

재료의 변형거동 추적을 통한 예비형상 설계

홍진태* · 박철현* · 이석렬* · 양동열*

Preform Design Technique by Tracing The Material Deformation Behavior

J. T. Hong, C. H. Park, S. R. Lee and D. Y. Yang

Abstract

Preform design techniques have been investigated in efforts to reduce die wear and forming load and to improve material flow, filling ratio, etc. In hot forging processes, a thin deformed part of a workpiece, known as a flash, is formed in the narrow gap between the upper and lower tools. Although designers make tools that generate a flash intentionally in order to improve flow properties, excessive flash increases die wear and forming load. Therefore, it is necessary to make a preform shape that can reduce the excessive flash without changing flow properties. In this paper, a new preform design technique is proposed to reduce the excessive flash in a metal forging process. After a finite element simulation of the process is carried out with an initial billet, the flow of material in the flash region is traced from the final shape to the initial billet. The region belonging to the flash is then easily found in the initial billet. The finite element simulation is then carried out again with the modified billet from which the selected region has been removed. In several iterations of this technique, the optimal preform shape that minimizes the amount of flash without changing the forgeability can be obtained.

Key Words : Hot forging, Rigid-plastic finite element method, Optimization, Preform design, Material flow tracing

1. 서론

소성가공의 하나인 단조공정에서 잘 설계된 예비형상은 다이의 마모와 펀치의 성형하중을 감소시키고, 재료유동과 결정 크기, 충전률을 향상시키며, 플래시의 양을 줄임으로써 재료의 소모를 줄여준다. 반면에, 예비형상을 사용하지 않거나 잘못 설계된 예비형상을 이용하여 단조공정을 수행할 경우, 미충진, 과도한 플래시 등으로 인한 다양한 결함이 발생할 수 있다. 따라서, 적절한

예비형상을 구하기 위한 수많은 연구들이 진행되어왔다.

일반적으로, 예비형상은 설계자의 경험이나 노하우에 의존하여 설계되었으며, Akgerman[1]과 Tetrin[2]등이 추적된 노하우를 바탕으로 설계규칙을 제안하였다. 그 후, 다이마모 감소, 충진율 향상, 변형률 분포 균일화, 결합제거 등을 목적함수로 하고, 형상변수를 설계변수로 하는 최적화방법들이 제안되었다[3-6]. 그러나, 이러한 방법들은 설계자의 경험이나 감각이 중요한 요소로 작용하

* 한국과학기술원 기계공학과

므로 일반적인 예제에 적용하기가 어려우며, 최적의 예비형상을 구하기 위하여 목적함수를 최소화시키는데 많은 반복계산이 필요하므로 과도한 시간이 소요되는 단점이 있다.

본 연구에서는 재료의 변형거동을 추적하여 플래시의 발생을 줄이는 방향으로 예비형상을 설계하는 방법으로, 일반적인 열간단조공정에서 적절한 예비형상을 설계할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 반복적 예비형상 설계방법

열간단조공정의 유한요소해석 결과, 과도한 플래시가 발생했을 때, 본 연구에서 제안하는 반복적 예비형상 설계방법은 Fig. 1 과 같다.

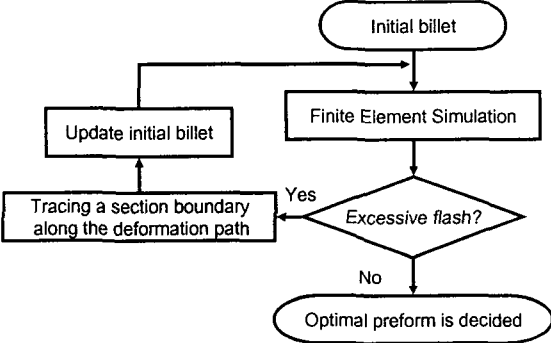


Fig. 1 Flow chart for the optimization of preform design

2.1 추적 기준면 설정

단조공정의 해석이 끝났을 때, 과도한 플래시가 생성된 경우, 플래시를 줄이기 위해 예비형상을 설계해야 하며, 그 첫 단계로 플래시의 출구부에 추적 기준면을 구성한다.

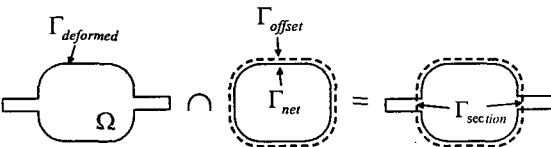


Fig. 2 Definition of shape boundary

Fig. 2 는 형상 경계면의 정의를 보여준다. 여기서, $\Gamma_{deformed}$ 는 단조공정 해석이 끝난 상태의 형상 경계면이고, Γ_{net} 은 피니싱 공정이 끝난 상태의 최종제품의 형상 경계면이며, 이로부터 식 (3) 과 같이 오프셋된 경계면을 결정한다.

$$\Gamma_{deformed} = \{x \mid x \in \partial\Omega\} \quad (1)$$

$$\Gamma_{net} = \{y \mid y \in \partial\Omega_{net}\} \quad (2)$$

$$\Gamma_{offset} = \{y' \mid y' = y + \alpha \vec{n}, y \in \Gamma_{net}\} \quad (3)$$

여기서, \vec{n} 은 형상의 바깥쪽 법선벡터이고, α 는 오프셋 거리이다. 식(1)과 (3)으로부터 식(4)와 같이 추적기준면을 정의한다.

$$\Gamma_{section} = \Gamma_{deformed} \cap \Gamma_{offset} \quad (4)$$

2.2 기준면 추적

Fig. 3 은 기준면 추적에 대한 개략도이다. 즉, n 단계에서 추적 기준면 위의 점 p_i^t 를 표시하고 로컬 좌표를 저장해 두면, (n+1)단계에서 소재의 변형으로 인해 p_i^t 가 $p_i^{t+\Delta t}$ 로 바뀌었을 때, 저장된 국소좌표를 이용하여 식(5)와 같이 쉽게 위치를 파악 할 수 있다.

$$p_i^t = \sum h_i x_i$$

$$p_i^{t+\Delta t} = \sum h_i x_i' \quad (5)$$

여기서, h_i 는 형상함수, x_i 는 추적점 p_i^t 가 속한 요소의 절점들의 전역좌표, x_i' 는 변형된 상태의 요소의 절점들의 전역좌표이다. 만약, 격자재 구성을 할 경우, 추적점의 전역좌표를 이용하여 새로 국소좌표를 변경시킨다.

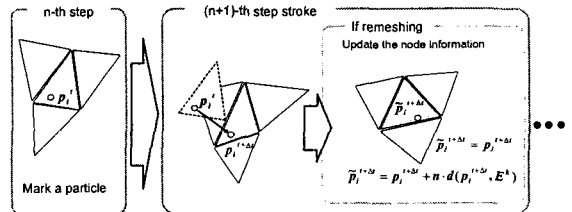


Fig. 3 Schematics of material tracing

위의 개념을 이용하여 소재의 변형 거동을 추적할 수 있으며, 본 연구에서는 최종형상의 한 단면으로부터 초기 소재까지 변형경로를 추적하였다. 초기 형상까지 추적된 단면의 외부 영역은 플래시를 구성하는 영역으로 판단하고 제거한 후,

변경된 초기 형상을 이용하여 해석을 진행하며, 적절한 최종 형상을 구할 때까지 반복한다.

3. 피스톤 단조공정에의 적용

전절에서 제안된 반복적 예비형상 설계방법의 타당성과 효용성을 검증하기 위하여, 자동차 에어킨 압축기에 이용되는 피스톤의 3 차원 단조공정 해석에 적용하여 보았다.

피스톤의 단조공정은 3 단계로 이루어져 있으며, Fig. 4 와 같이 중간형상은 기업의 노하우로 일반에게 알려지지 않았다. 그러나, 과도한 플래시가 발생하는 것으로 보아 금형 마모와 성형하중이 크고, 소재 손실이 심함을 알 수 있다.

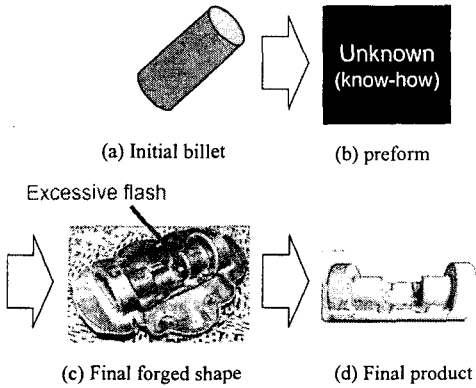


Fig. 4 Forging process of a piston

제품의 크기 및 금형의 형상은 Fig. 5 와 같으며, 이를 이용하여 강소성 유한요소해석[7]을 통해 단조공정을 해석한 결과는 Fig. 6 과 같다. 소재가 1/4 대칭형상이므로, 전체의 1/4 만 해석하였다.

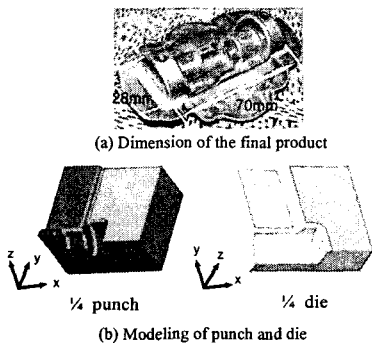


Fig. 5 Dimension of the product and modeling of die

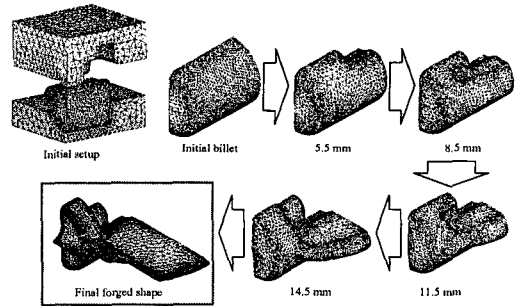


Fig. 6 Deformation behavior of the piston with initial billet

Fig. 6 에서 최종단조제품은 과도한 플래시를 생성하였으므로, Fig. 7 과 같이 플래시의 출구부에 추적 기준면을 설정한 후, 초기 형상까지 소재의 변형거동을 따라 추적하면 Fig. 8 과 같다.

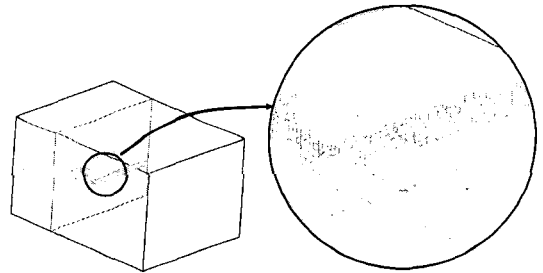


Fig. 7 Selecting a section boundary

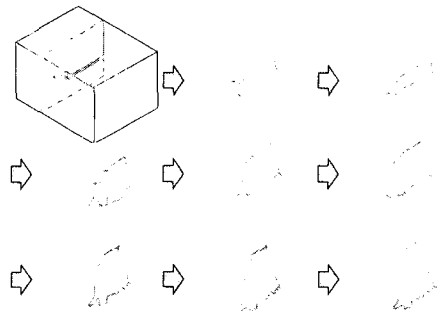


Fig. 8 Tracing a section boundary along the deformation path

Fig. 8 에서 초기 형상까지 추적된 기준면의 외부 영역을 제거한 후 해석을 다시 진행하는 과정을 반복하면 Fig. 9 와 같이 초기 형상이 수정된다. 초기 빌렛과 5 번째 예비형상을 이용하여 단조공정을 해석한 결과는 Fig. 10 에 비교하였으며, 두 결과가 소재 내부에서 비슷한 유효변형률분포를 보이는 것으로 보아, 본 연구에서 제안된 방법은

소재의 단조성에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

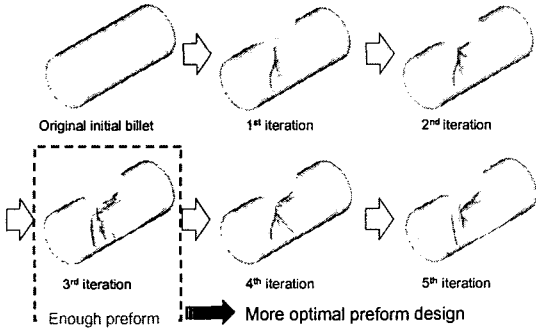


Fig. 9 The change of preform design in each iteration

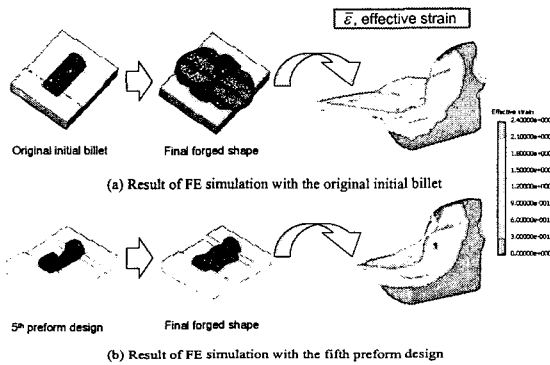


Fig. 10 The Comparison of the distribution of effective strain

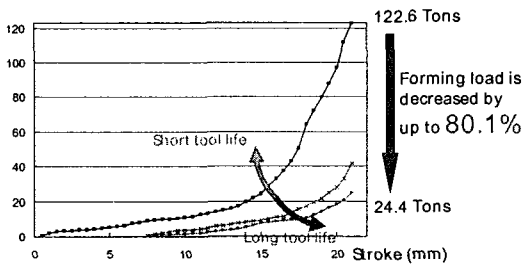


Fig. 11 Block diagram of multi-modal chatter model of a high speed machining center

Fig. 11 은 각 초기형상별 압하량에 따른 성형하중의 변화 그래프이다. 5 번째 예비형상에서는 초기 빌렛으로 성형한 경우에 비해 80%의 성형하중이 감소하였으며, 이로부터 금형의 마모 및 피로 수명이 좋아질 것임을 예측할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 열간단조공정에서 발생하는 과

도한 플래시를 줄이기 위하여 반복적 예비형상 설계 방법을 제안하였다. 이 방법은 오프라인 방법이므로 어떤 해석 프로그램에서든지 쉽게 적용이 가능하며, 과도한 플래시를 유발하는 일반적인 열간단조공정의 예비형상 설계에 활용이 가능하다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 피스톤 단조공정의 예비형상 설계에 적용하여보았으며, 단조성에는 영향을 거의 주지 않으면서, 금형의 수명을 향상시킬 수 있음을 예측할 수 있었다. 앞으로 더욱 정확한 검증을 위하여 실험을 통한 정량적인 비교가 있어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) N. Akgerman and T. Altan, 1972, "Modular analysis of geometry and Stresses in closed-die forging : Application to a structural part", J. Eng. Ind. - T. ASME, Vol.94, pp. 1025 ~ 1041.
- (2) G. P. Tetrin et al., 1996, "Shape difficulty criterion for forgings", Kuznechno - Stampovochnoe Proizvodstvo, pp. 6 ~ 13.
- (3) J. J. Park, N. Rebelo and S. Kobayashi, 1983, "A new approach to preform design in metal forming with the finite element method", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.23, pp. 71 ~ 79.
- (4) G. B. Yu and T. A. Dean, 1985, "A practical computer-aided approach to mould design for axisymmetric forging die cavities", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.25, No.1, pp. 1 ~ 13.
- (5) S. Badrinarayanan and N. Zabaras, 1994, "A sensitivity analysis for the optimal design of metal forming process", J. Mater. Proc. Tech., Vol.129, pp. 83 ~ 104.
- (6) H. Shim, 2003, "Optimal perform design for the free forging of 3D shapes by the sensitivity method", J. Mater. Proc. Tech., Vol.134, pp.99 ~ 107
- (7) J. H. Yoon and D. Y. Yang, 1988, "Rigid-plastic finite element analysis of three-dimensional forging by considering friction on continuous curved dies with initial guess generation", Int. J. Mech. Sci., Vol.30, pp. 887 ~ 898.
- (8) Y. Tronel and J. L. Chenot, 1992, "Prediction of tool wear using finite-element software for the three-dimensional simulation of the hot-forging process" J. Mater. Proc. Tech., Vol.31, pp.255-263