D (mm) | 40 | 35 | 30 | 20 |
| | R _o (mm) | 20 | 17.5 | 15 | 10 |

- 1) Flat headed punch
- 2) Hemispherical headed punch

Table.3 Testing conditions

∅86mm(Blank Diameter)

| Material | Al | | Br | | Steel | |
|---------------------------|---------------------------|-----|-----|---------------------|-------|-----|
| Nominal Thickness (mm) | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 |
| Punch Diameter (mm) | 20~40 (30~40) | | | | | |
| Diameter of Die hole (mm) | 55 | | | | | |
| Die Profile Radius (mm) | 10 | | | | | |
| Punch Stroke (mm) | 11.5 | | | | | |
| Punch Speed (m/s) | 1.0×10^{-3} | | | | | |
| Lubricant | Die and Blank-holder face | | | Spindle Oil | | |
| | Punch and Blank | | | Degreased by Aceton | | |

Table.4 Angle of drawn cup(Stroke:11.5mm)

| Punch diameter (mm) | 40 | 35 | 30 | 20 |
|---------------------|------|------|------|------|
| Angle for F.H.P.* | 28.8 | 26.6 | 24.7 | 21.8 |
| Angle for H.H.P.** | 19.6 | 19.3 | 19.1 | 18.6 |

* F.H.P.:Flat-headed punch

**H.H.P.:Hemispherical-headed punch

Table.5 Material properties

| Material | Thick. | $E^{1)}$ [MPa] | $\nu^{2)}$ [-] | $n^{3)}$ [-] | $K^{4)}$ [MPa] | $\sigma_e^{5)}$ [MPa] | $\epsilon_e^{6)}$ [-] |
|----------|--------|-------------------|----------------|--------------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Al | 0.2 | 7.0×10^4 | 0.35 | 0.259 | 188.9 | 23.9 | 3.39×10^{-4} |
| | 0.3 | 7.0×10^4 | 0.35 | 0.272 | 159.6 | 16.4 | 2.33×10^{-4} |
| Br | 0.2 | 1.0×10^5 | 0.35 | 0.389 | 768.9 | 34.6 | 3.47×10^{-4} |
| | 0.3 | 1.0×10^5 | 0.35 | 0.422 | 778.4 | 22.5 | 2.25×10^{-4} |
| SPCE | 0.3 | 2.0×10^5 | 0.29 | 0.152 | 636.4 | 359.4 | 2.3×10^{-4} |
| SPCC | 0.4 | 2.0×10^5 | 0.29 | 0.201 | 548.8 | 190.5 | 2.3×10^{-4} |

- 1) Young's modulus
- 2) Poisson's ratio
- 3) Strain hardening exponent
- 4) Plastic coefficient
- 5) Initial yield stress
- 6) Initial yield strain

Table.6 Critical stroke VS. Punch forces

| | | Material | | Aluminium | | Brass(60/40) | | SPCE | SPCC |
|------|-------------------|--------------|-------------------------------|-----------|-----------|--------------|---------|------------|------------|
| Dia. | Type | Thickness mm | | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 |
| φ 40 | F.H ¹⁾ | Cal. | H _{cr} ³⁾ | 7.6 | 8.03 | 7.1-7.97 | 11.5 | 11.1 | 11.5 |
| | | | P.F ⁴⁾ | 1960 | 1997 | 5192 | 6023 | 10746 | 9004 |
| | | Exp. | P.F | 1466 | 1667 | 3472 | 4562 | 9249 | 6267 |
| | H.H ²⁾ | Cal. | H _{cr} | 9.3-11.5 | 11.5 | 10.7 | 11.5-12 | 13 | 13 |
| | | | P.F | 806 | 925 | 2519 | 2735 | 5614 | 4332 |
| | | Exp. | P.F | 834 | 911 | 2138 | 2453 | 5326 | 3694 |
| φ 35 | F.H | Cal. | H _{cr} | 9.25 | 11.5 | 8.03-8.55 | 11.5 | 10.3* | 11.5 |
| | | | P.F | 1705 | 1707 | 4551 | 5038 | 10010 | 7927 |
| | | Exp. | P.F | 1051 | 1362 | 2978 | 3612 | 8417 | 4997 |
| | H.H | Cal. | H _{cr} | 9.08-11.1 | 10.7-11.5 | 10.7-11.5 | 12.2 | 14.5 | 13 |
| | | | P.F | 906 | 891 | 2398 | 2582 | 5219 | 4076 |
| | | Exp. | P.F | 774 | 876 | 1884 | 2364 | 4997 | 3647 |
| φ 30 | F.H | Cal. | H _{cr} | 8.4 | 11.5 | 8.2-9.3 | 11.5-12 | 10.9-11.5* | 12.3-13* |
| | | | P.F | 1437 | 1464 | 3989 | 4385 | 8782 | 7070 |
| | | Exp. | P.F | 965 | 1202 | 2765 | 3260 | 7583 | 5280 |
| | H.H | Cal. | H _{cr} | 11.2 | 11.2-11.5 | 11.2 | 12.5 | 14-14.5 | 13.7 |
| | | | P.F | 860 | 828 | 2312 | 2435 | 4724 | 3788 |
| | | Exp. | P.F | 707 | 721 | 1751 | 2127 | 4700 | 3559 |
| φ 20 | F.H | Cal. | H _{cr} | 10.7 | 12.5-13 | 10.9 | 14.5 | 12.3* | 11.5-12.2* |
| | | | P.F | 1068 | 1045 | 2952 | 3279 | 6306 | 5096 |
| | | Exp. | P.F | 817 | 870 | 2208 | 2546 | 5121 | 3957 |
| | H.H | Cal. | H _{cr} | 11.5-14.5 | 11.5-12 | 11.5 | 13 | 11* | 11.5* |
| | | | P.F | 641 | 707 | 2026 | 2199 | 3859 | 3189 |
| | | Exp. | P.F | 623 | 644 | 1628 | 2046 | 4015 | 3502 |

- 1) Flat headed punch
- 2) Hemispherical headed punch
- 3) Critical stroke at which bifurcation has occurred
- 4) Punch force

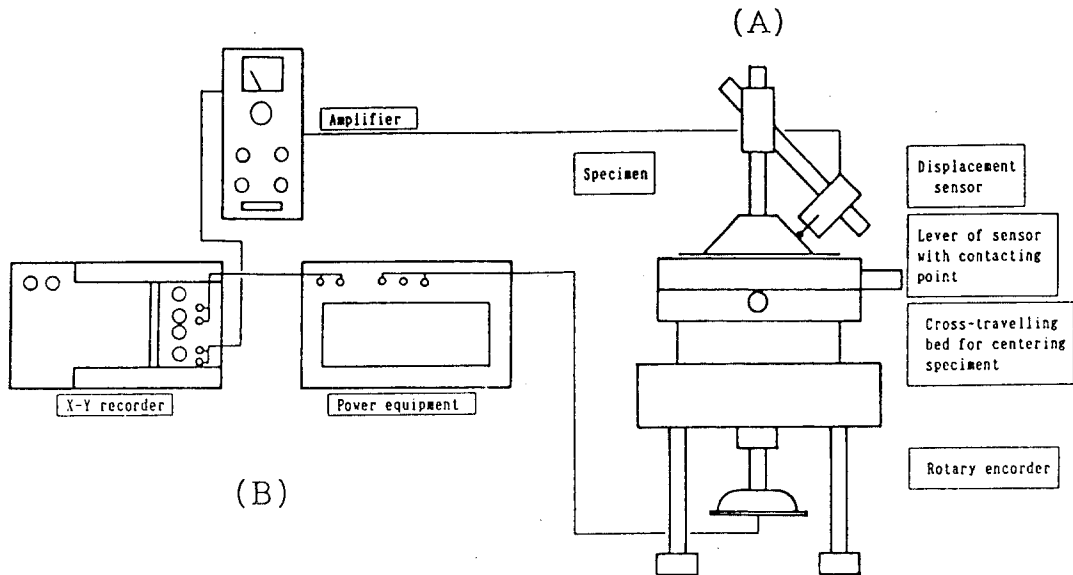
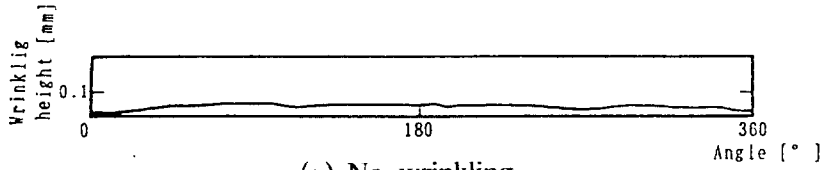
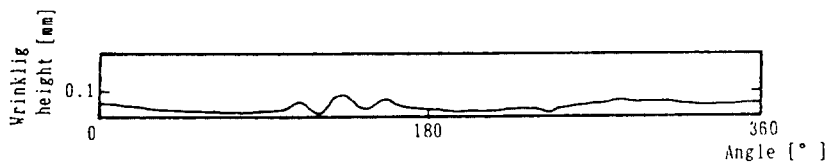


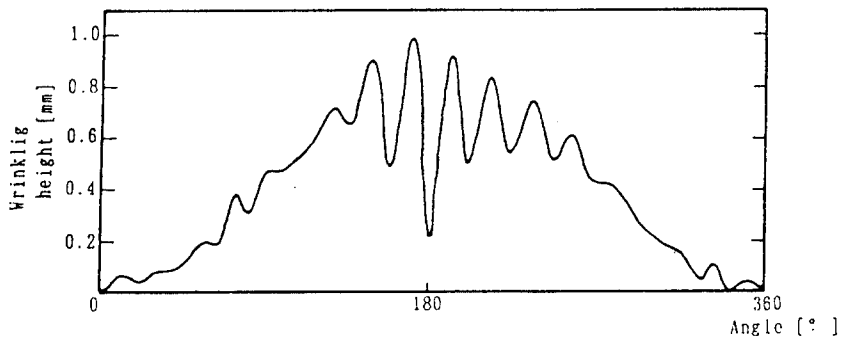
Fig.1 Outline picture of rotary type apparatus for measuring height of wrinkling



(a) No-wrinkling
 ($\phi 40$ Br 0.2mm Stroke 11.5mm)



(b) Wrinkling
 ($\phi 40$ Br 0.2mm Stroke 11.5mm)



(c) Wrinkling

($\phi 40$ Br 0.2mm Stroke 11.5mm)

Fig.2 Example of measurement of surface undulation

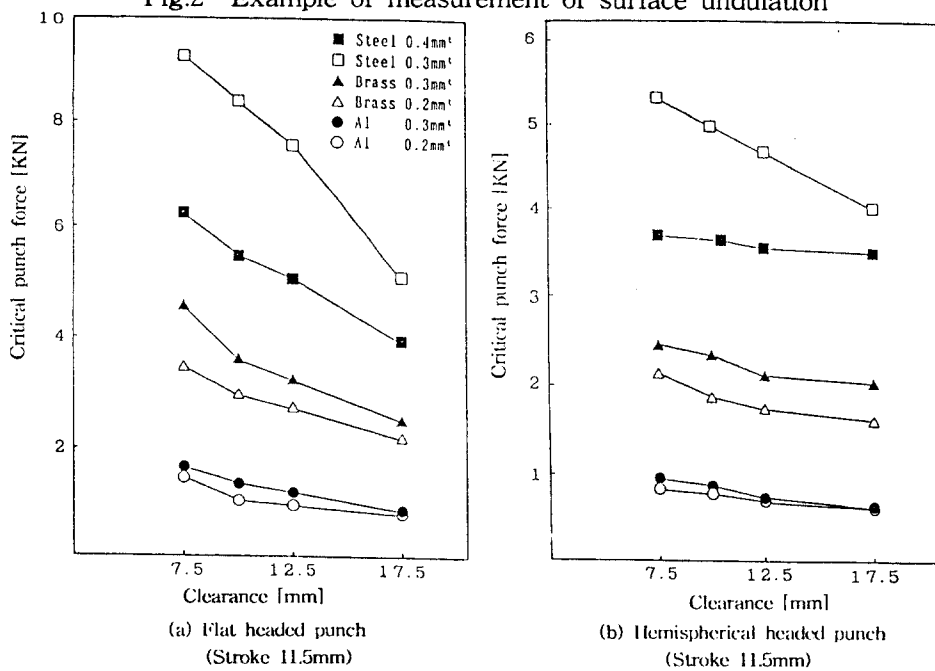
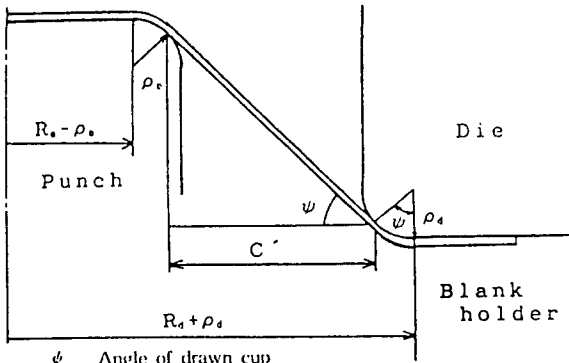
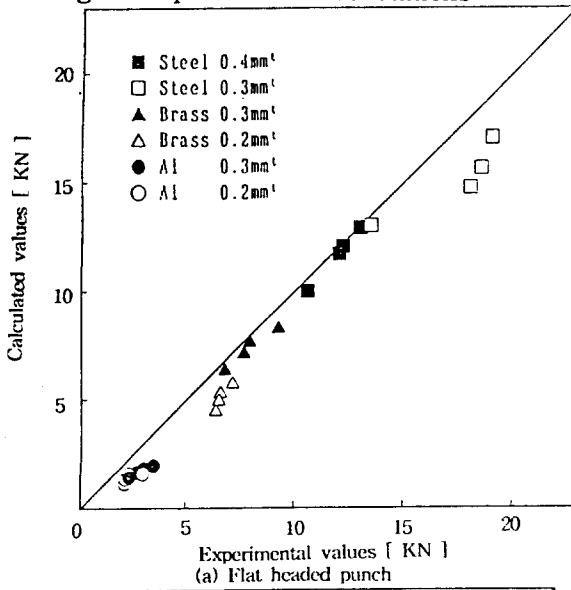


Fig.3 Critical punch force VS. Clearance

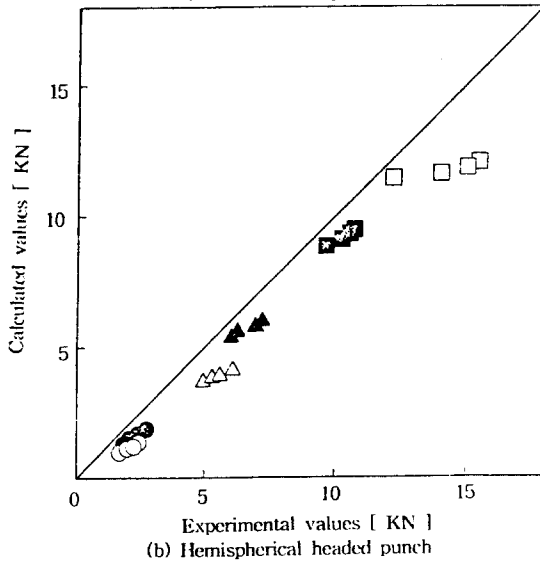


- ψ Angle of drawn cup
- R_p Punch radius
- ρ_p Punch profile radius
- R_d Die radius
- ρ_d Die profile radius

Fig.4 Explanation of denotations

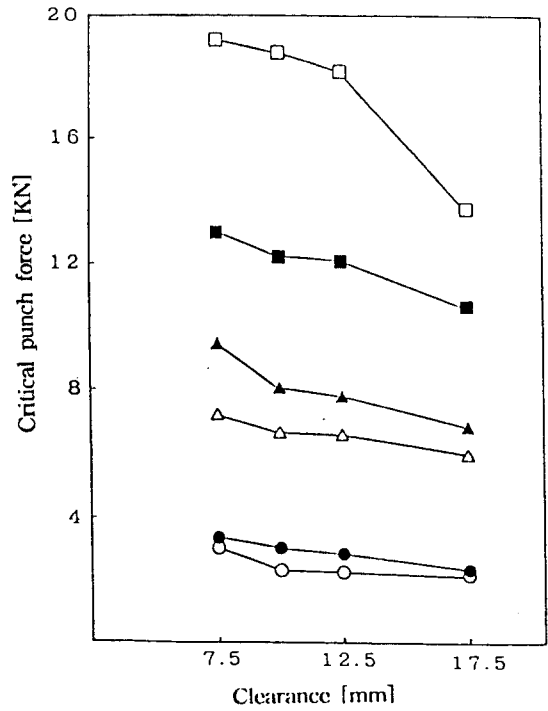


(a) Flat headed punch

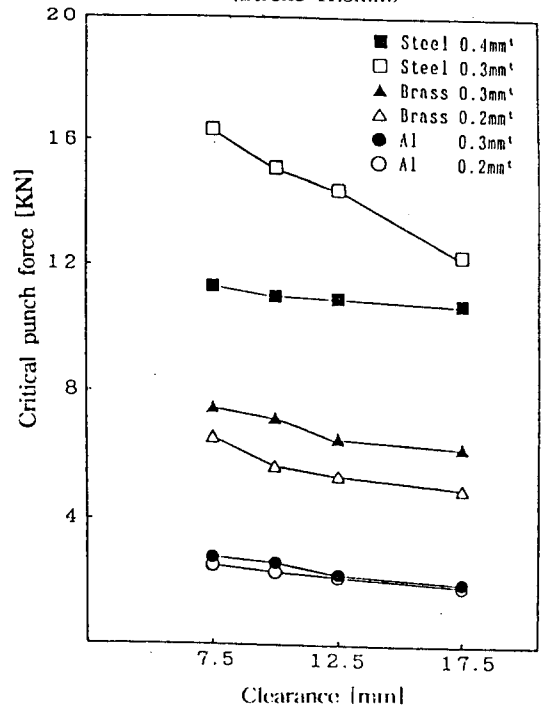


(b) Hemispherical headed punch

Fig.5 Critical tension VS. Clearance

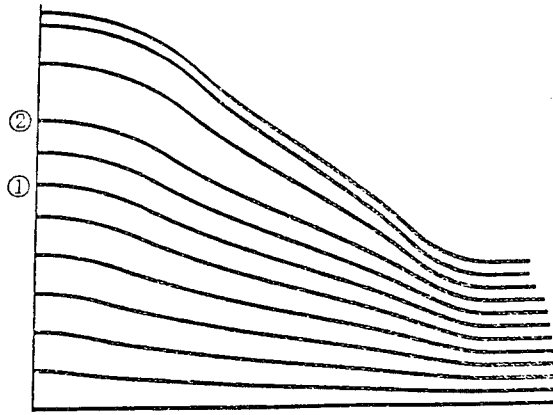


(a) Flat headed punch
(Stroke 11.5mm)

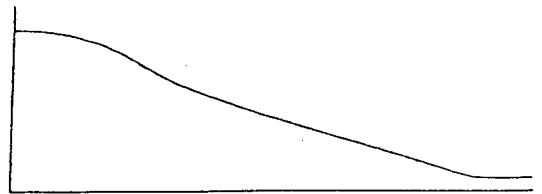


(b) Hemispherical headed punch
(Stroke 11.5mm)

Fig.6 Comparison of calculated values and experimental values

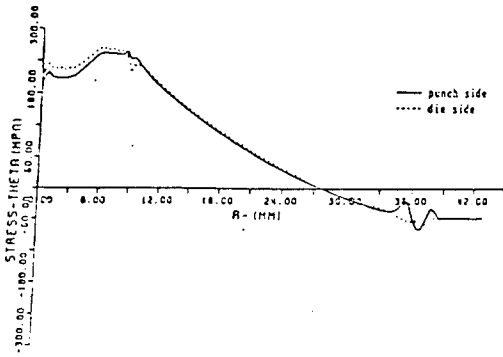


(a) Deformation process of deep drawing

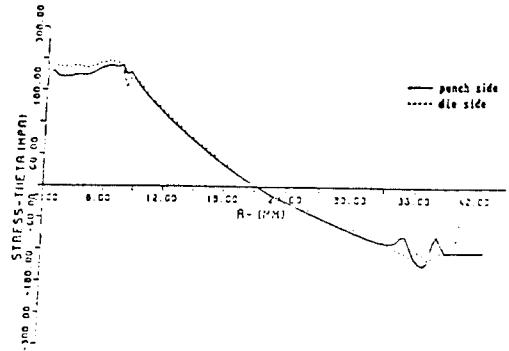


(b) Configuration of deep drawing

Fig.7 Deformation process



(a) Critical tension (2123 [KN])



(b) Low tension (1791 [KN])

Fig.8 Stress distribution (Br 0.2mm,φ40 Hemispherical headed punch)

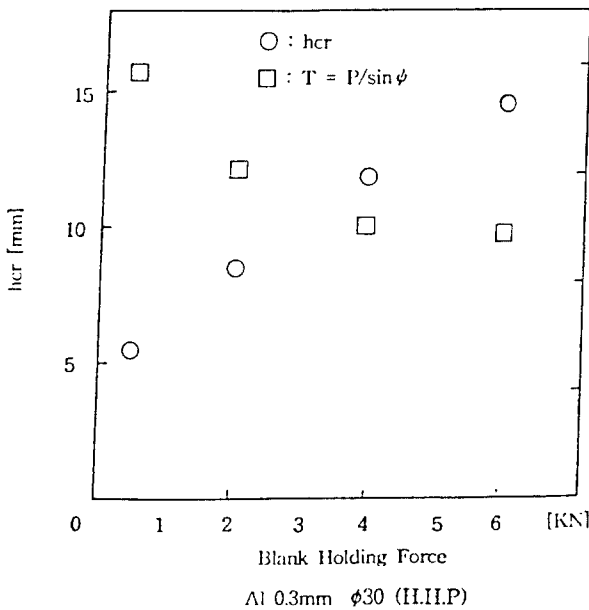


Fig.9 Critical stroke VS. B.H.F and Tension

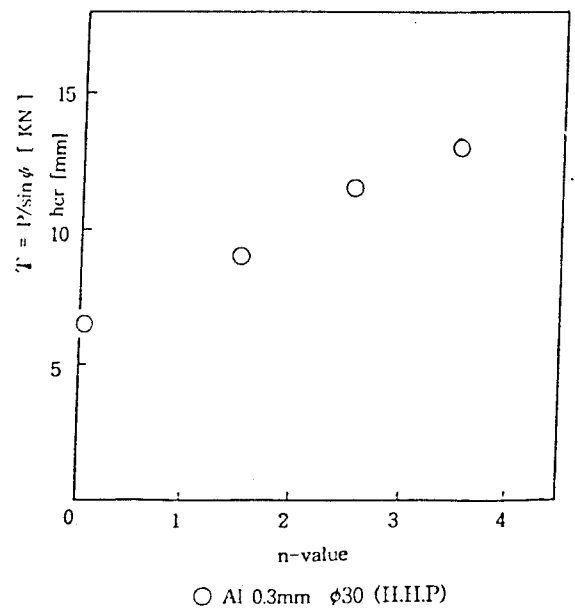


Fig.10 Critical stroke VS. n-values

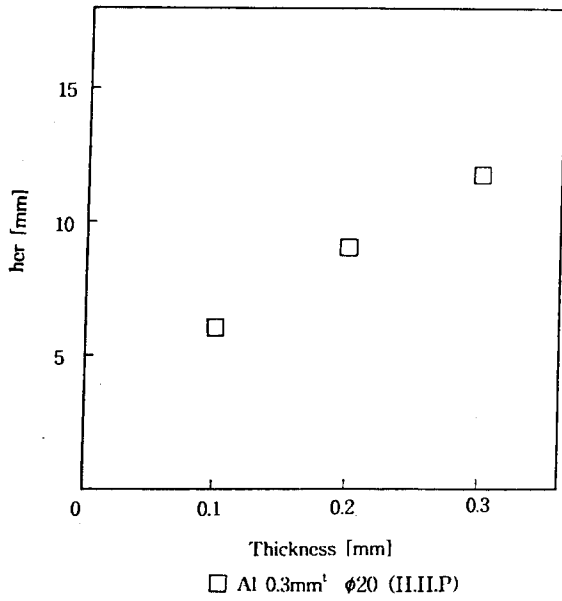


Fig.11 Critical stroke VS. Thickness

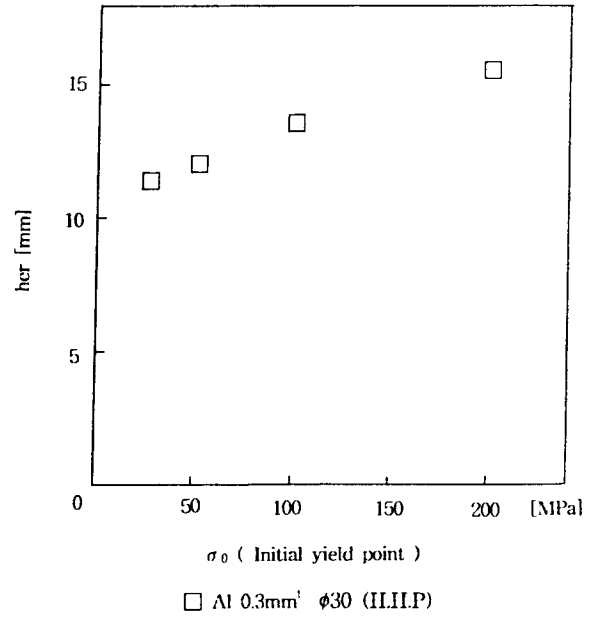


Fig.12 Critical stroke VS. Initial yield point