

설계민감도를 이용한 분말단조 공정에서의 최적 예비성형체 설계

정 석환, 황 상무
포항공과대학교 기계공학과

Optimal Preform Design in Powder Forging by the Design Sensitivity

S. H. Chung, S. M. Hwang
Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH

ABSTRACT

A derivative based approach to process optimal design in powder forging is presented. The process model, the formulation for process optimal design, and the schemes for the evaluation of the design sensitivity, and an iterative procedure for the optimization are described in detail. The validity of the schemes for the evaluation of the design sensitivity is examined by performing numerical tests. The capability of the proposed approach to deal with diverse process parameters and objective functions is demonstrated through applications to some selected process design problems.

keyword : powder forging, finite element method, design sensitivity

1 서론

전형적인 분말야금법은 powder blending, cold compaction, sintering, finishing 작업들을 포함한다. 분말단조는 분말야금법과 단조공정을 접목한 작업인데, 분말야금법으로 얻어진 예비성형체를 이용하여 단조공정으로 제품을 생산하는 방법으로 대개 powder blending, compaction, sintering, forging, finishing의 순으로 작업이 이루어진다.

일반적인 단조 공정에서 보다 분말 단조에 있어서 여러가지 장점들이 있다. 먼저, 분말 단조를 통해서 제품을 생산할 때, 대부분의 경우 밀폐 금형을 이용하기 때문에 복잡한 형상의 net shape을 얻음으로서 가공후 절삭 가공등의 후처리 과정을 줄일 수 있어서 생산성에 있어서 큰 장점을 가지고 있다. 또한, 분말 단조를 통해서 가공된 제품에서는 기공이 존재하기 때문에 전형적인 casting과 forging

으로 생산된 제품에 비해서 무게를 줄일 수 있을 뿐 아니라 무게를 조절할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 분말 재료에서는 내부에 void가 이미 존재하고 있기 때문에 소성변형 중에 fracture가 발생하게 될 가능성이 일반적인 재료보다 크기 때문에, fracture를 방지하기 위한 고려가 필수적이다.

2 다공질재료에서의 유한 요소 수식화

Shima와 Oyane등이 제시한 소결 다공질 재료의 항복거동은 다음과 같다.

$$AJ_2' + BJ_1^2 = \bar{\sigma}^2 = \delta \bar{\sigma}_m^2 \quad (1)$$

여기서, $A = 3/(1 + 1/(3f)^2)$, $B = 1 - A/3$, $\delta = \rho^5/(1 + 1/(3f)^2)$, $f = 0.4/(1 - \rho)^{0.5}$ 이다.

해석영역 Ω 의 경계 Γ 에서 경계 Γ_h 에서는 traction이 주어져 있고 경계 Γ_{u_i} 에서는 속도가 $u_i = \bar{u}_i$ 로 주어져 있다고 하자. 그리고, 나머지 경계를 Γ_c 라고 하고 Γ_c 는 금형과 workpiece가 접하고 있는 경계라고 가정하자. 다공질 재료에 대한 경계값 문제에 벌칙 강소성 유한 요소 수식을 사용하면 아래와 같은 변분식이 된다.

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \sigma'_{ij} \omega'_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} P \omega_{ii} d\Omega \\
 & - \int_{\Omega} f_i \omega_i d\Omega - \sum_{\alpha} \int_{\Gamma_{h\alpha}} h_{\alpha} \omega_{\alpha} d\Gamma \\
 & - \int_{\Gamma_c} -\xi (u_n - u_n^D) \omega_n d\Gamma \\
 & - \int_{\Gamma_c} \mu \xi (u_n - u_n^D) g(\Delta \mathbf{u}) \omega_i d\Gamma \\
 & = 0 \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서, $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(\omega_{i,j} + \omega_{j,i})$ 이고 $\omega'_{ij} = \omega_{ij} - \frac{\omega_{kk}}{3} \delta_{ij}$ 이다.

x_i, u_i, ω_i 에 대해서 유한요소 근사화를 수행하여 유한요소 수식을 얻는다.

3 설계민감도의 계산 및 검증

설계민감도란 설계변수에 대한 목적함수의 미분을 나타내는 것으로 주로 구조해석에서 설계민감도 해석이 많이 이루어져 왔다. 설계민감도를 구하는 방법에는 크게 해석적인 방법과 수치적인 방법이 있다. 해석적인 방법에는 직접미분법이나 수반변수법이 사용되고 수치적인 방법에는 직접접근법이 사용된다. 해석적인 방법은 수치적인 방법에 비해서 계산시간이 월등히 좋은 반면 수식화에 어려움이 있다. 단조공정과 같은 비정상상태 문제는 해석적인 방법을 적용할 수 없는 경우가 발생하는 데 본 연구에서는 이러한 경우에 수치적인 방법을 함께 사용하는 방법을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 방법을 검증하기 위하여 수치적인 방법으로 구한 설계민감도와 비교하였는데 최대 상대오차가 5% 정도로 비교적 정확한 설계민감도를 구함을 알 수 있었다.

4 상대밀도의 균일화

분말 재료를 이용하여 생산한 제품은 일반적인 단조 공정으로 생산한 제품에 비해서 강도면에서 약점을 가지고 있다. 다공질재료의 강도는 상대밀도에 거의 정비례하는 것으로 조사되고 있다. 본 연구에서는 가공후 전체적으로 균일한 기공분포를 가지도록 하는 예비성형체를 구함으로써 균일한 강도를 가지는 제품을 얻도록 하였다. 또한, net shape을 이루도록 하기 위해 아래와 같은 목적함수를 사용하였다.

$$\psi_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nc} A_i (\rho_i - \rho_f)^2 V_i}{V_T}} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{cases} \text{if } \rho_i < \rho_f & A_i = 1.0 \\ \text{else} & A_i = 10.0 \end{cases} \quad (4)$$

Fig. 1과 같은 제품을 가공하기 위한 예비성형체의 형상을 표현하기 위해 9개의 control point를 가진 B-Spline 곡선을 사용하였으며, 이 control point의 좌표를 결정하기 위하여 9개의 설계변수를 사용하였다. 가공에 사용한 다공질 재료의 모재는 아래와 같은 유동응력 특성을 갖는 ASTALOY이고 초기 상대밀도는 0.83이다.

$$\sigma_m = 1633.26[1 + 0.577(1 - \exp(-\bar{\epsilon}_m / 0.026))](1 - T/1809)^{4.01} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

설계 반복계산에 따른 목적함수의 변화, 예비성형체 형상의 변화, 최적 예비성형체의 형상은 Fig. 2와 같다. 최적 예비성형체를 가공하는 경우 최종상태에서의 상대밀도 분포는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 볼 때, 최적화 과정을 통해서 구한 예비성형체를 가공하면 설계자가 원하는 값으로 상대밀도 분포를 이룰 수 있을 뿐 아니라, net shape의 구현에도 성공함을 알 수 있다.

5 재료의 fracture 최소화

본 연구에서는 fracture가 발생하지 않도록 예비성형체를 설계하였다. Fig. 4와 같은 Double hub 모양을 분말 단조하는 경우 제품의 가운데 부분과 금형의 형상이 꺾이는 모서리 부분, 상단부 가운데 부분등에서 fracture가 자주 발생한다. Fracture가 발생하지 않도록 하기 위해 사용한 목적함수는 아래와 같다.

$$\psi_0 = \sum_{i=1}^{nst} \sum_{n=1}^{ne'} \left\{ \int_0^{\epsilon_{eq,i}} \left(0.28 + \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d\epsilon_{eq} \right\}^2 \quad (6)$$

여기서 nst는 전체 incremental time step 수이고, ne'는 각각의 incremental step에서 $\int_0^{\epsilon_{eq,i}} \left(A + \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) d\epsilon_{eq}$ 가 0보다 큰 요소의 수를 나타낸다.

예비성형체의 형상을 표현하기 위해 10개의 control point를 가진 B-Spline 곡선을 사용하였는데, 이 control point들의 좌표값을 결정하기 위하여 8개의 설계변수가 사용되었다. 이 공정에서 사용한 재료는 copper로서 아래와 같은 유동응력관계가 있고 초기 상대밀도는 0.80이었다.

$$\bar{\sigma} = 212.2(1 - 6.53\bar{\epsilon})^{0.373} \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

설계 반복 계산 도중의 목적함수, 예비성형체의 형상변화, 최적 예비성형체의 형상은 Fig. 5에서 보인 바와 같다. Fig. 6은 최적 예비성형체를 사용하는 경우의 fracture potential 값이 변하는 추세를 보여주는 그림이다.

6 결론

이번 연구는 분말단조 공정 설계에 필요한 최적화 기법에 관한 것이다. 본 연구에서 사용한 최적화 방법은 설계민감도에 기초를 두는 방법으로 설계민감도를 효과적으로 구하는 방법에 중점을 두었다. 제안된 방법을 사용하여 가공후 제품에서의 상대밀도가 전 영역에서 균일하게 원하고자 하는 값이 되도록 예비

성형체의 형상을 최적화하였고, 가공 중에 발생할 수 있는 fracture의 가능성을 최소화하는 예비성형체의 형상을 설계하였다.

본 연구를 통해서 개발한 접근방법이 분말 단조공정에서 자주 마주치게 되는 몇가지 설계 상황에서의 다양한 공정 변수들의 최적치들을 구하는데 효과적임을 알 수 있었다.

REFERENCE

1. S. H. Chung and S. M. Hwang, "Optimal Process Design in Non-Isothermal, Non-Steady Metal Forming by the Finite Element Method," Int. J. Num. Meth. Eng., accepted.
2. T. Tabata and S. Masaki, "A Fracture Criterion for Porous Materials and Its Application to the Shape of Sintered Preforms in Forging," Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME, pp. 16-22 (1977).
3. Y. T. Im, "Finite Element Modelling of Plastic Deformation of Porous Materials," Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley (1985).
4. Howard A. Kuhn and B. Lynn Ferguson, "Powder Forging," Metal Powder Industries Federation, Princeton (1990).

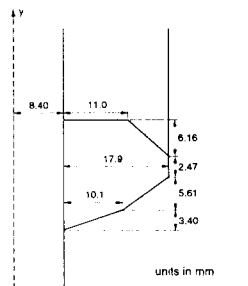
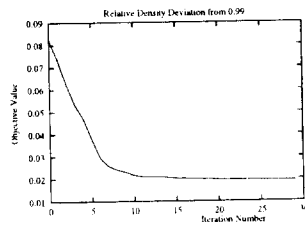
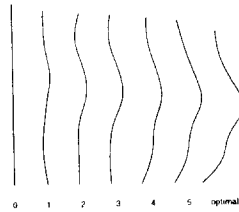


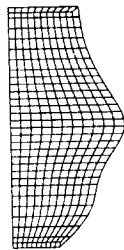
Fig. 1 Dimensions of the product and those of the forging die



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 (a) Variation of the objective function, (b) Variation of the preform shape, (c) optimal preform shape and mesh system

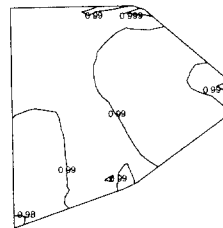


Fig. 3 Relative density distribution in the optimal case

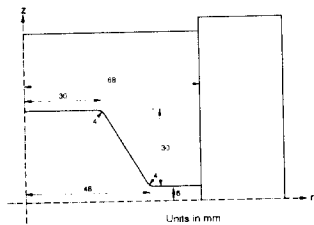
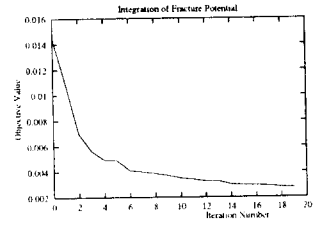
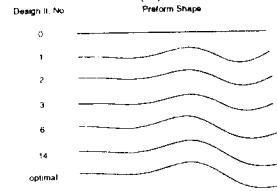


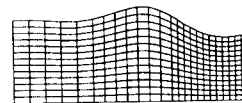
Fig. 4 Dimensions of the product and those of the forging die



(a)



(b)

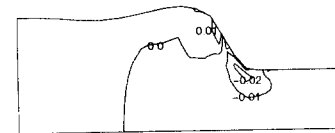


(c)

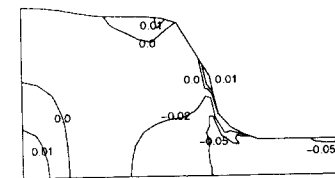
Fig. 5 (a) Variation of the objective function, (b) Variation of the shape of the preform, (c) optimal preform shape and mesh system



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Variation of fracture potential during the forming simulation with optimal preform shape