

설계민감도를 이용한 비정상상태 소성가공공정 최적 설계

*정 석환, 황 상무
포항공과대학교 기계공학과

Optimal Process Design in Non-Steady Metal Forming by the Design Sensitivity

Suk-Hwan Chung and Sang-Moo Hwang
Department of Mechanical Engineering
Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

ABSTRACT

A new approach to process optimal design in non-isothermal, non-steady state metal forming is presented. In this approach, the optimal design problem is formulated on the basis of the integrated thermo-mechanical finite element process model so as to cover a wide range of the objective functions and design variables, and the derivative based approach is adopted for conducting optimization by design iteration. The process model, the formulation for process optimal design, and the procedures for the evaluation of the design sensitivity and for design iteration for optimization are described.

1. 서론

소성가공 공정은 재료의 형상, 금형의 형상, 마찰, 온도, 가공 속도, 재료의 성질 등의 다양한 공정변수에 의해서 결정된다. 따라서, 조절가능한 공정변수들을 적절하게 결정하는 것이 공정 설계자가 직면하고 있는 가장 중요한 문제이다. 공정설계자는 이러한 공정을 설계함에 있어서 제품에서의 결함을 줄이고, 기계적 성질을 향상시키고, 제품을 생산하는데 비용을 줄이는 방향으로 공정 변수를 결정하게 된다.

소성가공 공정을 설계함에 있어서 대부분의 경우 유한요소법을 이용한 computation을 포함하여 시행오차적인 방법이 많이 사용되어 왔다. 그러나, 이러한 방

법은 공정을 설계하는데 필요한 시간과 금전적인 비용이 많이 필요로하고 그 결과에 있어서도 최적의 결과를 얻기 어렵다. 따라서, 보다 과학적인 방법을 필요로 하게 되었으며, 최근에 들어서 backward tracing method, forward tracing method, direct differentiation method, genetic algorithm 등의 기법들에 대한 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 direct differentiation method를 이용한 공정 최적화 기법에 대해서 연구하였다. 설계민감도를 이용한 최적화 기법에서 설계민감도를 어떻게 효율적이고 정확하게 구하느냐가 중요한 문제이며 본 논문에서는 direct differentiation method와 direct approach method를 함께 사용하여 설계민감도를 구하는 방법을 연구하였다.

2. 본론

2.1. 설계민감도

목적함수가 설계변수 및 상태 변수의 함수이고 상태변수와 설계변수가 implicit 함수로 주어지는 경우 해석적인 방법으로 설계민감도를 구하는 방법으로 수반변수법(adjoint variable method)과 직접 미분법(direct differentiation method)가 있다. 또한 설계민감도를 구하는 수치적 방법으로 직접접근법(direct approach method)가 있다. 전만수[3]등이 정상상태 압출 문제에서 최적 금형 형상을 설계하기 위해 처음으로 설계민감도를 사용하였으며, 세노[4]등에 의해서 비정상상태 단조 공정에서 중간 금형 형상을 설계하는데 설계민감도가 사용되었다. 본 연구에서는 비정상상태 non-isothermal 문제에 설계민감도를 사용하는 방법을 확장하였으며, 비정상상태 문제에서 세노 등이 고려하지 못한 문제를 해결하였다.

설계민감도를 구하는 데 있어서 비정상상태 문제에서의 정상상태 문제에서의 차이점은 크게 두가지로 나타난다. 먼저 설계변수의 변위에 의한 영향이 정상상태에서는 초기에 주어진 양으로 변하지 않는 반면 비정상상태 문제에서는 설계변수의 변위에 따른 영향이 매 스텝에서 변하게 된다. 그런데, 설계민감도를 구하기 위해서는 이러한 영향을 매 스텝에서 계산해야 하므로 계산시간에 있어서 장점을 가지는 수반변수법을 사용하지 못하고 직접미분법을 사용하게 된다. 둘째로 재료의 형상이나, 금형의 형상 등과 같은 설계변수의 변위에 따라 금형과 접하지 않던 절점이 금형과 접하게 되는 시점이 달라지게 되는데 이로 인해 해석적인 방법을 사용할 수 없는 영역이 발생하게 되는데 본 연구에서는 이 영역에서 수치적인 방법인 직접접근법을 사용하였다. 그림 2는 그림 1에서와 같은 공정에서 각 절점의 y 축 좌표값을 설계변수로 하고 목적함수가 아래와 같을 때의 설계민감도를 직접접근법으로 구한 값과 본 연구에서 사용한 방법으로 구한 값을 비교한 그림이다.

$$\psi_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^{numel} (\bar{\epsilon}_i - \bar{\epsilon}_{avg})^2 / numel} \quad (1)$$

$$\psi_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{numnp} (T_i - T_{avg})^2 / numnp} \quad (2)$$

$$\psi_3 = \sum_{i=1}^4 (r_i - \bar{r})^2 \quad (3)$$

$$\psi = \psi_1 * \psi_2 * \psi_3 \quad (4)$$

2.2. 2 stage upsetting공정에서의 응용

열간 upsetting 공정에서 가공 후 재료에서의 온도 분포를 균일화 시키기 위한 금형형상을 설계하였다. 본 연구에서 사용한 설계 변수는 금형의 형상을 결정하는 6개 점의 위치, stroke, 그리고 금형과 재료의 초기 온도이다. 본 공정에서 사용한 재료는 S45C로 아래와 같은 성질을 가지고 있으며, 최적화를 위해 사용한 목적함수는 ψ_2 를 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = 35.8 \epsilon^{-0.2581} \epsilon^{-0.0617} \exp\left(\frac{1893}{T}\right) \quad (MPa) \quad (5)$$

그림 3은 최적 금형형상을 나타내는 그림이고, 그림 4는 이러한 금형을 사용하여 upsetting한 후의 온도 분포이다. 1 stage 금형 형상을 flat한 형상으로 하였을 때의 온도의 편차값은 9.745이었고, 최적 금형을 사용하는 경우의 온도의 편차값은 3.352로 떨어졌다.

3. 결론

설계민감도를 이용한 최적화 기법에서 가장 중요한 것은 정확하고 빠르게 설계민감도를 구할 수 있느냐 하는 점이다. 본 연구에서 설계민감도를 구하기 위해 해석적인 방법과 수치적인 방법을 혼용함으로써 비교적 정확한 설계민감도를 구할 수 있었다. 이러한 설계민감도를 바탕으로 2 stage upsetting 공정에서 온도 분포를 균일화하는 처음 stage의 금형 형상을 설계하였는데, 최종 가공 후 제품의 표면이 flat하도록 하는 제한 조건을 사용하지 않은 관계로 가공 후의 제품 형상에 문제가 발생하였지만 온도 분포는 상당히 균일화 되었다. 현재 설계민감도를 구하는 방법에 대한 연구가 어느 정도 이루어졌기 때문에 앞으로 많은 문제에 적용이 가능할 것으로 보며 설계민감도를 계산하는데 필요한 시간을 줄이기 위한 노력도 이루어 질 것이다.

4. 참고 문헌

1. J. J. Park, N. Rebelo, and S. Kobayashi, "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 (1983).
2. R. V. Grandhi, A. Kumar, A. Chaudhary, and J. Malas, "State-Space Representation of Optimal Control of Non-Linear Material Deformation Using the Finite Element Method," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 36, pp. 1967-1986 (1993).
3. M. S. Joun and S. M. Hwang, "Optimal Process Design in Steady-State Metal Forming by Finite Element Method-I. Theoretical Considerations," *Int. J. Mach Tools Manufact.*, Vol. 33, pp. 51-61 (1993).
4. L. Forment and J. L. Chenot, "Optimal Design for Non-Steady State Metal Forming Processes - I. Shape Optimization Method," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 39, pp. 33-50 (1996).
5. S. Roy, S. Ghoshi, and R. Shivpuri, "A New Approach to Optimal Design of Multi-Stage Metal Forming Processes with Micro Genetic Algorithms," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 37, pp. 29-44 (1997).

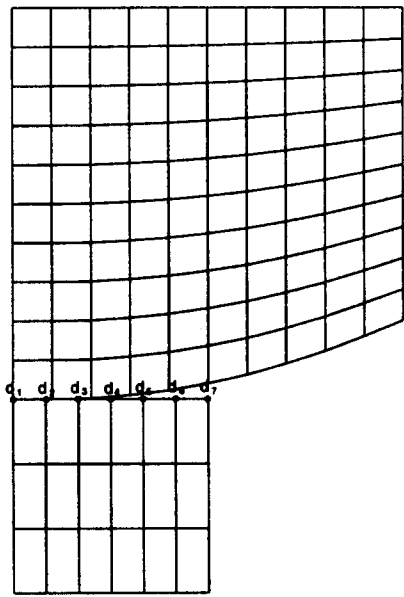


그림 1: 설계민감도 검증을 위한 공정

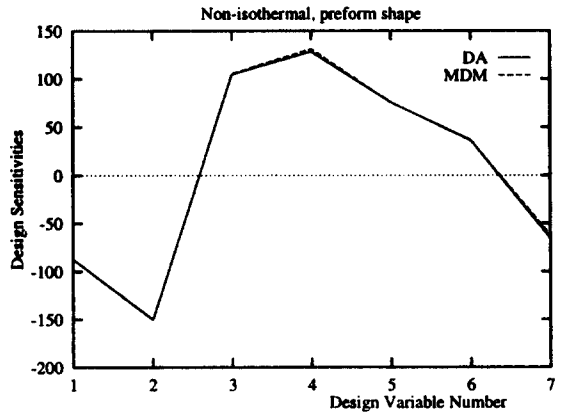


그림 2: 설계민감도

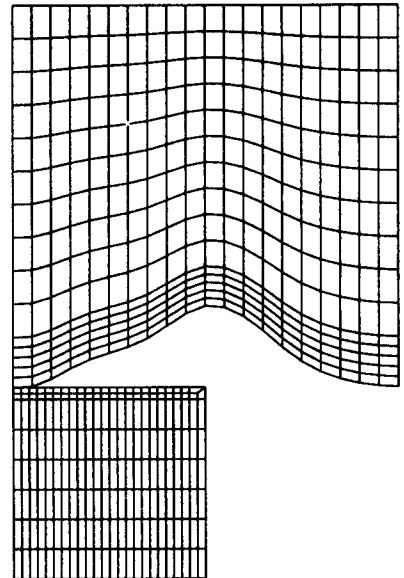


그림 3: 최적 금형 형상

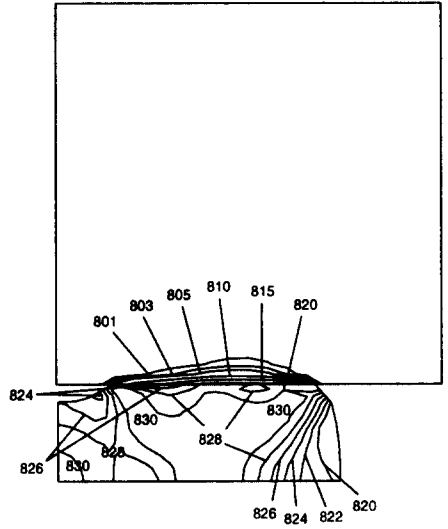


그림 4: 온도 분포