

엔진 벨브 스프링 컵 단조의 유한요소해석

이인환[†] · 조해용* · 송홍기* · 김지훈** · 서보혁** · 경기현**

Finite element analysis of forging for spring cup of engine valve

In-Hwan Lee, Hae-yong Cho, Hong-ki Song, Ji-Hoon Kim, Bo-Hyuck Seo and
Ki-Hyun Kyoung

Key Words: backward extrusion(후방 압출), Cold forgong(냉간 단조), FEM(유한요소해석),
Process Design(공정설계)

Abstract

Forging for spring cup of engine valve was investigated in this study. New method is needed to reduce cost and development lead time required to fix forming process of new product, that eventually can provide die, metal flow and forming loads with high confidence level. FEM could provide required detail information that could reduce trial error in advance before the actual production. By using the rigid-plastic finite element simulation, possibilities of improving former research were explored.

Results generated by FEM could foresee expected material deformation in advance and made possible new forming process successfully.

1. 서론

냉간 단조는 자동차, 항공기 등의 복잡한 부품의 생산에 많이 이용되고 있다. 냉간 단조는 다른 금속성형법에 비해 생산품의 질, 생산율 그리고 생산비용 등에 있어서 많은 이점을 가지고 있다. 특히, 냉간 단조로 인한 제품의 표면경도와 정밀도가 높고, 재료의 강도와 기계적 성질을 향상시켜 주는 등이 공정의 주된 이점이다.

냉간 단조로 제품을 생산하는데 있어서 생산경비를 최소화하기 위해서는 초기소재를 이용하여 한 공정으로 성형하는 것이 가장 효율적인 방

법이 될 수 있다. 그러나 제품의 형상 및 요구 만드는 것이 어려운 경우가 대부분이다. 이러한 경되는 설계조건에 따라 한 공정으로 최종제품을 위해서는 예비성형체를 만들어 몇 번의 단조 공정으로 요구하는 제품을 만들고 있다. 생산현장에서 최상의 제품을 생산하기 위해서는 보유 장비의 적합성 생산시간의 최소화 및 최소의 소재 투입량 등을 고려한 단조품의 형상 및 공정설계를 하여야 한다. 이렇게 설계된 공정설계 및 단조품의 형상도 제품을 대량 생산함에 따라 개선이 이루어져야 한다.

새로운 제품을 생산하기 위한 성형공정의 개발에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위하여 실제의 금형, 소재유동, 성형하중 등의 상세한 정보를 제공할 수 있는 방법들이 필요하다.

그중 유한요소법은 이와 같은 정보들을 상세히

[†] 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : anxanx@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-3161 FAX : (043)263-2448

* 충북대학교

** (주)선일 다이파스

제공할 수 있어 생산과정의 시행착오를 줄일 수 있다. Choi(1) 등은 유한요소해석을 이용한 환봉 단조 공정 최적화 대해 연구 하였다. Park(2) 등은 내 치형 드럼클러치의 냉간 단조 공정을 설계하였다. Kim(3) 등은 알루미늄합금 휠 단조공정을 설계하였다. Choi(4~5) 등은 유한요소 해석을 통합한 다단 냉간 단조 공정시스템을 연구와 강소성 유한 요소법을 이용한 냉간단조 공정의 최종단계를 해석하였다. 이외에도 냉간단조에 관한 연구(6~7)는 폭넓게 연구 되어 왔다.

본 연구에서는 이전 연구에서 제한한 성형공정을 검토하여 개선 가능성을 상용 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하여 조사하였다. 또한 성형공정 동안의 소재변형 양상을 예측하였다. 이러한 결과를 기초로 새로운 성형 공정을 제시 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 강소성 유한요소법의 적용 이론식

소성가공에 대한 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM 3D는 다음과 같은 강소성식을 사용하고 있다.

$$\text{평형방정식} : \sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{적합방정식} : \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{2}(\mu_{i,j} + \mu_{j,i}) & (2) \\ \dot{\epsilon}_v &= \mu_{i,i} = 0 \end{aligned}$$

$$\text{구성방정식} : \sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} \cdot \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{경계조건} : \sigma'_{ij}n_i &= F_j & \text{on } S_F & (4) \\ \mu_i &= U_i & \text{on } S_U \end{aligned}$$

여기서 σ'_{ij} 와 $\dot{\epsilon}'_{ij}$ 는 각각 변형재료의 응력과 변형률 속도를 나타내고 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 재료의 유효 응력과 유효변형률 속도를 나타내고 있는데 각각 $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}(\sigma'_{ij}\sigma'_{ij})}$ 와 $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}'_{ij}\dot{\epsilon}'_{ij})}$ 로 정의 되며, F_j 는 재료의 경계면에 걸리는 힘, U_i 는 경계면에서의 변형속도를 나타내고 있다. (1) ~ (4)식에 변분법을 적용하여 다음과 같은 약형(weak form)을 구할 수 있다.

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (5)$$

V 와 S 는 각각 표면적을 나타내고, K 는 페널티 상수를 나타낸다.

3. 유한요소 해석

3.1 문제정의

엔진 벨브 스프링 컵의 냉간단조 공정이 Fig.1에 나타내었다. 공정은 후방압출이 주된 것으로 초기소재의 높이에 대한 최종 제품의 형상의 길이비로 볼 때 성형난이도가 높고 예비 성형이 필요하다. 현재 제품의 성형을 위해서 예비공정인 업셋팅과 컵부분을 성형하기 위한 후방압출(backward extrusion)이 각각 2번의 성형공정과 소재의 충분한 성형성을 유지하기 위해 4회의 어닐링(annealing) 과정을 거친다. Fig.1의 공정에 따라 유한요소 시뮬레이션결과 최대하중은 3st stage에서 발생하였다.

Fig. 1의 공정을 개선하기 위해서 Fig. 2에서 제시한 공정인 Workpiece를 한 번 업셋팅 한 후 바로 후방압출을 해서 제품을 성형하는 새로운 공정설계를 제안 이를 검토하고자한다. Fig. 2의 공정은 성형공정중에 발생하는 최대 하중은 Fig. 1 경우보다 높으나, 공정수와 어닐링 과정을 줄일 수 있고 성형성이 향상되는 장점이 있기 때문에 실제 산업현장에서 성형하고자 하는 공정이다. 본 논문에서는 Fig. 2의 단조공정과 현재 생산되고 있는 Fig. 1의 공정을 비교하여 Fig. 2의 새로운 공정의 타당성을 검증하고자 한다.

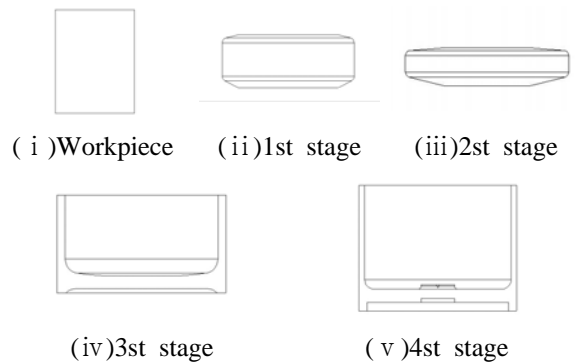


Fig. 1 processing I

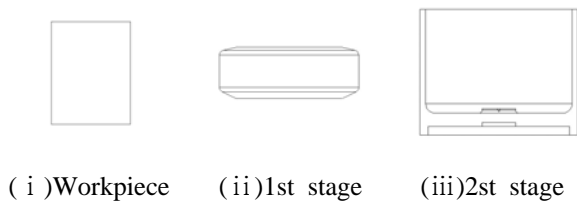


Fig. 2 Processing II

Table 1 Chemical composition(wt%) of the alloy steels used in this study

Steel	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
AISI4140	0.40	.072	0.25	1.05	-	0.15
AISI H13	1.40	0.60	0.60	11	0.3	0.7

Table 2 Material property of the alloy steels used in this study

Material	Young's modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Possion's ration	Flow stress (MPa)
AISI4140	211,000	415	0.29	$860\epsilon^{0.2439}$
AISI H13	210,000	3,100	0.27	-

3.2 해석절차

본 연구에서는 엔진 벨브 스프링 컵 성형을 위해 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하였다. 사용된 제품의 재료는 AISI4140이고 금형과 펀치의 재료는 AISI H13이다. 재료의 성분과 물성은 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 편의상 Fig. 1의 공정을 공정 I, Fig. 2의 공정을 공정 II라고 하겠다. 먼저 재료와 금형을 모델링한 후 요소를 분할하였다. 요소 분할 후 경계조건 물성 등 공정변수를 입력하였다. 해석조건과 해석과정을 Table 3과 fig. 3에 나타내었다. 해석조건은 온도는 변하지 않는다는 가정 하에서 펀치 속도는 10mm/, 마찰은 0.08, 요소 분할은 50000개로 하였다.

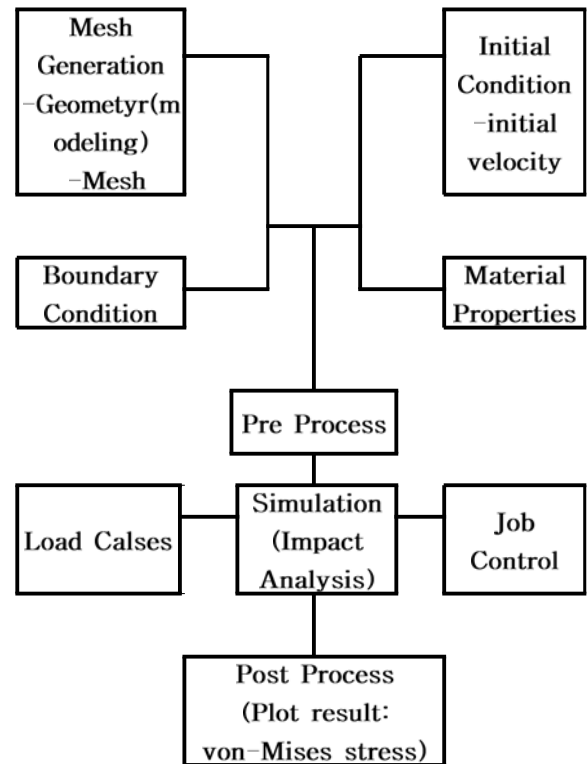


Fig. 3 The flow chart of simulation

Table 3 Condition of forging simulation

Velocity of punch down(mm/s)	0.08
Shear friction factor	10
Number of element	50000
Simulation mode	Isothermal

4. 해석 결과

4.1 공정 I의 해석 결과

해석결과 최종형상과 실제 성형하고자 하는 제품의 형상을 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. 제품의 높이는 최종 절삭가공을 고려해서 실제 제품보다 1.3mm 크게 성형하였다. 바닥면의 태두리 형상은 비교적 정확한 성형이 이루어 졌으며 내부에 원형으로 돌출된 부분의 형상이 내측 코너부에서 완전히 충만하지 않고 0.04mm 정도 공극이 발생했다. 이 공극은 공차범위 내에 속하므로 비교적 양호한 정밀도를 보였다. Fig. 7은 해석을 통해

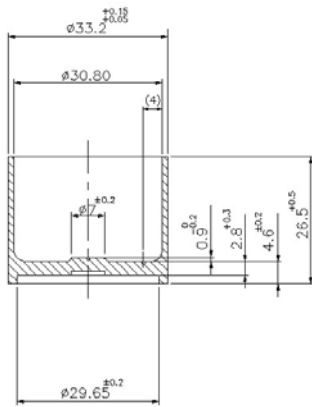


Fig. 4 Shape of forming product

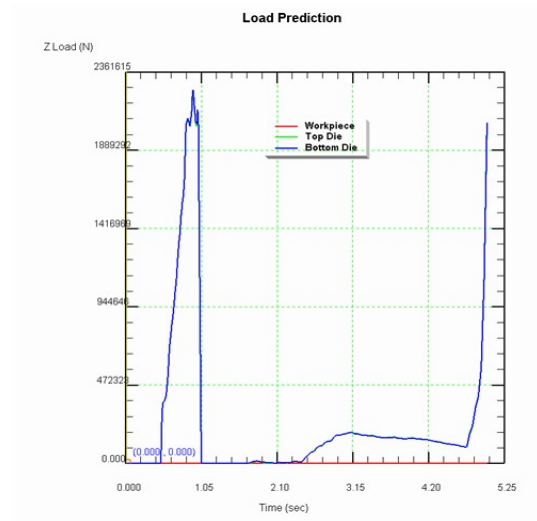


Fig. 7 Load of processing I

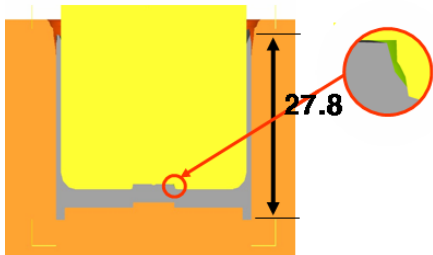


Fig. 5 Shape of processing I

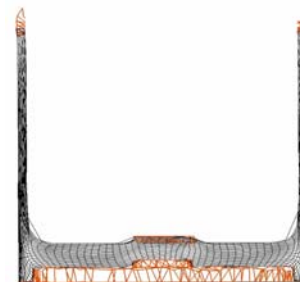


Fig. 8. Metal flow of Processing I

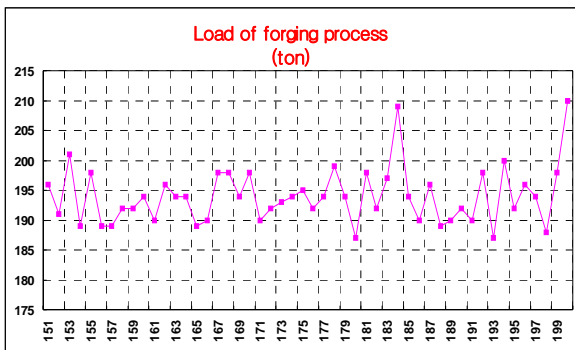


Fig. 6 Load of forging process

얻은 성형하중을 나타낸 것이다. 최대하중은 3st stage 후방압출 단계에서 2250000N으로 가장 크게 나타났다. 그 이유는 좁은 공간으로 소재가 압출되면서 큰 부하가 걸렸기 때문이다. 해석으로 구한 최대성형하중은 실제 생산라인에서 얻은 성형하중과 비교 했을 때 200000N 정도의 차이를 보였다. 그 이유는 균일하지 못한 열처리로 인해 발생하는 재료의 경도 차이, 성형 시 운환에 의한 마찰계수의 차이라고 판단된다. Fig. 6은 현재 생산라인에서 측정한 성형하중을 나타낸 것

이다. Metal flow는 단조품의 품질을 평가하는 중요한 요소이다. Fig. 8은 공정 I의 최종단계에서의 Metal flow이다. 바닥과 옆면이 이어지는 직각부분의 단류선이 복잡하긴 하나 끊어지거나 겹쳐지지 않는 것으로 볼 때 단조품의 품질은 양호한 것으로 판단된다

4.2 공정 II의 해석 결과

Fig. 9은 공정 II의 공정해석 최종형상을 나타낸다. 공정 I에서 공극이 생겼던 부분의 성형성이 향상된 것을 볼 수 있다. 또한 공정 I에서 언급했던 부분들에 대한 성형성도 양호한 정밀도를 가진다. Fig. 10은 해석을 통해 얻어진 성형하중이다. 최대 성형하중은 2550000N으로 2st stage에서 나타났다. 성형하중은 공정 I에 비해 300000N이 많이 나타났다. 그 이유는 초기소재의 높이에

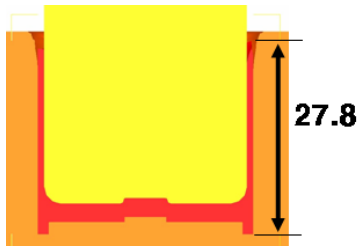


Fig. 9 Shape of processing II

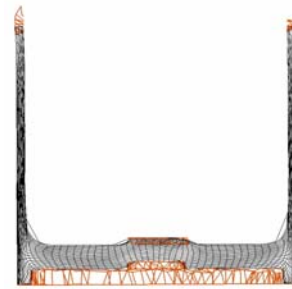


Fig. 11 Metal flow of Processing II

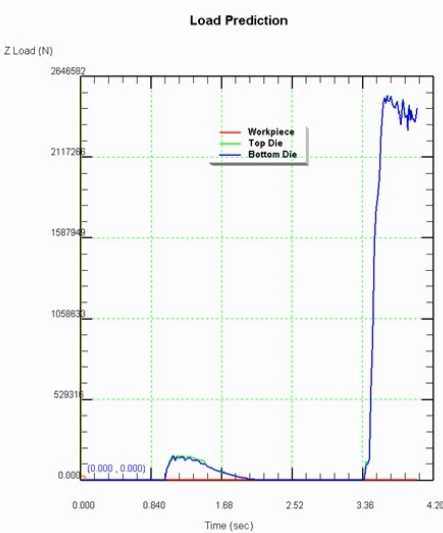


Fig. 10 Load of processing II

대한 최종 제품의 형상의 길이비로 볼 때 성형 난이도가 공정 I 에 비해 높기 때문이다. 현재 제품을 생산하고 있는 프레스가 400톤급이다. 따라서 2550000N의 단조하중은 제품을 생산하기에 구조적으로 안전함을 확인할 수 있다. Metal flow 역시 공정 I 과 거의 같은 수준으로 단조품의 품질은 양호하다고 판단된다. Fig. 11 은 공정 II의 Metal flow를 나타낸 것이다.

5. 결론

본 연구는 엔진 밸브 스프링 컵 성형공정 개선에 목적을 두고 현재 진행되고 있는 성형공정과 개선된 성형공정에 대해 유한요소 해석을 수행하여 해석프로그램에서 얻은 정보를 검토하여 개선된 성형공정의 타당성을 입증하기 위한 것이다.

연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1)유한요소해석을 통해 얻은 성형하중, Metal flow를 현재 라인에서 생산되고 있는 제품의 것과 비교함으로써 새롭게 제안한 성형공정의 타당성을 검증하였다.

(2)유한요소해석 통해 얻은 형상을 비교함으로써 제안한 공정 II의 성형성 향상을 확인할 수 있었다.

(3)제안한 공정의 타당성이 검증됨으로써 생산 시간 및 비용의 대폭 절감할 수 있을 것이다. .

(4)초기소재의 높이에 대한 최종 제품의 형상의 길이 비로 볼 때 성형난이도가 높은 제품을 한번에 성형할 수 있는 성형 공정을 제시하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음

참고문헌

- (1)Choi, S. K., Chun, M. S. and Moon, Y. S., 2004, "Optimization of Round Bar Forging Process by Using Finite Element Analysis," The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 13, No. 2, pp. 142~147.
- (2)park, S. S., kim, B. M. and Lee, J. M., 2005, "Process Design of Cold Forging for Drum Clutch with Inner Tooth Component," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 30~37.

- (3)Kim, Y. H., Yoo, T. G, and Hwang, B. B., 1999, "An Analysis on the Forging Processes for 6061 Aluminum Alloy Wheel," The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 8, No. 5, pp. 498~506.
- (4)Choi, J. C., Kim, B. M, and Lee, U. H., 1995, "An Integrated Process Planning System and Finite Element Simulation for Multistage Cold Forging," The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 4, No. 1, pp. 28~38.
- (5)Choi, J. C., Kim, B. M., Choi, Y. and Jung, S. Y., 1999, "An Analysis of Cold Foging at Final State Using Rigid-Plastic FEM," The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 8, No. 1, pp. 108~115
- (6)Lee, K. H., Jin, M. H., Je, J. S., Nam, W. S. and Kang, S. S., 2003, "Development of Cold Forging Process for OP Shaft and Improvement of Forgeability of SNCM Steel," The Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 12, No. 5, pp. 473~478
- (7)Park, J. C., Park, Y. and Kim, K. K., 1997, "A Study on the Cold Forging Process of Spur Gears," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 14, No. 12, pp. 105~113