

냉간 밀폐 업세팅시 금형과 단조소재의 성형 단계별 치수 변화

이영선* · 권용남* · 천세환** · 이정환*

(2003년 9월 5일 접수)

Dimensional Changes of Workpiece and Die in Cold Upsetting by the Closed-Die at Each Stage

Y. S. Lee, Y. N. Kwon, S. H. Chun and J. H. Lee

Abstract

The dimensions of die and workpiece are changed continuously during loading, unloading, and ejecting stage. Finally, to predict precisely the dimension of forged part and get the die dimension for the net-shape components, the analysis of die and workpiece should be evaluated from the loading to ejecting. Therefore, the experimental and FEM analyses are performed to investigate the elastic characteristics at workpiece and die in the closed-die upsetting for ferrous material. FE techniques are proposed to consider the unloading and ejecting stages and estimate more precisely the dimension of forged part and die. The dimensional changes for the workpiece were evaluated quantitatively during loading, unloading, and ejecting stages. The strains measured by the strain gages were compared with the estimated values by the FEM.

Key Words : Closed Die, Cold Upsetting, FEM, Dimensional Change, Strain Gage, Loading, Unloading, Ejecting

1. 서론

정형 제조를 목표로 한 냉간 단조 기술은 단조품의 치수 정밀도를 향상시켜 기계가공 공정을 생략하거나 기계가공량을 최소화하고자 많은 연구들이 이루어져 왔으며, 최근들어 금형 수명 향상과 함께 냉간단조 기술 연구의 핵심이 되고 있다. 냉간단조품이 금형과 다른 치수를 갖게되는 요인을 살펴보면 프레스의 정밀도, 단조시 발생하는 열에 의한 열팽창 수축량과 함께 금형과 단조품의 탄성 변형에 의한 치수 변화 등이 대표적이다. 이 가운데 철계 소재에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 탄성 변형에 의한 금형과 단조품의

치수변화라 할 수 있다. 탄성변형은 제품의 형상과 소재 종류에 따라 달라지기 때문에 각각의 경우에 따라 보정량을 설계하여 이를 반영해야 한다. 따라서, 시행오차를 감소시키기 위해 이론적 해석과 실험적 접근을 통해 탄성변형에 대한 정량적인 분석을 수행하고 이를 설계에 반영하고자 하는 많은 연구들이 수행되어 왔다.⁽¹⁻³⁾ 본 연구에서 사용한 원통형 냉간 밀폐 업세팅은 냉간단조시 주로 이용되는 단조 형태 가운데 하나이며, 이론적 분석이 용이하기 때문에 많은 연구들이 진행되어⁽⁴⁻⁸⁾ 단조품의 치수 정밀도를 보다 정확하게 예측하고자 하였다. 단조품의 치수 정밀도 제어를 위해서는 우선적으로 단조품의 치수를 보다 정확

* 한국기계연구원 공정연구부 소성응용그룹

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

히 예측할 수 있어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 단조품의 치수 예측 정밀도를 향상시키기 위한 FEM 해석 기술을 정립하고자 Fig. 1 과 같은 모델을 이용한 실험을 통해 금형의 탄성 변형량과 단조품의 치수를 정량적으로 측정하였으며 탄소성 FEM 해석(DEFORM-2D™)을 통해 금형과 단조품의 탄성 변형량을 정량적으로 비교 분석하였다.

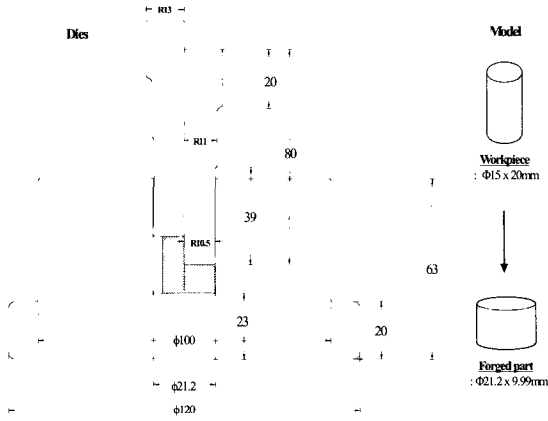


Fig. 1 Model and die used in experiment and FEM analysis

2. 금형의 탄성변형량 측정

금형의 탄성 변형량을 정량적으로 분석하기 위해 Fig. 2 와 같이 스트레인 게이지를 금형에 부착하여 단조 공정>Loading, Unloading) 동안 실시간으로 금형의 부위별 탄성 변형량을 측정하였다. 또한, 단조하중에 따른 금형과 단조품의 탄성 변형량과 단조품의 부위별 치수편차를 분석하기 위해 200 톤 CNC 압축시험기에서 단조 하중을 60 톤, 80 톤, 100 톤 기준으로 가압하여 각각의 변형량과 치수를 분석하였다. 금형의 탄성 변형율은 2 개의 위치에서 반경 변형율을 6 개의 위치에서 원주 방향 변형율을 측정하였다. 금형은 STD61 (AISI H13) 중 소재를, 단조용 소재는 냉간 단조를 위해 구상화 소둔 열처리된 기어용 침탄강인 SCM420 을 사용하였다.

Fig. 3 은 100 톤의 하중으로 가압했을 경우의 가압>Loading) 공정과 제하>Unloading) 공정까지의 부위별 탄성 변형율을 나타내고 있다.

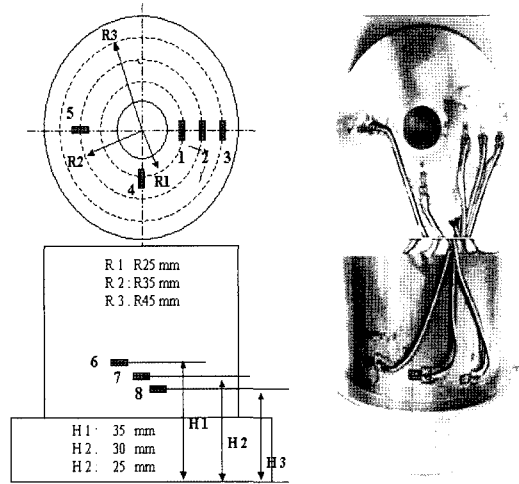


Fig. 2 Strain gages and locations attached in dies

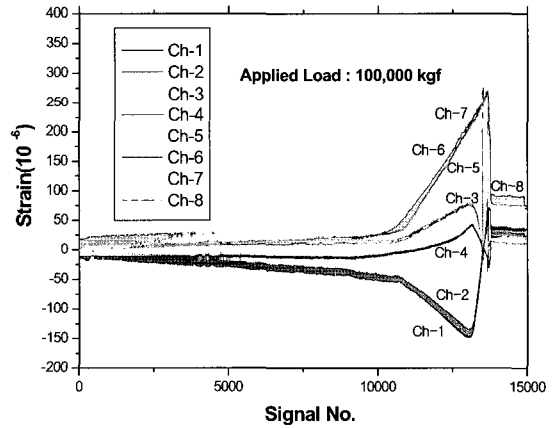


Fig. 3 Elastic strains of die measured by the strain gages

단조품의 탄성 변형은 직접 측정이 곤란하므로 금형의 탄성 변형량을 측정하여 해석값과 비교 분석함으로써 단조품의 탄성 변형량 예측에 대한 FEM 해석의 신뢰성을 입증하고자 하였다. Fig. 4 는 금형의 탄성 변형율을 가압시와 제하시에 비교한 것으로, 가압시에는 가압하중에 따라 측정값과 해석값이 2×10^{-4} , 제하시에는 2×10^{-5} 로 미소한 차이를 나타내고 있어 FEM 해석을 이용한 금형의 응력 및 탄성 변형의 정량적인 분석이 가능함을 입증하였다.

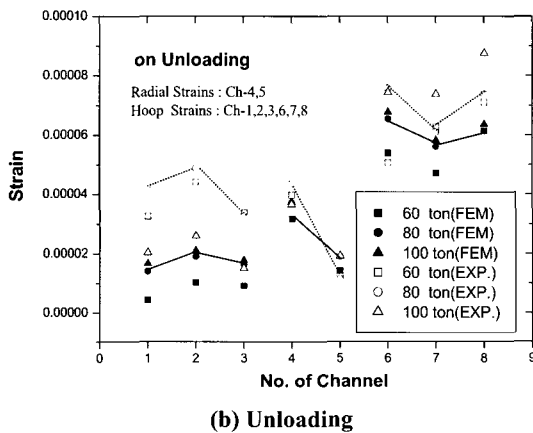
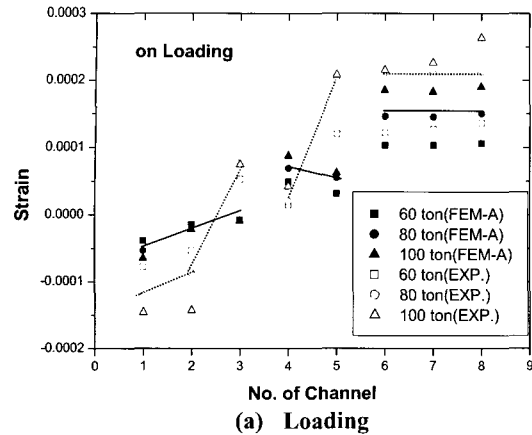


Fig. 4 Comparisons of measured elastic strains and estimated strains for die

3. FEM 해석에 의한 금형과 단조 소재의 탄성 변형량 분석

금형과 단조 소재의 탄성 변형량을 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 FEM 해석시 금형은 탄성체로 단조소재는 탄-소성체를 이용하였다. 또한, 가압 후 편치가 후퇴하는 동안 발생하는 금형 수축에 의한 단조 소재의 2 차변형을 분석하기 위해 실험과 동일한 조건으로 제하 공정 또한 해석을 수행하였다. Table 1 은 본 연구에서 사용한 세가지 해석방법을, Table 2 는 물성치를 나타내고 있다. 해석에 사용된 유동응력은 압축시험을, 항복응력은 인장시험을 통해, 탄성계수는 초음파를 이용한 측정(ASTM E-1875-00)법을 이용하여 직접 측정한 결과를 이용하였다.

Table 1 FE variables used in analysis

	Loading	Unloading	Ejecting	Remarks
FEM-A	○	○	○	
FEM-B	○	○	×	Unloading → Stress Relief
FEM-C	○	×	×	Loading → Stress Relief

Table 2 Material properties

	Die	Workpiece
Material	STD61	SCM420
Young's Modulus(Gpa)	218	211
Possion's Ratio	0.29	0.29
Flow Stress (Mpa)	-	759 $\epsilon^{0.12}$
Yield Stress (Mpa)	-	415

3.1 단조 공정의 해석 방법에 따른 영향

Table 1 에 나타나 있듯이 FEM-A 방법은 가압-하중 제거-제품 취출 공정을 실제와 동일한 조건으로 해석을 수행한 것이며, FEM-B 는 가압-하중 제거 후 단조품의 탄성 회복을 해석한 것이다. 또한, FEM-C 는 단조 가압 후 단조품의 탄성회복을 해석한 것으로 3 가지 방법의 결과가 단조품 치수와 단조품의 잔류응력 분포에서 많은 차이를 나타내고 있다. Fig.5 는 해석 방법에 따른 단조품의 잔류응력 분포로서 FEM-B 에 의한 결과값의 경우는 편치 후퇴시 금형의 수축에 의해 단조품의 2 차 항복에 의한 응력 해소로 잔류응력이 거의 존재하지 않고 있는 반면 FEM-C 의 경우는 제하 시 발생하는 2 차 항복의 고려 없이 탄성변형 해석이 이루어지므로 부위별로 유동응력 크기에 해당되는 인장응력과 압축응력이 잔류하고 있다. 가압-제하-취출 공정을 모두 해석한 FEM-A 의 경우는 FEM-B 의 결과에 비해 단조품 하단의 표면에 압축응력이 잔류하고 있는데, 그 이유는 취출 공정 동안에 굽힘 잔류 응력이 존재하는 금형과의 접촉으로 인한 3 차 항복이 발생되기 때문이다. 단조품의 치수측정 결과에서도 제품 하단의 치수가 다른 부위에 비해 상대적으로 작은 값을

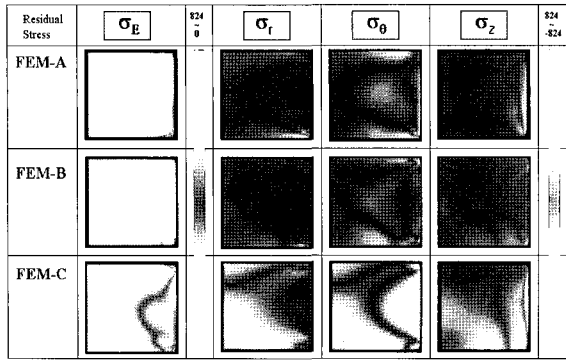


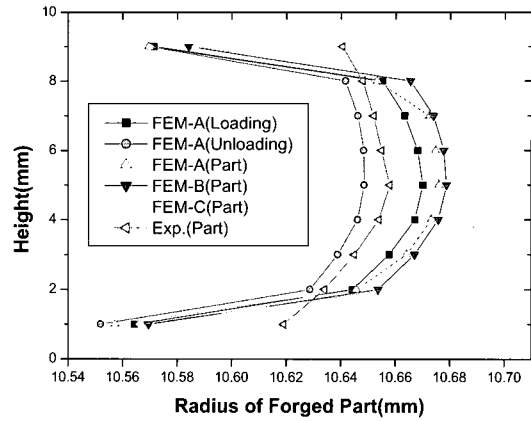
Fig. 5 Residual stresses for forged part at each FE technique (Applied Load = 100,000kgf)

나타내므로써 3 차 항복 발생의 근거를 나타내고 있다.

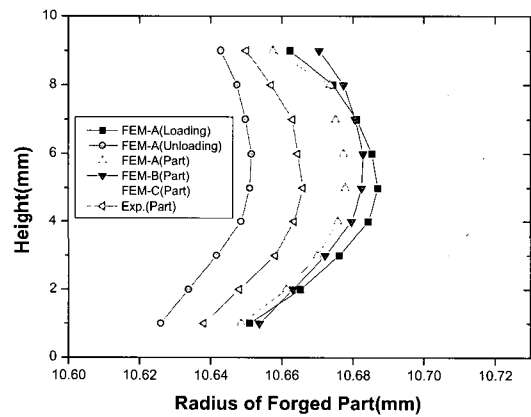
각 공정에 대한 해석 방법이 탄성변형에 미치는 영향을 분석하기 위해 단조품의 부위별 치수를 3 차원 측정기를 이용하여 측정된 결과와 해석 결과를 비교하면 Fig. 6 과 같다. Fig.6 에서 알 수 있듯이 단조품 치수는 세가지 가압하중에서 모두 실제 단조 공정과 동일한 조건으로 해석한 FEM-A 의 경우가 실 단조품과 가장 좋은 일치율을 나타내고 있으며 가압 후 탄성회복을 해석하는 FEM-C 의 경우가 가장 큰 치수 차이를 나타내었다. 가압-제하 후 탄성회복을 수행하는 FEM-B 의 경우는 FEM-A 의 경우와 근사하지만 보다 큰 치수를 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이 단조품 취출시 발생된 3 차 항복이 반영되지 않았기 때문으로 판단된다. 3 차 항복에 대한 근거는 Fig. 5 의 잔류응력 분포와 함께 Fig. 6 의 제품 하단에서 FEM-A 의 치수와 FEM-B 의 결과치수가 중앙부위에 비해 더 큰 차이를 나타내는 것이 그 근거를 설명해 주고 있다.

3.2 가압 하중에 따른 영향

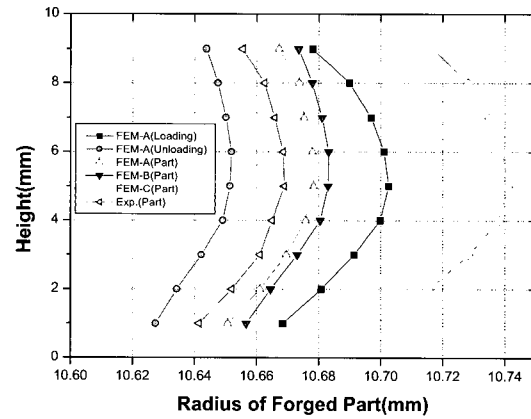
가압 하중의 크기에 따른 단조품 외관 및 치수는 Fig. 7 에 나타나 있는 바와 같이 60 톤과 80 톤은 10~20 μm 의 치수 차이를 나타내고 있는 반면, 80 톤과 100 톤은 2~3 μm 의 치수 차이를 나타내고 있어 60 톤과 80 톤 사이에 역치값을 나타내는 하중이 존재함을 알 수 있다. 가압시 금형의 팽창량, 펀치 후퇴시 제하에 의한 금형 및 단조품의 수축량, 취출에 의한 단조품의 탄성회복량은 Fig. 8 과 같다.



(a) Applied load : 60,000 kg

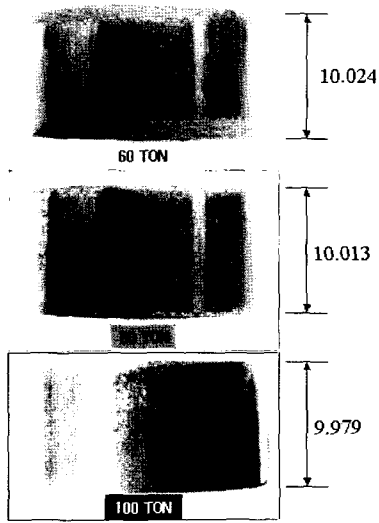


(b) Applied load : 80,000 kg

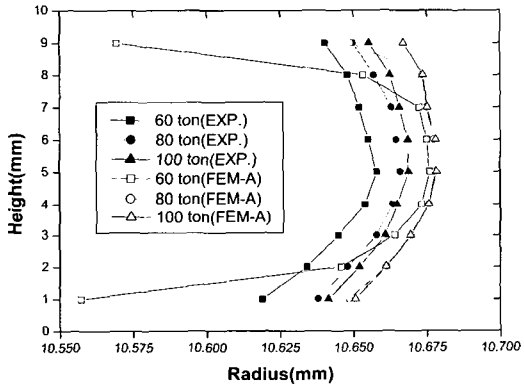


(c) Applied load : 100,000 kg

Fig. 6 Radius for forged part at each FE technique

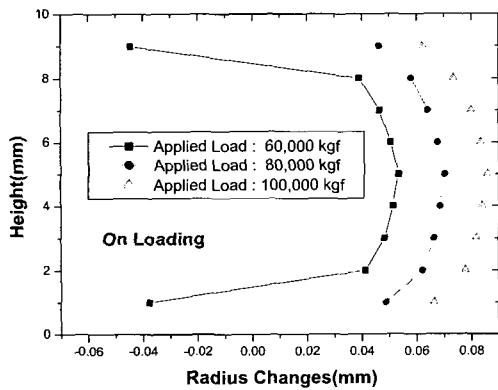


(a) Forged parts

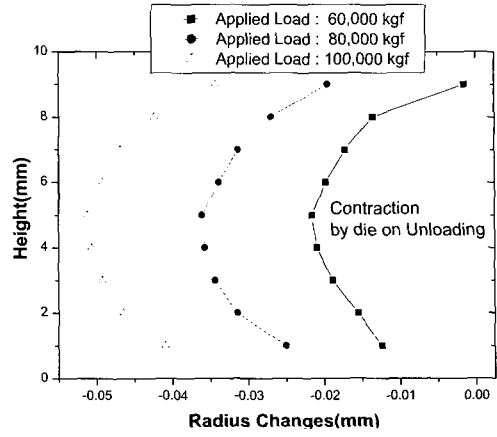


(b) Radius

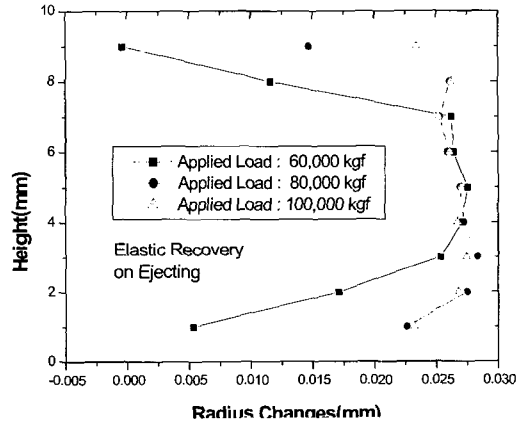
Fig. 7 Heights and radius of forged part according to the applied load



(a) Expansion by loading



(b) Contraction by the unloading



(c) Expansion by the elastic recovery

Fig. 8 The estimated values of radius changes during each stage resulting from each punch load

Fig. 8(a)에 나타나 있듯이 가압시 금형의 탄성 팽창량은 가압 하중에 비례적으로 증가되며, Fig. 8(b)의 제하시 금형의 수축량 또한 하중에 비례적으로 증가된다. 그러나, 취출에 의한 단조품의 팽창량은 Fig. 8(c)와 같이 25~27 μm 수준에서 동일한 값을 나타내고 있는데, 그 이유는 하중이 계속적으로 증가되더라도 단조품에 가해지는 응력은 소재의 유동응력 수준이기 때문에 성형 하중에 관계없이 동일한 탄성회복량을 나타내는 것으로 판단된다.

4. 결론

밀폐 단조시 금형과 단조품의 탄성 변형량을 분석하기 위해 원통 형상 모델을 이용하여 실험과 FEM 해석을 수행하였다. 금형에 스트레인게이지를 부착하여 측정된 금형의 탄성 변형율은 해석에서 분석된 탄성 변형율과 비교 분석하므로써 해석결과의 신뢰성을 입증하였으며 단조품의 치수를 측정하여 해석을 통해 예측된 단조품의 치수와 비교 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 직접 측정이 곤란한 부위별 금형의 탄성 변형량을 분석하기 위해 측정 가능한 금형 표면에서 실시간으로 탄성 변형율을 측정하고 이를 유한요소해석과 동일 부위에서 비교 분석한 결과, 좋은 일치를 나타내고 있어 유한요소해석을 통하여 각 부위별, 공정간 금형의 탄성 변형율의 정량적 분석에 대한 신뢰성을 확립하였다.

(2) 유한요소해석을 이용하여 단조 금형과 단조품의 탄성 변형율을 정량적으로 분석하기 위해서는 최대한 해석 모델을 실제와 동일하게 처리할 필요가 있음을 확인하였다. 즉, 단조 소재는 탄-소성체, 금형은 탄성체로 가정하고, 가압((Loading)-제하(Unloading)-제품취출(Ejecting)의 각 공정을 생략하지 않고 실제와 동일하게 해석을 수행할 경우가 실험값과 가장 좋은 일치를 나타내며, 이때 실 단조품과 해석 결과는 반경치수로 10 μm 이내로 우수한 예측 정밀도를 나타내었다.

(3) 해석 결과로부터, 단조가압과 제하시 단조

품과 단조 금형의 치수는 가압 하중에 비례적으로 거동하나, 단조품의 취출 후 탄성 회복량은 가압 하중에는 무관하고 단조품의 탄성계수에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로 진행된 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Y.Qin, R.Balendra, Int. J. Mach. Tools Manufact., 37 (2) (1997), pp. 183~192.
- (2) T.Ishikawa, etc., Annals of the CIRP, 49 (1) (2000), pp. 169~172.
- (3) Y.S. Lee, J.H. Lee, T.Ishikawa, J. of Materials Processing Technology, 130-131 (2002), pp. 532~539.
- (4) M.H.Sadeghi, etc., Proc. Instn. Mech. Eng., 205(1991), p. 171.
- (5) B.Raddad, etc., Proc. 4th ICTP, 1993, p. 242.
- (6) A.Rosochowski, etc. J. of Material Processing Technology, 58(1996), pp. 145~152.
- (7) 이강희, 박용복, 한국소성가공학회 '99 춘계학술대회 논문집, 1999, pp. 94~97.
- (8) A.Rosochowski, etc. J. of Material Processing Technology, 115(2001), pp. 233~239.