

냉간 단조품의 치수 정밀 예측을 위한 유한 요소 해석 기술

이영선* · 권용남* · 이정환*

(2003년 10월 9일 접수)

FE Techniques for the Accurate Prediction of Part Dimension in Cold Forging

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

Abstract

The improvement of dimensional accuracy for forged part is one of major goals in cold forging industry. There are many problems in controlling the dimension by the trial-and-error, especially for a precision forged gear. A FEM analysis has been used in developing the forging technology. However, FE techniques have to be reconfirmed for predicting accurately the dimension of forged part. In this study, the effects of elastic characteristics and temperature changes are investigated by the comparisons between experimental and FEA in cold forging. When FE models related with elastic characteristics are considered practically, FE results could predict the part dimension within the range of $10\ \mu\text{m}$. And if thermal effects also are considered additionally, the predicted dimensions are well coincided with the experimental down to about $5\ \mu\text{m}$.

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

1. 서 론

최근의 냉간 단조 기술 개발은 금형 수명과 단조품 정밀도 향상에 집중되고 있다. 그 가운데 단조품의 정밀도를 향상시키는 것은 후속 공정을 생략함으로써 제조비용을 절감함과 동시에 단조품(특히 기어류)의 부가가치를 향상시켜주는 장점이 있는 만큼 지속적인 연구를 통해 품질향상을 꾀할 필요가 있다. 자동차용 기어의 요구 정밀도는 평균 $10\ \mu\text{m}$ 단위의 고정밀인 만큼 단조 기어의 정밀도를 만족시키기 위해서는 일반적인 수준 보

다 높은 치수 정밀도를 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 따라서, 보다 우수한 정밀도 제어를 위해서는 시행오차를 거치는 직접 실험만을 이용하는 것은 비효율적이며 해석적인 접근방법을 이용할 필요가 있다. 그러나, FEM해석의 경우도 현재까지는 대부분 μm 단위의 치수 정밀도에 대한 검증은 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 μm 단위의 단조품 치수를 예측하기 위한 기술을 개발하기 위해 원통형 시편의 밀폐 단조 실험과 비교분석하면서 각 단조 공정 변수들의 영향을 분석하였다.

* 한국기계연구원 공정연구부 소성응용그룹

또한, 이상의 체계적인 분석 결과를 보다 복잡한 형상의 실 단조품에 적용하기 위한 효율적인 해석 방법 또한 제안하였다.

2. 분석 모델 및 실험

분석에 사용된 모델은 원통형 밀폐단조로서, 금형은 STD61(AISI H13)종 소재가 사용되었으며, 단조용 소재는 냉간 단조를 위해 구상화 소둔 열처리된 기어용 침탄강인 SCM420H 가 사용되었다.

사용된 모델은 Fig. 1과 같으며 해석값에 대한 신뢰성 입증을 위해서 실험에 사용된 금형에는 총 8개의 Strain Gage를 부착하여 금형의 각 부위에서 성형 단계별로 탄성 변형율을 비교·분석하였으며 자세한 내용은 참고문헌(1)에서 언급한바 있다. 그 결과 해석에 의해 예측된 변형율이 가압시 2×10^{-4} , 제하시 2×10^{-5} 이내로 측정값과 미소한 차이를 나타내었다.(1)

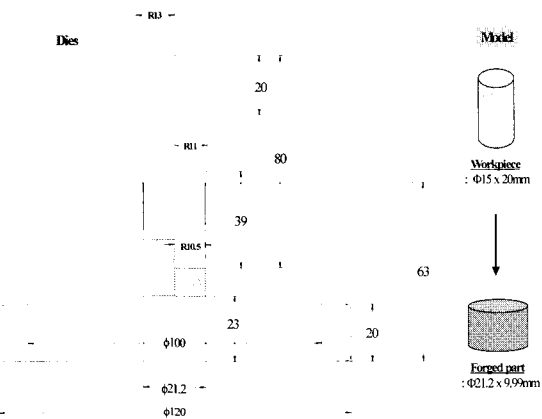


Fig. 1 Model and die used in experiment and FEM analysis

3. 단조품 치수 예측 정밀도 향상을 위한 유한요소해석 방법

FEM 해석을 이용하여 단조 공정을 해석할 때 고려할 수 있는 변수들을 정리하면, (1) 단조 소재와 금형의 재료 모델(Material Model), (2) 탄성회복 해석 방법, (3) 물성치의 영향 (4) 변형 유기 발생 열에 의한 수축/팽창 고려 유무 등으로 구분할 수

있다. 이 가운데, (1) 재료 모델에 따른 영향은 참고문헌(2)에서 분석한 바 있으며, 금형은 탄성체(Elastic Body), 단조 소재는 탄소성체(Elasto-Plastic Body)로 가정하는 것이 가장 우수한 결과를 나타내므로 분석 대상에서 제외하고 나머지 3 가지 변수에 대한 영향을 분석하였다. 해석에 사용된 물성치는 Table 1 과 같다.

Table 1 Material properties of die and workpiece

	Die	Workpiece
Material Designation	AISI H-13	KS-SCM420H (BS-708M20)
Elastic Modulus (Gpa)	218	211
Poission's Ratio	0.29	0.29
Flow Stress (Mpa)	-	$759\epsilon^{0.12}$
Thermal Expansion Coefficient ($^{\circ}\text{C}$)	13.1E-6	10.4E-6
Thermal Conductivity (N/sec. $^{\circ}\text{C}$)	23.7	46.6
Heat Capacity (N/mm 2 / $^{\circ}\text{C}$)	1.08	4.51
Yield Stress (Mpa)	-	415

3.1 탄성 회복 방법에 따른 영향

Balendra(3) 등은 가압>Loading)-제하(Unloading)-단조품 취출(Ejecting)로 구분할 수 있는 단조 공정 가운데, 제하 시에 발생하는 단조품의 2차 항복에 대해 분석한 바 있다. 이는 단조 성형 후 단조품의 탄성회복 해석을 곧 바로 수행하는 것은 모순된 것일 수 있다는 분석으로, 이론적인 분석을 수행한 Balendra의 분석 결과를 본 연구에서는 FEM 해석을 이용하여 단조 공정의 각 단계를 해석에 고려할 경우와 그렇지 않을 경우 최종 단조품의 치수 예측값의 변화를 비교하였다. Table 2는 해석 방법에 따른 영향을 분석하기 위해 사용한 모델의 종류를 나타내고 있다.

Fig. 2는 100,000kgf의 성형하중으로 단조했을 경

위의 해석결과와 실험값을 비교한 그래프로서, 가압-제하-취출의 전 공정을 해석한 FEM-A의 경우는 실험값과의 차이가 최대 10 μ m 이내의 예측정밀도를 나타내었다. 반면에 FEM-C의 경우는 70 μ m 이상 치수차이가 발생되고 있다.

Table 2 FE Variables used in analysis

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

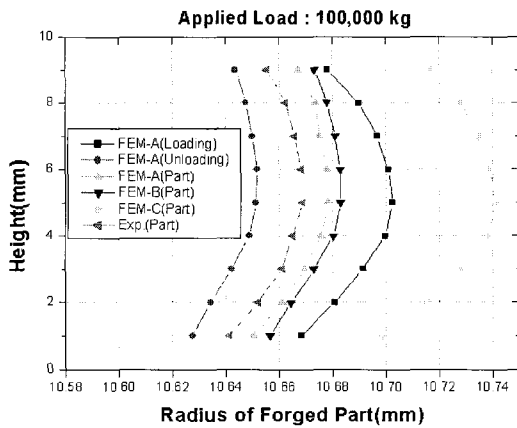


Fig. 2 Radius for forged part at each FE technique

FEM-C해석 방법은 가압 공정 해석 후 제하(편치 후퇴) 공정을 해석하지 않고 곧 바로 단조품의 탄성회복을 해석함으로써 2차 항복을 고려하지 않기 때문에 가압 성형 시에 팽창된 금형의 치수에서 곧 바로 탄성회복이 이루어지므로 단조품의 탄성 회복량이 과대 평가되는 것이다. 제하 시 단조품의 2차 항복이 발생하는 이유는, Fig. 3에 나타나 있는 바와 같이 가압시 단조 금형 내부에 위치하고 있는 단조품과 단조금형의 응력은 큰 차이가 발생된다. 그 후 단조품 보다 높은 응력 상태에 있는 단조 금형은 응력 평형 상태에 도달할 때까지 단조품을 추가적으로 변형시키면서 수축

하게 된다. 이때 단조 소재의 유효응력은 소재의 유동응력(Flow Stress)과 동일한데, 그 이유는 금형내의 단조품은 이미 소성 영역에 도달해 있기 때문이다. 반면에 금형의 유효응력은 단조품의 응력보다 미소하게 높은 값을 갖고 있는데, 그 이유는 금형에 압입 응력이 작용하고 있기 때문으로 판단된다.

각 단계별 단조 금형과 접촉하고 있는 위치에서 단조품의 응력 분포를 보다 정밀하게 분석하면 Fig. 4와 같다.

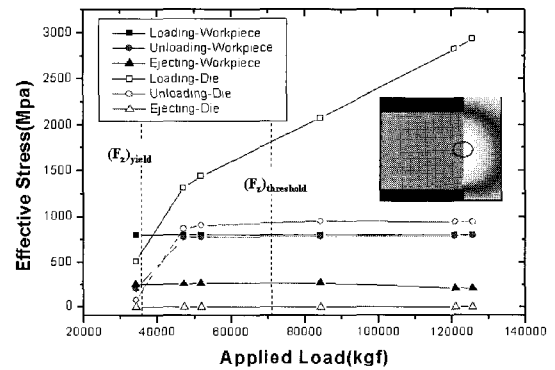


Fig. 3 Effective stress of die and workpiece during the dull cycle

단조 소재는 점1에서 다이와 접촉할 때까지 금형내에서 자유단조가 되며, 1-2 구간에서 금형 팽창과 함께 밀폐 단조가 이루어진다. 그 이후로는 2-3 구간에서 편치가 후퇴되는 동안 금형에 의해 2차 항복이 발생된다. 3번 위치에서 단조 소재는 2차 항복이 발생되어 항복 곡면에 위치하게 된다. 2-3번의 구간에서 단조 소재는 2 단계로 구분되어 변화가 발생되는데 우선 2-a 구간에서는 자유단조가 발생하는 구간인 0-1에서 거친 경로와 동일한 기울기로 탄성회복이 발생된 후 α -3 구간과 같이 항복 곡면을 따라 2차 항복이 발생된다. 이상의 결과로부터 알 수 있는 것은 제하 공정과 단조품 취출 공정이 실제와 동일하게 고려되는 것이 가장 우수한 예측 정밀도를 나타내며, 그 원인은 단조품의 2차 항복 발생의 고려 여부 때문으로 해석 가능하다. 따라서, 재료 모델 또한 단조 금형과 단조 소재의 탄성 변형과 응력 변화를 고려할 수 있도록 최대한 실제와 동일한 모델(단조소재:탄소성체, 금형:탄성체)을 이용해야 한다.

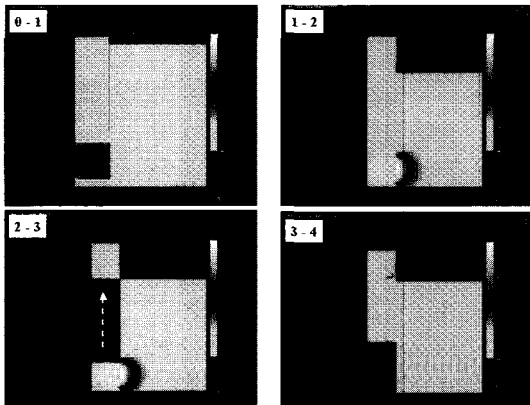
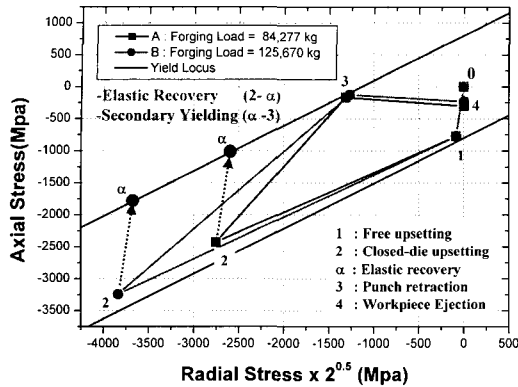


Fig. 4 History of stress in the workpiece during each stage

이상의 결과로부터 알 수 있는 것은 제하 공정과 단조품 취출 공정이 실제와 동일하게 고려되는 것이 가장 우수한 예측 정확도를 나타내며, 그 원인은 단조품의 2차 항복 발생의 고려 여부 때문으로 해석 가능하다. 따라서, 재료 모델 또한 단조 금형과 단조 소재의 탄성 변형과 응력 변화를 고려할 수 있도록 최대한 실제와 동일한 모델(단조소재 : 탄소성체, 금형 : 탄성체)을 이용해야 한다.

3.2 탄성계수의 정확도에 따른 영향

탄성계수는 합금 성분에 따라 결정되는 고유의 물성치이지만, 측정 방법에 따라 많은 차이를 나타내므로 정확한 측정을 위해서는 많은 노력과 비용이 소요된다. 따라서, 본 연구에서는 측정 오차 수준(±10%)에 해당하는 크기 만큼 변화될 경우 치수 예측값에는 얼마나 많은 영향을 미치는지를 분석하였다.

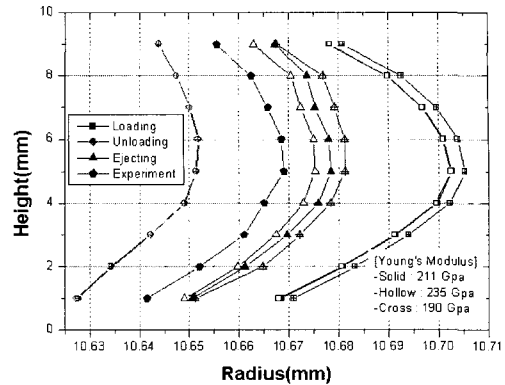


Fig. 5 Dimensional changes according to the variations of elastic modulus for workpiece

SCM420H 소재의 탄성계수 값인 211Gpa(초음파를 이용한 측정 결과값, ASTM-E1875)를 기준으로 탄성계수가 ±10% 범위에서 변화될 경우 단조품의 단계별 치수 변화를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 5 와 같다. 분석 결과, 탄성계수의 변화에 대해서는 그 민감도가 크지 않아 측정 기준 값의 10% 변화에서 최대 5 μm 이내의 변화가 발생되었다.

3.3 변형 유기 발생 열에 따른 치수 변화

냉간 단조는 상온에서 단조가 이루어지지만, 변형율이 과대할 경우가 많아 변형에 의한 열 발생과 그에 따른 치수 변화가 동반된다. 따라서, 정밀 치수를 분석하기 위해서는 열 영향에 따른 치수 변화 또한 정량 분석이 필요하다. 변형열 발생에 의한 열전달을 해석에 고려한 경우 가압시 단조품은 90~120℃의 온도분포를, 취출 후에는 50℃의 온도 분포를 나타내었다. Fig. 6은 변형에 의한 발생열을 고려하여 해석한 결과를 비교한 것으로서 열영향을 고려하지 않을 경우 해석값과 실험값의 차이인 10μm의 치수 오차를 5μm으로 감소시켜주고 있다. 열영향을 고려할 경우 해석 결과가 열영향을 고려하지 않을 경우 보다 작은 치수를 나타내는 이유는, 가압시 상승된 온도에서 팽창된 금형 치수로 변형된 단조품이 제하시 온도 하강으로 인해 열영향을 고려하지 않았을 경우 보다 추가적으로 수축되기 때문이다. 다시말해, 열영향을 고려할 경우, 그렇지 않을 경우 보다 가압에 의한 금형의 팽창량은 미소하게 증가되는 반면에 제하시 단조품이 수축되는 양에 탄성 변형량과 2차 항복량 이외에 온도 저하에 의한 수축량이 추

가되기 때문에 취출 후 단조품의 치수가 약 5 μ m 정도 추가적으로 감소된다.

그런데, 온도를 고려한 경우는 단조품의 외곽형상이 열영향을 고려하지 않았을 경우와는 달리 불규칙한 형상을 나타내고 있는데, 그 이유는 금형의 온도가 정상상태에 도달한 상태에서 해석을 수행하지 않았기 때문으로 판단되며, 반복 작업에 의해 금형의 온도 상승이 정상상태에 도달한 후 치수 변화를 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

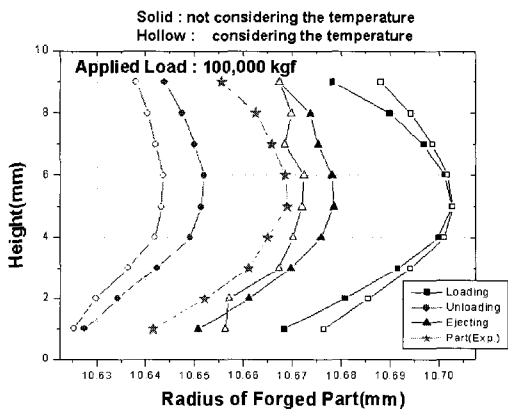


Fig. 6 Effects of temperature by deformation heat which affected in dimensional changes

4. 3차원 복잡 형상 단조품의 치수 분석을 위한 효율적인 방법

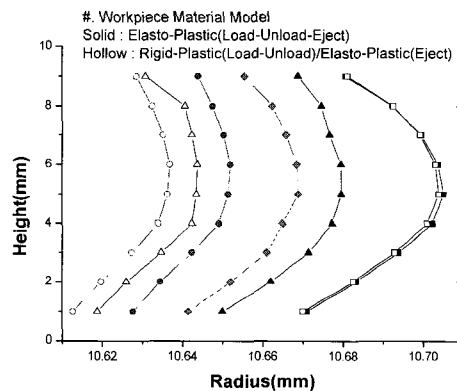
Fig. 2의 결과로 기술한 바와 같이 치수 예측 정밀도는 재료 모델을 금형은 탄성체, 단조 소재의 경우는 탄소성체로 가정하고, 전 공정을 해석하는 경우가 가장 우수함을 확인하였다. 그러나, 기어와 같은 3차원 형상 단조품의 경우는 금형이 탄성체이면서 단조소재를 탄소성체로 가정하고 해석하는데 많은 시간이 소요되며 수렴에 문제가 발생되고 있는 것이 현실이다. 따라서, 이런 경우를 위해 해석의 효율성을 고려하면서도 정밀 예측이 가능한 방법을 분석하였다. Table 3은 현실적인 해석을 위한 모델링 방법을 찾기 위해 고려한 2가지 모델 'S1', 'S2'의 해석 조건과 가장 좋은 해석 조건인 'GD'를 비교한 것이다. 제하시에 발생하는 2차 항복을 고려해야 함을 생각해 볼 때,

'S2'의 방법이 보다 좋은 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

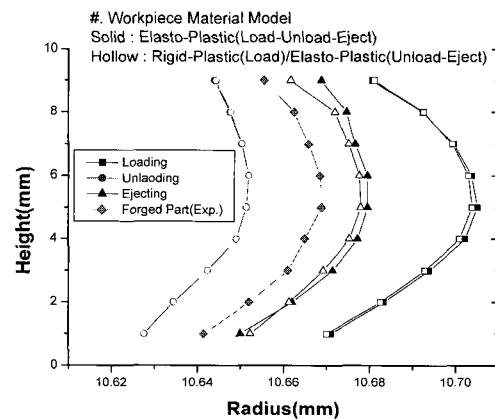
Table 3 Two modeling approaches investigated for realistic analysis

Model Cases		Loading	Unloading	Ejecting
S1	Die	Elastic	Elastic	Elastic
	Workpiece	R-P	R-P	E-P
S2	Die	Elastic	Elastic	Elastic
	Workpiece	R-P	E-P	E-P
GD	Die	Elastic	Elastic	Elastic
	Workpiece	E-P	E-P	E-P

(E-P: Elasto-Plastic, R-P: Rigid-Plastic)



(a) Case 'S1' and 'GD'



(b) Case 'S2' and 'GD'

Fig. 7 Dimensional accuracy by the simplified modeling approach for the complex shaped-part

Fig. 7은 최적의 조건과 현실적인 면을 고려하여 제안한 경우의 최종 단조품의 예측 치수를 나타내고 있다. Fig. 7(a)의 경우는 'S1'의 조건으로 해석한 경우의 해석 결과로서 실험값과 30 μ m까지 차이를 나타내고 있다. 반면에 'S2'의 조건으로 해석한 결과인 Fig. 7(b)의 경우는 5 μ m이내로 미소한 차이를 나타내고 있다. 따라서, 해석의 효율성 증대를 위해 해석 모델을 변화시키고자 하는 경우에는 가압 공정은 강소성체 재료모델을 이용하는 방법인 'S2'를 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

냉간 단조품의 치수 정밀도 향상을 위해 필요한 유한요소해석의 예측정밀도 향상을 위해 수행한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 단조품의 치수를 예측하는데 가장 좋은 방법은 금형은 탄성체, 단조 소재는 탄소성체로 가정하고 단조 공정의 단계(가압-제하-취출)를 실제와 동일하게 고려하여 해석을 수행하며 변형에 의해 발생하는 온도 변화 또한 고려하는 것이다.

(2) 단조 소재의 탄성계수 값은 측정 오차 범위인 10% 이내에서는 단조품의 치수 변화에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

(3) 복잡 형상을 갖는 실 단조품의 해석시 단조소재를 탄소성체로 가정하여 해석하기가 곤란할 경우는 가압 공정에 대해서는 단조소재를 강소성체로 가정하여 해석한 후 이를 이용하는 것도 충분한 정밀도를 부여하고 있었다. 단, 2차항복을 고려하기 위해 제하 공정부터는 탄소성체로 해석하는 것이 정밀도 저하를 방지할 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 이영선, 권용남, 천세환, 이정환, 2003, "냉간 밀폐 업세팅시 금형과 단조소재의 성형 단계별 치수 변화", 한국소성가공학회 2003 춘계학술대회 논문집, pp. 38~43.
- (2) Y. S. Lee, J. H. Lee, T. Ishikawa, 2002, "Experimental and analytical evaluation for elastic deformation behaviours of cold forging tool", J. of Materials Processing Technology, 127, pp. 73~82.
- (3) Y. Qin, R. Balendra, 1997, "FE simulation of the influence of die-elasticity on component dimensions in forward extrusion", Int. J. Mach. Tools Manufact., 37 (2), pp. 183~192.
- (4) T. Ishikawa, etc., 2000, "Prediction of dimensional difference of product from tool in cold backward extrusion", Annals of the CIRP, 49 (1), pp. 169~172.
- (5) Y. S. Lee, J. H. Lee, T. Ishikawa, 2002, "Analysis of the elastic characteristics at forging die for cold forged dimensional accuracy", J. of Materials Processing Technology, 130-131, pp. 532~539.
- (6) M. H. Sadeghi, etc., 1991, "Analysis of dimensional accuracy of precision forged axisymmetric components", Proc. Inst. Mech. Eng., 205, p. 171.
- (7) B. Raddad, etc., 1993, "On the strength criteria for high stressed ring-shaped dies", Proc. 4th ICTP, p. 242.
- (8) A. Rosochowski, etc., 1996, "Effect of secondary yielding on net-shape forming", J. of Material Processing Technology, 58, pp. 145~152.
- (9) 이강희, 박용복, 1999, "밀폐 업세팅에서 금형과 제품 변형에 관한 연구", 한국소성가공학회 '99 춘계학술대회 논문집, pp. 94~97.
- (10) A. Rosochowski, etc., 2001, "secondary yielding of forged components due to unloading", J. of Material Processing Technology, 115, pp. 233~239.