

냉간 단조용 금형의 탄성 변형에 관한 실험 및 이론적 연구

이영선* · 이대근** · 이정환*

(2002년 1월 29일 접수)

A Study on the Experimental and Theoretical Analysis About the Elastic Deflections of Die for Cold Forging

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

Abstract

The elastic deflections of the cold forging die influence the dimensional accuracy of forged parts. 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 the loading, unloading, and ejecting stage with experimental and FEM analysis. Uni-axial strain gages are used to measure elastic strain of die during each forging stage. Strain gages are attached on the upper surface of die. A commercial F.E.M. code, DEFORM-2DTM is used to predict the elastic strains of die, to be compared those by experiments. Two modelling approaches are used to define the reasonable analysis method. The first of the two modelling approaches 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 deformed part. The other is to regard the die as elastic body from forging cycle. The elastic strain of tool is calculated and the tool is elastically deformed at each step. The calculated results under the elastic die assumption are well agreed with experimental data using the strain gages.

Key Words : Elastic Recovery, Forging Mode, F.E.M., Strain Gage

1. 서 론

단조품의 치수 정밀도 향상은 냉간 단조 기술 개발의 가장 중요한 항목 가운데 하나이다. 단조품은 단조 공정 동안 금형의 탄성 팽창, 단조 후 단조품의 탄성회복에 의해 금형 치수와 다른 치수를 갖게 된다. 따라서, 단조품의 치수 정밀도를 향상시키기 위해서는 상기 2가지 탄

성 변형에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 결국, 정확한 분석을 통해 실제 제조하고자 하는 단조품 치수를 얻을 수 있는 금형 가공이 이루어져야 정밀도 높은 단조품을 제조할 수 있는 것이다.

이를 위해 많은 연구자들이 금형의 탄성 변형에 대한 연구를 수행하여 왔다. 실험적인 연구로, Matsubara and Kudo⁽¹⁾ 는 냉간 단조용 금형의 압력분포를 측정하였으

* 한국기계연구원

** 경남대학교 대학원

며, Hillery⁽²⁾는 봉 인발 공정에 대하여 스트레인 게이지를 이용하여 분석하였으며, Park⁽³⁾은 금형 측면에 스트레인 게이지를 부착하여 냉간단조용 금형의 원주방향 변형률을 정량적으로 분석하였다. 수치해석적인 방법으로는 Sadeghi⁽⁴⁾등이 축대칭 제품 단조 공정에 대한 치수정밀도에 대한 연구를 수행하였으며, Raddad⁽⁵⁾등은 탄성 및 탄소성해석을 이용하여 실험과 비교 분석하였다. 또한, Im⁽⁶⁾등은 유한요소해석을 이용하여 냉간단조용 금형의 탄성변형 및 마모에 대한 연구를 수행하였으며, Balendra⁽⁷⁻⁹⁾는 다양한 공정에 대하여 금형의 치수 변화를 해석을 통해 고찰하였다.

본 연구에서는 스트레인게이지(Strain Gage)를 이용한 실험적 연구와 FEM해석을 이용한 이론해석을 통하여 수 μm 에 해당되는 탄성 변형량을 분석하므로써 무절삭 정밀 단조 기술의 기초를 확립하고 이를 실제제품의 정밀도 향상을 위한 응용에 이용하고자 하였다. 실험에 사용된 모델은 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 외경이 3부분으로 구분되는 형상으로 2단 압출에 의해 제조된다.

금형의 탄성변형량을 측정하기 위해 스트레인 게이지를 이용하여 원주방향 탄성변형률을 측정하여 하중 부가(Loading), 하중 제거(Unloading), 단조품 취출(Ejecting) 단계에서의 금형의 탄성변형률의 변화를 정량적으로 분석하였다.

유한요소해석은 해석 방법에 따른 영향을 분석하여 실험 값과 비교하므로써 해석 값의 신뢰성을 입증하고, 기어류와 같은 복잡한 형상의 무절삭 정밀단조 제품에 대한 분석에 대해 활용할 수 있는 근거를 마련하고자 하였다. 해석에 사용된 방법은 금형의 탄성 거동을 해석할 수 있는 2가지 방법 가운데, 첫번째 방법은 단조 소재의 소성 변형 해석 동안은 금형을 강체로 가정하는 방법으로서, 이때 금형의 탄성 해석은 소재의 변형해석이 완료된 후 금형 응력 해석을 수행하는 방법으로 일반적으로 많이 사용되고 있다. 이와는 달리 두 번째 방법은 금형을 소재의 변형 해석 초기부터 탄성체로 가정하여 변형해석이 이루어지는 동안에도 금형의 탄성 변형이 고려되는 방법으로 실제 상황에 보다 근접한 방법이다. 실험에 사용된 금형은 금형강(AISI H-13)으로 제조된 보강링에 초경(WC) 다이 인서트와 열박음(Shrink-Fitting)되어 있는 구조이기 때문에 이를 고려하여 해석을 수행하였다.

2. 실험 및 유한요소 해석

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 마찰 감소에 의해서 소재가 성형 결함없이 원활한 유동을 할 수 있도록 인산염 피막처리를 하였다.

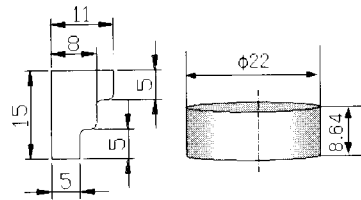


Fig. 1 Dimension of forged part and workpiece

본 실험에 사용된 장비는 수치제어가 가능한 Tinius Olsen 200ton 유압프레스를 사용하였으며 금형은 Fig.2와 같이 초경 다이 인서트와 금형강(SKD61)간에 보강이 되어 있는 구조를 이용하였다. 초경 다이 인서트와 보강링 간의 간극은 보강링 설계 기준에 의해 100 μm 이 이용되었으며, 펀치와 금형간 수직 방향의 진직도 유지를 위해 정밀 냉간 단조 다이 세트(Die-set)을 이용하였다.

금형의 원주방향의 변형률을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 금형의 상단에 중심으로부터 일정한 간격으로 부착하였다. 스트레인 게이지는 게이지 길이(Gage Length)가 2mm이며, 게이지 저항이 120 Ω 인 스트레인 게이지를 사용하였으며, 게이지로 부터의 신호는 DAS(Data Acquisition System)를 통하여 처리하였다. 금형의 상단 표면에 부착한 스트레인 게이지의 위치는 Fig.2에 나타나 있다.

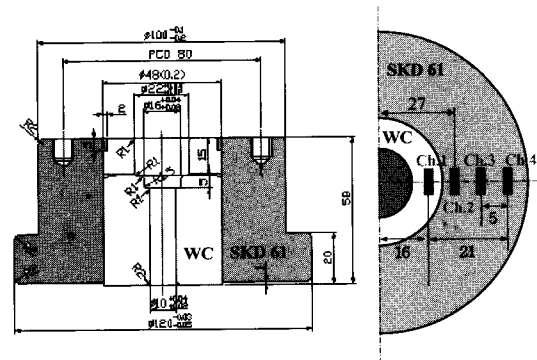


Fig. 2 Dimension of model die and attachment of strain gages

2.2 유한요소 해석

소재의 변형 해석 및 금형의 탄성변형 해석은 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-2D™ V.7.1 이용하였으며, 해석은 전술한 바와 같이 2가지 방법을 이용하여 금형의 탄성변형을 해석하는 방법에 따른 영향과 타당성을 분석하였다.

Table 1에서 볼 수 있듯이 첫 번째 방법은 소재의 변형해석과 금형 응력 해석을 분리해서 수행하는 일반적인 방법으로, 소재의 변형 해석 과정에서는 금형을 강체로 가정하여 해석한 뒤 금형의 응력 해석을 위한 해석을 위해, 추가적으로 금형을 탄성체로 가정하여 모델링 한 후 금형에 가해지는 내압을 부가(Interpolation)하여 금형의 응력을 해석하게 된다.(이하 “강체 금형 모델”, Rigid Die Assumption 이라 함). 이와는 달리, 두 번째는 소재의 변형 해석과 금형의 응력 해석과정을 별도로 수행하지 않고 소재의 변형해석과 금형 응력해석을 동시에 할 수 있도록 금형을 탄성체로 가정하여 해석하는 방법이다. (이하 “탄성체 금형 모델”, Elastic Die Assumption 이라 함). 탄성체 금형 모델을 이용하게 되면 Table 1에 나타나 있는 바와 같이, 각 단계에서의 금형 응력을 별도의 응력 해석 과정 없이 알 수 있으며, 금형의 탄성변형이 각 단계에서 소재의 변형 해석에 영향을 미치게 되므로 보다 실제적인 치수 변화를 분석할 수 있는 장점이 있다. Table 2는 해석에 사용된 금형(초경 다이 인서트, 보강링)의 물성치를 나타내고 있다.

Table 1 Two approaches used in F.E.A.

Step	Objects	Rigid Die Assumption	Elastic Die Assumption
Deformation Analysis	Workpiece Material	Plastic	Plastic
	Die Material	Rigid	Elastic
	Die Deflection	No-updated	Updated
Die Stress Analysis	Available Step	Final Step (Only)	Full Step

Table 2 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 _R A)	500000	3100	0.23
SKD61	47(H _R C)	212000	1200	0.30

해석에 사용된 소재의 유동응력은 압축시험을 통하여 실제 사용된 소재의 물성치를 이용하였다. Fig. 3은 압축 시험 결과로부터 얻은 구상화된 S10C 유동응력을 나타내고 있다.

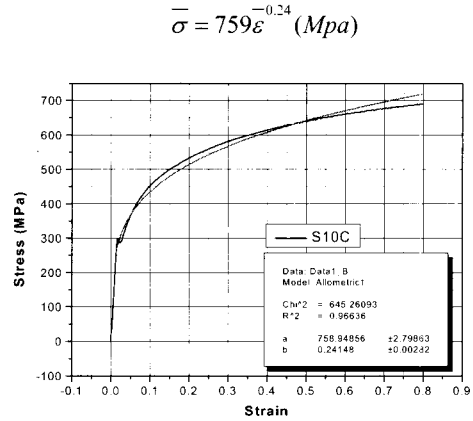


Fig. 3 Flow stress of used workpiece material (S10C, AISI 1010)

3. 결과 및 분석

3.1 소재의 변형 과정 및 금형의 탄성변형

단조 실험은 냉간단조의 특성상 펀치 이송(Stroke)의 최종 단계에서 급격하게 증가되는 소요하중에 의해 발생될 수 있는 금형 응력 상승과 파손을 방지하기 위해 펀치 이송량을 기준으로 하지 않고 하중을 기준으로 단조를 수행하였다. 부가된 하중은 “강체 금형 모델”을 이용한 FEM해석 결과인 소요하중 110 ton을 이용하였다. Fig. 4는 각 단계별 단조품 외관과 FEM 해석에 의해 얻은 단계별 변형 형태를 나타내고 있다. 이러한 변형 단계는 금형에 부착된 스트레인 게이지에서 측정된 원주방향 변형률에서도 단계별로 구분될 수 있다. Fig. 5는 성형 공정의 단계별 금형의 탄성 변형률을 나타내는 곡선으로 1단 전방압출이 이루어지는 시점인 “A” 지점에서 하중이 증가되기 시작하여 “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. Fig. 6은 하중-변위 곡선으로 각 단계별로 스트레인 게이지에서 측정된 곡선 형태와 동일한 하중 증가 형태를 나타내고 있어, 탄성변형 측정의 신뢰성을 재 확인할 수 있다.

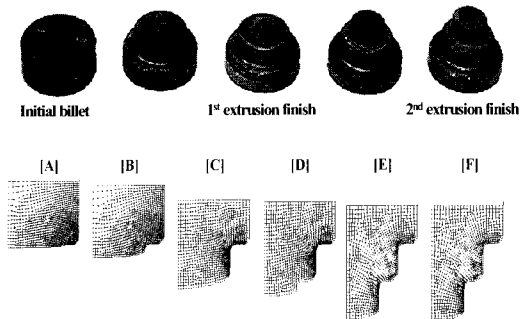


Fig. 4 Forged part and deformed mesh

금형의 부위별 탄성변형은 초경 다이 인서트와 보강링이 서로 많은 차이를 나타내고 있다. 초경 다이 인서는 압축변형이 발생되며 보강링은 인장 변형을 거치고 있음을 Fig. 5에서 알 수 있으며, 단조 후 편치가 복귀하는 단계(Unloading)에서는 측정 위치에 따라 미소한 차이($\pm 5 \times 10^{-5}$)는 있으나 약 10^{-4} 의 인장 변형률이 나타나고 있다.

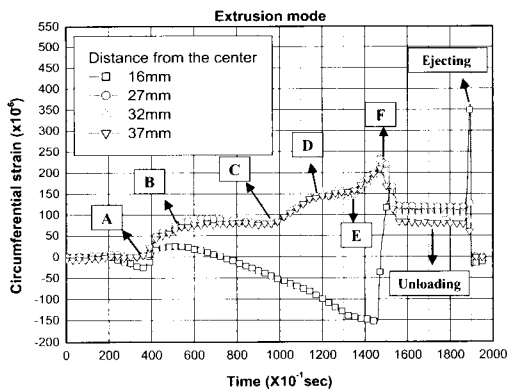


Fig. 5 Circumferential strains measured at each position

Table 3 Circumferential strain measured with strain gages

Position (No.)	Distance from the center	Circumferential-Strain [$\times 10^{-4}$]
1	16 mm	-1.54
2	27 mm	2.41
3	32 mm	2.23
4	37 mm	2.14

하중 부가 단계(Loading)에서 측정된 변형률의 경우 Table 3에 나타나 있듯이 초경 다이 인서는 1.54×10^{-4} 압축 변형을, 보강링의 경우는 $2.14 \sim 2.41 \times 10^{-4}$ 범위로 중심에서부터 멀어질수록 인장 변형이 작아짐을 알 수 있다.

냉간 단조의 경우는 최종 성형 단계에서 하중이 급증하므로 금형의 탄성변형을 해석하기 위해서는 실 단조품의 형상을 기준으로 해석의 단계를 결정해야 한다. 그렇지 않으면 미소한 편치 진행량에 의해서도 금형의 응력 및 탄성변형은 과도하게 평가된다. 본 연구에서는 실 단조품의 미성형부 길이를 기준으로 비교시점의 변위(Stroke)를 설정하였다. Fig. 6은 실험에서 측정된 하중-변위 곡선과 유한요소 해석결과를 비교한 결과로서, "강체 금형 모델"의 경우는 1.8mm, "탄성체 금형 모델"로 해석한 경우는 0.7mm의 변위(Stroke) 차이가 나타나고 있다. "탄성체 금형 모델"의 경우 0.7mm가 실험 보다 변위가 부족한 것은 해석에서는 고려되지 않는 프레스의 강성(Die Cushion)에 의한 것으로 판단되며, "강체 금형 모델"의 경우 이보다 더 큰 1.8mm 차이는 프레스 강성과 더불어 금형의 탄성 팽창량이 고려되지 않기 때문으로 판단된다.

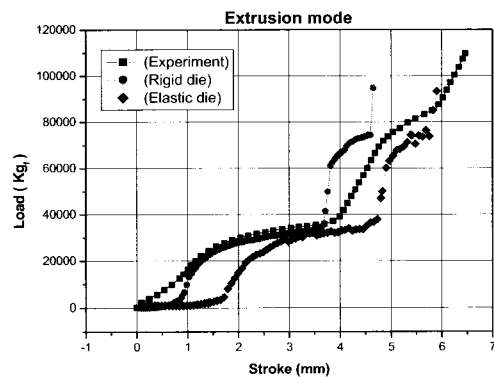


Fig. 6 Stroke-load curve by experiment and FEA

3.2 유한요소 해석 방법에 따른 영향 분석

금형의 탄성변형을 해석할 수 있는 방법은 Table 1에 나타나 있는 바와 같이 크게 2가지 방법이 있을 수 있다. 또한, 각각의 경우에서 초경다이 인서트와 보강링 사이에 열박음에 의한 효과를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우로 구분하여 분석할 수 있다. 각각의 방법에 의해 해석된 금형의 탄성변형률을 실험 값과 비교하면 Table 4와 같다. 해석 값은 4가지 경우 모두 실험 값 보

다 큰 변형률을 나타내고 있으며, “탄성체 금형 모델”이 “강체 금형 모델” 보다 실험값과 좋은 일치율을 나타내고 있다. 또한, 초경 다이 인서트와 보강링간 열박음(Shrink Fitting)에 의한 영향은, 열박음을 고려하지 않은 경우 1.03 ~ 3.7배 정도 실험값 보다 큰 값을 나타내는 반면, 열박음을 고려한 경우는 실험값에 비해 10배 이상 차이가 나타나고 있다. 이는 열박음에 의한 변형률이 과대 평가되고 있는 것으로 판단된다. 열박음을 고려할 경우 해석값이 과대 평가되는 이유는 실험에 의해 측정된 변형률은 열박음에 의해 제조된 금형에서 변형률을 측정하기 때문에 열박음시에 발생하는 변형률은 측정되지 않는 것과는 달리, 일반적인 금형 응력 해석에서는 실제 치수로 모델링된 금형에서 열박음에 의해 발생하는 변형률을 포함하여 해석을 수행하기 때문이다. Fig. 7은 이에 대한 개념을 도식적으로 설명하고 있다.

5와 같다. 따라서, 과대 평가되는 크기를 해석결과에서 고려해야만 한다.

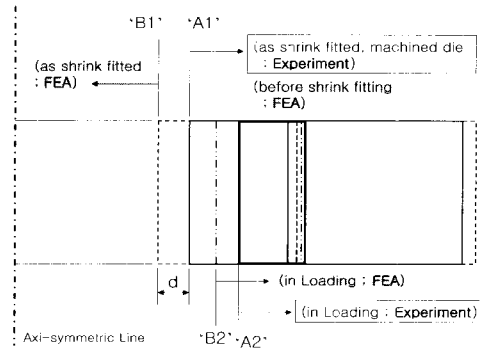


Fig. 7 The difference of shrink fitting consideration between experiment and FEA

Table 4 The comparisons of circumferential strains according to the FEA models

No Shrink Fitting [$\times 10^{-4}$]			
Distance from the center	Rigid Die	Elastic Die	Experiment
	Assumption	Assumption	
16 mm	-5.70	-2.80	-1.54
27 mm	4.52	3.09	2.41
32 mm	3.78	2.60	2.23
37 mm	3.28	2.20	2.14
Shrink Fitting [$\times 10^{-4}$]			
Distance from the center	Rigid Die	Elastic Die	Experiment
	Assumption	Assumption	
16 mm	-14.80	-13.00	-1.54
27 mm	28.62	28.00	2.41
32 mm	21.80	21.50	2.23
37 mm	17.71	17.40	2.14

Table 5 The circumferential strain generated by the shrink fitting

Distance from the center	Strain by the Shrink Fitting [$\times 10^{-4}$]
16 mm	-11.60
27 mm	25.50
32 mm	19.20
37 mm	15.20

그림에서 알 수 있듯이 실제 금형은 “A1”의 치수로 가공되어 실험에 사용된 후 하중 부가 상태>Loading)에서 “A2”로 탄성 변형이 이루어지나, 유한요소해석에서는 초기 “A1”의 치수로 모델링 된 금형이 열박음 해석에 의해 “B1”으로 치수가 변화된 상태에서 하중 부가에 의해 “B2”로 탄성변형이 이루어지므로 실험에 의해 측정된 탄성변형률은 A1과 B1의 차이인 “d” 크기 만큼 변형률의 차이가 나타나게 된다. 그러므로, 열박음 효과를 고려한 해석 결과는 측정 값 보다 “d”의 크기 만큼 과대평가 되는 것이다. 열박음에 의한 금형의 탄성변형률은 Table

Table 6은 Table 5에 나타나 있는 열박음에 의한 탄성변형률을 제거한 후의 원주 방향 탄성변형률을 나타낸 것으로, 열박음에 의한 탄성변형률 값을 제거하면, “탄성체 금형 모델”로 해석한 경우가 실험 값과의 차이가 가장 미소함을 알 수 있다. 그러므로, 보강링을 이용하는 냉간 단조 금형의 경우 금형의 탄성 변형률은 열박음 효과를 고려하여 분석해야 하며 이를 위해서는 변형률 계산시 열박음에 의해 발생하는 변형된 금형의 치수를 보정해야 한다.

해석 방법에 따른 영향을 각 위치별로 실험 값과 비교하면 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 “탄성체 금형 모델”로 열박음 효과를 고려한 유한요소해석 결과가 실험값과 가장 우수한 일치율을 나타내고 있음을 알 수 있었으며 그 오차는 최대 1.3×10^{-5} 의 미소한 차이를 나타내고 있다. 각 부위에서의 변형률을 반경 치수로 환산하면 Table 7과 같이 μm 단위의 차이를 나타내고 있어, 금형의 탄성변형에 대한 정량적인 분석을 가능하게 할 것으로 기대된다. Fig. 9는 “탄성체 금형 모델”에 의해 해

석된 금형의 탄성 변형률을 나타내고 있다.

Table 6 The comparisons of circumferential strains considered effect by shrink fitting

Distance from the center	Fitting [$\times 10^{-4}$]		Experiment
	Rigid Die Assumption	Elastic Die Assumption	
16 mm	-3.20	-1.41	-1.54
27 mm	3.12	2.50	2.41
32 mm	2.60	2.32	2.23
37 mm	2.51	2.20	2.14

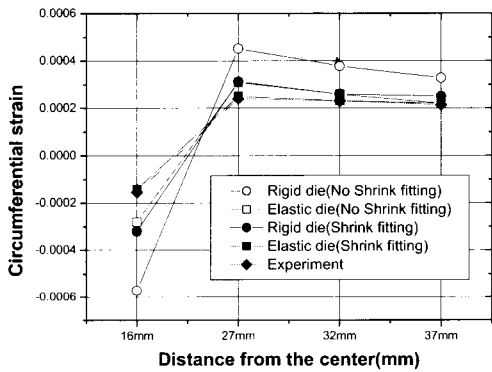


Fig. 8 The comparisons of circumferential strain between experiment and each FEA models

3.3 단계별 금형의 탄성 변형량

편치가 하중 부가 후 복귀되는 하중 제거단계에서는 각 위치별 변형률이 일정하게 정적상태가 유지됨은 Fig. 5에서 알 수 있었다. 초경 다이 인서트부에서 측정된 위치의 변형을 기준으로 단계별로 정리하면 다음과 같다. 성형 공정이 종료된 후 하중이 제거되면 초경 다이 인서트 상단은 수축되며, 또한 소재의 취출시 금형의 초경인서트 부위에서 변형률이 급격히 팽창하는것은 성형시 발생하는 굽힘모멘트에 의해 초경인서트 부위가 압축변형률이 발생된 후 취출되면서 소재가 금형에 압력을 가하기 때문이다.

이러한 현상을 각 단계별로 정리하면, Fig. 10에 나타나 있는 바와 같이 무부하 상태에서 금형은 하중을 가하면 상부 초경인서트는 굽힘모멘트에 의해서 상단에서 압축 변형을 하고 하중을 제거하면 금형의 상단은 인장변형을 하여 팽창을 한다. 그리고 소재를 취출할때는 소재가 금

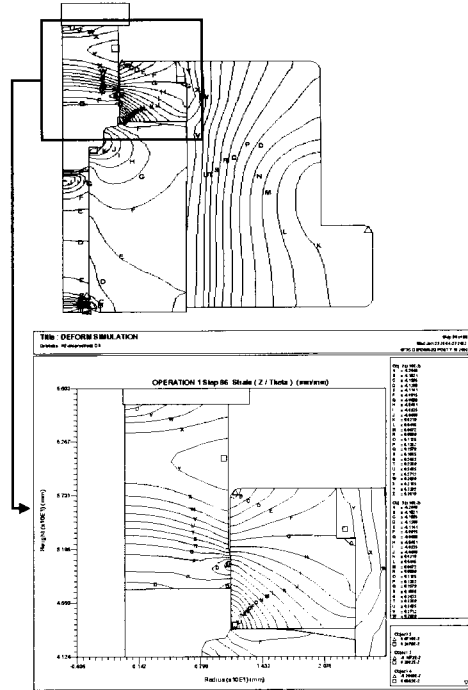


Fig. 9 The circumferential strain distributions analyzed by elastic die assumption

Table 7 Displacement comparison of calculation and measurement

Distance from the center	Circumference change [μm]		
	Rigid Die Assumption	Elastic Die Assumption	Experiment
16 mm	-32.2	-14.2	-15.5
27 mm	52.9	42.4	40.9
32 mm	52.3	46.6	44.8
37 mm	58.4	51.1	49.8

Distance from the center	Radius change [μm]		
	Rigid Die Assumption	Elastic Die Assumption	Experiment
16 mm	-5.1	-2.3	-2.5
27 mm	8.4	6.8	6.5
32 mm	8.3	7.4	7.1
37 mm	9.3	8.1	7.9

형에 압축응력을 가하므로 금형은 최대인장변형을 하고 취출후에는 가공된 치수로 복귀한다. 따라서 금형은 ② → ① → ③ → ④ → ②와 같은 치수변화를 반복한다. 각 단조 공정별 초경인서트의 반경 치수 변화를 스트레

인 게이지로 측정된 위치에서의 원주방향 변형량을 계산하면 Table 8과 같은 결과를 얻을 수 있다. 무 부하시의 금형 치수(②번)를 기준으로 각각의 치수 변화를 살펴보면, 금형은 최대 단조 하중시에 약 2.5 μm의 반경 수축이 발생된 후 펀치 복귀시에 1.5μm의 반경 증가가, 취출시에는 5.5μm의 반경증가가 발생된다. 따라서, 단계별 금형 상단부(초경 인서트 부위)의 치수 변화를 살펴보면 금형의 탄성 팽창량은 최대 하중이 작용되는 하중 부가 단계뿐만 아니라, 단조품 취출 단계에서도 단조품과 금형 간 탄성변형이 추가적으로 발생되며, 본 연구에서 사용한 모델 경우와 같이 펀치가 다이 내부로 진행되는 밀폐형 금형일 경우는 그 양이 부위에 따라서는 하중 부가시의 탄성 변형량 보다 크다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과를 종합하면, 치수정밀도 측면에서도 간과하기 쉬운 단조품 취출 시의 금형의 탄성변형 거동은 단조품의 최종 치수에 영향을 미칠 수 있으므로 각 단계별 금형의 탄성 변형을 보다 세분화하여 정량적으로 분석해야 할 필요성이 있음을 알 수 있다.

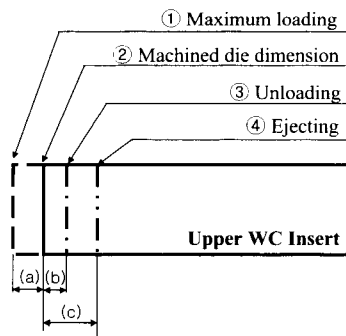


Fig. 10 Change of die dimension in process

Table 8 Deflections measured in WC tip at each step

Step	Loading	Unloading	Ejecting
Change of Radius dimension	-2.630μm	1.526μm	5.670μm

4. 결론

실제 금형의 탄성팽창과 유한요소 해석에 의한 금형의 탄성 팽창량의 관계를 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- (1) 금형의 상단에 스트레인 게이지를 부착하여 단조

시 위치별 금형의 변형량을 측정하여 하중 부가, 하중 제거, 단조품 취출시 금형은 탄성 범위내에서 압축과 인장변형을 반복하며, 그 형태는 소요하중과 동일한 형태를 나타낸다.

- (2) 금형의 탄성 변형률을 예측하기 위한 유한요소해석시 금형을 탄성체로 가정하여 변형해석과 금형의 탄성 변형도 동시에 해석이 가능한 방법인 탄성체 금형 모델이 보다 우수한 결과를 얻을 수 있으며 μm단위의 변형률을 예측할 수 있었다.

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

- (4) 성형 후 취출시에 단조 하중에 의해 잔류하는 소재와 금형의 압력에 의해 단조품은 금형을 추가적으로 탄성 팽창시키며, 펀치가 다이 내부로 진행되는 밀폐형 금형일 경우는 그 양이 성형시의 탄성 변형량 보다 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 금형의 탄성 팽창은 각 단계별로 분석이 필요하다.

이상의 결과를 토대로 금형의 탄성 변형에 의한 단조품의 치수 변화를 정량적으로 분석하기 위해서는 보강링 효과를 현실적으로 고려할 수 있는 해석 방법의 연구가 필요하며, 단조 공정의 단계(하중 부가, 하중제거, 단조품 취출)별 탄성 변형에 대한 이론적인 체계화가 무절삭 정밀 단조 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) S.Matsubara, H.Kudo, 1991, "Nonuniform pressure distribution on punch nose surface in axisymmetric cold forging processes", J. JSTP Vol.32 (366) pp.874~879.
- (2) 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.
- (3) 이강희, 박용복, 2001, "전방압출 공정에서의 제품 변형 이력", 한국소성가공학회지, 제10권, 제1호, pp.75

- ~79.
- (4) 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.
 - (5) 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.
 - (6) Geun-An Lee, Yong-Taek Im, 1999, "Finite element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming", J. of Materials Processing Technology, Vol.89-90 pp.123~127.
 - (7) 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.
 - (8) 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.
 - (9) Xian Lu, Raj Balendra, 2001, "Pressure contours on forming dies Part II : Finite element simulation", J. of Materials Processing Technology, Vol.115 pp.220~226.
 - (10) 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.
 - (11) 이대근, 이영선, 김원일, 이정환, 2001, "단조형식에 따른 단조품과 금형의 탄성변형에 관한 연구", '01 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 C, pp.586~591.