

단조 후 소재 절삭에 따른 탄성회복 변형의 유한요소예측

전만수[#] · 정완진¹ · 정승원²

Finite Element Prediction of Deformation of Material due to Springback after Material Removal of a Forging

M. S. Joun, W. J. Chung, S. W. Jeong

(Received March 2, 2017 / Revised May 25, 2017 / Accepted June 23, 2017)

Abstract

In this paper, finite element prediction of deformation of material due to springback after material removal by an axis-symmetric forging fabrication at room temperature is conducted. An elastoplastic finite element method is employed considering die plastic deformation. The predictions of a springback analysis conducted after the final stroke of an axis-symmetric cold forging process containing residual stresses are utilized to be mapped onto the final material after the material removal. It is assumed that material removal occurs at an instant, *i.e.*, all the material to be removed disappears at once. The predictions are compared with experiments, revealing strong qualitative agreement.

Key Words : Springback, Axi-Symmetric Cold Forging, Material Removal, Finite Element Method

1. 서론

주요 동력전달 부품은 대체적으로 단조로부터 시작된다. 단조품의 특징은 제조 과정에서 큰 힘에 의한 소성변형에 노출되어 있고 이로 인하여 내부에 잔류응력을 내포하고 있기 때문에 열처리 및 절삭 등의 후처리 공정에서 불가피하게 변형을 초래한다.

따라서 단조품의 절삭에 따른 변형의 예측은 매우 중요한 문제이다. 그러나 실제 절삭 또는 인위적 잔류응력의 제거에 따른 제품의 변형을 예측하는 것은 단순한 문제가 아니다. 물론 연속적인 절삭 과정에서 발생하는 점진적인 스프링 백을 고려한다면, 그 난이도는 훨씬 높아진다. 비록 절삭 공정을 일순간에 발생하는 재료의 제거로 간주한다고 하더라도 여전히 요소망재구성에 따른 상태변수의 순화 문제가 남는다.

잔류응력을 비롯한 상태변수를 사상하는 과정에서 다소의 오류가 개입될 수밖에 없고, 특히 단조 시물레이션 중에서 불가피한 요소망재구성에 의한 상태변수, 특히 탄소성 관련 변수들의 인위적 변화는 해석 결과의 정확도를 크게 떨어뜨리는 요인이다. 그리고 단조 시물레이션 목적의 탄소성 유한요소법 그 자체도 아직 충분히 안정화되었다고 할 수가 없는 상황이다. 대부분의 단조 시물레이션이 강소성 유한요소법에 근거하고 있고, 고급 기술자 중심으로 탄소성 유한요소법의 적용이 이루어지고 있다.

이러한 점이 단조 시물레이션에서 탄성회복에 관한 관심도가 낮은 이유 중의 하나이다. 물론 기계가공에 따른 잔류응력의 변화 및 그에 따른 치수의 변화는 대부분의 단조 시물레이터 사용자의 관심사 밖에 머무르고 있는 것이 현실이다.

1. 서울과학기술대학교 제품설계금형공학공학과

2. ㈜엠에프알씨

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering / Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

반면, 판재성형 및 판단조[1~11] 분야에서 탄성회복은 매우 중요한 문제이며, 학문적 및 실용적 측면에서 많은 발전이 이루어졌다.

최근 Lee 등[12]은 단순한 업세팅 공정을 대상으로 탄소성 유한요소법을 실행한 후 재료의 인위적 제거로 발생하는 스프링 백의 영향을 변위의 발생 및 잔류응력의 변화 등으로 가시화함으로써 접근방법을 확립하였다.

이 논문에서는 단조 이후 소재의 제거로 발생하는 가공품의 치수변화를 예측하고 그 결과를 실험결과와 비교함으로써 접근방법의 타당성을 조사한다.

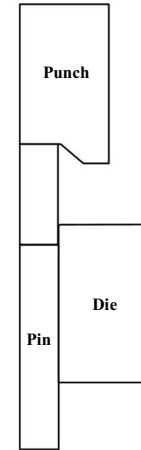
2. 공정의 유한요소해석

Fig. 1 (a)는 연구 대상 공정의 형상을 나타내고 있다. 재료는 SCM420H이며, 단조 목적으로 충분히 풀림처리되었다. 따라서 초기 조건으로 모든 상태변수를 초기화하였다. 소재는 탄소성의 변형 특성을 따르고 금형은 탄성체로 간주하였다. 따라서 소재-금형 연계해석이 이루어졌다.

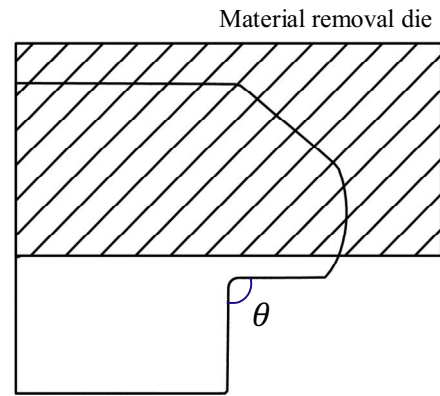
단조 이후의 절삭공정은 순간적으로 이루어지는 것으로 간주하였다. 다시 말해, 절삭되는 과정에서 상태변수의 변화를 허용하지 않았다. 실제 이 가정에 가깝도록 하기 위하여 절삭 과정 그 자체에 영향을 작게 받는 부위의 각도 변화를 측정하였다. 즉, Fig. 1 (b)에 표시된 모서리 각도 θ 가 예측 및 실험과의 비교 대상이다. Fig. 1 (b)에서 소재를 제거하는 방식을 개념적으로 설명하고 있다. 즉, 종료 시점에서 박스에 의하여 정의된 소재 제거 영역에 속하는 모든 절점을 삭제 하였다.

Fig. 2는 공정해석에 사용된 유동응력곡선이다. 탄소성 해석을 위하여 소재의 탄성계수와 포아송 비를 각각 200GPa와 0.29로 간주하였고, 금형의 재료는 SKD11이며, 탄성계수와 포아송 비가 각각 200 GPa와 0.3이다. 마찰계수는 0.1로 간주하였다.

AFDEX 2D [13]를 사용하였으며, 사각형요소가 사용되었다. 종료 시점에서 소재의 절점 수는 약 10,000개이고, 상형과 하형의 절점 수는 각각 1,800개와 1,700개이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 절단이 되는 지점에서 요소밀도를 증가시키기 위하여 요소 밀도 제어 기능을 사용하였다. Fig. 4는 소재 절삭에 의한 스프링 백의 영향을 해석하기 위한 유한요소망이며, 절점의 수는 4,800개이다.



(a) Forging process definition



(b) Material removal process definition

Fig. 1 Process definition

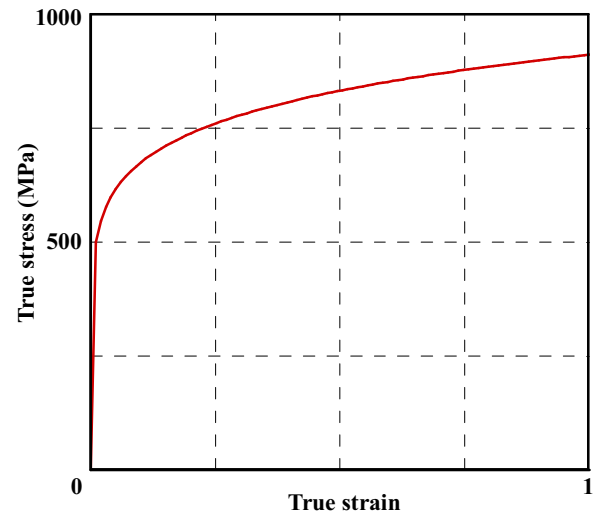


Fig. 2 Flow stress of SCM420H

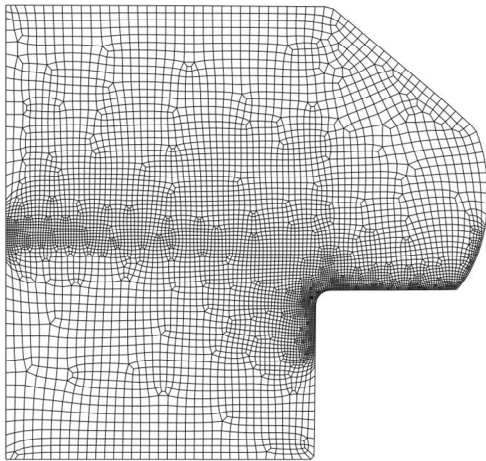


Fig. 3 Finite element mesh system at the final stroke of the cold forging

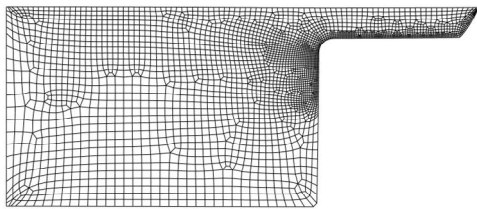


Fig. 4 Finite element mesh system for simulating springback after material removal

Fig. 5는 절삭 직전의 유효응력의 상태를 나타낸다. 단조공정의 탄소성 유한요소해석을 실시한 이후에 탄성회복을 해석한 결과이다. 탄성회복에 의한 최대 잔류응력은 847.2MPa이며, 이것은 절삭공정에 의한 형상변화를 초래한다. 탄성회복 해석 과정에서 발생하는 모서리 부의 각도 θ 의 변화는 약 0.006° 로 절삭공정에 기인하는 각도 변화에 비하여 무시 가능하다.

Fig. 6은 절삭공정에 따른 탄성회복의 해석결과이다. 기본적으로 절단면에 작용하는 응력벡터가 사라짐으로 인하여 역학적 불균형이 발생하며, 이것이 2차의 탄성회복, 즉 절삭공정에 따른 탄성회복을 야기시킨다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 절삭선에서 멀리 떨어진 영역의 잔류응력은 이전과 크게 차이가 없는 반면, 절삭선 주위에서는 비교적 큰 차이가 발생한다. 물론 절삭과 무관한 영역에서의 잔류응력 변화는 요소망재구성에 따른 순화현상으로 불가피하다. 이 해석을 통하여 예측된 측정 대상의 모서리 부위의 각도 변화는 0.14° 이다.

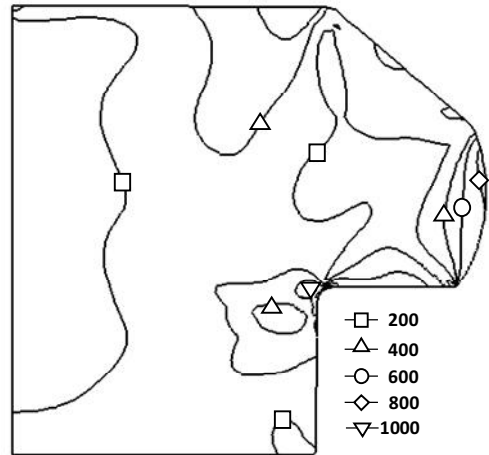
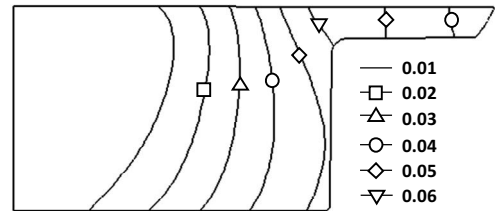
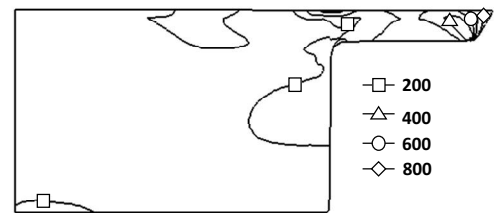


Fig. 5 Residual effective stress due to springback after forging (MPa)



(a) Displacement (mm)



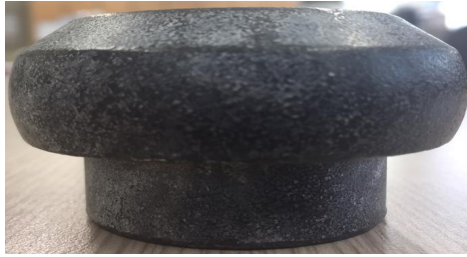
(b) Residual effective stress (MPa)

Fig. 6 Finite element predictions of material removal process

3. 실험

Fig. 7은 단조품과 절삭 이후의 제품을 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 절삭 과정에서 야기될 수 있는 구조 변형을 최소화하기 위하여 선삭 시 스피ndl의 회전수를 정상상태에 비하여 절반으로 줄였고, 절입량 및 절삭 피드를 정상상태의 1/3로 줄였다. 냉각이 충분하게 이루어지도록 하기 위하여 절삭유를 최대한 분사하였다.

측정은 한국생산기술연구원 진주뿌리기술혁신센터의 3차원 비접촉식 측정기(ZS-4060)를 사용하여



(a) Forging



(b) Final product

Fig. 7 Experiments

Table 1 Measurements of test forging

Specimen number	Measurements (°)			Selected value (°)
	1	2	3	
1	0.45	0.46	0.45	0.45
2	0.61	0.58	0.55	0.58
3	0.55	0.58	0.54	0.54
4	0.49	0.48	0.55	0.49
5	0.48	0.52	0.49	0.52
Mean value				0.52

Table 2 Measurements of test forging after material removal

Specimen number	Measurements (°)			Selected value (°)
	1	2	3	
1	0.68	0.70	0.66	0.68
2	0.74	0.72	0.75	0.74
3	0.72	0.71	0.69	0.71
4	0.70	0.75	0.73	0.70
5	0.72	0.74	0.71	0.71
Mean value				0.71

Table 3 Comparison of predictions and experiments

Predictions	Experiments	Difference
0.14°	0.19°	25%

실시되었다. 장치의 측정오차는 최대 1/100mm이다.

측정 시편은 총 5개이며, 각 시편에 대해서 3번 반복 측정을 실시하여 중간값을 취하였다. 5개의 시편에서 확정된 대표값 중에서 최대와 최소를 버린 나머지 3개의 실험치를 산술평균하여 최종 실험치로 간주하였다. Table 1과 2는 실험치 전체를 나타내고 있다. 최종적으로 확정된 실험치는 0.19°이다. 즉, 절삭공정에 의한 모서리 각도의 증가량은 0.184°이다.

Table 3은 예측치와 실험치를 비교하고 있다. 실험치 대비 예측치의 오차는 약 25%이며, 이것은 정성적으로 유의미한 결과라고 사료된다.

4. 결론

이 논문에서는 단조 후 절삭공정 중에 발생하는 스프링백에 의한 잔류응력의 변화와 제품의 형상치수 변화를 예측하고 그 결과를 실험치와 비교하는 전 과정을 제시하였다. 탄소성 유한요소법 및 소재-금형 변형 연계해석 기법을 사용하였으며, 절삭공정은 재료의 순간적 제거로 처리하였다.

시험공정에서 절삭의 영향이 비교적 작을 것으로 예상되는 모서리 각도의 변화에 대한 예측치와 실험치를 비교한 결과, 예측치가 실험치에 비하여 약 25% 작게 나타났다.

해석 대상 문제의 복잡성, 요소망재구성에 따른 순화 현상, 측정 오차 등을 고려할 때, 이 정도의 정확도는 정성적으로 유의미하다고 사료된다. 추후 요소망생성과 연계하여 기능이 보완된다면, 정량적 예측이 가능해질 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2014년 중소기업청의 혁신기술개발사업(S2227273) 및 2014년도 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

[1] M. Kawaka, T. Kakita, A. Makinouchi, 1998, Simulation of Multi-step Sheet Metal Forming Processes by a Static Explicit FEM Code, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80, pp. 54~59.

- [2] Y. E. Ling, H. P. Lee, B. T. Cheok, 2005, Finite Element Analysis of Spring Back in L-bending of Sheet Metal, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 168, No. 2, pp. 296~302.
- [3] R. Bahloul, S. Ben-Elechi, A. Potiron, 2006, Optimization of Springback Predicted by Experimental and Numerical Approach by using Response Surface Methodology, *J. Mat. Proc. Tehc.*, Vol. 173, No. 1, pp. 101~110.
- [4] J. S. Park, H. J. Choi, S. H. Kim, 2014, Improvement in Prediction Accuracy of Springback for Stamping CAE Considering Tool Deformation, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 6, pp. 380~384.
- [5] M. K. Choi, H. Huh, 2012, Investigation of Springback Behavior of DP780 Steel Sheets after the U-bending Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 6, pp. 384~388.
- [6] S. H. Kwon, H. S. Lee, Y. S. Lee, S. W. Kim, C. Y. Jung, S. M. Hong, 2016, Compensation Design to Reduce Springback in Sheet Metal Forming of 1.2 GPa Ultra High Strength Steel, *Trans. Master. Process.*, Vol. 25, No. 5, pp. 301~305.
- [7] J. B. Yang, B. H. Jeon, S. I. Oh, 2000, A Study of the Springback Reduction in Aluminium Sheet Forming using Response Surface Method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 9, No. 5, pp. 526~530.
- [8] J. W. Cho, W. J. Chung, 1997, On the Springback Analysis of Sheet Metal Forming, *Trans. Master. Process.*, Vol. 6, No. 5, pp. 386~391.
- [9] H. Y. Kim, S. C. Choi, H. S. Lee, H. J. Kim, K. T. Lee, 2007, Experiments for Forming Limit Diagram and Springback Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy Sheet at Elevated Temperature, *Trans. Master. Process.*, Vol. 16, No. 5, pp. 364~368.
- [10] H. S. Son, Y. S. Kim, 2003, Analysis of Formability and Plastic Instability in Sheet Metals (I), *Trans. Master. Process.*, Vol. 12, No. 3, pp. 184~193.
- [11] Y. S. Lee, M. C. Kim, Y. N. Kwon, J. H. Lee, 2004, Experimental and FE Analysis to Improve the Accuracy of Springback Prediction on Sheet Metal Forming, *Trans. Master. Process.*, Vol. 13, No. 6, pp. 490~496.
- [12] Y. S. Lee, W. J. Chung, M. S. Joun, 2015, Proc. 13th Asian Symposium on Precision Forging (ASPF2015), Gyeongju, Korea, pp. 104~105.
- [13] AFDEX, 2005, <http://www.afdex.com>