

열간포머 단조공정중 스프링부착 금형을 가진 피어싱과 트리밍 동시공정의 유한요소해석

문호근* · 정재현* · 전만수**

(2002년 11월 8일 접수)

Finite Element Analysis of a Piercing and Trimming Process Having a Spring-Attached Die in Hot Former Forging

H. K. Moon, J. H. Chung and M. S. Joun

Abstract

In this paper, the rigid-viscoplastic finite element method is employed together with an iteratively force-balancing method to analyze a piercing and trimming process with a spring-attached die in hot former forging. An actual piercing and trimming process with a spring-attached die is investigated in detail and a generalized analysis model is proposed. A multi-stage hot former forging process is simulated under various spring constants. The analyzed results are discussed in order to investigate the effects of spring constants on the metal flow lines and the formed shapes. Then an optimal piercing and trimming process in hot former forging is devised.

Key Words : Finite Element Analysis, Piercing and Trimming Process, Spring-Attached Die, Hot Former Forging Process, Iteratively Force-Balancing Scheme

1. 서론

일반적으로 단조공정에서 베어링 레이스와 같은 대량생산품은 고속, 자동화 공정이 필수적으로 요구된다. 이러한 요구조건을 만족하는 적절한 장비가 포머 단조기(former forging machine)이다. 베어링 레이스는 재료의 기계적 성질 및 제품의 수명 향상 등의 이유로 열간단조로 제작된다. 열간포머 단조는 고온, 고속의 한계상황에서 실시되며, 다단공정(multi-stage process) 및 자동화 등이 고려되어야 하기 때문에 단조공정에서의 설계 실패는 생산성에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

열간포머 단조공정중 피어싱과 트리밍 공정은 단조품에 치명적인 결함을 일으킬 수 있다. 피어싱과 트리밍이 순차적으로 이루어지는 공정에서 피어싱 공정의 금형에는 소재의 배출문제를 해결하기 위하여 스프링이 장착된다. 단조공정 설계에서 부적절한 스프링 상수와 스프링 예압량은 피어싱과 트리밍 공정에서 형상결함을 유발할 수 있다.(Fig. 1) 이러한 결함은 후속된 기계가공 시간을 늘릴 뿐만 아니라 표면불량을 유발할 수 있다.

단조공정상의 각종문제의 해결을 위하여 유한요소법^(1~3)이 널리 사용되고 있다. 열간 단조공정

* FAG 한화베어링㈜ 연구소

** 경상대학교 기계항공공학부



Fig. 1 Defective shape of the workpiece after a piercing and trimming process

중 피어싱과 트리밍 공정은 파단을 제외하면 성형공정과 유사하다. 소성가공 공정중 소재의 파괴 및 파단에 관한 연구는 많은 학자들에 의하여 실시되었고⁽⁶⁾, Joeng 등⁽⁷⁾은 요소제거 기법을 제안하여 손상도에 근거한 파괴판단방법으로 판재의 전단변형 및 파단과정을 강소성 유한요소법으로 해석하였다. Lee 등⁽⁸⁾은 열간 단조공정중 연성 파괴 이론에 근거한 피어싱공정 해석기법을 제안하여 다단 단조공정에 대한 유한요소해석을 실시하였으며, Joun 등⁽⁹⁾은 금속유동선도를 제어하기 위하여 스프링을 장착한 금형을 가진 열간 단조공정에 대한 유한요소해석을 실시하였으며, 스프링부착 금형의 해석에 필요한 축차적 하중균형기법을 제안하였다.

본 논문에서는 단조 시뮬레이션 기술⁽⁸⁻⁹⁾을 이용하여 스프링부착 금형을 가진 피어싱 및 트리밍공정을 포함한 다단 열간포머 단조공정에 대한 유한요소해석을 실시하여 피어싱 공정설계에 필요한 스프링상수, 스프링 예압량, 피어싱 금형형상 등의 결정방법을 제안하고자한다.

2. 유한요소 수식화 및 해석모델

2.1 소성유동해석

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계영역 S 로 나누어지며 경계영역 S 는 표면력이 $t_i = \bar{t}_i$ 로 주어진 S_t , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 S_v , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 S_c

등으로 세분화될 수 있다. 소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화 등의 성질을 가지고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따른다고 가정한다. 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 속도장 v_i 와 정수압 p 를 구하자는 것이며, 벌칙기법에 근거하여 수식화하면, 다음과 같은 경계치 문제로 수식화된다.

(1) 평형방정식 :

$$\sigma_{y,j} + f_i = 0 \quad (1)$$

(2) 응력-변형률속도 관계식(구성방정식) :

$$\sigma_y = -p\delta_y + \sigma'_y \quad (2)$$

$$\sigma'_y = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_y \quad (3)$$

(3) 속도-변형률속도 관계식 :

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4)$$

(4) 비압축성조건 :

$$v_{i,i} = 0 \quad (5)$$

(5) 경계조건 :

$$\sigma_y n_j = \bar{t}_i \quad \text{on } S_t \quad (6)$$

$$v_i = \bar{v}_i \quad \text{on } S_v \quad (7)$$

$$v_n = \bar{v}_n \quad \text{on } S_c \quad (8)$$

$$\sigma_t = -\mu\sigma_n g(v_i) \quad \text{on } S_c \quad (9)$$

$$\sigma_t = mkg(v_i) \quad \text{on } S_c \quad (10)$$

평형방정식에서 f_i 는 체적력이고, 벡터 n_i 는 해석경계에서 정의되는 외향단위법선벡터이다.

구성방정식에서 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 각각 유효응력과 유효변형률속도를 의미한다. 일반적으로 $\bar{\sigma}$ 는 변형률, 변형률속도, 온도 등의 함수이며, 소재의 기계적 성질 또는 상태를 반영하는 함수이다. 텐서량에서 상첨자 프라임(')은 편차성분을 나타내며, 하첨자 t 와 n 은 각각 접선과 법선성분을 의미한다. 그리고 하첨자가 두 번 반복되는 것은 덧셈에 대한 부호규약을 따른 것이며, 콤마(,) 뒤의 첨자는 편미분을 의미한다. 이러한 부호규약은 다음의 수식에도 적용된다.

위의 경계치문제에 대한 약형(weak form)은 다음과 같다.

$$\int_V \sigma'_y \omega'_y dV - \int_V p \omega_n dV - \int_V f_i \omega_i dV - \int_V v_{i,i} q dV - \sum \int_{S_t} \bar{t}_i \omega_i dS - \int_{S_c} \sigma_n \omega_n dS - \int_{S_c} \sigma_t \omega_t dS = 0 \quad (11)$$

여기서 가중함수 ω 는 경계 S_v 에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고, 가중함수 q 는 전 해석영역에서 임의의 함수이다.

약형에서 $\omega_v = (\omega_{v,j} + \omega_{j,v})/2$ 이며, ω_n 과 ω_t 는 각각 ω_i 의 법선성분과 접선성분을 나타낸다.

따라서 진술한 경계치 문제를 푸는 것은 임의의 가중함수 ω_i 와 q 에 대하여 약형을 항상 만족시키는 속도장 v_i 와 압력장 p 를 구하는 문제와 동일하다. 물론, 속도장은 필수경계조건을 만족해야 한다.

약형에는 속도장 v_i 와 압력장 p , 가중함수 ω_i 와 q 등이 바탕을 형성하고 있다. 그 이외의 것은 이들로부터 파생된 것이다. 따라서 이 네 개의 함수를 보간하여 속도와 압력이 미지수인 비선형 연립방정식을 얻을 수 있다.

2.2 피어싱 · 트리밍 동시공정

Fig. 2는 스프링이 장착된 피어싱과 트리밍의 금형 형상을 보여주고 있다. Fig. 3은 스프링부착 금형을 가진 피어싱과 트리밍 공정이 같은 단계에서 순차적으로 일어나는 포머 단조공정의 개념도이다. 일반적으로 스프링은 초기에 예압량 s_0 만큼 예압이 되며, 금형의 최대허용 스트로크 s_{max} 는 규제된다.

스프링부착 금형은 예압하중(spring preload) $P_0 (=ks_0)$ 보다 작은 하중이 작용하면 정지해 있다가 그 이상의 하중이 작용하면 성형하중과 스프링 하중이 균형을 이루는 방향으로 움직이게 된다.

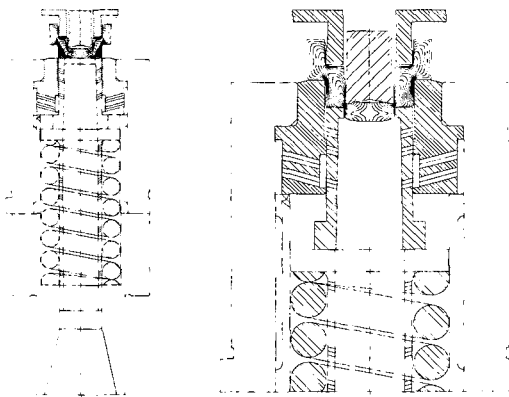


Fig. 2 Schematic diagram of a piercing and trimming die

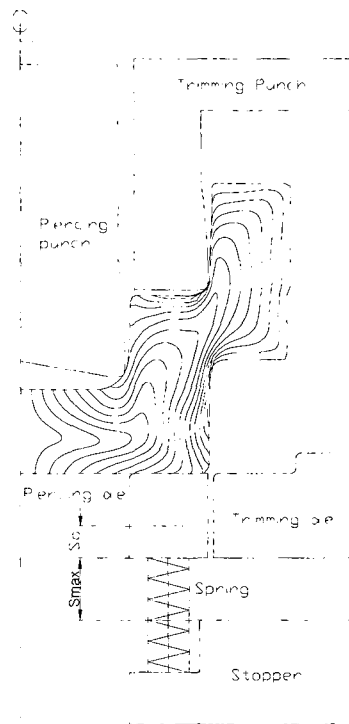


Fig. 3 Conceptual diagram of a piercing and trimming process having a spring-attached die

기존의 유한요소법을 이용하여 스프링부착 금형을 지닌 단조공정을 해석할 경우, 성형하중과 스프링반력의 균형을 이루기 위한 축차적 접근방법이 불가피하다. 축차적 하중균형기법에 관한 자세한 내용은 참고문헌⁹⁾으로 대신한다.

그림에서 소재 내부의 선은 단조시물레이션을 통하여 소성유동선도(metal flow lines)를 예측한 결과이다.

2.3 열간포머 단조공정의 해석모델

Fig. 4는 스프링부착 금형을 가진 다단 열간포머 단조공정의 예이다. 소재는 절단과 이송 이후에 2단의 연속단조공정에 의하여 성형되며, 최종 단계인 피어싱과 트리밍 동시공정에서 분리된다. 열간포머 단조공정은 금형과 소재가 수냉 및 공냉에 의하여 열적 변화를 겪기 때문에 연계 해석이 필요하지만 주요 관심사가 성형형상이므로 등온공정 가정하에서 해석을 실시하였다. 사용된 공정조건은 Table 1과 같다.

트리밍 개시 직전거리의 10%가 되었을 때 분리가 이루어진다고 가정하였다.⁽¹⁰⁾

3. 적용예제 및 해석결과 고찰

피어싱과 트리밍 동시공정에서 스프링의 선정은 장비와 금형의 치수에 의해 제한을 받는다.

스프링 상수와 예압량이 피어싱과 트리밍 동시공정의 성형형상에 미치는 영향을 고려하기 위하여 세가지 스프링에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 사용된 스프링의 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Spring information

Classification	Spring 1	Spring 2	Spring 3
Spring constant (N/mm)	110	420	540
Max. stroke (mm)	56.0	30.6	22.7
Spring preload (N)	1300	2000	4000

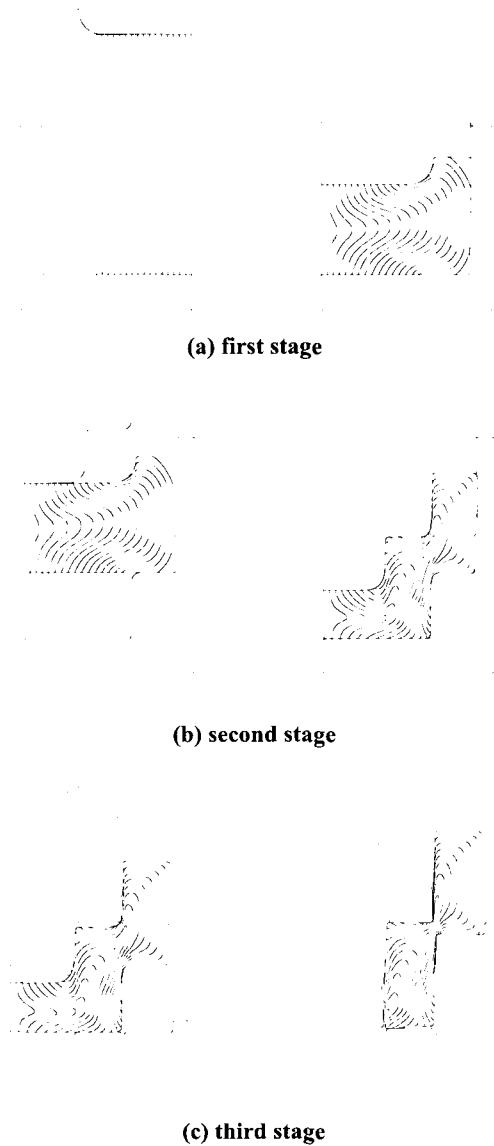


Fig. 4 Schematic description of a multi-stage hot former forging process and its analysis

Table 1 Material Property and Process conditions

die velocity	$v_D = 300\text{mm/sec}$
coefficient of Coulomb friction	$\mu = 0.3$
flow rule of material	$\bar{\sigma} = 68.0\bar{\epsilon}^{0.18} \text{MPa}$

피어싱과 트리밍 동시공정에서 재료의 분리는 두 금형의 모서리 점 사이의 거리가 피어싱 및

Fig. 5는 다단 열간포머 단조공정 중 피어싱과 트리밍 동시공정에 대한 유한요소해석 결과를 스프링 조건별로 비교하고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 스프링부착 피어싱 금형(하형)이 아래로 이동했음을 알 수 있으며, 이 금형의 윗부분과 접촉하고 있는 단조품의 형상을 보면 소재 절단면으로 소재가 부풀어져 있는 것을 알 수 있다. 해석결과를 비교한 결과, 그림(c)의 예압량이 가장 큰 경우가 소재의 형상결합이 적은 것을 알 수 있다. 따라서 피어싱과 트리밍 동시공정의 금형 및 스프링 설계시 금형의 행정(stroke)과 절단소재의 추출문제 등을 고려하여 주어진 공간에서 스프링의 상수와 예압량을 최대한 크게 하는 것이 필요하다.

4. 결론

피어싱과 트리밍 동시공정을 거친 단조품은 후속공정인 전조공정을 거쳐 선삭가공 후, 베어링의 내·외륜으로 사용되므로, 단조품의 성형결합은 후속가공에 지장을 초래할 수 있으며, 가공불량을 일으킬 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여,

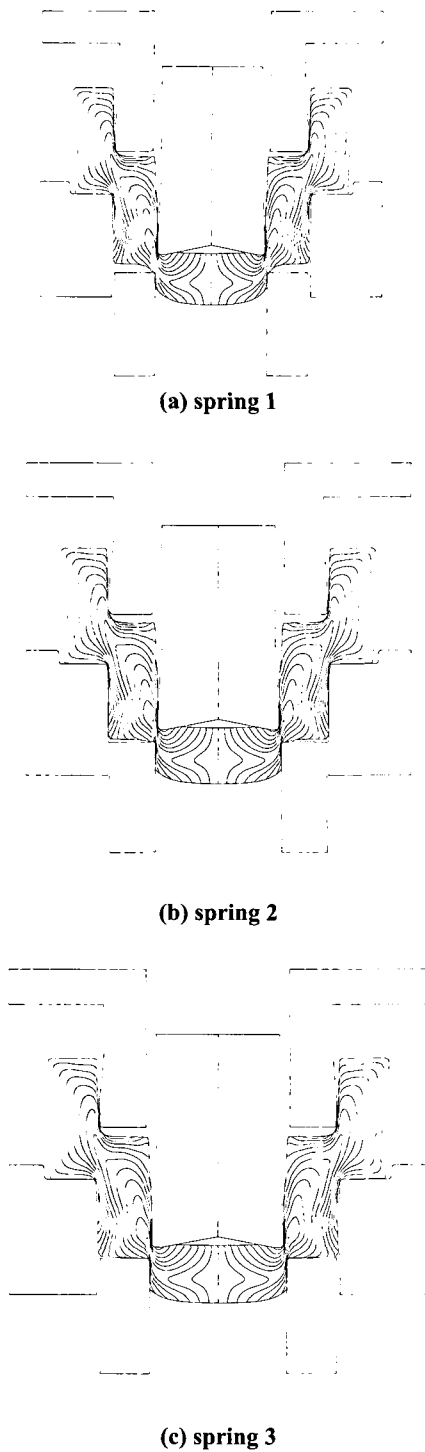


Fig. 5 Deformed shapes of the materials at various spring conditions

본 논문에서는 스프링부착 금형을 가진 피어싱 및 트리밍 동시공정을 포함한 다단 열간포머 단조공정에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 해석결과, 단조품 형상이 스프링 부착 금형의 스프링 상수와 스프링 예압량에 따라 변화함을 알 수 있었으며, 이러한 해석결과는 다단 열간포머 단조공정 중 피어싱과 트리밍 동시공정의 금형설계와 스프링의 최적설계에 성공적으로 활용되었다.

후 기

본 논문은 BK21 지역대학 육성사업단의 지원으로 실시된 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, C. H. and Kobayashi, S., 1973, "New Solutions to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method", ASME, J. Eng. Ind., Vol. 95, pp. 865 ~ 873.
- (2) Kobayashi, S., Oh, S. I. And Altah, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, New York, USA.
- (3) Hwang, S. M., Joun, M. S. and Park, J. S., 1990, "A Penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distributions at the Tool-Workpiece Interface in Metal Forming", Trans. of NAMRI of SME, Vol. XVIII, pp. 13 ~ 19.
- (4) Cho, J. R., Park, C. Y. and Yang, D. Y., 1992, "Investigation of the Cogging Processes by Three Dimensional Thermo-Viscoplastic Finite Element Analysis", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 206, pp. 277 ~ 286.
- (5) Joun, M. S., Moon, H. K. and Shivpuri, R., 1998, "Automatic Simulation of a Sequence of Hot Former Forging Processes by a Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Method", Trans. ASME J. Eng. Mat. and Tech., Vol. 120, pp. 291 ~ 296.
- (6) Koga, N. and Murakawa, M., 1996, "Application of Viscoplasticity to Experimental Analysis of Shearing Phenomena", Adv. Tech. Plast., pp. 277 ~ 286.
- (7) Jeong, S. H., Kang, J. J. and Oh, S. I., 1996, "A Study on Shearing Mechanism by FEM", Proc. 5th ICTP, Columbus, Vol. 2, pp. 631 ~ 634.
- (8) Lee, S. W. and Joun, M. S., 2000, "Rigid-viscoplastic Finite Element Analysis of the Piercing Process in

- the Automatic Simulation of Multi-Stage Forging Process", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 99, pp. 207~214.
- (9) Joun, M. S., Lee, S. W. and Chung, J. H., 1998, "Finite Element Analysis of a Multi-Stage Axisymmetric Forging Process Having a Spring-Attached Die for Controlling Metal Flow Lines", Int. J. Mech. Tools and Manu., Vol. 38, pp. 843~854.
- (10) 이석원, 최대영, 전만수, 1999, "다단 단조공정의 자동 시뮬레이션 중 피어싱 공정의 강점소성 유한요소해석", 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 2 호, pp. 216~221.