

다단계 자동차 부품 소성가공 공정설계

변 상 규*, 양 순 종*, 제 진 수**, 강 범 수*

* 부산대학교 항공우주공학과, ** 만도기계

Process Design in Multi-stage Forming of an Automobile Component

S.K. Byun*, S.J. Yang*, J.S. Jae**, B.S. Kang*

* Dept. Aerospace Eng. Pusan National Univ.

** Mando Machinery

Abstract

This study aims detecting defects for the forming processes of X2 spline, which is designed by an industry expert. The exist process consists of 3 runs and 7 operations with 3 heat treatments. The rigid-plastic FEM analysis was carried out to design a new process and some defecs were found. Thus the design was modified to get better results. It is confirmed that the industry expert agree the possibility of defects derived from the FEM results

Key Words : X2 Spline, forward extrusion, backward extrusion, upsetting , piercing, sizing, remesh,

1. 서론

자동차 부품은 대량 생산되고 있으며, 지금까지는 주로 기계가공으로 최종 제품의 정확한 치수를 성형하였다. 그러나 인건비 상승, 전문 기술인력 부족 및 생산성 저하 등의 문제점을 해결하기 위하여 프레스를 활용한 온간 혹은 냉간 다단계 단조공정으로 전환되고 있는 추세이다[1]. 단조에 의한 부품 생산의 최종 목표는 결함이 없으면서 요구조건에 부합되는 부품을 가장 경제적으로 생산하는 것이며, 여기에 따라 적절한 성형공정이 설계되어야 한다. 공정설계에는 공정결정, 예비성형체(preform), 금형, 윤활 및 장비등의 여러 분야가 포함된다. 그중 공정결정 및 예비성형체 설계의 효율적인 수행은 제품 개발에 소요되는 시간 및 원가를 감소시키는데 매우 중요한 요소이며[2-5] 아울러 유한요소법이 효과적으로 응용될 수 있는 분야이다. 그러나 지금까지는 대부분의 프레스 성형공정의 설계에서 숙련자의 경험적 직관 및 실험에 의해 공정변수를 결정하여 왔으며 이로인한 시행착오를 줄이기 위하여 이론적인 해석을 통해 공정중에 발생가능한 결함들을 미리 파악하는 연구가 필요하다. 전통적으로 초등해석법, 미끄럼 선장법 및 상계법 등과 같은 해석방법과 이러한 해석방법에 기본적인 CAD시스템들이 활용되어 왔으나[6-8] 복잡한 형상

의 부품 성형공정에 대해서는 적용이 곤란한 점이 있으므로 최근 유한요소법이 널리 사용되고 있다. 유한요소 해석을 이용한 공정설계는 종래의 방법과는 달리 실제 생산과정에 필요한 정보 즉, 금형하중, 결합, 유효 변형률 및 응력의 분포 등의 광범위한 정보를 제공하며, 해의 신뢰성 또한 매우 높다.

미국의 경우 미국과학재단으로부터 장기간 집중적으로 지원을 받고 있는 오하이오 주립대학의 정밀정형 연구센터(ERC for Net-Shape Manufacturing)에서 유한요소법을 활용한 정밀 정형품의 성형공정설계에 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한 독일, 일본, 프랑스 등도 유한요소법을 활용한 성형공정해석 및 설계에 대한 활발한 연구를 수행하고 있다. 국내에서도 많은 연구가 이루어지고 있으나 이러한 연구가 결실을 맺기 위하여서는 실제 공정에 직접 이용될 수 있어야 한다.

본 연구에서는 현재 만도기계에서 생산되고 있는 자동차 스타터(starter) 부품의 하나인 X-2 스플라인(spline)의 성형공정을 개선하기 위하여 전문가에 의하여 새로이 설계된 다단계 냉간단조 공정에 대한 유한요소 해석을 수행하였으며 새로운 공정중에 발생가능한 결합들을 미리 예측하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 결합이 방지된 새로운 공정을 설계하였으며, 이를 통하여 열처리 및 성형공정수를 줄임으로써 생산성을 향상시키고자 하였다. 해석에는 실험실에서 자체 개발한 유한요소 프로그램인 DAMF를 활용하였다.

2. 유한요소 모델링

X-2 스플라인에 사용되는 소재는 SCR415H이며 소재의 물성치는 아래와 같다.

$$\sigma = 30.28 \left(1 + \frac{\epsilon}{0.0503}\right)^{0.3772} \quad (\text{kgf/mm}^2)$$

해석은 소재의 대칭성을 감안하여 축대칭기법으로 수행되었으며 다이와 소재사이의 마찰 조건에서 마찰상수(m)는 0.1을 사용하였다. 또한 소재의 탄성거동을 배제한 강소성 유한요소법으로 해석을 수행하였으며 이에대한 수식화 및 계산기법은 이미 잘 정립되어 있다 [9]. 비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙상수(penalty constant) K를 도입하면, 강소성 재료에 대한 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta u_i dS = 0$$

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} (\sigma_{ij}' \sigma_{ij}')^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, σ_{ij}' 는 편차응력, f_i 는 표면력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률 속도이다. 윗식은 유한요소 분할화 과정을 거치면 절점의 속도가 미지수인 비선형 방정식이 되며 이를 풀기 위하여 초기속도장을 가정하여 뉴우튼-랩슨(Newton-Raphson)법으로 해를 구했다. 이때 자동적인 초기속도장의 발생을 위하여 Oh [10]가 제안한 방법에 따라 재료를 선형점성재료로 취급하여 초기속도장을 구하였다.

3. 기존 성형공정

X2 스플라인은 자동차 스타터에 장착되어 시동시에 모터의 구동력을 엔진에 전달하고 시동후 엔진으로부터 역으로 전달되는 토크를 차단하여 모터를 보호해 주는 부품이다. 따라서 작동시 고속으로 회전하게 되므로 기계적 특성이 양호해야 하며 다단계 연속공정

을 거쳐 생산되므로 성형중 받게되는 심한 소성변형에 의한 결함발생 가능성이 매우 높다.

기존의 성형공정에서는 그림 1에서 보여지는 바와같이 3런(run) 7공정으로 구성되어 있다. 우선 원형봉(bar)을 적당한 크기로 자른후(cutting) 열처리 공정을 수행한다. 이를 1차 전방압출(forward extrusion)과 옆셀팅(upsetting)공정을 통하여 윤곽을 성형하게 되며, 가공경화로 인한 국부적인 응력집중을 방지하기 위하여 열처리 과정을 거치게 된다(1차 런). 그리고 두 번의 후방압출(backward extrusion)과정을 거친 후 피어싱(piercing)공정을 통해 홀을 만든다. 이 과정 역시 심한 가공경화가 발생하므로 다시 열처리를 하게 된다(2차 런). 이후 3차 런에서는 사이징(sizing) 및 후방압출 공정을 거쳐 부품을 완성하게된다(그림 2 참조). 그러나 이러한 공정은 3번의 열처리 공정을 포함하게 되므로 이로인한 생산성 저하 및 단가상승을 방지하기 위하여 새로운 공정도가 설계되었다.

새로운 공정은 2런 5공정과 2번의 열처리 공정으로 구성되어 있다(그림 1 참조). 1차 런에서 초기 소재의 컷팅 및 열처리, 전방압출, 옆셀팅, 피어싱 및 열처리 공정을 수행하며 2차 런에서는 기존 공정도의 3차런과 동일한 사이징 및 후방압출 공정을 수행하게 된다. 새로운 공정도에서는 1번의 열처리 공정 및 런, 그리고 2개의 공정수를 줄일 수 있게 되어 에너지 절감 및 생산성의 향상을 기할 수 있으며 그에따른 최종 제품의 단가를 떨어뜨릴수 있게 된다.

본 연구에서는 1차 런의 전방압출 및 옆셀팅 공정에 대한 해석을 수행하였으며 피어싱 공정과 기존공정과 내용이 동일한 2차 런은 해석 대상에서 제외시켰다.

4. 1차 공정도에 의한 유한요소 해석1

그림 3에서는 새로운 공정도에 따른 전방압출 및 옆셀팅 공정을 위한 금형의 치수 및 소재의 형상이 보여지고 있다. 전방압출 공정에서는 윗편치를 하강시켜 실린더 형상의 소재를 압출하여 후속의 피어싱 공정을 수행하기 위한 홀의 일부가 만들어지도록 설계되었다. 옆셀팅 공정 역시 편치를 하강시켜 소재의 높이를 줄이게 된다. 해석에서의 주요 관찰항목은 성형시 소재에 발생하는 가공경화 정도 및 유효 변형률 분포 그리고 성형에 소요되는 하중 등이다.

그림 4에서는 전방압출 공정에 대한 해석 결과 형상이 보여지고 있다. 초기소재는 압출되는 부위의 격자 체계를 조밀하게 구성하여 해석의 신뢰도를 높이고자 하였다. 공정이 진행되면서 심한 소성변형에 의해 격자 시스템이 파괴되어 다시 구성하는 작업(remesh)을 반복하였다. 그림 4-b에는 보다 조밀하게 재 구성된 격자를 확인할 수 있다. 이 공정에 대한 해석의 결과형상은 그림 4-c에서, 이때의 변형률 분포는 그림 5에서 보여지고 있다. 여기서 소재의 우측 상단부(A)는 가공경화를 적게 받아 열처리시에 잔류응력이 제거되지 않는 문제점이 발생하였으며 B부위에서는 심한 가공경화에 의해 소재에 비틀림 현상이 발생됨을 알 수 있었다. 또한 이때의 금형 하중은 전문가에 의해 예측된 50톤보다 현저하게 높은 110톤으로 나타났다.

그림 6에서는 옆셀팅 공정 해석의 결과형상을 보여주고 있다. 초기 소재는 앞공정의 해석 결과를 사용하였으며 원하는 형상의 결과를 얻을 수 있었다(그림 6-c 참조). 그림 7의 변형률 분포에서는 편치의 하강으로 인해 심한 소성 변형을 받았음을 알 수 있으며 이때의 하중은 전문가의 예측과 일치하는 300톤으로 나타났다.

새로운 공정을 유한요소법으로 해석한 결과 공정수와 런을 줄이는데는 성공하였으나

가공경화의 분포가 심한 편차를 나타내어 기계적 특성이 나쁘게 나타났다. 또한 전방압출 공정에서는 다이 하중이 높게 나타났으며, 이로 인해 금형의 구조적 특성상 아랫다이의 중심부위에서 좌굴 발생이 예상되는 등의 현장 전문가의 지적도 있었다. 그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전방압출되는 부위의 다이 바깥쪽 곡면 반경을 조절하여 다시 해석을 수행하게 되었다.

5. 2차 공정도에 의한 유한요소 해석

새로이 설계된 공정은 앞에서 수행된 해석에서 문제가 발생하였던 전방압출공정을 개선하여 바깥쪽의 곡면을 제거하여 전술된 여러 결함들을 방지하고자 하였다(그림 8 참조). 그림 9에서는 해석의 결과형상이 보여지고 있으며 역시 격자체계의 파괴로 인한 새로운 격자구성 작업이 수행되었다. 이때의 하중분포는 약 57톤으로 나타나 설계자의 요구와 비슷하게 나타났으며 소재에 발생한 격자의 비틀림 현상도 현저하게 감소한 것을 알 수 있었다. 그림 10에서는 옆셀팅 공정을 수행한 결과 형상을 보여주고 있으며 원하는 형상으로 성형됨을 알 수 있었다. 이때의 하중은 약 330톤으로 앞공정에 비해 조금 상승한 것을 알 수 있었으나 공정중에 큰 문제를 일으키지 않는다는 결론을 현장 전문가에 의해 얻을 수 있었다. 그러나 공정초기에 소재의 세장비가 훨씬 길어짐으로 인한 좌굴의 발생이 예측되었으며 이는 아래의 방법으로 검증되었다.

압축응력상태 하에서의 안정성 이론에 따르면 소성영역에서 원형 붕에 대한 좌굴 공식은 다음과 같다[11].

$$\frac{L}{r} = \pi \sqrt{\frac{E_t}{\sigma_{cr}}}$$

여기서, L : length of work-piece

r : radius of work-piece

E_t : tangent modulus of material

σ_{cr} : tensile strength of material

이때 $L=42.36$ mm, $r=11.1$ mm이며 $\bar{\epsilon}=0.2$ 일때 $E_t=83.6$ kgf/mm², $\sigma_{cr}=55.5$ kgf/mm²로 나타났으므로 윗식 각 항의 값은 아래와 같다.

$$\frac{L}{r} = 3.816 \leq \pi \sqrt{\frac{E_t}{\sigma_{cr}}} = 3.857$$

따라서 좌굴은 일어나지 않는 것으로 판단되었다.

6. 결과

자동차 부품의 하나인 X2 스플라인의 다단계 연속 성형공정이 공정설계 전문가에 의해 설계되었으며 이에대한 강소성 유한요소 해석이 수행되었다. 그 결과 발견된 결함들을 제거하기 위하여 새로이 공정을 설계하였으며 이에대한 유한요소 해석이 재수행되었다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

6.1 1차 공정도에 의한 유한요소 해석

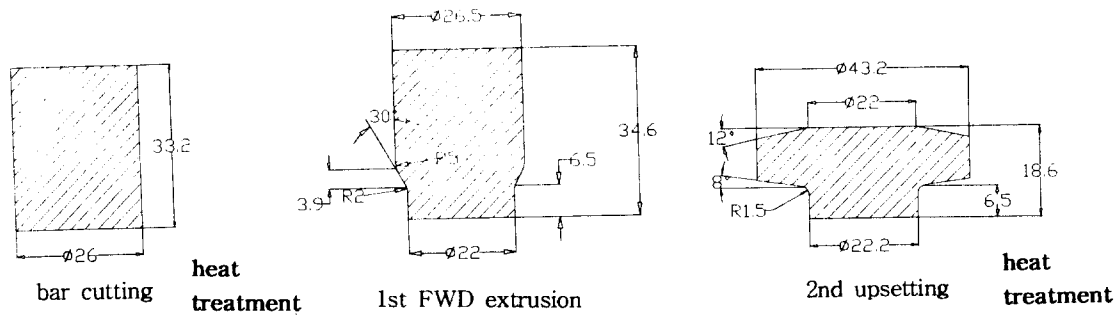
1차 공정도에 따라 전방압출 및 옆셀팅 공정에 대한 해석이 수행되었으며 심한 소성변형에 의해 격자 시스템이 파괴되어 이를 재구성하는 작업을 반복하였다. 해석의 결과 새로운 공정도에서는 공정수와 런을 줄이는데는 성공하였으나 가공경화의 분포가 심한 편차를 나타내었으며 전방압출 공정에서 다이 하중이 110톤으로 매우 높게 나타나는 문제점이 발견되었다. 이러한 결함들을 방지하기 위하여 전방압출되는 부위의 다이 바깥쪽 곡면의 반경을 제거하여 해석을 다시 수행하게 되었다. 옆셀팅 공정에서는 원하는 형상의 결과를 얻을 수 있었으며 하중은 전문가의 예측과 일치하는 300톤으로 나타났다.

6.2 2차 공정도에 의한 유한요소 해석

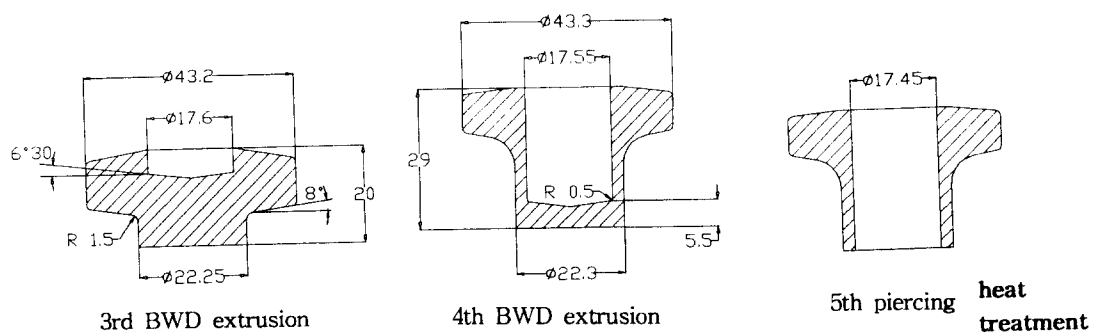
전방압출공정에서 바깥쪽의 곡면을 제거한 새로운 공정도에 따른 해석이 수행되었다. 이때의 하중분포는 약 57톤으로 나타나 설계자의 요구와 비슷하게 나타났으며 소재에 발생된 격자의 비틀림 현상도 현저하게 감소한 것을 알 수 있었다. 옆셀팅 공정에서는 원하는 형상으로 성형됨을 알 수 있었고 소재의 길이가 훨씬 길어짐으로 인한 좌굴은 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 이때의 하중은 330톤으로 나타났다.

참고문헌

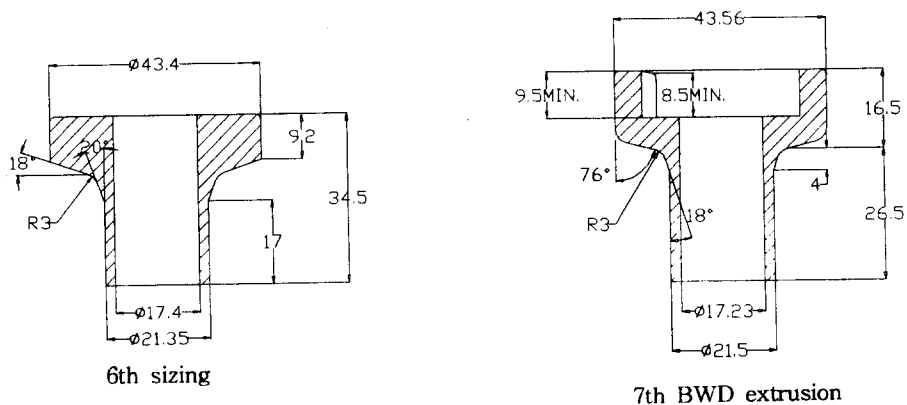
1. 강 범수, 이 진희, 변 상규 등, "유한요소법을 활용한 웨도륜의 프레스 성형공정 설계", 한국 소성가공 학회지, 제 3권, 1994.
2. S.M. Hwang and S. Kobayashi, "Preform Design in Disk Forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 3, pp. 231-243, 1986.
3. B.S. Kang, N.S. Kim and S. Kobayashi, "Computer-Aided Preform Design in Forging of airfoil Section Blade", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 30, No. 1, pp. 43-52, 1990.
4. 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.
5. B.S. Kang, J.H. Lee and Others, "Preform Design in Flashless Forging of Rib/Web-Shaped Plane-Strain Component", Accepted for publication in J. of Materials processing Tech., 1993.
6. C.R. Boër, "Process Modelling of Forming of Structural parts with Thin Ribs", Int. J. Mech. Sci., Vol. 26, No. 5, pp. 337-349, 1984.
7. 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.
8. 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.
9. S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, 1989.
10. S.I. Oh, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies", Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, pp. 479-493, 1982
11. L.M. Kachanov, "Foundations of the Theory of Plasticity", North-Holland publishing Company, pp. 396, 1971.



(a) the first run



(b) the second run



(c) the third run

Fig. 1 Schematic description of the existing forming sequence processes for forming of X2 spline



Fig. 2 Complete component from the existing forming processes

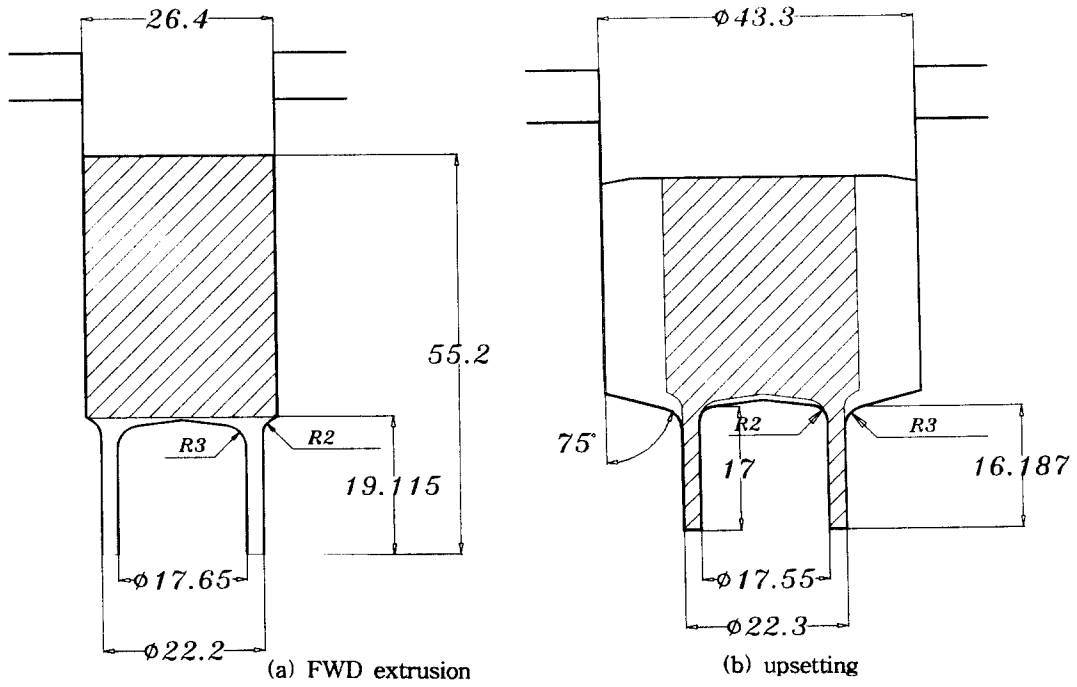


Fig. 3 Sectional configurations and dimensions of dies for X2 spline

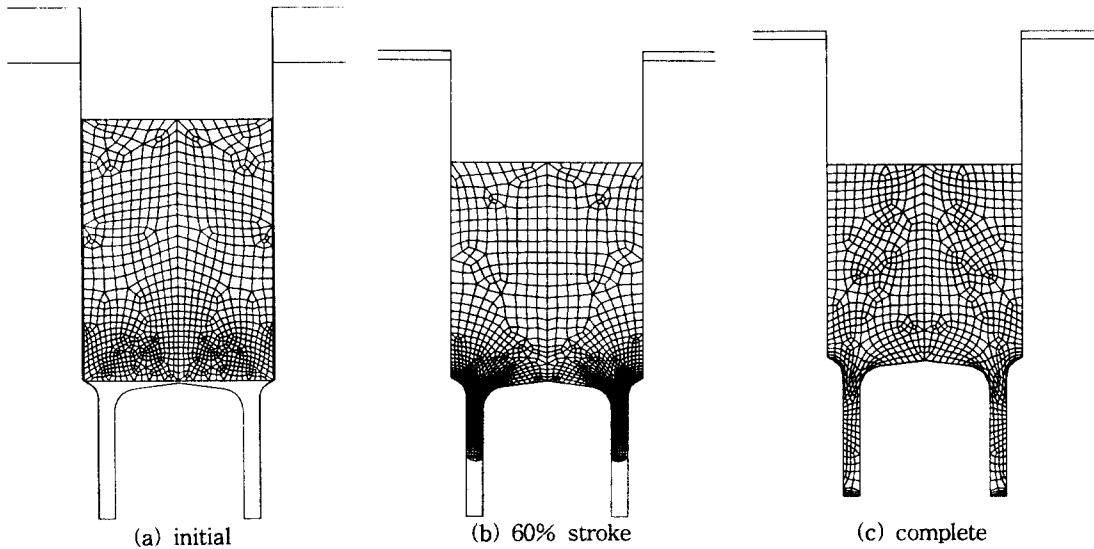


Fig. 4 Loading simulation for the forward extrusion operation according to the 1st new process design

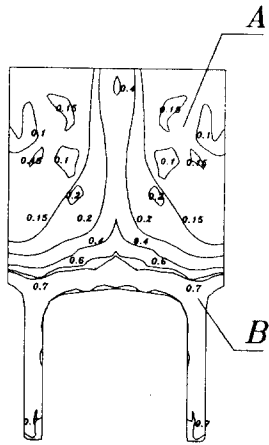
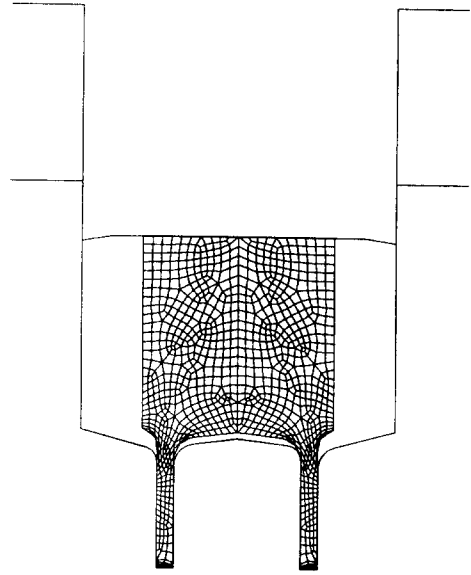
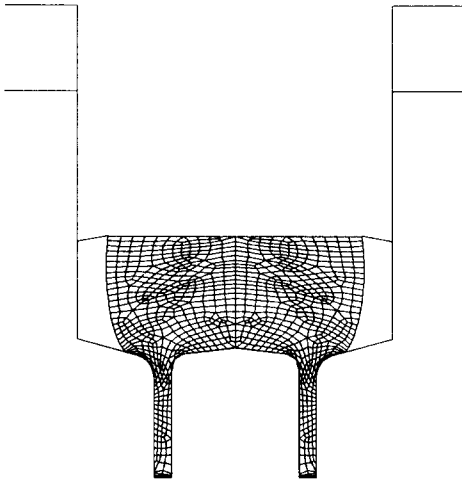


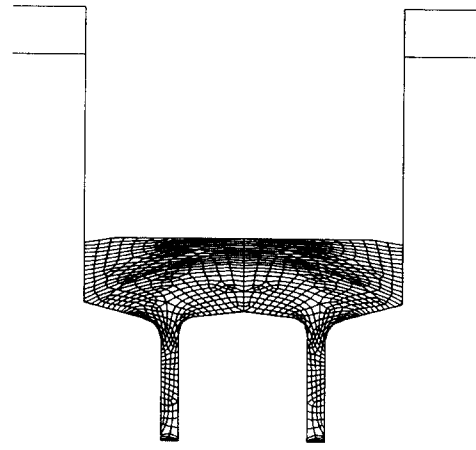
Fig. 5 Distribution of effective strain after the forward extrusion operation



(a) initial



(b) 70% stroke



(c) complete

Fig. 6 Loading simulation for the upsetting operation

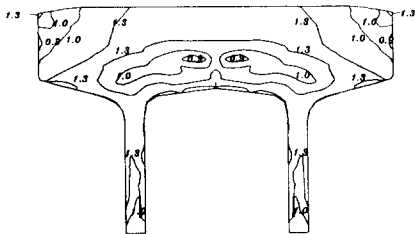
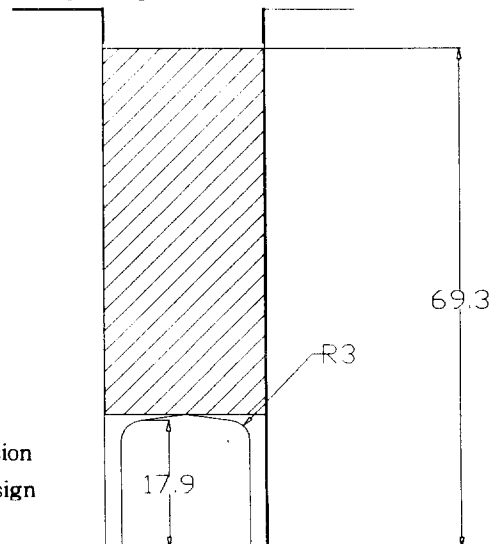


Fig. 7 Distribution of effective strain after the upsetting operation

Fig. 8 New shape of dies for the forward extrusion operation according to the 2nd process design



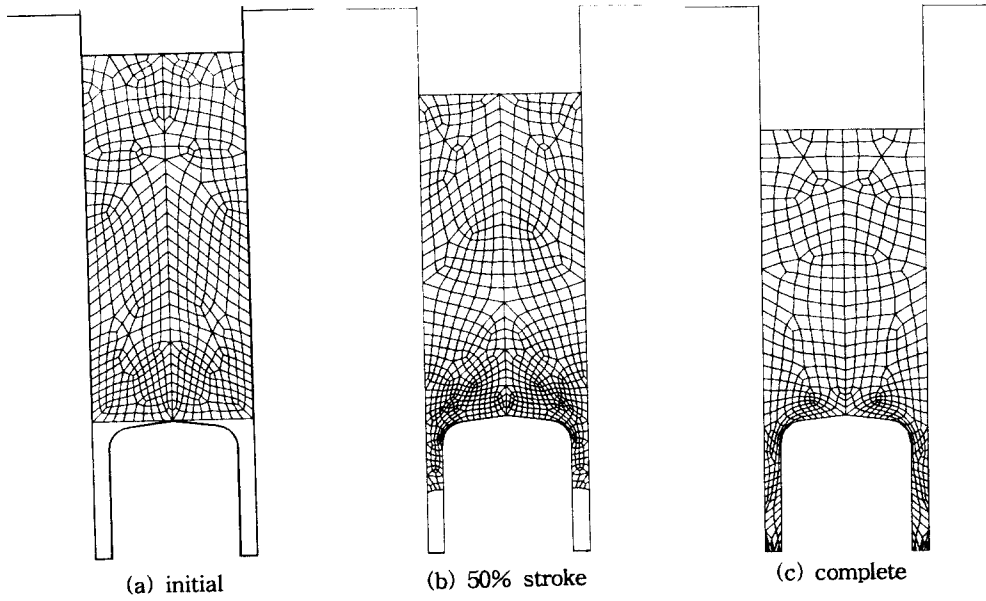


Fig. 9 Loading simulation for the forward extrusion operation according to the 2nd new process design

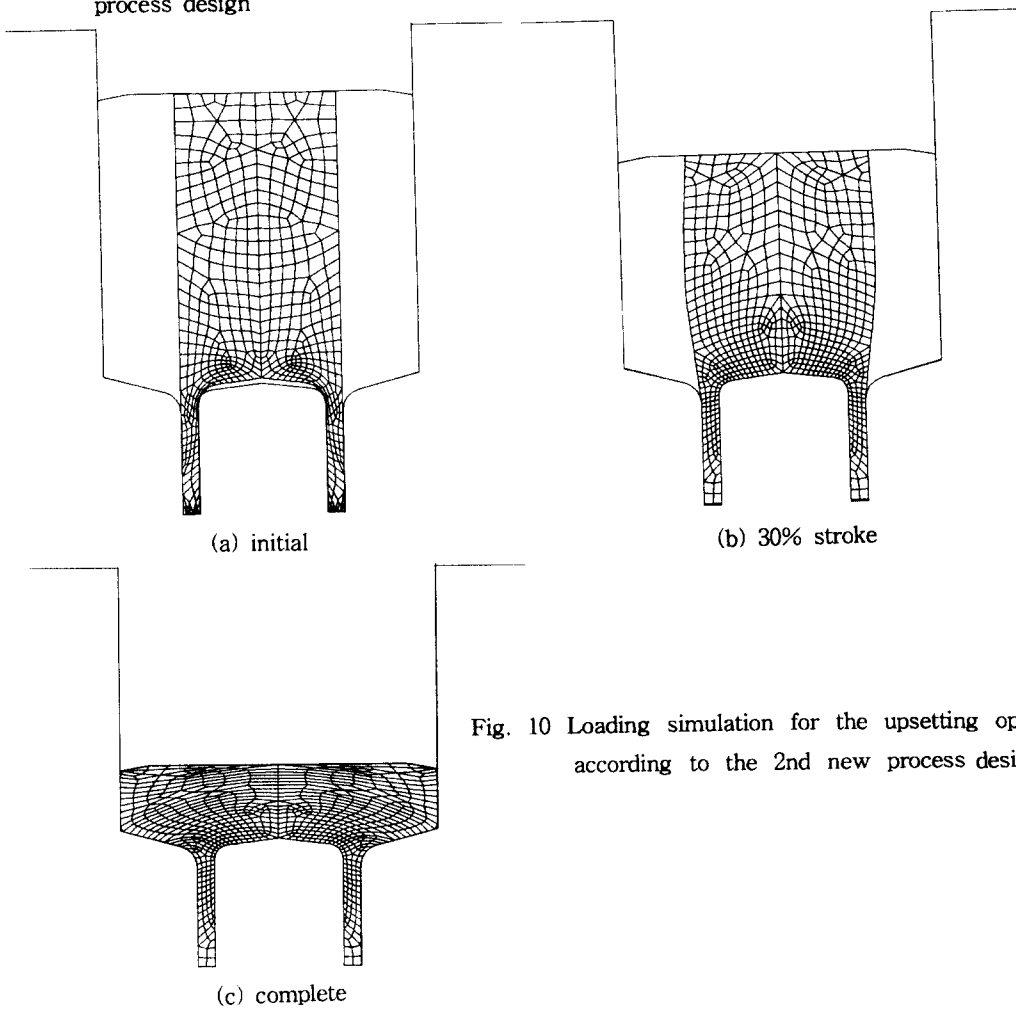


Fig. 10 Loading simulation for the upsetting operation according to the 2nd new process design