

유한요소법을 이용한 Valve-Spring Retainer의 공정해석

오 현 석, 박 성 호, 황 병 복*

인하대학교 공과대학 자동화공학과 대학원

*인하대학교 공과대학 자동화공학과

Application of F.E.M to the Forming Process of Valve-Spring Retainer

Hyun-Seok Oh, Sung-Ho Park, Beong-Bok Hwang*

Graduate Student, Department of Industrial Automation, Inha University

*Department of Industrial Automation, Inha University

ABSTRACT

A design methodology is applied for manufacturing the valve-spring retainer component. The design criterion is the forging load within the available press limit. Also, the final product should not have any geometrical defect. The rigid-plastic FEM has been applied to simulate the conventional five-stage manufacturing processes, which include mainly backward extrusion and heading process. Simulations of one step process from selected stocks to the final product shape are performed for a possibly better process than the conventional one.

Key words : *Process Design, Backward Extrusion, Heading, Rigid-Plastic FEM, valve-spring retainer*

1. 서 론

최근 국내 자동차 산업의 호황과 조선, 철강 산업 그리고 전자제품 산업의 발전에 의해 금속성형산업은 새로운 전기를 맞고 있다. 그러나, 국내의 금속성형 기술은 관련 산업의 성장과 소재산업의 발전에 힘입어 성장을 지속해 왔으나, 아직도 많은 소성가공업체에서는 시간과 비용이 많이 드는 시행착오와 간단한 해석에 의존하여 금속성형공정을 결정하고 있다¹⁾²⁾³⁾⁴⁾. 따라서, 국내의 금속성형 공정설계기술은 타 분야에 비하여 낙후되어 있다. 금형을 제작할 때 비용이 가장 많이 들기 때문에 한 번이라도 실패를 하면 제품의 가격 상승을 초래하여, 현재 가까운 일본과 기타 국가에서 많은 부품을 수입하는 형편에 있다. 일반적으로 복잡한 형상의 부품은 여러 가

지 공정이 합쳐진 다단계 공정으로 이루어져 있으므로 전통적인 방법으로 공정을 개선하기는 매우 어렵다. 경제적으로 원하는 부품을 생산하기 위하여 적절한 금형설계, 공정결정, 예비성형체 설계등이 아주 중요하다. 그러므로, 새로운 제품개발에 드는 시간소비와 최종제품의 단가를 줄이고, 최종제품의 결함방지 등을 위해서는 시행착오를 행하기 이전에 유한요소법에 의한 시뮬레이션으로 적절한 가공 공정의 선택과 가공 순서를 신속히 결정할 수 있으며, 예비 형상의 설계, 가공조건, 가공장비 등을 적절히 선택할 수 있다⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾. 한편 Lange와 Du⁹⁾는 축대칭 부품들의 가공공정을 설계하는 방법을 소개하였는데, 이 방법은 완성된 부품의 형상에서 비교적 간단한 초기의 형상을 유추해 내는 것이다. 이것은 Knowledge-based 방식으로서 고전적 의미의 컴퓨터 원용설계라 할 수 있다. 또 다른 공정설계의 예로서 Al-Sened¹⁰⁾등은 헤드포밍공정을 유한요소법으로 해석하여 4개의 가공단계에 대한 최적의 형상과 치수를 구하였다. Kang¹¹⁾은 같은 공정을 유한요소법에 의한 후방추적기법을 이용하여 좌굴과 표면균열 등이 없는 2단계의 성형공정을 제안하였다. 그리고 3차원의 복잡한 형상을 가진 가공물에 대한 예비성형체의 설계에서는 유한요소법을 이용한 전방 및 후방추적기법이 많이 사용되었다¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾.

자동차부품중의 하나인 valve-spring retainer는 자동차엔진의 밸브에 반드시 들어가는 부품으로 수요가 아주 많고, 밸브스프링을 밸브스템(valve stem)으로부터 일정한 거리를 유지하게 하며, 밸브스템(valve stem)의 가이드 역할을 한다. 그리고 스프링의 위 부분을 보호하여 깨끗하게 유지해 주고, 스프링의 좌우 요동을 줄여 준다. 따라서, 밸브스템(valve stem)이 들어가는 valve-spring retainer의 가이드 내면과 스프링이 걸릴 수 있는 단이 해석할 때 가장 중요하게 고려해야 할 점이다.

본 연구에서는 5단계로 생산되어진 기존의 valve-spring retainer를 해석하고, 이를 토대로 기존공정의 5단계를 1단계로 줄인 새로운 공정을 시도하여 보았다.

2. 강소성 유한요소해석

소성가공 문제에 유한요소법을 적용할 때는 지배적인 변형형태에 따라 탄소성 유한요소법(elastic-plastic finite element method)과 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)의 두 가지로 구별하여 적용한다. 박판의 성형과 같이 굽힘에 의한 변형이 지배적인 가공에서는 탄성변형을 무시할 수 없으며 변형 후에 스프링백과 잔류응력 등을 알아보기 위해서는 탄소성 유한요소법을 사용¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾하여야 하나 본 논문의 Valve-Spring Retainer의 성형과정에서는 탄성변형의 양이 소성변형에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작고 압출이 주된 작업공정이기 때문에 시뮬레이션의 효율을 높이기 위하여 강소성 유한요소법을 사용한다¹⁸⁾¹⁹⁾.

◎ 강소성 유한요소법의 지배방정식

강소성 유한요소법에서는 다음과 같은 지배방정식들이 사용된다²⁰⁾²¹⁾²²⁾.

(i) 평형방정식 :

$$\sigma_{ij, j} = 0 \quad (1)$$

(ii) 항복식, $f(\sigma_{ij}) = C$:

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{1/2} \quad (2)$$

(iii) 구성방정식 :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \lambda = \frac{3}{2} \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (3)$$

(iv) 적합방정식 :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4)$$

(v) 유동응력식 :

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}) \quad (5)$$

여기서 $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률로서 다음과 같이 표현한다.

$$\bar{\epsilon} = \left(\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij} \right)^{1/2} \quad (6)$$

(vi) 경계조건 :

$$\begin{aligned} v_i &= \bar{v}_i \quad \text{on } S_u, \\ \sigma_{ij} n_j &= \bar{t}_i \quad \text{on } S_F, \\ S &= S_U + S_F \end{aligned} \quad (7)$$

일반적으로 6개의 응력요소와 3개의 속도요소등 총 9개의 미지수가 있으며 지배방정식으로는 3개의 평형식과 1개의 항복식 그리고 5개의 독립적인 응력-변형율식이 사용된다.

3. 기존공정의 해석

자동차 부품중의 하나인 valve-spring retainer는 1008 강철로 만들어지고, 해석에 사용된 재료의 유동응력과 변형률의 관계식은 다음과 같다²³⁾.

$$\bar{\sigma} = 423.9 \bar{\epsilon}^{0.24} [MPa] \quad (8)$$

그리고, 재료와 다이 사이의 윤활상태는 75%로 가정하고, 마찰계수를 0.2로 하였다²⁴⁾.

Fig.1과 같이 처음에 지름 0.56(in), 길이 0.75(in)의 빌렛으로 만들어졌으나, 이 크기의 빌렛으로 크랙없이 생산하기 위해서는 비용이 많이 드는 냉간 해당작업이 필요하다. 빌렛의 크기를 지름 0.75(in), 길이 0.56(in)으로 바꾸어주면 해당비율을 줄일 수 있어, 결함이 없는 제품을 경제적으로 제작할 수 있다. 그러나, 여전히 공정수가 5단계로써 많은 편에 속하고, 시간이 많이 소요되며, 피어싱으로 버려지는 재료의 양이 많다. 그리고 공정의 3단계에서는 모서리 부분을 채우기가 매우 어렵고, 공정의 4단계에서는 피어싱을 해야 하는데 이것은 아주 많은 시간을 요할 뿐만 아니라, 제품에 결함을 일으킬 수 있다.

Fig. 2와 같이 빌렛에 단순히 구멍을 내거나, 기존에 나와있는 파이프를 쓸 수 있다. 그러면, 기존의 방법과 같이 제품공정 중간단계에서 시간이 많이 필요하고, 제품의 질에 결함을 줄 수 있는 피어싱을 하지 않기 때문에, 질 향상뿐만 아니라 공정수도 줄여 생산시간의 단축 효과를 볼 수 있다. 무엇보다도 금형의 수가 기존의 방법으로는 8개인데, 시도된 새로운 공정으로는 2개이므로 금형의 비용이 적게 들고, 금형의 모양 또한 기존보다 훨씬 간단하여 제작하기 매우 쉽다. 그리고, 기존의 방법에서는 피어싱으로 재료의 버리는 양이 많으나, 단 공정으로 하게 되면 버려지는 재료의 양은 거의 없게 된다.

Fig. 3은 기존공정 5단계중 첫 공정의 해석결과를 나타낸다. 초기 빌렛을 평면 다이에 올려놓고, 약간 블록하게 각진 다이로 인텐테이션을 하는 작업이다. 변형양은 빌렛의 내부로 갈수록 심하고, 위 다이의 각진 부분에서 최고변형양이 나타난다. 최대 편치하중은 0.36(tonf)이고, 행정거리는 1.07(mm)이다. 전반적으로 편치하중은 행정거리와 비례관계로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4는 두 번째 공정의 해석결과를 나타낸다. 첫 공정의 위 다이와 정대칭한 아랫다리로 눌러 준다. 그렇게 하면 단조비율을 줄일 수 있어 다음 공정에서 단조하기가 쉽다. 변형양은 전 단계와 마찬가지로 빌렛의 내부로 갈수록 심하고, 다이가 정대칭하므로 변형 분포도 상하 대칭이다. 최대 편치하중은 1.55(tonf)이고, 행정거리는 5.48(mm)이다. 이 공정에서도 편치하중과 행정거리는 비례관계임을 알 수 있다. 여기서 주의할 것은 지름을 24.64(mm)에 맞추어야 한다. 그러면 다음 단계에서 윗다이에 꼭 끼기 때문에 센터링이 해결되나, 만약에 그 치수보다 크면 재료에 벤딩이 심하게 일어나 균열이 일어날 수 있고 작으면 센터링이 잘 되지 않는다.

Fig. 5는 세 번째 공정의 해석결과를 나타낸다. 빌렛의 유동이 위쪽과 양 옆으로 동시에 일어나, 위와 옆의 단을 넘어가 빈 공간을 다 채우기는 매우 어렵다. 뿐만 아니라 편치하중은 전체 공정중 이 공정에서 최대가 걸린다. 최대 편치하중은 253.38(tonf)이고 행정거리는 8.6(mm)이다. 편치하중은 전반적으로 일정하게 증가하고, 10(tonf)이하이다. 그러나, 밀폐형 단조이기 때문에 끝 부분에서는 편치하중이 아주 심하게 증가함을 알 수 있다. 변형은 전반적으로 고르게 일어났으나, 변형이 심

한 곳은 대부분이 모서리이다. 이 단계에서는 가장 끝단의 외경을 34.04(mm)에 맞추고, 플랜지 안쪽의 내경을 20.32(mm)로 맞추어야 한다.

Fig. 6은 네 번째 공정의 해석결과를 보여주고 있다. 이 공정에서는 피어싱을 하면서 가운데 단의 외경을 24.9(mm)로 맞추고 각의 모서리를 더 예리하게 만드는 작업을 한다. 그리고 내경이 9.9(mm)가 되게 피어싱을 한다. 변형이 가장 심한 곳은 외측 상단의 모서리부분에서 일어났다. 한 번에 피어싱을 할 수 없는 두께이므로 많은 시간이 필요한 공정이다.

Fig. 7은 마지막 공정의 해석결과를 보여주고 있다. 피어싱한 제품의 내면에 7°의 경사각을 주고 valve-spring retainer의 전체 높이를 14.6(mm)로 맞춘다. 최대 펀치하중은 107.89(tonf)이고, 행정거리는 7.43(mm)이다. 이 공정은 세 번째 공정과 마찬가지로 밀폐형 단조이기 때문에 행정의 끝 부분에서만 심하게 증가하고, 그 전에는 거의 일정하고, 펀치하중도 작다. 변형은 전 단계와 비슷하나, 외측 상단의 모서리부분에서 주요 변형이 일어남을 알 수 있다.

4. 단공정 해석

Fig. 8과 같이 초기 빌렛을 파이프를 사용하거나 아니면, 봉에 알맞은 구멍을 내주어, 그림과 같은 방법으로 한 공정에 시도를 해 보았다. 처음에는 개방형 다이를 사용하였으나, 자유면에 결함이 생길 수 있을 가능성이 있어 지금과 같이 밀폐형 다이를 사용하였다. 주요 변형은 다이 모서리부분에서 일어났고, 변형이 가장 심한 곳은 빌렛이 다이를 타고 올라가는 외측상단에서 일어났다. 그리고 다이 내측 각진 부분에서 전단이 일어나 변형이 심하게 일어났다. 최대 펀치하중은 106.48(tonf)이고, 행정거리는 4.59(mm)이다. 하중-행정 곡선을 보면 A점 전에는 빌렛의 내경 상단이 자유롭게 유동을 하였으나, A점을 지나서부터 위 다이와 접하게 되어 하중이 기하급수적으로 증가한다. 그리고 B점에 도달했을 때는 빌렛의 외측이 거의 다이와 다 접촉을 하여 밀폐형 단조처럼 하중이 증가하나, 위 다이의 두 번째 단을 지나가면서 많은 폭으로 떨어졌다. 그리고 다시 행정의 끝 부분에서 하중이 큰 폭으로 증가하였다.

Fig. 9는 다이 내측의 각진 부분을 곡선으로 바꿔주어 시뮬레이션을 해 본 결과를 나타내고 있다. 주요 변형은 전 그림과 같이 모서리부분과 다이 외측상단에서 심하게 일어났으나, 다이 내측에는 전단이 일어나지 않아서 변형이 적게 일어났다. 최대 펀치하중은 108.89(tonf)이고, 행정거리는 4.85(mm)이다. 하중-행정 곡선을 보면 A점 전에는 빌렛의 내경 상단이 자유롭게 유동을 하여 하중이 적은 폭으로 일정하게 증가하였으나, A점을 지나서부터 위 다이와 접하게 되어 하중이 큰 폭으로 B점까지 증가하였다. 그러나, 다이 내측이 각졌을 때와 비교하면 하중이 반 이하로 줄어들었다. 그리고 행정의 끝 부분에서 하중이 큰 폭으로 다시 증가하였다.

5. 결 론

시뮬레이션을 통하여 기존의 제작공정을 해석하였고, 기존의 생산방법보다 더 나은 방법으로 부품을 생산할 수 있도록 하기 위해, 새로운 제작공정을 유한요소법을 이용한 시뮬레이션으로 시도하여 보았다. 새로 시도된 제작공정에 의하면 기존의 방법이 5단계 작업공정을 포함하고 있는 것과는 달리 1단계의 작업공정이며, 가공의 중간단계에서 피어싱을 하지 않기 때문에 생산시간을 줄일 수 있고, 가공품의 결함도 줄일 수 있을 것으로 예측된다. 그리고 최대 편치하중도 253.4(tonf)에서 108.9(tonf)로 줄어 들었다. 앞으로 실험을 통한 검증이 필요한 것으로 생각된다.

6. 참고 문헌

- 1 G.D. Lahoti, T.L. Subramanian and T. Altan, "Development of Computerized Mathematical Model for the Hot/Cold Nosing of Shells," Technical Report ARSCD CR-78019 to U.S. Army Research and Development Command, Sept. 1978.
- 2 Y. Mihara and W. Johnson, "Crop loss; front and back end deformation during slab and bloom rolling," Metallurgia and Metal Forming, Vol. 44,p.332, 1977.
- 3 U. Stahlberg, J-O. Soderberg and A. Wallero, "Overlap at the back and front ends in slab ingot rolling," Int. J. Mech. Sci., Vol. 23, pp.243-252, 1981.
- 4 H. Gloeckl and K. Lange, "Computer-aided design of blanks for deep drawing of irregular-shaped components," Proceedings of 11th NAMRC, p.243, 1983.
- 5 S.K. Biswas and W.A. Knight, "Computer-Aided Design of Axisymmetric Hot Forging Dies," Proc. 15th Int. MTDR Conf., p.135, 1974.
- 6 N. Akgerman and T. Altan, "Recent Developments in Computer-Aided Design of Firing Processes," SME Technical Paper, No. 72-110, April, 1972.
- 7 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, p.1, 1985.
- 8 김현영, 김중재, 김낙수, "단조하중감소를 위한 열간 형단조 해석," 대한기계학회논문집, 제17권, 제12호, pp. 2970 - 2981, 1993.
- 9 K. Lange and G. Du, "A formal approach to designing forming sequences for cold forging," Proceedings of NAMRC, p.17, 1989.
- 10 A.A.K. Al-Sened, P. Hartley, C.E.N. Sturges and G.W. Rowe, "Finite element analysis of a five stage cold heading process," J. Mech. Working Tech., Vol. 14, p.225, 1987.
- 11 B.S. Kang, "Process sequence design in a heading process," J. Materials Processing Technology, Vol. 27, p.213, 1991.
- 12 B.S. Kang, N.S. Kim and S. Kobayashi, "Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol.30 No.1, p.43, 1990.
- 13 N.S. Kim and S. Kobayashi, "Preform design in H-shaped cross sectional axisymmetric forging by the finite element method," Int. J. Mach. Tools and

- Manufacture, Vol. 30, p.243, 1990
- 14 B.S. Kang and S. Kobayashi, "Preform design in ring rolling by the three dimensional finite element method," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 31, p.139, 1991.
 15. K. Lange, M. Herrmann, P. Keck and M. Wilhelm, "Application of an elasto-plastic finite element code to the simulation of metal forming processes," J. Material Processing Technology, Vol.27, p.239, 1991.
 16. M. J. Saran, "Comparison of elastic-plastic and rigid-plastic implicit FEM simulations in sheet forming applications," J. Materials Processing Technology, Vol. 27, p. 279, 1991.
 17. J. H. Cheng and N. Kikuchi, "An analysis of metal forming processes using large deformation elastic plastic formulations," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 49, p. 71, 1985.
 18. C. H. Lee and S. Kobayashi, "New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 95, p. 865, 1973.
 19. S. Kobayashi and J. H. Kim, "Deformation analysis of axisymmetric sheet metal forming processes by the rigid-plastic finite element method," Mechanics of Sheet Metal Forming, edited by Koistinen and Wang, Plenum, New York, p. 341, 1978.
 - 20 S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, "Metal Forming and the Finite Element Method," Oxford University Press, 1989.
 - 21 N.S. Kim, Computer-Aided Preform Design in Metal Forming by the Finite Element Method, Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, 1989.
 - 22 C. Hung, The Process Design of Three-Dimensional Open-Die Forging and the Deformation Analysis of Metal Matrix Composites, Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, 1990.
 - 23 J. Datsko, Materials in Design and Manufacturing, Malloy Inc., Ann Arbor, Michigan, 1977.
 - 24 이동녕, "소성가공학", 문운당, p.128, 1994

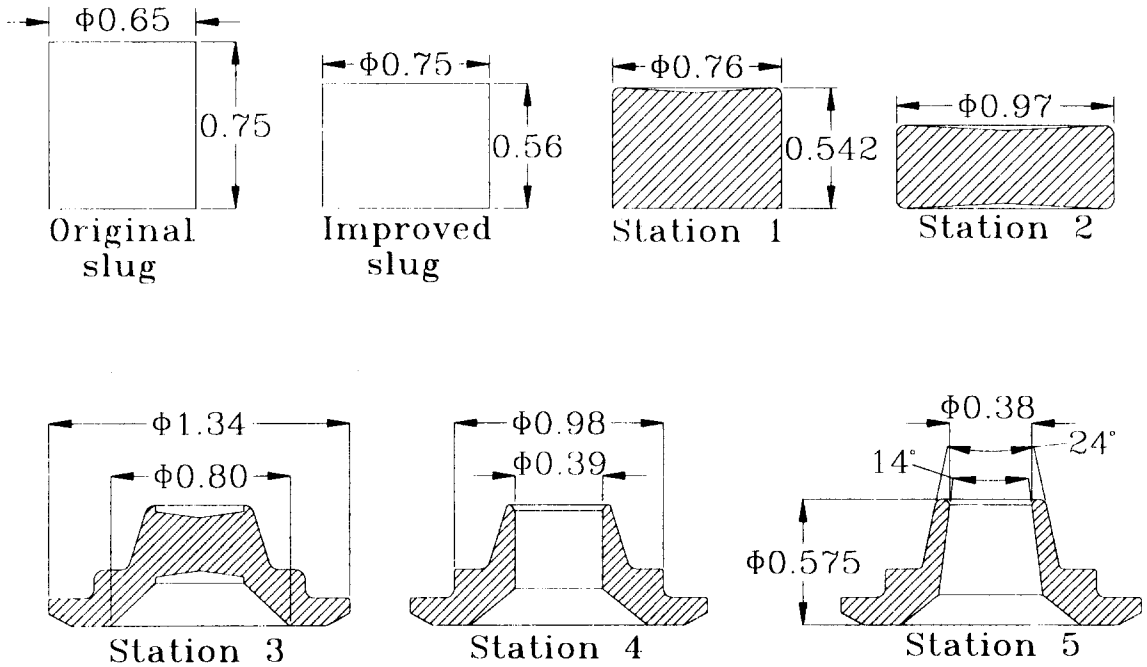


Fig. 1 Production of a valve-spring retainer in five operations.

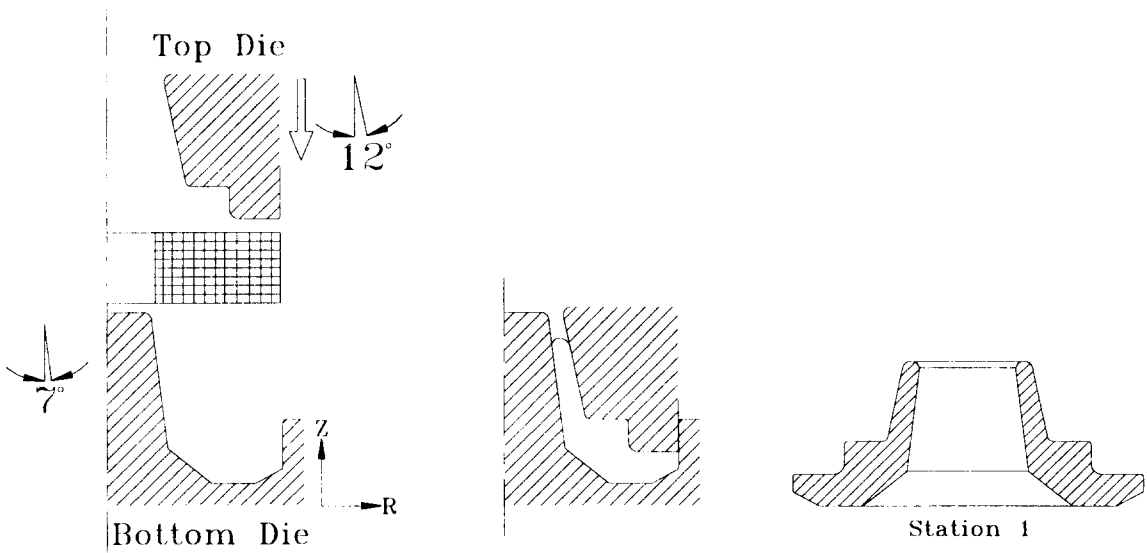


Fig. 2 A possible one-step forging process.

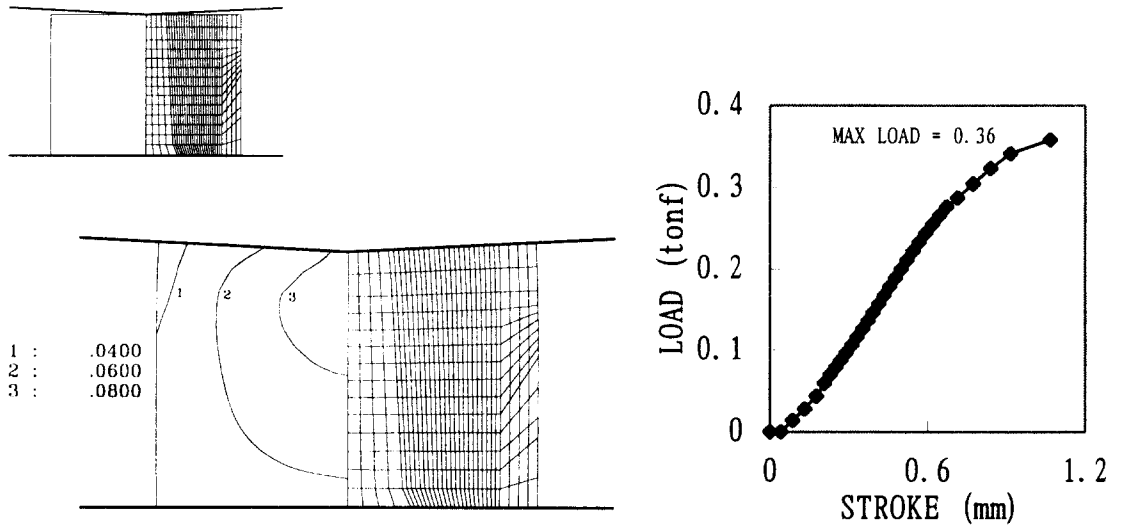


Fig. 3 Deformation patterns and load-stroke relationships for the first step operation.

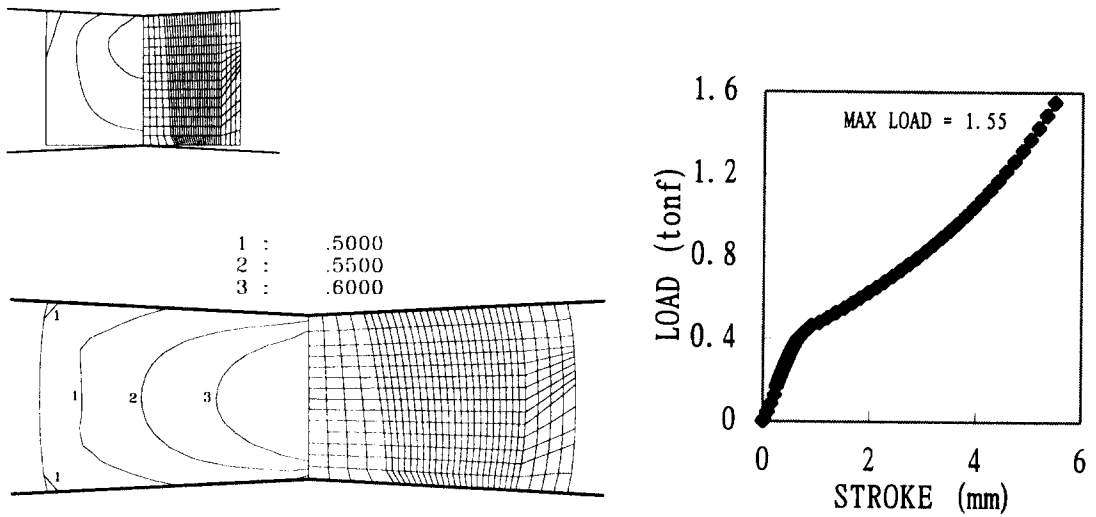


Fig. 4 Deformation patterns and load-stroke relationships for the second step operation.

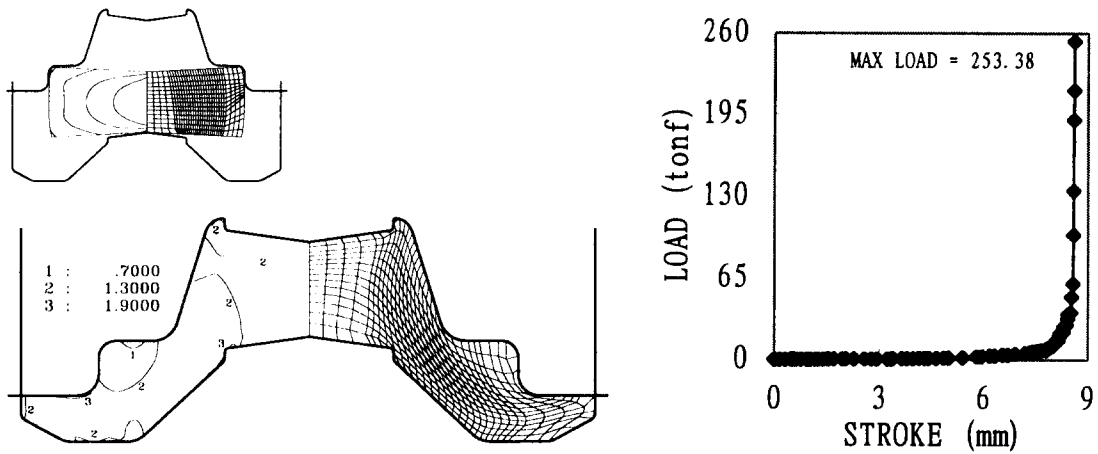


Fig. 5 Deformation patterns and load-stroke relationships for third step operation.

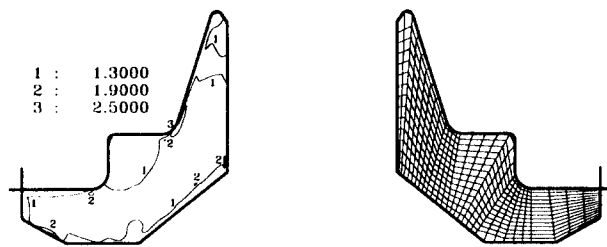


Fig. 6 Deformation patterns for the fourth step operation.

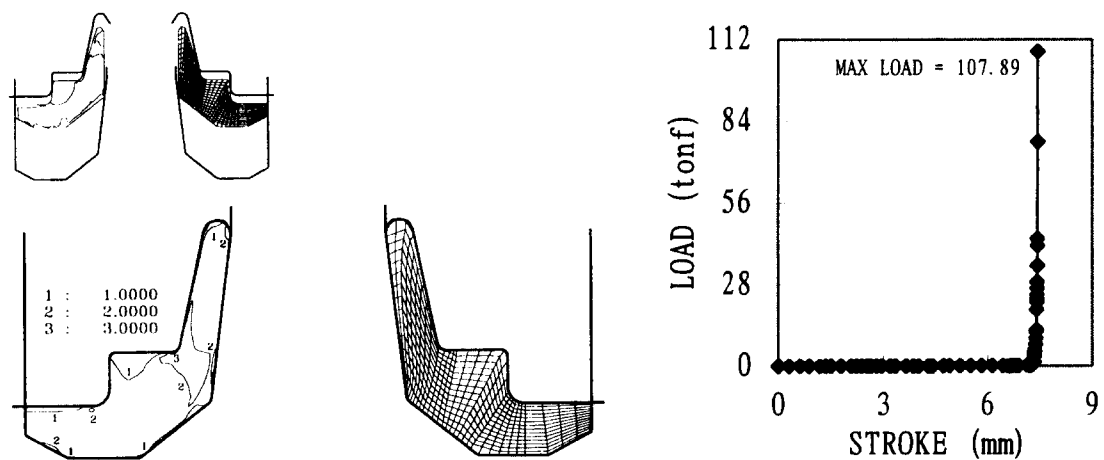


Fig. 7 Deformation patterns and load-stroke relationships for the final step operation.

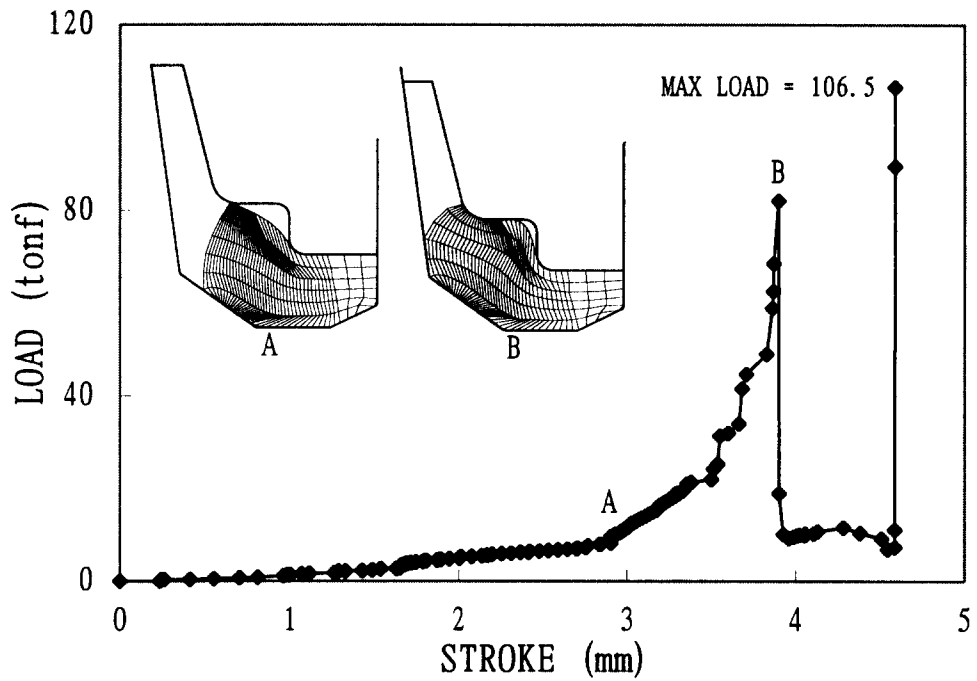
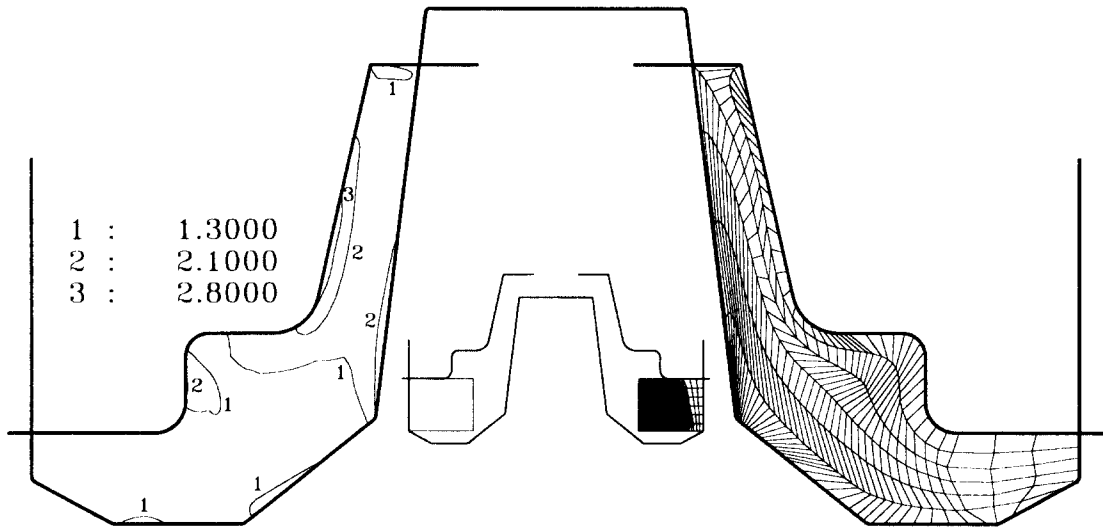


Fig. 8 Deformation patterns and load-stroke relationships for one-step forging process(slanting surface).

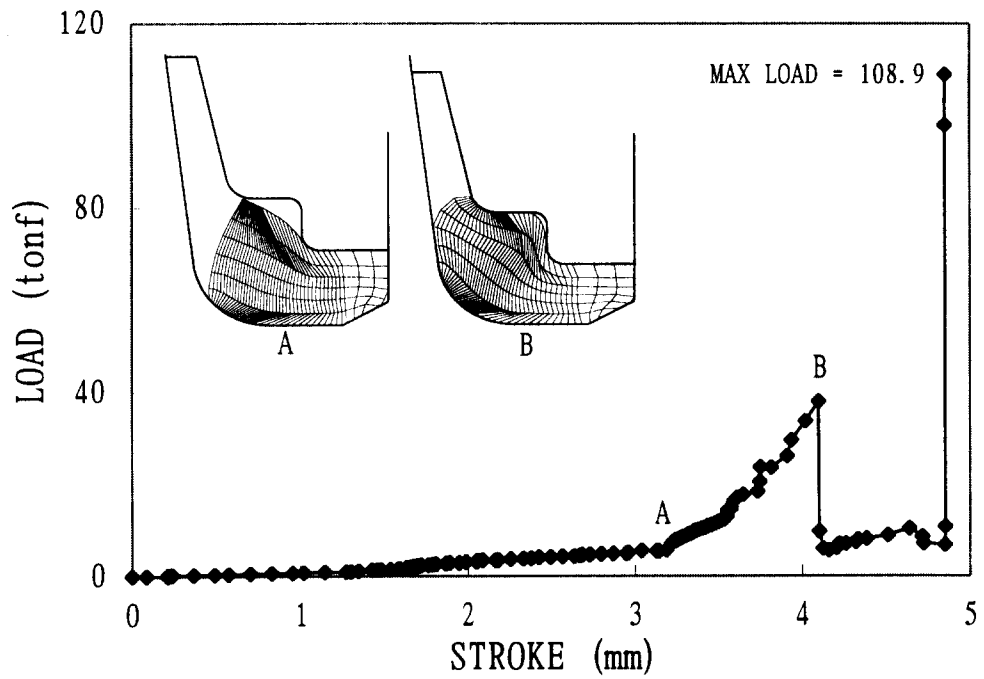
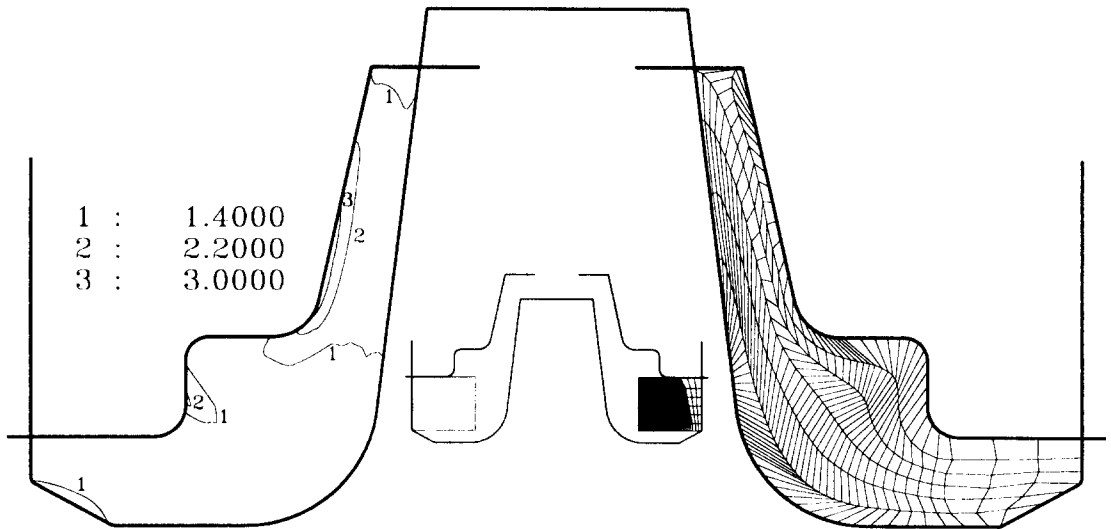


Fig. 9 Deformation patterns and load-stroke relationships for one-step forging process(curved surface).