

# 유한요소법을 이용한 HIPing 공정에서의 컨테이너 형상 최적설계

정석환\*, 전경달\*\*, 황상무\*

## Optimal Shape Design of Container in HIPing Process by the Finite Element Method

S.H. Chung\*, K.D. Jeon\*\*, S.M. Hwang\*

### Abstract

It is very important to design the shape of container in HIPing process, since the final shape and relative density distribution of the product are decisively dependent on the shape of container. A derivative based approach to determine the shape of container in HIPing process is presented. In this approach, the optimal design problem is formulated on the basis of the finite element process. The process model, the formulation for process optimal design, and the schemes for the evaluation of the design sensitivity and an iterative procedure for optimization are described. In comparison with finite difference scheme, the validity of the schemes for the evaluation of the design sensitivity is examined.

**Key words:** HIPing, optimal design, design sensitivity, finite element method

### 1. 서론

열간 등가압 소결 공정(Hot Isostatic Pressing)에 의한 부품은 내식성, 내산화성, 기계적 특성, 비자기성 및 경도 등이 우수하기 때문에 그 수요가 증대되고 있다. 열간 등가압 소결을 위해서는 스테인레스 강과 같은 내열성 재료의 용기에 분말을 채운 뒤 적절한 고온에서 용기 내부의 불순가스를 모두 제거하는 탈가스 작업(degassing)을 한다. 탈가스 작업을 거친 용기는 TIG 용접으로 진공 밀봉하여 열간 등가압 소결중 외부 가스가 시편 내부에 들지 않도록 한다. 이 때, 분말을 넣는 용기 설계의 기술적인 어려움이 있으며 용기의 영향으로 실제 내부에는 균일한 압력이 가해지지 않아 이로 인해 불균일한 형상 변화를 유발한다[1,2,3]. 이러한 단점에도 불구하고 열간 등가압 소결은 단 한번의 공정으로 짧은 시간내에 고밀도 및 정형에 가깝게 만들 수 있으며 균일한 미세조직(microstructure)을 얻을 수 있는 공정이므로 높은 평가를 받고 있다.

그러나, 열간 등가압 소결 공정에 사용되는 분말 재료의 가격이 일반강에 비해서 상당히 고가이기 때문에, 추가적인 가공을 최소화 함으로써 생산성을

향상시키고 생산비를 줄이기 위한 공정 설계가 필요하다. 열간등가압 소결 공정을 거친 제품의 형상 및 밀도 분포는 일반적으로 용기의 형상에 결정적인 영향을 받는다. 현재까지 용기의 형상 설계는 거의 대부분 시행오차적인 방법에 의해서 이루어지고 있으나, 보다 효율적인 결과를 얻기 위해서는 과학적인 설계 기법을 필요로 한다. 본 연구에서는 용기의 형상을 설계하기 위해 설계민감도를 이용한 최적화 기법을 사용하였는데, 단조 공정등과 같은 비정상상태 공정에서 몇몇 연구자들에 의해 적용된 바 있다[4,5].

### 2. 열간 등가압 소결(HIPing) 공정의 구성 모델

고온에서 금속 분말 성형체의 성형 공정을 해석하기 위해서는 일반적인 하중하에서 성형체의 탄-소성 변형 및 크리프 거동에 관한 구성 이론이 중요하며, 이를 위하여 지금까지 실험 및 이론적 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되었다.

본 논문에서는 멱수법칙 크리프를 고려한 Abouaf 등[2,6]의 구성 모델을 유한 요소 해석(Finite Element Analysis)에 적용하였다. Abouaf 등은 거시적인 관점에서 분말 성형체를 기공을 가진 연속체로 간주하고 고온에서 치밀화 거동을 예측할 수 있는 변형률 속도식을 상당 Mises 응력  $\sigma_{eq}$ , 온도 및 상당 Mises 응

\* 포항공과 대학교 기계공학과  
\*\* 포항공과 대학교 철강대학원

력의 함수인 크리프 포텐셜을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\rho \dot{\epsilon}_0 \sigma_{eq}^{n-1}}{\sigma_0^n} (f I_1 \delta_{ij} + \frac{3}{2} c \sigma'_{ij}) \quad (1)$$

여기서

$$\sigma_{eq}^2 = f(\rho) I_1^2 + 3c(\rho) J_2 \quad (2)$$

$I_1 = \sigma_{ii}$ ,  $J_2 = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}$ ,  $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$  이다. 또한,  $f(\rho)$ 와  $c(\rho)$ 는 각각 상대 밀도의 함수로서 실험을 통하여 구할 수 있다.  $f(\rho)$ 는 정수 응력이 다공질 금속의 치밀화에 미치는 영향 정도를 나타내며,  $c(\rho)$ 는 모재의 항복 강도에 대한 다공질 금속의 유동 응력의 비를 나타낸다. 본 연구에서  $f(\rho)$ 와  $c(\rho)$  및 크리프 상수들은 Dellis[7]등의 실험 결과를 이용하였으며, 그 값은 다음과 같다.

$$f(\rho) = 0.16 \left( \frac{1-\rho}{\rho-0.69} \right)^{1.1} \quad (3)$$

$$c(\rho) = 1 + 5.23 \left( \frac{1-\rho}{\rho-0.69} \right)^{0.914} \quad (4)$$

### 3. 유한 요소 수식화

열간 등가압 소결 공정에서 변형되는 재료는 내부 영역  $\Omega$ 와 경계  $\Gamma$ 로 나누어지며 경계  $\Gamma$ 는 속도장이 주어진  $\Gamma_u$  표면력이 주어진  $\Gamma_h$ 로 나누어진다. 열간 등가압 소결 공정에서의 표면력은 압력 용기에서 가해주는 압력만이 작용한다. 그리고, 본 연구에서는 용기와 분말재료간의 미끄러짐이나 떨어지는 현상은 고려하지 않았다. 이러한 가정들과 위에서 사용한 구성모델을 바탕으로 아래와 같은 경계값 문제가 주어지게 된다.

평형방정식

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (5)$$

속도-변형률 속도 관계식

$$\dot{\epsilon}_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2 \quad (6)$$

변형률속도-응력 관계식

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\rho \dot{\epsilon}_0 \sigma_{eq}^{n-1}}{\sigma_0^n} (f I_1 \delta_{ij} + \frac{3}{2} c \sigma'_{ij}) \quad (7)$$

경계조건

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \Gamma_u \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{h}_i \quad \text{on } \Gamma_h \quad (9)$$

### 4. 설계민감도의 계산

용기의 형상을 최적화하기 위해서 설계민감도를 기초로 한 최적화 기법을 사용하였다. 설계민감도를 구하는 방법은 크게 수치적인 방법과 해석적인 방법으로 나누어진다. 수치적인 방법으로는 직접접근법(Direct Approach)을 들 수 있는데 설계변수의 수만큼의 추가적인 시뮬레이션을 통해서 설계민감도를 구하는 방법이다. 이에 반해 해석적인 방법은 수반변수법(Adjoint Variable Method)와 직접미분법(Direct Differentiation Method)를 들 수 있는데 계산 시간적인 면에서 수반변수법이 효율적이나, 비정상상태 문제에서의 적용에 있어서는 수반변수법의 장점을 활용할 수 없다. 본 연구에서는 직접미분법을 이용하여 설계민감도를 구하였으며 설계민감도를 구하는 상세한 내용은 참고문헌 [8]에서 잘 설명되어 있다.

### 5. 용기 형상 최적화

열간 등가압 공정의 용기 형상 최적화를 위해서 사용한 공정은 Fig 1 과 같이 가운데 구멍이 있는 축대칭 원통을 가공하기 위한 공정이다. 본 연구에서 사용한 재료는 용기인 경우 스테인레스 강 304L 이고 분말재료인 경우는 스테인레스 강 316L 분말을 사용하였다. 가공시의 압력의 변화는 0 기압에서 1 분당 1 기압씩 100 기압까지 증가되도록 조절하였고, 온도의 변화는 25 °C 에서 1 분당 10 °C 씩 1125 °C 까지 증가되도록 하였다. 그리고, 온도와 압력이 최고치에 도달하고 나서 4 시간 정도를 유지하도록 하였다. Fig 1 과 같은 제품을 얻기 위한 초기 예측 용기 형상과 설계변수들은 Fig 2 에서 보인 바와 같다. Fig 2 에서 용기의 두께는 1 mm 이고, 초기 상대밀도는 0.7 이었다. Fig 3 은 Fig 2 와 같은 용기 형상을 이용하여 열간 등가압 소결했을 때 나오는 제품의 형상과 연고자 하는 형상을 함께 나타낸 그림인데 여기서는 용기의 형상을 빼고 순수하게 HIP 된 제품의 형상만을 나타내었다.

용기의 임의형상을 나타내기 위한 설계 변수는 그림에서와 같이 모두 27 개로서 이들을 조절점으로 이용하여 모두 3 개의 B-spline 을 생성하였다. 설계 변수  $d_1 \sim d_6$ 는 B1 의 조절점들의 r 축 방향의 좌표값을 나타내고,  $d_{10} \sim d_{18}$ 은 B2 의 조절점들의 z 축 방향의 좌표값을 나타내고,  $d_{19} \sim d_{27}$ 은 B3 의 조절점들

의 r 축 방향의 좌표값을 나타낸다. 그리고, B1 조절점들의 z 축 좌표값들은  $d_{10}$ 에 의하여 각각의 초기값에 비례하여 얻어지고, B3 조절점들의 z 축 좌표값은  $d_{18}$ 에 의해서 비례적으로 결정된다. B2 조절점들의 r 축 좌표값은  $d_9$ 와  $d_{19}$ 에 의해서 초기치들에 비례해서 결정되었다. 그리고, 대칭면에서 부드러운 곡선을 얻기 위해서 상하 대칭축 근처의 3 개씩의 조절점들의 r 축 좌표값들이 같이 움직이도록 하였다.

Fig 1 과 같은 최종 제품을 얻기 위한 목적함수는 아래와 같이 원하는 형상에 대한 가공후의 형상의 차를 합산하여 사용하였다. 여기서, 최종 상태에서의 비교 대상은 용기의 형상이 아니고 열간 등가압 소결된 재료의 형상이다.

$$\psi_0 = \sum_{i=1}^{n_1} (r_{1i} - 10)^2 + \sum_{i=1}^{n_2} (z_{2i} - 25)^2 + \sum_{i=1}^{n_3} (r_{3i} - 25)^2 \quad (10)$$

여기서  $n_1$ 과  $r_{1i}$ 은 제품의 내경의 형상을 나타내는 절점의 수와 각 절점들의 r 축 좌표값들이고,  $n_2$ 와  $z_2$ 는 상단부의 절점과 z 축 좌표값들이고,  $n_3$ 과  $r_3$ 은 외경의 절점과 r 축 좌표값들을 나타낸다.

본 연구에서 사용된 최적화 기법으로는 최적화 반복 계산의 진행방향을 결정하기 위한 급경사법(Steepest Descent Method)과 진행 크기를 결정하기 위한 황금분할법(Golden Section Method)을 함께 이용하였다. Fig 4 는 위에서 설명한 목적함수와 최적화기법을 적용하였을 때 반복 계산에 따른 목적함수의 변화를 보여주는 그림이고, Fig 5 는 최적화 반복계산을 통해서 나온 최적 용기 형상을 보여준다. Fig 6 은 Fig 5 와 같은 형상의 용기를 이용하여 열간 등가압 소결 공정을 거쳐서 나온 제품의 형상과 얻고자 하는 형상을 함께 그린 그림이다. 실선으로 나타낸 것이 최적 용기를 이용하여 나온 제품의 형상이고 점선으로 나타낸 것이 원하는 형상이다. 이상의 결과에서 볼 때 용기의 형상을 최적 설계하기 위해 본 연구에서 사용한 방법이 효과적이었음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 열간 등가압 공정에서 아주 중요한 역할을 하는 용기의 형상을 설계하기 위해 설계민감도를 이용하는 최적화 기법을 이용하였다. 먼저 최적화 기법을 적용하는데 있어서 필요로 하는 설계민감도의 검증이 이루어 졌으며, 이를 바탕으로 가운데에 구멍이 있는 원통형 제품을 가공하기 위한 용

기의 형상을 설계하였다. 열간 등가압 소결 공정에서 가공후의 제품의 형상은 용기의 두께 및 형상에 의해 결정되는 것을 알 수 있으며, 용기의 형상에 대한 최적 설계를 통한 공정 최적 설계가 가능함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] J. Besson and M. Abouaf, "Behavior of Cylindrical HIP Containers", Int. J. Solids and Struct., Vol. 28, No. 6, pp. 696-702, 1991.
- [2] J. Besson and M. Abouaf, "Grain Growth Enhancement in Alumina During Hot Isostatic Pressing", Acta Metall. Mater., Vol. 39, No. 10, pp. 2225-2234, 1991
- [3] J. Xu and R.M. McMeeking, "An Analysis of the Can Effect in an Isostatic Pressing of Copper Powder", Int. J. Mech. Sci., Vol. 34, No. 2, pp. 167-174, 1992
- [4] L. Fourment 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.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., Vol. 42, pp. 1343-1390, 1998
- [6] M. Abouaf, J.L. Chenot, G. Raisson, and P. Bauduin, Int. J. Num. Meth. Eng., Vol. 25, pp.191-212, 1988
- [7] C. Dellis, F. Bernier, O. Bouaziz, R. Baccino, and F. Moret, private communication, 1996
- [8] S.H. Chung, 유한요소법을 이용한 비정상상태 공정의 최적설계, 포항공과 대학교 박사 논문, pp. 43-62, 1999

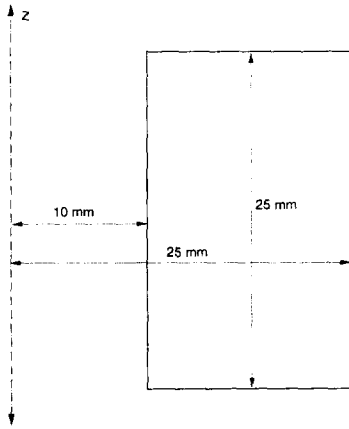


Fig 1. Desired shape of the product

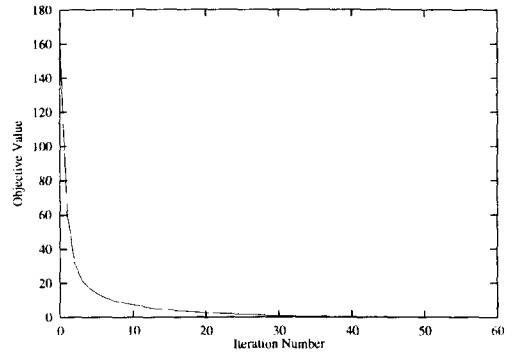


Fig 4. Variation of the objective value during optimization

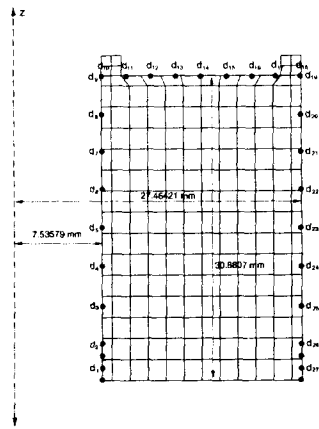


Fig 2. Initial guess geometry of the container and finite element layouts

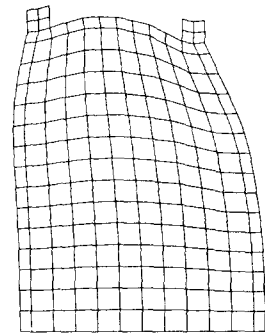


Fig 5. Optimized shape of the container and finite element layouts

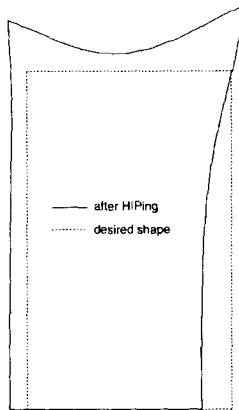


Fig 3. Comparison between shape of the product after HIPing with initial container and desired shape of the product

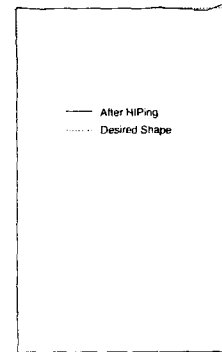


Fig 6. Comparison between shape of the product after HIPing with optimal container and desired shape of the product