

금속분말 압축성형에서의 마찰특성

장동환, 황병복*
인하대학교 자동화공학과

Friction Effect on the Powdered Metal Compaction

Dong-Hwan Jang and Beong-Bok Hwang*
Department of Industrial Automation Engineering
Inha University, Incheon

Abstract

A plasticity theory applicable to powdered metal compaction is briefly summarized and its variational form for the finite element analysis is described. The compaction processes of axisymmetric solid cylinder are simulated. For the analysis of the friction effect of solid cylinder, the investigations were performed for different compact geometries. Highlights of the results for given geometries are reported in terms of transmitted pressure on the lower punch from the upper punch through the compact and maximum density variation within the compacts. General conclusions from these simulation results are : (1) the friction coefficient could be selected from the transmitted force data during the single acting compaction test with the simulated results ; and (2) density variations within the compacts are very much dependent of the compact geometry such as the height to diameter ratio and the frictional condition between compact and dies.

Key words : plasticity theory, axisymmetry solid cylinder, friction effect, transmitted force

1. 서론

금속분말의 성형은 기존의 금속성형공정에 비하여 분말의 다양한 가용성에 의한 광범위한 성형성, 거의 최종치수에 맞추어 정형가공(net-shape forming)으로 생산할 수 있는 점, 저렴한 가격으로 제품을 성형할 수 있기 때문에 부품을 경제적으로 생산할 수 있다.¹⁾ 금속분말성형에 있어서 설계시 고려해야 할 가장 중요한 점은 소결시에 형상적 결함이 없게 하기 위하여 압축생형(green compact)이 고른 밀도분포를 가지도록 하는 것이다. 압축생형의 밀도분포는 소결후 압축생형의 형상변화에 큰 영향을 주며 성형품의 강도와 관련이 있는 가장 중요한 설계변수이다. 압축생형에서 밀도분포의 차이는 공구에 의하여 작용된 압력의 불균일한 분포에 의하여 발생한다. 이는 입자간 또는 입자와 다이벽과의 마찰과 압축생형의 길이와 직경비에 큰 영향을 받는다.²⁾ 그러나, 분말의 압축공정에 있어서 마찰값을 정하기란 쉽지 않고 측정하기 또한 매우 어렵다.

본 논문에서는 금속분말의 압축성형공정을 유한요소해석을 통하여 해석함으로써 금속분말의 변형거동에 대하여 살펴보고자 한다. 압축실험의 시뮬레이션은 금속분말을 원기둥 형태의 금형내에 충전시킨후 두 개의 평평한 압축판(punch)사이에 놓고 수행하였다. 여러 가지 길이/직경비를 선택하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 해석결과로서 마찰계수의 변화에 따른 상부펀치와 하부펀치의 압력전달율을 계산하고, 압축생형내의 최대밀도와 최소밀도를 비교하여 그 차이를 구하여 보았다. 또한, 각각의 형상조건(즉, 길이-직경비)에 대한 압축생형의 압밀현상(consolidation)도 알아 보았다.

2. 분말압축의 항복식과 유동법칙

현실적으로 금속분말의 성형공정을 해석하기 위한 모델로는 균일한 재료의 연속체모델(homogeneous continuum)을 적용하는 것이다. 연속체모델이 확립된 후에는 구성방정식(constitutive relationships)을 세워야 한다. 이러한 모델은 금속분말의 종류, 분말의 입자크기 등에 대하여 상당한 양의 체적변화와 다이와 분말 사이의 마찰 등을 다룰 수 있도록 일반성이 있어야 한다. 금속분말의 압축성형공정에서 두가지 변형형태가 나타난다. 하나는 낮은 압축응력 하에서 발생하는 슬립(slip)에 의한 변형이고, 또 하나는 높은 압력에서 분말입자들의 소성변형에 의한 압밀현상이다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 두가지 변형형태를 포함한 항복조건 및 물성치를 적용하였다.²⁾ 금속분말 압축성형에서 항복함수와 유동법칙으로부터 구성방정식을 유도하는 과정은 다음과 같다.

항복함수 $f(\sigma_{ij})$ 는 응력텐서(stress tensor)와 응력성분(stress component)에 의하여 식 (1)과 같이 표현된다.

$$f = \frac{\alpha}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}' + \left[1 - \frac{\alpha}{3} \right] (\sigma_{ij} \delta_{ij} + p)^2 - \overline{\sigma}_R^2 = 0 \quad (1)$$

여기에서 $\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ 는 편차응력텐서이고, Kronecker delta δ_{ij} 는 상대밀도의 함수이며 p 는 상대밀도와 입자크기의 함수로 물질상수이고, $\overline{\sigma}_R$ 는 겉보기유효응력(금속분말 압축생형의 항복응력)이다. 소성포텐셜(plastic potential)이 항복함수와 동일하고 유동법칙(flow rule)의 적용이 유효하다고 가정하면 즉, 항복면(yield surface)에 대한 변형률속도 벡터(strain-rate vector)의 직교조건(normality condition)이 만족된다면 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

여기에서 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도성분이고 λ 는 비례상수이다.

변형체의 체적을 V 라 하고, 속도벡터 u_i 의 변분(variation)을 도입하여 평형식(equilibrium equation)으로 표현하여 경계조건을 만족하면 다음과 같이 쓸수있다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS_F - \int_{S_c} t_i \delta u_i dS_c = 0 \quad (3)$$

이때, $\delta \dot{\epsilon}_{ij}$ 는 δu_i 로부터 유도할 수 있는 변형률 속도 성분에 대한 변분이다.

금속분말의 압축성형시 변형특성을 완전히 알기 위해서는 항복함수에서의 α , p 그리고 상대밀도 R 의 함수인 $\overline{\sigma}_R$ 를 정의할 필요가 있다. 본 논문은 구리분말의 단동프레싱을 해석대상으로 삼고 있으며 성형체강도는 임계밀도 R_c 와 상대밀도 R 에 관한 경험적인 관계로 다음의 식 (4)와 같이 표현 가능하며 C 와 n 은 물질상수로서 구리 분말의 경우 $C = 27 \text{ MPa}$, $n = 2$ 로서 상대밀도의 함수로서 정해진다.³⁾

$$\sigma_t = CR^n \ln \frac{1}{1 + R_c - R} \quad (4)$$

대부분의 구리분말에 대한 탭밀도는 약 0.35로서 식 (4)에서 임계밀도 R_c 는 탭밀도인 0.35를 사용하였다. 부품의 대칭성을 고려하여 전체 단면에 대하여 반쪽만을 해석하였으며, 해석에 있어서 압축공정 중 재료내부의 기공에 포함되어 있는 공기나 윤활제에 의하여 영향을 받지 않는다고 가정하였다.

3. 마찰계수에 따른 압력전달율

대부분의 성형가공에서 윤활제에 의한 윤활은 다이와 가공물 사이의 마찰상태를 결정하기 때

문에 중요한 요소이다. 다시 말하면 마찰은 응력분포와 성형하중, 그리고 성형에너지에 직접적인 영향을 끼치는 요소이다. 윤활제는 다이와 압축생형간의 마찰로 인하여 손실되는 에너지를 감소시켜 펀치에 의하여 작용되는 압력이 고르게 잘 전달되도록 하여 고른 밀도분포를 갖게 하는 등의 여러 가지 장점이 있으나 오히려 압축생형의 성형체 강도를 저하하여 압축생형의 소결시 방해요인으로 작용하는 등 단점도 없지 않으므로 예측된 마찰값을 통하여 적당한 양의 윤활제를 사용되어야 한다.⁴⁾

링 압축실험을 이용하여 가공재의 마찰인자 값을 알아보는 것처럼 금속분말의 압축공정에서도 마찰에 대한 압력전달율과 길이대 직경비(L/D)와의 관계를 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 구함으로서 마찰계수 값을 예측할 수 있다. 링 압축실험에서와 비슷한 방식으로, 금속분말의 압축실험을 하여, 상/하 펀치사이의 압력전달율을 측정함으로서, 단지 길이와 직경비 그리고 압력 전달률의 데이터로 제시된 그림1~3과 같이 시뮬레이션에 의하여 얻은 그림으로부터 실험에 사용된 금속분말의 마찰값을 예측할 수 있다.

그림 1~3은 초기 분말의 충전상태로 길이대 직경비가 3.0, 6.0, 12.0일 때 단동프레싱에 의한 유한요소해석의 결과를 나타낸다. 해석에서의 평균 다이압은 40,000 psi 및 100,000 psi를 사용하였으며, 마찰계수가 각각 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 에 대한 압력전달률을 유한요소해석을 통하여 얻은 것이다. 그림으로부터 초기 L/D비가 클수록 작용압력에 대하여 압력전달률이 작아지는 것을 알 수 있으며, 이는 이동펀치(상펀치)에 의하여 가해지는 압력이 다이벽면과 분말사이의 마찰에 의하여 성형체의 하부에 충분히 전달되지 못하기 때문이다. 같은 초기 L/D비에 대하여도 마찰계수가 클수록 압력전달률은 더욱 낮기 때문에 각각의 마찰조건에 대하여 동일한 밀도를 가지는 압축생형을 얻기 위해서는 더 높은 압력이 필요하다.

4. 마찰계수에 따른 압축생형내의 최소/최대 밀도비

압축생형의 높이/직경에 대한 최소/최대 밀도비는 압축생형을 소결한 후의 뒤틀림(distortion)의 정도를 예측할 수 있는 척도가 될 수 있다. 압축생형의 소결시 나타나는 큰 특징으로 재료의 수축현상을 들 수 있는데 이러한 형상변화에 영향을 미치는 요소로서 성형체의 밀도분포가 가장 결정적으로 영향을 끼친다. 이러한 압축생형의 밀도분포에 의한 소결시의 형상변화는 소결조건을 바꿈으로서 해결할 수 없는 문제이다. 그림4~6은 각각의 마찰조건과 초기 L/D에 대한 압축생형의 최소/최대 밀도비의 변화를 나타내고 있다. 같은 조건 하에서는 마찰이 클수록 압축생형내의 밀도의 차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 압축생형의 상펀치 부근과 하펀치 부근과의 밀도 차이가 크며 또한, 각각의 마찰계수에 대하여 압축공정의 중간에서는 최소/최대 밀도차는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 또한, 그림으로부터 초기 L/D비가 증가할수록 각각의 압축생형에서의 밀도차가 커짐을 알 수 있으며, 이러한 현상은 초기 L/D비가 작을수록 다이벽에서의 마찰효과가 감소되어 압축생형내에 비교적 고른 압력이 전달되기 때문에, 압축생형내의 밀도차이가 작으며, 또한 압력전달율도 커지기 때문이다.

5. 결론 및 고찰

지금까지 유한요소법을 이용하여 금속분말 압축성형공정에 대한 초기직경대 길이비, 마찰계수, 압축생형의 최소/최대 밀도비, 압력전달의 관계에 대하여 정리 하였다. 이로부터 압축생형의 밀도분포는 작용 압력과 초기 L/D비 그리고 마찰과 깊은 관계가 있음을 알 수 있었다. 금속분말 압축공정에서 이동펀치가 압축생형에 가한 평균압력이 정지펀치에 전달된 압력전달률과 압축생형내의 최소/최대 밀도비를 가지고 마찰계수 값을 예측할 수 있는 방법을 알아보았다. 즉, 다양한 범위의 마찰계수에 대한 압력전달율을 유한요소해석을 통하여 구함으로서, 어떠한 금속분말도 간단한 압축실험을 통하여 마찰계수 값을 정할 수 있다.

참고문헌

1. Serope Kalpakjian, "Manufacturing Processes for Engineering Materials", 2nd Ed., Addison-Wesley publishing company Inc., pp. 687-707, 1902
2. B.B. Hwang, H.Y. Lee, and S.H. Park, "A Study on the Deformation Characterization of Powdered Metal compaction processes", Inha Univ R. I. S. T., pp. 70-71, 1996
3. B.B. Hwang, and S. Kobayashi, "Application of the Finite Element Method to Powdered Metal Compaction Processes of Multilevel Flanged Parts", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 34, No. 3, pp. 424-426. 1994
4. Fritz V. Lenel, "Powder Metallurgy - Principles and Applications", Metal Powder Industries Federation, pp. 99-141, 1980

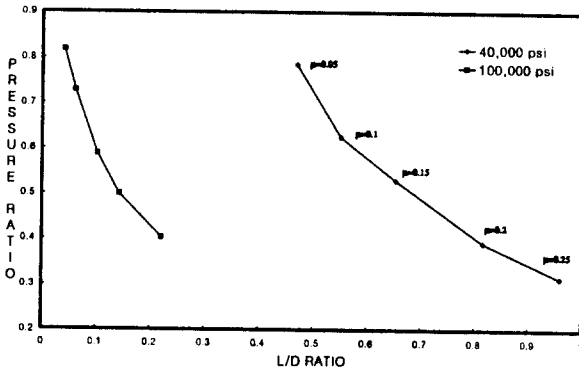


Fig. 1. Pressure Ratio (Init. L/D = 3.0)

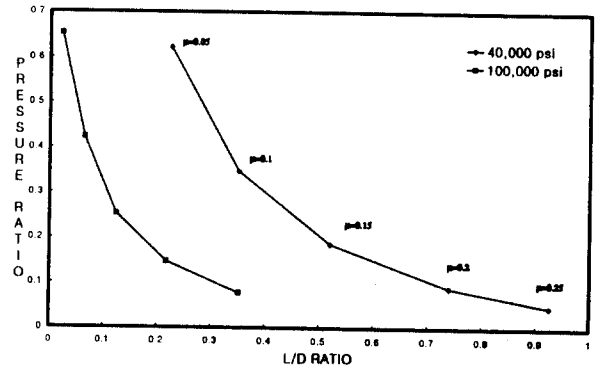


Fig. 2. Pressure Ratio (Init. L/D = 6.0)

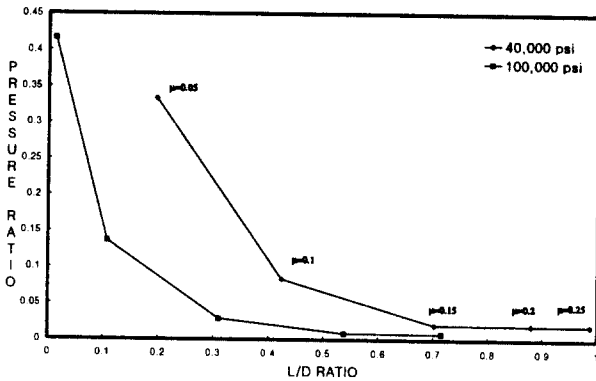


Fig. 3. Pressure Ratio (Init. L/D = 12.0)

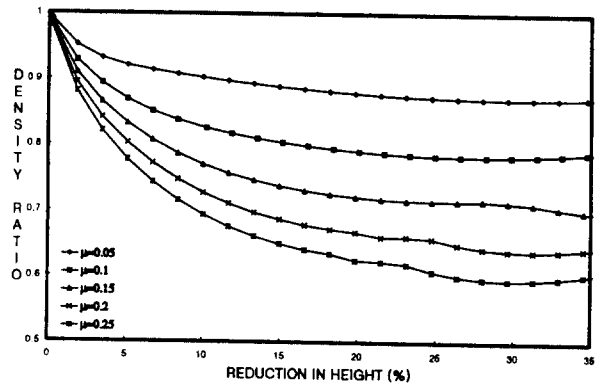


Fig. 4. Density Ratio (Init. L/D = 3.0)

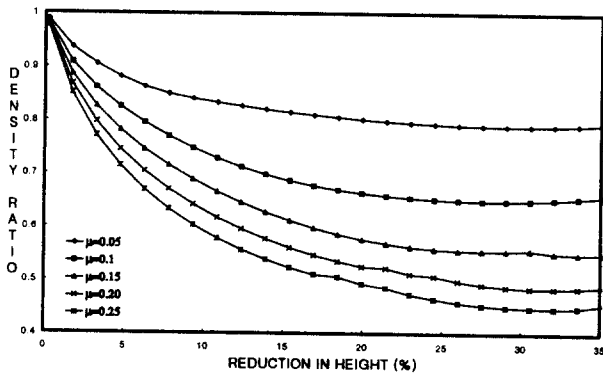


Fig. 5. Density Ratio (Init. L/D = 6.0)

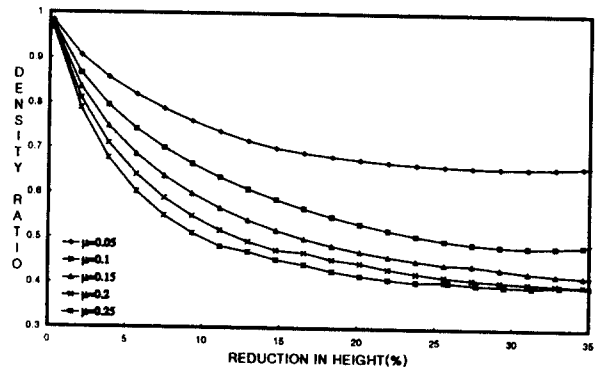


Fig. 6. Density Ratio (Init. L/D = 12.0)