

유한요소법을 이용한 disk-brake piston의 공정설계

황 병 북, 이 호 용*

인하대학교 공과대학 자동화공학과

*동국대학교 공과대학 기계공학과

Application of FEM to the Forming Process of Disk-Brake Piston

Beong-Bok Hwang, HoYong Lee*

Department of Industrial Automation, Inha University

*Department of Mechanical Engineering, Dongguk University

ABSTRACT

A design methodology is applied for manufacturing a disk-brake piston component. The design criteria are the limit drawing ratio and 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 four stage manufacturing processes, which include deep drawing and forging process. Simulation of one stage process from a selected stock to the final product shape is performed for generating information on additional requirements for metal flow. Two stage forming processes with different punch corner and nose geometries are also simulated to identify the possible best solutions. Finally, the best manufacturing process is selected, which is using a hemispherical punch in the deep drawing process.

Key words : Process Design, Deep Drawing, Forging, Rigid-Plastic FEM, disk-brake piston

1. 서 론

소성가공에서의 공정설계는 원하는 부품 형상을 가장 경제적으로 생산할 수 있는 방법을 찾는 데 그 목적이 있다. 이를 위하여 적절한 가공공정의 선택과 가공 순서의 결정, 예비 형상의 설계, 가공 조건의 결정 및 가공 장비의 선정 등이 공정 설계에서 고려되어야 한다. 디프드로잉, 인발, 압출, 박판성형, 단조 등 대부분의 소성가공에서 공정의 수를 줄여서 생산성을 높일 수 있는 공정설계가 절실히 필요하나 아직까지 기술자의 경험이나 실험, 또는 간단한 해석에 의존하고 있는 실정

이다.^[1-4] 이와같은 방법들은 다양한 소재와 형상을 가지는 여러가지 소성가공공정에 적용하기에는 한계가 있으며 많은 시행착오와 시간낭비가 따르게 된다.

최근들어 유한요소법을 이용하여 단조부품에 대한 예비성형체 설계와 공정설계에 관한 연구가 있었다.^[5-8] 또 Lange와 Du^[9]는 축대칭 부품들의 가공공정을 설계하는 방법을 소개하였다. 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-Sened^[10] 등은 헤드포밍공정을 유한요소법으로 해석하여 4개의 가공단계에 대한 최적의 형상과 치수를 구하였다. Kang^[11]은 같은 공정을 유한요소법에 의한 후방추적기법을 이용하여 좌굴과 표면균열등이 없는 2단계의 성형공정을 제안하였다. 또 3차원의 복잡한 형상을 가진 가공물에 대한 예비성형체의 설계에서는 유한요소법을 이용한 전방 및 후방추적기법이 많이 사용되었다.^[12-14]

본 논문에서는 디프드로잉과 단조등 특성이 서로 상이한 공정들에 의하여 생산되는 가공물로서 자동차 부품인 Disk-Brake Piston에 대한 공정설계를 하였다. 강소성 유한요소법을 사용하여 기존의 4단계로 이루어진 공정에 대하여 변형률과 하중을 구하였고 공정개선을 위하여 한단계와 두단계 공정으로 대체했을 경우의 변형률과 하중에 대한 각각의 해석결과를 토대로 최적의 공정을 설계하였다. 유한요소법은 적용범위가 다양함으로서 유사한 공정설계에 응용할 수 있을뿐 아니라 신속하게 결과의 예측이 가능한 장점이 있다. 그러나 소성가공에서의 경계조건등 해석과정에서의 어려움이 있으므로 실험을 통하여 모델이 적절함을 보여야 할 것이나 실험 결과치와의 비교는 추후에 보이고자 한다.

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)으로 구별하여 적용한다. 일반적으로 박판의 성형에서와 같이 굽힘에 의한 변형이 지배적인 가공에서는 탄성변형을 무시할 수가 없으며 변형후에 스프링백과 잔류응력등을 알아보기 위해서는 탄소성 유한요소법을 사용한다.^[15-17] 하지만 대부분의 소성가공에서는 탄성변형의 양이 소성변형에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 시뮬레이션의 효율을 높이기 위하여 강소성 유한요소법을 사용한다.^[18,19] 본 연구에서도 Disk-Brake Piston의 성형과정이 후판의 디프드로잉과 단조가 주된 작업공정이기 때문에 강소성 유한요소법을 해석에 이용한다.

2.1 강소성 유한요소법의 지배방정식

강소성 유한요소법에서는 다음과 같은 지배방정식들이 사용된다.^[20-22]

(i) 평형방정식 :

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

(ii) 항복식, $f(\sigma_{ij}) = C$:

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

(iii) 구성방정식 :

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

(iv) 적합방정식 :

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

(v) 유동응력식 :

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

여기서 $\bar{\varepsilon}$ 는 유효변형률로서 다음과 같이 표현된다.

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

(vi) 경계조건 :

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

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

2.2 약형(weak form)과 이산화(discretization)

평형방정식 (1)과 경계조건 (7)을 약형으로 풀고 재료의 비압축성을 벌칙상수 k 를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon'_{ij} dV - \int_{S_F} \bar{t}_i \delta v_i dS + \int_V k \varepsilon'_{ii} \delta \varepsilon'_{kk} dV = 0 \quad (8)$$

식 (8)에서 변수를 이산화하여 수치적분이 가능한 형태로 정리하면,

$$\left[\int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} \hat{v}^T B^T D B dV + \int_V K \hat{v}^T B^T c c^T B dV - \int_{S_F} \bar{t}^T N dS \right] \delta \hat{v} = 0 \quad (9)$$

과 같이 되고 $\delta \hat{v}$ 는 임의이므로 다음과 같이 쓸수있다.

$$\Phi(\hat{v}) = F(\hat{v}) + G\hat{v} - h = 0 \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)에서의 B, D, c, N, F, G, h 등은 문헌^[21]에 잘 정리되어 있다. 연립방정식 (10)은 비선형으로서 직접반복법과 Newton-Raphson 반복법^[23]에 의해서 푼다.

2.3 해석조건

문헌^[24]에 의하면 0.25 inch 두께의 판재는 후판으로 분류되기 때문에 디프드로

잉시 블랭크홀다는 사용하지 않는다. 또한 마찰조건도 박판의 경우 Coulomb 마찰 계수를 사용하나 체적성형의 경우 마찰인자를 사용하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 두께가 0.25 inch의 판재를 재료로 사용하기 때문에 마찰인자를 해석에 적용하여 펀치의 마찰인자의 값을 0.25로 다이의 마찰인자는 0.05로 가정하였다. 이러한 가정은 일반적으로 펀치의 마찰을 크게하고 다이의 마찰을 작게하는 것이 디프드로잉 작업에 유리하기 때문이며 실제의 공정에서도 유사한 상황에서 작업이 행하여 진다.

3. 해석방법 및 결과고찰

3.1 해석방법

자동차용 부품인 Disk-Brake Piston의 성형방법은 그림 1과 같이 0.25 inch의 판재로 부터 디프드로잉, 리드로잉, 단조, 리드로잉과 포밍등의 4 단계 공정으로 되어있다. 이와 같이 4 단계의 공정이 완료된 후 기계가공을 통하여 완성품이 만들어 진다.재료는 열간 압연강인 ASTM 1008 블랭크가 사용되고 직경은 4.75 inch 이다. 또한 해석에 사용된 재료의 유동응력과 변형률의 관계식은 다음과 같다.^[25]

$$\bar{\sigma} = 70 \bar{\epsilon}^{0.24} \text{ [Ksi]} \quad (11)$$

성형전 소재의 형상과 성형후의 형상을 비교하면 제품의 생산공정으로 디프드로잉과 단조가 필수적인 공정임을 알 수 있다. 따라서 공정설계의 기준으로는 드로잉 공정에서의 한계 드로잉 비와 단조공정에서의 단조하중이고 또 성형 후 격자의 찌그러짐과 변형률 분포를 고찰함으로써 최종 형상에 결함이 없어야 한다.

3.2 기존 4 단계 공정의 해석

기존 공정에 대한 유한요소해석의 결과로서 그림 2(a)와 같이 디프드로잉과 리드로잉 후의 주변형률이 나타났다. 펀치코너 부근에서의 두께 변형률이 -0.2로서 극부적으로 두께가 얇아짐을 알 수 있으나 동공부위 형성등의 결함은 나타나지 않았다.(그림 2(b)) 그림 2(c)는 각각의 가공 단계별 펀치 행정에 따른 하중 변화를 보여 주는데 단조공정에서의 최대 하중값은 1987 klb 로서 실제공정이 분당 14 행정의 800 ton 기계 프레스에서 작업되고 있다. 공정설계에서는 제시된 제작공정이 기존의 설비로 가공할 수 있어야 함이 중요하다. 하중 800 ton은 단조공정에서 바닥면의 두께가 0.232 inch에서 0.093 inch로 변화하는데 필요한 하중이다. 펀치코너반경(P.C.R.)과 펀치노즈반경(P.N.R.)은 두께 변형률에 커다란 영향을 미치는데 제 1 단계 공정에서의 펀치코너반경은 0.5 inch이고 제 2 단계 공정에서의 펀치코너반경은 0.25 inch이며 제 1,2 단계 공정 모두 펀치 노즈는 반경이 무한대인 평면 형상이다. 또 디프드로잉 작업시 드로잉 비는 1.98 이며 블랭크 직경과 블랭크 두께의 비가 비교적 작기 때문에 블랭크홀다 없이 디프드로잉이 완료될 수 있다. 한편 단계별 공정에서의 에너지 소모량은 그림 2(d)에 나와 있으며 총 에너지 소모량은 293 kJ 이다.

3.3 단일 공정에 대한 해석

디프드로잉과 단조를 단일공정으로 하여 해석한 결과가 그림 3에 나와있다. 편

치코너 부근에서 두께 변형률이 -0.7 에 이르며 완성품에서 동공부위(검은 부분)가 형성되는 형상적 결함이 격자 지그리짐으로 관찰 되었다. 단일 공정으로 가공하기 위하여 펀치코너반경을 0.005 inch로 줄였으나 이 때문에 코너 부위에서의 국부적 두께 감소 현상이 기존의 방식에 비하여 현저히 나타나며 결국은 동공 결함이 발생하게 된다. 따라서 단일 공정으로의 가공은 불가능함을 알 수 있으며 디프드로잉과 단조의 2 단계의 공정에 대한 해석이 필요하다. 한편 단일 공정으로 가공했을 때의 드로잉비는 2.09 으로 기존 공정의 드로잉비 1.98 에 비하여 큰 차이가 없어 이것은 한계드로잉비 이내에 있다고 볼 수 있다.

3.4 최적 공정의 설계

디프드로잉과 단조작업의 2 단계에 대한 해석 결과가 그림 4와 그림 5에 나와 있다. 그림 4와 그림 5를 비교하면 펀치노즈반경은 2 inch로 같으나 펀치코너반경은 각각 0.07 inch와 1 inch이다. 그림 4의 변형률 분포를 살펴보면 바닥면의 두께 변형률은 기존 공정과 거의 비슷하나 펀치 코너 부근에서 -0.4 정도의 두께변형률이 발생하여 두께 감소가 크다. 이 영향 때문에 단조작업 후에도 코너부에서 동공 결함이 발생한다. 그림 5는 디프드로잉 공정의 펀치코너반경을 1 inch로 늘린 것에 대한 해석 결과로서 바닥 부위의 두께 감소는 그림 4에 비하여 커졌으나 펀치코너 부분의 국부적인 두께 감소 현상이 현저하게 개선되었다. 따라서 2 단계 공정인 단조 작업 후의 제품 형상에서 뚜렷한 동공 결함이 발생되지 않았다. 화살표 부위를 확대하여 보면 약간의 동공이 발생하나 이는 완성품 제작을 위한 기계 가공에서 없어지게 된다.

설계의 마지막 단계는 디프드로잉 작업시 최적의 펀치 형상을 결정하는 것이다. 이것은 펀치노즈반경과 펀치코너반경을 결정하는 것인데 앞서의 결과에 의하여 펀치코너반경이 코너부의 두께변형률에 커다란 영향을 주는 것을 알 수 있다. 펀치코너반경이 작으면 코너부에서의 두께감소가 심해져 단조 작업 후에 동공 결함이 발생했고 펀치코너반경과 펀치노즈반경이 서로 같은 반구형 형상의 펀치로 가공하면 곡률 반경 사이의 불연속점이 없고 코너 부위에서의 국부적인 변형을 감소시킬 수 있다. 이것에 대한 결과는 그림 6에 나타나 있는데 디프드로잉 작업시 바닥면에서의 두께는 기존의 공정에 비하여 많이 줄어들지만 최종 제품의 형상은 아무런 결함없이 완벽하게 성형되며 오히려 단조 작업에서의 최대 하중이 400 ton 이내로 줄어들었다. 총 에너지 소모량은 기존 4 단계 공정과 큰 차이가 없는 299 kJ로 계산되었다.

4. 결 론

디프드로잉과 단조등 4 단계 공정으로 가공되는 Disk-Brake Piston의 공정설계를 위하여 강소성 유한요소법을 이용하였다. 개선된 공정은 디프드로잉에서의 한계드로잉비와 단조하중의 제한치를 넘지 않아야 하며 특히 코너부의 두께감소로 생기는 단조후의 동공 결함이 생기지 않아야 한다. 이와같은 설계 기준에 의하여 해석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 펀치코너반경이 작아질수록 디프드로잉시 코너부에서의 두께감소가 심하게 나타났다.
- (2) 코너부에서의 현저한 두께 감소는 단조작업후 동공발생의 원인이 된다.
- (3) 기존 4 단계의 공정을 디프드로잉과 단조의 2 단계 공정으로 줄였다. 디프드

로잉 작업시 반구형 펀치의 사용으로 코너부의 두께 감소를 줄임으로서 단조후 동공 발생의 결함이 없었다. 또 바닥면의 두께감소로 단조하중이 줄어들었고 총 에너지 소모량은 기존의 공정과 비슷하였다.

참고문헌

- [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] Zienkiewicz and Taylor, The Finite Element Method, McGraw Hill, 4th ed., Vol. 2 1989.
- [24] Metals Handbook, Forming and Forging, Vol. 14, 94, American Society of Metals, 9th Edition.
- [25] J. Datsko, Materials in Design and Manufacturing, Malloy Inc., Ann Arbor, Michigan, 1977.

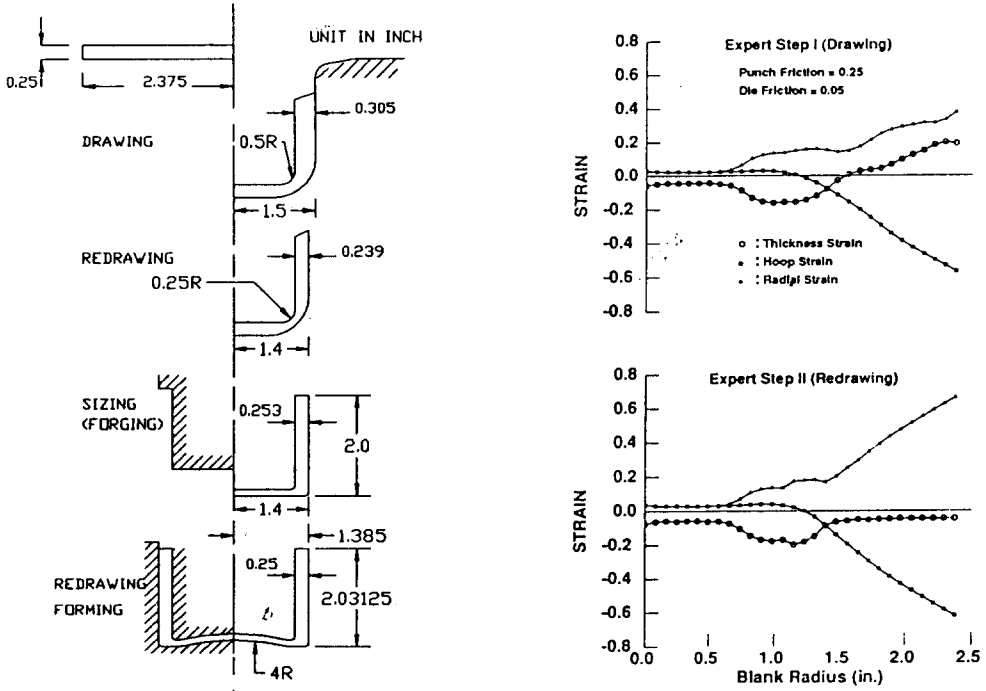
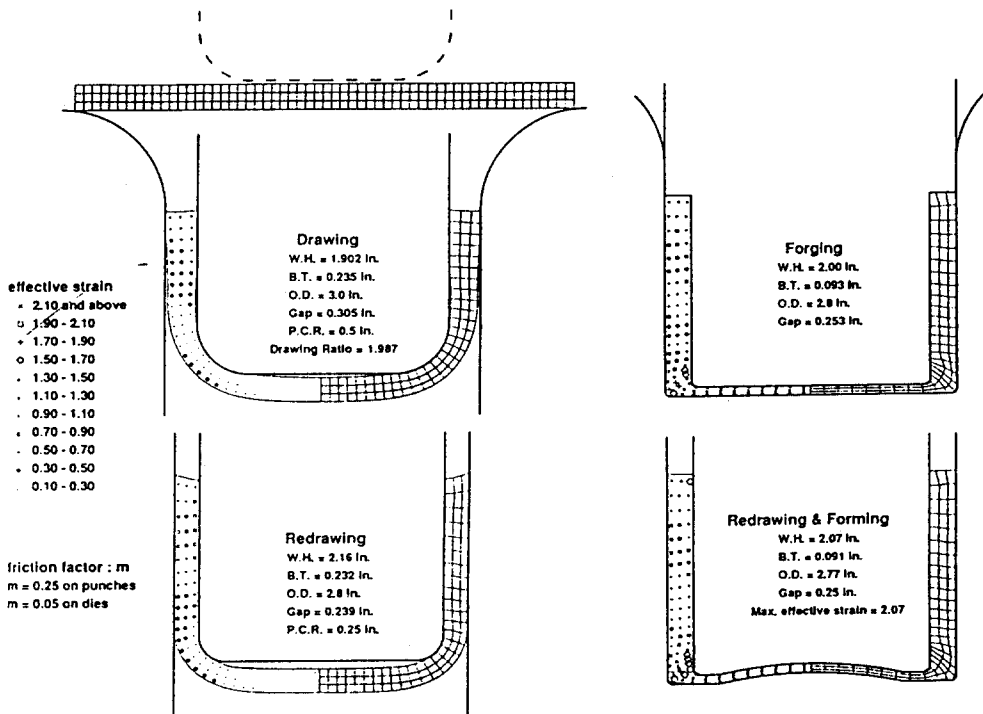


Fig. 1 An Expert solution in the production of a disk-brake piston component.

(a)



(b)

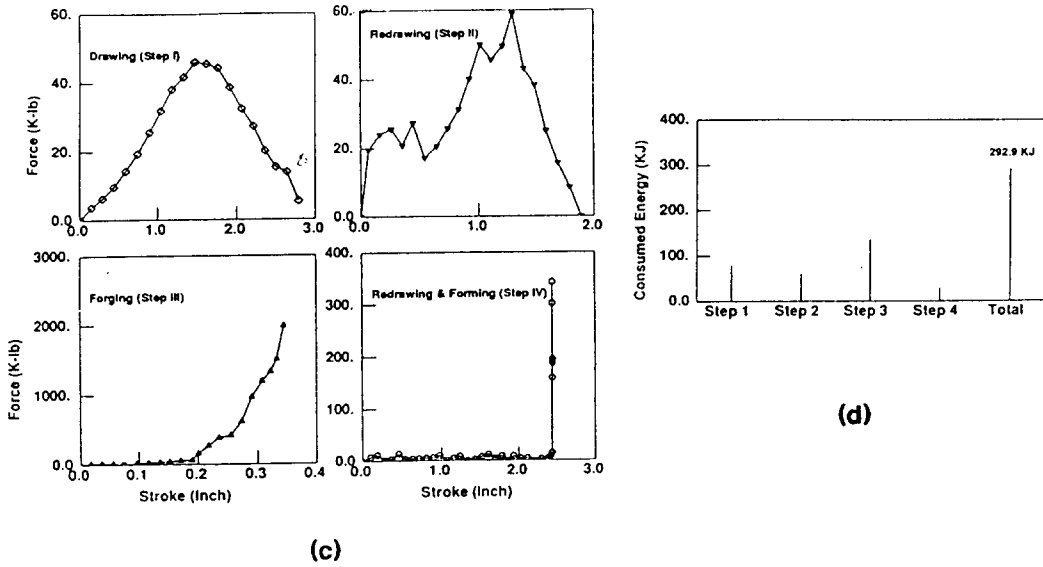


Fig. 2 Simulation results of expert solution : (a)strain distributions (b)deformation patterns (c) load-stroke relationships (d) consumed energy.

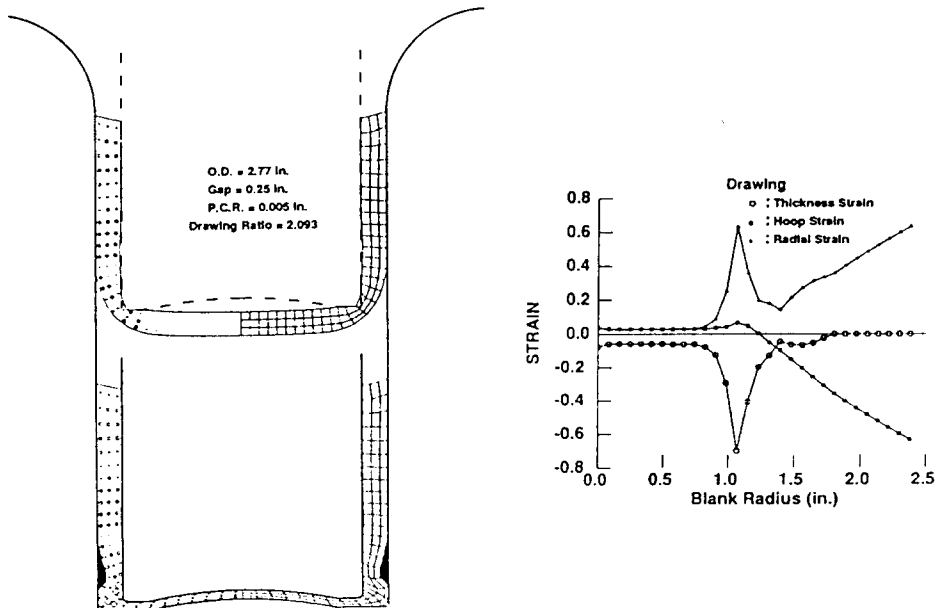


Fig. 3 Deformation patterns and strain distributions for one step operation.

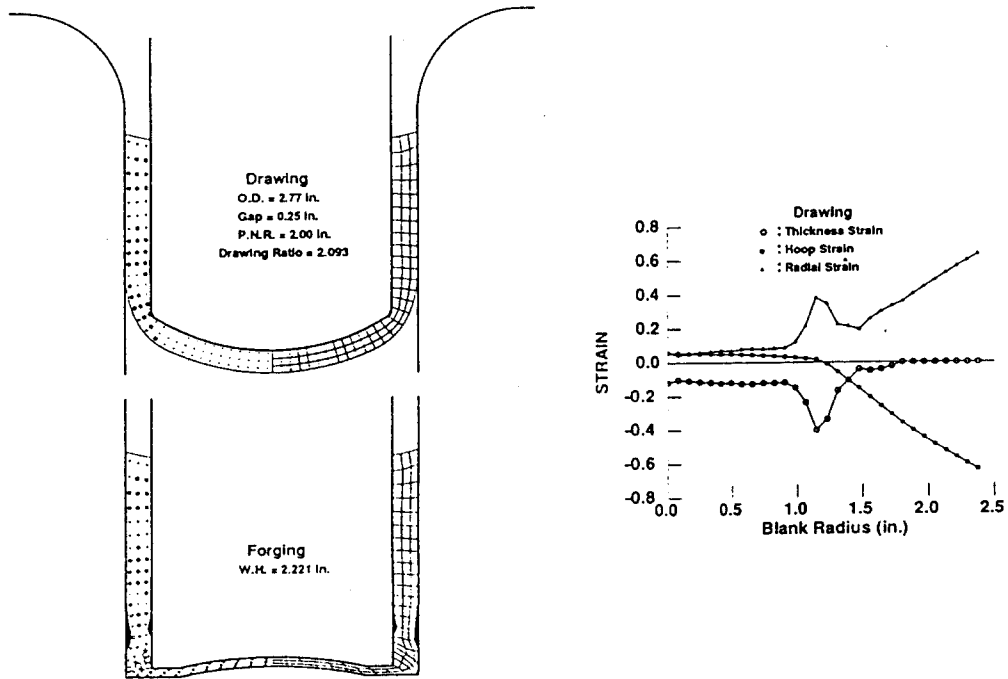


Fig. 4 Strain distributions for drawing with 2.0 inch P.N.R. and 0.07 inch P.C.R. and deformation patterns for the second operation of forging.

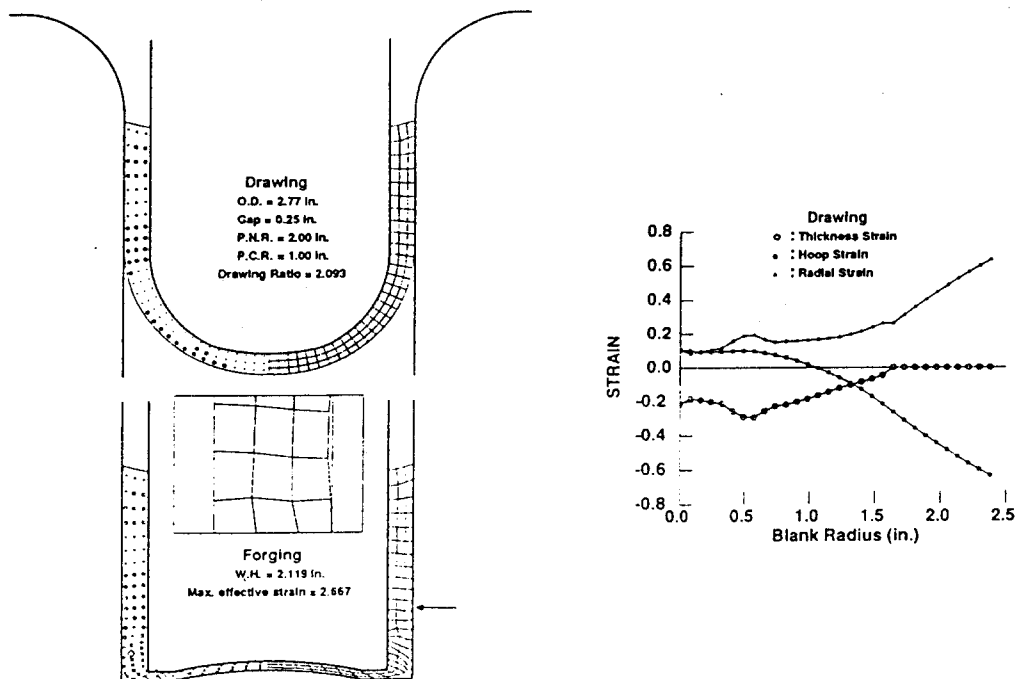


Fig. 5 Strain distributions for drawing with 2.0 inch P.N.R. and 1.0 inch P.C.R. and deformation patterns for forging.

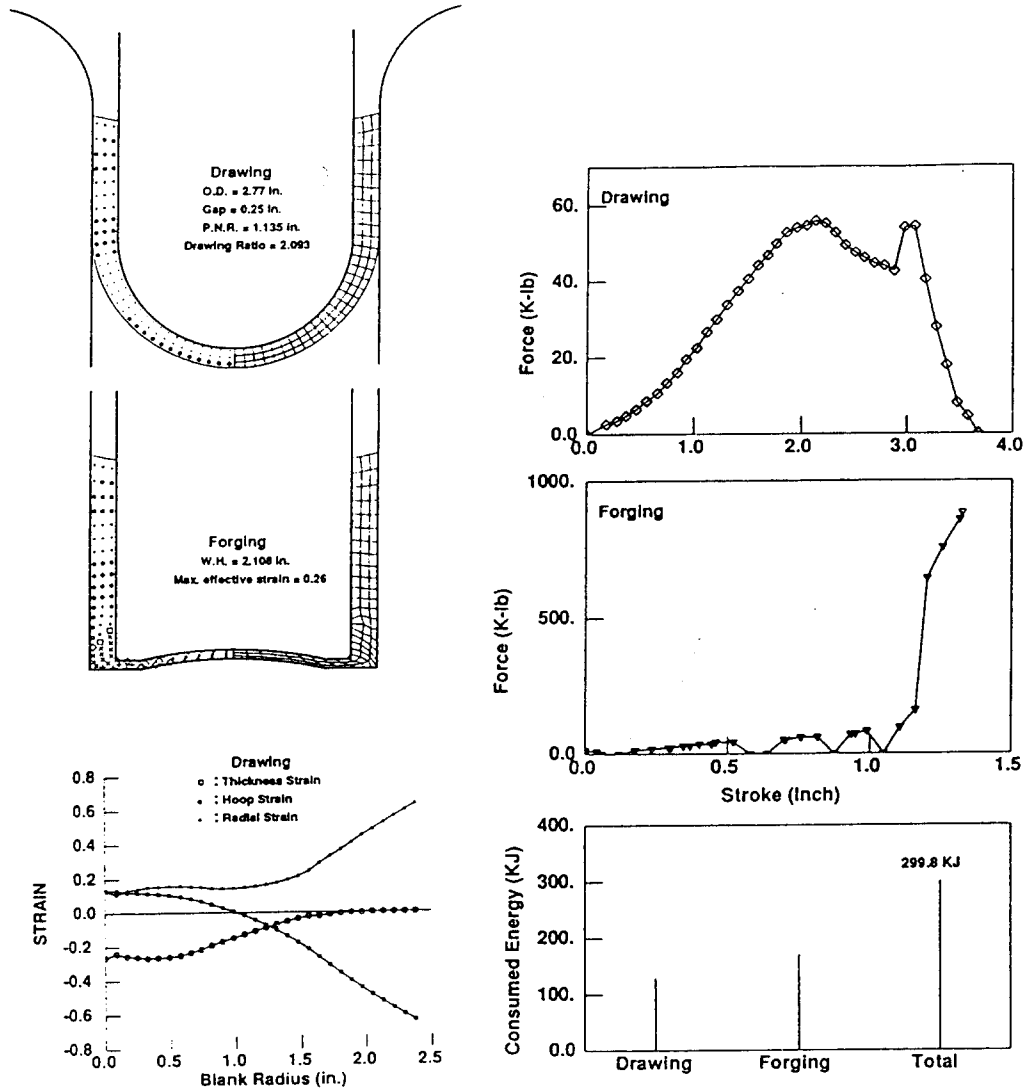


Fig. 6 Deformation patterns, strain distributions, load-stroke relationship and the consumed energy for the final process sequence design.