

## 디프드로잉이 포함된 소성가공의 공정설계에 관한 연구

황 병 복, 임 중 연\*, 이 호 용\*\*

인하대학교 공과대학 자동화공학과

\*인천과학아카데미, 생산/자동화 연구실

\*\*동국대학교 공과대학 기계공학과

### **A Study on the Process Sequence Design in Metal Forming including Deep Drawing**

Beong-Bok Hwang, Joong-Yeon Lim\*, Ho Yong Lee\*\*

Department of Industrial Automation, Inha University

\*Manufacturing/Automation Lab., Incheon Academy of Science

\*\*Department of Mechanical Engineering, Dongguk University

#### **abstract**

A design methodology is applied for manufacturing a disk-brake piston component and a washing machine container. 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 and elastic-plastic FEM have been applied to simulate both of the conventional manufacturing processes, respectively, which include deep drawing and forging process. Simulations of one stage process from a selected stock to the final product shape are performed for generating information on additional requirements for metal flow. The best manufacturing processes are selected, which is using a hemispherical punch in the deep drawing process for both disk-brake piston component and washing machine container.

#### **1. 서 론**

소성가공에서의 공정설계는 원하는 부품 형상을 가장 경제적으로 생산할 수 있는 방법을 찾는 데 그 목적이 있다. 이를 위하여 적절한 가공공정의 선택과 가공순서의 결정, 예비형상의 설계, 가공조건의 결정 및 가공장비의 선정 등이 공정설계에서 고려되어야 한다. 디프드로잉, 인발, 압출, 박판성형, 단조 등 대부분의 소성가공에서 공정의 수를 줄여서 생산성을 높일 수 있는 공정설계가 절실히 필요하다. 그러나 아직까지 기술자의 경험이나 실험, 또는 간단한 해석에 의존하고 있는 실정이다.<sup>[1-4]</sup> 이와 같은 방법들은 다양한 소재와 형상을 가지는 여러 가지 소성가공공정에 적용하기에는 한계가 있으며 많은 시행착오와 시간낭비가 따르게 된다.

본 논문에서는 디프드로잉과 단조등 특성이 서로 상이한 공정들에 의하여 생산되는 가공물로서 자동차 부품인 Disk-Brake Piston에 대한 공정설계를 하였다. 강소성 유한요소법<sup>[5]</sup>을 사용하여 기존의 4단계로 이루어진 공정에 대하여 변형률과 하중을 구하였고 공정개선을 위하여 한 단계와 두단계 공정으로 대체했을 경우의 변형률과 하중에 대한 각각의 해석결과를 토대로 최적의 공정을 설계하였다. 또한 세탁기 내조의 성형과정이<sup>[6]</sup> 판재성형에서의 기본적인 문제들을 잘 설명해 주는 전형적인 문제로 보아 공정순서 설계를 시도하였다. 시뮬레이션의 도구로는 탄소성 문제를 해석할 수 있는 유한요소법 프로그램인 ABAQUS<sup>[7]</sup>를 사용하였다. 경험에 의하여 얻어진 성형한계법칙<sup>[8]</sup>을 따라 재료의 등방성과 선형적 탄성법칙을 포함한 기존의 탄소성 유한요소이론<sup>[9]</sup>에 의한 모델을 실질적인 설계문제에 적용하였다.

유한요소법은 적용범위가 다양함으로서 유사한 공정설계에 응용할 수 있을 뿐 아니라 신속하게 결과의 예측이 가능한 장점이 있다. 이와 같이 디프드로잉을 포함한 소성가공공정의 설계 결과는 유사 공정에 응용될 수 있고 관련 제품의 생산 자동화에도 이용될 수 있다.

## 2. 유한요소 해석방법

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 변형 후에 스프링백과 잔류응력등을 알아보기 위해서는 탄소성 유한요소법을 사용한다. 하지만 대부분의 소성가공에서는 탄성변형의 양이 소성변형에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 시뮬레이션의 효율을 높이기 위하여 강소성 유한요소법을 사용한다. Disk-Brake Piston의 성형과정은 후판의 디프드로잉과 단조가 주된 작업공정이기 때문에 강소성 유한요소법을 해석에 이용한다. 또한 세탁조의 성형과정은 박판의 디프드로잉과 굽힘이 주된 작업공정이기 때문에 탄소성 유한요소법을 해석에 이용하였다.

### 2.1 Disk-Brake Piston의 해석조건

문헌<sup>[10]</sup>에 의하면 0.25 inch 두께의 판재는 후판으로 분류되기 때문에 디프드로잉시 블랭크홀다는 사용하지 않는다. 또한 마찰조건도 박판의 경우 Coulomb 마찰계수를 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 크게 하고 다이의 마찰을 작게 하는 것이 디프드로잉 작업에 유리하기 때문이며 실제의 공정에서도 유사한 상황에서 작업이 행하여진다. 재료는 열간 압연강인 ASTM 1008 블랭크가 사용되고 블랭크 직경은 4.75 inch 이다.

### 2.2 Washing Machine Container의 해석조건

세탁기용 내조는 두께가 0.048 inch인 냉간 압연된 드로잉용 AISI 1010 강재의 블랭크를 사용하여 직경 21 inch의 컵 형상으로 제작된다. 펀치, 다이, 블랭크홀더와 다이쿠션은 강체로서 모델링되었다. 블랭크홀더는 전 공정에서 일정한 접촉 하중이 작용하도록 하였고 다이쿠션은 펀치와 다이 사이의 간격이 항상 일정하게 유지되게 모델링되었다.<sup>[11]</sup> 포와송비는 0.3으로 등방성(isotropy) 이론이 적용된다.<sup>[12]</sup> 마찰은 쿨롱마찰(Coulomb friction)을 사용하고 최대 마찰응력의 크기를 제한하였다. 각각의 접촉면에서의 윤활상태를 고려하여 블랭크와 펀치 그리고 다이쿠션 사이의 마찰계수는 0.2로, 블랭크와 다이 그리고 블랭크홀더 사이의 마찰계수는 0.1로 가정한다. 기존 방법의 첫 번째 공정(엠보싱)에서 5 ksi의 압력이 블랭크홀더에 의해 가해지고 나머지 공정에서는 주름이 잡히는 것을 방지하기 위하여 10 ksi의 압력이 블랭크홀더를 통해서 소재에 가해진다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 Disk-Brake Piston

디프드로잉과 단조를 단일공정으로 하여 해석한 결과가 Fig. 1에 나와있다. 펀치코너 부근에서 두께 변형률이 -0.7에 이르며 완성품에서 동공부위(검은 부분)가 형성되는 형상적 결함이 격자 지그러짐으로 관찰되었다. 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 단계 공정에 대한 해석이 필요하다. 한편 단일 공정으로 가공했을 때의 드로잉 비는 2.09로 기존 공정의 드로잉비 1.98에 비하여 큰 차이가 없어 이것은 한계드로잉비 이내에 있다고 볼 수 있다.

기존 공정에 대한 유한요소해석의 결과로서 Fig. 2(a)와 같이 디프드로잉과 리드로잉 후의 주변형률이 나타났다. Fig. 2(b)는 각각의 가공 단계별 펀치 행정에 따른 하중 변화를 보여 주는데 단조공정에서의 최대 하중 값은 1987 klb로서 실제 공정이 분당 14 행정의 800 tonf 기계프레스에서 작업되고 있다. 펀치코너 부근에서의 두께 변형률이 -0.2로서 국부적으로 두께가 얇아짐을 알 수 있으나 동공부위 형성 등의 결함은 나타나지 않았다. (Fig. 2(c)) 하중 800 tonf는 단조공정에서 바닥 면의 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 펀치노즈는 반경이 무한대인 평면 형상이다. 또 디프드로잉 작업시 드로잉 비는 1.98 이며 블랭크 직경과 블랭크 두께의 비가 비교적 작기 때문에 블랭크홀더 없이 디프드로잉이 완료될 수 있다.

설계의 마지막 단계는 디프드로잉 작업시 최적의 펀치노즈반경과 펀치코너반경

을 결정하는 것인데 여러 가지 펀치노즈반경과 펀치코너반경을 사용하여 해석한 결과 펀치코너반경이 코너 부의 두께변형률에 커다란 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 펀치코너반경이 작으면 코너 부에서의 두께감소가 심해져 단조 작업 후에 동공 결합이 발생했고 펀치코너반경과 펀치노즈반경이 서로 같은 반구형 형상의 펀치로 가공하면 곡률 반경 사이의 불연속점이 없어 코너 부위에서의 국부적인 변형을 감소시킬 수 있다. 이것에 대한 결과는 Fig. 3에 나와 있는데 디프트로잉 작업시 바닥 면에서의 두께는 기존의 공정에 비하여 많이 줄어들지만 최종 제품의 형상은 아무런 결함없이 완벽하게 성형되며 오히려 단조 작업에서의 최대 하중이 400 ton 이내로 줄어들었다.

### 3.2 Washing Machine Container

Fig. 4의 공정순서는 기존의 3단계 공정에 의한 제작방법이다. 드로잉비 및 장비의 구성과 설계기준들이 어떤 관계인가를 개략적으로 알아보기 위하여 초기의 블랭크에서 최종 부품을 단 한번의 공정에 의해 완성하는 단 공정 작업을 시뮬레이션 하였다. 완성품의 제원으로 부터 초기 브랭크치수를 구하는 공식<sup>[13,14]</sup>을 사용하여 41 inch 직경의 블랭크를 시뮬레이션에 적용하였다. 단 공정 작업에서의 드로잉 비는 1.97이며 Fig. 5에 보이는 것처럼 펀치노즈와 펀치코너 부근에서 국부적인 두께감소가 일어난다. 이런 결함은 완성된 부품을 만들기 위해서는 단 공정으로는 제작이 불가능하다는 것을 보여준다.

기존의 제작공정은 프레스장비 전문가들이 최대 하중값 이내에서 결함없이 완성품이 제작될 수 있도록 공정을 설계한 것이다. 기존의 공정에서 첫 번째 작업인 엠보싱 공정에서 엠보싱된 부분의 두께변화는 매우 중요하여 다음 작업공정에 큰 영향을 미친다. 엠보싱 공정의 해석 결과가 Fig. 6에 나와 있다. 펀치 행정은 0.5 inch이며 두께감소가 가장 심한 곳의 두께는 0.0403 inch 이고 최대 펀치하중은 15 tonf이다.

두 번째 공정의 성형과정을 살펴보면 드로잉과 급힘이 동시에 일어남을 알 수 있으며 드로잉 비는 1.96이다. 두 번째 공정에서의 펀치 직경은 20.90 inch이며 펀치노즈 반경은 1.75 inch, 다이곡률은 0.25 inch, 펀치와 다이 사이의 간극은 0.053 inch이고 드로잉 깊이는 3 inch이다. Fig. 7에 나타난 해석 결과에서 두께 분포를 보면 드로잉된 부품의 펀치코너 부근에서 국부적인 두께감소에 의한 작은 결함이 나타나며 이것은 원소재인 블랭크의 중심에서 약 8 inch 떨어진 부위에서 발생한다. 그림의 행정-하중선도에서 나타난 바와 같이 펀치력은 전 행정에 걸쳐 점진적으로 증가하고 행정의 마지막 단계에서 최대 펀치하중은 130 tonf이다.

기존 성형방법의 마지막 작업공정은 드로잉비가 1.003인 재드로잉으로 드로잉비가 아주 작기 때문에 불필요한 공정으로 간주되기 쉬우나 제 2단계 공정이 드로잉과 급힘의 복합성형 공정이기 때문에 펀치노즈 부위의 소재에서 심한 신장을 피하여 완성된 부품을 만들기 위해 재드로잉이 필요하다. 재드로잉 공정에서 펀치직경은 20.83 inch이고 펀치노즈반경은 2.0 inch이다. 다이곡률은 0.25 inch이고 다이간극은 0.083 inch이며 드로잉 깊이는 14 inch이다. 제 3단계 공정의 시뮬레이션 결과로써 Fig. 8에 나타난 두께분포를 보면 두께감소가 가장 심한 곳은 중심부

로서 성형후의 두께는 0.029 inch이고 최대 펀치하중은 134 tonf이다. 행정-하중선도에서는 펀치가 내려감에 따라 하중이 감소하는 것을 볼 수 있으며 이러한 경향은 두 번째 공정의 행정-하중선도와는 반대되는 경향이다.

기존의 가공방법을 시뮬레이션한 결과에서 관찰할 수 있는 것은 Fig. 7에 나타난 것처럼 드로잉 하중의 최대 값은 제 2 단계 공정의 드로잉 깊이에 의해 결정되며 또한 작은 드로잉 자국(drawing mark)이 Fig. 8에서와 같이 완성품에서도 나타나며 이는 드로잉 작업시 발생한 결함은 재드로잉 작업등 부차적인 공정으로도 제거되지 않는다는 사실과도 잘 부합된다. 완성된 가공품에서 두께가 가장 얇은 곳은 0.0294 inch이고 최대 펀치하중은 134 tonf이다. 기존의 방법으로 가공한 가공품의 벽면에서의 스프링백은 약 0.08 deg.이며 무시할 수 있을 만큼 작다.

위와 같은 시뮬레이션을 통해 다음의 세 가지를 관찰하였다. 첫째, 가공품의 중심부와 곡률진 부분은 두께 감소가 크며 둘째, 단 공정 작업으로는 완성품을 가공이 불가능하고 셋째, 스프링백의 영향은 무시할 수 있다는 것이다. 판재 가공물의 대체적인 형상은 첫 번째 드로잉 공정에서 만들어지며 첫 번째 작업 후의 성형의 양은 그리 크지 않다. 따라서 첫 번째 작업 이후에는 비신장성형을 주로 하여 마지막 형상을 가공하는 것이 두께방향의 변형을 방지하는 좋은 방법이다. 국부적인 변형을 감소시키고 고른 두께분포를 갖는 완성품을 얻기 위해서는 Disk-Brake Piston의 성형에서와 같이 반구형의 펀치를 사용하는 것이 바람직하다.

따라서 첫공정에서 Fig. 9와 같이 직경 24.828 inch의 반구형 펀치를 사용하여 드로잉 작업을 시도하여 Fig. 10과 같이 비교적 고른 두께분포를 얻었으며 최소 두께는 0.0346 inch로 나타났다. 드로잉 비는 1.65이며 최대 펀치하중은 70 tonf 로써 기존의 방식에 비하여 상당히 작게 나타났다.

두 번째 공정은 Fig. 11과 같이 드로잉 비가 1.18인 재드로잉과 함께 완성품의 형상을 얻기 위한 단조작업이며 최소두께는 0.033 inch이다. Fig. 12에 나타난 두께변화를 살펴보면 중앙부는 기존 방식에 비해 두꺼워졌으며 이는 바닥 면의 소재가 안쪽으로 유동했기 때문이다. 최대하중은 Fig. 12에 나타난 행정-하중선도에서 처럼 360 tonf로써 이는 기존 프레스장비의 하중능력(500 tonf) 이내의 값이다.

## 4. 결 론

단 공정과 기존의 제작공정에 대한 해석을 하여 새로운 공정설계를 하는데 유용한 설계자료들을 얻었으며 이를 토대로 새로운 제작공정을 제시하였다. 제안된 제작공정은 기존의 방법이 4단계와 3단계 작업공정을 포함하고 있는 것과는 달리 2단계의 작업공정이며 가공품에서 어떤 결함도 예측되지 않았다. 예상되는 펀치하중은 각각의 작업공정에서 작업능력 이내에 있는 것으로 확인되었다. 새로운 제작 방법에서 제 1단계 공정은 균일한 신장을 얻기 위하여 반구형 펀치가 사용된 드로잉 공정이다. 새로운 제작공정을 위한 펀치의 설계에서 중요한 점은 펀치모양이 부품의 두께분포에 커다란 영향을 준다는 점이다. 새로운 제작공정은 균일한 벽두께와 기존설비의 하중능력을 고려하는 설계기준으로 볼 때 만족스러운 것이다.

## 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] 황병복, 이호용, "유한요소법을 이용한 disk-brake piston의 공정설계," *한국소성가공학회, 제3권, 제2호*, p. 178, 1994.
- [6] *Metals Handbook, Forming*, American Society for Metals, 8th ed., vol. 4, p. 179, 1969.
- [7] ABAQUS : User's Examples and Theory Manuals, Hibbit, Karalsson and Sorenson Inc., 1988.
- [8] N. Rebelo, J. C. Nagtegaal and H. D. Hibbit, "Finite Element Analysis of the Sheet Forming Processes," *Int. J. Num. Met. Eng.*, vol. 30, pp. 1739-1758, 1990.
- [9] 임중연, 이호용, 황병복, "세탁조의 제작공정해석 및 공정개선에 관한 연구," *한국소성가공학회, 제3권, 제2호*, p. , 1994.
- [10] *Metals Handbook, Forming and Forging*, Vol. 14, 94, American Society of Metals, 9th Edition.
- [11] S. Thiruvarudchelvan and W. G. Lewis, "Deep Drawing with Blankholder Force Approximately Proportional to the Punch Force," *Trans. ASME*, vol. 112, pp. 278-285, August, 1990.
- [12] *Source Book on Industrial Alloy and Engineering Data*, American Society for Metals, vol. 4, 1978.
- [13] *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Society of Manufacturing Engineer, 3rd ed., 1983.
- [14] *Die Design Handbook*, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, N.Y., McGraw-Hill, 1955.

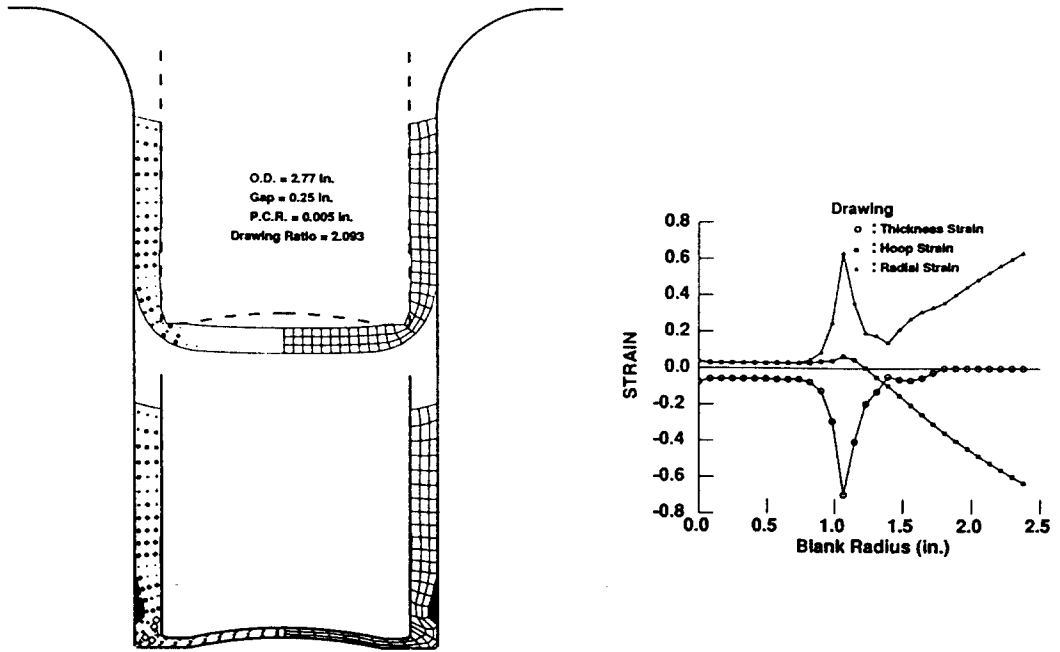
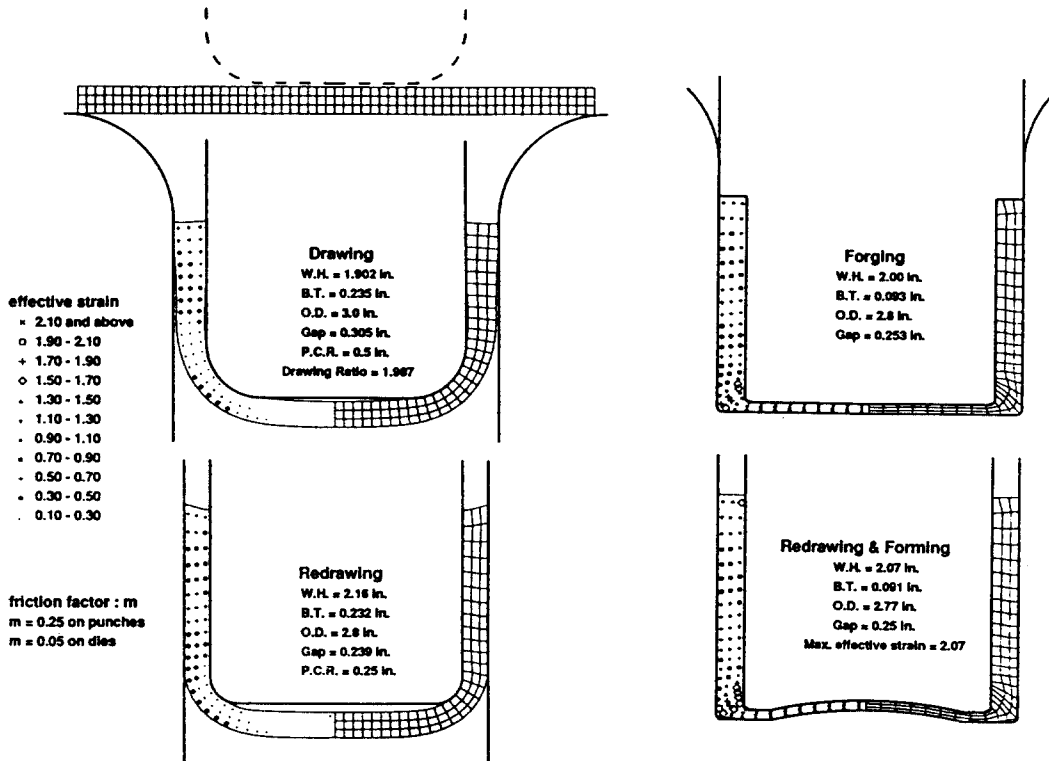


Fig. 1 Deformation patterns and strain distributions for one step operation



(a)

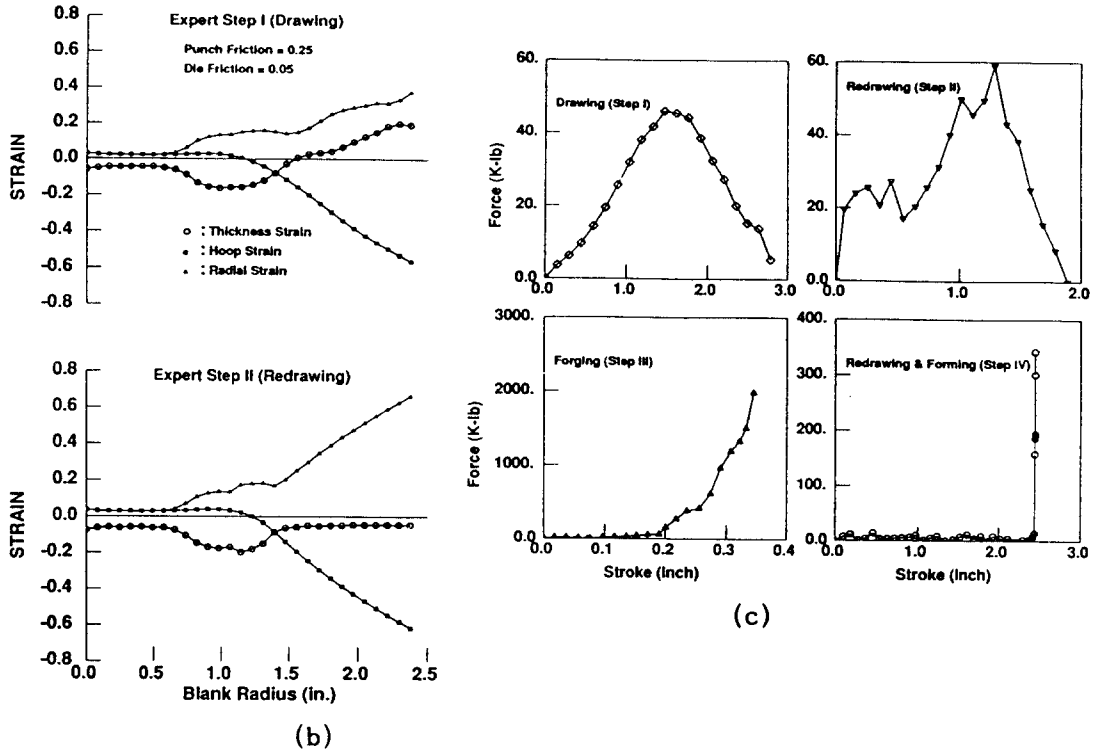


Fig. 2 Simulation results of expert solution : (a) deformation pattern  
(b) strain distributions (c) load-stroke relationships

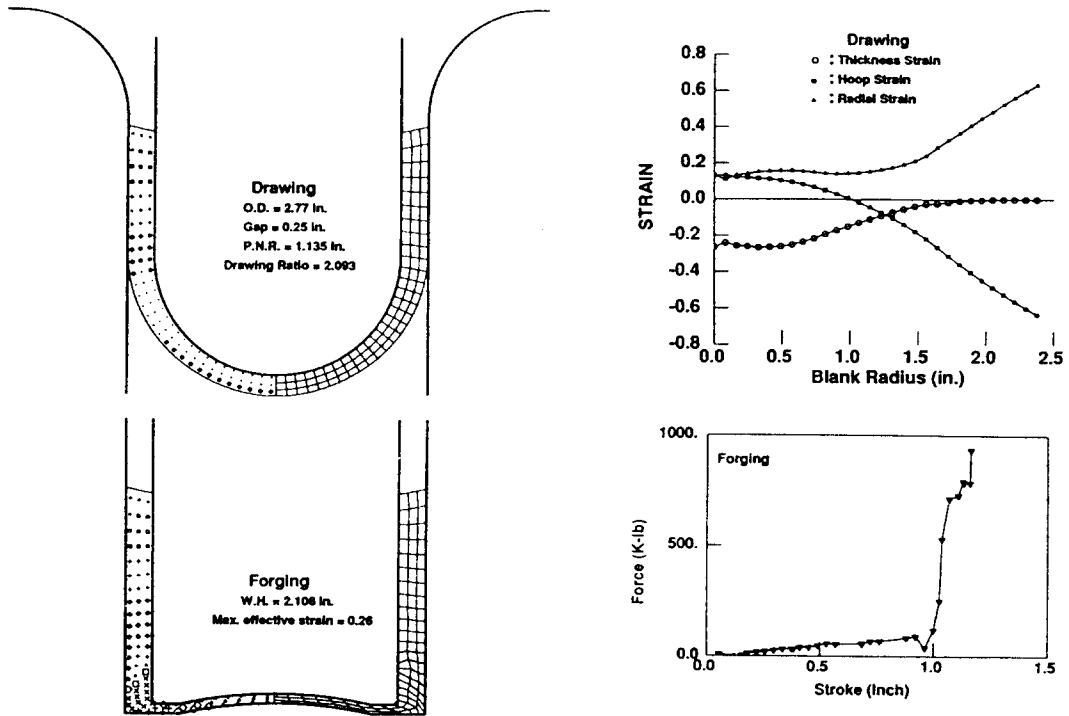


Fig. 3 Deformation patterns, strain distributions and load-stroke relationship for the final process design of disk-brake piston component



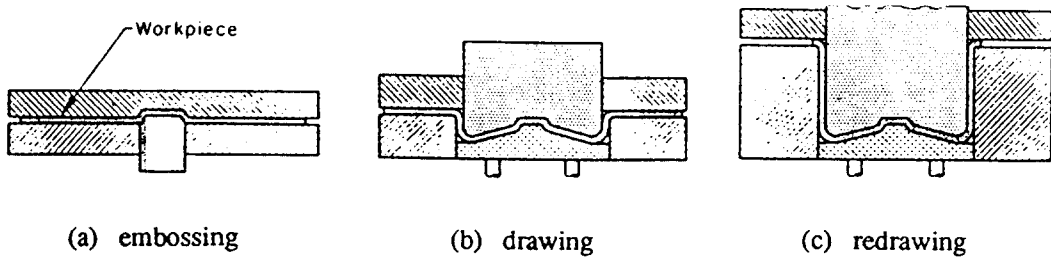


Fig. 4 Three operations in the production of washing machine tub

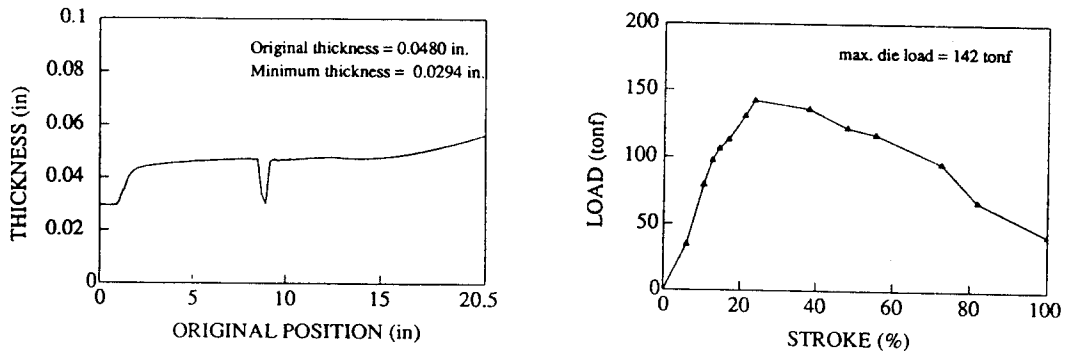


Fig. 5 Thickness distribution and punch stroke-load curve for the single forming operation

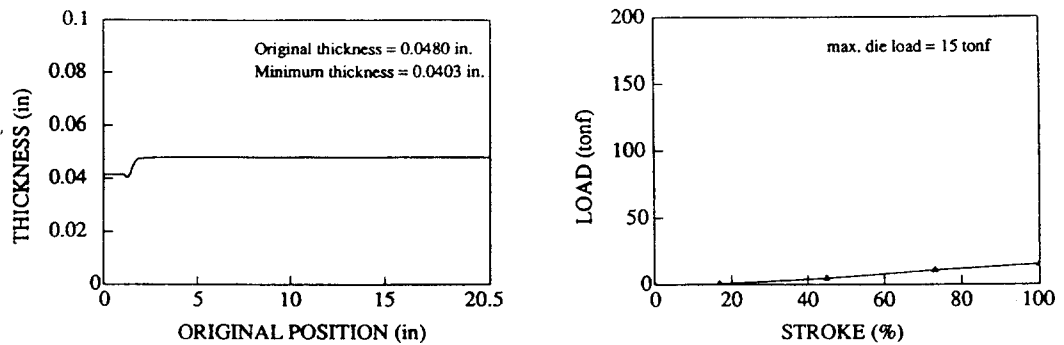


Fig. 6 Thickness distribution and punch stroke-load curve for embossing

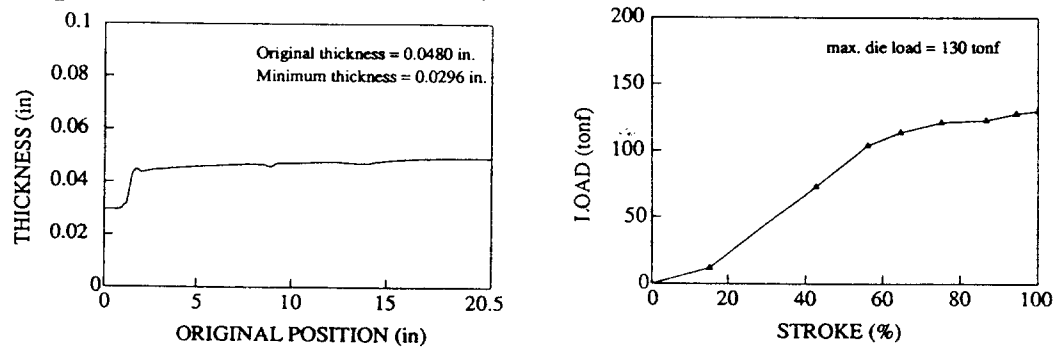


Fig. 7 Thickness distribution and punch stroke-load curve for drawing

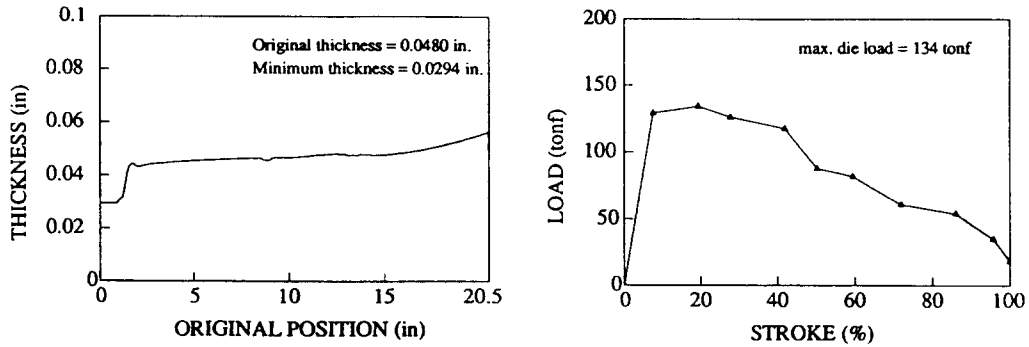


Fig. 8 Thickness distribution and punch stroke-load curve for redrawing

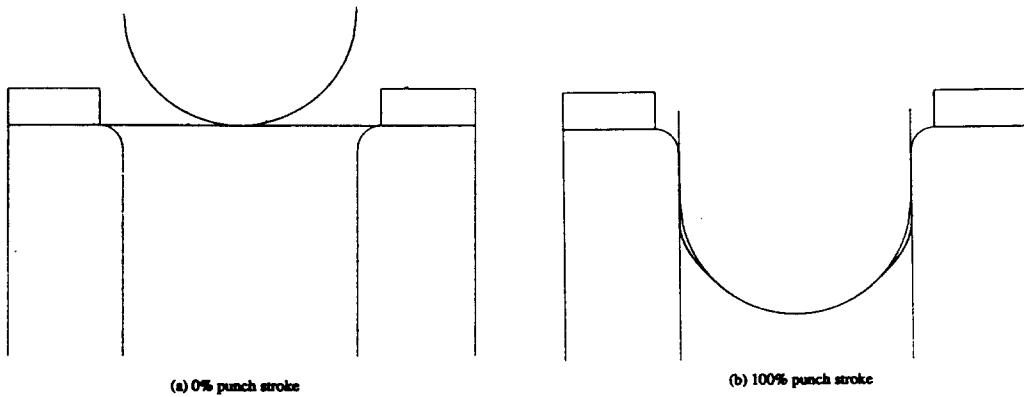


Fig. 9 Deformation pattern of a drawing operation with hemispherical punch for the proposed process

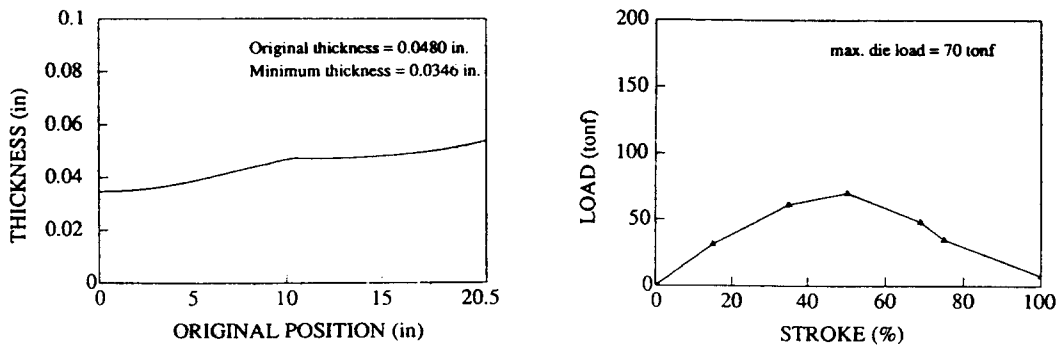
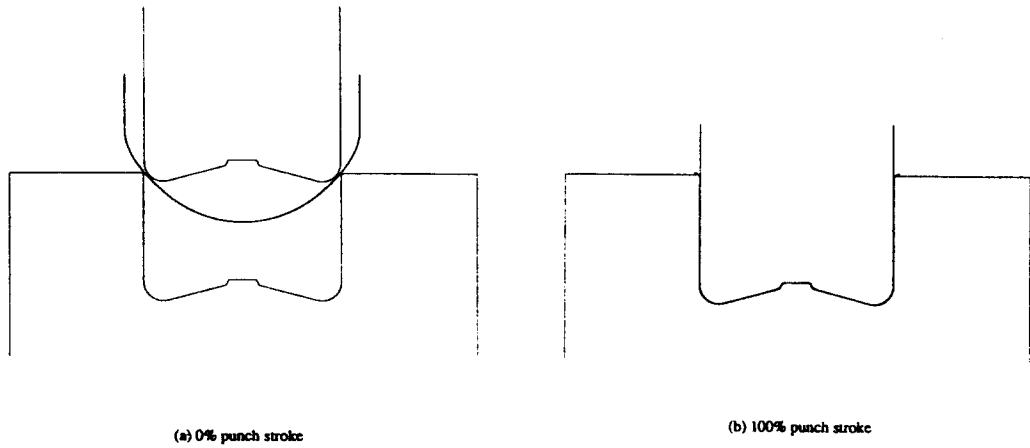
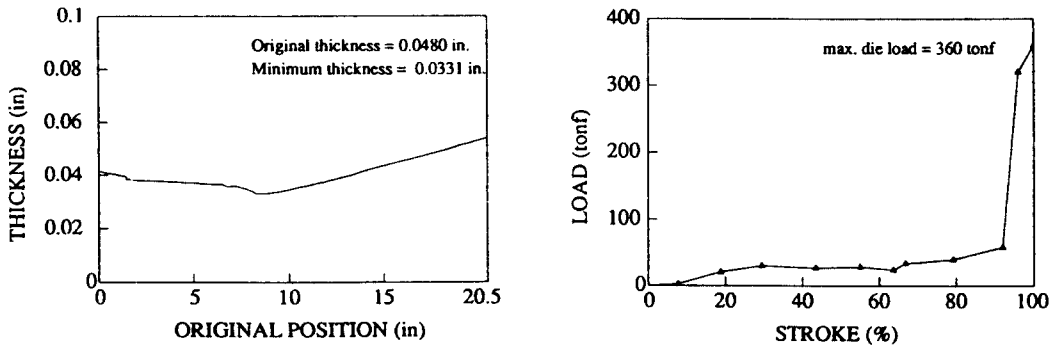


Fig. 10 Thickness distribution and punch stroke-load curve for the 1st drawing operation with hemispherical punch



**Fig. 11** Deformation pattern of the 2nd redrawing and forging operation for the proposed process



**Fig. 12** Thickness distribution and punch stroke-load curve for the 2nd operation