

<論 文>

# 드로오비드 인출특성에 관한 유한요소해석 및 실험적 검증

김창만\* · 임영석\* · 김낙수\*\* · 서대교\*\*\*

(1994년 10월 10일 접수)

## Finite Element Analysis and Experimental Verification for the Drawing Characteristics Through Drawbeads

Chang-Man Kim, Young-seok Im, Nak-soo Kim and Dae-Gyo Seo

**Key Words :** Single Circular Drawbead(단일원형비드), Square Drawbead(사각비드), Rigid Finite Element Method(강소성 유한요소법), Die Reactional Forces(다이 반발력), Restraining Forces(인출력), Strain Distribution of Upper and Lower Skins(소재 상하부표면의 변형률 분포), Deformed and Drawn Phenomena(성형 및 인출양상)

### Abstract

Theoretical and experimental drawing characteristics for the single circular and square drawbeads are discussed. During the blank holding process, the strain distributions of upper and lower skins of specimens, and the die reactional forces are analysed by F. E. M., and they are compared with the experimental results. The drawbead restraining forces and strain distributions for the drawn specimens by the various drawing length are also analysed and compared with the experimental results. It is concluded that the theoretical simulations and results could be very useful for the prediction of real cases.

### 1. 서 론

차량용 판재성형 및 중소산업 현장의 프레스작업에 이르기까지 드로오비드의 설치는 필수적이다. 드로오비드는 제작과 설치가 용이할뿐만 아니라 다이의 형상에 따른 적합한 형상의 비드 선택에 의하여 판재성형시 발생하는 결함들이 제거되어 판재성형률을 향상시킬 수 있다. 따라서 구미 선진국과 일본 등 고도로 자동차 산업이 발달된 국가에서는 이미 드로오비드에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이를 실제 생산현장에 이용하기 위하여 드로오

비드의 각종형상에 따른 데이터를 구축해 가고 있다.

드로오비드 형상의 작은 변화에 의해서도 판재성형의 성패에 큰 영향을 받게 된다. 이와 같이 자동차 산업에서 비드의 역할이 갖는 중요성에 비해 국내의 연구에는 많지 않았으며, 국외의 드로오비드에 관한 본격적인 연구는 1978년 Nine<sup>(1,2)</sup>에 의한 단일원형비드에 대한 연구를 시작으로 해서 1982년 Wang<sup>(3)</sup>은 수학적 모델로 비드인출력을 유도하였다. 1982년 Nine<sup>(4)</sup>은 비드 홈에 우레탄을 삽입하여 실험해 본 바가 있으며 1983년 Levy는 Wang과 Nine의 연구방법을 발전시켰으며,<sup>(5)</sup> 1984년 Yellup<sup>(6)</sup>과 Painter<sup>(7)</sup> 등은 좁은 드로오비드 시스템을 컴퓨터 모델화하여 인출력을 예측해 보았으며, 1986~87년 Maker와 Samanta<sup>(8,9)</sup> 등은 인출

\*성균관대학교 기계설계학과

\*\*정회원, 서강대학교 기계공학과

\*\*\*정회원, 성균관대학교 기계설계학과

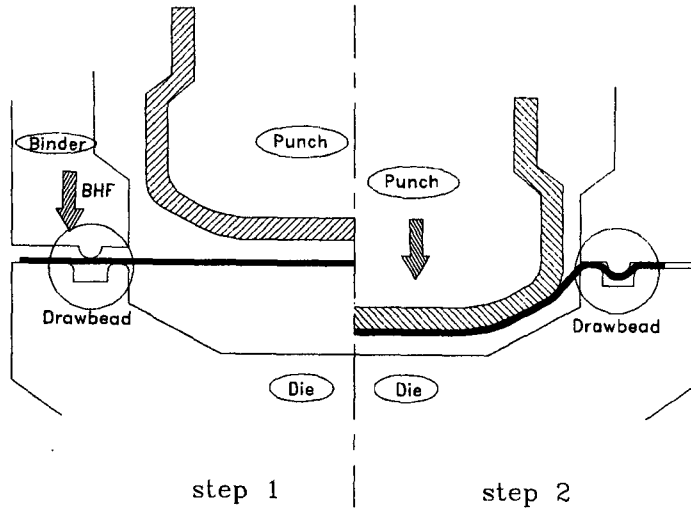


Fig. 1 Sheet metal forming process for step 1 and step 2

력과 변위분포 선도 등을 탄소성 셸모델로 해석한 바가 있고, 1988년 Weinmann 등<sup>(10)</sup>은 원형비드부를 기하학적으로 롤러라 가정하고 모델링하여 드로오비드해석을 수행한 바 있으며, Stoughton<sup>(11)</sup>은 재료의 굽힘효과, 드로오비드 인출력, 블랭크 가압력 등을 마찰계수와 관련지어 실험과 이론을 고찰한 바가 있다. 臼田松男<sup>(12)</sup>외에도 Usuda와 Ishii 등<sup>(13)</sup>은 비드를 통과한 후의 유동응력과 재료의 성질을 평가한 바 있다. 1988년 이후 Ujihara, Sakamoto와 Frubayashi<sup>(14,15)</sup> 등은 벨트(belt)식과 관련지어 근사적으로 비드 인출력과 변형률을 구하였으며 최근 단일원형 드로오비드에 대한 유한요소 해석으로서는 Cao, Tedosiu<sup>(16)</sup> 등의 연구 예를 들 수가 있다.

또한 이제까지 숙련된 전문 기술자들의 경험을 기초로 한 시행착오에 의한 비드설계 및 제작은 많은 시간과 비용을 필요로 한다.

Fig. 1은 실제 판재성형과정을 도시한 것으로 제 1단계에서는 상부다이가 전진하여 소재를 비드형상으로 성형하면서 적절한 가압력(blank holding force)을 준다. 제2단계에서는 펀치가 전진하면서 원하는 형상의 제품을 성형하는 과정으로서 드로오비드가 설치된 플랜지 부근에서 소재가 인출되는 과정이다. 본 연구에서 실제 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있는 단일원형비드와 사각비드를 대상으로 드로오비드 성형과 인출해석을 위하여 2차원 상태에서 드로오비드가 설치된 플랜지부분에 대하여 두

가지 단계에 대하여 고찰하였다. 제 1단계에서 시험편이 단일원형비드 형상으로 성형되는 과정, 제2 단계에서 성형된 시험편이 인출되는 과정을 유한요소법으로 해석하고 타당성을 입증하기 위하여 구속력과 시편의 변형양상을 실험과 비교 고찰하였다.

## 2. 이론해석

유한요소법은 재료의 구성방정식에 따라 탄소성 유한요소법과 강소성 유한요소법으로 대별된다. 강소성 유한요소법은 하중제거시 잔류응력에 대한 계산이 불가능하다는 단점이 있으나, 소성가공과 같은 대변형 문제에 대해서는 탄성변형은 무시할 수 있을만큼 작으므로 보다 효율적인 강소성 유한요소법을 많이 이용한다.

본 연구에서는 계산이 좀 더 용이하고 효율적인 4절점의 연속체요소를 사용하여 다음과 같은 해석

의 기본가정을 설정하였다.

(1) 비드성형시 폭방향의 변형률은 두께방향의 변형률에 비해 무시할 수 있을만큼 작으므로 폭 방향의 변형률을 무시하고 평면변형상태로 가정한다.

(2) 소재는 평면이방성이나 수직이방성에 무관한 등방성재료이며, 아래의 유동법칙을 만족하고 강소성재료(rigid-plastic material)로 생각한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{(\partial \sigma_{ij})} = \dot{\lambda} \quad (2.1)$$

(3) 공구는 모두 강제이고 공구와 소재간의 접촉 면에서 쿨롱(coulomb) 마찰법칙이 만족된다.

(4) 단축인장에서 얻어진 재료의 물성치 선도는 아래의 Swift식으로 표현될 수 있다.

$$\bar{\sigma} = C(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (2.2)$$

유한요소 구성방정식은 평형방정식과 가상일률의 원리, 경계조건(비압축성조건)으로부터 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\int_V \bar{\sigma}_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS + \int_V k \bar{\epsilon}_{kk} \delta \bar{\epsilon}_{kk} dV = 0 \quad (2.3)$$

여기에서 상당 변형률속도 (effective strain rate) 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} &= \dot{\epsilon}_{11}^2 + \dot{\epsilon}_{22}^2 + \dot{\epsilon}_{33}^2 + 2(\dot{\epsilon}_{12}^2 + \dot{\epsilon}_{23}^2 + \dot{\epsilon}_{31}^2) \\ &= \dot{\epsilon}^T \begin{bmatrix} 100000 \\ 010000 \\ 001000 \\ 000200 \\ 000020 \\ 000002 \end{bmatrix} \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^T D \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (2.4)$$

이산화과정후 텐서(tensor) 형태의 식을 행렬식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\left\{ \int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \bar{v}^T B^T D B dV + \int_V k \bar{v}^T B^T c c^T B dV - \int_{S_f} \bar{t}^T N dS \right\} \delta \bar{v} = 0 \quad (2.5)$$

위의 식을 1차 Taylor 전개한 후 선형화하면

$$K \Delta \bar{v} = L \quad (2.6)$$

로 요약되고 직접반복법과 Newton-Raphson법으로 속도벡터를 구해낼 수 있다. 또한 속도벡터가 구해지면 소재의 변형된 새로운 형상을 구해낼 수 있다. 마찰력은 쿨롱(coulomb) 마찰을 적용하여 아래와 같이 모형화한다.

$$f = -\mu p \left( \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{|v_r|}{a} \right) \right) \frac{v_r}{|v_r|} \quad (2.7)$$

### 3. 실험

본 실험에 사용된 재료는 두께 0.65 mm의 자동차 프레스 성형용 판재인 아연도금 유기피막 강판

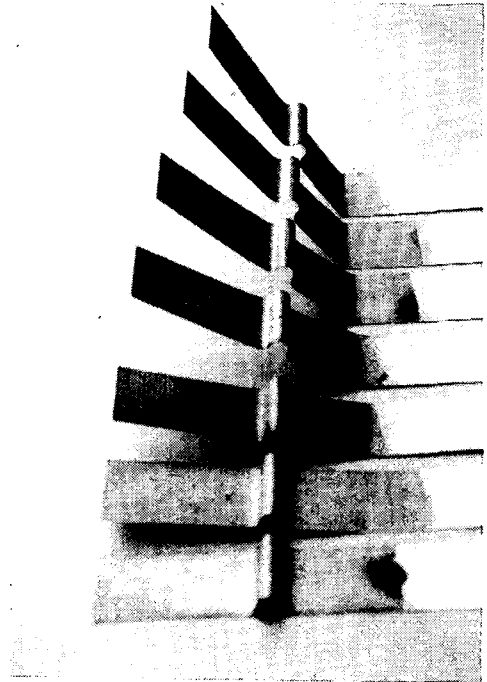


Photo 1 Drawn test pieces for drawing angle, 0°~60

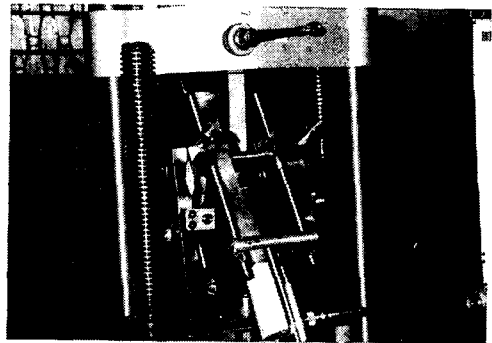


Photo 2 Experimental apparatus for drawing angle, 60°

을 사용하였다. 드로오비드 실험장치 및 소재의 형상은 Photo 1과 Photo 2에서 각각 보여주고 있다.

#### 3.1 성형실험

본 실험에서 사용된 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Fig. 2는 각각 단일원형비드와 사각비드의 형상과 치수를 보여주고 있다. 용량 2 ton의 plasticine machine을 가압하는 방법으로 Fig. 2에서의 상부 다이(male bead)를 1.0 mm, 3.5 mm, 4.9 mm씩

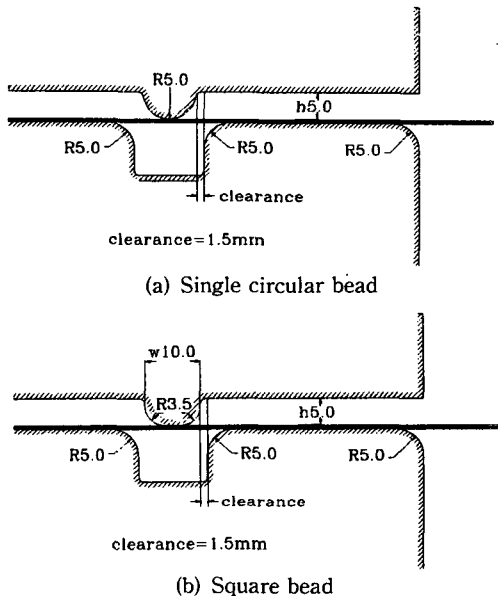
**Table 1** Mechanical properties for drawbead specimen

| KS B 0801 NO. 5 simple-tensile test specimen (t=0.65 mm) |                           |                          |                               |
|--|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Yield stress (Y)   | Plastic coefficient (K)   | Tensile strength         | Strain-hardening exponent (n) |
| 15.0 Kgf/mm <sup>2</sup>                                 | 50.81 Kgf/mm <sup>2</sup> | 28.0 Kgf/mm <sup>2</sup> | 0.25                          |

하부다이의 비드 홈으로 전진시켜가며 시편과 상부다이의 단면형상을 고찰하였다. 성형이나 인출 각 단계마다 시험편 상하부 표면의 길이방향 대수 변형률을 측정하기 위하여 시편표면에 2.4 mm 크기의 격자무늬를 입혔으며 386PC와 연결된 공구현미경을 사용하여 변형률을 측정하였다. 무늬입힘순서는 먼저 시편 상하부 표면에 감광액을 도포한후 회전식 건조기를 통해 건조시키고 격자무늬 직경이 2.4 mm인 필름을 시편위에 부착시켜 진공식 노출장치를 거쳐 현상액으로 현상한후 염색액으로 시편 표면을 염색하였다. 또한 상부다이에 로드셀 (load cell)을 설치하여 가압할 때의 상부다이의 반력을 유한요소해석 결과와 비교하기 위하여 측정하였다.

**3.2 인출실험**

판재성형시 펀치가 전진함에 따른 공구다이 모서리부에서 소재의 인출각도가 변화되는 점을 착안하

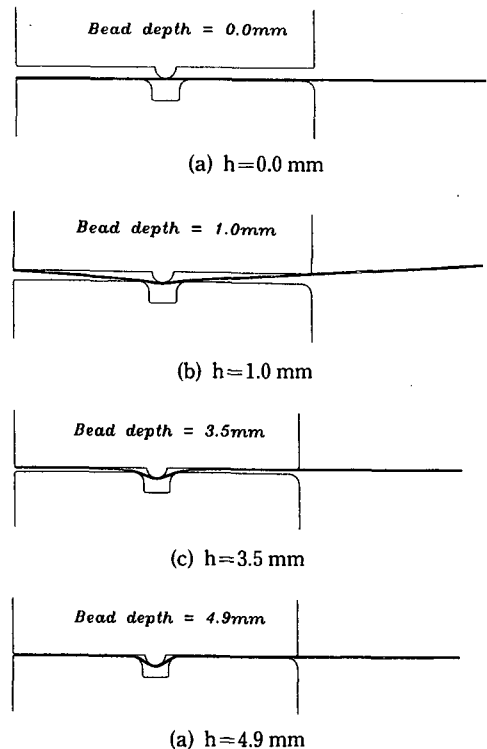


**Fig. 2** Drawbeads geometry and dimension

여 본 실험에서는 시험편을 비드장치에 삽입한 후 인출하고자 하는 각도로 비드시험기를 setting시킨 다음 시편 선단을 그립 (grip)에 물리고 인출하였다. 인출각도는 0°, 30°, 60°로 변화시키며 분당 50 mm 속도로 인출하였다. 비드 시편표면에 격자무늬를 도포시킨 후 인출하여 변형률을 공구 현미경으로 측정하였다.

**4. 결과 및 고찰**

Fig. 3(a)와 같이 소재가 단일원형비드 형상으로 성형될 때의 해석을 위하여 154개의 사각형 요소 (element)와 310개의 절점 (node)으로 시험편의



**Fig. 3** Step 1, step 2 deformed specimen by F.E.M.

두께방향에 대하여 단층으로 분할하였고 마찰계수는 0.05로 하였다. 상부다이(male bead)와 하부다이(female bead)는 강체로 가정하여 해석하였으며, 상부다이의 반력(reactional force)은 소재의 가압력(blank holding force)으로 본다.

4.1 성형과정

성형전인 초기 시험편을 상부다이(male bead)가 전진하여 비드 전진깊이가 4.9 mm될 때까지의 해석시간은 IBM RS-6000 기종으로 약 1시간 정도의 시간이 소요되었다.

Fig. 3(a)에서는 초기의 시험편형상과 단일원형비드 지그형상의 그림을 보여준다. 또한 (b), (c)와 (d)는 각각 단일원형비드가 드로오비드 홈으로 전

진하기 시작하여 1 mm, 3.5 mm와 4.9 mm까지 전진하였을 때의 유한요소해석 결과에 의한 형상을 보여주고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 비드 전진깊이가 3.5 mm 일때의 시험 상, 하부표면에서의 실험 및 이론해석 결과의 변형률분포 선도이다. 두 경우 모두 플랜지 부근에서 변형률은 거의 0의 값으로 일정함을 볼 수 있고, 변형률분포는 좌우대칭이다. 상부표면에서의 변형률분포(Fig. 4)에서는 비드 좌우모서리부근에서 최대변형률을 보이고 있다. 그러나 하부표면에서의 변형률분포(Fig. 5)에서는 비드의 가운데 부근에서 최대변형률을 보여준다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 비드 전진깊이가 4.9 mm 일때의 상하부표면에서의 변형률분포이다. 경향은

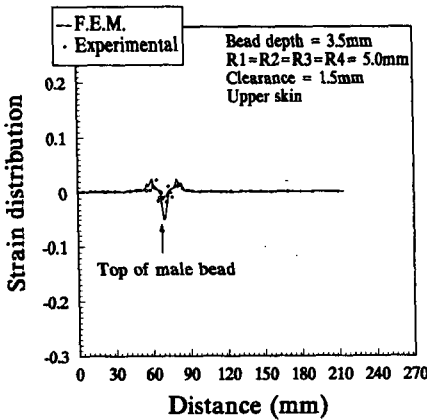


Fig. 4 Strain distribution of upper skin for the 3.5 mm, bead depth

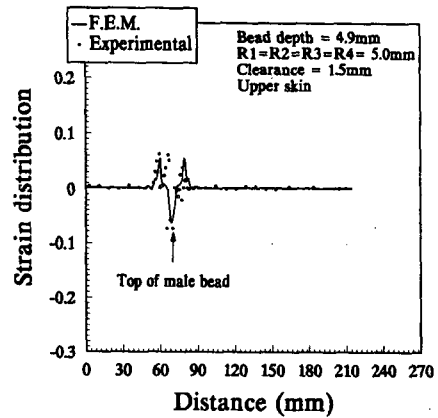


Fig. 6 Strain distribution of upper skin for the 4.9 mm, bead depth

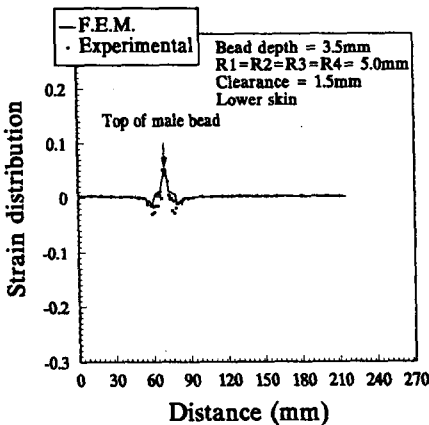


Fig. 5 Strain distribution on lower skin for the 3.5 mm, bead depth

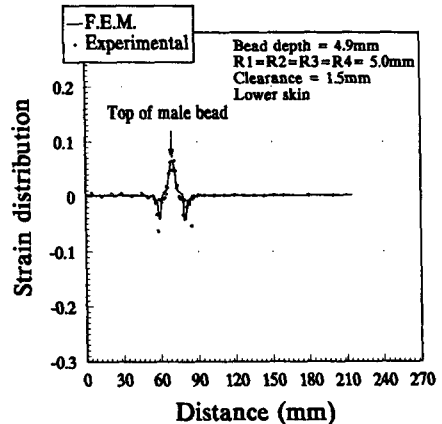


Fig. 7 Strain distribution of lower skin for the 4.9 mm, bead depth

Fig. 6은 Fig. 4와 동일하고, Fig. 7은 Fig. 5와 동일하나 상대적인 수치가 증가하였음을 알 수 있다. 실험결과와 이론해석 결과의 경향과 상대적 수치도 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

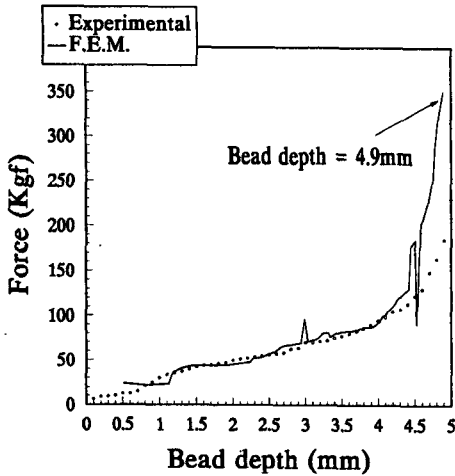


Fig. 8 Reactional die force for the bead depth

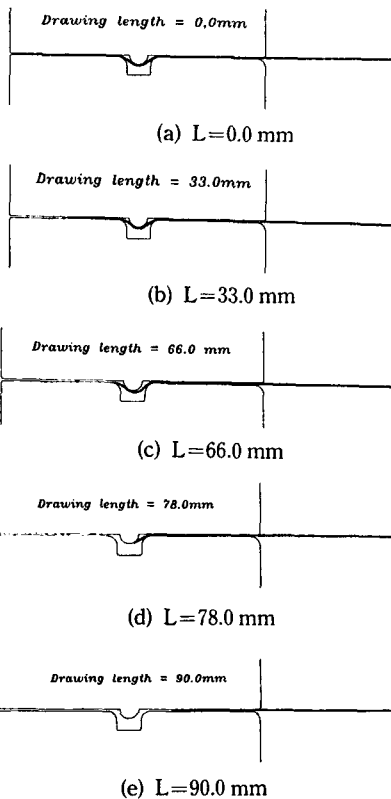


Fig. 9 Drawn specimen from 0 to 90 mm

Fig. 8은 비드 전진깊이가 0 mm에서 4.9 mm가 될 때까지 드로오비드가 전진했을 때의 상부다이가 받는 반력의 실험과 이론해석 결과이다. 비드 전진 깊이가 4.9 mm일 때 상부다이의 반력, 즉 블랭크 홀딩력(blank holding force)은 거의 350 Kgf임을 볼 수 있다. 성형초기에는 비교적 실험결과와 잘 일치하나, 성형 마지막단계인 비드깊이가 4.6 mm ~ 5.0 mm에서는 상부다이스와 시편의 상하부 표면이 거의 접촉된 것으로 해석되기 때문에 이론해석 결과가 실험결과치보다 다소 크게 나타남을 볼 수 있다.

4.2 인출과정

Fig. 9(a)는 비드 전진깊이가 4.9 mm일 때와 동일한 형상의 해석결과이며, 인출시는 178개의 요소와 358개의 절점으로 시편을 단층으로 분할하였고 마찰계수는 0.1로 하였다. (b), (c), (d), (e)는 각각 소재를 인출하기 시작하여 인출깊이가 33.0 mm, 66 mm, 78 mm, 90 mm일 때의 소재의 형상과 단일원형비드 세트(set)의 형상을 보이고 있다.

Fig. 10에서처럼 비드 왼쪽모서리를 (1), 비드부를 (2), 비드 오른쪽모서리를 (3), 그리고 다이모서리부를 (4)로 정의한다. 비드 인출각도가 0°일 때에 한해서 시편의 두께방향에 대하여 단층으로 분

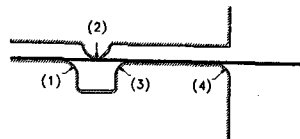


Fig. 10 Selected positions for the strain measurement

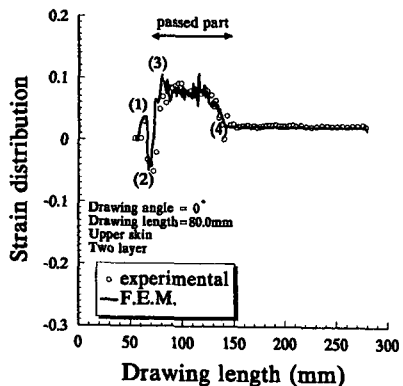


Fig. 11 Upper skin strain distribution of 80 mm drawn specimen

할했을 때의 이론결과와 2층으로 분할했을 때의 이론결과와의 진폭정도를 알아 보았다. Fig. 11은 단일 원형비드 인출도중(인출길이 80 mm) 시편 상부표면에서의 328개 요소와 495개의 절점으로 시편을 2층으로 분할했을 때의 이론결과와 실험결과에 대한 변형률분포이다. 영역 (1)에서 인장변형률을 보이고 있고, (2)에서는 반대로 압축변형률을 보이고 있다. 또한 비드를 통과한 부분은 평균 0.1 정도의 변형률 값을 보이고, 비드 왼쪽모서리 (1)을 통과하기 전의 소재 변형은 거의 없음을 알 수 있다. 실험결과와 요소가 2층일때의 이론해석결과의 정량적인 수치와 경향은 비교적 양호한 접근을 하고 있다. Fig. 12는 인출도중 하부표면에서의 요소를 단층으로 분할한 이론결과와 실험결과의 변형률분포 선도로서 영역 (1)과 (2)에서는 Fig. 11과 반대되

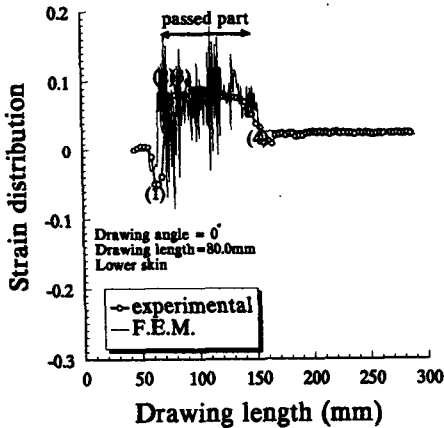


Fig. 12 Lower skin strain distribution of 80 mm drawn specimen

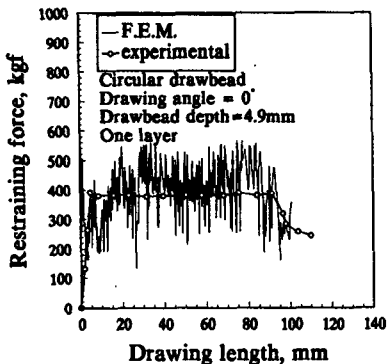


Fig. 13 Circular drawbead restraining forces for the drawing length (one layer)

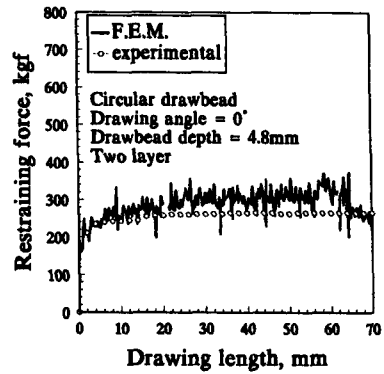


Fig. 14 Circular drawbead restraining forces for the drawing length (two layer)

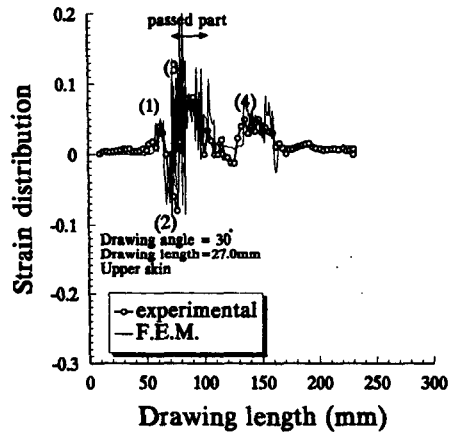


Fig. 15 Upper skin strain distribution for the 27.3 mm drawn specimen and 30° drawing angle

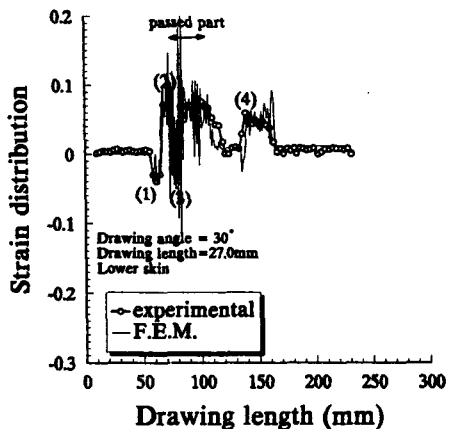


Fig. 16 Lower skin strain distribution for the 27.3 mm drawn specimen and 30° drawing angle

는 경향을 보이고 있으나 비드를 통과한 부분과 비드를 통과하기 전의 영역에서는 거의 동일하다. 이는 영역 (1)과 (2)에서 인출에 의한 변형보다 비드 왼쪽모서리와 비드 오른쪽모서리에서의 굽힘에 의한 변형이 더 큼을 나타내며 단층으로 요소를 분할한 이론결과의 진폭정도가 2층으로 요소를 분할한 상부표면의 Fig. 11이론결과보다 다소 심함을 알 수 있다. Fig. 13은 인출각도가 0°, 비드깊이가 4.9 mm일때 단일원형비드의 인출길이에 대한 인출력 선도이며 이론결과가 다소 크게 진동하는 이유로서 단층요소 분할에 의한 이유와 비드부나 비드 좌,우모서리부를 연속체요소의 절점들이 진입하거나 이탈함으로 인해 다소 진폭이 커짐을 들 수 있겠다. 다소 이론결과가 상당히 큰 폭으로 진동하고 있지만 그 평균치는 실험치와 유사한 결과이다. Fig. 14는 비드깊이가 1 mm정도 줄어든 4.8 mm이 기때문에 인출력은 다소 감소하며 요소를 2층으로 분할한 이론결과의 진폭정도는 Fig. 13에 비해 줄어들음을 보여주고 있다.

Fig. 15는 인출각도가 30°일때의 상부표면에서의

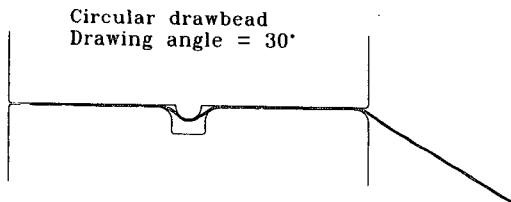


Fig. 17 Drawn phenomenon of specimen by 30° drawing angle

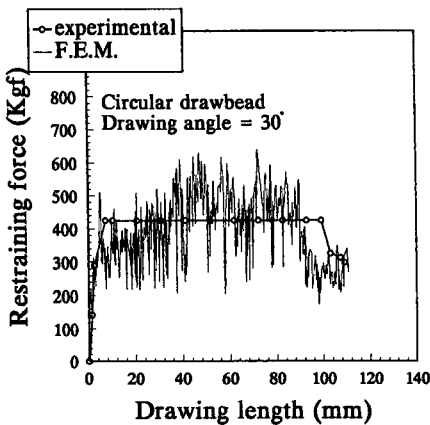


Fig. 18 Circular drawbead restraining forces for the drawing length

변형률분포이고, Fig. 16은 하부표면에서의 변형률 분포 선도이다. 마찬가지로 영역 (1)과 영역 (2), 영역 (3)에서 Fig. 15와 Fig. 16은 반대의 경향을 보인다. Fig. 15와 Fig. 16은 인출길이가 27.3 mm 일때의 선도이므로 재료가 비드를 통과한 부분이 작다. 따라서 영역 (3)과 영역 (4)사이에서 거의 변형이 없는 부분이 존재한다. 인출각도가 0°일때는 다이모서리부 (4)에서 접촉이 없기 때문에 재료의 변형은 인장에 의해서만 일어나지만, 인출각도가 0°가 아닐때는 인출각도에 상당하는 굽힘에 의한 변형을 동반한다. 그러므로 Fig. 15와 Fig. 16에서 처럼 영역 (4)에서 변형이 Fig. 11과 Fig. 12에 비해서 상당히 큰 수치를 보이고 있다. Fig. 17은 30°로 인출할때의 변형된 시편의 형상을 보여주는

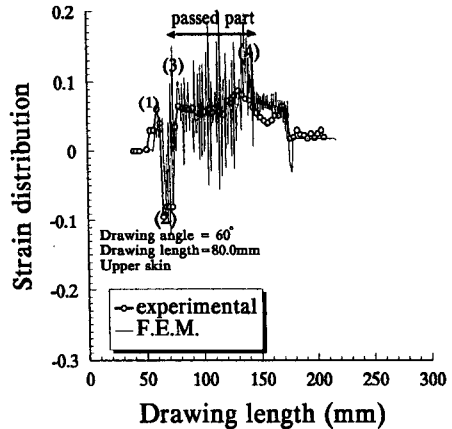


Fig. 19 Upper skin strain distribution of 80 mm drawn specimen

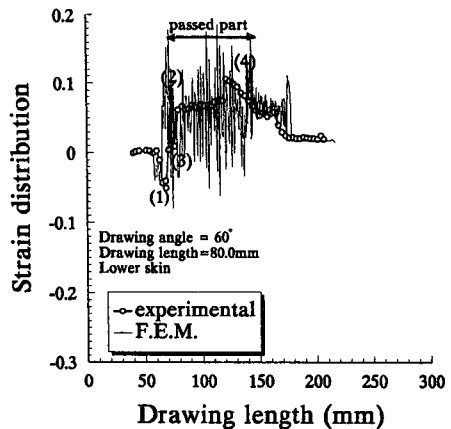


Fig. 20 Lower skin strain distribution of 80 mm drawn Specimen



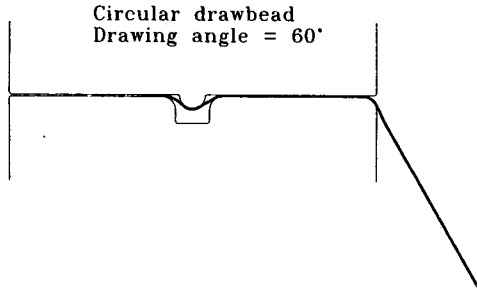


Fig. 21 Drawn phenomenon of specimen by 60° drawing angle

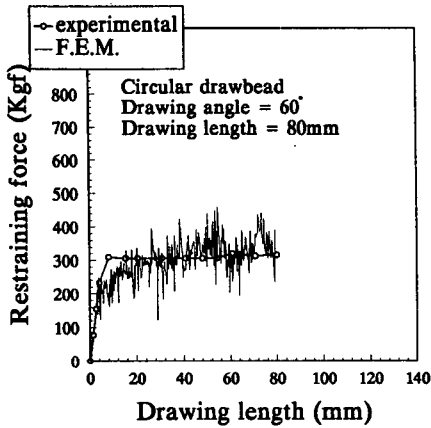


Fig. 22 Circular drawbead restraining forces for the drawing length

해석결과이다. Fig. 18은 시편을 30°로 인출할 때의 인출길이에 대한 인출력의 선도로서 이론의 평균값으로 실험값을 어느 정도 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 20과 Fig. 21에서는 각각 인출각도가 60°일 때의 상부와 하부표면에서의 변형률분포 선도이다. Fig. 11과 Fig. 12에서와는 달리 시편이 다이모서리부 (4)에서 60°로 접촉하여 인출되기때문에 영역 (4)에서도 큰 인장변형을 받고있다. 또한 시편이 비드를 통과한 후 다시 다이모서리부 (4)를 통과했을때 최대변형률 값을 나타낸다. Fig. 22는 60°로 시편이 인출될 때의 유한요소해석에 의한 변형된 시편의 형상이다. Fig. 23은 그때의 인출길이에 대한 인출력의 선도로서 비교적 실험값과 잘 접근한다.

Fig. 23과 Fig. 24는 인출각도가 0°일때의 사각비드에 대한 결과로서 Fig. 23은 인출길이에 대한 인

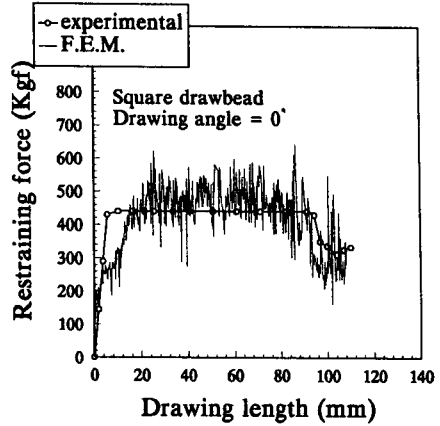


Fig. 23 Square drawbead restraining forces for the drawing length

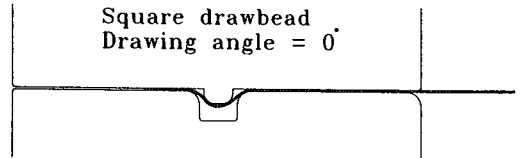


Fig. 24 Drawn phenomenon of specimen through square drawbead

출력의 선도이고, Fig. 24는 변형된 재료의 형상과 사각비드 세트(set) 형상이다. Fig. 23에서 인출력의 평균값은 동일 비드깊이인 단일원형비드의 인출력 수치(Fig. 13)보다 비교적 큼을 볼 수 있다. 상대적인 수치는 거의 60 Kgf 정도로 사각비드의 경우가 단일원형비드보다 크다.

### 5. 결 론

드로오비드를 설치한 상태에서의 시험편의 가압성형과정 및 인출과정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 드로오비드 전진길이에 따른 다이가 받는 반력은 이론해석 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치하나, 성형 마지막 단계에서는 다소 크게 나타나고 있으나, 전반적인 유형은 비슷했다.

(2) 단일원형비드 형상성형시 시편 길이방향에 대한 변형률분포는 플랜지부근에서는 거의 0의 값으로 일정하였고, 드로오비드부와 비드 좌우모서리부근에서의 변형률의 변화에 관한 유형은 이론해석결과와 실험결과가 잘 접근함을 알 수 있었다.

(3) 단일원형비드와 사각비드를 통하여 재료가 인출될 때의 재료의 상하부표면에서의 변형률분포는 실험결과와 이론해석 결과가 비교적 잘 접근함을 알 수 있었다.

(4) 재료가 비드부를 통과할 때의 인출길이에 대한 인출력은 이론해석값이 상당히 큰 폭으로 진동하고 있으나 그 평균값은 실험값과 비교적 일치하였으며, 이론적인 예측이 가능함을 알 수 있었다.

(5) 동일한 조건에서는 단일원형비드보다 사각비드의 인출력이 비교적 큼을 이론 및 실험을 통하여 검증하였고, 정량적인 값의 차이도 예측할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국 과학 재단(과제번호 : 93-10-00-04-3)의 지원과 기아자동차(주)의 협력에 의하여 수행중에 있으며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Nine, H. D., 1978, "Drawbead Forces in Sheet Metal Forming," *Mechanics of Sheet Metal Forming*, pp. 179~211.
- (2) Nine, H. D., 1982, "The Applicability of Coulomb's Friction Law to Drawbead 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) Nine, H. D., 1982, "New Drawbead Concepts for Sheet Metal Forming," *J. of Applied Metal Working*, Vol. 2, No. 3, pp. 185~192.
- (5) Levy, B. S., 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) Yellup, J. M., 1984, "Modelling of Sheet Metal Flow Through a Drawbead," *3th IDDRG*, pp. 166~177.
- (7) Yellup, J. M., 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) Triantafyllidis, N., Maker, B. and Shyam Samanta, S. K., 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) Triantafyllidis, N., Grab, G., Maker, B. and Shyam Samanta, S. K., 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) Sanchez, L. R. and Weinmann, K. J., 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 Stoughton, B., 1988, "Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming," *15th IDDRG*, pp. 205~215.
- (12) 白田松男, 石井良男, 1985, "薄板成形における破断豫測," 第 36回 塑性加工 聯合講演會, pp. 321~324.
- (13) Usuda, M. and Ishii, Y., 1988, "Estimaion of Flow Stress in Secondary Deformation of Prestrained Sheet Steels," *15th IDDRG*, pp. 155~161.
- (14) Furubayashi, T., Ujihara, S. and Sakamoto, T., 1988, "Simulation of Forming Severity on Autobody Panels using a CAD system-Analysis of Drawbead and its Control," *15th IDDRG*, pp. 243~250.
- (15) Furubayashi, T., Ujihara, S. and Sakamoto, T., 1989, "自動車用 パネル の成形性豫測 と 絞り ビ-ド 役割," 塑性 と 加工, Vol. 30, No. 337, pp. 206~211.
- (16) Cao, H. L. and Tadosiu, C., 1992, "Numerical Simulation of Drawbeads for Axisymmetric Deep-Drawing," *NUMIFORM '92, Proc.*, pp. 439~448.