

3 차원 압출 공정에서 다목적 최적화 기법을 이용한 금형 마모율의 최소화

이석렬¹, 양동열^{1#}

Minimization of Die Wear Rate by Using Multi-Objective Optimization in Three-Dimensional Extrusion Processes

S. R. Lee, D. Y. Yang

Abstract

A shape optimization of flow guide is accomplished to minimize the wear rate of die in three-dimensional flat-die extrusion processes. In order to achieve the balanced flow and the uniformed distribution of the effective strain during the extrusion, a multi-objective optimization is implemented. During the process of optimization formulation, the flow balance and the deviation of strain is considered as constrained conditions. The proposed approach is applied to an extrusion of H section. Through the optimization, it has been confirmed that the wear rate of die can be minimized satisfying the constraint.

Key Words : Shape Optimization, Flat-die Extrusion, Wear Rate, Flow Guide

1. 서 론

최근 장비 및 해석 프로그램의 발달로 최적화 방법론이 여러 분야에 광범위하게 적용되고 있다. 압출이나 단조공정과 같이 대형의 비선형 문제에도 최적화 기법이 적용되고 있으며, 주로 금형 형상의 설계나 예비형상의 설계에 이용되고 있다. 유한요소해석 등의 수치계산으로 최적화에 필요한 여러 함수값들을 구하고, 이를 이용해 설계최적화의 목적함수를 계산한다. 설계 목적함수는 소재의 정형형상, 소재의 물성(온도 분포, 유효변형률 분포), 금형의 마모정도, 성형 하중들을 개선하기 위해 설정되고, 이를 수합함수로 표현함으로써 최적화문제로 정식화한다[1-4].

지금까지의 단조나 압출공정에서의 최적화는 주로 2 차원 축대칭 문제를 다루었는데, 이는 단순히 3 차원 자체에서 오는 계산 시간과 계산의

복잡성의 증가 때문만 아니라, 설계변수의 수의 증가에 따른 최적화의 축차 횟수의 비약적인 증가의 원인도 큰 역할을 한다. 따라서 해석비용이 큰 단조나 압출공정에서 해석 횟수를 최소화할 수 있는 효율적인 최적화 방법이 절실히 필요하다.

본 연구에서는 3 차원 압출 공정에서 랜드부 주위의 금형 마모를 최소화 하기 위해 플로우 가이드의 형상을 최적화하였다. 또한 압출품의 휨과 뒤틀림, 치수정밀도 향상을 위해 압출 출구부 단면에서의 속도분포를 균일하게 유지하도록 하였으며, 압출품의 내부의 유효변형율의 분포도 균일하게 하도록 하였다. 이와 같은 여러 설계 목적을 부합하기 위해 다목적 최적화 방법을 이용하였고, 이를 통하여 최적의 플로우 가이드 형상을 얻을 수 있었다.

1. 한국과학기술원, 기계공학과

한국과학기술원, 기계공학과, dynag@kaist.ac.kr

2. H 형상의 압출 공정

최적화에 적용한 H 형상 압출공정은 Fig. 1 과 같다. 대칭성을 가지고 있기 때문에 실제 수치해석에는 1/4 형상만을 사용하였다. 플로우 가이드의 초기 형상은 H 형 압출제품형상에서 4 mm 의 윗셋을 준 형상으로 모두 10 개의 조정점을 갖는 베지어 곡선으로 표현하였다.

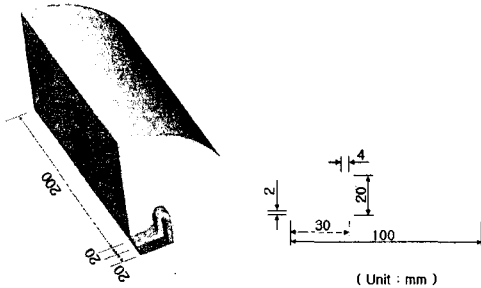


Fig. 1 Dimension of an extrusion part for the FEM

압출공정의 유한요소해석은 공정중의 소재의 상태를 등온의 정상상태로 가정하여 적용하였다. 소재의 재료는 AL6061 을 사용하였으며, 유동응력식은 식 1 과 같다. 마찰계수(m)는 0.3, 펀치 속도는 1.0 mm/sec 이다.

$$\bar{\sigma} = 10.367 \bar{\epsilon}^{0.084} \text{ (MPa)}, T = 300^\circ\text{C} \quad (1)$$

금형 마모율은 Chenot[5]등이 제안한 마모모델을 이용하였는데, 이때의 마모율(\dot{d})는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{d} = k\sigma_n |v_x| \quad (2)$$

초기 가정된 플로우 가이드를 이용하여 마모율을 구한 결과가 Fig. 2 이다. 금형 마모율은 재료가 빌렛에서 플로우 가이드로 흘러가기 위해 심하게 변형되는 부분(A 영역)과 플로우 가이드에서 랜드부를 통해 최종 압출단면으로 빠져나가기 위해 심하게 변형되는 부분(B 영역)에서 가장 높게 나타난다.

금형 랜드부의 마모는 압출품의 표면 결함, 기계적 성질 저하, 치수 정밀도를 떨어뜨리는 요인이 되므로, 본 연구에서는 금형 랜드부(B 영역)에서의 마모만을 고려하여 최적화를 수행하였다

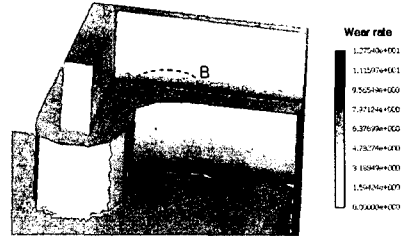


Fig. 2 Distribution of wear rate before optimization

3. 최적화 방법

3.1 목적함수

최적화 목적은 Fig. 3 에서의 선택된 선을 따라 각 절점에서 마모율을 구한 후, 이 값들 중 최대 마모율이 최소화되도록 하는 것이다. 이를 수식화하면 식 3 과 같다.

$$\min \varphi = \min \max \{ (\dot{\delta}_w)_1, (\dot{\delta}_w)_2, \dots, (\dot{\delta}_w)_n \} \quad (3)$$

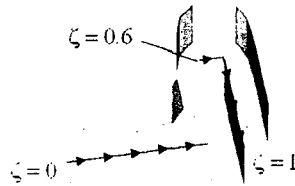


Fig. 3 Characteristic line defined along the die land

식 2 를 최적화 문제로 정식화하기 위해 형태를 바꾸면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min \varphi &= \min \eta_{n+1} \\ \text{s.t. } &(\dot{\delta}_w)_1 - \eta_{n+1} \leq 0 \\ &(\dot{\delta}_w)_2 - \eta_{n+1} \leq 0 \\ &\dots \\ &(\dot{\delta}_w)_n - \eta_{n+1} \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 설계변수

평금형 압출에서 플로우 가이드는 재료의 유동을 결정하는 매우 중요한 설계인자이므로, 이 플

로우 가이드의 형상을 표현하는 변수를 설계변수로 정의하였다. Fig.4 와 같이 10 개의 조정점을 갖는 베지어 곡선으로 플로우 가이드의 형상을 표현하였고, 이 조정점을 설계변수로 정하였다. 설계변수의 수는 모두 20 개가 되지만 형상의 대칭성 때문에 16 개로 감소한다. 이때 주어지는 구속조건은 다음과 같다.

- (1) $x_0 = 0, y_0 = 0$; 대칭면상
- (2) $x_8 = x_0, y_8 = y_0$; 대칭면에서 형상의 기울기가 대칭면과 수직

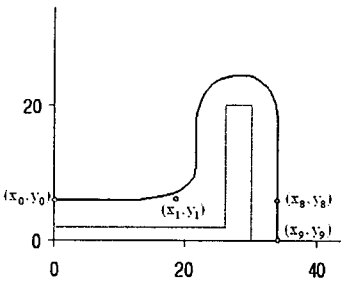


Fig. 4 Design constraints of the flow guide

3.3 제한조건

3.1 절에서 정의한 최적화 목적함수만을 이용하여 최적화를 수행하면 축차가 진행할수록 플로우 가이드 형상은 최종 압출재의 형상에 수렴한다. 또한 압출재의 뒤틀림, 휨, 치수정밀도에 큰 영향을 미치는 출구부 속도 분포나 재료 품질에 영향을 미치는 변형율의 분포가 편차값에서 크게 증가한다. 이와 같은 문제로 또 다른 목적함수들을 정의해야 한다. 본 연구에서는 여러 설계 목적을 다루는 방법 중에, 출구부의 속도분포와 변형율의 분포를 구속조건으로 고려하는 방법을 이용하였다. 구속조건은 식 5 와 같다.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{V_i - V_{avg}}{V_{avg}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n w_i}} \leq 0.1 \quad (5.1)$$

$$\sigma_{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{\bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}_{avg}}{\bar{\epsilon}_{avg}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n w_i}} \leq 0.1 \quad (5.2)$$

식 5.2 에서의 유효변형율은 유효변형율 속도를 재료의 유동선을 따라 적분하여 구하였다.

3.4 최적화 방법

초기 가정한 설계변수는 식 5 의 구속조건에 위배된다. 따라서 먼저 식 6 에서 정의된 목적함수를 이용하여 부 최적화(sub-optimization) 문제를 정의하였고 최적화를 수행하였다.

$$\min \phi = \min (\sigma_v + \sigma_{\bar{\epsilon}}) \quad (6)$$

위의 부 최적화를 통하여 설계변수를 가용영역(feasible region)으로 이동시킨 후, 식 3 의 마모율을 최적화하였다. 최적화 방법은 먼저 근사화[6]를 통해 목적함수와 제한조건을 설계변수에 대한 명시함수(explicit function)으로 만든 후, SQP 방법을 이용하여 최적값을 구하였다. 이렇게 구한 최적값을 현재 설계점으로 바꾸고 위의 과정을 반복하여 수렴된 값을 얻었다.

4. 최적화 결과

먼저 설계변수값이 최적값의 제한조건을 만족하도록 식 6 의 목적함수를 최적화하였다. 최적화 결과 압출 출구부에서 속도분포와 유효변형율의 분포는 Fig. 5 와 같다. 또한 부 최적화 후 얻은 설계변수값은 식 5 의 제한조건을 만족하였다.

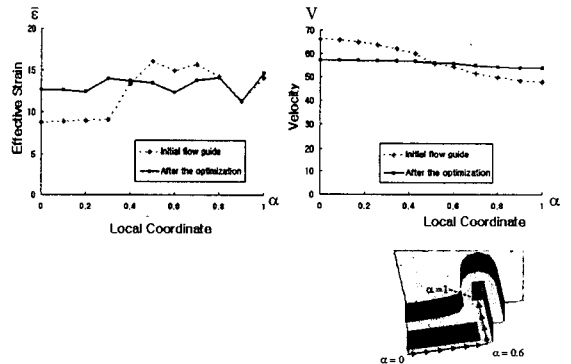


Fig. 5 Distributions of the outlet velocity and the effective strain before and after sub-optimization

설계변수를 가용영역 내로 이동한 후, 금형 마모율의 최적화를 수행한 결과 Fig 6 과 같이 5 회

축차 후에 수렴하였다. 초기에 마모율의 H 형상의 중심부 근처에서 최대값을 가지지만 최적화가 진행될수록 바깥쪽으로 이동하였다. Fig 7 은 지정된 선을 따라 마모율 값을 나타낸 그래프이다. 축차가 진행될수록 마모율의 최대치가 감소할 뿐 아니라 최대 마모율이 나타나는 위치도 이동됨을 알 수 있다. 최대 마모율 값은 초기에 11.5 에서 최적화 후 9.65 로 약 16% 감소하였다. Fig. 8 에는 최적화 전, 후의 플로우 가이드의 형상을 비교하였다.

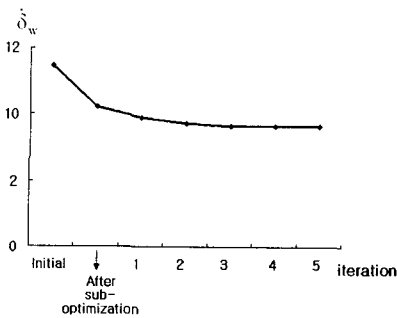


Fig. 6 Distribution of wear rate after the optimization

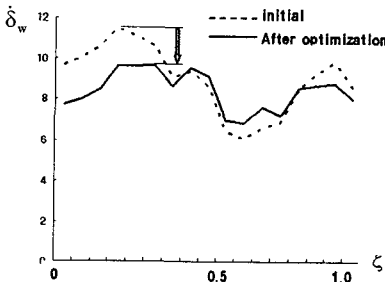


Fig. 7 Wear rate along the characteristic line

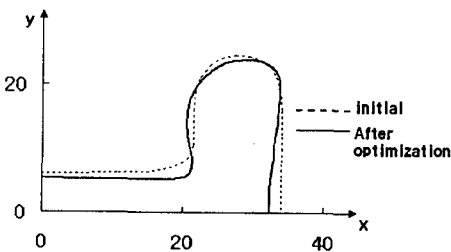


Fig. 8 Comparison of initial and optimized shape of flow guide

5. 결론

3 차원 평균형 압출 공정에서 금형의 마모를 최소화하기 위해 최적화를 수행하였다. 또한 제품의 뒤틀림, 휨, 재료물성을 고려하여 압출 출구부 단면에서의 속도 분포와 유효변형율의 편차를 일정한 값 이내로 유지하도록 제한조건을 설정하였다. H 형상의 압출에서 플로우 가이드의 형상을 설계 변수로 하여 최적 플로우 가이드 형상을 얻었다. 부 최적화 문제에서 초기해석을 포함하여 총 4 회의 유한요소해석이 필요하였고, 따라서 모두 9 회의 유한요소해석이 필요하였다.

참고 문헌

- [1] S. M. Byon, S. M. Hwang, 1997, Die shape optimal design in cold and hot extrusion, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 6647, pp. 1~9.
- [2] M. S. Joun, S. M. Hwang, 1998, Die shape optimal design in three-dimensional shape metal extrusion by the finite element method, Int. J. Numer. Meth. Engng., Vol. 41, pp. 311-335.
- [3] P. Ulysse, 2002, Extrusion die design for flow balance using FE and optimization methods, Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, pp. 319-341.
- [4] L. Zou, J. Xia, X. Wang, and G. Hu, 2003, Optimization of die profile for improving die life in the hot extrusion processes, J. Mater. Proc. Technol., Vol. 142, pp. 659-664.
- [5] S. R. Lee, D. Y. Yang, 2004, Shape optimization of flow guide in three-dimensional profile of H section extrusion, Proceedings of 8th international Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, pp. 2085-2090, Springer, NJ.
- [6] Y. Tronel, 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. Technol., Vol. 31, pp. 255-263.