

## 냉간 밀폐 업세팅시 금형과 단조소재의 성형 단계별 치수 변화

이영선\*, 권용남\*, 천세환\*\*, 이정환\*

### 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\*\*, 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 analysis 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(밀폐금형), Cold Upsetting(냉간업세팅), FEM(유한요소법), Strain Gage(스트레인게이지), Loading(가압), Unloading(제하), Ejecting(취출)

#### 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. 냉간 단조품이 금형과 다른 치수를 갖게되는 요인을 살펴보면 프레스의 정밀도, 단조시 발생하는 열에 의한 열팽창·수축량과 함께 금형과 단조품의 탄

\* 한국기계연구원

\*\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

성 변형에 의한 치수 변화 등이 대표적이다. 이 가운데 철계 소재에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 탄성 변형에 의한 금형과 단조품의 치수변화라 할 수 있다. 탄성 변형은 제품의 형상과 소재 종류에 따라 달라지기 때문에 각각의 경우에 따라 보정량을 설계하여 이를 반영해야 한다. 따라서, 시행오차를 감소시키기 위해 이론적 해석과 실험적 접근을 통해 탄성 변형에 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 정확히 예측할 수 있어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 단조품의 치수 예측 정밀도를 향상시키기 위한 FEM해석 기술을 정립하고자 그림 1과 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.

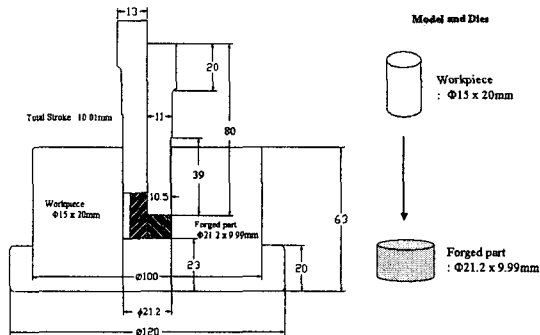


Fig. 1 Model and die used in experiment and FEM analysis

## 2. 금형의 탄성 변형량 측정

금형의 탄성 변형량을 정량적으로 분석하기 위해 그림 2와 같이 스트레인 게이지를 금형에 부착하여 단조 공정(Loading, Unloading) 동안 실시간으

로 금형의 부위별 탄성 변형량을 측정하였다. 또한, 단조하중에 따른 금형과 단조품의 탄성 변형량과 단조품의 부위별 치수편차를 분석하기 위해 200톤 CNC 압축시험기에서 단조 하중을 60톤, 80톤, 100톤 기준으로 가압하여 각각의 변형량과 치수를 분석하였다. 금형의 탄성 변형율은 2개의 위치에서는 반경 변형율을 6개의 위치에서는 원주방향 변형율을 측정하였다.

금형은 STD61(AISI H13)종 소재가 사용되었으며, 단조용 소재는 냉간단조를 위해 구상화 소둔 처리된 기어용 침탄강인 SCM420이 사용되었다.

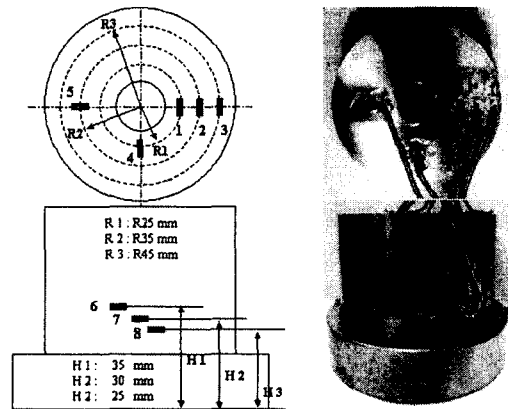


Fig.2 Strain gages and locations attached in dies

그림 3은 100톤의 하중으로 가압했을 경우의 Loading 공정과 Unloading 공정까지의 부위별 탄성 변형율을 나타내고 있다.

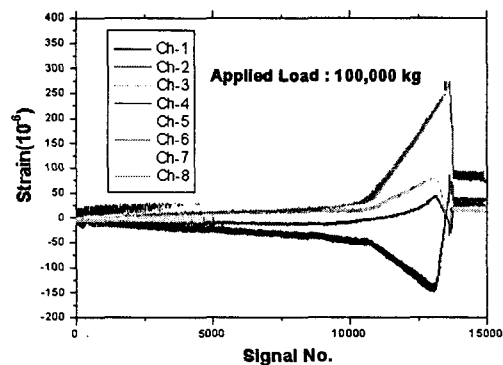
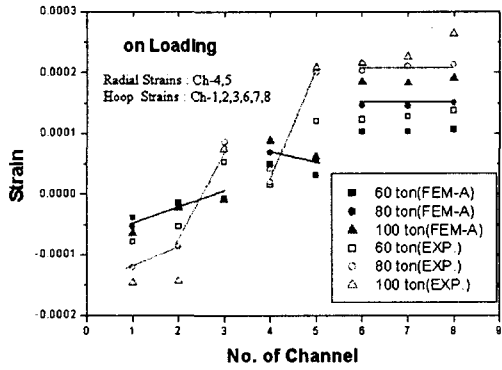
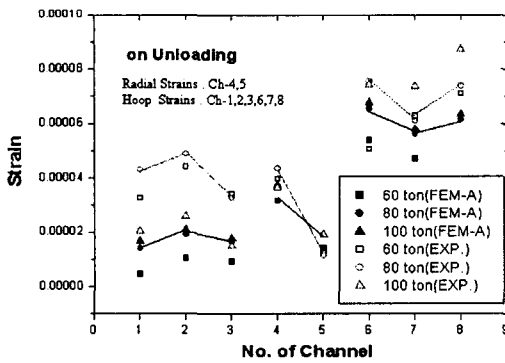


Fig.3 Elastic strains of die measured by the strain gages

단조품의 탄성 변형은 직접 측정이 곤란하므로 금형의 탄성변형량을 측정하여 해석값과 비교·분석하므로써 단조품의 탄성 변형량 예측에 대한 FEM해석의 신뢰성을 입증하고자 하였다. 그림 4는 금형의 탄성변형율을 가압시와 제하시에 비교한 것으로, 가압시에는 가압하중에 따라 측정값과 해석값이  $2 \times 10^{-4}$ , 제하시에는  $2 \times 10^{-5}$  까지 차이를 나타내고 있어 가압시에 반경방향으로의 균일한 변형이 곤란함을 알 수 있다.



(a) Loading



(b) Unloading

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 탄성변형량을 정량적으로 분석하기 위해 본 연구에서는 FEM해석시 금형은 탄성체로 단조소재는 탄-소성체를 이용하였다. 또한, 가압(Loading)후 펀치가 후퇴하는 동안 발생

되는 금형 수축에 의한 단조 소재의 2차변형을 분석하기 위해 실험과 동일한 조건으로 제하(Unloading)공정도 해석을 수행하였다. 표 1은 본 연구에서 사용한 3가지 해석방법을, 표 2는 물성치를 나타내고 있다. 해석에 사용된 유동응력은 압축시험을, 항복응력은 인장시험을 통해, 탄성계수는 초음파를 이용한 측정(ASTM E-1875-00)법을 이용하여 직접 측정된 결과를 이용하였다.

Table 1 FE Variables used in analysis

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

Table 2 Material Properties

	Die	Workpiece
Material	AISI H-13	SCM420
Young's Modulus(GPa)	218	211
Poisson'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

표 1에 나타나 있듯이 FEM-A방법은 가압-하중제거-제품 취출 공정을 실제와 동일한 조건으로 해석을 수행한 것이며, FEM-B는 가압-하중제거 후 단조품의 탄성 회복을 해석한 것이다. 또한, FEM-C는 단조 가압 후 단조품의 탄성회복을 해석한 것으로 3가지 방법의 결과가 단조품 치수와 단조품의 잔류응력 분포에서 많은 차이를 나타내고 있다. 그림 5는 해석 방법에 따른 단조품의 잔류응력 분포로서 FEM-B의 결과값의 경우는 펀치 후퇴시 금형의 수축에 의해 단조품의 2차 항복에 의한 응력 해소로 잔류응력이 거의 존재하지 않고 있는 반면 FEM-C의 경우는 제하

(Unloading)시 발생하는 2차 항복의 고려없이 탄성변형 해석이 수행되었기 때문에 부위별로 유동 응력 크기의 인장응력과 압축응력이 잔류하고 있다. 가압-제하-취출 공정을 모두 해석한 FEM-A의 경우는 FEM-B의 결과에 비해 단조품 하단의 표면에 압축응력이 잔류하고 있는데, 그 이유는 취출 공정 동안에 급힘 잔류 응력이 존재하는 금형과의 접촉으로 인한 3차 항복이 발생되기 때문이다. 단조품의 치수측정 결과에서도 제품 하단의 치수 편차가 상대적으로 작은 값을 나타내므로써 3차 항복의 근거를 나타내고 있다.

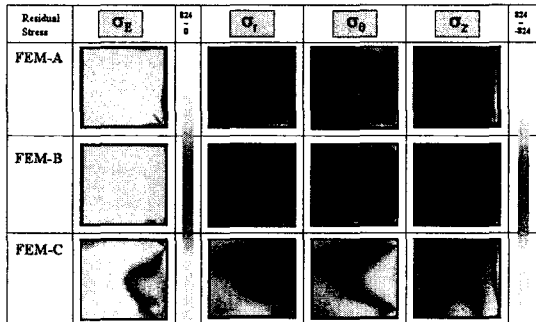
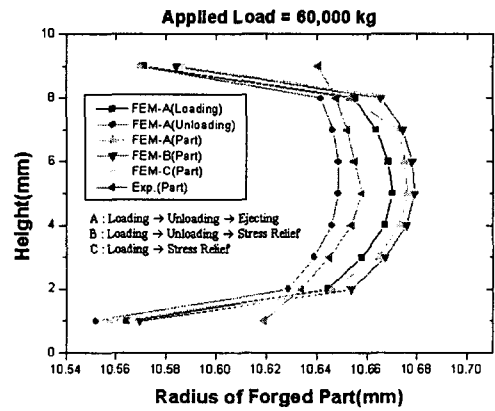
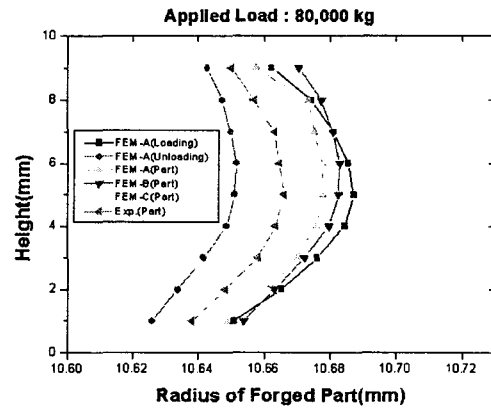


Fig. 5 Residual stresses for forged part at each FE technique  
(Applied Load = 100,000kg)

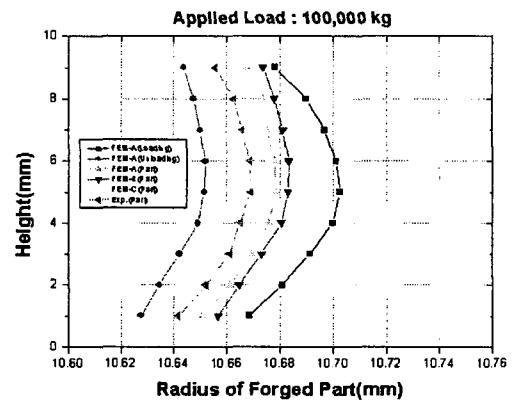
각 공정에 대한 해석 방법이 탄성변형에 미치는 영향을 분석하기 위해 단조품의 부위별 치수를 3차원 측정기를 이용하여 측정된 결과와 해석결과를 비교하면 그림 6과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 단조품 치수는 3가지 가압하중에서 모두 실제 단조 공정과 동일한 조건으로 해석한 FEM-A의 경우가 실 단조품과 가장 좋은 일치율을 나타내고 있으며 가압 후 탄성회복을 해석하는 FEM-C의 경우가 가장 큰 치수 차이를 나타내었다. 가압-제하 후 탄성회복을 수행하는 FEM-B의 경우는 FEM-A의 경우와 근사하지만 보다 큰 치수를 나타내고 있다.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



(a) Applied Load : 60,000 kg

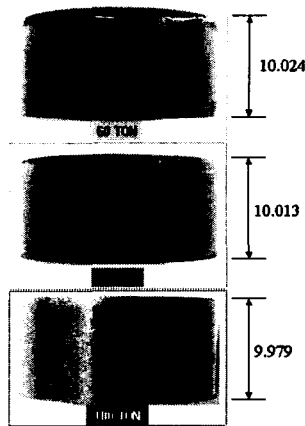


(b) Applied Load : 80,000 kg

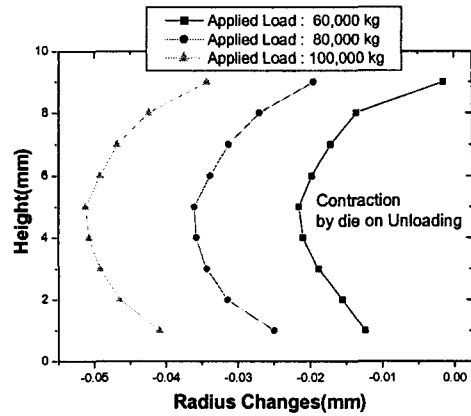


(c) Applied Load : 100,000 kg

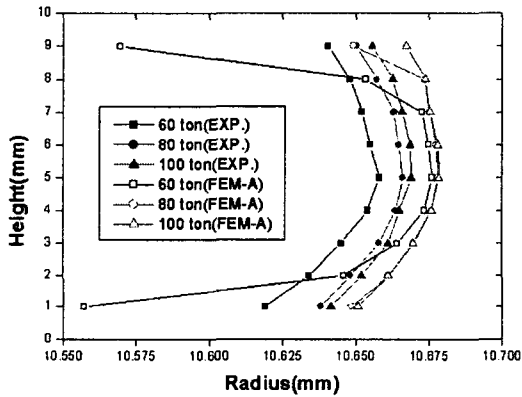
Fig. 6 Radius for forged part at each FE technique



(a) Forged Parts

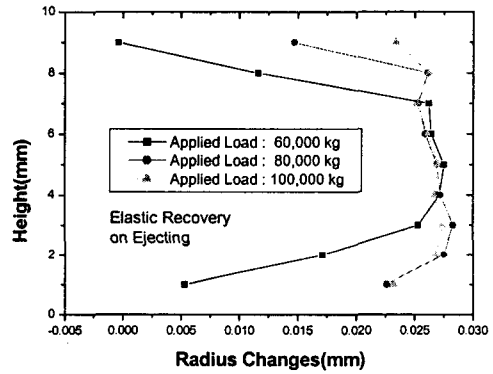


(b) Contraction by the unloading



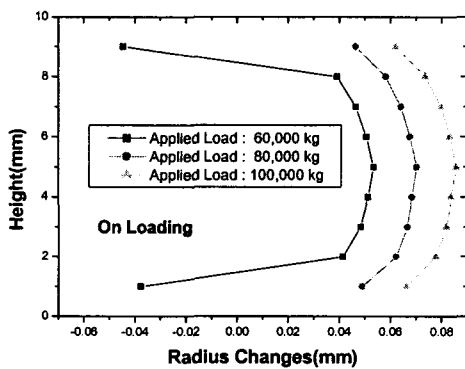
(b) Radius

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



(c) Expansion by the elastic recovery

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



(a) Expansion by loading

### 3.2 가압 하중에 따른 영향

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

그림 8(a)에 나타나 있듯이 가압시 금형의 탄성 팽창량은 가압 하중에 비례적으로 증가되며, 8(b)

의 제하시 금형의 수축량 또한 하중에 비례적으로 증가된다. 그러나, 취출에 의한 단조품의 팽창량은 8(c)와 같이 25~27 $\mu$ m 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.

## 5. 결 론

밀폐 단조시 금형과 단조품의 탄성 변형량을 분석하기 위해 원통형 시편을 이용하여 단조 실험과 FEM해석을 수행한 결과, 최종 단조품의 치수에 미치는 인자는 금형의 탄성변형량이 단조 소재 보다 큰 영향을 미치고 있으며 금형의 경우는 하중에 비례적인 관계를 가지며 단조 소재의 경우는 유동응력과 탄성계수에 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), pp183-192
- [2] T.Ishikawa, etc., Annals of the CIRP, 49 (1) (2000), pp169-172.
- [3] Y.S. Lee, J.H. Lee, T.Ishikawa,, J. of Materials Processing Technology, 130-131 (2002), pp532-539
- [4] M.H.Sadeghi. etc., Proc. Instn. Mech. Eng., 205(1991), p171
- [5] B.Raddad, etc., Proc. 4th ICTP, 1993, p242
- [6] A.Rosochowski, etc. J. of Mats. Proc. Technol. 58(1996), pp145-152
- [7] 이강희, 박용복, 한국소성가공학회 '99춘계 학술대회 논문집, 1999, pp94-97
- [8] A.Rosochowski, etc. J. of Mats. Proc. Technol. 115(2001), pp233-239