

냉간 단조품의 치수 정밀 예측을 위한 유한요소해석 기술

이영선, 권용남, 이정환

FE techniques for the accurate prediction of part dimension in cold forging

Y.S. Lee, Y.N. Kwon, 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 only 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 as reality, FE results could predict the part dimension within the range of 10 μm . And if temperature also is considered really, the predicted dimensions are well coincided with the experimental down to about 5 μm .

Key Words : Closed-die(밀폐금형), Cold Upsetting(냉간업세팅), FEM(유한요소법), Strain Gage(스트레인게이지), Loading(가압), Unloading(제하), Ejecting(취출)

1. 서 론

최근의 냉간 단조 기술은 금형의 수명을 향상시키기 위한 목표와 단조품의 정밀도를 향상시키는 방향으로 집중되고 있다. 그 가운데 단조품의 정

밀도를 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 10 μm 단위의

고정밀인 만큼 단조 기어의 정밀도를 만족시키기 위해서는 일반적인 범위의 정밀도 이상의 치수를 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 따라서, 보다 우수한 정밀도 제어를 위해서는 실험을 통한 시행오차를 거쳐 요구 정밀도를 만족시킨다는 것은 비효율적이므로 해석적인 접근방법을 이용할 필요가 있다. 그러나, 현재까지는 단조 공정에 FEM해석이 이용되는 대부분의 경우는 μm 단위의 치수 정밀도 측면에 대한 검증이 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 원통형 시편의 밀폐 단조실험과 비교·분석하면서 유한요소해석을 이용하여 μm 단위의 단조품 치수를 예측하기 위한 기술을 개발하기 위해 각 단조 공정 변수들에 영향을 분석하였다. 또한, 이상의 체계적인 분석 결과를 보다 복잡한 형상의 실 단조품에 적용하기 위한 경제적인 해석 방법 또한 제시하였다.

분석에 사용된 모델은 원통형 밀폐단조로서, 금형은 STD61(AISI H13)종 소재가 사용되었으며, 단조용 소재는 냉간단조를 위해 구상화 소둔처리된 기어용 침탄강인 SCM420H이 사용되었다. 해석값에 대한 신뢰성 입증을 위해서 실험에 사용된 금형에는 총 8개의 Strain Gage를 부착하여 각 부위에서 단계별로의 탄성 변형을 비교·분석하였으며 이에 대한 자세한 결과는 문헌[1]에 언급한 바 있다.

2. 단조품 치수 예측 정밀도 향상을 위한 유한요소해석 방법

FEM해석을 이용하여 단조 공정을 해석할 때 고려할 수 있는 변수들을 정리하면, (1) 단조 소재와 금형의 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) Material Model에 따른 영향은 문헌[2]에서 분석한 바 있으며, 실제적인 가정인 금형은 탄성체(Elastic Body), 단조 소재는 탄소성체(Elasto-Plastic Body)로 가정하는 것이 가장 우수한 결과를 나타낼 것은 당연하므로 분석 대상에서 제외하고 나머지 3가지 변수에 대한 영향을 분석하였다.

2.1 탄성 회복 방법에 따른 영향

Balendra[3] 등은 단조성형(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 FEM해석을 이용하여 단조 공정의 각 단계를 해석에 고려할 경우와 그렇지 않을 경우 최종 단조품의 치수 예측값의 변화를 비교하였다. 비교를 위해 수행한 해석 방법은 표 1에 나타나 있으며, 가압성형-제하-취출 공정을 모두 해석에 고려하여 실제와 동일하게 분석한 결과가 역시 가장 우수한 결과를 나타내어 실제 실험 결과와 $10\mu\text{m}$ 이내에서 좋은 일치를 나타내고 있다.

Table 1 FE Variables used in analysis

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

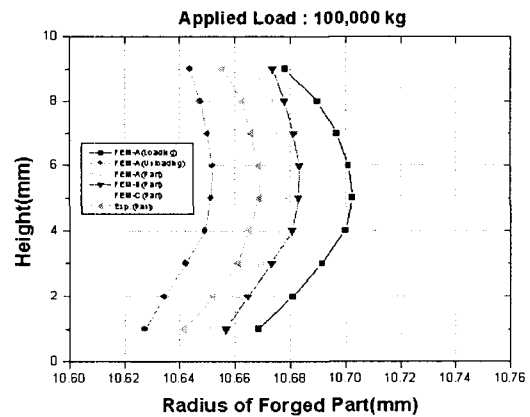


Fig. 1 Radius for forged part at each FE technique

그림 1은 100,000kgf의 성형하중으로 단조했을 경우의 해석결과와 실험값을 비교한 그래프로 Unloading 공정을 해석하지 않고 가압 성형 후 바로 단조품의 탄성회복을 해석함으로써 2차 항복을 고려하지 않는 FEM-C의 경우는 $70\mu\text{m}$ 이상 치

수 차이가 발생되고 있음을 알 수 있다. 2차 항복을 고려하지 않을 경우는 가압 성형 시에 팽창된 금형의 치수에서 곧 바로 탄성회복이 이루어지므로 전체적으로는 단조품의 탄성 회복량이 과대 평가 되는 것이다. 가압 후 제하시 단조품의 2차 항복이 발생하는 이유는, 가압시 단조 금형 내부에 위치하고 있는 단조품과 단조금형의 응력은 그림 2에 나타나 있는 바와 같이 큰 차이가 발생되며 그 편차는 제하시 단조 금형이 단조품을 추가적으로 변형을 유도하기 때문에 발생되며, 제하시의 금형과 단조품의 응력 분포는 힘의 평형조건 상태에 도달하게 된다. 이때 단조 소재의 응력은 유동응력(Flow Stress)수준이며 금형의 응력이 단조품의 응력 보다 미소하게 높은 값을 갖는 이유는 일축응력 상태가 아니며 금형에는 굽힘 응력이 작용하고 있기 때문으로 판단된다.

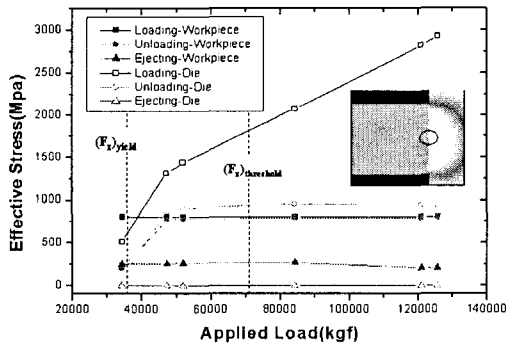


Fig. 2 Effective stress of die and workpiece during the full cycle

각 단계별 단조품의 변형에 영향을 미치는 응력 분포를 보다 정밀하게 분석하면 그림 3과 같다.

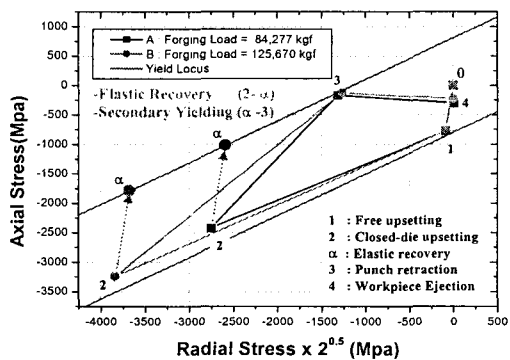


Fig. 3 History of stress in the workpiece during each stage

단조 소재는 점 1에서 다이와 접촉할 때 까지 금형 내에서 자유단조가 되며, 1-2 구간에서 금형 팽창과 함께 밀폐 단조가 이루어진다. 그 이후로는 2-3구간에서 펀치가 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 추선 2-a 구간에서는 자유단조가 발생하는 구간인 0-1에서 거친 경로와 동일한 기울기로 탄성회복이 발생되며, a-3구간과 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 나타낸다는 것이며, 그 원인은 단조품의 2차 항복이 발생할 수 있는 것이며 이를 위해서는 단조 금형과 단조 소재에 대한 Material Model 역시 실제와 동일해야 한다는 것이다.

2.2 탄성계수의 정확도에 따른 영향

탄성계수는 합금 성분에 따라 결정되는 고유의 물성치이지만, 응력성분과 경화법칙에 의해 10% 이내에서는 변화 발생할 수 있다. 따라서, SCM420H 소재의 탄성계수 값인 211Gpa를 기준으로 탄성계수가 $\pm 10\%$ 범위에서 물성치를 변화시켰을 경우 단조품의 단계별 치수 변화를 분석하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다.

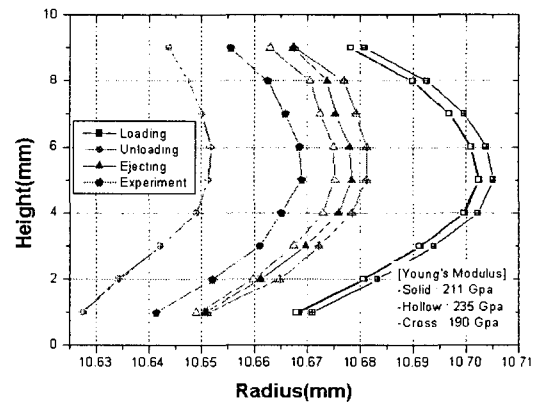


Fig. 4 Dimensional changes according to the variations of elastic modulus for workpiece

탄성계수의 변화에 대해서는 그 민감도가 크지 않아 기준 값의 10% 변화에서 최대 5 μm 이내의 변화가 발생되고 있음을 알 수 있다.

2.3 변형 유기 발생 열에 따른 치수 변화

냉간 단조는 상온에서 단조가 이루어지지만, 변형열이 과대할 경우가 많아 변형에 의한 열 발생과 그에 따른 치수 변화가 동반된다. 따라서, 정밀 치수를 분석할 경우에는 이에 따른 영향 또한 정량 분석이 필요하다. 발생에 의해 의한 온도를 고려한 경우 가압시에는 단조품은 90~120 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도분포를, 제하시와 취출시에는 50 $^{\circ}\text{C}$ 의 분포를 나타내었다. 그림 5는 변형에 의한 발생열을 고려하여 해석한 결과를 비교·분석한 것으로서 발생열에 의한 치수변화를 고려하지 않을 경우에 나타나고 있는 해석값과 실험값의 차이인 10 μm 의 치수 오차를 5 μm 으로 감소시켜주고 있다.

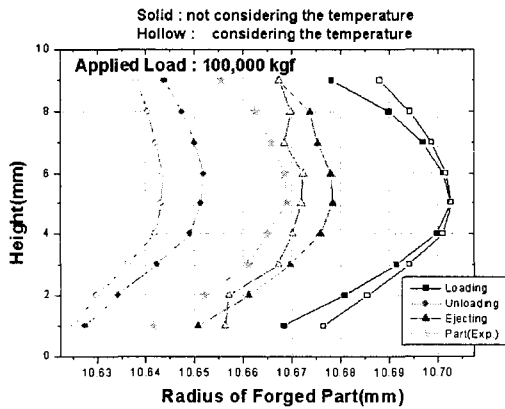


Fig. 5 Effects of temperature by deformation heat which affected in dimensional changes

온도를 고려한 경우는 단조품의 외곽형상이 고려하지 않았을 경우와는 달리 불규칙적인 결과를 나타내고 있는데, 이는 금형의 온도가 정상상태에 도달한 상태에서 해석을 하지 않았기 때문으로 판단되며, 반복 작업에 의해 금형의 온도 분포가 정상상태에 도달한 후 치수 변화를 분석할 필요가 있다.

3. 복잡 형상 단조품의 치수 예측 해석을 위한 효율적인 방법

그림 1의 결과로 기술한 바와 같이 치수 예측 정밀도는 Material Model을 금형은 탄성체, 단조소재의 경우는 탄소성체로 가정하고, 전 공정을 해석하는 경우가 가장 좋음을 확인하였다. 그러나, 기어와 같은 3차원 형상 단조품의 경우는 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. 그림 6은 최적의 조건과 현실적인 면을 고려하여 제안한 경우의 최종 단조품의 예측 치수를 나타내고 있는데, 가압 성형>Loading) 동안에 단조 소재를 강소성체로 가정하여 해석한 경우에도 5 μm 이내에서 우수한 일치를 하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 단조 소재를 탄소성체로 가정하여 해석이 곤란할 경우는 단조소재는 강소성체로 가정하고 금형은 탄성체로 가정하여 해석하는 방법을 이용하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

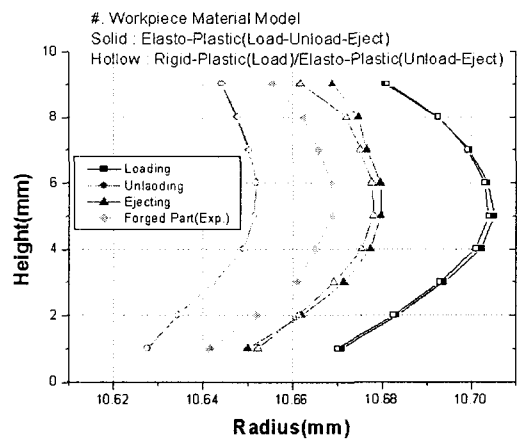


Fig. 6 Dimensional accuracy by the proposed solving method for saving the calculating time

4. 결론

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

- 1) 단조품의 치수를 예측하는데 가장 좋은 방법

은 금형은 탄성체, 단조 소재는 탄소성체로 가정하고 단조 공정의 단계를 실제와 동일하게 고려하여 해석을 수행하며 변형에 의해 발생하는 온도 변화 또한 고려하는 것이다.

2) 단조 소재의 탄성계수 값은 측정 오차 범위 내에서는 큰 차이를 나타내지 않고 있었다.

3) 복잡 형상을 갖는 실 단조품의 해석시 단조 소재를 탄소성체로 가정하여 해석하기가 곤란할 경우는 단조 소재를 강소성체로 가정하여 해석한 후 이를 이용하는 것도 충분한 정밀도를 부여하고 있었다. 단, 금형은 탄성체로 가정되어야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업으로

진행된 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 이영선, 권용남, 천세환, 이정환, 한국소성가공학회 2003춘계학술대회논문집, pp38-43
- [2] Y.S. Lee, J.H. Lee, T.Ishikawa,, J. of Materials Processing Technology, 130-131 (2002), pp532-539
- [3] A. Rosochowski, R. Balendra, Secondary yielding of forged components due to unloading, J. of Materials Processing Technology, 115 (2001) 233-239