

〈논문〉 SAE NO. 943707

비원형 단면에 대한 판재 성형성(I) (직사각형 단면에 대하여)

Formability of Sheet Metal in Noncircular Cup Drawing(I)
(for Rectangular Cross Section)

신재현,* 김민수,* 서대교**
J. H. Shin, M. S. Kim, D. K. Seo

ABSTRACT

The effects of punch and blank shapes in the rectangular cup drawing process are examined experimentally to improve the formabilities.

For this purpose, three blank shapes which are h-bl., G-bl. and T-bl., and five punch shape factors which are the ratios of two adjacent side lengths in rectangular cross section are adopted.

The constructing methods of the three blank shapes are as follows.

The h-bl. is designed by slip-line theory, and the G-bl. is selected for the similar shape to the punch.

The T-bl. is obtained by the drawing method which is introduced in the technical references.

The five punch shape factors are selected for length/width=1, 1.25, 1.5, 1.75 and 2.

The experimental procedures are performed for all the above forming conditions to investigate and compare the formabilities.

As a result, it is verified experimentally that the rectangular cups drawn by the h-bl. are more ideal than those drawn by G-bl. and T-bl..

They have not only higher limiting drawing ratio, more uniformity in drawn cup heights and more ideal thickness distributions, but also need relatively less maximum drawing forces.

주요기술용어 : Rectangular Cup Drawing(직사각형 컵성형), Blank Design(소재형상설계), Slip Line Theory(미끄럼 선장이론), Limiting Drawing Ratio(한계성형비), Thickness Distribution(두께분포)

1. 서론

원형 단면인 컵의 성형(Depth Drawing) 혹은 인장성형(Stretch Forming)에 관한 연구는 일찍이

Swift¹⁾와 Woo²⁾의 연구로부터 본격화 되어, 80년대 중반에 이르기까지의 30여년 이상의 장기간에 걸쳐 수많은 연구가 발표되어 왔다. 따라서 이러한 문제에 대한 관심은 이제 어느 정도 한

* 현대정공

** 정회원, 성균관대학교 기계설계학과

계에 이르렀다고 생각되며, 연구에는 드물게 발견되고 있다. 이즈음 신 마경³⁻¹¹⁾은 4각형단면의 컵 성형에 관한 연구를 발표 함으로써, 이제 주 관심사는 원형 단면 컵에서 4각형을 비롯한 비원형 단면의 컵 성형으로 쏠리게 되었다. 이로부터 Thomson¹²⁾과 Gopinathan¹³⁾등은 실험위주의 경험적인 방법으로 연구한 바 있으며, K. Lange¹⁴⁾등은 신 마경과 같은 방법인 미끄럼선장법으로 연구하였고, S. Kobayashi¹⁵⁻¹⁶⁾등은 기하학적 근사해법과 유한요소법으로 연구하였다. 이무렵 하합망¹⁷⁻¹⁸⁾등은 알미늄 박판에 대한 정4각형 단면 컵 성형을 미끄럼선장법으로 연구함에 있어서, 윤활문제와 성형한계 등을 고찰하였다. 4각형컵 성형에 관한 연구는 이상의 연도별 연구예가 대표적인 동시에 사실상 거의 대부분에 해당한다고 볼 수 있다. 정관일출남¹⁹⁾은 이러한 연구 동향을 종합한 해설을 발표한 바 있다.

이와 같이 원형이 아닌 단면의 컵 성형은 그 종류가 수없이 많은데다, 그러한 연구에는 이제 시작하는 초기 단계에 있다고 생각되며, 지금까지 산업현장에서 취해온 방법은 거의 경험적인 방법에 의존해 왔다고 볼 수 있다. 이러한 연구가 체계적으로 진행이 된다면, 현재 각광을 받고 있는 자동차 공업을 비롯한 각종 판재성형을 요하는 산업현장에서의 품질 개량, 작업 능률향상, 한계성형비의 향상등에 크게 기여할 수 있다고 생각한다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 앞서의 몇가지 해석 방법중 미끄럼선장법을 이용하여, 정4각형과 직4각형 단면인 컵 성형에서 주로 성형후 컵 가장자리 전반에서의 높이가 균일하도록 하려면 성형전 어떤 모양의 소재형상으로 부터 성형가공을 시작하여야 하는가에 대한 문제를 증점적으로 취급하며, 이와 관련하여, 소요 성형력, 두께분포도 아울러 고찰하였다.

2. 이론 해석

미끄럼선장법으로 등고의 4각형컵을 얻기위한 소재형상(Blank Shape)을 구하는 이론해석의 배경은 다음과 같다.

Fig.1은 직4각형 단면의 펀치로 성형하여 등고

의 컵을 얻고져 펀치기준으로 작도된 미끄럼선장의 개요이며, 상하좌우의 대칭성이 성립되므로 1/4부분만 작도 한 것이다. 이러한 선도를 얻기 위하여는 펀치의 외형선에 접하고 있는 재료의 요소들 즉, 그림의 점 1, 11, 19, 25등은 펀치의 강하속도와 같은 속도를 갖는다는 사실과 접선 응력이 0인 상태(Tangential Stress, $\sigma_t=0$, Radial Stress, $\sigma_r=2K$, Shear Stress, $\tau=0$)라는 가정을 전제로 한다.(k: 순수 전단항복응력) 즉, 펀치의 외형선에 접한 재료요소에 작용하는 응력상태는 펀치 외형선에 수직방향의 인장응력을 대수학적 최대응력으로 하는 주응력 상태에 있다고 보는 것이며, 이에 미끄럼선장의 정의에 따라, 대수학적 최대 주응력의 방향과 시계방향으로 45° 기울어진 방향, 즉, 그림의 25-20-13-4-26-27-28로 이어지는 선이 α 선이며, 19-20-21로 이어지는 선분이 β 선이 된다. 또 미끄럼선장 구성의 기본원칙에 의하여, 영역 I 과 III은 직선장이며, 영역 25-4-1로 이루어지는, 즉, 펀치형상의 모서리 원호 부분에 대한 미끄럼선장은 대수나선장이 된다. 이러한 원리로 부터 직선, 25-25인 β -line과 25-20-13-4의 α -line이 일단 얻어질 수 있으며, 이로부터 미끄럼선장을 확장하여 그림과 같은 선도를 얻는데는 수동에 의한 근사작도법과 전산에 의한 수치적 작도법이 있으며, 여기서는 두개의 미끄럼선분을 이미 알고 있을 때, 예를들면, 25-25의 직선인 β -line과 25-20-13-4의 대수나선인 α -line을 이미 알고 있을 때에는 그로부터 둘러싸인 25-25-4-4에 이르는 영역내의 미끄럼선장이 수치적으로 작도 될수 있다고 하는 Hill의 수치적작도법²⁰⁾을 채용하여, 5°간격으로 그린것을 설명을 위하여 개괄적으로 표시하였다. 더 자세한 선도는 Fig.2와 같다.

성형된 컵의 소요 높이가 되도록 소재의 크기를 이론적으로 결정하려면 펀치 주변의 소재의 각 요소에서의 재료의 유동방향과 그 속도를 알 필요가 있다. 미끄럼선상의 임의 요소에 대한 속도는 미끄럼선장에 대한 호도그래프(Hodograph)를 그림으로써 알 수 있다. 호도그래프와 미끄럼선장과의 기본적인 관계로 부터 Fig.1에 대한 호도그래프를 그리면 Fig.3과 같다. 이상의 과정을

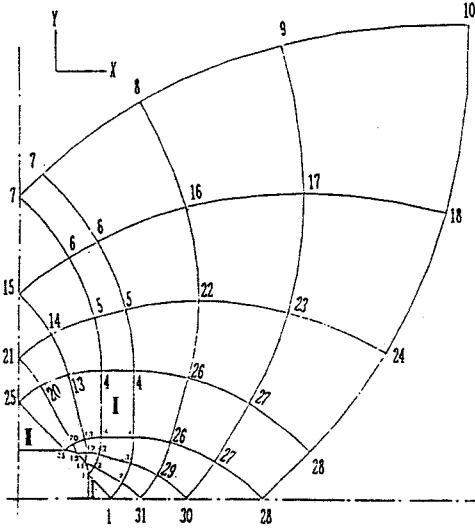


Fig.1 Simplified slip line field for a quarter part of rectangular punch

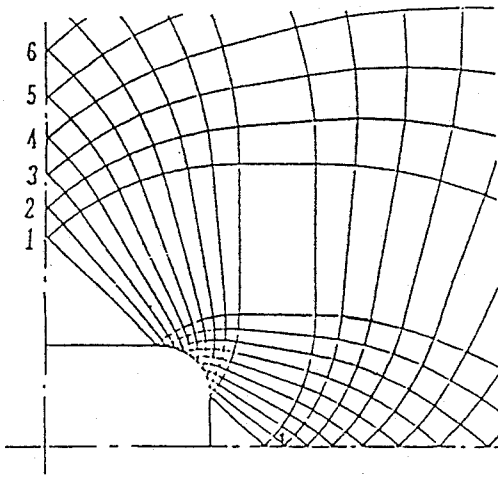


Fig.2 Detailed slip line field for Fig.1

바탕으로 하여 소요 소재형상을 이론적으로 얻기 위하여, 소재의 가장자리에서의 응력상태에 대한 다음과 같은 가정이 추가될 필요가 있다. 즉, 소재의 외형선에 접하고 있는 요소들의 응력상태는 접선응력(σ)만 $-2K$ 인 상태(k : 순수전단항복응력)이며, 반경방향 응력, $\sigma_r=0$, 전단응력, $\tau=0$ 로 본다. 이로부터 소재의 외형선과 미끄럼선과의 교선은 모두가 그 교각이 45° 가 되며 이러한 가

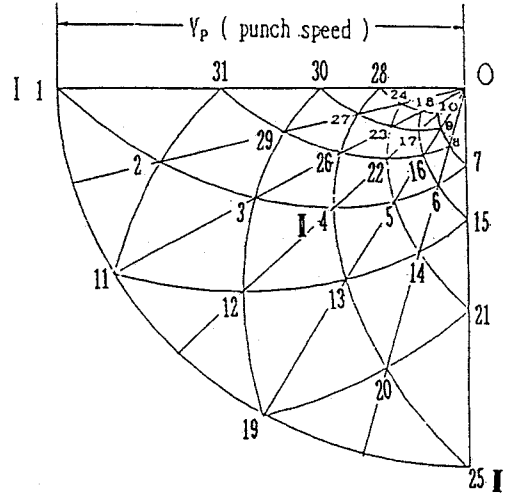
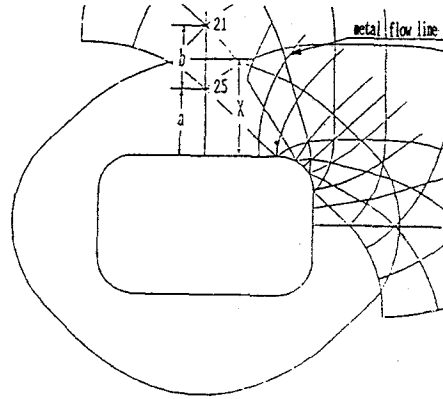
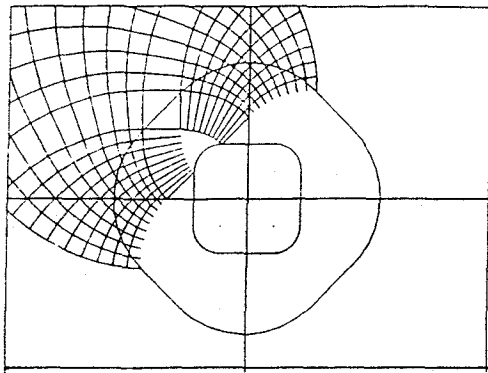


Fig.3 Hodograph correspondent to Fig.1

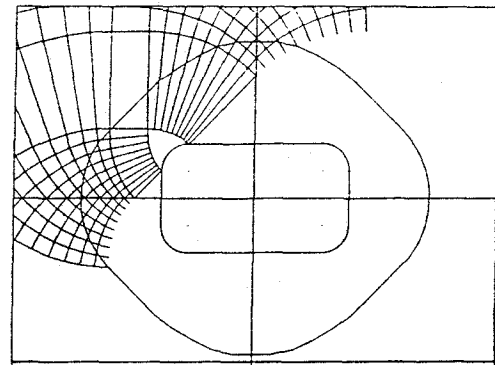
정으로 부터 소요 소재형상의 작도가 가능해진다. 마지막으로 고려해야 할것은 소요점의 높이이다. Fig.4에서 예를들어 펀치 가장자리로 부터 거리 X만큼 떨어진 요소가 성형된후에 컵의 바닥으로 부터의 거리가 변화없이 X가 되지 않는다는데에 문제가 있다. 성형가공중 펀치는 일정한 속도로 강하한다. 예를 들어 펀치의 강하속도가 2mm/sec이고 소요컵의 높이가 20mm라면 펀치의 소요 강하시간은 10초가 될 것이다. 이때 Fig.4에서 X=20mm인 점을 소재의 가장자리로 취하면 이점이 펀치 가장자리까지 도달하는데 소요되는 시간은 10초가 초과된다. 이는 Fig.3에서 보는 바와 같이 각 요소마다 속도와 방향이 다르기 때문이다. 따라서 위의 예에서 높이 20mm인 컵을 얻으려면 펀치 가장 자리까지의 도달에 소요되는 시간이 10초인 점을 소재상에서 찾아야 한다. 이를 설명하는 것이 Fig.4이며 점 21과 점 25는 Fig.1에 대응되는 점들이다. 호도그래프에서 표시되는 속도는 미끄럼선상의 요소에 한하여 표시되므로 예를 들어 그림에 표시된 점 25와 점 21과의 사이를 소재형상이 지나갈 경우, 그 교점의 정확한 속도는, 사실 호도그래프상에 표시될 수가 없다. 따라서 이때는 두점사이의 속도가 점 21의 속도에서 점 25의 속도로 간격 b상의 위치에 대하여, 선형적으로 변화한다고 보아 이 교점의 속도를



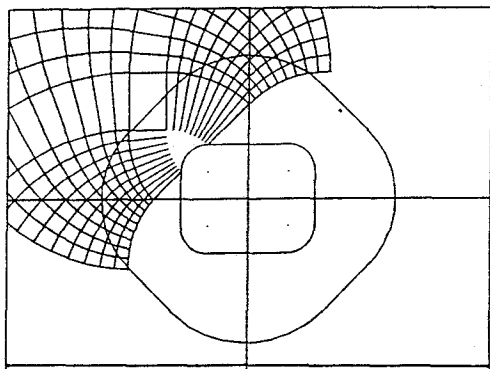
(a) R.F=1.5



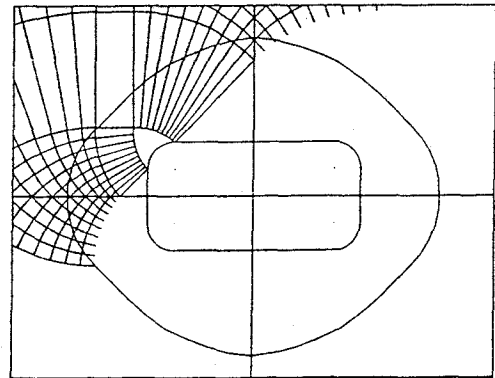
(b) R.F=1



(d) R.F=1.75



(c) R.F=1.25



(e) R.F=2

Fig.4 Determination of theoretical blank shape

얻을 수 있다. 또 점 21이 점 25까지 도달하는데 소요시간은 속도 변화를 이 두점사이에서는 선형적이라고 가정하므로 $b/\frac{(V_{21}+V_{25})}{2} = 2b/(V_{21}+V_{25})$ 가 된다.(여기서 V_{21} : 점 21의 속도, V_{25} : 점 25의 속도) 이와같이 하여, 위의 예에서 편치가 10초간 강하한다면, 편치 가장자리까지의 도달 소요시간이 10초인 소재상의 점들을 모두 이어 주면 이것이 이론상 얻어진 소요 소재형상이 된다. 그러나 실제에 있어서 이러한 점들은 그 갯수가 무한이며, 그점들이 모두 Fig4의 점 21이나 점 25와 같이 직선으로 움직여 편치에 도달하는 것이 아니라, 대부분의 요소들이 재료의 유동법칙을 따라 곡선경로로 움직여 간다. 이를 Fig4의 재료의 유동곡선이 표시하고 있다. 그래서 편의상 소재형상을 얻는 보다 효율적인 방법으로 앞에서 언급한 가정(소재 외형선과 미끄럼선과의 교각이 45°)을 활용하여 Fig4에서와 같이, 거리 X인 이론적인 점, 하나만 구하여 이로부터 기존의 미끄럼선장에 대하여 교각 45°인 선을 차례로 그려 나가는 방법을 취하였다. 이렇게 하여 얻은 소재형상을 Fig4에서 보여 준다.

3. 실험

이상의 이론 과정으로 얻어진 소재를 높이가 같은 컵을 얻을 수 있는 소재(Uniform Height Blank)라는 의미로 h-uni blank, 이를 약하여 h-bl이라 명명하였다. 이와의 비교 고찰을 위하여 소재형상을 두가지 더 선택하였다. 즉, Gopinathan이 별다른 이론적인 근거없이 모서리만 적절한 반경으로 둥글게 하여 실험한 형상을 Gopinathan Blank, 이를 약하여 G-bl.이라 하였고¹³⁾, 또 하나는 위의 이론이 발표되기 전까지 각종 문헌에서 적당한 소재형상이라고 소개하고 있는 것을 Blank in the Text or Reference, 이를 약하여 T-bl.이라 명명하였다.²¹⁾

Fig5는 이들 형상을 취하는 방법을 소개하고 있다. 이들 형상들은 직선부와 반경부에서의 소재 변형양상의 차이를 고려하여 적절한 반지름으로 모서리를 둥글게 취하는 방법이며, 그 방법에서 약간의 차이를 보일 뿐이며, 어떠한 이론적인

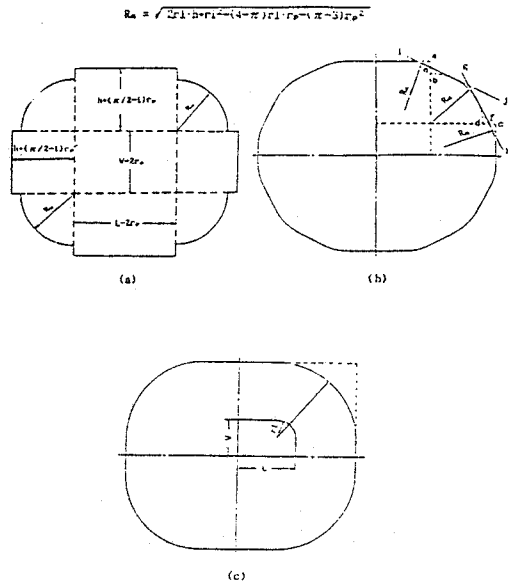


Fig.5 Blank shapes from Text and Gopinathan, (a) and (b) ; T-bl, (c) ; G-bl

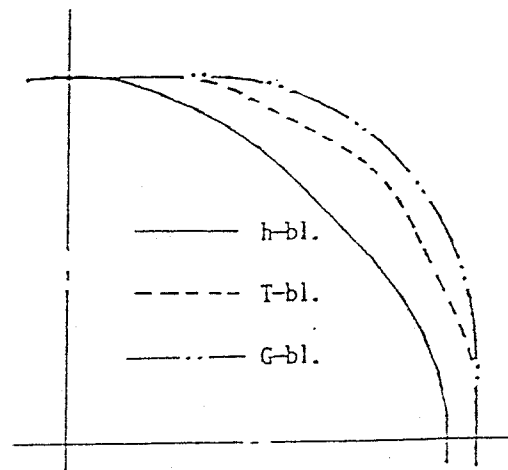


Fig.6 Comparison of three blank shapes

근거를 배경으로 하고 있는 모양은 아니다. Fig6은 이들 소재형상의 차이를 비교해 보인 것이다.

이들 세가지 소재형상과 실험에 사용한 편치, 다이세트로는 장변과 단변의 비가 1, 1.25, 1.5, 1.75 및 2인 5가지의 모양을 제작하여 실험을 수행하였다. 편치와 다이의 틈새는 1mm, 실험재료는 두께 0.8mm의 박강판을 사용하였고, 편치의 형상 반지름(Profile Radius)은 3mm, 모서리 반지름은

10mm로 일정하게 취하였다. 이방성의 영향을 고려하여 모든 실험과정에서 편치의 장변의 방향이 압연방향과 일치하도록 하였고, 윤활은 그리스를 사용하였다. 실험중 소재를 가압하는 소재가압력(Blank Pressure)은 이에 대한 반이론적인 식으로 제안되어 있는 Siebel의 식에 근거하여, 소재의 크기에 따라 약간씩 조정되었다. 이방성의 영향을 파악하기 위한 실험으로, RF=1인 경우에 대하여 다이대각선 방향을 압연 방향과 일치(0°) 및 45°를 이루는 두가지 경우에 대하여 소재형상을 h-bl과 원형 블랭크로 취하여 실험해 보았다.

그 결과 두가지 소재형상에 대하여 모두 45°인 경우가 0°인 경우보다 소요 성형력에 있어서는 0인 경우의 약 3%, 유효컵 높이에 있어서는 약

4% 정도 더 크게 됨을 알 수 있었으며, 따라서 기타의 경우에도 이 정도의 차이를 크게 벗어나지 않을것이 예상된다.

Table 1은 사용한 소재의 기계적 성질을 보여 주며, Table 2는 이상의 실험조건들을 정리한 것이다.

사용한 실험장치는 Fig.7에서 보는 것처럼 만능시험기(U.T.M)위에 SS45C 재료를 사용하여 성형장치를 제작, 설치하여 실험하였다.

블랭크 가압장치는 유압식 잭을 이용하였으며, 수동오일펌프(Hand Oil Pump)에는 압력 게이지를 설치하여 가압력을 읽을 수 있게 하였다.

컵의 성형과정은 다음과 같다.

우선 소재형상을 채취하여 소재의 아랫면에 그리이스(Grease)를 윤활제로 바른 후 Die ③에

Table 1. Tensile properties of specimen

| Tensile direction to R.D | 0° | 45° | 90° | Ave. |
|--|--------|--------|--------|--------|
| Tensile strength(Kgf/mm ²) | 31.637 | 32.465 | 30.769 | 31.624 |
| R-Value | 2.4 | 2.15 | 2.85 | 2.47 |
| n-value | 0.213 | 0.221 | 0.254 | 0.23 |
| Elongation(%) | 42.62 | 39.779 | 30.604 | 37.668 |

Table 2 Experimental condition

| |
|--|
| Press machine : 30 ton Universal Testing Machine, Oil-hydraulic Pump and Single-acting rams. |
| Tool(rf. Dimension of mm) |
| Punch : L×W×r1(Length×Width×Corner Radius) 40×40×10, 50×40×10, 60×40×10, 70×40×10, 70×35×8.75 |
| Clearance between punch and die : 1mm |
| Die profile radius : rd=3 |
| Blank : |
| Material : Mild Steel Sheets |
| Nominal thickness : 0.8mm |
| Long side direction : 0° to R.D |
| Shape : H-bl., T-bl., G-bl. |
| Lubricant : (on Die) Grease |
| Blank-holding force=Siebel's semi-theoretical value |
| Punch speed : 2mm/sec Temperature : 20°C |

올려 놓는다. 다음, 오일펌프 ⑨를 작동시키면, 가압판 ②가 가압판 지지대 ④와 함께 강하하여 Die 지지대 ⑤와 함께 소재를 가압하게 된다. 소재에 원하는 압력이 가해지면 만능시험기를 작동시켜, Cross Head에 장치한 펀치 ①로써, 성형을 이룬다.

성형이 끝나고 오일펌프를 풀어주면, 가압판 지지대는 스프링 ⑥의 작용으로 원래 위치로 되돌아 가고 성형된 컵은 다이 밑으로 떨어지게 된다.

위에서 가압판의 소요 가압력은, 다음의 원형컵 당드로잉에 대한 Siebel의 반 경험적인 식

$$P_s = a\{(\beta_0 - 1)^2 + b\delta\} \cdot \sigma_b \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

σ_b : 인장강도(kg/mm²)

β_0 : 드로잉비 = D_0/d

δ : 상대직경 = d/t_0

— D_0 : 초기 소재형상의 직경 —

d : 성형된 컵의 직경

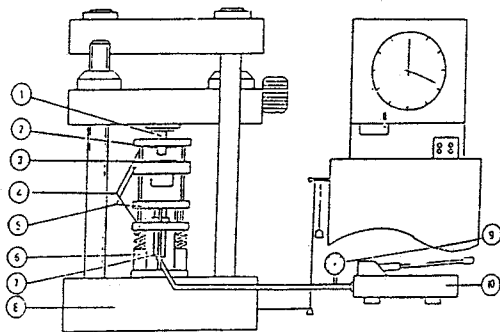


Fig.7 Experimental apparatus for rectangular cup drawing

Table 3 Name list for experimental apparatus

| No. | NAME | No. | NAME |
|-----|------------------------|-----|------------------------------|
| 1 | Punch | 6 | Relax Equipment |
| 2 | Blank Holder | 7 | Ram(Blank Holder Compressor) |
| 3 | Die | 8 | Universal Testing Machine |
| 4 | Blank Holder Supporter | 9 | Holding Pressure Gage |
| 5 | Die Supporter | 7 | Hand Oil Pump |

— t_0 : 소재형상의 초기 두께 —

에서 초기 소재형상의 직경 D_0 와 성형된 컵의 직경 d 를 다음과 같이 대치해서 가압력을 얻었다.

$$D_0 = 4 \frac{A_b}{C_b} \quad d = 4 \frac{A_p}{C_p}$$

A_b : 소재형상의 면적

C_b : 소재형상의 외곽선의 길이

A_p : 펀치의 단면적

C_p : 펀치 외곽선의 길이

Table 3은 실험 장치에 설치된 각 요소의 명칭이다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 성형된 컵의 등고성(等高性)

세가지 소재형상을 5가지의 직4각형의 비(Rectangular Factor, RF)의 펀치와 다이세트로 성형한 후의 제품을 Photo.1에서 보여준다. h-bl로 성형된 컵은 등고성이 매우 양호한 반면, T-bl과 G-bl로 성형된 컵은 최대(hmax) 및 최소컵 높이(he)의 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 성형된 컵의 최소높이를 유효컵높이(he)로 볼 수 있고, 이것이 h-bl인 경우는 장변의 끝부분에서 펀치의 모서리 반지름이 시작되는 위치에 있는 반면, T-bl과 G-bl인 경우는 모두 장변의 중앙부분에 있다. 이와 같이 최대 및 최소컵 높이의 차이가 클수록, 재료의 손실이 많을뿐 아니라 마무리가공(Trimming)을 많이 해야 할 것이다. 직4각형비를 편 의상 장변과 단변의 길이비로 정의하여 이를 R.

F로 표기하기로 하여 RF=1, 1.25, 1.5, 1.75 및 2에 대하여 세가지 소재로 성형된 컵의 최대 및 최소컵 높이비, h_e/h_{max} 를 Fig.8에 표시한다. 단 성형이 가능한 최대의 컵 높이에 대한 경우이다.

RF=1인 정4각형 컵에서 장변이 단변길이의 2 배인 RF=2로 직4각형비가 증가함에 따라, 3

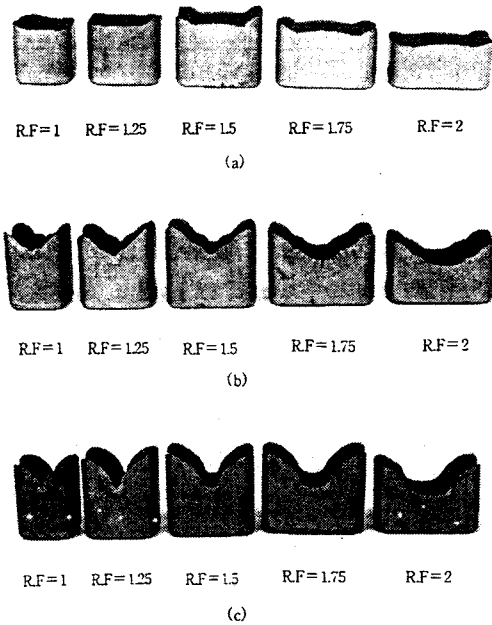


Photo.1 Example of drawn cups, (a) h-bl. (b) T-bl, (c) G-bl.

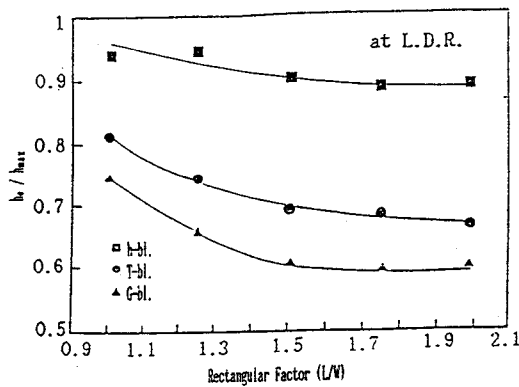


Fig.8 Comparison of h_e/h_{max} for three blank shapes

가지 소재에 대하여 모두가 최대 및 최소컵 높이의 비가 약간 감소하는 경향을 보여주며, 이러한 등고성은 G-bl보다 T-bl이, T-bl보다 h-bl을 사용한 경우가 훨씬 더 양호함이 명백하다. 뿐만 아니라, Fig.9에서는 세가지 소재형상으로 부터 얻어질 수 있는 컵의 최대 유효높이가 h-bl인 경우가 가장 높음을 볼 수 있다. 이는 h-bl을 사용하는 것이 성형과정에서 재료유동에 무리가 없이, 비교적 변화가 적은 두께 분포를 유지함으로써, 더 높은 컵을 얻을 수 있음을 짐작하게 한다.

그림 중 LDR은 한계성형비(Limiting Drawing Ratio) 즉, 성공적인 컵 성형이 가능한 최대치수의 소재로 성형했을 때를 의미하고 있으며, 이는 원형컵의 경우,

$$\frac{\text{소재의 최대 지름}}{\text{편치 지름}} \text{으로써}$$

약 2 정도가 보통이며,

정4각형의 경우도, $\frac{\text{최대소재의 대응되는 거리}}{\text{편치의 한변의 직선거리}}$

로써 약 2-2.7의 범위이며 수치적 표현이 가능하다. 그러나 직4각형컵인 경우는 장변과 단변이 있으므로 LDR에 대한 수치적 표기에 대한 제안이 현재까지 명확치 않으나, 여기서 편의상 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{성형비(Drawing Ratio)} = \frac{1}{2}$$

$$\left\{ \frac{\text{단변길이 방향의 최대 소재길이}}{\text{단변 길이}} + \right.$$

$$\left. \frac{\text{장변길이 방향의 최대 소재길이}}{\text{장변 길이}} \right\}$$

로 취하였고 이값의 최대치가 한계성형비(LDR)이다.

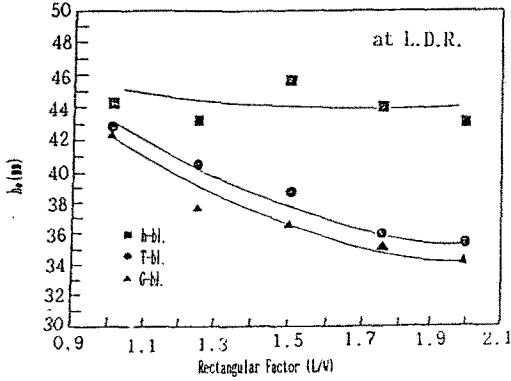


Fig.9 Comparison of effective cup height, h_e , for three blank shapes

4.2 두께 분포

h-bl로 성형된 최대높이인 컵의 두께 분포를 각각의 직4각형비에 대하여 측정하였다. 그 결과 성형의 한계를 암시하는 최소두께의 위치가 직4각형비와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 대표적인 예로써, Fig.10과 11은 직4각형비, R.F=1과 1.5인 경우의 성형된 컵 두께를 모서리반지름 방향, 장변방향 및 단변방향의 세 방향으로 측정된 결과를 보여준다. R.F=1인 경우는 최소두께가 모서리 반지름방향의 펀치 형상 반지름상에 있는 반면, R.F=1.5인 경우는 단변이 있는 벽면상이 최소두께가 됨을 알 수 있다. 소재형상을 더 크게 하여 성형도중 컵이 파단이 된다면, 최소두께인 위치에서 파단이 될 것이며, 이러한 측정으로 부터, R.F=1 및 1.25인 경우는 파단이 모서리 반지름상의 펀치형상반지름에 해당하는 위치에서 발생하며, R.F=1.5, 1.75 및 2인 경우는 파단이 단변의 벽면에서 발생함이 확인되었다.

이와같은 현상은 장변의 길이가 커짐에 따라 강성영역(Fig.1의 영역Ⅲ)이 증가하여, 변형영역(Fig.1의 1-4-25의 영역)과 단변에 대한 강제영역(Fig.1의 영역 I)은 상대적으로 볼 때 감소하는 셈이되어, 직4각형비가 증가함에 따라, 하중부담이 단변쪽으로 쏠리기 때문이라고 생각된다. 이와같은 현상은 T-bl과 G-bl인 소재에 대하여도 흡사하였다.

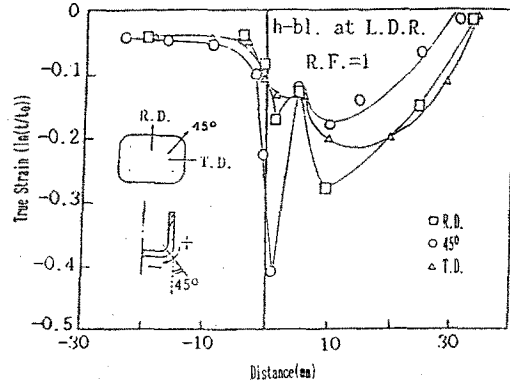


Fig.10 Comparison of thickness distribution of drawn cup(R.F=1) at L.D.R. for three directions.

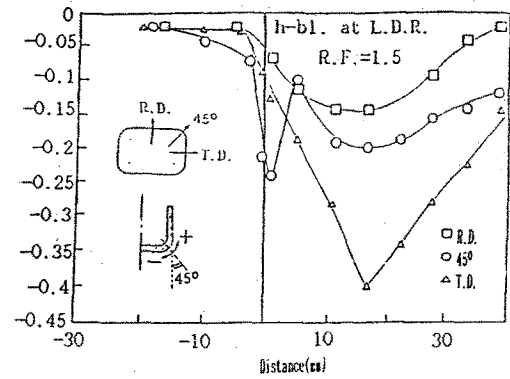


Fig.11 Comparison of thickness distribution of drawn cup(R.F=1.5) at L.D.R. for three directions.

4.3 소요 성형력

h-bl에 대하여 성형비를 증가시켜감에 따라, 또 각각의 직4각형에 대하여 성형 하중이 어떻게 변화하는가를 고찰한 것이 Fig.12이다. P_{max} 은 성형이 성공적으로 이루어진 경우에서의 최대성형력이며, P_a 은 끝까지 성형이 가능하지 못한 경우의 최대 성형력이다. σ_r 는 소재의 인장강도이며 A^* 는 성형된 컵의 횡단면적중 컵의 벽부분만이 차지하는 면적이다. 여기서 컵의 단면이 정4각형에 가까울수록 더 높은 컵의 성형이 가능함을 알 수 있는 동시에, 한계성형비까지는 소요 최대편치력이 성형비의 증가와 더불어 거의 직선

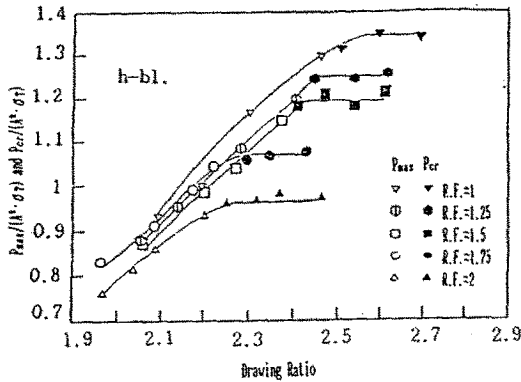


Fig.12 Comparison of $P_{max}/(A^*, \sigma_T)$ and $P_{cr}/(A^*, \sigma_T)$ for each rectangular factor of h-bl

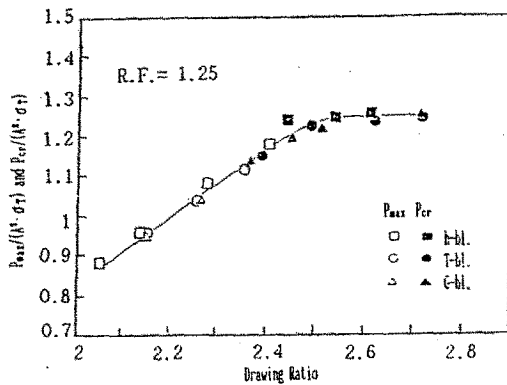


Fig.13 Comparison of $P_{max}/(A^*, \sigma_T)$ and $P_{cr}/(A^*, \sigma_T)$ for three blank shapes when R.F.=1.25

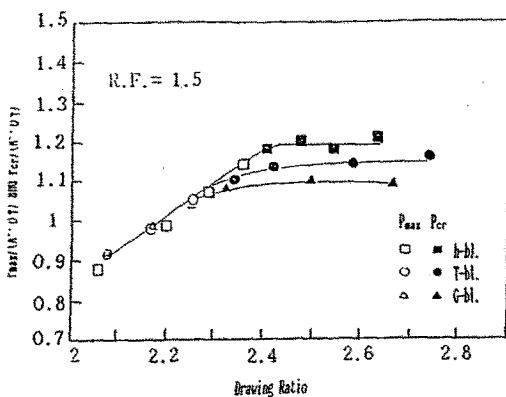


Fig.14 Comparison of $P_{max}/(A^*, \sigma_T)$ and $P_{cr}/(A^*, \sigma_T)$ for three blank shapes when R.F.=1.5

적으로 증가하다가 처음 파단이 일어난후는 그 값이 거의 일정하게 됨을 볼 수 있다. 이러한 양상은 다른 형상의 소재에 대하여도 흡사하였으며, 일정한 직4각형비(R.F)에 대하여 세가지 소재형상에 대한 성형력을 비교한 것이 Fig.13과 14이다. 모든 R.F에 대하여 성형비의 증가에 따른 소재형상별 소요편치력의 차이는 비교적 미미하였으나, 한계성형비 이후의 파단력에 대하여는 그 경향이 약간 달랐다. 즉, R.F.1과 1.25에서는 Fig.13과 같이 소재형상에 따른 차이가 거의 없었으며, R.F.=1.5, 1.75 및 2에서는 Fig.14와 같이, 한계성형비 이후의 파단력은 소재형상에 따라 차이가 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 정4각형과 직4각형인 단면의 컵 성형에서 성형후 컵의 높이가 일정하도록 하기 위한 최적 소재형상을 미끄럼선장법으로 구하였다.

결과의 비교를 위하여 종래까지 경험적으로 사용되어온 소재형상도 채택하여 성형 결과를 비교 고찰하였다. 컵 높이의 균일성 이외에도 성형력, 두께분포등을 아울러 고찰함으로써 실험결과를 종합하였고, 직4각형단면에 대한 성형비를 정의함으로써 한계성형비도 고찰하였다.

(Fig.12). 결과로써, h-bl에 의한 성형은 컵의 등고성 및 한계성형비에서 G-bl이나 T-bl에 비하여 우월함이 입증되었다.

결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 성형된 컵의 등고성의 정도를 표시하는 h_0/h_{max} 값이 G-bl에서는 0.74-0.6, T-bl에서는 0.82-0.68인 반면 h-bl의 경우는 0.95-0.89로 h-bl이 훨씬 컵의 높이가 균일하였다.
- 2) h_0/h_{max} 값은 직4각형비(장변길이/단변길이)의 증가와 더불어 완만히 감소하였다.
- 3) 성형이 가능한컵의 최대 유효 높이는 h-bl에서는 직4각형비에 관계없이 약 44-45mm 정도였으며, T-bl과 G-bl의 경우는 이보다 낮았다.

- 4) 성형된 컵의 최소 두께는 $R.F=1$ 과 1.25에 서는 모서리 반경에서의 펀치 형상반경부에 있으며, $R.F=1.5, 1.75$ 및 2에서는 단변의 벽부분에 있었다. 따라서 이 부분이 파단 위치이기도 하다.
- 5) 직각형비가 작을수록 한계성형비는 증가 하며, 한계성형비 까지는 성형비의 증가에 따라 성형력이 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이는 모든 소재형상에 대하여 공통적이었다.

참 고 문 헌

1. Chung, S. Y. and Swift, H. W., "Cup drawing from a flat blank, part1, Experimental investigation, part2, Analytical investigation", Proc. Inst. Mech. Eng. Vol.165, Part197, pp.199-223, 1951.
2. D. M. Woo, "The stretch forming test", The Engineer, NOV., pp.876-880, 1965.
3. 신 마경, "凹多角筒體の深絞り加工の研究—絞り加工のすべり線場理論による解析"(第1報), 塑性と加工, Vol.11, No.116, pp.653-660, 1970.
4. Takashi JIMMA*, Toshihiko KUWABARA¹*, Soon Chul CHOI* Researches on the Deep Drawing of Reentrant Contour Shells, Advanced Technology of Plasticity, Vol.11, pp.1091-1096, 1984.
5. 神馬 敬**, 나 桑原利彦**, 崔淳哲**
凹輪渾を有する容器の深絞り加工の研究*
塑性と加工(日本塑性加工學會誌) 第26卷 第294號(1985-7) pp.744-751
6. 神馬 敬**, 桑原利彦**, 崔淳哲**
深い凹輪渾を有する容器の深絞り加工の研究
Journal of the JSTP, Vol.26, No.299(1985-12)
pp.1195-1202
7. Takashi JIMMA, Toshihiko KUWABARA, Soon Chul CHOI
Deep Drawing of Double Cylindrical Shells,
Journal of Mechanics Working Technology, 13,
(1986) 365-377
8. 神馬 敬**, 桑原利彦**, 崔淳哲**
二連圓筒容器の深絞り加工の研究*
Journal of the JSTP, Vol.27, No.301(1986-2)
pp.295-300
9. 桑原利彦**, 神馬 敬**
底部に段差を有する容器の深絞り加工の研究
塑性と加工(日本塑性加工學會誌) 第28卷 第314號(1987-3) pp.278-283
10. 桑原利彦**, 神馬 敬**, 木田毅***
角筒容器多段絞り金形の自動設計*
Journal of the JSTP, Vol.30, No.337(1989-2)
pp.227-233
11. 大上哲郎**, 武智 弘**, 古野嘉拜***
温間での角筒深絞り成形性*
塑性と加工(日本塑性加工學會誌) 第28卷 第318號(1987-7) pp.706-711
12. T. R. Thomson, "Influence of material properties in the forming of square shells", The J. of the Australian institute of metals, Vol.20, No. 2, pp.106-113, 1975.
13. V. Gopinathan, "Optimum blank profile determination for rectangular deep drawing", Indian J. of technology, Vol.15, pp.330-333, 1977.
14. V. V. Hasek, and k. Lange, "Use of the slip-line method in deep drawing of large irregular shaped components", Proc. of 7th NAMRC, pp. 65-71, 1979.
15. C. H. Toh and S. Kobayashi, "Deformation analysis and blank design in square cup drawing", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol.25, No.1, pp.15-32. 1985.
16. Naksoo Kim and S. Kobayashi, "Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.26, No.2, pp.125-135, 1986.
17. 河合望外 3人, "アルミニウム薄板の正四角筒深絞り性(ポンチ頭部潤滑と形状の相乗効果), 日本機械學會論文集(C編), Vol.52, No. 484, pp.3317-3323, 1986.

18. 河合望外 3人, 工業用純アルミニウム薄板の正四角筒深絞り性(カッブ高さ一様の素板形状の決定およびそれによる深絞り限界の検討) 日本機械學會論文集(C編), Vol.53, No.487, pp.771-779, 1987.
19. 井關日出男, “深絞りの最適ブランク形状の決定法”, J. of the JSTP, Vol.30, No.337, pp.181-186, 1989.
20. R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity”, Oxford, Clarendon Press, pp.140-149, 1950.
21. 金東垣 “機械工作法”, pp.339-345, 1986.