

전방압출 공정에서 제품 변형 이력

이강혁* · 박용복**

(2000년 10월 23일 접수)

Deformation History of Product during Forward Extrusion Process

K. H. Lee and Y. B. Park

Abstract

The study has been performed for the relation between die and product during forward extrusion by the experiment. Strains of the die have been given by the simple experiment using the strain gauge located at the outer surface of the die. The history of the deformation of the die and the product has been given by the experiment and Lamé's formula. The inner pressure of the die causes the deformation of die that affects the accuracy of dimension as well as shape of the product.

The product with accurate dimension and shape can be obtained by analysing elastic deformation of the die during the process. The deformation of the die during metal forming process has been usually predicted by the experience of industrial engineer or finite element analysis. But it is difficult to predict the dimension of the product at unloading and ejected states.

In the present study, useful results for the deformation history of the die and the product were obtained through the experiment and Lamé's formula in forward extrusion which can be applied to the die design for the product with accurate dimension.

Key Words : Forward Extrusion, Deformation of Die and Product, Strain Gauge

1. 서 론

냉간 단조에서 정확한 치수의 최종 형상을 얻기 위해서는 성형될 때 접촉되는 부위의 탄성변형분포와 이에 따른 제품 변형에 관한 정확한 정보가 필요하며, 이를 토대로 하여 제품의 공정설계와 금형설계를 하는 것이 상당히 중요하다.

금형의 합리적인 설계 방법을 확보하기 위하여 제품 성형시 평균 가압 압력뿐만 아니라, 금형의 국부적인 파손이나 마모에 미치는 영향을 고려한 압력분포에 대한 정확한 지식이 필요하다. 또한 제조 현장에서는 정확한 치수의 최종형상을 시행착오 없이 조기에 개발하고 생산할 수 있는 방법이 요구되며, 이를 위하여 금형의 변형과 이에 따른 제품 변형 사이의 구체적인 정보를 필요로

* 공주대학교 대학원 기계공학과
** 공주대학교 기계공학부

하게 된다.

Shigeo Matsubara 등은 냉간 단조에 있어서 압력분포에 대한 연구를 하였고,⁽¹⁻³⁾ John L.Frater는 FEM을 이용하여 해석하였으며,⁽⁴⁾ A. Kocanda 등은 정밀 냉간단조에 있어서 금형 변형에 대한 양상을 FEM으로 고찰하였다.⁽⁵⁾

최근에 구체적인 모델 실험으로는 밀폐 업셋팅에서 금형과 제품 변형⁽⁶⁾을 통하여 단조 도중의 제품 변형이력에 관한 연구를 시도하였다.

본 연구는 전방압출 공정에 있어서 금형의 변형 분포를 간단하게 측정할 수 있는 방법으로 금형의 표면에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 측정하고, 모델 실험으로 데이터를 얻어 Lamé식으로부터 금형의 내경 변형량을 역으로 계산하며, 제품은 직접측정을 하여 상호관계를 비교 분석하는 방법으로 제품의 변형 이력과 이를 토대로 공정설계 및 금형설계를 할 수 있는 기초자료를 제시하였다.

2. 금형의 변형

2.1 금형에 걸리는 내압⁽⁷⁾

전방압출가공에 있어서 주어진 가압압력에 대해 펀치의 압력 p_p 와 금형 내벽에 가해지는 내압 p_i 와의 관계는 식(1)과 같다.

$$p_i = K \times p_p \quad (1)$$

여기서 K 는 가공 방식에 따라 정해지는 보정계수로서 $K = 1 - \sigma_Y / p_p$ 로 계산된다.

2.2 금형의 탄성변형

제품을 성형하는 도중에는 금형의 내벽에 내압으로 금형에 탄성변형이 발생되어 제품의 치수변화를 발생시킨다. 금형의 변형량은 금형의 구멍 내벽면에 내압이 작용하면 두꺼운 원통에 관한 Lamé식에 의하여 다음 식(2)와 (3)과 같이 직경방향 탄성변형량과 원주방향 탄성변형율이 주어진다.

- 직경방향 탄성변형량 δ 는

$$\delta = \frac{p_i r_i^2}{E(r_o^2 - r_i^2)} \left[(1 - \nu) + (1 + \nu) \frac{r_o^2}{r^2} \right] 2r \quad (2)$$

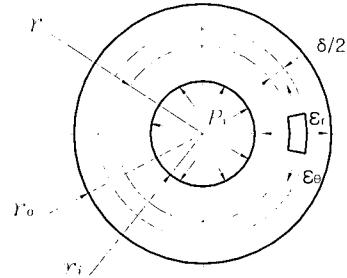


Fig. 1 Schematic diagram of the die subject to internal pressure

- 원주방향 탄성변형율 ϵ_θ 는

$$\epsilon_\theta = \frac{p_i r_i^2}{E(r_o^2 - r_i^2)} \left[(1 - \nu) + (1 + \nu) \frac{r_o^2}{r^2} \right] \quad (3)$$

여기서, p_i 는 내압(kg/mm²), r_i 는 내반경(mm), r_o 는 외반경(mm), E 는 종탄성계수(kg/mm²), ν 는 포아송비이다.

3. 실험 방법

실험에 사용한 시험편 재료는 공업용 알루미늄(A6061-O)이며, 금형은 냉간단조용 금형재료로 많이 사용되고 있는 SKD11(HRC59)로 제작하였고, 변위를 측정하기 위하여 표면에 일정한 간격으로 스트레인 게이지를 Fig. 2와 같이 부착하였다. Fig. 3은 전방압출의 실험장면을 보여준다.

실험장치로는 시험편을 가압하는데 50Ton 유압식 만능재료시험기를 사용하였으며, 변형율은 스트레인 게이지 전용측정기를 사용하였다. 실험방법은 연마면으로 제작된 실험금형을 설치하고, 인산염피막처리후 MoS₂로 윤활된 시험편을 금형에 넣은 후 50Ton 유압식 만능재료 시험기를 통하여 5mm/min의 속도로 전방압출하였다. 이때 가압압력은 만능재료시험기에서 얻었으며, 금형의 외경 변형율은 금형의 표면에 연결된 스트레인 게이지와 측정기를 통하여 컴퓨터에서 가압이 진행되는 동안 처리되었다. 전방압출된 제품은 직접 측정하였다. 금형과 제품의 변형 관계는 다음 3가지 즉 ① 초기 시험편의 직경을 $\phi 32$ 로 하였을 때, ② $\phi 32$ 의 초기 시험편을 $\phi 34.5$ 로 자유업셋

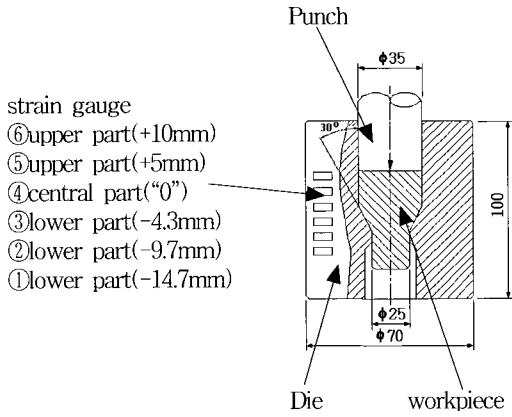


Fig. 2 Die for experiment

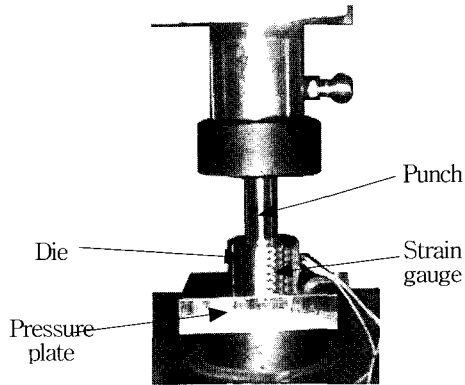


Fig. 3 Experiment for forward extrusion

팅하여 실제 산업 현장에서 사용하고 있는 조건과 유사하게 금형과 소재사이의 간격을 두었을 때, ③ 초기 시편의 직경을 금형 직경 $\phi 35$ 와 동일하게 하였을 때를 비교하여 고찰하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

시편에 따른 하중과 변위관계를 Fig. 4에서 보여 주며, 3가지 경우 모두 최종적으로 전방압출이 이루어지는 단계에서는 정하중 상태를 보이는데 이는 전형적인 중실체의 전방압출 하중 곡선을 나타내는 것이다. $\phi 32$ 의 경우는 변형 초기에 컨테이너 금형에 접촉이 이루어지지 않고 있기 때문에 마찰력 성분만큼의 하중이 더 작게 작용하여 완만하게 하중이 상승하고 있음을 보여준다. Fig. 4(b)의 A부에서 미세한 정하중 상태를 보여주고 있는 점이 특징이다. 이는 소재가 초기에는 컨테이너 금형에

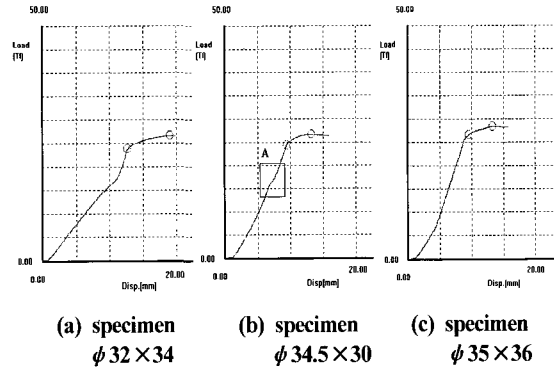


Fig. 4 Relation between punch load and displacement

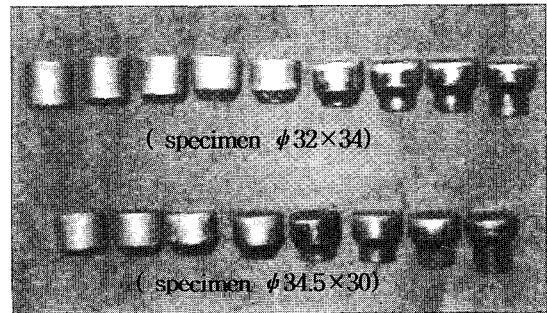


Fig. 5 Products along punch displacement in forward extrusion

접촉하기 전에 전방압출이 되다가 랜드부를 통과하기 직전 단계에서 업셋팅이 일어나면서 정하중 상태를 보여주는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 전방압출된 제품을 보여준다. Fig. 6은 전방압출시 측정부위별 외경변형율을 보여주며 3단계를 이루고 있다. 처음에는 펀치에 시편이 압력을 받아 전방압출이 되는 상태, 펀치가 제품에서 이탈된 상태 즉 무부하 상태, 최종적으로 제품이 금형에서 이젝팅된 상태가 된다. 이 과정을 금형의 표면에 부착된 스트레인 게이지를 통하여 측정하면 금형의 변형 이력을 알 수 있다. 최종 하중에 도달될 때까지는 금형의 변형율이 증가하다가 무부하 상태에서는 일정값까지 탄성회복이 이루어지며, 이젝팅시에는 금형과 제품의 접촉부위가 비접촉상태가 되면서 초기상태로 회복됨을 알 수 있다. 이 외경변형율을 역으로 Lamé식을 이용하여 내경의 변형을 계산한다면 제품의 변형이력을 알 수 있다.

Fig. 7은 초기 시편 $\phi 32$ 로부터 $\phi 34.5$ 로 자유 업셋팅한 시편을 전방압출 하였을 때 펀치 변위에 따른 금형 외경의 변형을 관계를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 컨테이너 금형 부분에 대해 내압은 식(1)에 의해 구하였고

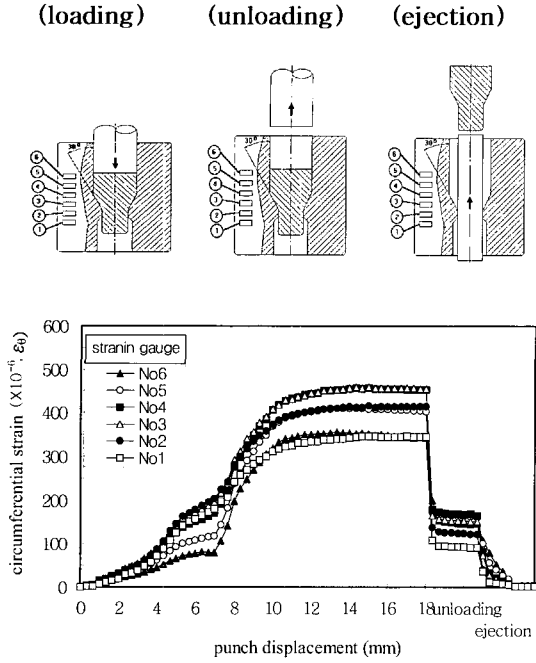


Fig. 6 History of circumferential strains at outer surface of die along punch displacement(specimen $\phi 34.5$)

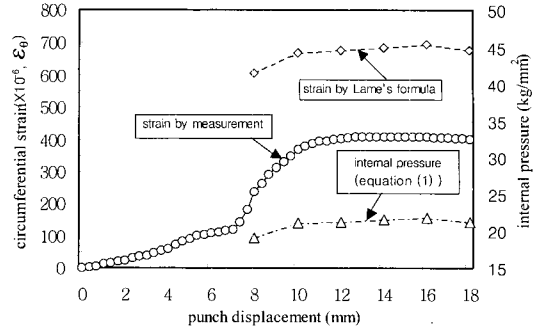
변형율은 Lamé식에 의해 구한 것이다. 펀치의 변위가 6mm까지는 시편의 외경이 컨테이너 금형 부분에 비접촉 상태로 Lamé식에 의한 변형율은 구할 수가 없었다. 단면감소율을 51%로 하였을 때 일반적으로 사용하고 있는 보정계수 K를 사용한 내압으로 구한 것과 실험 결과를 비교하면 이론치가 실험치보다 약 1.7배이상 크며, 따라서 이론치를 보정없이 적용한다는 것은 무리가 있다.

Fig. 7(b)는 경사금형 중앙부분을 측정하여 이론치와 실험치 변형율을 비교한 것이다. 이론적인 계산은 Fig. 8의 조건에서 Kudo⁽²⁾에 의해 제시된 다음 식을 사용하였다.

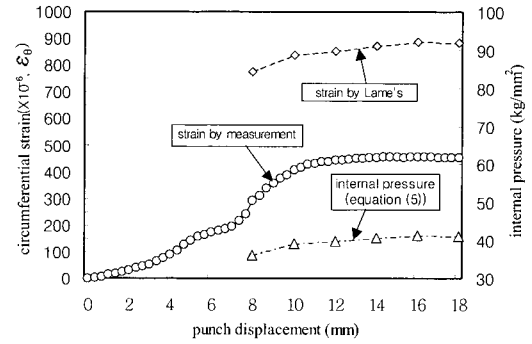
$$P_d = \frac{\sigma_y + (P_e - \sigma_y) \exp(\mu L / r_o)}{(1 + \mu \cot \beta) \epsilon_A / 100} \quad (4)$$

여기에서 P_d 는 금형 경사부분에서 제품에 작용하는 압력, P_e 는 가압압력, β 는 전방압출각을 나타낸다 반경방향으로 작용하는 내압 (P_d)_r은 다음식과 같다.

$$(P_d)_r = P_d \cos \beta - \mu P_d \sin \beta \quad (5)$$



(a) Container part (No ⑤)



(b) Inclined part (No ③)

Fig. 7 Comparison of circumferential strain on outer surface of die between experiment and calculation (specimen $\phi 34.5$)

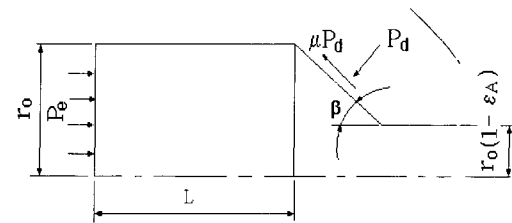


Fig. 8 Internal pressure at inclined die part⁽²⁾

이론치 변형율은 식 (3)과 (4),(5)로부터 전방압출각과 단면감소율에 직접적인 관계를 보여주고 있으며, 본 실험 조건에서는 이론치가 실험치보다 약 2배 정도 높게 나타난다. Fig. 7(a)에서 일반적인 보정계수 K를 적용한 컨테이너 금형 부분의 경우보다 더 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig 9, 10과 11은 컨테이너 금형부분의 변형량과 배출된 제품을 직접 측정된 제품 외경의 변형량을 비교하여 보여준다. 최종적인 제품의 외경치수는 무부하상태에서의 금형 치수 즉 하중이 제거된 상태의 금형속에 있는 제품의 외경과 밀접한 관계가 있으며, 금형으로부터 배출되

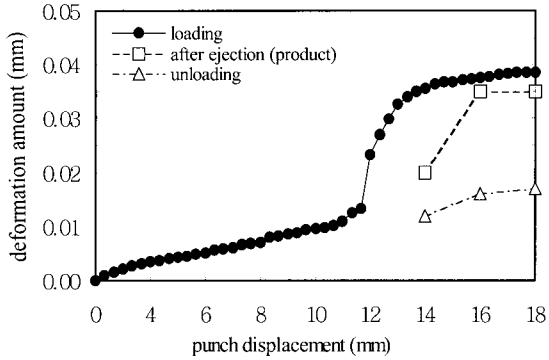


Fig. 9 Deformation amount of die and product (No ⑤, specimen $\phi 32$)

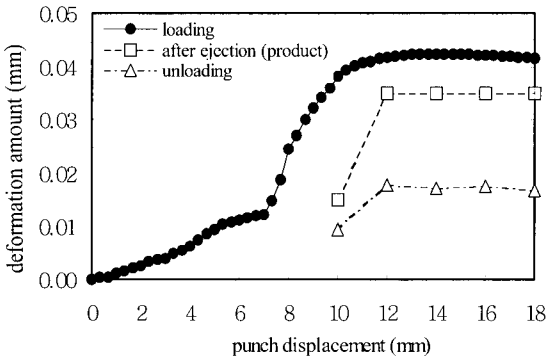


Fig. 10 Deformation amount of die and product (No ⑤, specimen $\phi 34.5$)

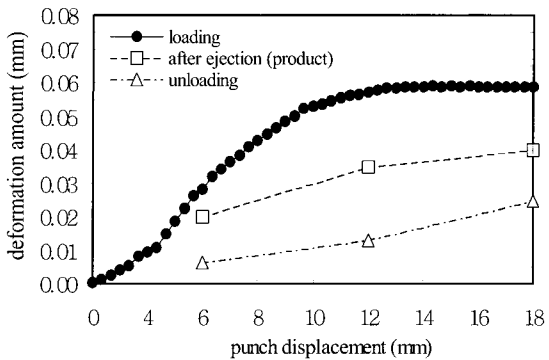


Fig. 11 Deformation amount of die and product (No ⑤, specimen $\phi 35$)

면서 반경방향으로 초기 금형의 치수보다 약 0.1% 치수 회복이 발생하였다.

5. 결론

전방압출공정에서 금형의 표면에 스트레인 게이지를 붙여 변형율을 간단하게 측정하고, Lamé식을 이용하여 내경 변형량을 계산하는 방법으로부터 가압력을 가하는 과정에서 직접 측정이 불가능한 금형의 내경 및 제품의 외경변화 이력을 예측하였다.

현재 널리 사용되고 있는 일반적인 보정계수를 전방압출에 대하여 적용하였으나 실제와 많은 차이를 보였기 때문에 본 연구에서는 내압을 구하기 위해서 일반적인 보정계수의 수정이 필요함을 제시하였다.

제시된 결과는 각종 소성가공에 있어서 공정 및 금형 설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며 금형의 설계에 있어서는 제품의 외경보다 일정량 작게 금형 치수를 결정하여야 하나 보정량에 대해서는 실험적 방법과 해석적 방법을 통한 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Shigeo Matsubara & Hideaki Kudo, 1991-7, "No n-uniform Pressure Distribution on Punch Nose Surface in Axisymmetric Cold Fording Processes", Journal of the JSTP, Vol. 32, No. 366, pp.874~879.
- (2) Shigeo Matsubara & Hideaki Kudo, 1991-7, "Contact Pressure Characteristics on Tool-Workpiece Interface During Plane-Strain Extrusion of Pure Aluminium", Journal of the JSTP, Vol. 32, No. 366, pp.862~867.
- (3) Shigeo Matsubara & Hideaki Kudo, 1991-7, "Distribution of Contact Pressure Tool-Workpiece Interface in Axisymmetric Backward Extrusion of Aluminium Cans", Journal of the JSTP, Vol. 32, No. 366, pp.868~873.
- (4) John L.Frater, 1989, "Application of Finite Element Methods to The Design of Prestressed Tooling", J. Material Shaping Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 49~55.
- (5) A. Kocanda, R. Cacko and P. Czyzewski, 1996, "Some Aspects of Die Deformation in Net-shape Cold Forging", Advanced Technology of Plasticity, pp.367~370.
- (6) 이강희·박용복, 1999, "밀폐 업셋팅에서 금형과 제품 변형에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제8권 제6호, pp.563~568.
- (7) 沢辺 弘, 1974, "冷間鍛造の基礎と應用", 日本, 株式会社 産報.