

## 정밀전자부품 성형을 위한 소성가공 공정해석

변상규\*, 허병우\*\*, 강범수\*

\*부산대학교 항공우주공학과

\*\*LG 전자 생산기술 연구센터

### Analysis of a Process Sequence in Precision Press Forming of Electronic Components

S.K. Byun\*, B.W. Huh\*\*, B.S. Kang\*

\*Dept. Aerospace Eng. Pusan National Univ.

\*\*LG Electronics, Inc.

#### Abstract

A process sequence in precision press forming of electronic components is investigated by the finite element method. Aperture, a key component of electronic gun, is formed through a sequence of about 15 operations, among which the beading & bending, the first coining, and the second coining operations are expected to be most critical in view of industrial experts' opinions. Thus, the analysis performed by a commercial code MARC focuses on the three operations, and comparisons are made between the results of the analysis and the measurements of experimental forming of the component, and it appears a sound agreement.

**Key Words** : spring back, aperture, progressive dies, strip, beading, bending, coining, sizing

#### 1. 서론

프레스에 의해 소재에 인장, 압축 등의 응력상태를 유발하여 판재를 원하는 형상으로 성형하는 판재성형 공정[1]은 기계구조물 및 부품 생산에 많이 이용되는 소성가공 공정 중의 하나이며, 제품의 크기 및 정밀도에 따라 그 종류 및 활용가능성이 다양하다. 대부분의 전자부품은 판재 성형품으로 구성되어 있으며, 초소형 초정밀화 되어 가는 경향이 있다[2]. 또한 효율적인 대량생산 체계의 확립이 절실히 요구되고 있으므로 프레스 가공에 의한 생산에 관심이 모아지고 있다[3].

프레스 성형은 제품설계, 공정설계, 소재, 운활, 프레스 기계 등의 요소기술이 조합된 총체적 기술이며, 이러한 기술들이 고도로 균형 있게 조화가 이루어지면 고정도 제품의 안정적 생산이 가능하다. 이중 공정설계에는 공정결정, 금형 설계, 예비성형체 설계 등과 같은 영역이 포함되며 여러 가지 공정이 조합된 다단계 공정으로 이루어진 복잡한 형상의 부품 개발에서 이의 효율적인 수행은 매우 중요한 요소라 할 것이다.

선진국에서는 판재성형 제품의 안정화, 고정밀화 및 생산성 향상을 달성하기 위해 3차원 비접촉 측정기를 활용하고 있으며, 지능형 가공 시스템, 온간 성형법 도입으로 인한 판재 성형한계 확장, 정밀정형(net shape or near net shape) 개념 등을 도입하고 있다[4]. 또한 탄성회복(spring back)등 판재성형에 영향을 미치는 여러 공정변수에 의한 시행착오를 줄이기 위하여 유한요소법을 활용하여 공정설계 및 해석을 하는 연구가 최근에 급속히 발달하고 있는 추세이며, 이미 필수 불가결한 기술로 자리잡고 있다[5-7]. 그러나 국내에서는 대부분의 공정설계가 숙련자의 경험적 직관 및 실험에 의해 수행되고 있으므로 다단계의 성형공정을 거쳐 생산되는 복잡한 형상의 제품을 개발할 경우 공정동안 소재가 받는 여러 형태의 변형으로 인한 시행착오로 시간소비 및 단가상승을 초래한다. 이를 개선하기 위하여 초등해석법, 미끄럼 선장법, 및 상계법과 같은 전통적인 해석방법을 활용하여 왔으나[8-10], 복잡한 형상의 해석과 정밀한 예측결과를 얻기가 곤란한 점이 있으므로 유한요소법의 활용이 시도되어지고 있다. 유한요소법에 의한 해석에서 구해지는 광범위한 정보는, 현장에서의 실무적인 경험과 결합하여 공정설계에 소요되는 시간적, 경제적 절감효과 및 공정수의 감소 등의 효율적인 공정설계를 수행하는데 도움을 줄 것이다[11-14]. 또한 유한요소법을 이용한 판재 성형공정의 해석은 기업에서 컴퓨터를 활용하여 제품을 설계할 수 있는 능력확보와 금형 설계에 관한 기술 축적에 도움을

줄 것이다.

본 연구에서는 브라운관(CRT)에 장착되어 전자선(electronic beam)을 방출하는 전자총 부품의 일종인 아퍼추어(aperture)의 성형공정에 대한 해석을 수행하였다. 아퍼추어를 성형하기 위한 공정은 약 15개의 연속 공정으로 구성되어 있으며, 프로그레시브 금형(progressive dies)에 의해 생산되고 있다. 유한요소 해석을 통해 성형공정동안의 소재 변형양상, 두께분포, 소재의 유동 형태, 유효 변형률 분포 등에 관한 정보를 획득하여 발생 가능한 결함을 예측하였으며, 시제품의 측정 결과와 해석에서의 결과를 비교하여, 보다 정확한 해석을 수행하기 위한 기술을 습득하고, 공정 개선 및 유사한 제품의 공정설계시 도움이 될 수 있도록 정량적인 자료를 마련하였다. 해석을 위하여 상용 FEM코드인 MARC, MTS(Material Test System) 장비 및 표면 조도기(Surf Com) 등을 활용하였다.

## 2. 유한요소 모델링

아퍼추어의 성형에 사용되는 소재는 I106S이며 두께 0.5mm의 박판이다. 각 공정별로 성형이 끝난 후 소재로부터 다이로 분리시켰을 때 탄성회복에 의한 변형 정도를 파악하기 위하여 탄소성 유한요소법을 활용하였고, 성형품의 형상이 복잡하므로 3차원으로 해석을 수행하였다. 소재의 대칭성을 감안하여 1/4을 제어체적으로 선택하여 초기속도장을 가졌, Newton-Raphson법으로 비선형 방정식을 풀었다. 소재와 다이사이의 마찰조건에서 마찰상수( $\mu$ )는 0.05를 사용하였다. 실험으로부터 구한 소재의 0.2% 오프셋(offset) 항복강도는 330 N/mm<sup>2</sup> 이며, 종탄성계수 E값은 131.4 kN/mm<sup>2</sup> 를 사용하였다. 박판 소재의 성형에 큰 영향을 미치는 이방성 효과를 나타내는 값들은 소성 변형률 비  $R$ (Lankford value), 평면 이방성 계수  $\Delta R$ , 수직 이방성 계수  $\bar{R}$  등이 있으며 이들에 대한 수식적 정의 및 실험치 들은 아래와 같다[15].

1) 소성 변형률 비  $R$

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln(w_f/w_o)}{\ln(t_f/t_o)} \quad \text{여기서} \quad \begin{array}{l} f : \text{final,} \quad o : \text{original} \\ w : \text{폭,} \quad t : \text{두께} \end{array}$$

이며 각 방향에 대한 값들은 아래와 같다.

$$R_0 = 0.905, \quad R_{45} = 1.008, \quad R_{90} = 1.007$$

2) 평면 이방성 계수  $\Delta R$

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90}}{2} - R_{45} = -0.052$$

3) 수직 이방성 계수  $\bar{R}$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} = 0.982$$

이어링(earring) 현상의 판정 기준이 되는  $\Delta R$ 은 0에 가깝게 나타났고, 수직 이방성 계수  $\bar{R}$ 은 등방성을 나타내는 값인 1에 거의 근접하였으므로 해석에서 이방성 효과는 고려하지 않았다.

## 3. 성형공정 및 경계조건

### 3.1 성형공정

아퍼추어는 연속 성형공정을 거쳐 생산되며, 이중 대부분의 성형이 이루어지며 결함발생 가능성이 가장 높은 비이딩 및 벤딩 공정, 1차 코이닝, 2차 코이닝 공정에 대해 해석이 수행되었다. 그림 1에서는 초기 소재의 평면도 및 주요 치수가 보여지고 있으며, 비이딩 및 벤딩 공정을 거치면서 소재는 두께변화 없이 성형된다. 1차 코이닝 공정에서는 비이드 성형되는 부위의 다이로 상승시키고, 비이드 안의 원형 부위를 성형하는 펀치 및 다이를 하강시켜 단차를 성형한다. 이어지는 2차 코이닝 공정에서는 사각형으로 들출된 펀치로 1차 코이닝 된 원의 중심부의 두께를 감소시키게 된다. 해석에서는 각 공정이 끝난 후 소재로부터 다이를 분리시켰을 때 탄성회복에 의한 변형의 정도 및 제품의 평탄도, 주요 부위의 두께 분포, 유효응력 및 변형률 분포, 2차 코이닝 공정에서의 금형의 탄성 변형률 등을 조사하였다. 이후 사이징(sizing), 트리밍(trimming), 벤딩 사이징(bending sizing), 표면 사이징(surface sizing) 등의 공정들을 통해 앞에서 성형된 주요 부위의

치수를 보정하게 되며, 2차 코이닝 성형된 부위의 가운데에 홀(hole)을 뚫는 피어싱(piercing) 공정 및 파팅(parting)공정으로 제품이 완성된다. 그림 2에서는 연속 성형 후 완성된 제품의 평면 형상이 보여지고 있다.

### 3.2 경제조건

소재는 연속 공정을 거치는 동안 스트립(strip)에 구속되어(그림 3참조) 이를 통해 다음 공정들로 이동하게 되며, 최종의 파팅 공정에서 분리된다. 그러므로 해석에서는 경제조건을 대칭면에 대한 구속조건 및 스트립에 의한 구속조건까지 고려하였다(그림 4참조). 또한 해석후 주요 관찰의 대상이 되는 단면에 임의로 P-P, C-C, S-S로 이름을 붙였으며, 스트립과 연결되는 S-S 단면에는 스트립의 변형을 유발할 정도의 과도한 하중이 z방향으로 걸리지 않는다는 가정 하에 x방향 및 y방향으로만 고정시켰다.

## 4. 비이딩 및 벤딩 공정

비이딩 및 벤딩 공정은 소재에 주요 변형이 발생하는 첫 공정으로 최종 제품의 형상에 큰 영향을 미치리라 예상된다. 그러므로 입력된 경제조건의 타당성을 검토하고, 해석의 신뢰도를 검토하기 위하여 시제품으로부터 측정된 주요 부위의 치수와 비교 검토하면서 해석을 수행하였다. 이 공정에서 해석의 주요점은 주요 부위의 두께분포 및 성형품의 평탄도 등이다.

그림 5에서는 아퍼추어의 성형 해석을 위한 초기 격자 체제 및 다이의 형상을 보여주고 있으며, 비이딩 및 벤딩 등의 급격한 변형이 예상되는 부위에서는 격자체제를 조밀하게 구성하여 해석의 신뢰도를 향상시키려 하였다. 금형은 윗다이 및 아랫다이와 성형 후 소재를 이동시키기 위해 스프링의 힘으로 밀어 올리는 패턴으로 구성되어 있다. 그림 6에서는 프레스가 하사점에 도달했을 때 소재의 성형형상 및 다이의 형상이 소재 흐름 경향(metal flow pattern)과 함께 보여지고 있다. 소재로부터 금형을 분리시켜 탄성회복에 의한 변형의 경향을 파악한 후 실제 측정치와 비교하였다. 이때 소재와 다이사이의 분포되는 분리력(separation force)이 소재의 탄성변형에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 이 값을 최소로 잡았다. 그림 7에서는 탄성회복이 발생한 성형품의 형상 및 유효 응력 분포를 각 단면(P-P 및 C-C)에 대해 10배 확대하여 보여주고 있다. 표면 조도 측정기로 시제품을 측정한 자료는 그림 8에서 보여지고 있으며 이를 해석 결과와 비교하였다. 측정에서는 P-P 단면에서 소재 중앙부로 갈수록 위로 들려 올라가는 경향을 볼 수 있었으나 해석에서는 오히려 중앙부위가 아래로 처진 것을 알 수 있었고 C-C 단면에서는 실험을 통하여 양쪽 날개부위가 탄성회복의 영향으로 아래로 처진 것을 알 수 있었으나 해석에서는 위로 들려 올려진 것을 관찰할 수 있었다.

다음으로 해석에 입력된 여러 경제조건의 타당성을 검토하기 위하여 이 값들을 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 스트립과 연결되는 S-S선상의 구속 조건 및 성형 후 소재로부터 다이가 분리되는 순서, 분리력의 크기 등을 변형시켜가며 해석을 수행하였으나 탄성회복 경향에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 다음으로 해석과 측정치 사이에 차이점을 유발하는 다른 요소들을 발견하기 위하여 동시에 발생하는 벤딩과 비이딩의 두 가지 성형을 따로 분리시켜 해석하여 각 성형이 소재 형상에 미치는 영향을 파악하였다. 그림 9 및 10에서는 벤딩공정만 거친 소재의 3차원 형상(유효변형을 분포)과 C-C 단면형상을 10배 확대하여 보여주고 있다. P-P 단면에서는 소재 중앙부로 갈수록 소재가 아래로 처졌고, C-C 단면에서는 날개부위가 아래로 처짐을 알 수 있었다. 그림 11 및 12에서는 비이딩 공정만 거친 소재의 형상과 P-P 단면에 대한 확대 형상이 보여지고 있다. P-P 단면에서는 소재 중앙부가 위로 들려 올려졌으며, C-C 단면에서는 날개가 위치하는 부위가 위로 약간 들려 올려짐을 알 수 있었다. 비이딩 효과와 벤딩 효과를 각 단면별로 비교 검토한 내용이 표 1에 나타나 있다. 여기서 각 공정에서 측정치와 반대되는 영향 및 부합되는 영향이 유발되며, 이들이 복합적으로 성형품의 형상에 영향을 미침을 알 수 있었다. 그러므로 각 공정에 의한 성형도에 가장 큰 영향을 미치리라 예상되는 다이 및 펀치의 스트로크를 조절하였다. 대부분의 경우 그 영향이 미미하게 나타남을 알 수 있었으나, 소재 윗면에서 하중을 가하는 평평한 펀치의 스트로크를 조금 크게 조절하였을 때 탄성회복 경향이 바뀔을 알 수 있었다. 그러므로 이 펀치의 스트로크 증분 편차를 조금 더 세밀하게 나누어 해석을 수행하였다. 그 중 스트로크를 5 $\mu$ m증가시켰을 때의 결과가 실험과 가장 일치하는 경향을 보였으며(그림 13참조), 이 결과를 다음 공정에 대한 해석의 자료로 삼았다. 비이딩 및 벤딩 공정을 거친 제품의 탄성회복 후 최종 형상은 그림 14에서 유효 변형률의 분포와 함께 보이고 있다. 이때 벤딩 및 비이딩 성형된 부위에 높은 값이 분포됨을 알 수 있다.

## 5. 1차 코이닝 공정

1차 코이닝 공정에서는 비이딩을 성형하는 다이는 0.081mm 상승시키고, 비이딩 안쪽부위를 성형하는 편

치 및 다이는 0.104mm 하강시켜 단차를 성형하는 공정이다. 이 공정에서는 주요 관찰 항목은 주요부위의 두께 분포와 탄성회복에 의한 평탄도 변화량 및 그 경향 등이다.

프레스 램이 하사점에 도달했을 때의 소재 성형 형상이 소재 유동 경향과 함께 그림 15에 나타나 있다. 그림 16에서는 P-P 단면의 탄성회복된 형상을 도식적으로 보여주고 있으며, 소재 중앙부가 조금 아래로 처지는 경향을 보이고 있다. 1차 코이닝 공정을 거친 성형품의 3차원 형상이 유효 응력 분포와 함께 그림 17에서 보이고 있으며, 비이딩 및 밴딩 성형된 부위의 응력 분포가 가장 높게 나타남을 알 수 있다.

## 6. 2차 코이닝 공정

2차 코이닝 공정에서는 앞 공정에서 단차 성형된 부위의 중앙에 가로 1.4mm, 세로 0.6mm의 사각형으로 돌출된 펀치를 이용하여 그 부위의 소재두께를 감소시킨다. 공정동안에 성형이 이루어지는 좁은 면적에 프레스 하중이 집중되고, 프레스 램이 하사점에 도달했을 때 윗 펀치와 아랫다이 사이의 간격이 너무 작으므로 금형의 손상이 예상되고 있다. 또한 금형의 치수와 실험에서 구한 성형품의 치수를 비교해 볼 때, 소재뿐만 아니라 금형에도 탄성 변형이 예상된다. 그러므로 해석을 통해 금형 하중을 구하여 금형의 탄성수축량을 구하고, 공정 해석을 통해 나타난 경향 및 주요 정보를 분석하여 다음의 사이징 공정들을 생각할 수 있도록 공정을 개선하는데 도움이 되고자 하였다.

그림 18에서는 프레스 램이 하사점에 도달하였을 때의 소재 성형형상이 소재 유동 경향과 함께 보여지고 있으며, P-P 단면에서는 원의 중심을 기준으로 소재 유동이 대칭적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 19에서는 탄성회복 후의 각 단면의 성형 형상을 보여주고 있으며, 2차 코이닝 성형된 부위의 아랫면에서 탄성회복에 의한 변형이 심하게 나타나 있다. 그림 20에서는 P-P 단면에 대한 최종 두께 분포가 나타나 있으며, 2차 코이닝 성형된 부위의 최소 두께는 중앙 원에서 0.2738mm, 왼쪽 원에서 0.2852mm로 나타났다. 완성품의 단면 상세도에서는 이 부위의 두께가 0.335mm로 나타나 있으므로, 해석치와의 차이만큼 금형이 성형공정 중에 탄성 수축을 받았을 것으로 생각된다. 그림 21에서는 해석에 포함된 주요 공정들을 모두 거친 성형품의 3차원 형상이 유효 응력 분포로 보여지고 있다.

## 7. 결론

상용 패키지인 MARC를 활용하여 아퍼추어를 성형하기 위한 연속 프레스 성형 공정에서 결함 발생이 예상되는 주요 공정에 대하여 탄소성 유한요소법으로 3차원 해석을 수행하였다. 해석 결과를 실험에 의한 측정치와 비교하였으며, 각 공정에 대해 다음의 결론을 얻었다.

### 7.1 비이딩 및 밴딩 공정

비이딩 및 밴딩 공정은 제품의 최종 성형형상에 큰 영향을 미치는 공정이다. 그러므로 해석의 신뢰도를 향상시키기 위해서 실제 성형품의 측정치와 비교하면서 해석을 수행하였다. 1차로 수행된 해석에서 구해진 결과는 관찰 단면들에서 실제 측정치와 반대되는 경향을 얻었다. 밴딩 및 비이딩 공정을 각각 따로 해석하였을 때 각 단면에 대해 서로 상반되는 탄성회복 경향을 보였으며, 이 경향들이 복합적으로 성형품의 형상에 영향을 미침을 알 수 있었다. 이에 각 공정의 성형도에 영향을 미치리라 예상되는 펀치 및 다이들의 스트로크를 조절하여 보았다. 그 결과로 소재 윗면에서 비이딩 부위의 바깥에 하중을 가하는 평평한 펀치의 스트로크가 성형의 최종 형상에 큰 영향을 미침을 알 수 있었고, 이 펀치의 스트로크 증분 편차를 보다 세밀하게 나누어 시뮬레이션 하였다. 이로부터 최적의 스트로크 증분을 5 $\mu$ m으로 두고 해석을 계속하였다.

### 7.2 1차 코이닝 공정

1차 코이닝 공정은 앞 공정에서 원형으로 비이딩 성형된 안쪽 부위에 하중을 가하여 단차를 성형하는 공정으로 다음 2차 코이닝 공정을 준비하는 과도적인 공정이다. 해석의 결과로부터 P-P 단면에서 소재 중앙부가 조금 아래로 처지는 경향 및 C-C 단면에서는 날개 부위가 상승하는 경향 등을 볼 수가 있었다. 응력 분포를 관찰하였을 때 비이딩 및 밴딩 성형된 부위에 가장 높은 잔류응력이 분포됨을 알 수 있었다.

### 7.3 2차 코이닝 공정

2차 코이닝 공정에서는 1차 코이닝 공정에 의해 단차 성형된 부위의 중앙에 사각형 펀치를 이용하여 소재 두께를 감소시키는 공정이다. 금형의 치수와 실험에서 구한 성형품의 치수를 비교해 볼 때, 소재뿐만 아니라

금형에도 탄성 변형이 확인되었다. 2차 코이닝 성형된 부위의 소재 아랫면에서 탄성 변형에 의한 굴곡이 관찰되었다. 소재의 두께 분포를 조사하였을 때 2차 코이닝 성형된 부위의 최소 두께는 중앙 원에서 0.2738mm로 나타나 제품 완성도의 두께 0.335mm보다 작게 나타났다. 이 두값의 차이만큼 금형이 탄성 수축을 받았을 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Book Co., 1985.
2. T. Jimma and T. Adachi, "Recent trends in precise-working of electronic components", Advanced Technology of Plasticity, 1993.
3. 강 범수, 이 진희, 변 상규 등, "유한요소법을 활용한 캐드륜의 프레스 성형공정 설계", 한국 소성가공 학회지, 제 3권, 1994.
4. K. Yamaguchi and K. Sadamura, " 板材成形 21世紀への展望", Journal of the JSTP, Vol. 35, No. 400, 1994.
5. B.S. Kang, "Application of FEM to Process Design in Metal Forming for Production of Aircraft Components," J. of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 19.
6. S.I. Oh, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies", Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, pp. 479-493, 1982
7. S.I. Oh, N. Rebelo, and S. Kobayashi, "Finite Element Formulation for the Analysis of Plastic Deformation of Rate-Sensitive Materials in Metal Forming", IUTAM Symposium, Tutzing/Germany, 28 August-3 September 1978, (1978), pp.273-291
8. G.B. Yu and T.A. Dean, "A practical computer-aided approach to mould design for axisymmetric forging die cavities", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 25, No. 1, pp. 1-3, 1985.
9. K.R. Vemuri, S.I. Oh and T. Altan, "BID : A knowledge-based system to automate blocker design", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 29, No. 4, pp. 505-518, 1989.
10. J.C. Gerdeen, "Development of a computer program "AXIFORM" for the analysis of forming of axisymmetric sheet metal parts", Proc. 12th NAMRC, pp. 209-213, 1984.
11. S.M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform Design in Disk Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp. 231-243, 1986.
12. B.S. Kang, N.S. Kim and S. Kobayashi, "Computer-Aided Preform Design in Forging of airfoil Section Blade", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 30, No. 1, pp. 43-52, 1990.
13. B.S. Kang and S. Kobayashi, "Preform design in Ring Rolling processes by the Three-Dimensional Finite Element Method", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No. 1, pp. 139-151, 1991.
14. B.S. Kang, "Processes Sequence Design in a heading Process", J. of materials Processing Tech., 27, pp. 213-226, 1991.
15. 전 기찬, "박판금속의 성형 - 이론과 실제", 반도출판사, 1993.

Table 1 Schematic description for the effects from the bending and beading processes

	P - P 단면		C - C 단면	
	성형 형상	측정치와 비교	성형 형상	측정치와 비교
벤딩 효과	중앙부위가 아래로 처짐	반대	날개부위가 아래로 처짐	부합
비이딩 효과	중앙부위가 위로 들려 올라감	부합	날개부위가 위로 들려 올라감	반대

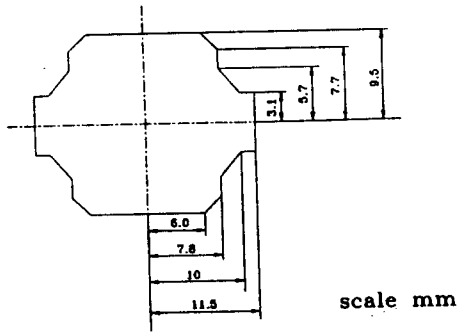


Fig. 1 Planar configuration and dimensions for the initial workpiece

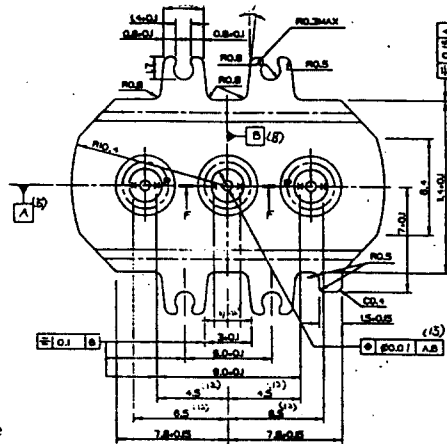


Fig. 2 Planar configuration and dimensions of aperture

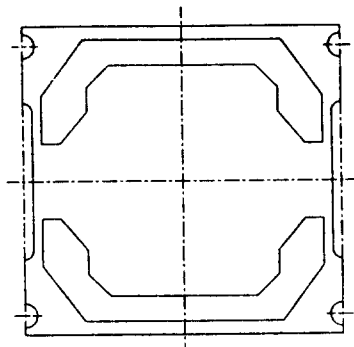


Fig. 3 Initial configuration of workpiece constrained by strip

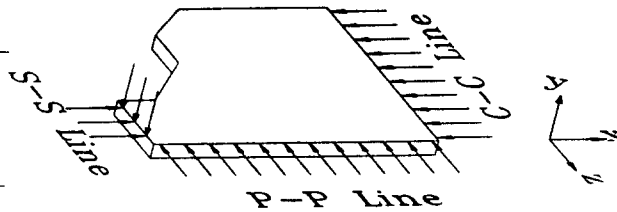


Fig. 4 Boundary conditions for the FEM anal.

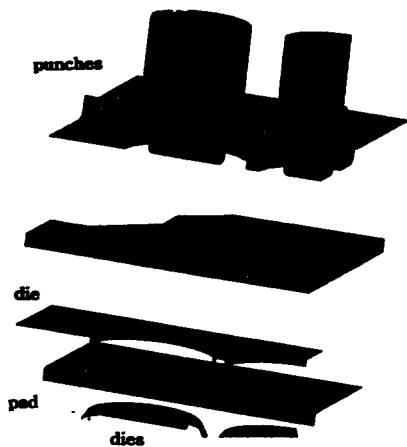


Fig. 5 Initial mesh system and die setup for 3 dim. anal.

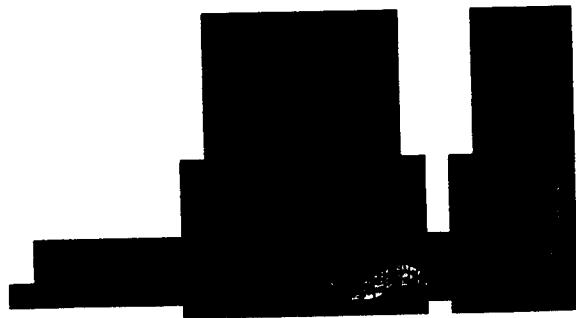
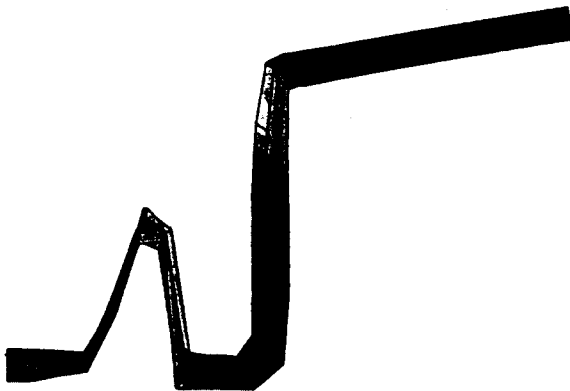


Fig. 6 Deformation and metal flow pattern after the B&B operation

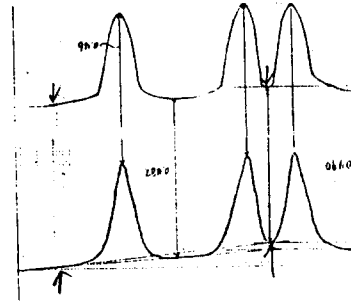


(a) P-P section

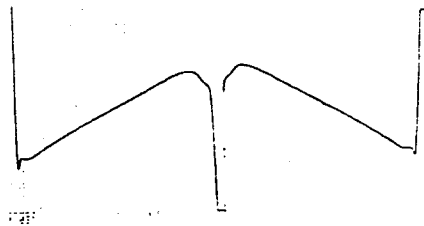


(b) C-C section

Fig. 7 Sectional configuration after the B&B operation (multiplied by 10 times)



(a) P-P section



(b) C-C section

Fig. 8 Sectional configuration from the experiment

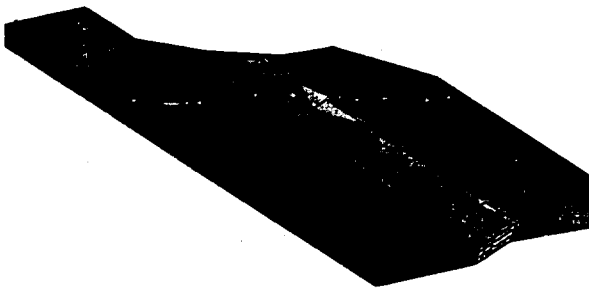


Fig. 9 3 dimensional configuration after the bending operation

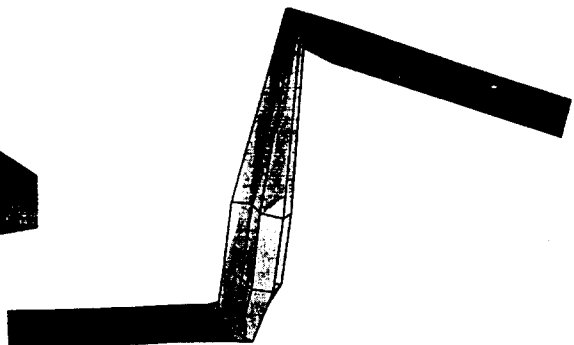


Fig. 10 Deformation for the C-C sect. after the bending operation

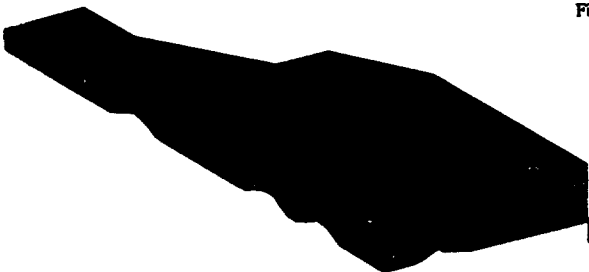


Fig. 11 3 dimensional configuration after the beading operation



Fig. 12 Deformation for the P-P sect. after the beading operation

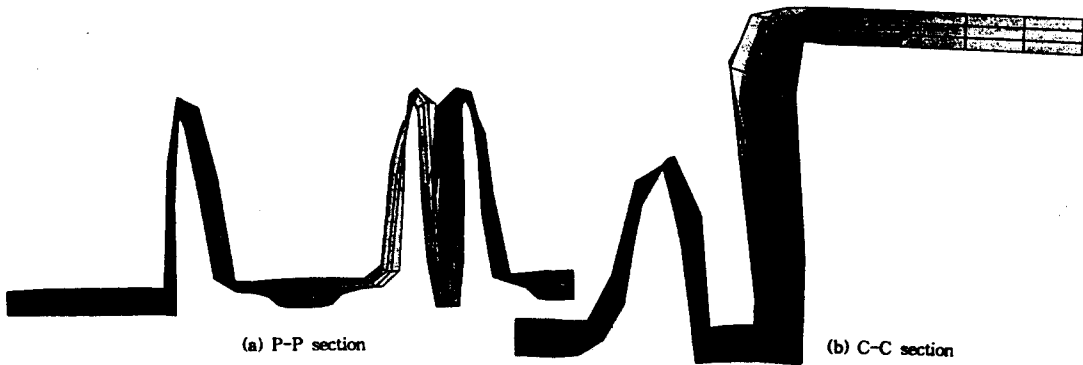


Fig. 13 Deformation by 5µm increasing the punch stroke



Fig. 14 3 dimensional configuration after the B&B operation Fig. 15 Deformation and metal flow pattern after the 1st coining operation

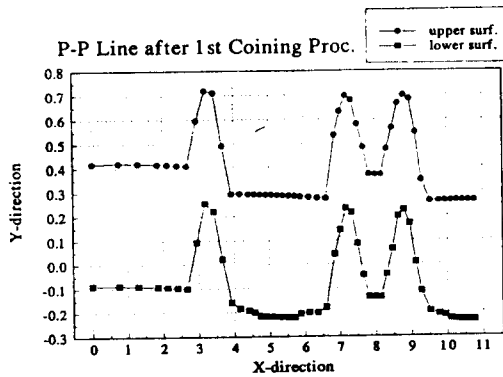


Fig. 16 Configuration for the P-P section after the 1st coining operation

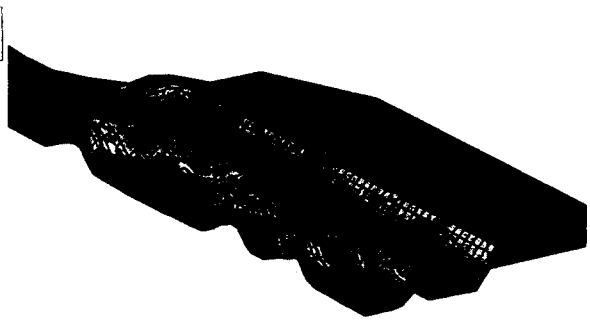


Fig. 17 3 dimensional configuration after the 1st coining operation

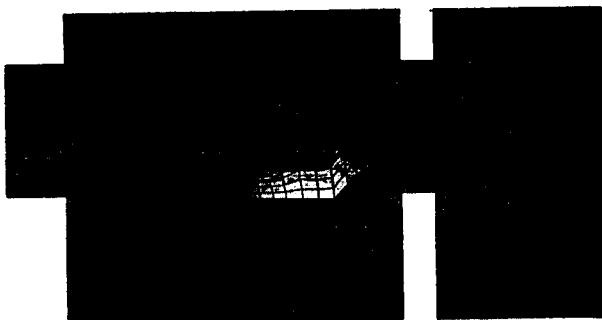


Fig. 18 Deformation and metal flow pattern after the 2nd coining operation



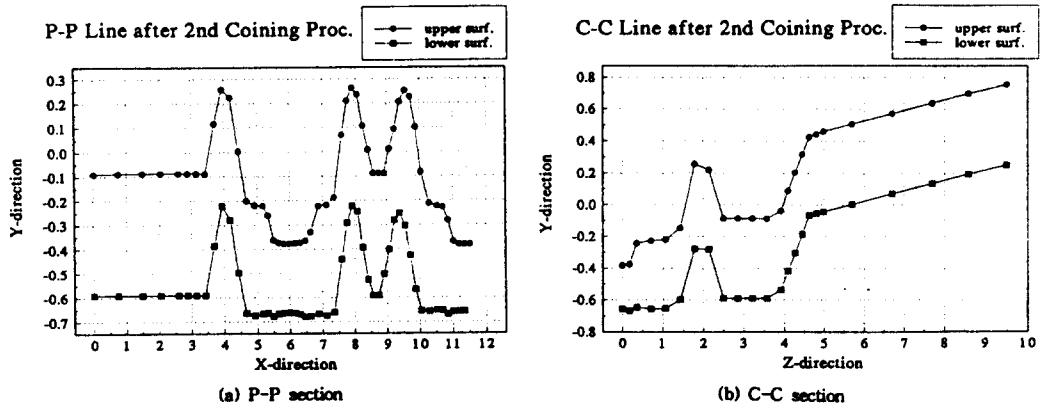


Fig. 19 Spring back effect for the sections after the processes.

Thickness Distribution on P-P Line after 2nd Coining Proc.

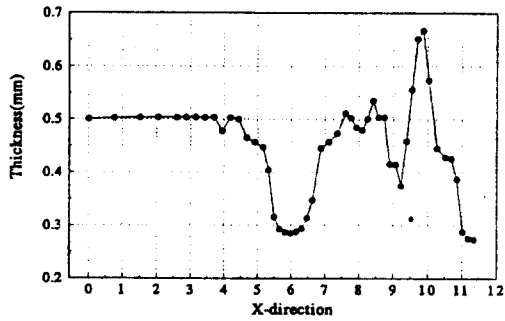


Fig. 20 The final thickness distribution over the P-P section

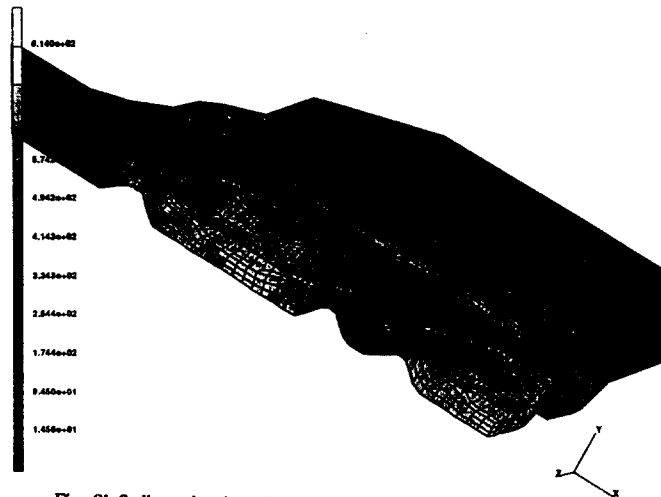


Fig. 21 3 dimensional configuration after the 2nd coining operation