

단조품의 정밀도 향상을 위한 금형의 탄성변형 예측

최종웅* · 이영선** · 이정환**

(2000년 3월 16일 접수)

The Prediction of Elastic Deformation of Forging Die to Improve Dimensional Accuracy

Jongung Choi, Young Seon Lee and Jung Hwan Lee

Key Words: Elastic Deformation(탄성변형), Strain Gage(스트레인게이지), Cold Forging(냉간단조), F. E. M(유한요소법)

Abstract

In this paper, the elastic deformation of cold forging die has been investigated to improve the accuracy of forged parts with FEM analysis and experiments using the strain gages. In the finite element analysis, two types of analysis are used to predict elastic deformation of die. The one is that dies are considered to be elastic body from initial stage to final one, and the other is that the dies are considered to be rigid body during forging simulation and then considered to be elastic body at elastic analysis. Considering the results of analysis and experiments, it is likely that the analytical results are in good agreement with experimental inspections. The method using the elastic assumption of die relatively takes a lot of time to simulate the forming operation. However, It is better that using an elastic die to predict not only the shape of product but also filling of die cavity.

1. 서론

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 효율 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 스트레인게이지로 측정하여 냉간 가공시에 발생하는 금형의 탄성변형량을 예측하고자 하였다. 이를 위하여 상용 유한요소 코드인 DEFORM을 사용하여 해석을 수행하였으며, 단축 스트레인게이지를 이용하여 볼 스톨드를 성형할 경우 금형의 상부 표면에 발생하는 변형을 측정하여 해석과 비교하였다.

* Institute for Metal Forming, RWTH Aachen, Germany

** 회원, 한국기계연구원 재료공정연구부

E-mail : ljh1239@kmail.kimm.re.kr

TEL : (055)280-3521 FAX : (055)280-3498

2. 금형 탄성변형 실험 및 해석

2.1 스트레인게이지를 이용한 금형의 변형측정 실험

길이의 작은 변화를 그에 상응하는 저항변화로 변환하는 일종의 저항체인 스트레인게이지는 변형량을 전기적인 신호로 측정하고 기록할 수 있기 때문에 탄성범위내의 변형률을 직접적으로 측정할 수 있다. 스트레인게이지는 전기 절연물인 기판(Base Material), 변형량을 감지하는 감지저항부(Sensing Alloy), 도선(Lead Wire)을 연결하는 납땜 부위(Solder Tap)로 구성되어 있고 접착제를 사용하여 측정하고자 하는 시험편의 표면에 부착하여 사용한다.⁽¹⁾ 따라서, 외부로부터 감지부에 힘이 가해졌을 때 감지부에 발생한 변형량은 기판을 거쳐 감지저항부에 전달되어 스트레인게이지의 저항값을 변화시킨다. 이렇게 변화되는 전기적인 신호를 증폭기를 통하여 증폭시킨 후 신호변환기(A/D Converter)를 이용하여 컴퓨터로 전송함으로써 변형률을 측정할 수 있다.

Fig. 1은 본 실험에서 볼 스타드 냉간 단조시 마지막 공정인 4차 공정 금형에 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 측정하는 장면을 나타내고 있으며 Fig. 2(a)는 금형에 부착된 스트레인게이지를 보여주고 있다. 사용된 스트레인게이지는 일본 Kyowa사의 Quarter Bridge (모델명 : KFG-1-120-C1-11)로서 게이지 길이는 1mm, 단축이며 게이지 저항값은 120Ω 인 제품으로 Fig. 2(b)와 같이 초경 다이 인서트(중심에서 20~21mm)와 1차 및 2차 보강링(중심에서 31~32mm) 부위에 90° 방향으로 모두 8개의 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다.

2.2 유한요소법에 의한 금형 탄성변형 해석

자동차 현가 장치에 사용되는 볼 스타드(Ball Stud)는 내피로성이 요구되는 부품으로 현재 Ni-Cr-Mo 강인 AISI4340을 사용하여 냉간 단조로 제작되고 있다.

본 연구에서 해석 대상으로 하는 볼 스타드는 Fig. 3과 같이 4단계의 공정을 거쳐 최종 제품에 이르게 된다. 4개의 공정 중 마지막 공정이 제품의 정도를 결정하므로 금형의 탄성해석은 마지막 공정인 구부 성형공정에 대하여 수행하였다. 마지막 공정에 사용되는 빌렛은 3차 공정에서 성형된 제품을 열처리하지 않고 사용하므로 해석에서도 3차 공정에서 생성된 격자를 변화시키지 않고 사용하였다. Fig. 3에 1공정에서 4공정까지 각 공정의 최종 성형단계에서의 제품의 변형률 분포를

나타내었다.

냉간 단조시 금형에 발생하는 탄성변형을 해석하기 위해 다음과 같은 2가지 방법을 사용하였다. 첫 번째는 Fig. 4와 같이 금형을 초기부터 탄성체로 가정하여 단조 소재의 변형에 대한 해석과 동시에 금형의 탄성 변형 또한 해석하는 방법이다. 이때 금형은 초경소재인 다이 인서트(Die Insert)의 강도 향상을 위한 예압(Pre-Stress)이 부

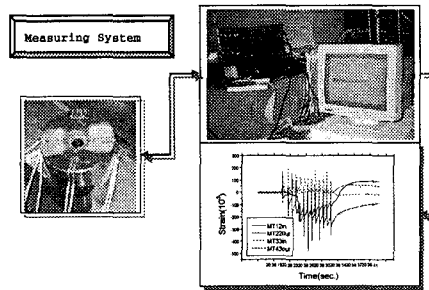


Fig. 1 The strain measuring system using the strain gauge for cold former die

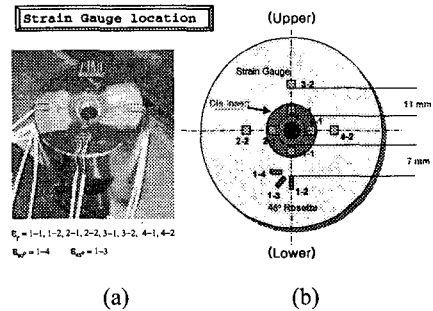


Fig. 2 The locations of strain gauge attachment

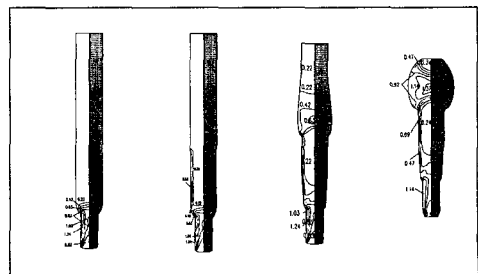


Fig. 3 Strain distributions and mesh systems for each stage

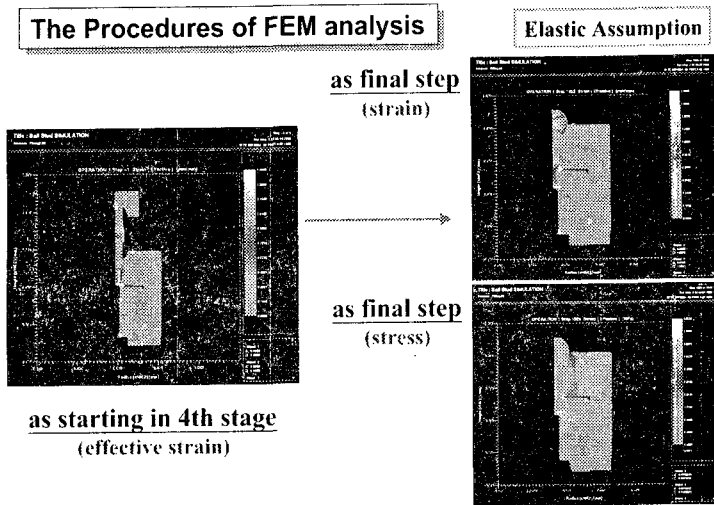


Fig. 4 The Procedures of FEM analysis under the elastic assumption of forging die

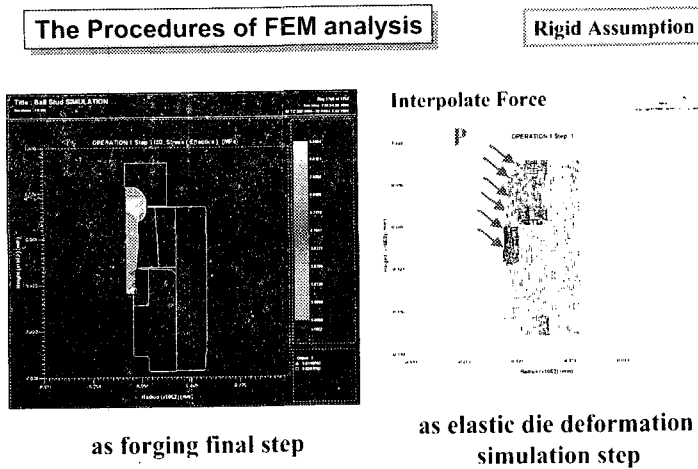


Fig. 5 The Procedures of FEM analysis under the rigid assumption of forging die

가된다. 다이 인서트와 1차 보강링, 1차 보강링과 2차 보강링 사이에 간섭량(Interference Gap : 100 μm)에 의한 예압은 응력해석을 통해 얻을 수 있다. 따라서, 금형은 미리 예압이 작용하는 탄성 범위내에서 변형이 발생할 수 있으므로 단조소재가 변형되는 동안 금형에 발생하는 응력과 변형 또한 동시에 해석할 수 있다. 반면에, 두 번째 해석방법으로는 Fig. 5와 같이 금형을 강체로 가정하는 것으로, 이 경우에는 단조소재가 최종 제품상태까지 변형되는 동안 탄성적으로 변형되지

않고 강체로 유지되게 된다. 따라서, 금형의 탄성 변형과 응력분포는 최종 변형 해석 후 제품의 표면에 발생하는 압력분포를 금형의 표면에 경계 조건으로 적용하여 금형에 대한 탄성 변형 해석을 수행하므로써 금형에 발생하는 응력 및 변형을 해석하였다. 이상의 두가지 해석 방법을 사용하여 얻어진 탄성 변형률의 결과는 스트레인게이지를 이용하여 실험적으로 측정된 실험 결과와 비교·검토하여 금형의 탄성 해석에 사용될 수 있는 2가지 방법의 해석 결과를 비교함으로써 정

밀도가 향상되는 해석방법을 선정하고자 하였다. 또한, 2가지 가정하에서 해석된 결과는 실 단조품과의 치수 비교 분석을 통하여 단조품의 정밀도를 보다 정밀하게 예측할 수 있는 방법을 고찰하고자 하였다.

Table 1에 금형을 탄성체로 해석한 경우 초경 인서트와 보강링의 기계적성질을 나타내었다. 초경의 물성치는 Gersh 등의⁽²⁾ 결과를 이용하였으며 보강링인 STD11종은 직접 실험을 통해 얻은 데이터를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 스트레인게이지에 의한 금형 탄성변형측정

냉간 포머(Former)에서 볼 스타드를 단조할 때의 금형 탄성 변형을 측정한 결과는 Fig. 6과 같다. 자동으로 연속작업을 할 때의 변형률은 단조시 변형의 급격한 증가가 나타나며 단조품이 취출됨에 따라 원점으로 복귀되며 다음 타격이 있을 때까지 미소한 변화가 발생된다. 또한, 순간적으로 높은 변형률 값이 측정되기도 하는데, 이는 소재의 변형이 항상 제품 중심을 기준으로 반경 방향으로 동일하게 변형되지 않기 때문으로 생각된다.

Table 1 Mechanical properties of die material

Die Material	Hardness	Young's Modulus (N/mm ²)	Yield Strength (N/mm ²)	Poisson's Ratio
W. C(G7)	85(HRA)	500000	3100	0.23
STD11	47(HRC)	212000	1200	0.3

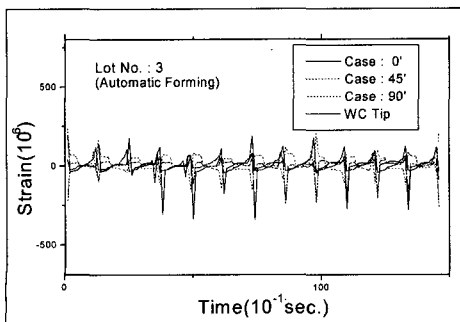
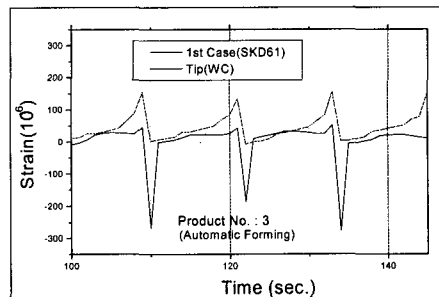


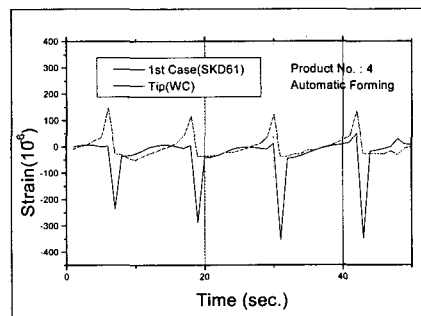
Fig. 6 The elastic strain measured by strain gauge in die for ball stud forging

연속작업에서 측정된 데이터를 초경 다이 인서트와 1차 보강링에 대하여 재구성하면 Fig. 7과 같이 나타나는데, 4 번의 반복실험에서 동일한 결과를 나타내고 있다. Fig. 7의 (a)는 3번째 실험이며 (b)는 4번째 실험치로 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 금형을 탄성체로 고려하여 해석한 경우, 초경 다이 인서트의 측정부위는 Fig. 8의 변형률 분포 곡선 상에서 "I" 부위에 해당되며, 0.0308×10^{-2} 의 인장변형률 값을 나타내어 실험 값과 약 0.0130×10^{-2} 의 값 차이를 나타내고 있다. 또한, 1차 보강링의 경우는 해석값의 경우 "H" 부위에 해당되는 0.0790×10^{-2} 의 압축 변형률을 나타내어 측정값과 약 0.04×10^{-2} 의 차이를 나타내었다. 실험값과 해석값의 차이는 초경소재의 물성치(탄성계수)에 대한 개선



(a) Lot No. 3



(b) Lot No. 4

Fig. 7 The elastic strain measured in W. C insert and stress ring of die for ball stud

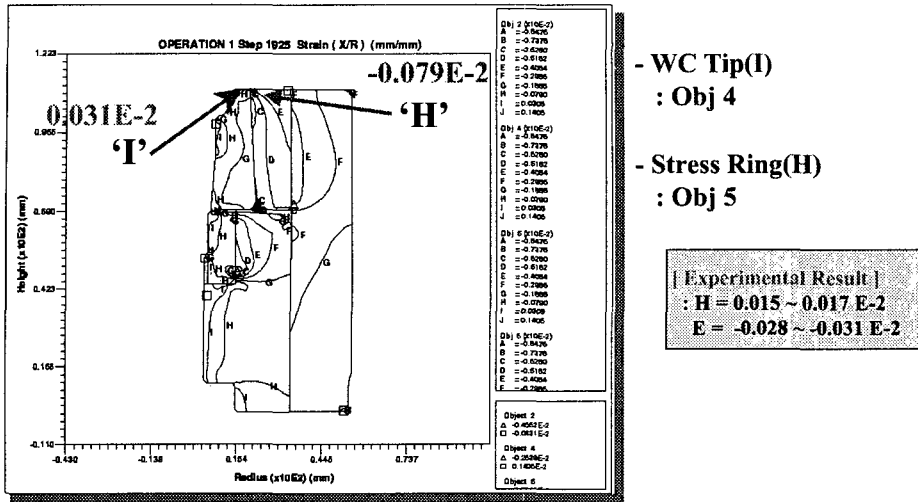


Fig. 8 Strain distribution of die considered to be elastic body from the beginning to final state

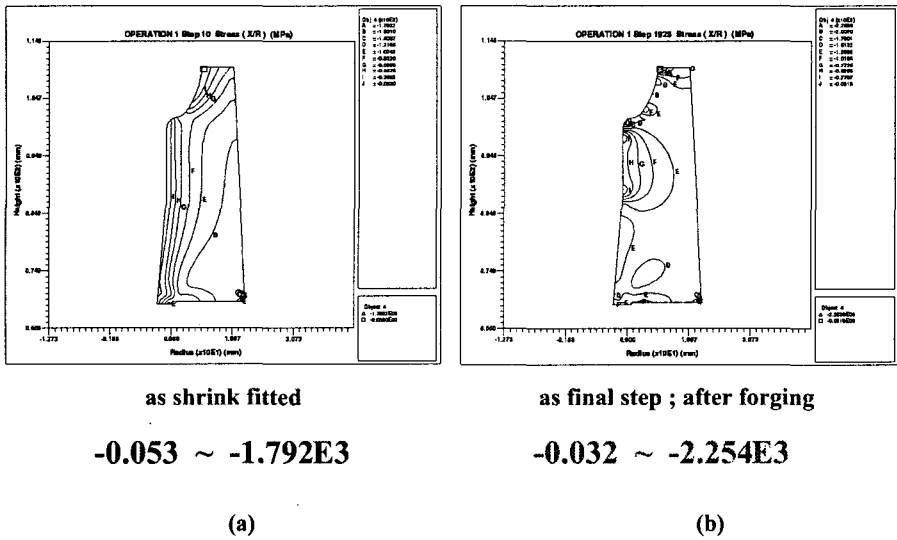


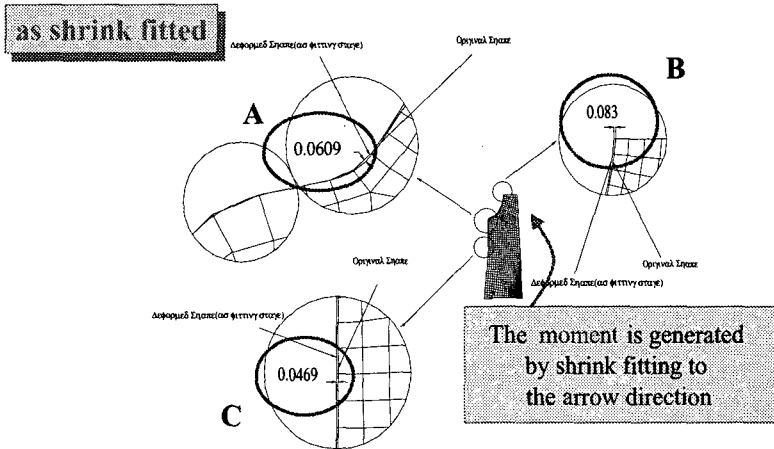
Fig. 9 Strain distribution of die considered to be elastic body at final state

을 통해 보다 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 유한요소 해석에 의한 금형 탄성변형 해석
 Fig. 3에는 각 단계에서의 제품의 변형을 분포 및 격자구조를 나타내었다. 변형의 초기에는 압출에 의해 테이퍼부 및 선단부의 경사각을 채우

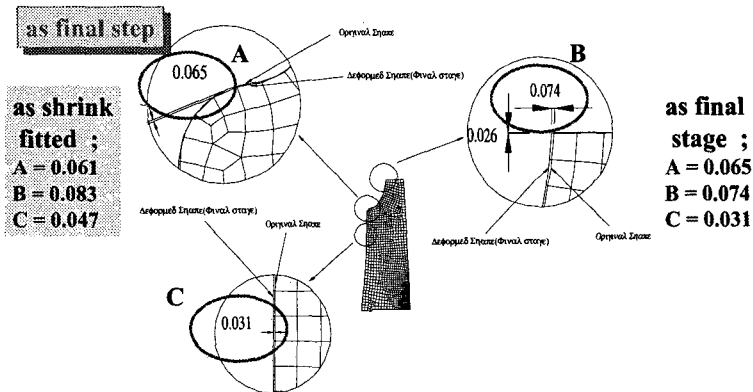
고 변형이 진행되어 후반부에 이르러 구면을 형성하므로 최종상태에서는 구면부에 변형이 집중되는 것을 볼 수 있다. 또한, 구면의 외각 표면에 미충진 영역이 존재하며 이는 실제 성형에서도 관찰되고 그 길이는 약 5 mm 정도이다.

Fig. 9(a)는 다이인서트와 -1차 보강링 사이에 열박음 간섭량에 의해 예압이 가해진 상태의 응



Elastic Deformation Amount ; A = 0.0609 B = 0.083 C = 0.0469

Fig. 10 Comparison of elastic deformation of W.C insert between original and deformed shape at fitting state

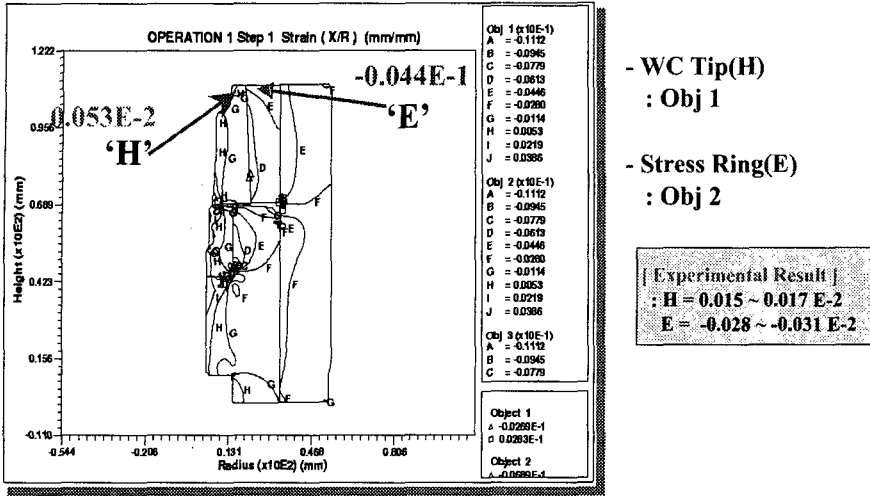


It is shown that the elastic deformation is smaller than that of unloading state as much as 0.009 ~ 0.016mm by internal pressure owing to the applied load

Fig. 11 Comparison of elastic deformation of W.C insert between original and deformed shape at final state

력분포를 나타내고 있으며, (b)는 단조시 성형하중에 의해 내압이 작용된 상태의 유효 응력 분포

를 나타내고 있다. 볼과 스테드의 직선부가 만나는 곡면부에서 성형압력에 의해 최대 압축응력이



- WC Tip(H)
: Obj 1

- Stress Ring(E)
: Obj 2

[Experimental Result]
: H = 0.015 ~ 0.017 E-2
E = -0.028 ~ -0.031 E-2

Fig. 12 Strain distribution of die considered to be rigid body

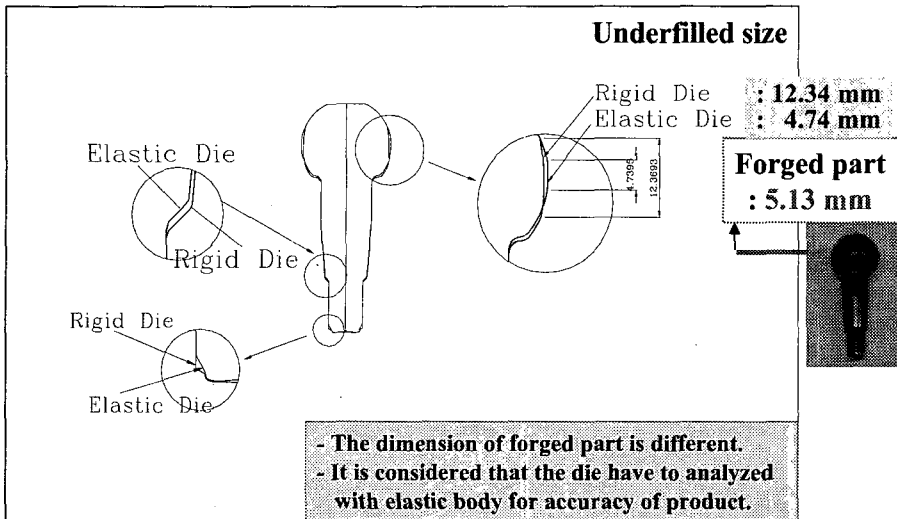


Fig. 13 Shape difference between rigid and elastic assumption of die at final state

발생하는 것을 볼 수 있으며, 초기 예압(0.053~1.792E3 MPa의 반경방향 응력)을 받은 상태에서 성형에 의한 압력의 작용으로 초기 상태보다 반경방향의 압축응력의 크기가 0.032~2.254E3 MPa 까지 증가한 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 인서트를 탄성체로 해석한 경우 볼 스테르드의 성형시 예압만이 작용한 상태에서의 인서트 변형의 크기를 나타내었다. 예압만이 작용

될 경우 테이퍼 상부 직선부는 약 0.0469 mm 정도 직경이 감소하는 방향으로 변형되고, 인서트의 끝부분은 약 0.083 mm 정도 변형한다.

Fig. 11은 다이 인서트와 보강링 사이에 예압이 가해진 상태에서 볼 스테르드의 최종 성형시 금형의 내부에 성형에 의한 부가 압력에 의해 다이 인서트가 추가적으로 변형된 크기를 나타낸 것이다. 테이퍼 상부 직선부는 약 0.031 mm 정도 변

형되었다. 예압만이 작용하는 초기와 비교해서 볼 스티드를 성형하므로 인해 발생하는 압력에 의해 약 0.016 mm 정도 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 mm 정도의 변형량의 차이가 보인다. 따라서, 실제 가공되는 금형은 진구가 아닌 형상으로 가공하여야 성형에 의해 발생하는 금형의 탄성 팽창을 고려하여 진구를 얻을 수 있다.

실제 성형에 사용되는 금형은 열박음 후 마무리 수사상가공을 한다. 따라서, 실제 성형에 의해 변형되는 량은 초기 열박음 상태인 Fig. 10의 변형량과 최종상태의 Fig. 11의 변형량의 차이인 편측으로 약 0.01 mm 정도가 성형에 의한 금형의 변형량이라 할 수 있다.

Fig. 8은 금형을 탄성체로 하여 실제 성형상태와 동일하게 예압이 작용하는 상태에서 성형 해석을 수행한 경우 최종상태에서의 다이에 작용하는 반경방향 변형률 분포이고 Fig. 12는 금형을 강체로 가정된 후 성형해석을 수행하고 최종상태에서 소재의 표면에 발생하는 압력을 경계조건으로 하여 금형에 대한 탄성해석을 수행하므로써 얻은 반경방향 변형률 분포의 결과를 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 초경 다이 인서트 부위(H)는 0.053E-2의 인장변형률이 1차 보강링(E)은 0.044E-1의 압축변형률이 발생되고 있어 실험치와 많은 차이를 보임을 알 수 있다.

따라서, 금형을 탄성체로 고려하지 않고 강체로 가정하여 변형해석을 수행한 경우는 변형률이 과대 평가됨을 알 수 있다. 또한, 금형을 강체로 해석하는 경우는 Fig. 13에 나타난 바와 같이 소재의 충전 상태 또한 실제 실험과 많은 차이를 나타낸다. 실제 단조품의 구면에 나타나는 미충진부 길이는 5.13mm인데 반해, 금형을 강체로 가정한 경우는 12.34mm, 탄성체로 고려한 경우는 4.74mm로 나타났다. 해석시 격자 재구성에 의해 발생하는 체적감소량은 3%미만으로 미소하였으나, 금형을 강체로 해석한 경우는 미충진 길이가 실제보다 2배 이상으로 과대하게 나타나고 있다. 이는 금형을 강체로 해석하게 되면 실제 단조시에 발생하는 구면의 굽힘응력에 의한 변형률이 고려되지 않기 때문이다. 반면에 금형을 탄

성체로 가정한 경우는 Fig. 10에 나타나 있듯이 화살표 방향으로 굽힘 모멘트가 발생되어 실제 성형시에 발생하는 금형의 탄성 변형율을 보다 정확하게 예측하고 있다. 따라서, 금형을 탄성체로 고려하여 해석하는 것이 강체로 가정한 경우보다 정밀한 예측이 가능함을 알 수 있으며, 제품의 형상측면에서도 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서, 냉간 단조품의 정밀도 예측을 위해서는 금형을 탄성체로 고려하여 해석해야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 냉간 단조에 의해 고정밀 제품을 성형하는데 있어 금형의 탄성 변형량이 제품의 정밀도에 미치는 영향을 예측하기 위하여 실험과 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금형 탄성해석을 수행할 경우 금형을 탄성체로 가정하여 열박음 상태를 고려하여 해석하는 방법과 금형을 강체로 하여 최종상태에서만 탄성변형을 해석한 경우, 탄성변형률의 예측값에 많은 차이를 보이고 있었다.

(2) 냉간단조용 금형의 탄성변형률은 동적인 상태에서 스트레인게이지를 이용하여 측정이 가능함을 알 수 있었다.

(3) 실험으로 측정된 냉간단조용 금형의 탄성변형율은 금형을 탄성체로 가정하여 예측한 유한요소해석값과 좋은 일치를 나타내었다. 그러나, 금형을 강체로 가정하여 해석한 결과는 실험과 많은 차이를 나타내었다.

(4) 단조품의 치수정밀도 예측 측면에서 해석을 수행할 경우 금형을 탄성체로 고려하여 해석하는 것이 금형을 강체로 가정하여 해석하는 것보다 더 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) 강대임, 1993, "스트레인게이지를 이용한 응력 측정 및 응용," 대한기계학회논문집, 제33권, 제7호, pp. 661 ~ 670.
- (2) Gersh S. Kreimer, 1968, "Strength of Hard Alloys," Consult Bureau, New York.
- (3) Kojima Y., Morikawa H., and Misuno T., 1985,

- "Measurement of Pressure Distribution in Drawing of Bars," *J. of JSPE*, Vol. 26, No. 295, pp. 855~861.
- (4) Hillery M. T. and Griffin S., 1994, "An embedded-strain-gauge technique of stress analysis in rod drawing," *J. of Material Processing Technology*, Vol. 47, pp. 1~12.
- (5) Oh S. I., Wu W. T., Tang J. P. and Vedhanayagam A., 1991, "Capabilities and Applications of FEM code DEFORM : The Perspectives of the developer," *J. of Mater. Process. Tech.*, Vol. 27, pp. 25~42.
- (6) 1998, "DEFORM User's Manual V 6.0," Scientific Forming Technology Corporation.