

## 냉간 단조용 금형의 탄성변형 예측

# The Prediction of Elastic Deformation for Cold Forging Die

이정환\*, 이영선\*, 최종웅\*, 강중훈\*\*  
J. H. Lee\*, Y. S. Lee\*, J. Choi\*, and J. H. Kang\*\*

### Abstract

Elastic deformation of die has been investigated to improve the accuracy of cold forged parts. In order to improve the accuracy of forged parts, we have investigated the elastic deformation of forging die by analysis with commercial F. E. M code, DEFORM, and experiments using the strain gages. In the F. E. M analysis, two types are used for elastic deformation of die. The one considers die as elastic body and the other considers the die as rigid body. The latter relatively takes a lot of time. The results from the two types are very similar with each other. Considering the results of analysis and experiments, it is likely that the elastic strain of forging die is very small.

Keyword : Elastic deformation, Cold forging, F. E. M Analysis

### 1. 서 론

냉간 단조에 있어 현재 추구되는 핵심기술 가운데 하나는 제품의 치수정밀도를 연삭공차 범위 내로 향상시키는 정형제조 기술로서 최근에 많은 진보가 이루어지고 있다. 정형제조를 통하여 제조된 제품은 후가공 공정의 제거효과를 얻을 수 있으므로 경제적 파급효과가 매우 크다. 특히, 무절삭 가공을 추구하고 있는 CIM라인의 구축 및 효율을 증대를 위해서는 치수정밀도 향상이 무엇보다도 중요하다.

냉간 단조는 가공 후 열수축에 의한 제품의 치수변화가 거의 없으므로 금형의 정도가 제품의 정도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 성형시 금형의 탄성변형, 가공 후 제품의 탄성회복 등을 종합적으로 고려하여 금형을 설계함으로써 요구하는 치수정밀도를 갖는 제품을 성형할 수 있다.

본 연구에서는 금형의 탄성 변형량을 유한요소법을 이용한 금형의 탄성해석과 실제 성형시 금형에 발생하는 변형을 스트레인 게이지로 측정하여 냉간 가공시에 발생하는 금형의 탄성변형량을 예측하고자 하였다. 이를 위하여 상용 유한요소 코드인 DEFORM을 사용하여 해석을 수행하였으

며, 단축 스트레인 게이지를 이용하여 볼 스테드를 성형할 경우 금형의 상부 표면에 발생하는 변형을 측정하여 해석과 비교하였다.

### 2. 연구 내용

#### 2.1 스트레인 게이지를 이용한 금형의 변형측정

스트레인 게이지는 변형량을 전기적인 신호로 측정하고 기록할 수 있기 때문에 탄성범위내의 변형률을 직접적으로 측정할 수 있다. 스트레인 게이지는 전기 절연물인 기판(base material), 변형량을 감지하는 감지저항부(sensing alloy), 도선(lead wire)을 연결하는 납땜 부위(solder tap)로 구성되어 있고 측정하고자 하는 시험편의 표면에 부착하여 사용한다. 외부로부터 감지부에 힘이 가해졌을 때 감지부에 발생한 변형량은 기판을 거쳐 감지저항부에 전달되어 스트레인 게이지의 저항값을 변화시켜 신호변환기를 이용하여 컴퓨터로 전송함으로써 변형률을 측정할 수 있다.

Fig. 1은 본 실험에서 볼 스테드 냉간 단조시 마지막 공정인 4차 공정 금형에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하는 장면을 나타내고 있으며 Fig. 2(a)는 금형에 부착된 스트레인 게이지를 보여주고 있다. 사용된 스트레인 게이지는 일본 Kyowa사의 Quarter Bridge로서 게이지 길이는 1mm, 단축이며 게이지 저항값은 120Ω인 제품으로서 Fig. 2(b)와 같이 초경 다이 인서트(중심

\* 한국기계연구원 재료공정 연구부

\*\* (주) 센트랄 기술연구소

에서 20~21mm)와 1차 및 2차 보강링(중심에서 31~32mm) 부위에 각각 90° 방향으로 8개의 스트레인 게이지를 부착하여 각 방향의 변형량의 차이를 분석하고자 하였다.

## 2.2 유한요소법에 의한 금형 탄성변형 해석

자동차 현가 장치에 사용되는 볼 스테드(Ball stud)는 현재 AISI4340을 사용하여 냉간 단조로써 제작하고 있다. 본 연구에서 해석 대상으로 하는 볼 스테드는 Fig. 5와 같이 4번의 공정을 거쳐 최종 제품에 이르게 된다. 4개의 공정 중 마지막 공정이 제품의 정도를 결정하므로 탄성해석은 마지막 공정에 대하여 수행하였다. 마지막 공정에 사용되는 빌렛은 3차 공정에서 성형된 제품을 열처리하지 않고 사용하므로 해석에서도 3차 공정에서 생성된 격자를 변화시키지 않고 사용하였다. Fig. 5에 4공정까지 각 공정의 최종 성형단계에서의 제품의 변형률 분포를 나타내었다.

냉간 단조시 금형에 발생하는 탄성변형을 해석하기 위해 다음과 같은 2가지 방법을 사용하였다. 첫 번째, 인서트와 1차 보강링, 1차 보강링과 2차 보강링 사이에 부과한 간섭량을 고려하여 미리 예압이 작용하는 상태에서 소재를 성형할 경우 금형에 발생하는 응력과 변형을 해석하였다. 두 번째로는 금형을 강체로 가정한 후 제품을 최종상태까지 성형하고 그때 제품의 표면에 발생하는 압력분포를 구하고, 그 결과를 탄성체로 고려한 금형의 표면에 경계조건으로 부과하여 금형에 발생하는 응력 및 변형을 해석하였다. 위의 두 가지 방법을 사용하여 해석된 결과를 비교·검토하여 금형의 탄성 해석시 실제에 더 가까운 해를 제공하는 방법을 선정하고자 하였다. Table 1에 금형을 탄성체로 해석한 경우 초경 인서트와 보강링의 소재물성치를 나타내었다

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 스트레인 게이지에 의한 금형 변형측정

냉간 포머에서 볼 스테드를 단조할 때의 금형 탄성 변형을 측정한 결과는 Fig. 3과 같다. 자동으로 연속작업을 할 때의 변형률은 단조시 변형의 급격한 증가가 나타나며 단조품이 취출됨에 따라 원점으로 복구되며 다음 타격이 있을 때까지 미소한 변화가 발생된다. 또한, 순간적으로 높

은 변형률 값이 측정되기도 하는데, 이는 소재와 금형의 정렬불량 때문이라 생각된다.

연속작업에서 측정된 데이터를 측정하고자 하는 초경 다이 인서트와 1차 보강링에 대하여 재구성하면 Fig. 4와 같이 나타나는데, 4 번의 반복 실험에서 얻은 결과는 동일한 결과를 나타내고 있다. Fig. 4의 (a)는 3번째 실험이며 (b)는 4번째 실험값으로 초경 다이 인서트 부위는 약  $0.0155 \sim 0.0175 \times 10^{-2}$ 의 인장변형률을, 1차 보강링은  $0.0280 \sim 0.0310 \times 10^{-2}$ 의 압축 변형률을 나타내고 있다. 변형률 측정값은 해석 결과와 동일한 양상을 보이고 있다. 유한요소해석 결과와 비교하면 초경 다이 인서트의 측정부위는 Fig. 9의 변형률 분포 곡선 상에서 "I" 부위에 해당되며,  $0.0308 \times 10^{-2}$ 의 인장변형률 값을 나타내어 실험 값과 약  $0.0130 \times 10^{-2}$ 의 값 차이를 나타내고 있다. 또한, 1차 보강링의 경우는 해석값의 경우 "H" 부위에 해당되는  $0.0790 \times 10^{-2}$ 의 압축 변형률을 나타내어 측정값과 약  $0.04 \times 10^{-2}$ 의 차이를 나타내었다. 실험값과 해석값의 차이는 측정시 현장에서 발생하는 노이즈와 초경소재의 물성치(탄성계수)에 대한 검증을 통해 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2 유한요소 해석에 의한 금형 탄성변형 해석

Fig. 5에는 각 단계에서의 제품의 변형률 분포 및 격자구조를 나타내었다. 성형의 초기에는 압출에 의해 테이퍼부 및 선단부의 경사각을 채우고 변형이 진행되어 후반부에 이르러 구면을 성형하므로 최종상태에서는 구면부에 변형이 집중되는 것을 볼 수 있다. 또한, 구면의 외각 표면에 미충진 영역이 존재하며 이는 실제 성형에서도 관찰되고 그 길이는 약 5 mm정도이다.

Fig. 6에는 탄성체의 금형에 예압을 작용시킨 경우에 있어 초기와 최종 성형단계에서의 초경 인서트에 작용하는 유효 응력분포를 나타내었다. 볼과 스테드의 직선부가 만나는 곡면부에서 성형 압력에 의해 최대 압축응력이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 초기 예압을 받은 상태에서 성형에 의한 압력의 작용으로 초기 상태보다 변경방향의 압축응력의 크기가 증가한 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 인서트를 탄성체로 해석한 경우 볼 스테드의 성형에서 예압만이 작용한 상태에서의 인서트의 변형의 크기를 나타내었다. 예압만이 작

용할 경우 테이퍼부의 윗쪽 직선부는 약 0.0469 mm정도 직경이 감소하는 방향으로 변형되고, 인서트의 끝부분은 약 0.083 mm 정도 변형한다.

Fig. 8은 금형의 내부에 성형에 의한 압력이 작용하는 볼 스티드의 최종성형 단계에서 인서트의 변형의 크기를 나타낸 것이다. 테이퍼부 윗쪽 직선부는 약 0.031 mm 정도 변형하였다. 예압만이 작용하는 초기와 비교해서 볼 스티드를 성형하므로 인해 발생하는 압력에 의해 약 0.016 mm정도 반경이 증가함을 알 수 있다. 또한, 초경 다이 인서트의 끝부분은 약 0.01 mm 정도 변형량의 차이가 보인다. 또한, 볼과 스티드의 직선부가 만나는 곳에서는 예압 상태와 최종상태에서 약 0.06 mm정도의 변형량의 차이가 보인다. 따라서, 실제 가공되는 금형은 진구가 아닌 형상으로 가공하여야 원하는 형상의 제품을 얻을 수 있다.

실제 성형에 사용되는 금형은 열박음 후 설계 치수를 얻기 위해 사상가공을 한다. 따라서, 실제 성형에 의해 변형되는 량은 초기 열박음 상태인 Fig. 7의 변형량과 최종상태의 Fig. 8의 변형량의 차이인 편측으로 약 0.01 mm정도가 성형에 의한 금형의 변형량이라 추정된다.

Fig. 9는 금형을 탄성체로 하여 예압이 작용하는 상태에서 성형 해석을 수행한 경우 최종상태에서의 다이에 작용하는 반경방향 변형률분포이고 Fig. 10은 금형을 강체로 가정한 후 성형해석을 수행하고 최종상태에서 소재의 표면에 발생하는 압력을 경계조건으로 하여 금형에 대한 탄성 해석을 수행하여 얻은 반경방향 변형률 분포의 결과를 각각 나타내었다. 그림과 같이 최종상태에서 각각의 금형 요소에 작용하는 변형률의 크기는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서, 금형의 탄성 변형 해석시 많은 시간이 소요되는 전자보다 후자의 경우가 더 효율적이라 할 수 있다.

제시한 두 가지 방법에 대하여 실제와 더 가까운 방법을 찾기 위하여 소재의 충진 정도를 비교하여 Fig. 11에 그 결과를 나타내었다. 금형을 강체로 가정한 경우 탄성체로 고려한 경우보다 구면 부분에 길이가 더 긴 미충진 부분이 관찰되었으며, 스티드의 선단부 형상이 많은 차이를 보이고 있다. 유한 요소해석 중 격자 재구성으로 인한 체적감소가 두 경우 거의 차이가 없다. 금형을 탄성체로 고려하여 해석하는 것이 변형률을 예측하는 데에는 강체로 가정한 경우와 큰 차이가 없으나, 제품의 형상측면에서는 많은 차이가

있음을 알 수 있었다. 따라서, 제품의 정도해석을 위해서는 반드시 금형을 탄성체로 고려하여 해석하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 금형의 탄성변형량이 제품의 정밀도에 미치는 영향을 예측하기 위하여 실험과 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금형을 탄성체로 고려하여 열박음상태로 해석하는 것이 금형을 강체로 하여 최종상태만 탄성으로 해석한 경우 변형률에 있어 미소한 차이를 보이므로 금형의 탄성변형률 예측에 대한 해석은 금형을 강체로 가정하는 것이 해석 시간 면에서 보다 효율적이라 할 수 있다.
2. 단조시 금형의 변형량을 예측하여 성형 후 제품의 치수정밀도를 향상시키기 위한 금형 가공의 기초로서 사용될 수 있었다.
3. 치수정밀도 측면에서 해석을 수행할 경우 금형을 탄성체로 고려하여 해석하는 것이 금형을 강체로 가정하여 해석하는 것보다 더 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] 강대임, "스트레인 게이지를 이용한 응력 측정 및 응용", 대한기계학회 논문집, 제 33 권, 제 7 호, pp. 661 ~ 670, 1993
- [2] Y. Kojima, H. Morikawa and T. Misuno, "Measurement of Pressure Distribution in Drawing of Bars", J. of JSPE, Vol. 26, No. 295, pp. 855 ~ 861, 1985
- [3] M. T. Hillery and S. Griffin, "An embedded-strain-gauge technique of stress analysis in rod drawing", J. of Material Processing Technology, Vol. 47, pp. 1 ~ 12, 1994
- [4] "DEFORM User's Manual V 6.0", Scientific Forming Technology Corporation, 1998

Table 1 Mechanical properties of die material

Die Material	Hardness	Young's Modulus(N/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio
W. C(G7)	85(HrA)	500000	3100	0.23
SKD61	47(HrC)	212000	1200	0.3

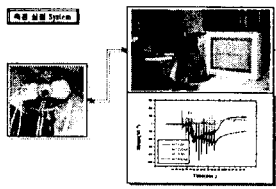


Fig. 1. The appearance of strain measuring equipment using the strain gauge for cold former die

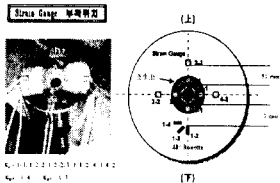


Fig. 2 The locations of strain gauge attachment

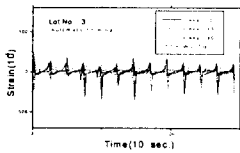


Fig. 3 The elastic strain measured by strain gauge in die for ball stud forging



(a) Lot No. 3 (b) Lot No. 4

Fig. 4 The elastic strain measured in W. C insert and stress ring of die for ball stud

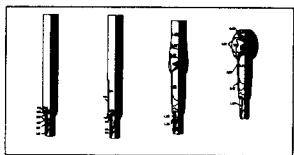
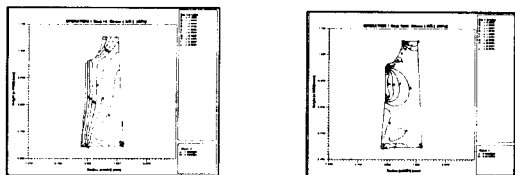


Fig. 5 Strain distributions and mesh systems for each step



(a) as shrink fitting state (B) at the final state  
Fig. 6 Distribution of effective stress on insert

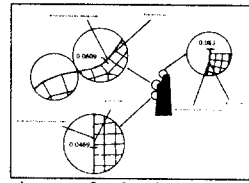


Fig. 7 Comparison of elastic deformation of W.C insert between original and deformed shape at fitting state

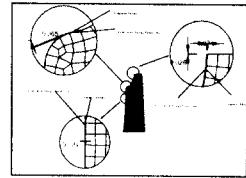


Fig. 8 Comparison of elastic deformation of W.C insert between original and deformed shape at final stage

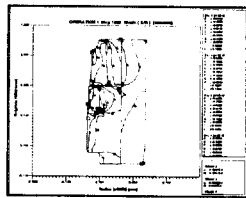


Fig. 9 Strain distribution on die considered as elastic body at final stage

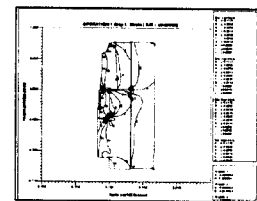


Fig. 10 Strain distribution on die considered as rigid body at final stage

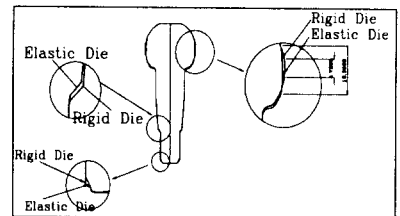


Fig. 11 Shape difference between rigid and elastic die at final stage