

후방압출 공정에서 금형의 반경방향 변형량을 통한 제품정밀도에 관한 연구

이강희*, 박태식**, 박용복***

(2003년 3월 27일 접수)

Study on Accuracy of Product by Radial Deformation of Die in Backward Extrusion

K. H. Lee, T. S. Park and Y. B. Park

Abstract

The die for cold forging gets a very high axial load and radial pressure during processing and hence deforms considerably in the radial direction. This radial deformation of die becomes a important factor influencing the dimensional accuracy of a product. In order to obtain the product with highly accurate dimension, therefore, it is essential to acquire some information on elastic deformation of the die and the product. The study has been performed for the relation of the deformation between the die and the product in backward extrusion. The strain of the die has been given by the simple experiment using the strain gauges attached to the outer surface of the die. Also the history of the deformation of the die and the product has been given by the experiment and Lame's formula. The results has been compared with the previous another method. The study has given useful results for the deformation history of the die and the product through the experiment and Lame's formula in backward extrusion, which can be applied in the die design for the product with accurate dimension.

Key Words : Backward Extrusion, Deformation Between Die and Product, Strain Gauge

1. 서론

냉간 단조용 금형은 높은 변형저항의 재료를 가공하기 때문에 가압 압력에 따라 발생하는 내압으로 외경방향의 주변형이 일어나며, 내압은 제품의 치수 정밀도와

형상 정도에 영향을 주는 중요한 요소이다. 따라서 정확한 치수의 최종 형상을 얻기 위해서는 성형될 때 금형과 소재의 접촉되는 부위의 탄성 변형 분포와 이에 따른 제품 변형에 관한 정확한 정보가 필요하며, 이를 토대로 제품의 공정설계와 금형설계를 하는 것이 상당히 중요하다.

* 공주대학교 대학원 기계공학과
** 대한상공회의소 충남인력개발원
*** 공주대학교 기계공학부

금형의 합리적인 설계 방법을 확보하기 위하여 제품 성형시 평균 가압 압력뿐만 아니라, 금형의 국부적인 파손이나 마모에 미치는 영향을 고려한 압력분포에 관한 정확한 지식이 필요하다. 현재의 산업 사회에서는 정확한 치수의 최종제품을 시행착오 없이 조기에 개발하고 생산할 수 있는 방법이 요구되며, 이를 위해서 금형의 변형과 이에 따른 제품 변형 사이의 구체적인 정보를 필요로 하게 된다.

Shigeo Matsubara 등은 금형의 압력분포에 대한 실험적 연구^(1,2)를 하였고, John L.Frater는 FEM에 의한 해석적 방법으로 금형설계에 적용하였으며⁽³⁾, A. Kocanda 등은 정밀 냉간단조에 있어서 금형변형에 대한 양상을 FEM으로 고찰하였다.⁽⁴⁾

저자 등은 구체적인 모델 실험으로서 밀폐 압출과 전방압출 공정에 적용하여 금형과 제품 변형에 대한 연구를 시도한 바 있다.⁽⁵⁻⁶⁾

본 연구는 후방압출 공정에 있어서 금형의 변형을 스트레인게이지(strain gauge)를 부착하여 측정하고, Lamé식에 의해 금형의 내압과 변형량을 역으로 계산하였으며, 제품은 직접 측정하여, 압력분포 측정법에 의한 Mastubara의 논문과 내압을 비교하였고, 금형과 제품의 변형관계를 분석후 설계의 기초 자료를 제시하였다.

2. 금형의 변형

2.1 금형에 걸리는 내압⁽⁷⁾

펀치의 압력 p_p 와 금형에 가해지는 내압 p_i 와의 관계는 다음과 같다.

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

여기서 K 는 가공 방식에 따라 정해지는 보정계수로써 후방압출가공에서는 $K = \epsilon_A - \sigma_V / p_p$ 로 계산된다.

2.2 금형의 탄성변형

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 :

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

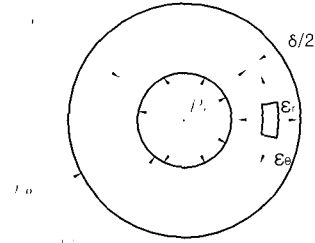


Fig. 1 Schematic diagram of the die subject to internal pressure

원주방향 탄성변형율 ϵ_{θ} :

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

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. 실험방법

본 실험에 사용한 실험 시편은 공업용 알루미늄(A6061 O)과 납(Pb)이며, 금형은 현재 냉간 단조용 금형재료로 가장 많이 사용되고 있는 SKD11을 선정하여 Fig. 2와 같이 금형(die), 펀치(punch), 패드(pad)를 각각 제작하였으며, 단면감소율이 44%, 66%, 88%되게 펀치의 치수(C부)는 각각 $\phi 23.2$, $\phi 28.4$, $\phi 32.8$ 로 제작하고 스트레인게이지(strain gauge)를 패드(pad) 상단부를 기준으로 일정하게 그림과 같이 금형(die) 표면에 정확히 부착하였다. Fig. 3은 실험에 사용된 금형을 보여준다.

실험 장치로는 Fig. 4와 같이 시편을 가압하는데는 50Ton 유압식 만능재료시험기를 사용하였으며, 변형율은 스트레인게이지 전용측정기를 사용하였다. 실험방법은 연마면으로 제작된 실험금형을 설치하고 표면을 신나로 희석된 MoS₂로 윤활한 시편(알루미늄과 납, 치수는 $\phi 35 \times 18$)을 금형에 넣은 후 0.5Ton/min의 속도로 가압하여 후방압출하였다. 이때 가압압력은 만능재료시험기에서 얻었으며, 금형의 외경변형율은 압출되는 동안 금형의 표면에 연결된 스트레인 게이지와 측정기를 통하여 컴퓨터에서 처리되었다. 제품은 직접 측정하였다.

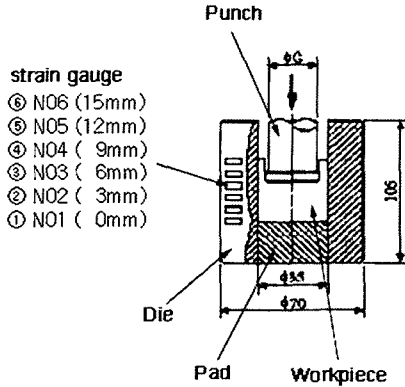


Fig. 2 Die for experiment



Fig. 3 Photograph of the Dies

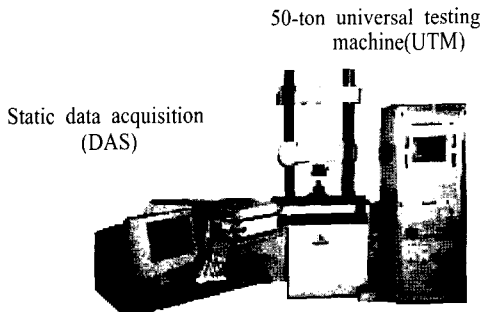


Fig. 4 Photograph of the experimental equipment

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 알루미늄

Fig. 5는 후방압출시 하중과 변위 관계를 보여준다. 초기에는 금형과 소재가 접촉하지 않아 하중이 작지만, 금형과 소재가 접촉후에는 마찰력 때문에 급격히 하중이 상승한다. 그후 진행적인 중심체의 후방압출 하중 곡선을 보여준다. 또 하중의 증가가 단면감소율 66%에서는 44%보다 더욱 더 급격히 이루어지는 것을 볼 수 있으며 단면감소율이 88%에서는 50Ton으로 실험을 할 수가 없

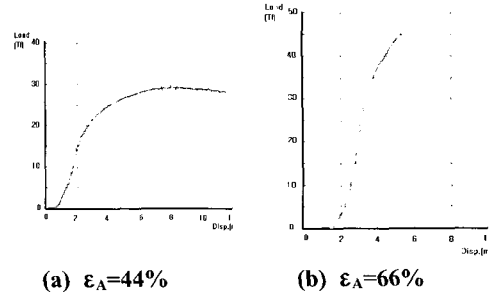


Fig. 5 Relation between punch load and displacement

었다. Fig. 6은 단면감소율 44%에서 변위에 따른 외경 변형율의 이력을 나타낸다. 시편이 후방 압출이 되고 이젝팅되는 과정을 보면 크게 3단계를 이루고 있는데 처음에는 펀치에 의해 시편이 압력을 받는 상태이고, 두번째는 펀치가 시편에서 이탈된 상태, 즉 무부하 상태이며, 마지막 단계는 제품을 금형으로부터 이젝팅한 상태가 된다. 이 과정을 금형의 표면에 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 외경 변형율을 측정하면 금형의 변형 이력을 알 수 있는데, 하중시에는 변위의 증가에 따라 금형의 외경변형율이 증가하다가 약간 감소되는 현상을 보이며, 무부하 상태에서는 일정한 값까지 탄성 회복이 이루어지고, 이젝팅시에는 금형의 접촉 부위가 비점촉상태가 되면서 초기 상태로 회복됨을 알 수 있다.

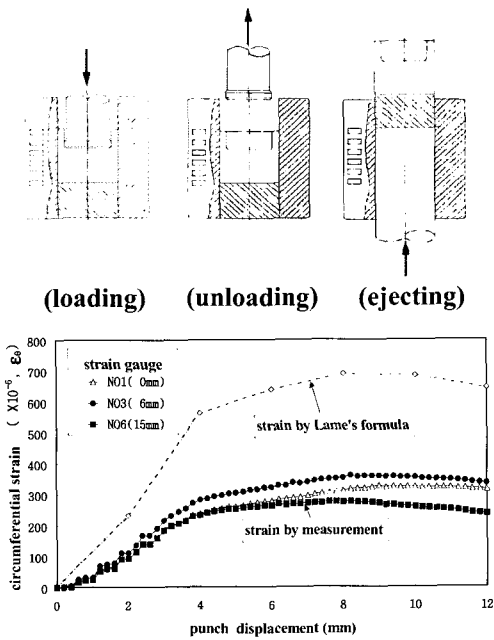


Fig. 6 History of circumferential strains at outer surface of die along punch displacement ($\epsilon_A=44\%$)

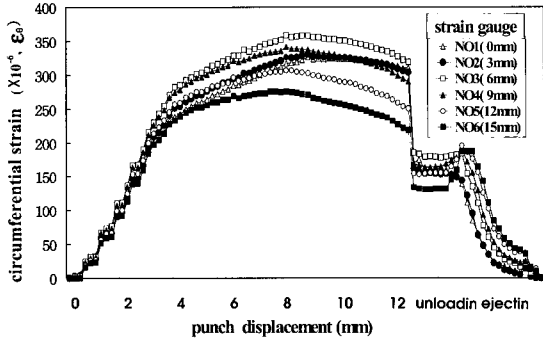


Fig. 7 Comparison of circumferential strain on outer surface of die between experiment and calculation ($\epsilon_A=44\%$)

Fig. 7은 단면감소율이 44%인 경우의 펀치압력 D_p 와 $K(= \epsilon_A - \sigma_Y / D_p)$ 로부터 식(1)에서 계산된 내압을 Lamé의 식(3)에 의하여 외경변형율로 계산한 이론변형율과 실험으로부터 얻은 데이터를 비교하여 보여준다. Lamé의 식에 의한 이론변형율과 실제 실험에서의 변형율은 많은 차이를 나타내며, 따라서 일반적으로 사용하고 있는 이론변형율을 K 의 수정없이 적용하는 것은 무리이다.

일본의 Shigeo Matsubara는 순알루미늄(A1070 O)을 시편으로 하여, 단면감소율 44%, 66%, 88%에 따른 내압을 직접 측정하여 패드로부터의 거리에 대해 보여준는데⁽²⁾, 본 실험에서 사용한 공업용 알루미늄(A6061 O)은 순알루미늄에 비해 강도가 높아 단면감소율 44%에 대해서만 비교하고 66%와 88%에 대해서는 납을 이용한 실험을 통해 비교하기로 한다.

Fig. 8은 단면감소율 44%에서 압입 깊이가 6mm일 때 내압을 비교한 것이다. 순알루미늄(A1070 O)과 공업용 알루미늄(A6061 O)의 항복응력 σ_Y 는 각각 $3.0 (kg/mm^2)$ 과 $5.5 (kg/mm^2)$ 로서 약 2배 차이가 나지만 그림을 보면 내압의 차이가 항복응력에 비례하지 않고 있다. 이것은 펀치압력 D_p 에 소재의 마찰계수, 펀치형상(랜드부의 길이, 바닥각도, 노즐R) 등에 많은 변수가 있기 때문이다.

순알루미늄(A1070 O)은 패드부(패드로부터의 거리 0 mm)가 가장 높고 금형 입구 쪽(패드로부터의 거리 15 mm)이 낮은 것을 알 수 있으나, 본 논문에서는 중앙부가 약간 높게 나타났다.

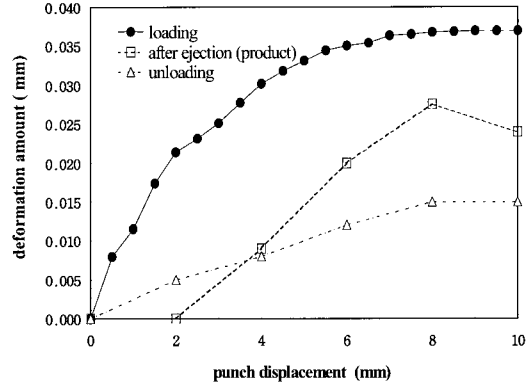


Fig. 8 Comparison of internal pressure between A1070-O and A6061-O ($\epsilon_A=44\%$)

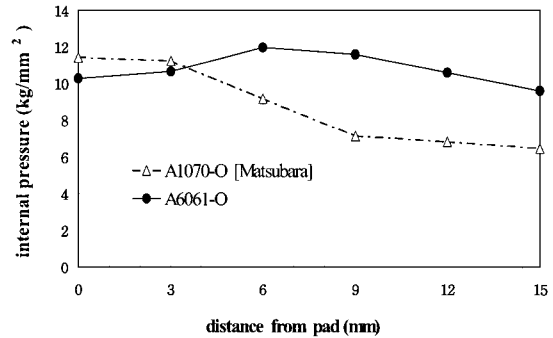


Fig. 9 Deformation amount of die and product (A6061-O, $\epsilon_A=44\%$)

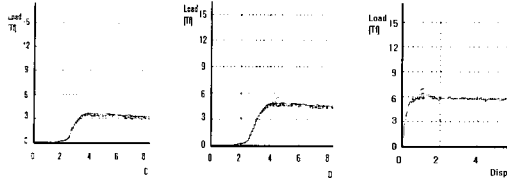
Fig. 9는 단면감소율 44%의 중앙부(패드로부터의 6mm)에서 하중시(가압력을 받은 상태) 금형 내경 변형량과 무부하시(가압 압력이 제거되고 금형 속에 제품이 잔존하는 상태)에서의 변형량 및 제품을 배출한 후 직접 측정된 제품 외경의 변형량을 비교하여 보여준다. 하중시와 무부하시 금형 내경 변형량은 실험중에 제품의 외경을 직접 측정하는 것이 불가능하기 때문에 외경의 변형율을 역계산한 것으로, 금형 속에 있는 제품의 외경치수를 나타낸 것이다.

최종적인 제품의 외경 치수는 금형으로부터 배출되면서 반경방향으로 상당한 양의 치수 회복이 발생하였다.

4.2 납

Fig. 10에서는 각 단면감소별 납의 후방압출시 변위에 따른 하중을 보여주고 있으며, 알루미늄과 동일하게 후

방압축의 전형적인 하중곡선으로 단면감소율이 증가함에 따라 하중이 높아지는 일반적인 현상이 나타났다.



(a) $\epsilon_A=44\%$ (b) $\epsilon_A=66\%$ (c) $\epsilon_A=88\%$

Fig. 10 Relation between punch load and displacement (Pb)

Fig. 11은 변위에 따른 금형과 제품의 변형율 이력을 나타내고 있으며, 납의 경우에서는 부부하상태에서 금형 변형율이 매우 미미하게 나타났다.

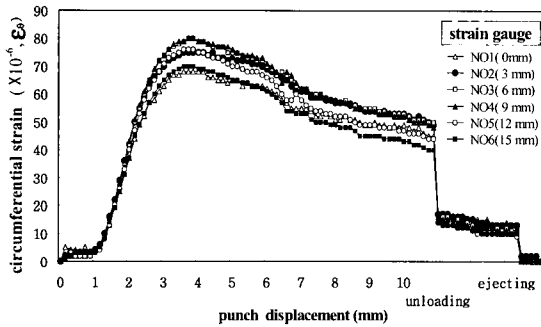


Fig. 11 History of circumferential strains at outer surface of die along punch displacement ($\epsilon_A=66\%$)

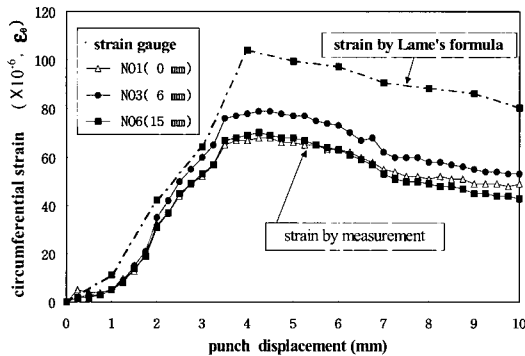


Fig. 12 Comparison of circumferential strain on outer surface of die between experiment and calculation (Pb, $\epsilon_A=66\%$)

Fig. 12는 Lamé의 식에 의한 이론변형율과 실제 실험에서의 변형율으로서 차이를 나타내며, 이것은 시편이 알루미늄과 동일한 현상으로 납에서도 일반적인 보정계수 K 의 보정이 필요하다. 그러나 최종 제품의 외경치수는 초기 금형 내경치수와 거의 동일하였다.

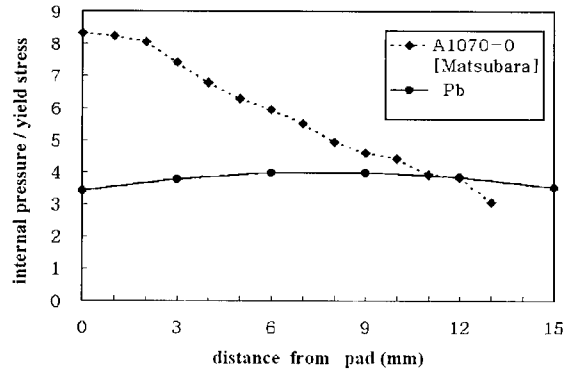


Fig. 13 Comparison of internal pressure/ yield stress between A1070-O and Pb ($\epsilon_A=66\%$)

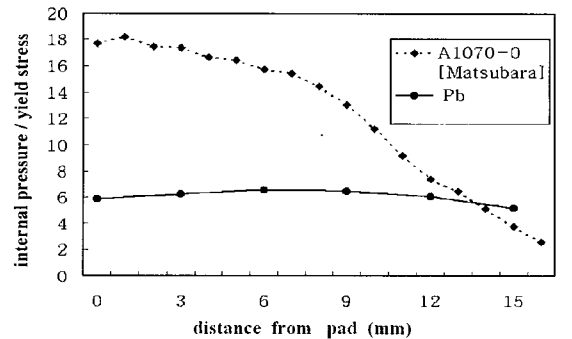


Fig. 14 Comparison of internal pressure/ yield stress between A1070-O and Pb ($\epsilon_A=88\%$)

Fig. 13, Fig. 14는 각각 단면감소율 66%, 88%에서 압입깊이가 6mm일 때 일본의 Matsubara의 순알루미늄(A1070-O)과 납(Pb)을 실험하여 내압/항복응력을 변수로 하여 비교한 것이다. 여기서 내압/항복응력을 변수로 표현한 것은 두 소재사이에 시편의 내압 p_i 의 차이가 커서 항복응력 σ_Y 으로 나눈 것이다. 순알루미늄(A1070-O)은 패드부(패드로부터의 거리 0mm)가 가장 높고 금형 입구 쪽(패드로부터의 거리 15mm)이 낮은 것을 알 수 있으나, 본 논문에서는 앞장의 공융용 알루미늄

(A6061 O)과 같이 중앙부가 약간 높은 것을 알 수 있다.

5. 결론

후방압출 공정에 대한 실험을 통하여 가압력이 가해지는 동안 금형의 내경과 제품의 외경의 변형이력을 예측하고 Lamé식으로부터 금형의 내압과 변형량을 계산하였다.

알루미늄과 납을 이용하여 후방압출에서 현재 널리 사용되고 있는 일반적인 보정계수를 적용하였으나 실제와 많은 차이를 보이기 때문에 본 연구에서는 내압을 구하기 위해서는 일반적인 보정계수의 수정이 필요함을 제시하였다.

Matsubara의 논문과 상이하게 본실험의 경우는 압입 깊이에 관계없이 시편의 중앙부>패드부> 금형입구 순서로 내압이 크게 나타났다.

제시된 결과는 제품과 금형설계의 기초자료로 활용될 것으로 기대되며, 공업용 알루미늄의 경우 금형 내경의 치수는 제품외경보다 보정량 만큼 작게 결정하여야 하나 이 보정량에 대해서는 더 많은 연구가 수행되어야 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) 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.

(4) A.Kocanda; R.Cacko; P. Czyzewski, 1996, "Some Aspects of Die Deformation in Net-shape Cold Forging", Advanced Technology of Plasticity, pp. 367~370.

(5) 이강희, 박용복, 1999, "밀폐 업셋팅에서 금형과 제품 변형에 관한 연구", 한국소성가공학회지 제8권, 제6호, pp. 563~568.

(6) 이강희, 박용복, 2001, "전방압출 공정에서 제품 변형 이력", 한국소성가공학회지 제10권 제1호, pp. 75~79.

(7) 沢 辺 弘, 1974, "冷間鍛造の基礎と應用", 日本, 株式會社 産報.