

냉간압축하에서 혼합 금속분말의 치밀화 모델

조장혁* · 조진호** · 김기태***
(2000년 3월 30일 접수)

A Densification Model for Mixed Metal Powder Under Cold Compaction

JangHyug Cho, JinHo Cho and KiTae Kim

Key Words : Densification (치밀화), Cold Isostatic Pressing(냉간 정수압 압축), Cold Die Compaction (냉간 금형 압축), Yield Function(항복함수), Constitutive Equation(구성방정식), Finite Element Analysis(유한요소해석), Mixed Metal Powder (혼합 금속 분말)

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 and with calculated results from the model of Kim et al. 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.

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. 그러나 혼합 분말은 동종 분말에 비해 치밀화 기구가 복잡하여 충분한 연구가 이루어지지 못했으며, 최근에 들어서야 혼합 분말 성형체의 치밀화에 대한 해석으로 관심이 확대되었다.⁽¹⁻⁴⁾

Lange 등,⁽⁵⁾ Besson 과 Evans,⁽⁶⁾ Gurson 과 McCabe⁽⁷⁾ 및 Turner 와 Ashby 등⁽⁸⁾은 연성 분말(soft powder)과 강성분말(hard powder)로 구성된 혼합분말에 대해 각기 다른 재료와 조건하에서 실험적 연구를 수행하였다.

혼합 분말의 치밀화에 대한 이론적 연구는

Bouvard,⁽⁹⁾ Zavaliangos 와 Wen⁽¹⁰⁾ 및 Storakers 등⁽¹¹⁾이 Arzt⁽³⁾의 연구를 바탕으로 혼합 금속분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 위의 모델들은 각기 다른 가정과 제약조건을 갖고 있기 때문에, 실제 혼합 금속분말의 치밀화 거동과는 잘 일치하지 않는다. 최근에 Kim 등⁽¹²⁾은 같은 크기를 가진 구형의 연성분말과 강성분말이 각기 다른 가공경화 거동을 갖는 경우에 대해 혼합 금속 분말의 치밀화 거동을 예측하는 식을 유도하였고 제안된 모델에서 구한 계산치를 구리-텅스텐 혼합 금속분말의 냉간성형에서 구한 실험치들과 비교하였다. 그러나, Kim 등⁽¹²⁾에 의해 유도된 식을 이용한 계산치는 초기 치밀화 단계의 단순히 압력에 대한 상대밀도의 계산이 가능할 뿐 성형체의 불균일한 변형 및 내부의 밀도구배에 대한 예측은 불가능하다. 분말야금에서 제조공정의 적절한 제어를 위해서는 냉간성형시 분말의 치밀화 정도와 성형체 내부의 밀도분포에 대한 예측이 필요하며 이를 위해 유한요소해석을 이용한 수치모사가 필수적이다. 지금까지 일반하중 하에서 분말의 압축성형시 치밀화 거동을 예측하기 위한 여러 소성 항복식이 개발되어 왔으나 주로 동종 분말의 치밀화 거동을 해석하기 위한 것이 대부분이었다.

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과
** 포항공과대학교 대학원 기계공학과 대학원
*** 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : korean@postech.ac.kr
TEL : (054)279-2164 FAX : (054)279-5899

본 논문에서는 연성분말로는 구리 분말을 사용하고 강성분말로는 공구강 분말을 사용한 혼합 금속 분말에 대해 냉간 정수압 압축 실험과 냉간 금형압축 실험을 수행하였다. 또한, 실험치를 Kim 등⁽¹²⁾의 모델에 의한 계산치와 비교하여 혼합분말의 치밀화 경향을 파악하고 기존의 여러 소성 항복조건식들 중 낮은 상대밀도의 범위에서 사용이 가능한 Fleck 등⁽³⁾의 소성 항복조건식과 상대밀도 0.9 이상의 높은 상대밀도 범위에서 사용이 적합한 수정된 Gurson의 소성 항복조건식을 조합하여 구한 Fleck-Gurson 소성 항복조건식을 동종분말 각각에 대해 혼합하여 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 다음과 같은 두 혼합 방법을 사용하였다.

첫째, 각 분말이 혼합분말 내에서 차지하는 부피비율에 따라 항복함수를 혼합하였다.

둘째, 혼합 분말 내의 치밀화에 따른 접촉수에 따라 항복함수를 혼합하였다. 여기서, 치밀화에 따라 접촉수가 일정하다고 가정한 경우와 치밀화에 따른 접촉수의 증가를 고려한 경우에 대하여 조사하였다.

2. 이론 및 해석

본 논문에서는 서로 다른 가공 경화 계수를 갖는 연성분말과 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 σ_{ms} , ϵ_{ms} , σ_{os} , n_s 와 σ_{mH} , ϵ_{mH} , σ_{oH} , n_H 는 각각 연성분말과 강성분말 모재의 일축 압축응력, 소성변형률, 응력계수 및 가공 경화 계수를 나타낸다.

2.1 구성 방정식

전체 변형률 속도성분 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^c + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ 와 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 는 각각 탄성변형률 속도성분과 소성변형률 속도성분을 나타낸다. 또한, Hooke의 법칙으로부터 응력성분 σ_{ij} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \epsilon_{kl}^e \quad (3)$$

여기서 D_{ijkl}^e 는 4차 탄성계수이다.

소성변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

여기서, Φ 는 항복함수이며, $\dot{\lambda}$ 은 양의 상수이다.

질량 불변의 법칙으로부터 상대밀도 D 의 변화율 \dot{D} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{D} = -D\dot{\epsilon}_{ii}^p \quad (5)$$

또한, 분말 성형체의 변형에너지가 모재의 변형에너지와 같다고 하면,

$$D\sigma_m \dot{\epsilon}_m^p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (6)$$

과 같이 쓸 수 있다. 여기서, σ_m 은 모재의 유동응력, $\dot{\epsilon}_m^p$ 은 모재의 등가 소성변형률 속도를 나타낸다.

2.2 소성 항복 조건식

2.2.1 Fleck-Gurson의 항복 조건식

Fleck 등⁽³⁾은 균일한 구형분말의 상호 접촉하의 소성변형을 해석하여 상대밀도 0.9 이하의 낮은 상대밀도를 갖는 분말 성형체의 소성 항복거동을 예측할 수 있는 소성 항복조건식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\Phi(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{\sqrt{5}p}{3P_y} \right)^2 + \left(\frac{5q}{18P_y} + \frac{2}{3} \right)^2 - 1 = 0$$

$$P_y = 2.97D^2 \frac{(D - D_0)}{(1 - D_0)} \sigma_m \quad (7)$$

여기서, p 와 q 는 각각 정수응력($= -\sigma_{kk} / 3$)과 유효응력($= \sqrt{3\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}} / 2$)을 나타내며, P_y 는 정수압 상태에서의 항복응력을 나타낸다.

Tvergaard^(14,15)는 Gurson⁽¹⁾이 제안한 상대밀도 0.9 이상인 분말성형체의 소성 항복조건식을 수정하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\Phi(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m} \right)^2 + 2q_1(1 - D) \cosh \left(-\frac{3q_2 p}{2\sigma_m} \right) - 1 - \{q_1(1 - D)\}^2 = 0 \quad (8)$$

여기서, q_1 과 q_2 는 각각 Tvergaard^(14,15)에 의하여 도입된 임의의 상수로서 q_1 과 q_2 의 값이 1인 경우 Gurson⁽¹⁾에 의하여 제안된 원래의 식이다.

분말상태에서 접촉변형에 의하여 치밀화가 일어나는 초기 상태에서 대략 상대밀도 0.9까지의 구간에 대하여 식 (7)을 사용하고 상대밀도 0.9 이상의 구간에 대하여 식 (8)을 사용함으로써 상대밀도의 전체 구간의 영역에서 분말 성형체의 소성변형거동을 해석할 수 있는 항복함수를 구성하였다. 또한, 식 (7)의 항복조건식은 분말간의 상호 접촉변형을 고려하므로 기공이 상호 연결되어 있고 식 (8)의 항복조건식은 변형이 진행됨에 따라 기공이 고립되어 중공구형을 이룬 경우를 고려함으로써 초기의 기공형상에서 고립된

구형의 기공으로의 변화거동이 연속적으로 변하는
 천이구간을 고려하였으며 천이구간에서 소성 항복합
 수 Φ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\Phi = \left(\frac{D_2 - D}{D_2 - D_1} \right) \Phi_1 + \left(\frac{D - D_1}{D_2 - D_1} \right) \Phi_2 = 0 \quad (9)$$

여기서 Φ_1 과 Φ_2 는 각각 Fleck 등⁽³⁾의 항복조건식
 (7)과 수정된 Gurson 의 항복조건식 (8)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.

2.2.2 혼합 분말의 항복조건식

본 논문에서는 Fleck 등⁽³⁾과 수정된 Gurson 의 모
 델을 조합하여 우선 연성분말과 강성분말의 치밀화 실
 험치를 잘 예측하도록 각 동종분말의 모재 물성치와
 Tvergaard^(14,15)에 의하여 도입된 임의의 상수 q_1 과 q_2
 값을 구하였다. 이렇게 구한 동종 분말의 항복합수들
 을 연성 분말과 강성분말의 부피비율과 접촉수의 비
 율에 따라 혼합하여 혼합분말의 항복합수를 결정하
 기위한 혼합방식을 연구하였다.

부피비율에 따른 항복조건식의 혼합

연성 분말과 강성분말의 부피비율에 따라 항복합
 수를 혼합하는 경우 혼합 분말의 항복합수는 다음과
 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi = f_s \Phi_s + f_h \Phi_h \quad (10)$$

여기서, Φ_s 는 연성분말의 항복합수이고, Φ_h 는 강
 성분말의 항복합수이며, f_s 와 f_h 는 각각 연성분말과
 강성분말의 부피 비율이다.

접촉수의 비율에 따른 항복조건식의 혼합

● 치밀화에 따라 접촉수가 일정하다고 가정한 경우
 접촉 종류에 따른 접촉수의 비율은 각 접촉의 비율
 에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_{SS} : Z_{SH} : Z_{HH} = f_s^2 : 2f_s f_h : f_h^2 \quad (11)$$

여기서 Z_{SS} , Z_{SH} 및 Z_{HH} 는 각각 연성-연성, 연성-
 강성 및 강성-강성 분말간의 접촉수를 나타낸다.^(9,10)

연성-연성, 연성-강성 및 강성-강성 구형분말이 서
 로 접촉할 때 두 구형체 사이의 중심거리의 변형량을
 각각 δ_{SS} , δ_{SH} 및 δ_{HH} 라 하면, 혼합 분말 전체의 변형
 량 δ 는 접촉종류에 따른 중심거리의 변형량과 각 접
 촉의 비율의 곱을 합한 것으로 가정하여 다음과 같이
 쓸 수 있다.

$$\delta = f_s^2 \delta_{SS} + 2f_s f_h \delta_{SH} + f_h^2 \delta_{HH} \quad (12)$$

Fig. 1 은 연성-연성, 연성-강성 및 강성-강성 분말
 이 서로 접촉할 때 일정 하중에 대한 변형된 형상의

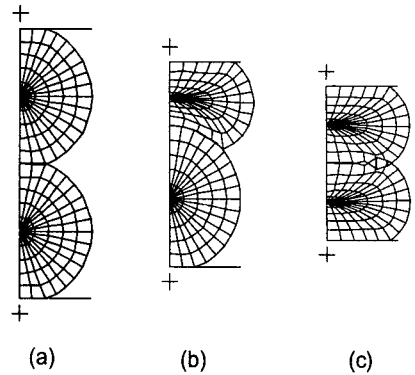


Fig. 1 Finite element meshes and finite element calculations for deformation of contacts with (a) tool steel powders, (b) mixed powders and (c) copper powders under the same load

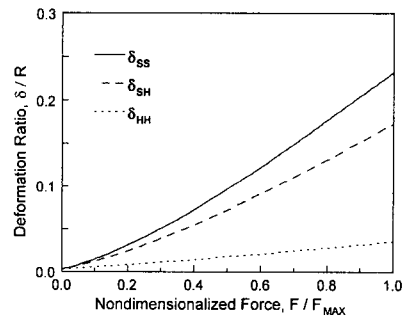


Fig. 2 Variation of deformation ratio with non-dimensionalized force for two particles of different or same contacts

유한요소해석의 결과이다. 같은 하중을 가했을 때 분
 말의 종류에 따른 변형량의 차이를 볼 수 있다. Fig. 2
 는 Fig. 1 의 유한요소해석에서 구한 하중과 각 분말
 간 중심거리의 변형량에 대한 관계를 나타낸 것이다.
 그림에서 δ_{SH} 는 δ_{SS} 와 δ_{HH} 의 사이에 놓이고 δ_{SS} 와
 δ_{HH} 와의 크기 차이의 비가 가해지는 하중과 무관하
 게 일정함을 알 수 있다.

따라서, 다른 분말간 중심거리의 변형량인 δ_{SH} 는
 동종 분말간 중심거리의 변형량인 δ_{SS} 와 δ_{HH} 로 쓸
 수 있다.

$$\delta_{SH} = \xi_1 \delta_{SS} + \xi_2 \delta_{HH} \quad (13)$$

여기서 ξ_1 과 ξ_2 는 δ_{SH} 의 δ_{SS} 와 δ_{HH} 대한 내분의
 계수이며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\xi_1 = \frac{\delta_{SH} - \delta_{HH}}{\delta_{SS} - \delta_{HH}}, \quad \xi_2 = \frac{\delta_{SS} - \delta_{SH}}{\delta_{SS} - \delta_{HH}} \quad (14)$$

본 논문에서는 ξ_1 과 ξ_2 를 분말의 종류에 따라 유한요소해석을 반복하여 구하지 않고 응력계수와 가공경화계수 만의 함수로 분말간의 접촉시 하중과 중심사이의 변형량 관계를 구한 Kim 등⁽¹²⁾의 식을 이용하였다. Kim 등⁽¹²⁾은 분말간 접촉시 가해지는 하중과 분말간 중심거리의 관계를 수식으로 나타내었는데, 그 식을 이용하면 구리와 공구강의 경우에 대해 $\xi_1 = 0.687$, $\xi_2 = 0.313$ 을 구할 수 있다.

식 (12)에 식 (13)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta = f_s(f_s + 2f_H\xi_1)\delta_{SS} + f_H(f_H + 2f_s\xi_2)\delta_{HH} \quad (15)$$

따라서, 구리와 공구강의 경우는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\delta = f_s(f_s + 1.374f_H)\delta_{SS} + f_H(f_H + 0.626f_s)\delta_{HH} \quad (16)$$

연성분말간의 접촉시 중심거리의 변형량 δ_{SS} 와 강성분말간의 접촉시 중심거리의 변형량 δ_{HH} 의 합으로 표현되는 혼합분말 전체의 변형량 δ 의 관계식을 항복함수 Φ 에 적용하면 혼합 분말전체의 항복함수 Φ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = f_s(f_s + 1.374f_H)\Phi_s + f_H(f_H + 0.626f_s)\Phi_H \quad (17)$$

• 치밀화에 따른 접촉수 증가를 고려한 경우

접촉수에 따른 항복 조건식의 혼합에 있어서 압력의 증가에 따른 분말간의 접촉수 증가를 고려한 Arzt⁽²⁾의 식을 이용하면 전체 변형량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{Z}(f_s^2 Z_{SS} \delta_{SS} + 2f_s f_H Z_{SH} \delta_{SH} + f_H^2 Z_{HH} \delta_{HH}) \quad (18)$$

여기서

$$Z = f_s^2 Z_{SS} + 2f_s f_H Z_{SH} + f_H^2 Z_{HH} \quad (19)$$

이다.

식 (18)의 변형량의 관계식을 이용하면 항복함수 Φ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{1}{Z} \{ f_s(f_s Z_{SS} + 1.374f_H Z_{SH})\Phi_s + f_H(f_H Z_{SS} + 0.626f_s Z_{SH})\Phi_H \} \quad (20)$$

2.3 Kim 등⁽¹²⁾의 모델

Kim 등⁽¹²⁾은 두 분말의 접촉의 종류에 따라 분말사이에 전달되는 힘이 서로 같다고 가정할 경우와 다르다고 가정할 경우에 대해 혼합분말의 치밀화 거동을 정수압 압축과 금형압축 하에서 예측하였다. 본 논문에서는 분말사이에 전달되는 힘은 접촉의 종류에 관계없이 서로 같다고 가정할 경우로 국한하여 해석결과를 적용하였다.

2.4 구성방정식의 유한요소 해석

미소역학적(micro-mechanical) 모델의 경우 실험식과 달리 모델이 적용되는 물질에 따라 치밀화에 있어 큰 차이를 보인다. 여러 가지 항복조건식들 가운데에 Fleck-Gurson 모델은 균일한 크기를 가지며 단단한 재료인 공구강 분말의 경우 소성 항복조건식이 압축실험치와 잘 일치하는 반면 스테인레스 강분말의 실험결과는 Shima 와 Oyane⁽¹⁶⁾의 소성 항복 조건식이 더 잘 일치함을 보였다.⁽¹³⁾ 따라서, 하나의 소성 항복조건식으로 동종분말 각각의 실험치를 잘 예측하도록 하기 위해서는 각 동종분말의 모재 물성을 수정하고 모델에 도입된 임의의 상수값을 달리 가정해야만 가능하다.

본 논문에서는 Fleck 등⁽³⁾과 수정된 Gurson 의 모델을 조합하여 우선 연성분말과 강성분말의 치밀화 실험치를 잘 예측하도록 각 동종분말의 모재 물성치와 Tvergaard^(14,15)에 의하여 도입된 임의의 상수 q_1 과 q_2 값을 구하였다. 이렇게 구한 구리분말과 공구강 분말 각각의 항복함수를 연성 분말과 강성분말의 부피비율과 접촉수의 비율에 따라 혼합하여 혼합분말의 항복함수를 결정하였다.

정수압 압축과 금형 압축을 해석하기 위해 혼합분말의 항복조건식을 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 의 사용자정의 서브루틴인 UMAT 에 입력하고 4 절점 축대칭 요소(CAX4)의 유한요소격자를 이용하여 해석하였다. 유한요소해석에 적용하는 구성방정식의 수치적분은 다른 논문^(4,13)에서 찾을 수 있으므로 언급하지 않았다. 금형 압축의 해석에는 분말과 금형사이의 마찰계수로서 $\mu = 0.17$ ⁽¹³⁾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 μm 와 45~75 μm 의 입자분포를 가지며 구리는 99.8%이상의 순도를 갖는다. Fig. 3 은 구리와 공구강 분말의 SEM 사진이다.

공구강 분말은 다른 금속 분말에 비해 경도와 항복강도가 매우 높으므로 상온에서 성형성이 좋지 않다. 따라서 성형을 용이하게 하기 위해서 폴리비닐 뷰티럴(Poly Vinyl Butyral, 이하 PVB)을 바인더(binder)로 사용하였다. PVB 1.0wt%를 자기 교반기(magnetic stirrer)를 이용하여 에틸알콜에 녹인 후 공구강 분말과 혼합하여 항온기에서 건조하였다.

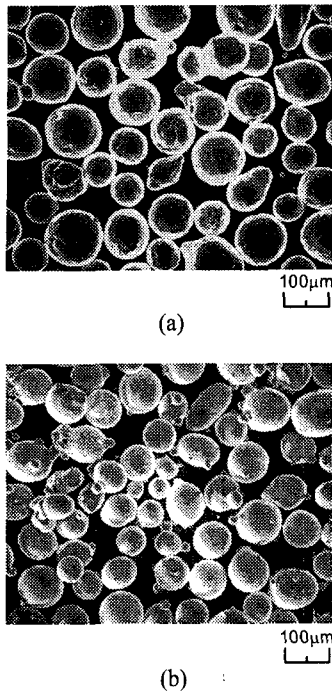


Fig. 3 Scanning electron micrograph of (a) copper and (b) tool steel powder

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

3.1 모재 시편의 제조

모재는 열간 등가압소결(hot isostatic pressing, HIP)에 의해 제조되었으며, 제조공정은 다음과 같다. 공구강 분말을 각각 내경 35.5mm, 두께 1.3mm인 스테인레스 스틸캔(Seamless 304 stainless steel)에 넣고, 400°C에서 5 시간동안 탈가스(degassing) 작업을 한 후 진공을 유지하면서 밀봉하였다. 진공 밀봉된 캔을 열간 등가압 성형기(Kobelco System 30T, Japan)에 넣은 후 1100°C에서 50MPa의 압력으로 1 시간 동안 열간 등가압 소결을 하였다.

열간 등가압 소결 실험이 끝난 시편은 기계가공을 통하여 원주 형태로 가공한 후 879°C의 수소 분위기에서 1 시간 동안 어닐링 하였다. 모재 시편의 최종 치수는 지름 10mm, 높이 12mm이며 상대밀도는 $D \geq 0.995$ 이다.

제조된 공구강 모재는 MTS 재료시험기를 사용하여 일정 하중속도(0.02 mm/sec)로 상온 일축압축실험을 수행하였다. 실험중 마찰의 영향을 줄이기 위하여

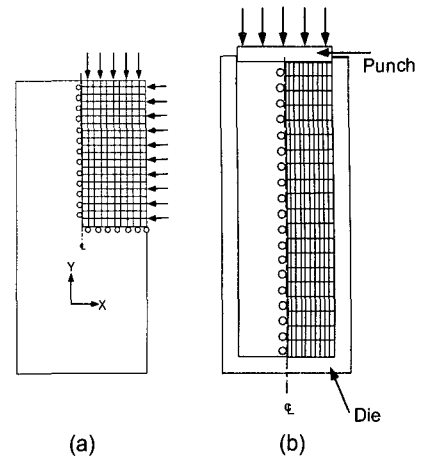


Fig. 4 Finite element meshes and boundary conditions for (a) cold isostatic pressing and (b) die compaction of mixed powder

시편과 압반 사이에 테프론을 삽입하였다. 또한 유동 응력을 측정하기 위하여 시편을 일정한 하중까지 압축한 후 압축된 시편의 높이와 직경을 측정하고 다시 압축하는 반복실험을 수행하였다.

구리는 Kim 등⁽¹²⁾이 구한 상대밀도 0.99의 구리모재의 소성거동 실험치를 사용하였다.

3.2 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 성형(ABB Autoclave Engineers, USA)에서 150~350 MPa의 성형압으로 냉간 정수압 압축 실험을 수행하였다. 성형된 시편 내부로 물이 침투하지 않도록 알키드 락카(alkyd lacquer)를 사용하여 0.005mm 두께의 코팅을 하고 아르키메데스법으로 밀도를 측정하였다.

3.3 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. 금형에서 일방향 압축으로 성형된 분말성형체를 금형에서 탈착한 후 성형체의 직경과 높이를 측정하여 시편의 밀도를 측정하였다.

4. 실험 및 해석 결과

Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 정수압 압축과 금형 압축

의 해석에 사용된 격자요소와 경계조건을 나타낸다. 정수압 압축의 경우 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이 y 축에 대한 축대칭과 x 축에 대한 대칭조건으로부터 전체 단면의 1/4에 대해서만 해석하였으며 금형 압축의 경우 y 축에 대한 축대칭이므로 전체 단면의 1/2에 대해서 해석하였다.

4.1 모재 실험

Fig. 5의 (a)와 (b)는 각각 구리와 공구강 모재의 일축 압축시 압축 진응력(true stress)과 소성변형률(plastic strain)의 관계를 나타내며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{ms} = \left(\frac{\sigma_{ms}}{480}\right)^{4.110}, \quad \epsilon_{mH} = \left(\frac{\sigma_{mH}}{1526}\right)^{9.996} \quad (21)$$

구리와 공구강 모재의 항복강도는 각각 149MPa과 574MPa이며, 탄성계수는 각각 110.3GPa과 274 GPa이다.

본 논문에서는 Fleck 등⁽³⁾과 수정된 Gurson의 모델을 이용한 유한요소해석과 각 동종분말의 치밀화 실험치의 비교를 통하여 Fleck-Gurson 모델이 각 동종분말의 실험치를 잘 예측할 수 있도록 모재 물성치와 임의의 상수 q_1 과 q_2 값을 구하였다.

구리 분말의 경우는 다음의 식으로 쓸 수 있다.

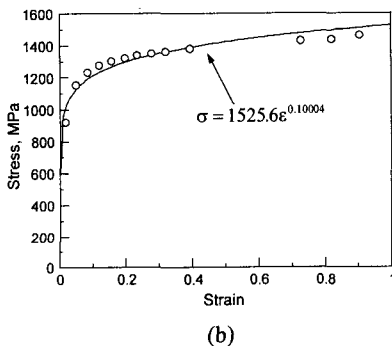
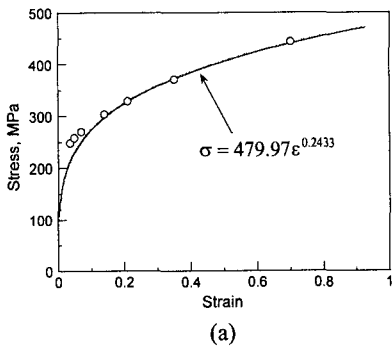


Fig. 5 Uniaxial stress-plastic strain relation for dense (a) copper and (b) tool steel

$$\epsilon_{ms} = \left(\frac{\sigma_{ms}}{205}\right)^{3.156}, \quad q_1 = 1.48, q_2 = 0.648 \quad (22)$$

공구강 분말의 경우는 다음의 식으로 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{mH} = \left(\frac{\sigma_{mH}}{1678}\right)^{9.996}, \quad q_1 = 2.48, q_2 = 0.748 \quad (23)$$

4.2 냉간 정수압 압축

Fig. 6은 여러 혼합비를 갖는 구리와 공구강 혼합 금속분말성형체의 냉간 정수압하에서 압력에 따른 상대밀도의 변화를 나타내는 실험치와 Kim 등⁽¹²⁾에 의한 계산치의 비교를 나타낸다. Kim 등⁽¹²⁾의 계산치는 초기 치밀화 단계에서의 실험치를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다. 그러나 Kim 등⁽¹²⁾에 의해 제안된 식은 치밀화의 방해가 일어나는 말기치밀화 거동을 정확히 예측하기는 어렵다.

Fig. 7(a), (b) 및 (c)는 냉간 정수압 압축하에서 여러 혼합비를 갖는 혼합분말의 압력에 대한 상대밀도 변화의 실험치와 부피비율 및 접촉수에 따라 구리와 공구강 분말의 항복함수를 혼합하여 얻은 구성방정식에 의한 계산치의 비교를 나타낸다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)를 비교해보면 접촉수를 고려하여 항복함수를 혼합한 경우가 부피비에 따라 항복함수를 혼합한 경우보다 실험치를 더 잘 예측함을 알 수 있다.

Fig. 7(c)는 접촉종류에 따른 접촉수의 비율로 항복함수를 혼합하되 Arzi⁽²⁾가 제시한 접촉수의 증가를 고려하여 구한 혼합분말의 항복함수인 식 (20)을 유한요소해석에 적용하여 해석한 결과이다. Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)를 비교해볼 때 접촉수의 증가를 고려한 경우가 실험치를 더욱 정확히 예측함을 알 수 있다.

4.3 냉간 금형 압축

Fig. 8은 여러 혼합비를 갖는 구리와 공구강 혼합

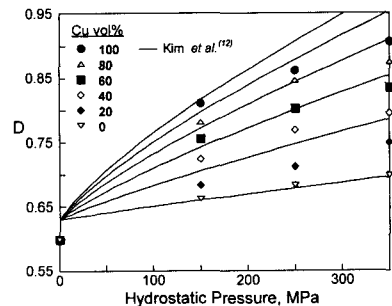


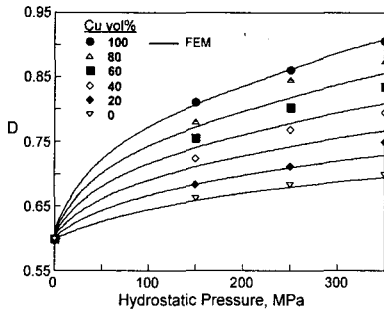
Fig. 6 Comparisons between experimental data and calculated results from the model by Kim et al.⁽¹²⁾ for the variation of relative density of mixed powders with pressure under cold isostatic pressing

분말의 냉간 금형 압축시 압력에 따른 상대밀도의 변화를 나타내는 실험치를 Kim 등⁽¹²⁾에 의해 제안된 식에 의한 계산치와 비교하여 나타낸 것이다. 정수압 압축의 경우와 마찬가지로 초기 치밀화의 경우 실험치를 비교적 잘 예측하나 압력이 커질수록 실험치를 정확히 예측하기는 어렵다.

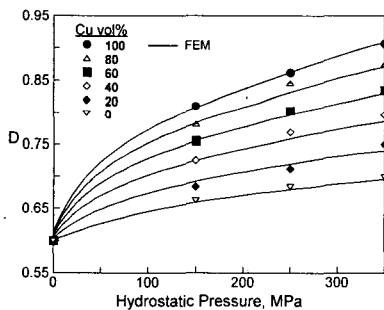
Fig. 9(a)와 (b)는 냉간 금형 압축의 경우 여러 혼합비를 갖는 혼합분말의 압력에 대한 상대밀도 변화의

실험치와 부피비율 및 접촉수에 따라 구리와 공구강 분말의 항복함수를 혼합하여 구한 구성방정식에 의한 계산치의 비교를 나타낸다.

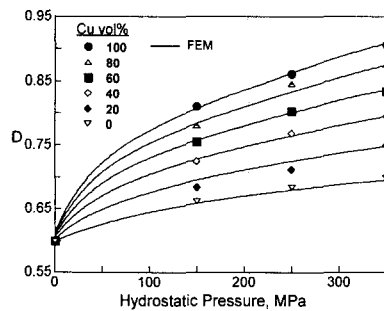
정수압 압축의 경우와 마찬가지로 접촉수를 고려하여 항복함수를 혼합한 경우가 부피비에 따라 항복함수를 혼합한 경우보다 실험치를 더 잘 예측함을 알



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Comparison between experimental data and finite element results from the proposed model mixed by (a) the volume fraction (b) the constant contact number and (c) the increasing contact number of copper powder for the variation of relative density with hydrostatic pressure of mixed powders under cold isostatic pressing

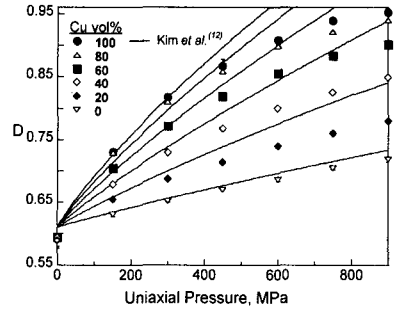
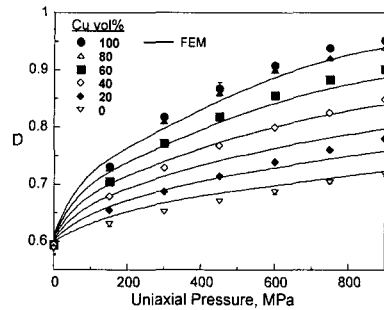
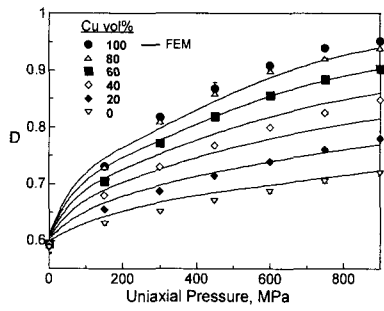


Fig. 8 Comparison between experimental data and calculated results from the model by Kim *et al.*⁽¹²⁾ for the variation of relative density of mixed powders with axial stress under die compaction



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison between experimental data and finite element results from the proposed model mixed by (a) the volume fraction (b) the constant contact number of copper powder for the variation of mixed relative density with axial stress of mixed powders under die compaction

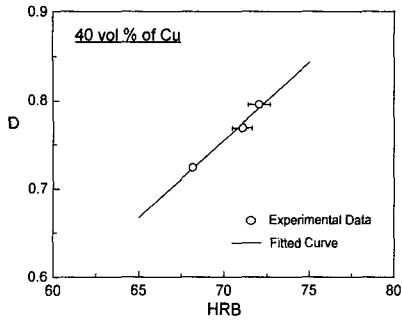


Fig. 10 Variation of relative density with Rockwell hardness for mixed powder compacts with 40 vol% of copper powder

수 있다.

분말 성형체의 상대밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있다.⁽¹⁷⁾ 분말 성형체의 경도와 상대밀도의 관계를 구하기 위하여 본 논문에서는 로크웰 B형 경도계(Rockwell 523T, Wilson, U.S.A.)를 사용하였는데 냉간 정수압 성형으로 제조한 시편을 아르키메데스방법으로 상대밀도를 측정하고 각 시편마다 3개의 경도 값을 측정하였다. 측정된 각 시편의 경도 값들을 평균하여 상대밀도와 경도의 관계식을 구하였다.

Fig. 10은 Cu 40 vol%의 혼합분말의 상대밀도와 로크웰 B형 경도치(HRB)의 관계를 나타내며 실험치를 보간하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$D = 1.754 \times 10^{-2} HRB - 0.4724 \quad (24)$$

Fig. 11(a)와 (b)는 일방향 금형압축시 가압력이 750MPa인 경우 성형체 내부의 상대 밀도분포와 변형된 형상을 보여주는 실험치와 유한요소해석의 결과를 각각 나타낸다. Fig. 11(a)는 식 (24)를 사용하여 로크웰 경도실험으로부터 구하였으며 Fig. 11(b)는 성형체와 금형사이의 마찰($\mu=0.17$)을 고려하여 접촉수에 따라 혼합한 항복조건식을 사용하여 구하였다. Fig. 11(a)에서 금형과 성형체 사이의 마찰의 영향으로 상대밀도는 성형체와 상부펀치 접촉면의 모서리 부근에서 가장 높고 금형 하부 접촉면의 모서리 부근에서 가장 낮음을 알 수 있으며 Fig. 11(b)의 유한요소 해석 결과는 이러한 실험치를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

상온 금형 압축에서 제조한 시편의 밀도분포를 구하기 위하여 시편을 높이 방향으로 절단한 후 절단면에서 경도를 측정하고 경도와 상대밀도의 관계식으로부터 시편 내의 상대밀도 분포를 간접적으로 구하였다. 전체의 1/2 단면에 대하여 가로방향은 2.8mm의 간격으로 4개씩 세로방향은 3mm의 간격으로 7개씩 총 28개의 격자를 만든 후 격자들의 적분점

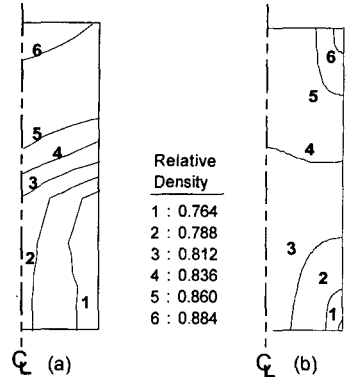


Fig. 11 Comparison between experimental data and finite element calculations for relative density contour plots of a mixed powder compact with 40 vol% of copper powder by single action pressing during die pressing under axial stress of 750MPa

(integral point)을 따라 1.58mm (1/16inch) 강구압자(hardened steel ball indenter)로 하중 100kg을 20초간 가하여 측정하였다. 이때, 가로 방향으로의 강구압자의 크기에 비해 격자가 작아 측정시 서로 간섭이 생기게 되는데 이를 없애기 위해 가로방향에 대해서는 시편의 중앙을 기준으로 서로 엇갈리게 배열하여 격자간의 간격이 5.6mm가 되게 하였다.

5. 결론

냉간 정수압 압축과 금형 압축 하에서 혼합분말의 치밀화에 대한 실험치와 제안한 항복함수를 이용한 유한요소 해석을 통해 혼합방식에 따른 치밀화결과를 비교검토 함으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Kim 등⁽¹²⁾의 모델은 같은 크기의 구리와 공구강의 혼합 분말의 냉간 압축 시 초기 치밀화 거동을 비교적 잘 예측하나 말기 치밀화에서는 실험치를 잘 예측하지 못함을 보였다.
- (2) 냉간 압축의 경우 접촉수의 비율에 따라 항복함수를 혼합한 경우가 부피비율에 따라 항복함수를 혼합한 경우보다 혼합분말의 치밀화를 보다 잘 예측하였다.
- (3) 접촉수의 비율에 따른 항복함수의 혼합방식에 있어 치밀화에 따라 분말간 접촉수의 증가를 고려한 경우는 그렇지 않은 경우보다 치밀화를 더 잘 예측하였다.

참고문헌

- (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, pp. 2~15.
- (2) Arzt, E., 1982, "The Influence of an Increasing Particle Coordination on the Densification of Spherical Powders," *Acta Metall.*, Vol. 30, pp. 1883~1890.
 - (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, pp. 1139~1162.
 - (4) Govindarajan, R. M. and Aravas, N., 1994, "Deformation Processing of Metal Powders: Part I - Cold Isostatic Pressing," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 36, No. 4, pp. 343~357.
 - (5) Lange, F. F., Atteraa, L., Zok, F. and Porter, J. R., 1991, "Deformation Consolidation of Metal Powders Containing Steel Inclusions," *Acta metall. mater.*, Vol. 39, No. 2, pp. 209~219.
 - (6) Besson, J. and Evans, A. G., 1992, "The Effect of Reinforcements on the Densification of A Metal Powder," *Acta metall. mater.*, Vol. 40, No. 9, pp. 2247~2255.
 - (7) Gurson, A. and McCabe, T., 1992, "Experimental determination of Yield Functions for Compaction of blended metal powders," *Proc. MPIF/APMI World Congress on Powder Metallurgy and Particular Materials*, 21-26 June, 1992, San Francisco, California, U.S.A..
 - (8) Turner, C. D. and Ashby, M. F., 1996, "The Cold Isostatic Pressing of Composite Powders -I. Experimental Investigations Using Model Powders," *Acta mater.*, Vol. 44, No. 11, pp. 4521~4530.
 - (9) Bouvard, D., 1993, "Modelling The Densification of Powder Composites by Power Law Creep," *Acta metall. mater.*, Vol. 41, No. 5, pp. 1413~1420.
 - (10) Zavaliangos, A. and Wen, J., 1997, "The Effects of Mixing Quality on the Densification of Heterogeneous Powder Mixtures by Pressure," *Proc. International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Process*, 21-23 July 1997, Grenoble, France, pp. 179~188.
 - (11) Storakers, B., Fleck, N. A. and McMeeking, R. M., 1999, "The Viscoplastic Compaction of Composite Powders," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, No. 4, pp. 785~816.
 - (12) 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, pp. 119~128.
 - (13) 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, pp. 366~373.
 - (14) Tvergaard, V., 1981, "Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions," *Int. J. Fracture*, Vol. 17, No. 4, pp. 389~407.
 - (15) Tvergaard, V., 1982, "On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids," *Int. J. Fracture*, Vol. 18, pp. 237~252.
 - (16) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285~291.
 - (17) 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, pp. 317~328.