

레이저 프린터용 샤프트 밀폐단조 성형해석

차성훈¹ · 신명수¹ · 김종호² · 나승우³ · 김종봉[#]

An Analysis of Closed Die Forging of Laser Printer Shaft by Finite Element Method

S.-H. Cha, M.-S. Shin, J.-H. Kim, S.-W. Ra, J.-B. Kim

(Received February 24, 2009)

Abstract

A shaft for laser printers has to be produced with high dimensional accuracy of a few micrometers. Most companies produce the shaft, therefore, by machining. These days, forging process is tried to be employed in manufacturing the shaft for productivity. In this study, the dimensional inaccuracy of straightness is studied and the underfill is not focused because the shaft shape is simple and the load capacity of press is sufficient. The straightness and concentricity of the shaft is important for the operation of a laser printer. Many design parameters such as preform shapes, tooling dimensions, forging load, and billet geometries may affect on the dimensional accuracy. In the forging process of shafts, a billet which is cut from wires is used. The billet, therefore, may be a little bit curved but not always straight. The elastic recovery is considered to cause the dimensional inaccuracy. Therefore, the effect of the forging load on the elastic recovery and straightness is investigated through the finite element analyses using DEFORM-3D and ABAQUS.

Key Words : Cold Forging, Shaft, FEM

1. 서 론

소성가공은 소재의 손실을 최소로 줄이면서 원하는 형상의 제품을 가공하는 가장 기본적인 금속성형 방식이다. 소성가공의 일종인 단조가공은 상부 금형과 하부 금형 사이에서 소재 넣고 누름으로써 행해지는데 금형의 온도에 따라 열간단조와 냉간단조로 나뉜다[1].

열간단조와 냉간단조는 서로 장단점을 지니고 있다. 열간단조 공정은 상대적으로 성형하중이 작고 큰 소성변형을 허용하는 장점을 지니고 있다. 그러나 기계적 성질이 불량하며, 금형의 마모가 심하고 치수의 정도가 냉간단조 공정에 비하여

현저히 떨어지는 단점을 지니고 있다. 이와 반대로 냉간가공은 과도한 성형하중으로 대물의 성형이 불가능하고 금형의 파손이 잦다. 이 이외에도 열간단조의 경우 작업환경이 불량하고 자동화가 비교적 어렵다는 문제점을 안고 있다. 이러한 냉간가공의 장점을 이용하고 단점을 극복하기 위해 다단 단조 방식이 이용되고 있다.

다단 단조공정의 정밀도를 높이기 위해서는 금형설계 및 공정기술, 단조설비의 정밀도, 윤활기술, 성형기술, 열처리기술 등과 같이 종합적이고 일괄적인 기술개발이 이루어져야 한다[2]. 따라서 완전밀폐단조공정(full enclosed die forging) [3]을 이용하여 원하는 형상을 정밀하게 완성하기 위하여

1. 서울산업대학교 NID 융합대학원

2. 서울산업대학교 금형설계학과

3. ㈜ 서울금속

교신저자 : 서울산업대학교 자동차공학과,

E-mail : jbkim@snut.ac.kr

각 공정별 성형하중, 단면감소율과 유동응력(flow stress)의 분포가 적절하게 이루어지도록 해야 한다. 이러한 단조공정에서의 성형예측을 위하여 3차원 유한요소해석 기법이 널리 적용되고 있으며, 다양한 단조공정에 대한 소재성형을 예측하려는 노력들이 수행되어 왔다[4].

일반적으로 단부의 형상이 단이 지고 대칭적인 샤프트의 제조는 CNC 공작기계를 이용한 절삭가공방식이 적용되고 있으나, 제조공정이 복잡하여 사이클타임(cycle time)이 과다하게 소요되고, 원재료의 낭비가 심하다.

본 연구에서는 단이 진 샤프트의 생산 공정에 위에서 언급한 다단-단조공정을 적용하였다. 다단 밀폐 단조공정을 통해서 비교적 양호한 치수 정확도를 갖은 제품을 성형하는데 성공하였으나 제품의 길이방향 이심률(Eccentricity) 불량 발생하였다. 이러한 문제점의 원인을 분석하고 불량을 해결하기 위해 범용 3차원 유한요소 프로그램인 Deform-3D 와 ABAQUS 을 이용하여 성형해석을 수행하였다. 샤프트 생산 공정에 철선으로부터 절단된 소재가 사용된다. 철선으로부터 절단된 소재는 초기에 곧게 펴진 것이 아니고, 어느 정도 휘어진 소재일 수 있다. 그렇기 때문에 성형 후 탄성회복을 할 경우 형상오차의 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해서 레이저 프린터용 샤프트의 직진도(straightness) 또는 이심률(Eccentricity) 형상 오차가 탄성회복에 의해 발생하는 정도를 분석하였다. 성형 하중에 따른 형상 오차를 해석하여 해결 방안도 제시하였다.

2. 해석

2.1 형상모델링

해석은 범용 해석프로그램인 Deform-3D와 ABAQUS를 이용하여 수행하였다. Fig.1 은 각 공정별 성형 형상을 보여준다. 4단계의 공정으로 이루어지며, 성형은 1개의 프레스에서 이루어진다.

Fig. 1에서 각 공정은 (a)~(d)까지 순차적으로 이루어지게 되며 (a)는 초기 소재를 곧게 펴는 공정이고 (b)와(c)는 예비성형 형상으로서의 성형공정을, 그리고 (d)는 최종 성형공정을 나타낸다.

탄소성(Elasto-Plastic) 해석은 강소성(rigid-plastic) 해석에 비해 해석이 어렵고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 하지만, 강소성 해석에서는 탄성 회복을 고려할 수 없기 때문에 성형 후 탄성 회복

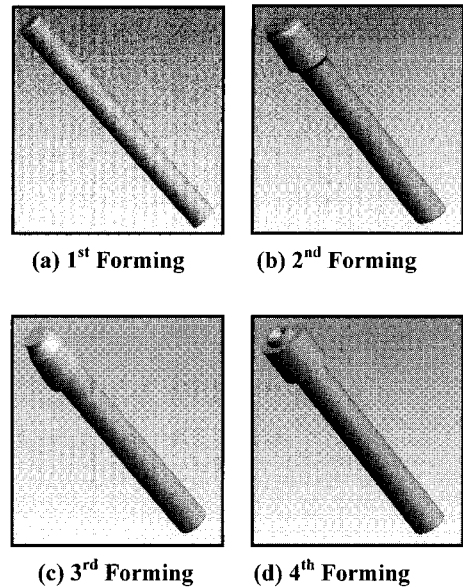


Fig. 1 Closed die forging process of a shaft

을 분석하기 위해서는 탄소성 해석이 필히 수행되어야 한다. 본 연구에서는 해석의 효율성을 위해 탄소성 해석과 강소성 해석으로 이원화 하여 다음과 같은 해석 방법으로 해석을 수행하였다.

금형의 하중 및 소재에 걸리는 유동응력 해석에는, 단조 공정에서는 재료의 소성변형이 크게 일어나 소성 변형률에 비해 탄성 변형률이 매우 작기 때문에 탄성 변형률을 무시고 소재를 강소성으로 가정하여 해석을 수행하였다. 샤프트의 강소성 해석은 4단계로 이루어진 밀폐단조 공정 모두에 대해서 수행하였다. 해석을 통해서 소재의 유동응력과 각 공정에 필요한 성형 하중을 계산하였다.

하지만, 실제 생산 공정에서 발생한 이심률 불량의 원인으로 예측이 되는 탄성회복은 강소성으로 해석이 불가능하기 때문에 탄소성으로 해석하여 원인을 분석하였다. 성형에 이용되는 금속소재는 운반효율을 높이기 위해서 코일(Coil) 형태로 운반 되는데 이러한 이유 때문에 소재가 굽어져 있다. 이처럼 굽어진 소재의 소성 변형 후에 일어나는 탄성복원(Springback) 현상이 이심률 불량의 원인이라고 판단하고 단순화된 샤프트 형상을 이용하여 탄소성해석을 통해 그 경향을 관찰하였다. 탄소성 해석에서는 전 공정을 해석하지 않고, 성형 하중에 따른 탄성회복의 경향을 분석하였다.

Table 1 Number of mesh

Part	Number of mesh
Workpiece	20000
Punch	5000
Die	10000

Table 2 Material properties

	Workpiece	Punch/Die
Material	SWCH 18 A	SKD-11
Young's Modulus	200 GPa	200 GPa
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Yield stress	410 MPa	-
Ultimate Strength	520 MPa	-

2.2 유한요소 격자 및 경계조건

범용 3D CAD 프로그램 Pro-Engineer 을 이용하여 소재와 금형에 대한 모델링을 수행하였고, 그 결과를 STL 파일로 변환하여 해석프로그램인 Deform-3D 에서 읽어 들여 해석에 적합한 요소로 분할하였다.

소성변형이 크게 발생하고 관심의 대상인 소재의 격자는 비교적 작게 하였으며 상, 하부 다이는 제품성형 해석 시 강체로 가정하여 격자 없이 해석을 수행하였고, 성형 해석 후에 상하부 다이 응력을 해석하였다. 각 개체의 유한요소 격자 수는 Table 1과 같다.

금형의 속도는 100mm/s로 각 공정에 상관없이 일정하게 적용하였다. 해석에서 속도를 설정하였지만, 유동응력이 점소성을 고려 한 것이 아니기 때문에 펀치의 속도는 무의미하다. 상, 하부 금형과 소재와의 마찰조건은 냉간 강제일 경우 일반적으로 적용이 되는 전단응력마찰 $m=0.12$ 로 설정하였다.

2.3 소재의 물성

성형에 이용되는 소재는 강재(SWCH 18A)이고, 금형 소재는 SKD-11이다. 두 소재의 물성은 다음과 같다. 소재는 선형 가공경화로 하였고, 금형은 탄성으로 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 성형 해석 결과

Fig. 2 와 Fig. 3 은 해석을 통해 계산된 각 공정

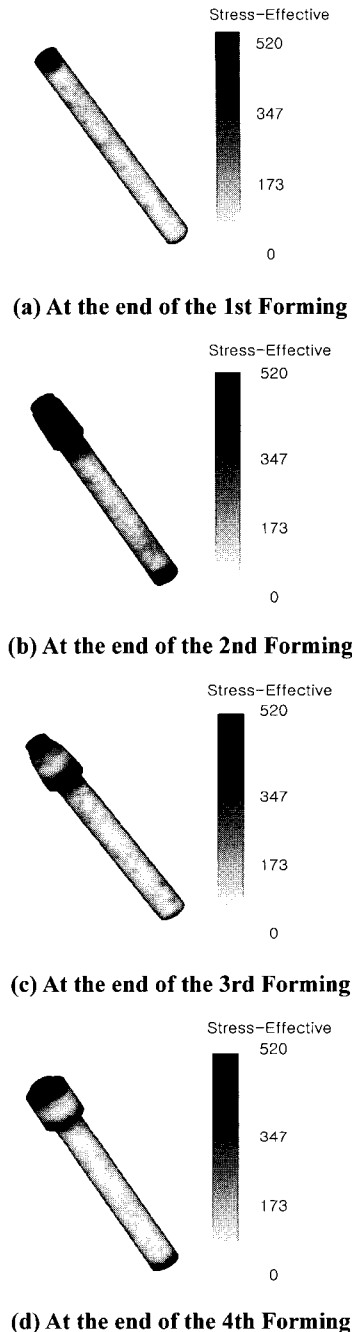


Fig. 2 Effective stress distribution of workpieces (Unit : MPa)

에서의 소재와 금형의 유효응력을 나타내고 있다. 성형이 이루어지는 부분에 응력이 크게 걸림을 알 수 있다.

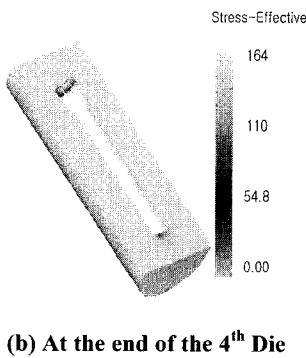
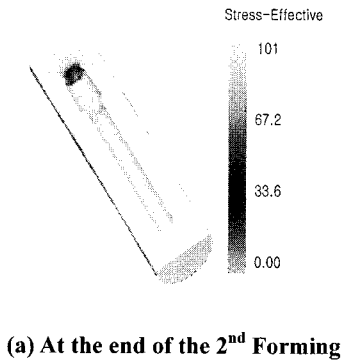


Fig. 3 Effective stress distributions on die(Unit : MPa)

제 1공정은 소재를 곧게 펴면서 끝 부분에 곡률을 주는 공정이라 끝 부분에 응력이 크게 걸린다.

제 2공정, 제 3공정, 그리고 마지막 제 4공정은 샤프트의 머리 부분을 성형하는 공정이라 그 부분의 응력이 크게 걸리고 있다. 금형도 머리 부분과 끝 부분에서 큰 응력이 걸리고 있다. 금형의 경우 강소성 해석한 결과로 탄성 해석하기 때문에 금형의 팽창으로 인해 상대적으로 작은 응력이 계산된 것으로 보인다.

3.2 성형하중

단조해석을 통해 계산된 펀치의 하중을 Fig. 4에 도시하였다. 제 1 공정은 하중에 적게 걸리고, 2-4 공정에서는 최대 10~14 톤 정도의 하중이 걸린다. 그림에서 각각의 공정 별로 성형하중은 적절하게 분배된 것을 확인할 수 있다. 각 공정에서 성형하중은 초기에는 완만하게 증가하다가 성형 완료 시점에서 급격히 증가한다. 이것은 성형 완료 시 소재가 상부다이와 하부다이 사이에 완전히 밀착되는 밀폐효과를 보여주고 있는 것이라고 판단되어진다[3~5]. 1 단계 공정을 제외한 2-4 단계

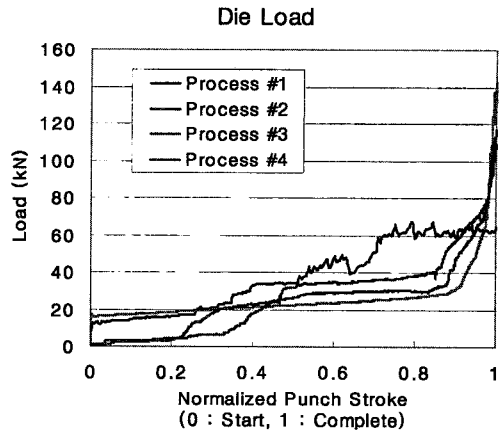


Fig. 4 Calculated forming loads

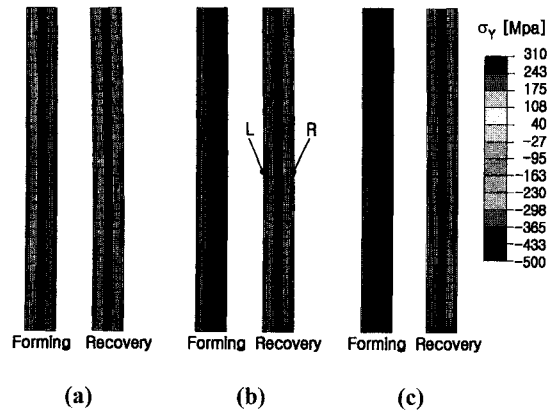


Fig. 5 Deformed shapes and axial stress distributions before and after forming with forming load of (a) 1000N, (b) 3000N, and (c) 7000N

공정의 성형하중은 8~14 톤 사이에 적절하게 분배되어 있다고 판단된다. 그렇기 때문에 성형 시 하중 불균형으로 인한 프로그레시브 (Progressive) 금형의 뒤틀림은 적을 것으로 판단된다.

3.3 탄성회복 해석

생산현장에서 사용되는 재료는 코일 형태이기 때문에 실제로 성형전의 금속재료는 길이방향으로 휘어진 상태로 금형 속으로 들어가게 된다. 그리고, 성형 후 탄성회복에 의해 휘어진 형상이 남아 있을 수 있다. 이러한 이유 때문에 성형후의 완제품에서 이심률 불량이 발생한다고 판단하고 휘어진 봉 형태의 시편을 이용하여 길이 방향으로 압축한 후 탄성회복 현상을 관찰하였다.

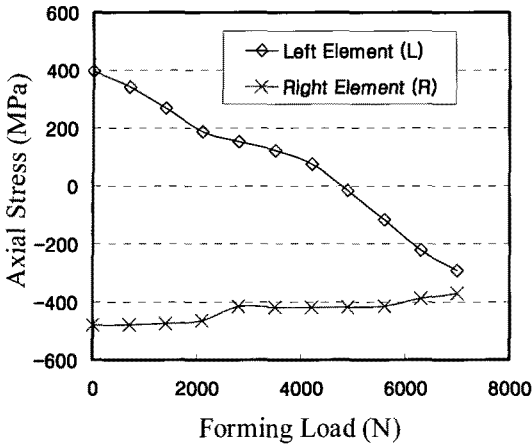


Fig. 6 Axial stress variation of the element located on the left and the right side of the specimen for various values of forming loads

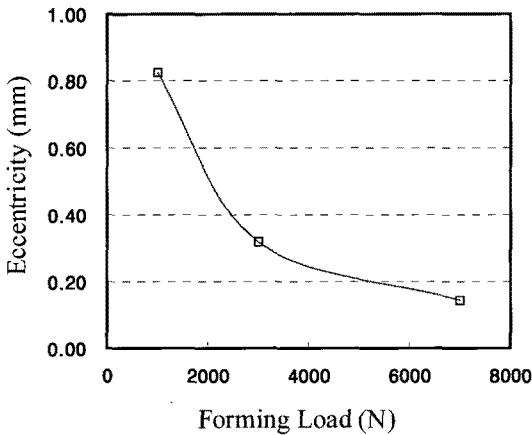


Fig. 7 Eccentricity variations after springback of a shaft for various values of forming loads

현장에서 성형에 사용되는 시편의 형상은 선경 6.92mm의 소재가 직경 1.5m의 코일 형태로 말려 있으며 이러한 소재를 성형하기 위해 67.7mm의 길이로 절단하여 사용하고 있다. 해석에 사용된 시편의 형상은 현장에서 사용되는 시편의 형상과 동일하게 곡률반경 1.5m, 길이 67.7mm, 소재경 6.92mm로 하였다.

Fig. 5는 휘어진 시편을 다이에 넣고 주어진 압축하중으로 성형 후 탄성 회복을 해석한 결과를 보여준다. 해석은 ABAQUS로 하였고, 압축 하중이 7000N보다 큰 경우의 해석은 수렴성이 불량하여 결과를 확인 할 수 없었다. 성형 하중이 작은 경우에는 샤프트의 왼쪽에 위치한 요소에는 퍼짐

에 의한 인장 응력이 걸리고, 오른쪽에 위치한 요소에는 압축하중이 걸린다. 성형 하중이 커짐에 따라 샤프트의 왼쪽 요소에 걸리는 인장 하중이 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 샤프트 왼쪽과 오른쪽 중앙에 위치한 요소에 걸리는 축 방향 응력을 하중 별로 보여준다. Fig. 5의 결과를 정량적으로 보여주는 것이다.

Fig. 7는 성형 하중 별로 탄성회복 후 샤프트의 맨 아래 부분과 맨 위 부분의 중심의 위치 차이를 보여준다. 이 결과가 이심률이라고 보면 된다. Fig. 5의 결과를 보면 성형시 휘어진 시편이 다이에서 곧게 펴지면서 시편의 중심선을 기준으로 한쪽은 압축응력, 반대쪽은 인장응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 좌우의 응력 차이 때문에 성형 후 탄성회복 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 6과 Fig. 7에서 좌우의 응력의 편차는 압축하중이 클수록 그 차이가 작아지고, 탄성회복 크기도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. ABAQUS에서 성형하중이 커지면 소재에 걸리는 정수압 응력(Hydrostatic stress)이 커져서 해석이 수렴이 되지 않았다. Fig. 4에서 계산한 성형 하중 약 10톤으로 해석하여 결과를 관찰한다면 실제 공정에서 어느 정도 형상오차가 발생하는지 예측할 수 있을 것이다. Fig. 6과 Fig. 7의 결과로 볼 때, 성형품에서 편심과 관련된 형상 오차가 발견된다면, 소재의 부피를 정확히 하고, 성형 하중을 보다 크게 하여 성형한다면 해결이 될 수 있을 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 프린터용 샤프트의 다단 성형 공정에서 발생하는 형상 불량 의 원인을 분석하였다. 잘 알려진 성형공정 해석 소프트웨어인 DEFORM-3D을 이용하여 각 공정에서의 성형하중 및 재료와 다이에 걸리는 응력을 해석하였다. 그리고, 휘어진 소재에 대한 성형 하중별 탄성회복 해석을 통해서 성형 하중이 탄성회복 크기에 큰 영향을 주고 샤프트의 직진도 불량을 유발할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] D. W. Jung, 2002, Analysis of Free Forging of Cylindrical Billets by Using Finite Element Method, J. Ocean Eng. Technol., Vol. 16, No.6, pp. 49~54.
- [2] Y. S. Kim, Plasticity, Sigma Press, 2003.
- [3] Y. J. Kim, S. D. Park, 2003, Finite Element Analysis for Design of Closed Die Forging Process of a Bevel Gear, J. Korean Society of Manufacturing Technology, Vol. 2, No.1, pp. 92~99.
- [4] J. H. Son, D. W. Bae, C. W. Park, H. Y. Lee, H. K. Seo, C. M. Seo, 2002, Study on Precision Cold Forming Process Design and Forming Analysis of Inner Sleeve Using 3D finite Element Method, Proc. of the Korean Society for Precision Engineering, Spring, pp. 575~576.
- [5] J. H. Song, S. Y. Kim, Y. T. Im, 2002, Forming Analysis and Design of Cold Gear Forging using 3D Finite Element Method, Proc. of the Korean Society for Technology of Plasticity, Spring, pp. 108~111.