

냉간단조용 금형의 변형모드에 따른 탄성변형량의 측정 및 유한요소 해석

이대근* · 이영선* · 이정환*

Measurements and FEM Analysis of Elastic Deformation According to the Forging Stages in Cold Forging Die

D.K. Lee, Y.S. Lee, and J.H. Lee

Abstract

In cold forging, the elastic behavior of the die has a direct influence on the accuracy of the forging part. And the die dimension is continuously changed during the loading, unloading, and ejecting stage. In this paper, we evaluated the elastic deflections of cold forging die during loading, unloading, and ejecting stage. Uni-axial strain gauges are used to measure elastic strain of die during each forging stage. Strain gauges are attached on the surface of die. A commercial F.E.M. code, DEFORM-2DTM is used to predict elastic strain of die. Two method of F.E.M. analysis are used to compare with measured and calculated elastic strain. One is to regard the die as rigid body over forging cycle. And then, the die stress is analyzed by loading the die with pressure from the forging part. The other is to regard the die as elastic body from forging cycle. The elastic strain of die is calculated and the die is elastically deformed at each step. The calculated results under the elastic die assumption are well agreed with experimental data using strain gauges.

Key Words : Forging Stage, Elastic Deformation, Strain Gauge, Elastic strain

1. 서 론

냉간 단조품의 정형 제조 기술은 해석기술의 발전과 더불어 정밀도 향상을 위한 연구로 발전되어 왔다. 특히 치수 정밀도 향상을 위한 기술은 냉간 단조에 있어서 가장 중요한 항목이며, 이를 위해서 많은 연구자들에 의해서 여러가지 방법으로 연구가 수행되어 왔다. Hilley⁽¹⁾는

스트레인 게이지를 이용하여 봉 인발 공정을 분석하였으며, Park⁽²⁾은 금형 측면에 스트레인 게이지를 부착하여 금형의 원주방향의 변형률을 정량적으로 분석하였다. 수치 해석적인 방법으로는 Sadeghi⁽³⁾등이 치수 정밀도 연구를 위하여 축대칭 제품 단조공정 연구를 수행하였고, Raddad⁽⁴⁾등은 탄성 및 탄소성 해석과 실험값을 비교하였다. Balendra⁽⁵⁻⁶⁾는 유한요소 해석을 통하여 다양한 공

* 한국기계연구원 소성용융그룹

정밀 금형의 치수 변화를 고찰하였다.

본 연구에서는 스트레인 게이지를 이용한 실험적 연구와 F.E.M. 해석을 통하여, 수 μm 에 해당되는 탄성 변형량을 분석함으로써 실 제품의 정밀도 향상을 위한 응용에 이용하고자 하였다. 또한 실험에 사용된 모델은 외경이 3부분으로 구분되는 형상으로 2단 전방압출에 의해 제조되었다. 금형의 탄성 변형량을 측정하기 위해 금형의 상단에 스트레인 게이지를 부착하여 원주방향 탄성 변형률을 측정하였으며, 하중 부가(Loading), 하중 제거(Unloading), 단조품 취출(Ejecting)단계에서의 금형의 탄성 변형량의 변화를 정량적으로 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험

본 연구에 사용된 단조품 모델은 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 정밀 측정이 용이하면서 부위별 변형률 분포가 변화되는 형상을 선정하였다. 실험에 사용된 소재는 구상화 소둔 처리된 저탄소강 S10C(AISI1010)를 사용하였으며, 원활한 유동을 할 수 있도록 윤활처리되는 인산염 피막처리를 하였다. 실험에 사용된 장비는 수치제어가 가능한 Tinius Olsen 200 ton 유압프레스를 사용하였으며 금형은 초경 인서트(금형강(SKD61)에 $100\mu\text{m}$ 간극으로 보강되어있는 구조)를 이용하였다.

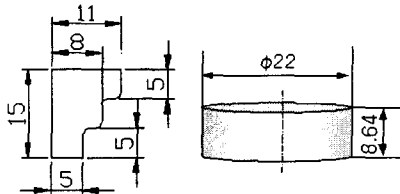


Fig. 1 Dimension of forged part and workpiece

금형의 원주방향의 변형률을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 금형의 상단에 부착하였다. 실험에 사용된 스트레인 게이지는 게이지 길이 2mm이며 게이지 저항이 120Ω 인 게이지로써 신호는 DAS(Data Acquisition System)를 통하여 처리하였다. 금형의 상단 표면에 부착한 스트레인 게이지의 위치는 Fig. 2에 나타나 있다.

2.2 유한요소 해석

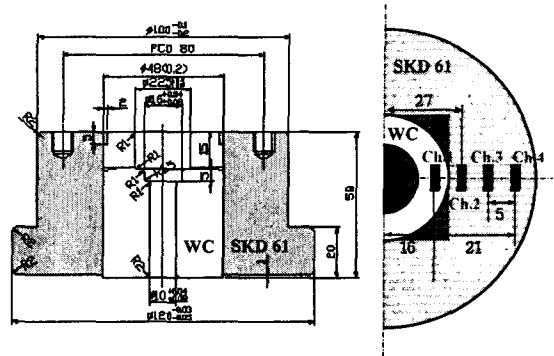


Fig. 2 Dimension of model die and attachment of strain gauges

소재의 변형 해석과 금형의 탄성 변형 해석은 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-2DTM를 이용하였으며 2가지 방법에 의하여 금형의 탄성 변형을 해석하였다.

첫 번째 방법은 소재의 변형 해석과정에서 금형을 강체로 가정하여 해석한 뒤 금형을 다시 탄성체로 모델링하여 소재가 금형에 가해지는 응력을 내삽(Interpolation)하여 금형의 응력을 해석한다.(이하 강체 금형 모델, "Rigid die model"이라 함) 이와는 다르게 두 번째 방법은 소재의 변형 해석과 금형의 응력 해석을 동시에 수행할 수 있도록 금형을 탄성체로 가정하여 해석하는 방법이다.(이하 탄성체 금형 모델, "Elastic die model"이라 함)

실험에 사용된 금형은 금형강으로 제조된 보강링에 초경 다이 인서트가 열박음(Shrink-fitting)되어 있는 구조로써 이를 고려하여 해석을 수행하였다. Table 1은 유한요소 해석에 사용된 소재와 금형의 물성치이며, 아래의 식은 구상화 소둔된 S10C를 냉간 압축시험으로 얻어진 유동응력 식이다.

$$\bar{\sigma} = 759 \varepsilon^{-0.24} \text{ (Mpa)}$$

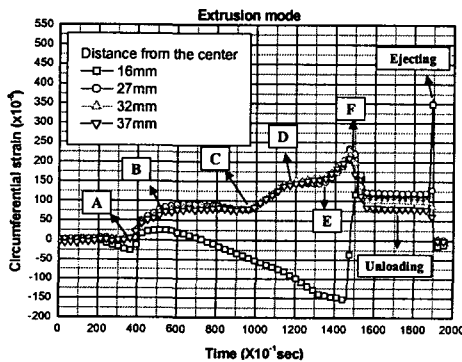
Table 1 Mechanical properties of die materials

Die Material	Hardness	Young's Modulus (N/mm ²)	Yield Strength (N/mm ²)	Poisson's Ratio
W.C	85(H _{RA})	500000	3100	0.23
SKD61	47(H _{RC})	212000	1200	0.30

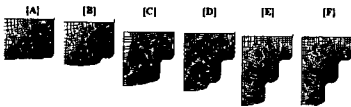
3. 결과 및 분석

3.1 소재의 변형과정 및 금형의 탄성변형

단조실험은 금형응력 상승과 파손을 방지하기 위해 편치 이송량을 기준으로 하지 않고 강제 금형 모델의 FEM해석 결과로 얻어진 소요하중 110 ton을 이용하였다. Fig. 3은 스트레인 게이지를 이용하여 측정된 성형 공정에서 위치별 금형의 탄성 변형률을 나타내는 곡선과 성형 단계별 소재의 변형 형상을 나타내고 있다. 탄성 변형률은 1단 전방압출이 이루어지는 시점인 [A]지점에서 하중이 증가되며, [B]지점부터 [C]지점까지 정상상태의 1차 전방압출이 이루어진 후, [D]부터 [E]까지 2차 전방압출이 이루어진다. [E]부터 [F]까지는 금형 하단에 소재가 접촉되어 하중이 증가되는 것으로 하중 곡선과 동일한 형태를 나타내고 있다.



(a) Circumferential strain measured with strain gauges



(b) Deformed mesh at each step(DEFORM-2D)

Fig. 3 Circumferential strains measured and deformed meshes at each step

하중 부가(Loading), 하중제거(Unloading), 단조품 취출(Ejecting)에서 측정된 변형률은 Table 2에 나타나 있다. 하중 부가 단계에서의 초경 다이 인서트는 1.54×10^{-4} 압축 변형을, 보강링의 경우는 $2.14 \sim 2.41 \times 10^{-4}$ 범위로 중심에서부터 멀어질수록 인장 변형이 점차 작아짐을 알 수 있다. 또한 하중제거 단계의 경우는 소재가 받는 응력이 작아지므로 변형률이 $0.48 \sim 1.33 \times 10^{-4}$ 범위만큼 작아짐을 알 수가 있으며, 단조품 취출 단계에서는 단조

품이 금형의 상단에 응력을 가하므로 초경 다이 인서트 상단에서는 압축 변형률에서 인장변형률로 변화됨을 알 수가 있다.

Table 2 Circumferential strain measured with strain gauges

Distance from the center	Circumferential strain (10^{-4})		
	Max. Loading	Unloading	Ejecting
16mm	-1.54	-1.05	3.64
27mm	2.41	1.20	1.23
32mm	2.23	1.01	0.81
37mm	2.14	0.81	0.58

3.2 유한요소 해석 방법에 따른 영향 분석

금형의 탄성변형을 해석할 수 있는 방법은 앞서 설명한 바와 같이 2가지가 있다. 또한 초경 다이 인서트와 보강링 사이에 열박음에 의한 효과를 고려하였다. 하지만 유한요소 해석값은 실험값에 비해 10배 이상 차이가 나타난다. 이는 열박음에 의한 변형률이 과대 평가되고 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 측정된 변형률의 경우 열박음이 이루어진 후에 금형이 가공되기 때문에 열박음시에 발생하는 변형률은 측정되지 않는 것과는 달리, 유한요소 해석에서는 열박음에 의해 발생하는 변형률을 포함하여 해석을 수행하기 때문이다. 따라서 열박음만 해석하여 그 값을 보정하면 Fig. 4와 같이 실험값과 유사함을 알 수가 있다. 또한 보정한 값을 실험값과 비교하면 강제 금형 모델에서 계산된 변형률보다 탄성체 금형 모델에서 계산된 변형률이 더 우수한 일치를 나타냄을 알 수가 있다. 그 오차는 최대 1.3×10^{-5} 의 미소한 차이를 나타내고 있으며 반경치수로 환산하면 Table 3과 같이 μm 단위의 차이를 나타내고 있어 정량적인 분석을 가능하게 할 것으로 기대된다.

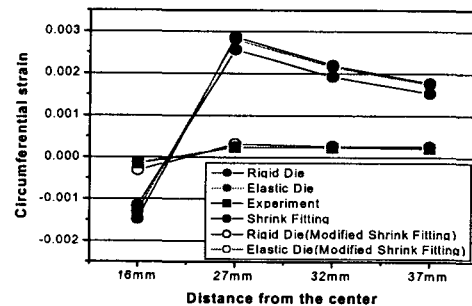


Fig. 4 The comparisons of circumferential strain between experiment and each FEA

Table 3 Comparison of experiment and FEA result for radius change in maximum loading stage [μm]

Distance from the center	Change of radius dimension		
	Experiment	F.E.M.	Error
16mm	-2.63	-2.26	0.37
27mm	6.51	6.75	0.24
32mm	7.14	7.42	0.28
37mm	7.92	8.14	0.22

3.3 단조 금형의 단계별 탄성 변형량

Fig. 3에서 보는바와 같이 초경 다이 인서트에서 측정된 변형은 단계별로 보강링에서 측정된 값과는 다른 거동을 하므로 그 값을 정리하면 다음과 같다. 성형 공정이 종료된 후 하중이 제거되면 초경 다이 인서트 상단은 수축되며, 또한 소재의 취출시 금형의 초경인서트 부위에서 변형률이 급격히 팽창하는 것은 성형시 발생하는 굽힘 모멘트에 의해 초경인서트 부위에 압축변형률이 발생된 후 취출되면서 소재가 금형에 압력을 가하기 때문이다. 이러한 현상을 각 단계별로 정리하면 Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 무부하 상태에서 금형은 하중을 가하면 상부 초경인서트는 굽힘 모멘트에 의해서 상단에서 압축변형을 하고 하중을 제거하면 금형의 상단은 인장변형을 하여 팽창을 한다. 그리고 소재를 취출할 때는 소재가 금형에 압축응력을 가하므로 금형은 최대인장변형을 하고 취출후에는 가공된 치수로 복귀한다. 따라서 ② \Rightarrow ① \Rightarrow ③ \Rightarrow ④ \Rightarrow ②와 같은 치수변화를 반복한다.

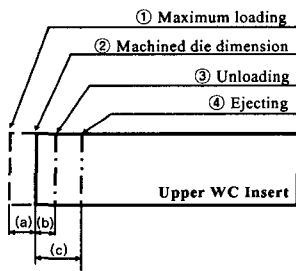


Fig. 5 Change of WC insert dimension in each stages

실험값과 유한요소 해석값을 단계별 실험값과 비교하려면 탄성체 금형 모델로써 해석한 경우에만 하중제거 단계와 단조품 취출 단계를 해석할 수 있다. 그러므로 단계별 치수변화는 탄성체 금형 모델로써 해석을 수행하였으며, Table 5에서 보는바와 같이 하중부가 단계는 반경방향의 변형률이 0.22~0.37 μm 의 범위로 매우 유사하다. 그러나 실험에서 측정된 값을 볼 때, 하중제거 단계

와 단조품 취출 단계에서는 소재의 탄성 팽창량이 금형의 탄성 팽창량에 커다란 영향을 미치지만 해석시에는 소재를 강소성으로 가정하므로 소재의 탄성 변형이 고려되지 않기 때문에 실제보다 금형의 탄성팽창이 미소하게 나타나는 것이다. 각 단계별로 측정된 실험값과 해석값의 탄성변형률을 반경변화로 환산한 결과를 비교하면 Fig. 6과 같다. 따라서, 하중제거와 단조품 취출시까지 소재와 금형의 탄성변형률을 제어하기 위해서는 소재의 탄성변형이 고려될 수 있는 소재를 탄소성으로 가정하여 해석하는 연구가 필요함을 알 수가 있다.

Table 4 Deflection measured and calculated at each stages [μm]

Change of radius dimension	Distance from the center	Step		
		Loading	Unloading	Ejecting
Experiment	16mm	-2.63	-1.53	5.67
	27mm	6.51	3.24	1.66
	32mm	7.14	3.23	3.32
	37mm	7.92	3.00	2.59
F.E.M.	16mm	-2.26	-1.60	-0.48
	27mm	6.75	0.27	0.27
	32mm	7.42	1.28	1.28
	37mm	8.14	3.33	1.48

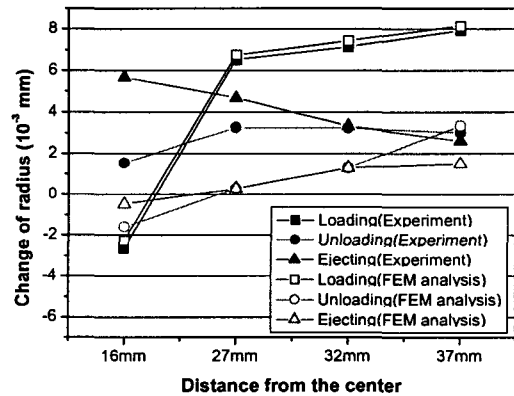


Fig. 6 Deflection measured and calculated at each stages

4. 결론

실제 금형의 탄성팽창과 유한요소 해석에 의한 금형의

탄성 팽창량의 관계를 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 금형의 상단에 스트레인 게이지를 부착하여 단조 시 위치별 금형의 변형량을 측정하여 하중 부가, 하중 제거, 단조품 취출시 금형은 탄성 범위 내에서 압축과 인장변형을 반복한다.

(2) 금형의 탄성 변형률을 예측하기 위하여 소재의 변형해석과 금형의 탄성변형이 동시에 해석이 가능한 방법인 탄성체 금형 모델이 강체 금형 모델보다 우수한 결과를 얻을 수 있으며 μm 단위의 변형률을 예측할 수 있었다.

(3) 보강링을 이용하는 냉간 단조 금형의 경우 금형의 탄성 변형량은 열박음 효과를 고려하여 해석해야 하며, 이를 위해서는 변형을 계산시 열박음에 의해 발생하는 변형률을 해석 결과에서 제거하는 보정작업이 필요하다.

(4) 소재를 강소성체로 가정하여 해석한 결과 하중 부가 단계에서는 μm 단위의 예측 정밀도가 나타났으나, 하중 제거와 단조품 취출시에는 μm 단위에서 오차를 나타내고 있었다. 그 원인은 하중 제거단계와 단조품 취출 단계에서는 소재의 탄성 변형이 금형의 탄성 팽창에 영향을 미치지만, 소재를 강소성체로 가정하여 해석할 경우는 소재의 탄성 변형이 고려되지 않기 때문이다.

이상의 결과를 토대로 금형의 탄성 변형에 대한 정량적인 해석 방법을 제시하였으며, 소재를 탄소성체로 가정하여 해석하는 방법에 대한 연구를 계속적으로 수행함으로써 탄성 변형에 대한 이론적인 체계화와 무절삭 정밀단조 기술의 확립을 가능하게 할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 국가지정연구실(NRL)과제로 수행된 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) M.T.Hillery and S. Griffin, 1994, "An embedded-strain-gauge technique of stress analysis in rod drawing", J. of Material Processing Technology, Vol. 47, pp.1~12.
- (2) Y.B. Park, K.H. Lee, 2001, "Study on the deformation of die and product in closed die upsetting", J. of Material Processing Technology, Vol. 118, pp. 417~421.
- (3) M.H. Sadeghi, T.A. Dean, 1991, "Analysis of dimensional accuracy of precision forged axisymmetric components", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.205, pp.171~178.
- (4) B. Raddad, A. Kocanda, 1993, "On the strength criteria for high stressed ring shaped dies, Proceedings of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity, Beijing, China, Sep. pp.5~9.
- (5) X. Lu, R. Balendra, 1996, "Evaluation of FE models for the calculation of die-cavity compensation", J. of Materials Processing Technology, Vol.58, pp.212~216.
- (6) R. Balendra, Y. Qin, X.Lu, 2000, "Analysis, evaluation and compensation of component-errors in the net-forming of engineering components", J. of Materials Processing Technology, Vol.106, pp.204~211.
- (7) Y.S. Lee, J. Choi, J.H. Lee, 2000, "The prediction of elastic deformation for cold forging die", 2nd JSTP International Seminar on Precision Forging, pp. 213~218.
- (8) 이대근, 이영선, 김원일, 이정환, 2001, "단조형식에 따른 단조품과 금형의 탄성변형에 관한 연구", '01 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 C, pp.586~591.