

# 분말야금 공정 중 성형압력과 소결 온도가 밀도와 치수에 미치는 영향

조주현<sup>1</sup>, 권영삼<sup>2</sup>, 정성택<sup>2</sup>, 이민철<sup>3</sup>, 전만수<sup>#</sup>

## The Influence of Compaction Pressure and Sintering Temperature on Density and Dimension of a Powder Metallurgy Product

J. H. Cho, Y. S. Kwon, S. T. Chung, M. C. Lee, M. S. Joun

### Abstract

The influence of compaction pressure and sintering temperature on the hydraulic cylinder block fabricated by powder metallurgy is investigated in this study. The cylinder block is powder compacted under various compaction pressures and sintered under various sintering temperatures, and its density and dimensions are measured to reveal the relation of the process condition with the product quality. Moreover, finite element analyses of the density distributions are conducted under the same conditions with the experiments and the predicted results are compared with the measured ones.

**Key Words** : Powder Metallurgy, Cylinder block, Compaction Pressure, Sintering Temperature, Dimension, Density, Finite Element Analysis

### 1. 서 론

국내에서는 현재, 굴삭기 등 중장비용 유압기기 부품인 실린더 블록은 요구된 윤활 특성과 비교적 복잡한 모양 때문에 주조 후 절삭가공 공법으로 생산되고 있다. 따라서 품질의 균질성이 떨어지고, 생산성 저조 및 절삭비용 과다로 인하여 타 공법으로의 전환이 꾸준히 시도되었다. 특히 분말야금법은 윤활 특성과 제조 단가 양면에서 주목을 받아 왔다. 분말야금법으로 복잡한 형상의 정형 가공이 가능하고 생산성 측면에서 강점을 가지고 있으며, 적절히 제어된 공극이 윤활 특성에 효과적이기 때문이다[1].

분말야금법의 장점 중 하나는 제품을 정형에 가깝게 성형할 수 있다는 것이다. 그러나 실린더 블

록과 같이 제품 개발 과정에서 소결시 발생하는 수축량을 예측하지 못한다면 정확한 치수를 만족하는 제품을 제조할 수 없다.

분말성형체의 기계적 강도를 높이기 위해서 금형압축성형 후 소결 공정이 필수적이다[2]. 분말압축성형 공정으로 생산된 제품을 소결하게 되면 제품은 수축하게 되는데 금형의 설계를 위해서는 수축량을 정확하게 예측해야 한다. 그러나 수축량은 분말의 종류, 성형 밀도, 소결온도에 따라 다르기 때문에 예측하기가 힘들다.

저자들[3]은 선행연구에서 유압펌프용 실린더 블록의 분말성형 공정을 개발하였다. 이 과정에서 누유방지 등을 고려하여 새로운 철계분말을 개발하였으나, 이에 관한 소결시의 수축 특성이 밝혀지지 않았다. 이로 인하여 시행착오가 불가피하였다.

1. 국립경상대학교 기계과 대학원

2. ㈜세타텍

3. 국립경상대학교 기계항공공학부

2단계 BK21 항공기부품기술연구소

# 교신저자: 국립경상대학교 기계항공공학부

E-mail : msjoun@gnu.ac.kr

따라서 본 연구에서는 유압펌프용 실린더 블록을 위해 개발된 철계분말로 실린더 블록을 다양한 성형압력과 소결온도 하에서 제작하여 밀도와 주요 치수의 변화량을 측정한다. 그리고 측정된 밀도를 분말야금 전용 CAE S/W인 PMSolver3D[4]를 이용하여 얻은 유한요소해석 결과와 비교함으로써 실험과 해석 결과의 타당성을 검증하고자 한다.

## 2. 유한요소해석을 위한 이론적 배경

수치해석을 위해서는 분말야금 공정시 분말성형체의 치밀화 및 변형 거동을 예측할 수 있는 구성모델의 개발이 선결 과제이다. 이런 이유로 많은 연구자들이 다양한 구성모델에 대해서 연구해 왔는데 본 연구에서는 다음과 같은 구성 모델[5]을 사용하였다.

$$\Phi = \left( \frac{q}{\sigma_m} \right)^2 + \alpha(1-\rho)^\gamma \left( \frac{p}{\sigma_m} \right)^2 - \rho^m \quad (1)$$

여기서  $\Phi$ 와  $\sigma_m$ 은 각각 항복함수와 모재의 항복응력을 의미하며,  $q = \sqrt{3J_1'}$ 로 정의되고  $p = -J_1/3$ 는 정수압을 의미한다.

그리고  $\rho$ 는 상대밀도를 의미하고,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $m$ 은 실험을 통해서 구해지는 재료상수이다.

식 (1)에 항복곡면에 대한 변형의 직교성을 수식화한 유동법칙(flow rule)을 적용하면 아래와 같은 응력-변형률 속도 관계식을 구할 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\epsilon}} \left( \frac{2}{A(\rho)} \dot{\epsilon}_{ij}' + \frac{1}{3(3-A(\rho))} \dot{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

여기서  $\sigma_{ij}$ ,  $\dot{\epsilon}_{ij}'$ ,  $\dot{\epsilon}_{kk}$ 는 각각 응력텐서, 편차 변형률속도, 부피 변형률속도를 의미하고, 일축 압축 조건으로부터  $A = 9/(3 + \alpha(1-\rho)^\gamma)$ 의 관계를 만족해야 한다. 그리고  $\delta_{ij}$ 는 크로네커 델타(Kronecker delta)를 의미하고, 유효응력  $\bar{\sigma}$ 와 유효 변형률 속도  $\dot{\epsilon}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma} = \left( \frac{A(\rho)}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}' + \frac{3-A(\rho)}{3} \sigma_{kk}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon} = \left( \frac{2}{A(\rho)} \dot{\epsilon}_{ij}' \dot{\epsilon}_{ij}' + \frac{1}{3(3-A(\rho))} \dot{\epsilon}_{kk}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_{ij}'$ 과  $\sigma_{kk}$ 는 각각 편차 응력성분과 정수

압을 각각 의미한다.

식 (1)-(4)의 구성방정식으로부터 금형압축성형 중 분말성형체의 변형거동을 해석하기 위한 경계치 문제는 다음과 같이 주어진다. 유한요소해석을 위해 변형되는 분말체의 해석영역은 내부영역  $V$ 와 경계  $S$ 로 나누어지며 경계  $S$ 는 속도  $v_i = \bar{v}_i$ 가 주어진 경계  $S_v$ , traction  $\bar{t}_i$ 가 주어진 경계  $S_t$ , 절점이 금형과 접촉하고 있는 경계  $S_c$ 로 이루어져 있다.  $S_c$ 상에서 법선방향으로 속도지정 경계조건을 벌칙기법(penalty method)으로 처리하면, 아래와 같이 분말재료의 금형압축성형과 관련한 경계치 문제가 유도된다.

$$1) \text{ 연속방정식: } \frac{\dot{\rho}}{\rho} = -\dot{\epsilon}_{kk} \quad (5)$$

$$2) \text{ 평형방정식: } \sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (6)$$

$$3) \text{ 응력-변형률속도 관계식: 식 (2)}$$

$$4) \text{ 경계 조건식:}$$

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i \text{ on } S_t \quad (7)$$

$$v_i = \bar{v}_i \text{ on } S_v \quad (8)$$

$$\sigma_n = -\xi \left( v_n - v_n^D + \frac{d}{\Delta t} \right) \text{ on } S_c \quad (9)$$

$$\sigma_t = -\nu \sigma_n g(\Delta v_t) \text{ on } S_c \quad (10)$$

여기서 식 (6)의  $f_i$ 는 체적력을 의미하고, 식 (9)의  $\xi$ 는 절점과 금형의 법선속도성분을 일치시켜 주기 위한 벌칙상수(penalty constant)이고,  $v_i$ 는 법선방향을 나타내는 단위벡터이다. 그리고  $v_n^D$ 는 금형의 법선방향 속도성분을 나타낸다. 식 (9)에서  $D$ 는 금형과 접하고 있거나 금형과 접촉하기로 예정되어 있는 절점과 금형과의 법선방향 거리를 나타내고  $\Delta t$ 는 해석스텝간의 시간증분을 의미한다. 식 (10)에서  $\Delta v_t$ 는 절점과 금형의 속도 차의 접선성분이며,  $\mu$ 는 마찰계수를 의미한다. 함수  $g$ 는 접착(sticking)과 미끄러짐 마찰을 동시에 고려할 수 있도록 아래와 같은 수식이 널리 사용된다.

$$g(\Delta v_t) = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{|\Delta v_t|}{a} \right) \quad (11)$$

여기서  $a$  는 아주 작은 양의 상수이다.

위에서 설명된 경계치 문제는 속도가 주어진 경계조건을 만족하는 속도장  $v_i$  중에서  $S_v$  에서 0 이 되는 임의 함수  $\omega_i$  에 대해서 아래의 약형을 만족하는 속도장  $v_i$  를 구하는 문제로 정리된다.

$$\int_V \sigma'_{ij} \omega'_j dV - \int_V p \omega_i dV - \int_V f_i \omega_i dV - \sum_i \int_{S_i} t_i \omega_i dS - \int_{S_c} -\xi \left( v_n - v_n^D + \frac{\delta}{\Delta t} \right) \omega_n dS - \int_{S_c} \mu \xi \left( v_n - v_n^D + \frac{\delta}{\Delta t} \right) g(\Delta \bar{v}_i) \omega_i dS = 0 \quad (16)$$

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

### 3. 실험

#### 3.1 분말성형실험

유압프레스용 실린더 블록을 분말성형하기 위해서 상 1 단 하 2 단의 다이세트와 500 톤 유압분말프레스가 사용되었다. 초기 분말 충전 높이는 110mm 이었으며, 최종 제품의 높이는 67mm 이었다. 성형 압력에 따른 밀도를 알아보기 위하여, 230 톤, 240 톤, 250 톤의 성형하중으로 성형 실험을 실시하였다. Fig. 1 은 실험을 통해 얻은 소결 이전의 실린더블록의 성형체이다.

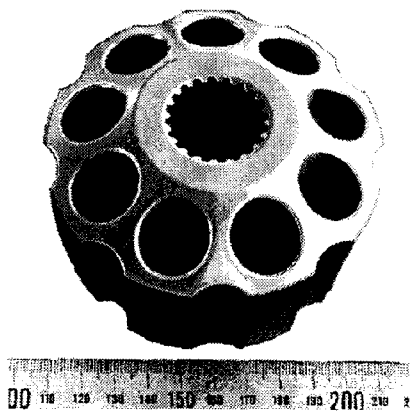


Fig. 1 A cylinder block, only powered compacted

#### 3.2 소결실험

유압분말프레스를 이용하여 성형한 성형체를 소결하기 위하여 연속 소결로에서 성형체의 탈지 및 소결을 실시하였다. 소결 온도에 따른 소

결체의 밀도 및 수축량을 측정하기 위하여 1120°C, 1150°C, 1170°C, 1190°C 등의 소결 온도에서 실험을 실시하였다. Fig. 2 는 연속 소결로에서 소결한 실린더 블록이다. 소결체는 성형체가 비해 부피가 0.3% 이하로 수축하였다.

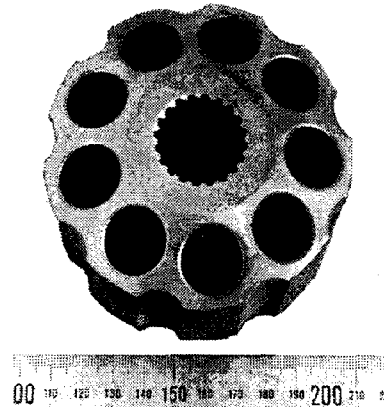


Fig. 2 The cylinder block, sintered after power compacted

#### 3.3 소결 온도 및 성형압력과 밀도

전술한 실험 조건 하에서 분말 성형된 실린더 블록을 대상으로 밀도를 측정하여 성형압력과 소결 온도가 소결체의 밀도에 미치는 영향을 분석하였다. 실린더 블록의 밀도를 측정을 위하여 수중법(한국산업규격 KSD 0033-1990)을 사용하였다.

Fig. 3는 성형하중과 소결 온도에 따른 소결체의 밀도를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 성형하중 즉 성형압력이 높으면 높을수록, 소결온도가 높으면 높을수록 밀도가 증가하는 경향을 보이고 있다.

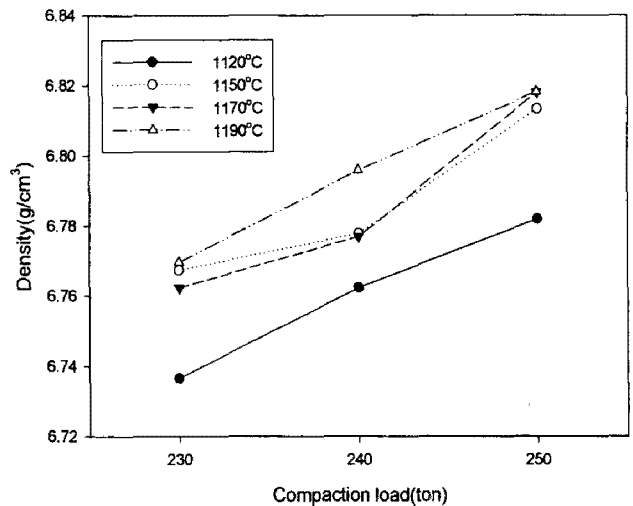


Fig. 3 Density variation with sintering temperature and compaction pressure

### 3.4 소결 온도와 성형압력과 주요치수

성형압력과 소결 온도에 따른 소결체의 수축량을 비교하기 위하여 주요치수를 3차원 측정기로 측정하였다. Fig. 4에 표시된 바와 같이 실린더 블록의 외경(D1), 사이드코어 직경(D2), 사이드코어 원지름(D3) 등의 치수가 설계 시에 주요 치수로 간주되므로 이에 관하여 측정하였다. 각 부분의 치수는 10회 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값의 평균을 구한 값이다.

Fig. 5는 소결체의 주요 치수변화를 그래프로 나타낸 것이다. 소결체의 밀도는 성형압력과 소결 온도가 높으면 높을수록 증가함을 알 수 있다. 그리고 소결체의 주요 치수는 성형압력이 증가하면 증가할수록 커지는 경향이 있고 소결온도가 높으면 높을수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 다만, 사이드코어 직경(D2)은 성형압력의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

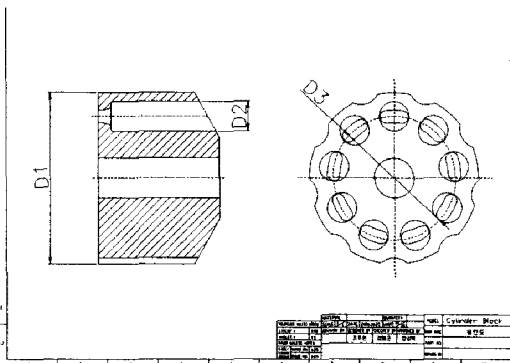
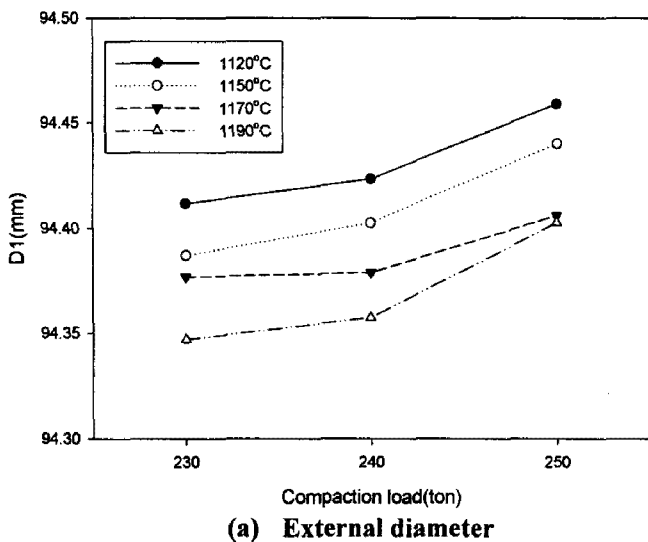
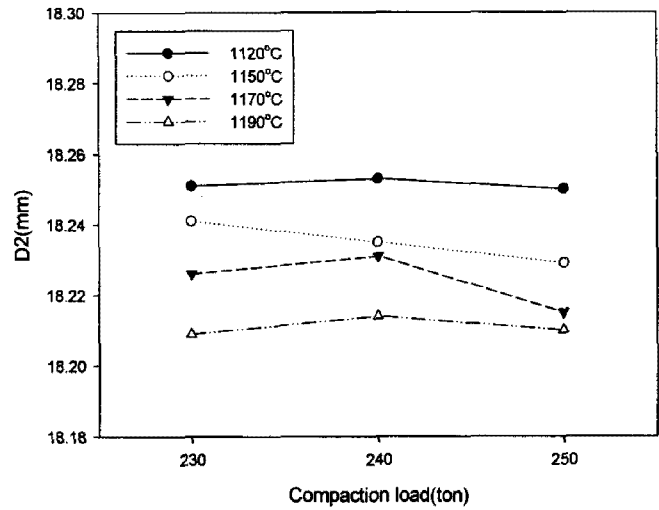


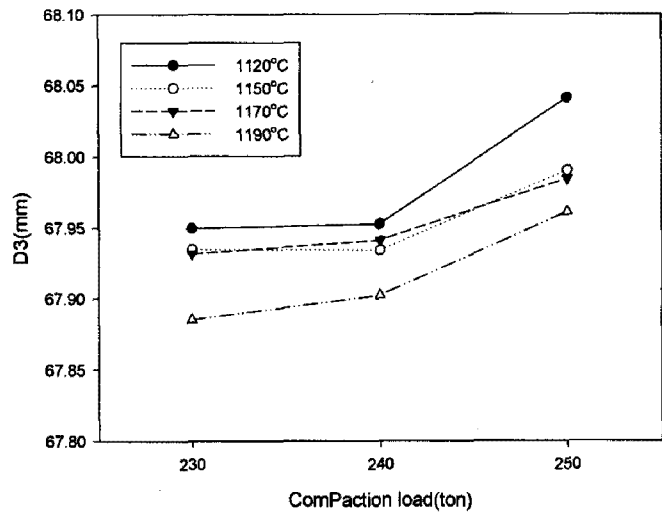
Fig. 4 A drawing of the cylinder block



(a) External diameter



(b) Side-core diameter



(c) Side-core PCD

Fig. 5 Variation of major dimensions with compaction load and sintering temperature

### 4. 유한요소해석과 결과의 비교

유한요소해석을 위해서 사용된 분말체의 유한요소해석모델을 Fig. 6에 나타내었다. 제품의 대칭성을 고려하여 전체 형상의 1/9을 해석 대상 영역으로 선택하였다. 유한요소 해석모델은 총 1022개의 절점과 3224의 사면체요소로 이루어져 있다[6].

해석 조건은 실험을 통해 측정된 소결체의 밀도를 사용하였다. 즉, 1150°C에서 소결한 소결체와 같은 밀도를 가지도록 해석을 수행하였다.

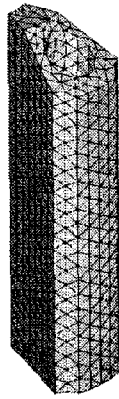
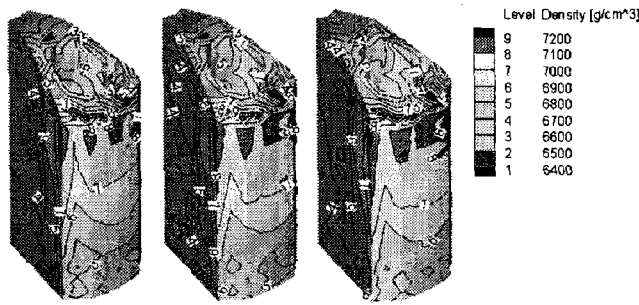


Fig. 6 Finite element model of the cylinder



(a) 230 tons (b) 240 tons (c) 250 tons

Fig. 7 Density distribution at different compaction load

해석에서 예측한 분말 성형체의 밀도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a), 7(b), 7(c)는 각각 230톤, 240톤, 250톤의 성형하중 조건에서 실험한 밀도를 가지도록 해석한 결과이다. Table 1에서는 각각의 조건에서 예측된 성형하중을 나타내고 있으며, 동시에 실험 결과와 해석 결과를 비교하고 있다. 소결체와 성형해석의 결과를 비교한 것은 철계분말의 경우 부피변화와 무게 변화 모두 1% 미만이기 때문에 실제 밀도의 변화 역시 작아서 비교를 하여도 무리가 없다고 판단된다.

해석을 통해 예측한 성형하중과 실측치는 최고 14.8%의 오차가 있음을 알 수 있다.

Table 1. Comparison between predictions and experiments

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Compaction load(ton)		(b-a) /b*100
	Experiments(a)	Predictions(b)	
6.767	230	256	11.3
6.778	240	270	12.5
6.809	250	287	14.8

#### 4. 결론

본 연구에서는 성형하중과 소결 온도가 대형 소결품의 밀도와 소결 시의 수축 변형량에 미치는 영향을 실험적으로 비교하였다. 그리고 성형압력에 따른 밀도의 변화를 분말성형 CAE S/W인 PMSolver3D를 이용하여 해석하였고 실제 실험과 비교를 하였다. 그 결과와 해석 결과는 실험결과와 정량적으로 잘 맞음을 확인하였다.

본 연구에서 실시한 실험적 및 해석적 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 성형압력과 소결 온도가 높으면 높을수록 소결체의 밀도는 증가하는 경향이 있다.
- (2) 소결체의 주요치수는 성형압력이 높으면 높을수록 커지는 경향이 있고, 소결온도가 높으면 높을수록 작아지는 경향이 있다.
- (3) 내부 직경의 경우는 성형압력보다는 소결 온도의 영향을 많이 받는다.

본 연구는 향후 제품 및 금형 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신인력양성사업, 2 단계 BK21 사업의 일환으로 실시된 연구 결과의 일부이며, 경상대 TIC 장비를 사용하여 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] R. M. German, 1994, Powder Metallurgy Science Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ.
- [2] Y. S. Kwon, S. H. Chung, H. I. Sanderow, K. T. Kim R. M. German, 2003, Numerical Analysis and Optimization of Die Compaction Process, PM2TEC2003, Las Vegas.
- [3] 조주현, 권영삼, 정성택, 이민철, 전만수, 2006, 유압프레스용 실린더 블록의 분말야금 성형공정의 3차원 유한요소해석, 추계대한기계학회.
- [4] www.cetateh.com
- [5] S. Shima, M. Oyane, 1976, Plasticity Theory for Porous Metals, Int. J. Mech. Sci., Vol. 18, pp. 33-50.
- [6] M. L. Lee, M. S. Joun, J. K. Lee, An advancing front method of tetrahedral mesh generation and its application to remeshing in forging, submitted to Int. J. Num. Methods Eng.