

밀폐 업셋팅에서 금형과 제품 변형에 관한 연구

이강희* · 박용복**

(1999년 3월 30일 접수)

Study on the Deformation of Die and Product in Closed Die Upsetting

Lee Kang-Hee and Park Yong-Bok

Abstract

The study has been performed for the relation between die and product in closed die upsetting by the experiment. The strain of die has been given by the simple experiment using the strain gauge located at the outer surface of die and the deformation history of die and product has been given by the experiment and Lamé's formula. The inner pressure of die causes the deformation of die that affects the accuracy of dimension and shape of product. The product with accurate dimension and shape can be obtained by analysing elastic deformation of die during upsetting process. The deformation of die during metal forming process has been usually predicted by the experience of industrial engineers or finite element analysis. But it is difficult to predict the dimension of product at unloading and ejected states. The study has given useful result for the deformation history of die and product through the experiment and Lamé's formula at closed die upsetting, and can be applied in the die design for product with accurate dimension.

Key Words : Cold Forging, Deformation of Die and Product, Closed Die Upsetting, Strain Gauge

1. 서론

냉간 단조용 금형은 높은 변형저항의 소재를 가공하기 때문에 가압 압력에 따라 발생하는 내압으로 변형이 일어나며 이는 제품의 치수 정밀도와 형상정도에 영향을 주는 중요한 요소이다. 따라서 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. 특히 복잡한 형상의 금형인 경우는 더욱 필요로 할 것이다.

현재 산업사회의 제조 현장에서 단조 제품은 경험이 있는 기술자들에 의해 공정계획이 수립되고, 금형의 설계와 제작 등이 진행되고 있다. 여기서 기술자의 경험만으로 단시간에 정확한 치수의 최종형상을 성형하기는 매우 어려우며, 많은 시행착오를 통하여 금형의 수정과 프레스 작업이 반복되고

* 대한상공회의소 공주직업훈련원
** 공주대학교 공과대학 기계공학부

있다. 이러한 방법으로 정확한 치수를 얻기 위한 수차례의 보정을 행함으로써 많은 시간과 경제적 손실을 초래하고 있다.

냉간단조에 있어서 금형은 탄성한계에 근접하는 높은 응력이 발생하는 경우가 많으므로 금형의 합리적인 설계 방법을 확보하기 위하여 제품 성형시 평균 가압 압력뿐만 아니라, 금형의 국부적인 파손이나 마모에 미치는 영향을 고려한 압력분포에 관한 정확한 지식이 필요하다. Shigeo Matsubara 등은 냉간단조에 있어서 금형의 압력 분포에 대한 실험적 연구를 위하여 압력 분포 측정 방법을 제안하였다.⁽¹⁾ 그리고 제안된 압력 분포 측정법을 순알루미늄에 적용하여 축대칭의 펀치 선단 압력분포, 평면 압축과 평면 전방압출 및 축대칭 캔(can)의 후방압출에 있어서 금형 압력분포에 관하여 연구 발표하였다.⁽²⁻⁴⁾ 한편 Yukio Kojima 등은 간단하게 압력에 의한 금형의 탄성변형율을 측정하고 역으로 압력을 추정하는 방법으로 플라스틱신에 의한 모델 실험을 행하여 금형의 압력분포를 얻었다.⁽⁵⁾

또한 해석적 방법으로 많은 연구가 활발히 진행되어 John L. Frater는 금형 설계에 있어서 FEM을 적용하였고,⁽⁶⁾ S.Takahashi 등은 경계 요소법을 이용하여 단조 금형의 응력을 해석하였으며,⁽⁷⁾ 스퍼어 기어의 밀폐단조시 응력과 변형을 D.H.Hristov 등은 FEM을 이용하여 해석하였다.⁽⁸⁾ B.Raddad 등은 금형의 응력 상태를 탄성과 탄-소성 상태일 때 FEM에 의해 구하였고, 해석과 실험의 변형 결과를 비교하였다.⁽⁹⁾ A. Kocanda 등은 정밀 냉간단조에 있어서 금형 변형에 대한 양상을 FEM으로 고찰하였다.⁽¹⁰⁾

그러나 구체적인 모델 실험을 통하여 금형의 변형이 제품에 미치는 영향은 아직 구체적으로 연구된 바가 없다.

제조 현장에서는 정확한 치수의 최종형상을 시행착오 없이 조기에 개발하고 생산할 수 있는 방법이 필요하며, 이를 위해서 금형의 변형과 이에 따른 제품 변형 사이의 구체적인 정보를 필요로 하게 된다.

본 연구는 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 분석 후 제품의 공정 설계 및 금형 설계를 할 수 있는 기초자료를 제시하였다.

2. 금형의 변형

2.1 가압력의 계산⁽¹¹⁾

반밀폐 또는 완전 밀폐 업셋팅의 경우는 금형에 접

촉되는 부위의 유무와 금형과 펀치 사이의 버어(burr)발생의 유무에 따라 가압력의 많은 변화를 나타낸다.

일반적으로 가압력 P_m 은 식(1)과 같이 나타낸다.

$$P_m = A \cdot p_m = A \cdot C \cdot K_m \quad (1)$$

여기서 A 는 압축 후의 가공 단면적이고, P_m 은 평균 가압 압력을 나타내며, C 는 밀폐계수, K_m 은 평균 변형 강도를 나타낸다.

일반적인 밀폐계수 C 는 Fig. 1에 의해 사용된다.

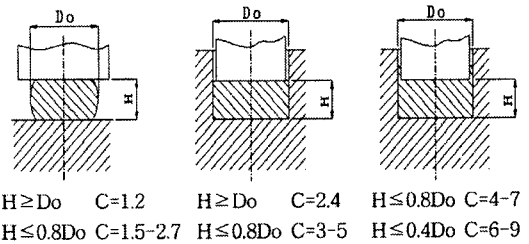


Fig. 1 Closing coefficient in closed die upsetting

2.2 금형에 걸리는 내압⁽¹¹⁾

냉간 단조에 있어서 금형의 설계는 금형이 가공 압력에 충분히 견디게끔 하여야 한다. 그러기 위해서는 주어진 가압 압력에 대해 금형에 작용하는 응력 및 그 분포를 알 필요가 있다. 금형에 사용되는 재료의 기계적 성질, 특히 인장 강도, 피로 강도, 항복강도 등은 열처리 조건이나 결정 입도 등에 영향을 받아 일률적으로 단정하기는 어려우나 대략 최대항복강도를 180-200 kg/mm² 정도(경도 HRC 60이상의 경우)로 생각하고 처리해야 한다.

펀치의 압력 p_p 와 금형 내벽에 가해지는 내압 p_i 와의 관계는 식(2)과 같다.

$$p_i = K \times p_p \quad (2)$$

여기서 K 는 가공 방식에 따라 정해지는 보정계수로서 반밀폐 또는 밀폐형 단조에서는 K 는 1로 계산된다.

2.3 금형의 탄성변형

성형 중 내압으로 금형에 탄성변형이 발생되어 제품 치수에 영향을 주며, 동일한 제품에 대해서도 성형조건 또한 변화하므로 정도가 높고 균일한 제품을 얻기 어렵다.

금형의 구멍 내벽면에 내압이 작용하면 두꺼운 원통에

관한 Lamé의 식에 의하여 다음 식 (3)과 (4)와 같이 직경방향 탄성변형량과 원주 방향 탄성변형율이 주어진다.

- 직경방향 탄성변형량 δ 는

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

- 원주방향 탄성변형율 ϵ_θ 는

$$\epsilon_\theta = \frac{\delta}{2r} = \frac{p_i r_i^2}{E(r_o^2 - r_i^2)} \left[(1 - \nu) + (1 + \nu) \frac{r_o^2}{r^2} \right] \quad (4)$$

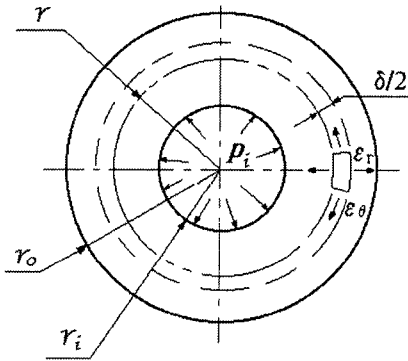


Fig. 2 Schematic diagram of the die subjected to internal pressure

3. 실험 방법

본 실험에 사용한 시험편 재료는 공업용 알루미늄 (A6061-O)이며, 금형은 냉간 단조용 금형재료로 많이 사용되고 있는 SKD11로 제작하였고, 변위를 측정하기 위하여 표면에 일정한 간격으로 스트레인 게이지(strain gauge)를 Fig. 3과 같이 부착하였다. Fig. 4는 가압 상태의 실험 장면을 보여준다.

실험 장치로서는 시험편을 가압하는데 50Ton 유압식 만능 재료시험기를 사용하였으며, 변형율은 스트레인 게이지(strain gauge) 전용 측정기를 이용하였다. 실험 방법은 만능 재료 시험기에 연마면으로 제작된 실험용 금형을 설치하고, MoS₂로 윤활된 시험편을 넣은 후 0.5Ton/min의 속도로 업셋팅을 하였다. 이 때 가압 압력은 만능 재료 시험기에서 얻었으며, 변형율은 금형의 표면에 연결된 스트레인 게이지(strain gauge)와 측정기를 통하여 컴퓨터

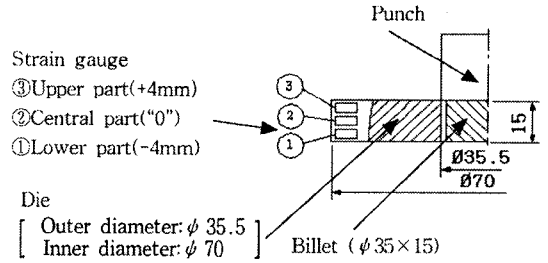


Fig. 3 Billet and die for experiment

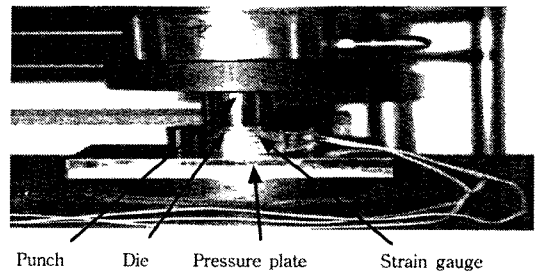


Fig. 4 Experiment for closed die upsetting

에서 가압이 진행되는 동안 데이터가 처리되었다. 업셋팅이 된 시험편은 직접 측정을 하였다. 실험에서 금형의 변형과 제품의 변형 관계를 비교하기 위하여 가압 압력을 변수로 업셋팅을 행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

실험에서 업셋팅시 하중과 변위 관계를 Fig. 5에서 보여 주고 있다. 그림에서 보면 미소한 변위에 대하여 초기부터 급격하게 하중이 상승한다. 이는 실험 조건에서 금형의 내경과 시험편의 외경이 0.5 mm의 작은 틈새를 가지고 있어 초기부터 시험편이 금형에 빠르게 접촉하면서 완전 밀폐 상태가 되기 때문이다.

시험편이 금형속에서 업셋팅이 되고 이젝팅되는 과정을 보면 Fig. 6에서 보는 것과 같이 3단계를 이루고 있다. 처음에는 펀치에 의해 시험편이 압력을 받는 상태, 펀치가 시험편에서 이탈된 상태, 즉 무부하 상태, 최종적으로 시험편을 금형에서 이젝팅된 상태가 된다. 이 과정을 금형의 표면에 부착된 스트레인 게이지(strain gauge)를 통하여 측정하면 금형의 변형 이력을 알 수 있다. 최종 하중에 도달될

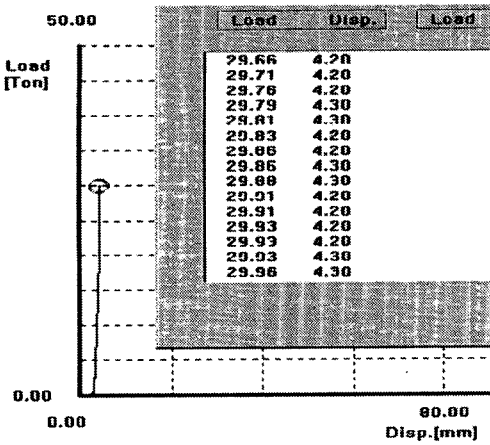


Fig. 5 Relation between punch load and displacement

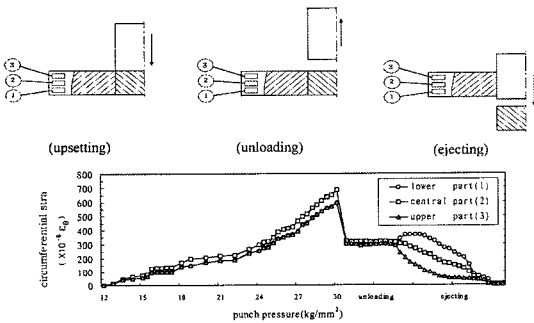


Fig. 6 History of circumferential strain at outer surface of die for punch pressure

때까지는 금형의 변형율이 증가하다가 무부하 상태에서는 일정한 값까지 탄성회복이 이루어지며 이젝팅시에는 금형과 시편의 접촉부위가 비접촉상태가 되면서 초기 상태로 회복됨을 알 수 있다. 이를 역으로 Lamé식을 이용하여 내경의 변형을 계산한다면 시편의 변형이력을 알 수 있다.

Fig. 7은 가압 압력에 대해 금형에 걸리는 내압을 식(2)에서 K를 1로 가정하여 계산하고, Lamé의 식(4)에 의하여 변형율을 계산한 결과와 실험 데이터를 비교하고 있다. 중앙부의 변형율이 상하부의 실험 결과보다 크게 나타났는데 이는 가압 압력을 받을 경우 중앙부가 변형이 많이 일어나는 일반적인 현상을 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 실제 변형율은 K가 1일 때의 Lamé식에 의한 이론치 변형율보다 항상 작은 값으로 나타났기 때문에 일반적으로 많이 사용하고 있는 K를 1로 가정하였을 때의 금형 내압으로 금형의 설계나 변형을 고려하는 것은 무리이며

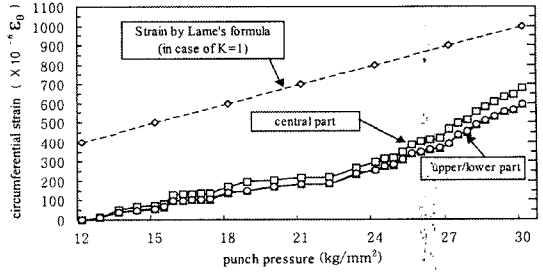


Fig. 7 Comparison of circumferential strain on outer surface of die between experiment and calculation

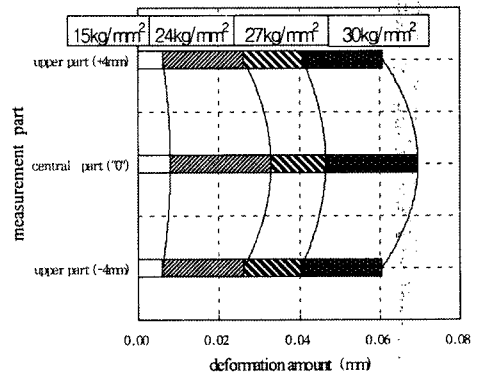


Fig. 8 Deformation amount inner radius of die along measured parts

반드시 보정이 필요하다

Fig. 8은 가압 압력에 따라 측정된 부위별 금형의 외부 변형율로부터 Lamé식으로 역계산한 내경변형량을 보여 준다. 가압 압력이 클수록 금형의 중앙부와 상하부의 차이가 점점 크게됨을 알 수 있다. 이것은 결국 실제 금형 속에 있는 제품의 외경치수 변형량과 동일한 것이다.

Fig. 9는 가압력을 받은 상태에서의 금형 내경 변형량과 가압 압력이 제거되고 금형속에 제품이 잔존하는 상태에서의 변형량을 보여준다. 가압 압력이 증가함에 따라 금형의 변형이 급격히 증가하다가 무부하 상태에서는 탄성회복의 결과로 금형 변형량이 감소하였다. 그러나 무부하 상태에서도 제품이 외경부위로 팽창된 상태를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 금형 중앙부에서 가압시, 무부하시의 제품 외경 변형량과 제품을 배출한 후 직접측정한 제품 외경의 변형량을 비교하여 보여준다. 최종적인 제품의 외경치수는 무부하시의 금형 내경 치수, 즉 업셋팅 후 금형 속에

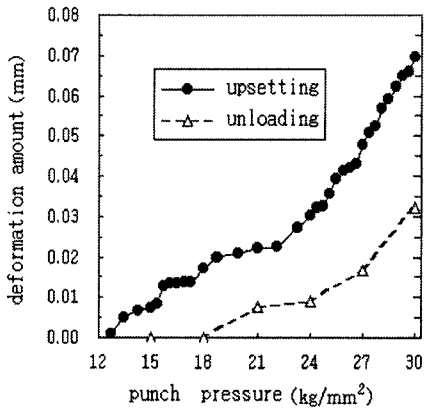


Fig. 9 Deformation amount of inner radius of die at upsetting and unloading states

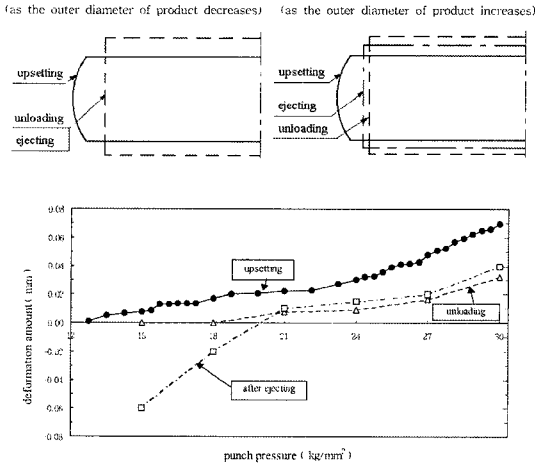


Fig. 10 Deformation amount of die and product

있는 제품의 외경과 상당히 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 배출된 제품의 외경은 초기 금형 내경에 비해 줄어드는 경우와 팽창하는 경우가 있다. 이는 시편을 가압시 축방향의 펀치 압력과 반경방향의 금형 압력이 작용하는데 소성가공 후 각 방향에 대한 치수회복은 소재에 작용하는 압력의 반대 방향으로 압력에 비례하여 탄성적으로 발생하며, 축방향에 대해서는 늘어나는 방향으로, 반경 방향에 대해서는 반경이 증가하는 방향으로 일어난다. 그러나 가압력이 작은 상태에서는 반경방향으로의 치수회복이 절대적으로 작기 때문에 축방향으로의 치수회복 영향으로 제품 외경이 금형의 내경보다 작아지게 된다. 가압력이 일정수준 이상에서는 무부하 상태에서 시편이 금형의 압력을 받고 있으므로 이젝

팅 후 반경방향으로 치수회복이 이루어진다. 따라서 업셋팅 공정에서 제품설계와 이에 따른 금형설계를 하기 위해서는 제품의 외경보다 일정량의 치수만큼 작게 금형 치수를 보정하여야 한다.

5. 결론

밀폐 업셋팅에서 금형과 제품 변형 관계를 금형의 표면에 스트레인 게이지(strain gauge)를 붙여 간단하게 측정하고, Lamé식을 이용하여 변형량을 계산하는 방법을 제시하였으며, 이 방법으로부터 가압력을 가하는 과정에서 직접 측정이 불가능한 제품의 외경변화 이력을 예측할 수 있었다.

실제 변형율은 K가 1일 때의 이론치 변형율보다 항상 작은 값으로 나타났기 때문에 일반적으로 사용하고 있는 K를 1로 가정하였을 때의 금형 내압으로 금형의 설계나 변형을 고려하는 것은 무리이며 반드시 보정이 필요하다

밀폐 업셋팅 후 배출된 제품의 외경은 줄어드는 경우와 팽창하는 경우가 있다. 이는 시편을 가압시 축방향의 펀치 압력과 반경방향의 금형 압력이 작용하는데 소성가공 후 각 방향에 대한 치수회복은 소재에 작용하는 압력의 반대 방향으로 압력에 비례하여 탄성적으로 발생하며, 가압력이 일정수준 이상에서는 무부하 상태에서 시편이 금형의 압력을 받고 있으므로 이젝팅 후 반경방향으로 치수회복이 이루어지는데 대부분의 유사한 밀폐 업셋팅 공정에서는 일정 수준 이상의 하중이 작용하므로 금형 내경의 치수보다 업셋팅 후 배출된 제품 외경의 치수가 커지게 된다. 따라서 밀폐 업셋팅 공정에서 제품 설계와 이에 따른 금형설계를 하기 위해서는 제품의 외경보다 일정량의 치수만큼 작게 금형 치수를 보정해야 하며 보정량에 대한 좀 더 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Shigeo Matsubara & Hideaki Kudo, 1991 -5, Devising and Calibration of a Simple Sensor for Determining Pressure Distribution on Tool-Work piece Interfaces, Journal of the JSTP, Vol.32, No.364, pp. 589-596.
- (2) Sigeo Matsubara & Hideaki Kudo, 1991-7, Nonuniform Pressure Distribution on Punch Nose Surface in Axisymmetric Cold Fording Processes, Journal

- of the JSTP, Vol.32, No.366, pp. 874~879.
- (3) 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.
 - (4) 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.
 - (5) Yukio Kojima; Toshihiro Mizuno; Toshiya Kohga and Takaji Mizuno, 1996-9, Measurement of Contact Pressure in Experiment With Plasticine, Journal of the JSTP, Vol.37, No.428, pp. 951~956.
 - (6) 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.
 - (7) S.Takahashi & C.A.Brebbia, 1990, Forging Die Stress Analysis Using Boundary Element Method, Advanced Technology of Plasticity, Vol.1, pp. 203~210.
 - (8) D.H.Hristove; B.I Tomov and D.K.Kolev, 1990, Stress and Strains in a Die for Closed - die Forging of Cylindrical Spur Gears, Journal of Processing Technology, Vol. 23, pp. 55~63.
 - (9) B.Raddad and A.Kocanda, 1993, On the Strength Criteria for High Speeded Ring-shaped Dies, Advanced Technology of Plasticity, pp. 242~245.
 - (10) A.Kocanda; R.Cacko; P. Czyzewski, 1996, Some Aspects of Die Deformation in Net-shape Cold Forging, Advanced Technology of Plasticity, pp. 367~370.
 - (11) 尺辺弘, 1974, 冷間鍛造の基礎と應用, 日本, 株式會社産報.