

재료의 변형거동 추적을 통한 예비형상 설계

홍진태* · 박철현* · 이석렬* · 양동열*
(2004년 5월 13일 접수)

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 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. 서 론

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 축적된 노하우를 바탕으로 설계규칙을 제안하였다. 그 후, 다이마모 감소, 충전율 향상, 변형률 분포 균일화, 결합제거 등을 목적함수로 하고, 형상변수를 설계변수로 하는 최적화방법들이 제안되었다.⁽³⁻⁶⁾ 그러나, 이러한 방법들은 설계자의 경험이나 감각이 중요한 요소로 작용하므로 일반적인 예제에 적용하기가 어려우며, 최적의 예비형상을 구하기 위하여 목적함수를 최소화시키는 데 많은 반복계산이 필요하므로 과도한 시간이 소요되는 단점이 있다.

* 한국과학기술원 기계공학과

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 같으며, 다음과 같은 단계로 이루어진다.

- Step 1. 초기 소재로 단조공정 해석 수행
- Step 2. 과도한 플래시가 발생하면, 플래시 출구부에 추적 기준면 설정
- Step 3. 재료거동을 따라 최종 단조형상에서 초기형상까지 추적 기준면 추적
- Step 4. 추적 기준면 바깥쪽 영역을 제거하여 초기형상 변경
- Step 5. 변경된 초기형상으로 단조공정 해석 수행 후, Step 2 로 이동

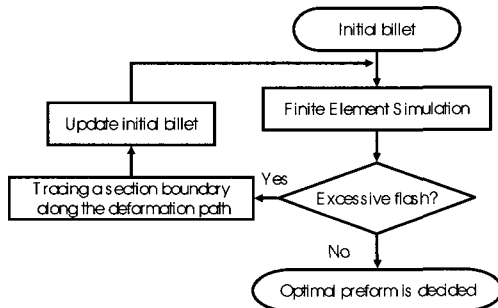


Fig. 1 Flow chart for the optimization of preform design

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

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

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

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

여기서, \bar{n} 은 형상의 바깥쪽 법선벡터이고, α 는 오프셋 거리이다. 오프셋 거리는 해석오차 및 소재의 금형에 대한 충진율을 고려하여 결정된다.

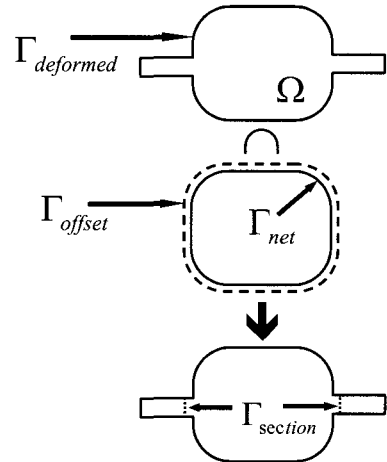


Fig. 2 Definition of shape boundary

식(1)과 (3)으로부터 추적기준면은 식(4)와 같이 정의된다.

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

식(4)에서 정의된 추적 기준면을 재료거동을 따라 추적 하기 위하여 기준면에 균일한 간격으로 추적 기준점들을 Fig. 3 과 같이 설정하게 되며, 추적 기준점이 많을수록 정밀한 추적이 가능하지만, 계산 시간이 많이 걸리므로 적절한 조정이 필요하다.

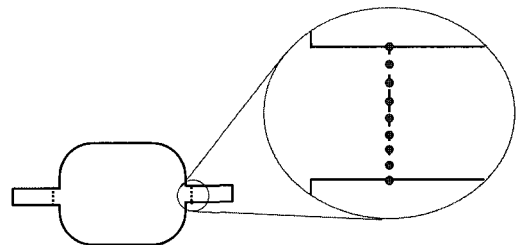


Fig. 3 Assignment of particles on the section boundary

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.

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

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.

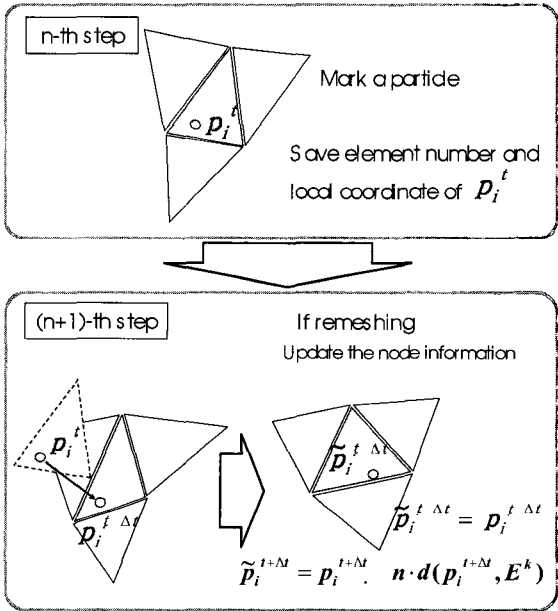


Fig. 4 Schematics of material tracing

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 효율성을 검증하기 위하여, 자동차 에어컨 압축기에 이용되는 피스톤(Fig. 5)의 3 차원 단조공정 해석에 적용하였다.

피스톤의 제작공정은 2 단계로 이루어져 있으며, 단조공정 시, Fig. 6 과 같이 과도한 플래시가 발생하는 것으로 보아 금형 마모와 성형하중이 크고, 소재 손실이 심함을 알 수 있다. 따라서, 적절한 예비형상을 통한 성형공정의 개선을 통해 단조 최종형상에서의 플래시를 감소시킬 필요가 있으며, 이를 통해 금형의 수명을 향상시키는 효과도 얻을 수 있으며, 소재 손실도 감소시킬 수 있다.

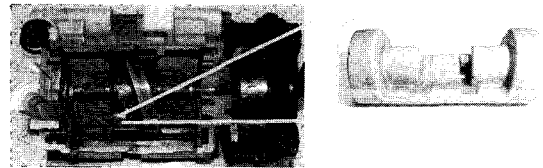


Fig. 5 A piston used in the air-conditioner of an automobile

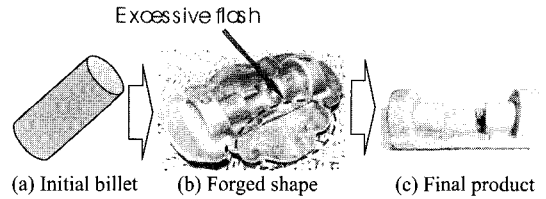
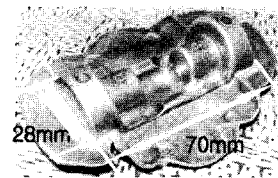
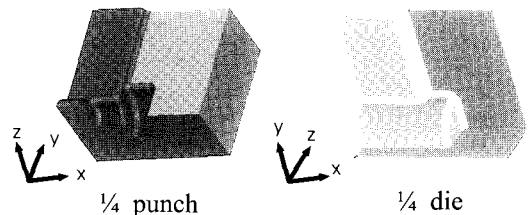


Fig. 6 Forging process of a piston



(a) Dimension of the final product



(b) Modeling of punch and die

Fig. 7 Dimension of the product and modeling of die

제품의 크기 및 금형의 형상은 Fig. 7 과 같으며, 단조공정의 해석은 10 절점 사면체요소를 이용하여 강소성 유한요소방법⁽⁷⁾으로 진행하였으며, 변분 방정식은 다음과 같다.

$$\sum_{m=1}^M \left[\int_{V^{(m)}} \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K^* \int_{V^{(m)}} \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S^{(m)}} f_i \delta v_i dS \right] = 0 \quad (6)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2 \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$, $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$, K^* 는 벌칙상수, f_i 는 견인력(traction force), v_i 는 한 절점에서의 속도이다.

마찰력은 식(7)과 같이 계산되며, 금형의 마모는 식(8)과 같다.⁽⁸⁾

$$f = mk \approx -(2/\pi)mk \tan^{-1}(\|V_s\|/u_n)t \quad (7)$$

여기서, m 은 마찰계수, k 는 전단유동응력이다.

$$\delta d = \alpha \int \sigma_n |\Delta v_i| dt \quad (8)$$

여기서, δd 는 마모깊이, α 는 실험과의 조정 상수, σ_n 은 수직응력, Δv_i 는 소재와 금형 사이의 접선방향 상대속도이다.

소재는 열간단조용 Al6061 을 사용하였고, 소재가 1/4 대칭형상이므로, 전체의 1/4 만 해석하였으며, 해석 결과, 펀치의 압하에 따른 소재의 변형거동은 Fig. 8 과 같다.

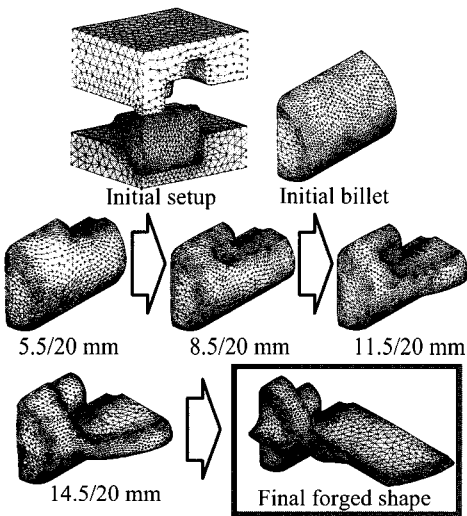


Fig. 8 Deformation behavior of the piston with initial billet

Fig. 8 의 최종단조제품에 과도한 플래시가 생성 되었으므로, 전절에서 제안된 반복적 예비형상 설계방법을 이용하여 예비형상을 설계하도록 한다. 먼저, Fig. 9 와 같이 플래시의 출구부에 추적 기준면을 설정하여 사각형 요소망으로 추적 기준점을

지정한 후, 초기 형상까지 소재의 변형거동을 따라 추적하면 Fig. 10 과 같다.

Fig. 10 에서 초기 형상까지 추적된 기준면의 외부 영역을 제거한 후, 변경된 형상을 초기형상으로 하여 해석을 다시 수행하는 과정을 반복한다. Fig. 11 은 매 반복계산시 초기 형상의 변화를 나타낸다. 초기 빌렛과 5 번째 예비형상을 이용하여 단조공정을 해석한 결과의 유효변형률 분포는 Fig. 12 에 비교하였다.

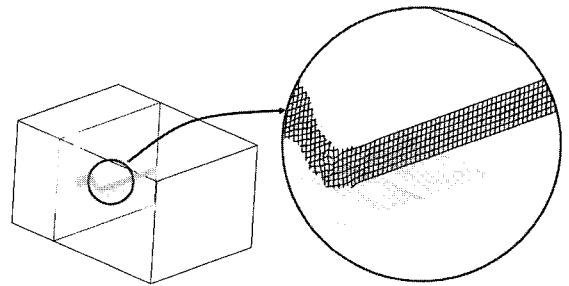


Fig. 9 Selecting a section boundary

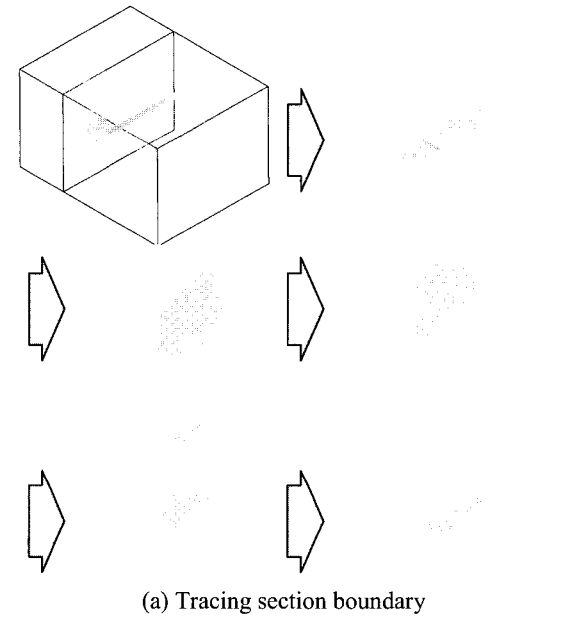


Fig. 10 Tracing a section boundary along the deformation path and update the initial shape

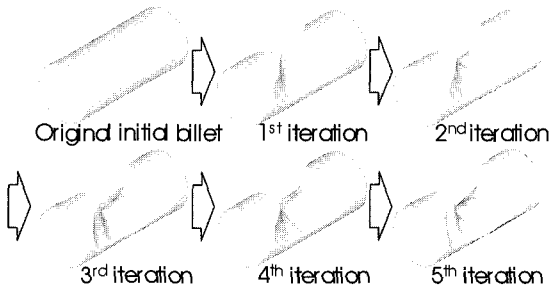


Fig. 11 The change of preform design in each iteration

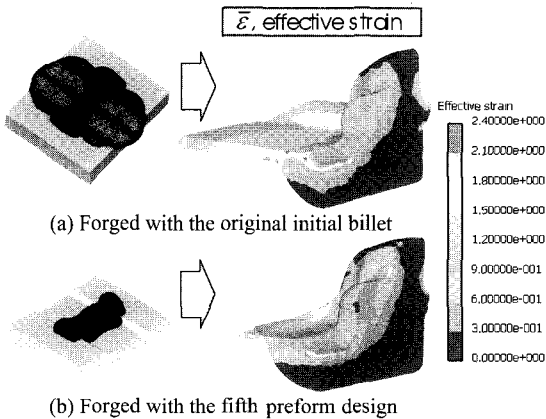


Fig. 12 The Comparison of the distribution of effective strain

Fig. 12 에서 보듯이, 두 해석 결과가 유사한 유효변형률분포를 나타내므로, 본 연구에서 제안된 방법으로 제작된 예비형상은 소재의 단조성에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

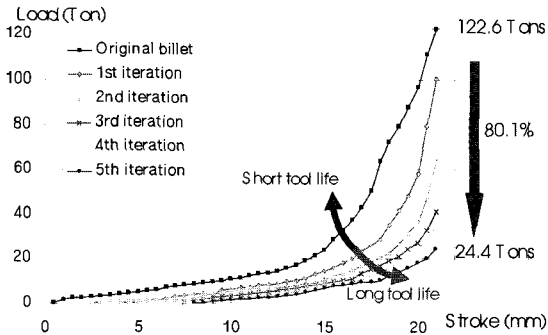


Fig. 13 The Comparison of the stroke-load graph

다음으로, 각 초기형상별 압하량에 따른 성형하중의 변화를 Fig. 13 에 나타내었다. 반복계산 횟수가 증가할수록 성형하중은 점차 감소하여, 5 번째

예비형상에서는 초기 빌렛으로 성형한 경우에 비해 80.1%의 성형하중이 감소하였다. 이로부터 금형의 피로수명이 향상되어 금형 수명이 좋아질 것임을 예측할 수 있다.

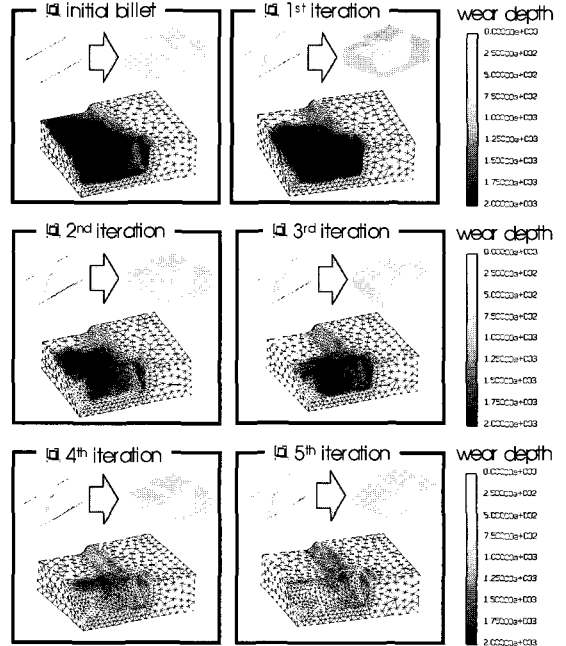


Fig. 14 The Comparison of the die wear

마지막으로, 식(8)의 금형 마모식을 이용하여 금형의 마모를 계산한 결과를 Fig. 14 에 나타내었다. 그림의 수치는 실제 실험을 통해 측정된 마모량과 α 값이 조정이 되지 않아 각각의 정량적인 의미는 없으나, 반복계산이 증가할수록 상대적으로 마모량 및 마모 영역이 감소함을 알 수 있다. 이로부터, 본 연구에서 제안한 방법은 금형의 마모를 감소시켜 금형 수명을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 열간단조공정에서 발생하는 과도한 플래시를 줄이기 위하여 반복적 예비형상 설계방법을 제안하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 피스톤 단조공정의 예비형상 설계에 적용하여보았으며, 반복적 예비형상 설계방법이 소재의 단조성에는 큰 영향을 주지 않으면서, 금형의 수명을 향상시킬 수 있음을 예측할 수 있었다. 앞으로 실제적인 검증을 위하여 실험을 통한 정량적인 비교가 있어야 할 것이다.

이 방법은 성형해석 결과로부터 예비형상을 설계하는 오프라인 방법이므로 어떠한 해석 프로그램에서도 쉽게 적용이 가능하며, 과도한 플래시를 유발하는 일반적인 열간단조공정의 예비형상 설계에 활용이 가능하다.

참 고 문 헌

- (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 - Stampochnoe Proizvodst vo, 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. Zabarar, 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.