

## 냉간압축하에서 혼합 금속분말의 치밀화 모델

조장혁\* · 조진호\* · 김기태\*\*

### A Densification Model for Mixed Metal Powder under Cold Compaction

J.H. Cho, J.H. Cho and K.T. Kim

#### Abstract

Densification behavior of mixed copper and tool steel powder under cold compaction was investigated. By mixing the yield functions proposed by Fleck et al. and by Gurson for pure powder in terms of volume fractions and contact numbers of Cu powder, new mixed yield functions were employed for densification of powder composites under cold compaction. The constitutive equations were implemented into a finite element program (ABAQUS) to compare with experimental data for densification of mixed powder under cold isostatic pressing and cold die compaction. Finite element calculations by using the yield functions mixed by contact numbers of Cu powder agreed better with experimental data than those by volume fractions of Cu powder.

**Key Words** : Densification, Cold Isostatic Pressing, Cold Die Compaction, Yield Function, Constitutive Equation, Finite Element Analysis, Mixed Metal Powder

#### 1. 서론

분말 야금법에 의한 성형공정은 분말을 임의의 형상으로 냉간 성형한 후 소결 과정 등을 거쳐 부품을 생산하는 공정이다. 특히, 합금재료를 얻기 위한 중요한 제조방법으로서 분말야금법이 사용됨에 따라 혼합 분말을 이용한 성형공정에 대한 이해가 필요하게 되었다. 그러

나 혼합 분말은 동종 분말에 비해 치밀화 기구가 복잡하여 충분한 연구가 이루어지지 못 했으며, 최근에 들어서야 혼합 분말 성형체의 치밀화에 대한 해석으로 관심이 확대되었다.<sup>(1-3)</sup>

혼합 분말의 치밀화에 대한 이론적 연구는 Arzt<sup>(2)</sup>의 연구를 바탕으로 혼합 금속분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 최근에 Kim등<sup>(4)</sup>은 같은

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\* 포항공과대학교 기계공학과

크기를 가진 구형의 연성분말과 강성분말이 각기 다른 가공경화 거동을 갖는 경우에 대해 혼합 금속 분말의 치밀화 거동을 예측하는 식을 유도하였다.

본 논문에서는 연성분말로는 구리 분말을 사용하고 강성분말로는 공구강 분말을 사용한 혼합 금속 분말에 대해 냉간 정수압 압축 실험과 냉간 금형압축 실험을 수행하였다. 또한, 기존의 소성 항복조건식을 조합하여 구한 Fleck-Gurson 소성 항복조건식을 동종분말 각각에 대해 적용하고 이를 혼합하여 혼합분말의 항복함수를 얻었다.

## 2. 이론 및 해석

본 논문에서는 서로 다른 가공 경화 계수를 갖는 연성 분말과 강성분말의 모재가 각각 다음과 같은 가공경화 거동을 갖는다고 가정하였다.

$$\epsilon_{mS} = \left(\frac{\sigma_{mS}}{\sigma_{oS}}\right)^{n_S}, \quad \epsilon_{mH} = \left(\frac{\sigma_{mH}}{\sigma_{oH}}\right)^{n_H} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{mS}$ ,  $\epsilon_{mS}$ ,  $\sigma_{oS}$ ,  $n_S$ 와  $\sigma_{mH}$ ,  $\epsilon_{mH}$ ,  $\sigma_{oH}$ ,  $n_H$  는 각각 연성분말과 강성분말 모재의 일축 압축응력, 소성 변형률, 응력계수 및 가공 경화 계수를 나타낸다.

### 2.1 소성 항복 조건식

#### 2.1.1 Fleck-Gurson의 항복 조건식

Fleck등<sup>(3)</sup>은 상대밀도 0.9 이하의 낮은 상대밀도를 갖는 분말 성형체의 소성 항복조건식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\phi = \left(\frac{\sqrt{5}p}{3P_y}\right)^2 + \left(\frac{5q}{18P_y} + \frac{2}{3}\right)^2 - 1 = 0$$

$$P_y = 2.97D^2 \frac{(D-D_0)}{(1-D_0)} \sigma_m \quad (2)$$

여기서, p와 q는 각각 정수응력과 유효응력을 나타낸다.

Tvergaard<sup>(6)</sup>은 Gurson<sup>(1)</sup>이 제안한 상대밀도 0.9 이상인 분말성형체의 소성 항복조건식을 수정하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\phi = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + 2q_1(1-D) \cosh\left(-\frac{3q_2p}{2\sigma_m}\right) - 1 - \{q_1(1-D)\}^2 = 0 \quad (3)$$

여기서,  $q_1$  과  $q_2$ 는 각각 임의의 상수이다.

천이구간에서 소성 항복함수  $\phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\phi = \left(\frac{D_2-D}{D_2-D_1}\right)\phi_1 + \left(\frac{D-D_1}{D_2-D_1}\right)\phi_2 = 0 \quad (4)$$

여기서  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는 각각 식 (2)과 식 (3)을 나타내며  $D_1$ 과  $D_2$ 는 각각 천이구간이 시작되는 상대밀도와 끝나는 상대밀도를 나타낸다. 본 논문에서는  $D_1=0.75$ 와  $D_2=0.9$ 를 사용하였다.

### 2.1.2 혼합 분말의 항복조건식

#### 부피비율에 따른 항복조건식의 혼합

부피비율에 따라 항복함수를 혼합하는 경우 혼합 분말의 항복함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = f_S \phi_1 + f_H \phi_2 \quad (5)$$

여기서,  $\phi_1$  는 연성분말의 항복함수이고,  $\phi_2$  는 강성분말의 항복함수이며  $f_S$ , 와  $f_H$ 는 각각 연성분말과 강성분말의 부피 비율이다.

#### 접촉수의 비율에 따른 항복조건식의 혼합

##### i) 치밀화에 따라 접촉수가 일정하다고 가정

접촉 종류에 따른 접촉수의 비율은 다음과 같다.

$$Z_{SS} : Z_{SH} : Z_{HH} = f_S^2 : 2f_S f_H : f_H^2 \quad (6)$$

여기서  $Z_{SS}$ ,  $Z_{SH}$  및  $Z_{HH}$  는 각각 연성-연성, 연성-강성 및 강성-강성 분말간의 접촉수를 나타낸다.<sup>(4)</sup>

연성-연성, 연성-강성 및 강성-강성 구형분말이 서로 접촉할 때 두 구형체 사이의 중심거리의 변형량을 각각  $\delta_{SS}$ ,  $\delta_{SH}$  및  $\delta_{HH}$ 라 하면, 혼합 분말 전체의 변형량  $\delta$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta = f_S^2 \delta_{SS} + 2f_S f_H \delta_{SH} + f_H^2 \delta_{HH} \quad (7)$$

또한  $\delta_{SH}$ 는  $\delta_{SS}$ 와  $\delta_{HH}$ 로 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\delta_{SH} = \xi_1 \delta_{SS} + \xi_2 \delta_{HH} \quad (8)$$

$$\xi_1 = \frac{\delta_{SH} - \delta_{HH}}{\delta_{SS} - \delta_{HH}}, \quad \xi_2 = \frac{\delta_{SS} - \delta_{SH}}{\delta_{SS} - \delta_{HH}} \quad (9)$$

본 논문에서는  $\xi_1$ 과  $\xi_2$ 를 구하기 위해 분말의 종류에 따라 분말간의 접촉시 하중과 중심사이의 변형량 관계를 구한 Kim등<sup>(4)</sup>의 식을 이용하였다. 구리와 공구강의 경우에 대해서는  $\xi_1 = 0.687$ ,  $\xi_2 = 0.313$ 이다.

(7) 식에 (8) 식을 대입하여 정리하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\delta = f_S(f_S + 1.374f_H)\delta_{SS} + f_H(f_H + 0.626f_S)\delta_{HH} \quad (10)$$

이를 이용하여 혼합 분말전체의 항복함수  $\phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = f_S(f_S + 1.374f_H)\Phi_S + f_H(f_H + 0.626f_S)\Phi_H \quad (11)$$

### ii) 치밀화에 따른 접촉수 증가를 고려

분말간 접촉수 증가를 고려한 Arzt<sup>(2)</sup>의 식을 이용하면 전체 변형량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{Z} (f_S^2 Z_{SS} \delta_{SS} + 2f_S f_H Z_{SH} \delta_{SH} + f_H^2 Z_{HH} \delta_{HH}) \quad (12)$$

$$Z = f_S^2 Z_{SS} + 2f_S f_H Z_{SH} + f_H^2 Z_{HH} \quad (13)$$

이 경우에 항복함수  $\Phi$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{1}{Z} \{ f_S (f_S Z_{SS} + 1.374 f_H Z_{SH}) \Phi_S + f_H (f_H Z_{HH} + 0.626 f_S Z_{SH}) \Phi_H \} \quad (14)$$

## 2.2 구성방정식의 유한요소 해석

정수압 압축과 금형 압축을 해석하기 위해 혼합분말의 항복조건식을 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 서브루틴에 입력하고 4절점 축대칭 요소의 유한요소격자를 이용하여 해석하였다. 금형 압축의 해석에는 분말과 금형사이의 마찰계수로서  $\mu = 0.17^{(5)}$ 을 사용하였다.

## 3. 실험

본 실험에 사용된 구리 분말(6003 Copper Powder, ACuPowder Int.)과 공구강 분말(D7 Tool Steel, Anval Co.)은 구형 분말로서 각각 45~90  $\mu\text{m}$ 와 45~75  $\mu\text{m}$ 의 입자분포를 가지며 구리는 99.8%이상의 순도를 갖는다.

구리분말과 공구강분말은 중력 혼합기(gravity mixer)를 이용하여 균일하게 섞어 0, 20, 40, 60, 80, 100%의 구리 분말의 혼합비율을 갖는 혼합분말을 만들었다.

### 3.1 냉간 정수압 압축 실험

냉간 정수압 압축실험을 위해 혼합분말을 고무 몰드에 넣은 후 라텍스(latex)로 싸고 진공 밀봉하였다. 고무몰드는 실리콘 재질로서 두께 1mm, 외경은 13mm, 길이 23mm의 원형 튜브이다. 진공 밀봉된 혼합분말을 냉간 정수압 성형기(ABB Autoclave Engineers, USA)에서 150~350 MPa의 성형압으로 냉간 정수압 압축 실험을 수행하였다.

### 3.2 냉간 금형 압축 실험

냉간 금형 압축 실험을 위해 여러 혼합비를 갖는 혼합분말 20g을 직경 11.28mm의 초경 금형에 넣은 후 150~900 MPa의 여러 압력으로 일방향 압축하였다. 분말과

금형 사이의 마찰력을 줄이기 위해 윤활제로 아연 분말(zinc stearate)을 금형 벽에 뿌렸다.

## 4. 실험 및 해석 결과

### 4.1 모재

본 논문에서는 Fleck-Gurson모델이 각 동종분말의 실험치를 잘 예측할 수 있도록 모재 물성치와 임의의 상수  $q_1$ 과  $q_2$ 값을 구하였다.

구리 분말과 공구강 분말의 경우 각각

$$\epsilon_{mS} = \left( \frac{\sigma_{mS}}{205} \right)^{3.156}, \quad q_1 = 1.48, \quad q_2 = 0.648 \quad (15)$$

$$\epsilon_{mH} = \left( \frac{\sigma_{mH}}{1678} \right)^{9.996}, \quad q_1 = 2.48, \quad q_2 = 0.748 \quad (16)$$

로 나타낼 수 있다.

### 4.2 냉간 정수압 압축

Fig. 1은 냉간 정수압 압축하에서 혼합분말의 압력에 대한 상대밀도 변화의 실험치와 부피비율 및 접촉수에 따라 구리와 공구강 분말의 항복함수를 혼합하여 얻은 구성방정식에 의한 계산치의 비교를 나타낸다.

Fig. 1의 (a)와 (b)를 비교해보면 접촉수를 고려하여 항복함수를 혼합한 경우가 부피비에 따라 항복함수를 혼합한 경우보다 실험치를 더 잘 예측함을 알 수 있다.

Fig. 1의 (c)는 접촉수의 증가를 고려하여 구한 혼합분말의 항복함수인 (14)식을 유한요소해석에 적용하여 해석한 결과이다. 접촉수의 증가를 고려한 경우가 실험치를 더욱 정확히 예측함을 알 수 있다.

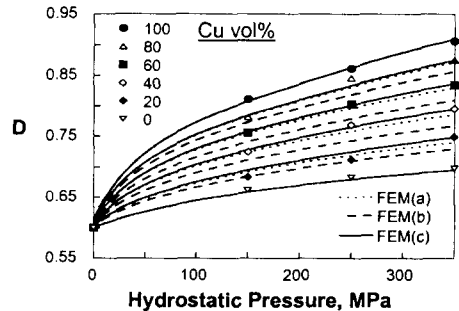


Fig. 1 Comparison of experimental data and finite element results for relative density of mixed powders vs hydrostatic pressure, under cold isostatic pressing.

## 5. 결론

냉간 압축 하에서 혼합분말의 치밀화에 대한 실험치와 제안한 항복함수를 이용한 유한요소 해석을 통해 혼합방식에 따른 치밀화 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 접촉수의 비율에 따라 항복함수를 혼합한 경우가 부피비율에 따른 경우보다 치밀화를 더 잘 예측하였다.
- (2) 치밀화에 따라 분말간 접촉수의 증가를 고려한 경우는 그렇지 않은 경우보다 치밀화를 더 잘 예측하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Gurson, A. L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth -Part 1. Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *ASME, J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 99, p. 2.
- (2) Arzt, E., 1982, "The Influence of an Increasing Particle Coordination on the Densification of Spherical Powders," *Acta Metall.*, Vol. 30, p. 1883.
- (3) Fleck, N. A., Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M., 1992, "Yielding of Metal Powder Bonded by Isolated Contacts," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40, No. 5, p. 1139.
- (4) Kim, K. T., Cho, J. H. and Kim, J. S., 2000, "Cold Compaction of Composite Powders," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 122, No. 1, p. 119.
- (5) Kwon, Y. S., Lee, H. T. and Kim, K. T., 1997, "Analysis for Cold Die Compaction of Stainless Steel Powder," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 119, p. 366.
- (6) Tvergaard, V., 1982, "On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids," *Int. J. Fracture*, Vol. 18, p. 237.
- (7) Cho, H. K., Suh, J. and Kim, K. T., 1994, "Densification of Porous Alloy Steel Preforms at High Temperature," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 36, No. 4, p. 317.

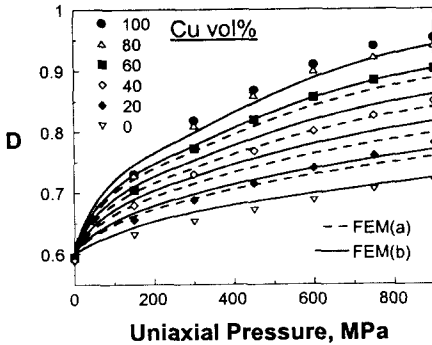


Fig. 2 Comparison of experimental data and finite element results for relative density of mixed powders vs uniaxial pressure under die compaction.

### 4.3 냉간 금형 압축

Fig. 2는 냉간 금형 압축의 경우 혼합분말의 압력에 대한 상대밀도 변화의 실험치와 항복함수를 혼합하여 구한 구성방정식에 의한 계산치의 비교를 나타낸다.

정수압 압축의 경우와 마찬가지로 접촉수를 고려하여 항복함수를 혼합한 경우가 부피비에 따라 항복함수를 혼합한 경우보다 실험치를 더 잘 예측함을 알 수 있다.

분말 성형체의 상대밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있다.<sup>(7)</sup>

Fig. 3(a)와 (b)는 Cu 40vol% 혼합분말의 일방향 금형 압축시 가압력이 750MPa인 경우 성형체 내부의 상대밀도분포를 보여주는 실험치와 유한요소해석의 결과를 각각 나타낸다. Fig. 3(b)의 유한요소해석 결과는 실험치를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

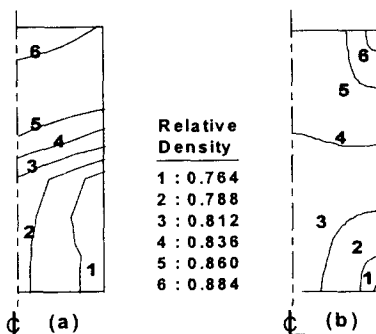


Fig. 3 Comparison between experimental data and finite element calculations for relative density contour plots of a mixed powder compact.