

단조형식에 따른 단조품과 금형의 탄성 변형에 관한 연구

이대근* · 이영선*** · 김원일** · 이정환***

The elastic strain analysis of forged product and die according to the forging mode

D. K. Lee*, Y. S. Lee***, W. I. Kim**, J. H. Lee***

Key Words: Elastic Deformation(탄성변형), Strain Gauge, Cold Forging(냉간단조), Forging Mode (단조형식), FEM Analysis(유한요소 해석)

Abstract

In the cold forging, elastic deformation of the die has been investigated to improve the accuracy of cold forged parts with F.E.M analysis using DEFORM, and with experiments using strain gauges.

In the experiments, initial billet was selected to easily find the effect of elastic deformation according to the forging modes, extrusion and upsetting type, and only extrusion type. Elastic deformation of the die can be obtained by the signal from the strain gauges and this signal can be amplified by data acquisition system during the process. In the F.E.M analysis, two types of analysis are used to predict elastic strain of the die.

To improve an accuracy of forged product and die dimension, this study compared with strain distribution between experiment and F.E.M analysis. As a result, the history of the deformation of the die and elastic recovery of forged product can be obtained by the elastic strain analysis of forged product and die according to the forging modes.

1. 서론

최근 세계적으로 단조공정에 있어서 제품의 치수정밀도를 향상시키는데 필요한 시간과 비용을 절약하기 위하여 상용 유한요소 코드를 많이 사용하고 있다. 또한 단조가공에 있어서 후가공 공정을 없애기 위하여 열간 단조에서 가공 후 열수축에 의한 제품의 치수 변화가 없는 냉간 단조로 이동하는 추세에 있다. 냉간 단조는 금형의 정도

가 제품의 정도에 직접적인 영향을 미치므로 금형의 탄성 변형량에 따른 치수 정밀도가 단조품에 미치는 영향은 많은 사람들에 의하여 그 중요성이 강조되어 왔다. 특히 M. H. Sadeghi와 T. A. Dean은 금형의 탄성 변형량, 소재의 열변형량, 단조후 금형의 수축, 그리고 금형 가공에 있어서의 전극의 크기에 따른 변화에 대하여 연구를 하였다.

본 연구에서는 단조시 단조형식, 특히 업셋팅과 전방 압출에 따른 금형의 탄성 변형량의 영향을 강소성 유한 요소 프로그램인 DEFORM을 사용하여 유한 요소법을 이용한 금형의 탄성변형 해석과 금형에 단축 스트레인 게이지를 부착하여 단조시 금형에 발생하는 실제 변형률을 측정 후 비교 분석한 뒤 고찰하여 정도가 높은 단조품을 얻기 위한 금형의 탄성변형을 고려한 정밀도 높

* 경남대학교 기계공학과 대학원

** 경남대학교 기계자동화 공학부

*** 한국기계연구원

은 금형 설계의 기초자료를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 스트레인 게이지를 이용한 금형의 탄성변형 측정실험

2.1.1 단조품과 금형의 선택

본 연구에서 선택한 최종형상은 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 측정이 용이하고, Preform에 따른 단조 형식을 수립할 수 있는 모델을 선택하였다. 최종형상의 부피가 3285.35mm^3 이므로 초기 시편의 크기는 전방 압출과 업세팅(이하 복합 형식이라 함)을 위한 $\phi 16 \times 16.34$ 시편과 전방 압출(이하 압출 형식이라 함)만을 위한 $\phi 22 \times 8.64$ 시편의 두 종류를 만들어서 실험하였다. 이와 같은 단조형식으로 최종형상을 얻어서 그 값들을 비교하였다. 또한 시편의 소재는 탄소강으로 성형성이 좋은 S10C를 선택하였고 시편에는 인산염 피막처리를 하였다.

금형은 최종 모델의 치수를 맞추어서 분할형 냉간 단조 금형을 제작하였으며, 초경다이 인서트(중심에서 22mm)와 보강링으로 SKD61 소재를 사용(중심에서 55mm)하여 제작하였다. 또한 실험 장비는 Timius Olsen 200톤 유압프레스를 사용하였으며 프레스의 수평 정밀도를 향상시키고 편차

의 정밀한 수직압축을 위하여 다이 셋(Die set)에 설치하여 실험하였다.

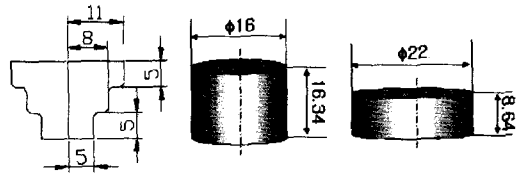


Fig. 1 Specimens of forged parts

2.2.2 스트레인 게이지 및 신호 처리

변형률(Strain)은 기계적 하중을 받는 대상물이나 재료에 발생하는 작은 변위의 측정방법은 여러 가지가 있으나, 공간 분해능이 좋고, 환경의 영향을 적게 받고, 동적 스트레인 측정을 위한 높은 주파수 응답 특성을 가지는 것은 저항 스트레인 게이지(Bonded resistance strain gauge)로써 스트레인 게이지는 변형률을 전기적 신호로 실시간 측정하고 기록할 수 있기에 탄성 범위내의 변형률을 직접적으로 측정할 수 있다. 스트레인 게이지는 전기 절연물인 기판(Base Material), 변형량을 감지하는 감지 저항부(Sensing Alloy), 도선(Lead Wire)을 연결하는 납땀부위(Terminals)로 구성되어 있으며 접착제를 사용하여 측정하고자 하는 곳에 부착하여 사용한다.

시편의 변위에 의하여 발생한 감지 저항부의 변형량은 스트레인 게이지의 저항값을 변화시킨

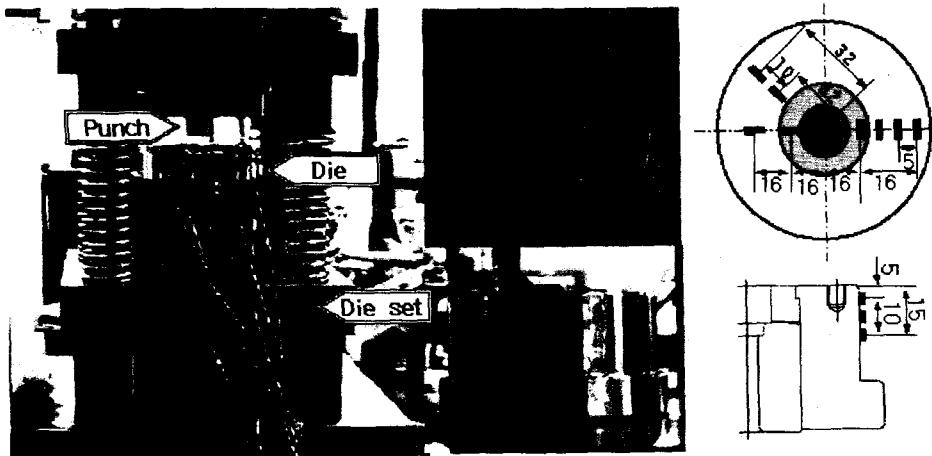


Fig. 2 The locations of strain gauges attachment

다. 이렇게 변화된 전기적 신호는 DAS(Data Acquisition System)를 통하여 증폭되며 컴퓨터로 전송되어 변형률을 측정할 수 있다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 금형과 그 위에 부착한 스트레인 게이지와 부착 위치를 나타낸 그림이다. 본 실험에서 사용한 스트레인 게이지는 미국의 Micro-Measurement Dicision사의 Precision Strain Gages(모델명 : EA-06-062AP-120) L Type으로써 게이지 길이(Gauge lengths)는 3.2mm이며, 저항값은 $120.0 \pm 0.15\%$, 그리고 게이지 팩터(Gage factor)는 $2.065 \pm 0.5\%$ 이다. 이 스트레인 게이지를 사용하여 반경 방향, 원주 방향에 스트레인 게이지를 부착하였다. 금형의 중심에서 16, 27, 32, 37mm로 각 방향으로 4개씩 부착하고, 금형의 측면부위에 금형의 상부에서부터 5mm간격으로 3개를 부착하여 측면의 원주방향의 변형량 차이를 분석하였다.

실험 장치는 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 200 ton Tinius Olsen 유압프레스를 사용하였으며 램 스피드는 3mm/min로 주었으며 성형하중은 금형의 손상을 우려하여 DEFORM해석에서 얻은 110 ton을 가하였다.

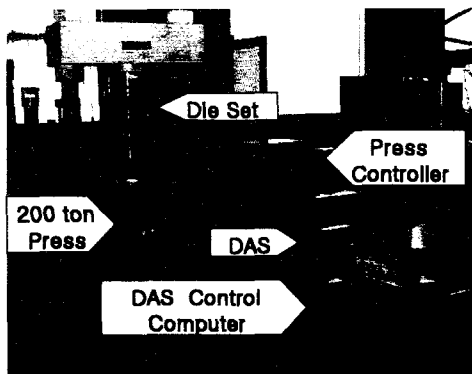


Fig. 3 Equipment of this experiment

2.1 유한요소법에 의한 금형의 탄성변형 해석

소재의 단조형식에 따른 성형해석과 금형의 탄성변형 해석을 예측을 위하여 강소성 유한 요소 해석 프로그램(DEFORM - 2D)을 이용하였다.

먼저 소재의 성형성을 고찰하기 위하여 금형을 강체로 가정하여 단조형식별로 해석을 수행하였다. 다음으로 금형을 강체로 가정하여 단조형식

별로 해석을 수행하여 그때 제품의 표면에 발생하는 압력분포를 구하고, 그 결과를 탄성체로 고려한 금형의 표면에 경계조건으로 부과하여 금형에 발생하는 응력 및 변형률을 해석하였다. 이러한 방법에 의하여 해석에 의하여 얻어진 하중 - 변위 값과 금형의 변형률 값을 실험과 서로 비교하였다.

Table 1은 금형을 탄성체로 해석한 경우 초경 인서트와 보강링의 소재 물성치를 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of die materials

| Die Material | Hardness | Young's Modulus (N/mm ²) | Yield Strength (N/mm ²) | Poissin's Ratio |
|--------------|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| W.C | 85(H _R A) | 500000 | 3100 | 0.23 |
| SKD61 | 47(H _R C) | 212000 | 1200 | 0.3 |

3. 연구 결과

3.1 스트레인 게이지에 의한 금형의 탄성변형

200 ton 유압 프레스를 사용하여 하중을 가할 때 스트레인 게이지로부터 얻은 금형의 탄성 변형을 측정 한 결과는 Fig. 4와 같다. 금형은 분할형이므로 시일링 테이퍼가 있어 초경 다이 인서트와 보강링 사이에 모멘트가 작용하여 성형시 금형에 부분적 압축변형이 발생하는 것으로 생각된다. 특히 Fig. 4의 ㉠과 ㉡에 나타난 복합형식의 금형의 중심으로부터 32mm영역의 반경방향으로 변형률 0.0001과 금형의 중심으로부터 27mm영역 원주방향의 변형률 0.00015의 압축 변형률이 발생됨을 알 수가 있다. 또한 Fig. 4의 ㉢에 나타난 압출 형식에서는 금형의 중심으로부터 16mm영역의 원주방향의 변형률 0.00015의 압축 변형률이 발생됨을 알 수가 있다. 금형 측면에서 측정 한 변형률은 형식별로 비슷한 양상을 보이지만 최대 변형률이 발생하는 위치는 금형의 상단으로부터 10mm위치로써 0.00014의 변형률을 가진다. 또한, 금형은 단조 형식별 최종 금형의 최대 탄성 변형률의 크기는 거의 일치한다. 하지만 위치에 따른 금형의 탄성변형의 분포는 단조형식에 따라 다르게 작용함을 알 수가 있다.

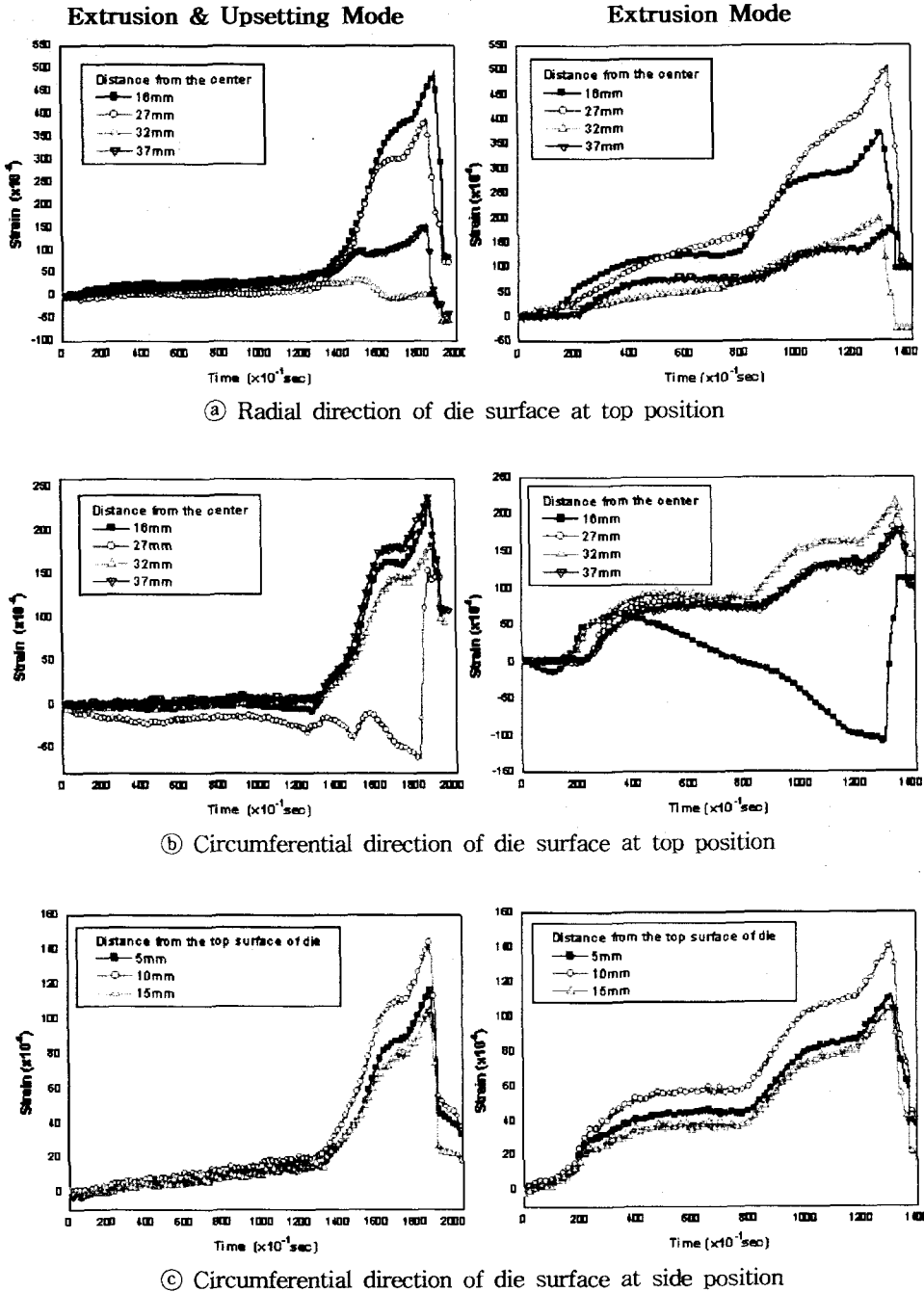


Fig. 4 The elastic strain measured in die

Fig. 5에서 보듯이 제품의 복합 형식에서의 사진을 보면 유한요소 해석과 같이 업세팅이 일어난 후 압출이 일어남을 추측 할 수가 있으므로 변형률을 비교하면 압출이 더 큰 하중이 소요됨

을 알 수가 있다. 두 단조 형식에 따른 최종 제품의 치수를 비교할 때 지름의 변화는 거의 일치 하지만 하중을 110톤 가하였을 때 제품의 높이를 비교하면 복합형식의 경우 15.168mm이고, 압출형

Table 2 Elastic strain calculated by F.E.M and measured by strain gauge

| Direction | | Radial direction of die surface at top position | | | | Circumferential direction of die surface at top position | | | | Circumferential direction of die surface at side position | | |
|------------|-----|---|----------|----------|----------|--|----------|---------|---------|---|---------|---------|
| | | 16mm | 27mm | 32mm | 37mm | 16mm | 27mm | 32mm | 37mm | 5mm | 10mm | 15mm |
| F.E.M | E&U | 0.00027 | -0.00001 | 0.000004 | -0.00005 | -0.00062 | 0.00051 | 0.00043 | 0.00037 | 0.00023 | 0.00019 | 0.00015 |
| | E | 0.00029 | -0.00002 | -0.00001 | -0.00007 | -0.00074 | 0.00054 | 0.00045 | 0.00038 | 0.00023 | 0.00020 | 0.00015 |
| Experiment | E&U | 0.00048 | 0.0003 | -0.00001 | 0.00016 | 0.00011 | -0.00015 | 0.00018 | 0.00024 | 0.00012 | 0.00015 | 0.00011 |
| | E | 0.00037 | 0.00048 | 0.00019 | 0.00018 | -0.00011 | 0.00014 | 0.00019 | 0.00015 | 0.00011 | 0.00014 | 0.00010 |

식의 경우 15.054mm로써 높이가 0.11mm정도의 차이를 보였다. 이것은 단조형식별 제품의 탄성 회복량의 차이에 의한 것으로 생각된다.

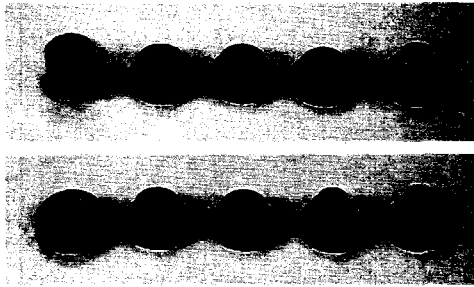


Fig. 5 Specimens according to forging process

3.2 유한 요소해석에 의한 금형의 탄성변형해석

Table.2는 DEFORM 해석 결과의 최종 해석 스텝에서 얻어진 금형의 각 방향별 변형률과 실험에서 얻어진 결과를 비교한 표로써 금형의 최종 탄성 변형률은 단조 형식에 따른 변형률은 거의 일치하지만 유한 요소해석에 의한 금형의 변형률과 실험에 의한 금형의 변형률의 차이는 최대 0.00073 차이가 있고 작게는 0.00004 차이를 나타낸다.

또한, 실험에 의한 압출 형식에서 반경방향의 변형률을 제외하면 금형은 인장 변형만 발생하는 것이 아니라 압축 변형이 일어남을 알 수가 있으며 복합형식보다 압출형식의 경우 금형의 변형률

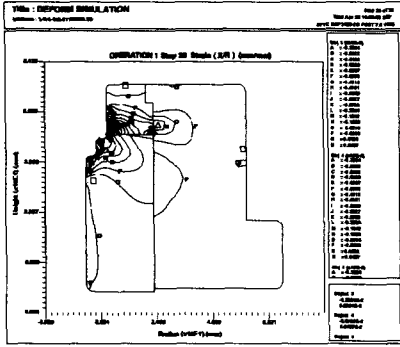
이 더 커지며 소재의 응력이 더 큰 것을 알 수가 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-2D에서 얻어진 마지막 스텝에서 금형의 반경방향의 변형률과 원주방향의 변형률 분포를 나타내는 그림으로써 변형률의 분포는 비슷하다.

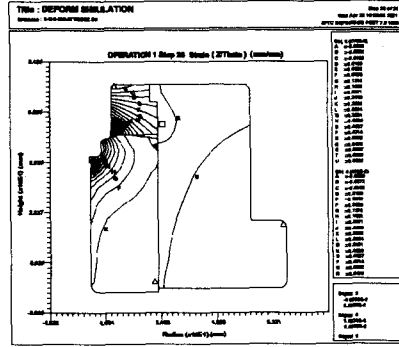
4. 결론

본 연구를 통하여 냉간 단조시 금형의 탄성 변형률을 스트레인 게이지로 정량적으로 측정하여 단조형식에 따른 금형의 실제 거동을 예측할 수 있었으며, 금형의 탄성 변형률을 고찰하여 지금까지 강소성 유한요소 해석 프로그램에 대한 오차 범위 검증이 부족하였으나 실제 실험에 의하여 얻어진 금형의 탄성 변형률과 강소성 유한요소 해석 프로그램에 의하여 얻어진 금형의 탄성 변형률과의 비교를 통하여 이론과 실험의 오차 범위를 제시함으로써 단조 형식에 따른 정도가 높은 금형 제작의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

금형의 탄성변형률 측정시 주위로부터 발생하는 노이즈를 개선하고, 강소성 유한 요소 해석 프로그램의 입력 데이터와 경계조건(Boundary conditions)을 여러 측면에서 실제와 좀더 실험과 유사하게 설정을 하면 지금보다 정밀한 변형률 0.0001 이하의 오차 범위 내에서 예측이 가능할 것으로 기대된다.

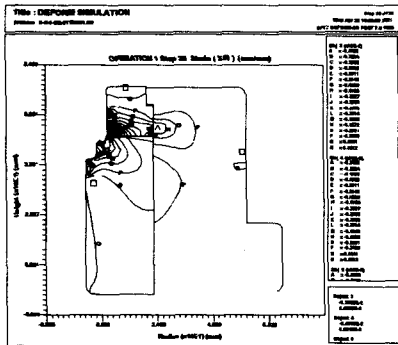


Radial direction

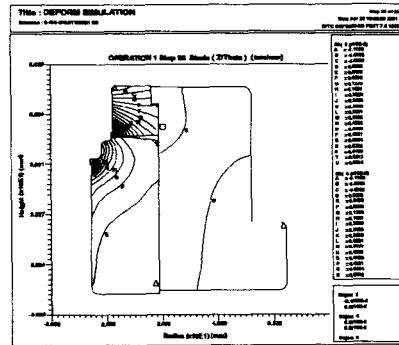


Circumferential direction

Fig. 6 Elastic strain distribution for final step in extrusion and upsetting mode



Radial direction



Circumferential direction

Fig. 7 Elastic strain distribution for final step in extrusion mode

참고문헌

- (1) 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.
- (2) James W. Dally, William F. Riley "Experimental Stress Analysis" McGraw-Hill, Inc.
- (3) M.N.Ravindranath, R.Krishna Kumar, 2000, "Simulation of cold forging using contact and practical adaptive meshing algorithms" J. of Materials Processing Technology, Vol.104, pp. 110 ~ 126
- (4) 이강희, 박용복, 2001, "전방압출 공정에서 제품 변형 이력" 한국소성가공학회지, 제10권, 제1호, pp.75 ~ 79.
- (5) Hyunkee Kim, Tetsuji Yagi, Masahito Yamanaka, 2000, "FE simulation as a must tool in cold/warm forging process and tool design" j.of Materials Processing Technology, Vol.98, pp. 143 ~ 149.
- (6) M.H.SADEGHI, T.A.DEAN, 1993, "Analysis of profile accuracy in precision forged spur gears with involute teeth" Transactions of NAMRI/SME, Volume X X I, pp. 3 ~ 8.