

냉간압축하에서 혼합 금속분말의 치밀화 거동에 관한 유한요소해석

조장혁* · 조진호* · 김기태**

A Finite Element Analysis for Densification Behavior of Mixed Metal Powder under Cold Compaction

JangHyug Cho, JinHo Cho and KiTae Kim

Key Words : Densification behavior(치밀화 거동), Cold Isostatic Pressing(냉간 정수압 압축), Die Compaction(금형 압축), Yield Function(항복함수), 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 originally proposed by Fleck-Gurson for pure powder, a new mixed yield functions in terms of volume fractions and contact numbers of Cu powder were employed in the constitutive models. 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 단일 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⁽⁸⁾ 등은 연성 및 강성재료로 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. 이들의 모델들은 각기 다른 가정과 제약조건을 갖고 있는데, 최근에 Kim 등⁽¹²⁾은 이들의 연구를 바탕으로 같은 크기를 가지며 각기 다른 가공경화 거동을 갖는 연성분말과 강성분말의 혼합 분말에 대한 치밀화 거동 모델을 제안하여 그 계산치를 텅스텐과 구리의 혼합 분말에 대한 실험치와 비교하였다.

본 논문에서는 연성분말로는 구리 분말을 사용하고 강성분말로는 공구강 분말을 사용한 혼합 금속 분말에 대해 냉간 정수압 압축 실험과 냉간 금형압축 실험을 수행하였다. 그리고 먼저 실험치를 Kim 등⁽¹²⁾의 모델에 의한 계산치와 비교하여 혼합분말의 치밀화 경향을 파악하고 기존의 여러 소성 항복조건식들중 낮은 상대밀도의 범위에서 사용이 가능한 Fleck 등⁽³⁾의 소성 항복조건식과 상대밀도 0.9 이상의 높은 상대 밀도 범위에서 사용이 적합한 Gurson⁽¹⁾의 소성 항복

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

조건식을 조합하여 구한 소성 항복조건식을 단일분말 각각에 대해 혼합하여 해석을 수행하였다. 이때, 혼합 방법은 다음의 두 가지 방법을 사용하였다.

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

둘째, 혼합 분말 내의 접촉 종류에 따른 접촉수에 따라 혼합하였다. 이 때, 접촉종류에 따른 접촉수가 일정하다고 가정한 경우와 치밀화에 따라 접촉수가 변화하는 경우로 나누어 고찰하였다.

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 속도 성분 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 탄성변형률과 소성변형률의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

응력성분 σ_{ij} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 D_{ijkl}^e 는 4 차 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 $\dot{\lambda}$ 은 양의 스칼라 양이다.

질량 불변과 변형에너지 관계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서 σ_m 은 모재의 흐름응력, $\dot{\epsilon}_m^p$ 은 모재의 등가 소성변형률 속도를 나타낸다.

2.2 Kim 등⁽¹²⁾의 모델

Kim 등⁽¹²⁾의 논문에서는 두 분말의 접촉의 종류에 따라 분말사이에 전달되는 힘이 서로 같다고 가정한 경우와 다르다고 가정한 경우에 대해 혼합분말의 정

수압 압축과 금형압축 하에서의 치밀화 거동을 예측하였다. 본 논문에서는 분말사이에 전달되는 힘이 접촉의 종류에 관계없이 서로 같다고 가정한 경우로 국한하여 해석결과를 적용하였다.

2.3 단일 분말의 항복 조건식

Fleck 등⁽³⁾은 상대밀도 0.9 이하의 분말 성형체의 소성 항복조건식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\Phi_1(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{\sqrt{5}p}{3P_y} \right)^2 + \left(\frac{5q}{18P_y} + \frac{2}{3} \right)^2 - 1 = 0 \quad (7)$$

$$P_y = 2.97D^2 \frac{(D-D_0)}{(1-D_0)} \sigma_m \quad (8)$$

$$p = -\sigma_{kk} / 3, \quad q = \sqrt{3s_{ij}s_{ij}} / 2 \quad (9)$$

여기서 P_y 는 정수압 상태에서의 항복응력을 나타낸다. Kwon 등⁽¹³⁾은 Govindarajan 과 Aravas⁽⁴⁾에 의하여 사용된 방법과 같이 항복함수의 정점 부근을 작은 구형 항복함수로 대체하여 유한요소 해석에 적용하였다.

Tvergaard^(14,15)는 Gurson⁽¹⁾이 제안한 상대밀도 0.9 이상인 분말 성형체의 소성 항복조건식에 임의의 상수로 q_1 과 q_2 를 도입하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\Phi_2(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m} \right)^2 + 2q_1(1-D) \cosh \left(-\frac{3q_2 p}{2\sigma_m} \right) - 1 - \{q_1(1-D)\}^2 = 0 \quad (10)$$

Kwon 등⁽¹³⁾은 단일 분말의 소성 항복조건식에 대해 $D_1=0.75$ 에서 $D_2=0.9$ 까지의 천이구간으로 Fleck 등⁽³⁾의 모델과 수정된 Gurson⁽¹⁾의 모델을 혼합하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\Phi = \frac{D_2 - D}{D_2 - D_1} \Phi_1 + \frac{D - D_1}{D_2 - D_1} \Phi_2 \quad (11)$$

여기서 Φ_1 과 Φ_2 는 각각 Fleck 등⁽³⁾의 항복조건식인 (7) 식과 Gurson⁽¹⁾의 수정된 항복조건식인 (10) 식을 나타낸다.

2.4 혼합 분말의 항복조건식

Fleck⁽³⁾등의 모델과 수정된 Gurson⁽¹⁾의 모델을 혼합하여 얻은 Kwon 등⁽¹³⁾의 (11) 식으로부터 구리와 공구강 각각의 단일 분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있다. Fleck-Gurson 의 모델을 혼합분말에 적용하기 위해 단일 분말의 항복함수를 분말의 부피비율과 접촉 종류에 따른 접촉수에 따라 적용하여 항복함수를 혼합하였다.

2.4.1 부피비율에 따른 항복조건식의 혼합

부피비율에 따라 단일 분말의 항복함수를 혼합하

는 경우에 혼합 분말의 항복함수는 초기에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi = f_1\Phi_1 + f_2\Phi_2 \quad (12)$$

여기서 Φ_1 는 연성분말의 항복함수이고, Φ_2 는 강성분말의 항복함수이며, f_1 과 f_2 는 분말 각각의 부피 비율이다. 그러나 압력이 증가함에 따라 연성과 강성 각각의 집합체의 부피가 D_0/D_1 과 D_0/D_2 만큼의 비율로 줄어드는 사실로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi = \frac{f_1 D_2}{f_1 D_2 + f_2 D_1} \Phi_1 + \frac{f_2 D_1}{f_1 D_2 + f_2 D_1} \Phi_2 \quad (13)$$

여기서 D_1 과 D_2 는 각각 치밀화에 따른 연성 및 강성 분말의 상대밀도이다.

2.4.2 접촉수에 따른 항복조건식의 혼합

i) 접촉수가 접촉종류에 무관한 경우

단일 분말의 항복함수를 접촉 종류에 따른 접촉수에 따라 혼합한 경우에는 다른 분말간의 접촉의 변형이 단일 분말간의 접촉의 변형으로 표현될 수 있다고 가정하였다.

혼합 분말 전체의 변형량을 δ 라고 하면, 각 접촉종류에 따른 변형량과 각 접촉비율의 곱을 합한 것으로 가정하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta = f_1^2 \delta_{SS} + 2f_1 f_2 \delta_{SH} + f_2^2 \delta_{HH} \quad (14)$$

이 때, 변형량의 비에 따라 서로 다른 분말간의 변형량(δ_{SH})을 같은 분말간의 변형량(δ_{SS}, δ_{HH})으로 표현할 수 있다.

$$\delta_{SH} = \xi_1 \delta_{SS} + \xi_2 \delta_{HH} \quad (15)$$

ξ_1 과 ξ_2 는 연성분말과 강성분말 각각의 이중 분말에 대한 접촉변형량의 비율이며 Kim 등⁽¹²⁾에서 구한 변형률을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\xi_1 = \frac{\delta_{SH} - \delta_{HH}}{\delta_{SS} - \delta_{HH}} \left(= \frac{d_{HH} - d_{SH}}{d_{HH} - d_{SS}} \right)$$

$$\xi_2 = \frac{\delta_{SS} - \delta_{SH}}{\delta_{SS} - \delta_{HH}} \left(= \frac{d_{SH} - d_{SS}}{d_{HH} - d_{SS}} \right) \quad (16)$$

여기서 δ_{SS}, δ_{SH} 및 δ_{HH} 와 d_{SS}, d_{SH} 및 d_{HH} 는 연성-연성, 연성-강성 및 강성-강성 분말간 변형량과 거리를 나타낸다.

(14) 식에 (15) 식을 대입하면 다음과 같다.

$$\delta = f_1(f_1 + 2f_2\xi_1)\delta_{SS} + f_2(f_2 + 2f_1\xi_2)\delta_{HH} \quad (17)$$

구리와 공구강의 경우 $\xi_1 = 0.687$, $\xi_2 = 0.313$ 이므로 구리와 공구강 혼합 분말 전체의 변형량은

$$\delta = f_1(f_1 + 1.374f_2)\delta_{SS} + f_2(f_2 + 0.626f_1)\delta_{HH} \quad (18)$$

이다.

변형량 δ 와 항복함수 Φ 의 비례관계에서 혼합 분말전체의 항복함수는 치밀화 초기에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = f_1(f_1 + 1.374f_2)\Phi_1 + f_2(f_2 + 0.626f_1)\Phi_2 \quad (19)$$

그러나 밀도가 증가함에 따른 구리와 공구강의 집합체의 부피 변화로부터 (13)식과 마찬가지로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi = \frac{f_1(f_1 + 1.374f_2)D_2}{f_1(f_1 + 1.374f_2)D_2 + f_2(f_2 + 0.626f_1)D_1} \Phi_1 + \frac{f_2(f_2 + 0.626f_1)D_1}{f_1(f_1 + 1.374f_2)D_2 + f_2(f_2 + 0.626f_1)D_1} \Phi_2 \quad (20)$$

ii) 접촉종류에 따라 접촉수가 변하는 경우

접촉비에 따른 항복 조건식의 혼합에 있어서 압력의 증가에 따른 분말간의 접촉수 증가를 고려한 Arzt⁽²⁾의 식을 이용하면 접촉비율의 보다 정확한 관계를 구할 수 있다. 전체 변형량은

$$\delta = \frac{1}{2}(f_1^2 Z_{SS} \delta_{SS} + 2f_1 f_2 Z_{SH} \delta_{SH} + f_2^2 Z_{HH} \delta_{HH}) \quad (21)$$

이며, 여기서

$$Z = f_1^2 Z_{SS} + 2f_1 f_2 Z_{SH} + f_2^2 Z_{HH} \quad (22)$$

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

이 경우에도 변형량과 항복함수의 비례관계로부터 혼합분말의 항복함수를 구하면 다음과 같다.

$$\Phi = \{f_1(f_1 Z_{SS} + 1.374f_2 Z_{SH})D_2 \Phi_1 + f_2(f_2 Z_{HH} + 0.626f_1 Z_{SH})D_1 \Phi_2\} / \{f_1(f_1 Z_{SS} + 1.374f_2 Z_{SH})D_2 + f_2(f_2 Z_{HH} + 0.626f_1 Z_{SH})D_1\} \quad (23)$$

2.5 구성방정식의 유한요소 해석

혼합 분말의 항복함수를 유한요소 해석에 적용하여 모델을 검증하였다. 미소역학적(micro-mechanical) 모델의 경우 실험식과 달리 모델이 적용되는 물질에 따라 치밀화에 있어 오차를 보인다. 따라서 미소역학적 모델의 적용을 위해서는 물성을 수정하여 모델의 타당성을 검증할 수 있다. 본 논문에서는 Fleck-Gurson 모델에 대해 단일 분말의 치밀화 실험치를 가장 잘 예측하는 물성치를 찾고 이를 혼합 분말의 항복함수에 적용하였다.

위의 방법으로 얻은 구리와 공구강의 혼합 분말의 항복함수를 정수압 압축과 금형 압축에 대해 해석하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 사용자정의 서브루틴인 UMAT에 입력하고 4절점 축대칭 요소(CAX4)의 유한요소격자를 이용하여 해석하였다.

해석에는 분말과 금형사이의 마찰계수로서 $\mu=0.17$ 을 사용하였다.

3. 실험

3.1 시료의 준비

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

공구강 분말은 높은 항복강도로 인해 성형성이 좋지 않으므로 폴리비닐부티릴(PVB)을 바인더(binder)로 사용하여 질량비 0.1%의 PVB가 코팅된 공구강 분말을 얻었다.

이와 같이 준비한 구리분말과 공구강분말은 균일한 혼합분포를 갖도록 Gravity Mixer에서 1시간이상 혼합하였다.

3.2 모재 실험

공구강 모재를 만들기 위해 공구강 분말을 스테인레스 스틸 캔에 넣고, 400°C 에서 1시간동안 탈가스(degassing) 작업하여 용접 밀봉한 후 1100°C 에서 50MPa로 1시간 동안 유지했다. 이렇게 얻어진 상대 밀도 99.7%의 공구강 모재를 길이 12mm, 지름 10mm로 가공하여 수소분위기에서 879°C 로 1시간 동안 어닐링(annealing)하였다. 제조된 공구강은 MTS를 사용하여 압축속도 0.02 mm/sec로 상온 일축압축실험을 하였다. 시편과 압반 사이에 테프론 막을 삽입하여 마찰을 최소화하였다.

구리는 Kim 등⁽¹²⁾이 구한 99%의 구리모재의 소성거동 실험치를 사용하였다.

3.3 냉간 정수압 압축 실험

냉간 정수압 압축실험을 위해 혼합분말을 고무몰드로 싸고 진공 밀봉하였다. 고무몰드는 실리콘 재질로서 두께 약 1mm, 외경은 약 13mm, 길이 약 23mm의 원통형이다. 진공밀봉된 혼합분말을 0~350 MPa의 압력으로 냉간 정수압 성형하였다. 성형된 시편 내부로 물이 침투하지 않게 페인트를 사용하여 코팅하여 아르키메데스 비중법으로 밀도를 측정하였다.

3.4 냉간 금형 압축 실험

준비된 혼합분말을 지름 11.28mm의 초경 금형에 높이 약 30mm만큼 채워 넣고 초기 충전 밀도를 얻기 위해 탭핑(tapping)을 하여 초기 충전 밀도를 얻었다. 탭핑시에 상하 좌우로 뒤집어가며 두 분말의 분리를 막기 위해 주의하였다. 충전된 분말을 0~900 MPa의

압력으로 일방향 압축하였다. 압축 시에 금형 벽면과 분말사이의 마찰을 줄이기 위해 탄소 윤활제를 금형 벽면에 얇게 발랐다. 성형된 분말시편은 탈착 전에 직경과 높이를 측정하여 밀도를 측정하였다.

4. 실험 및 해석 결과

4.1 모재 실험

구리 모재와 공구강 모재의 일축압축시 압축진응력(true stress)과 소성변형률(plastic strain)의 관계에 대한 실험치는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{ms} = \left(\frac{\sigma_{ms}}{480} \right)^{4.110}, \quad \epsilon_{mH} = \left(\frac{\sigma_{mH}}{1526} \right)^{9.996} \quad (24)$$

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

다음은 본 논문의 혼합분말에 대한 항복거동식에 사용된 수정된 물성의 데이터이다.

$$\epsilon_{ms} = \left(\frac{\sigma_{ms}}{205} \right)^{3.156}, \quad \epsilon_{mH} = \left(\frac{\sigma_{mH}}{1678} \right)^{9.996} \quad (25)$$

4.2 냉간 정수압 압축

Fig. 1은 여러 혼합비를 갖는 구리와 공구강 혼합분말의 냉간 정수압 압축시 압력에 따른 상대밀도의 변화를 측정된 실험치를 Kim 등⁽¹²⁾의 해석에 의한 계산치와 비교하여 나타낸 것이다. 낮은 압력에서 실험치를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다.

Fig. 2(a)는 구리와 공구강 분말의 항복함수인 (11)식을 이들의 부피비율에 따라 혼합하여 얻은 (13)식을 FEM에 적용하여 해석한 결과를 실험치와 비교하

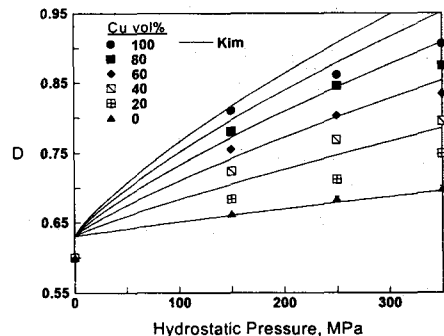
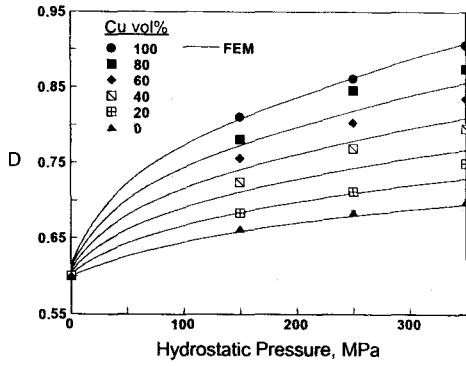
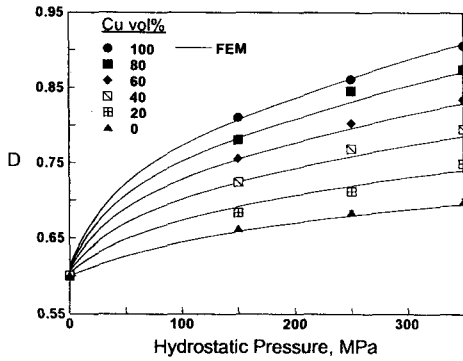


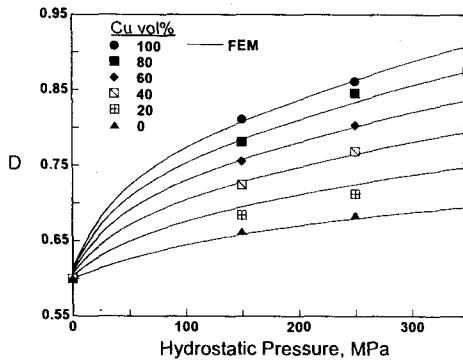
Fig.1 Comparison between experimental data and calculated results from the model by Kim *et al.*⁽¹²⁾ for the variation of relative density of mixed powders with pressure under cold isostatic pressing



(a)



(b)



(c)

Fig.2 Experimental data for the variation of relative density of mixed powders with pressure under cold isostatic pressing and finite element results from the yield function mixed by (a)the volume ratio of each powder, (b)the contact ratio of each contact type and (c)the contact ratio of each contact type regarding the number of contacts from Arzt⁽²⁾

여 나타낸 것이다.

Fig. 2(b)는 접촉종류에 따른 접촉비율로 단일분말

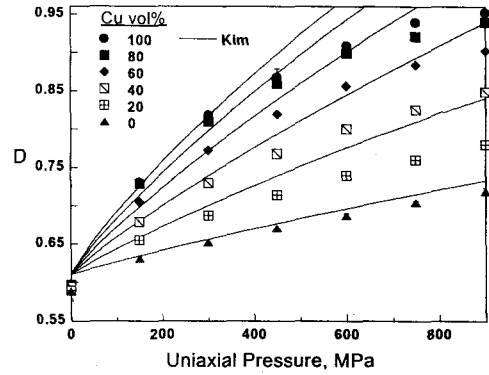


Fig.3 Comparison between experimental data and calculated results from the model by Kim *et al.*⁽¹²⁾ for the variation of relative density of mixed powders with axial stress under cold die compaction

의 항복함수를 혼합하여 구한 혼합 분말의 항복함수인 (20) 식을 FEM 에 적용하여 해석한 결과를 실험치와 비교하여 나타낸 것이다. 앞서 부피비에 따라 항복함수를 혼합한 경우의 해석 결과인 Fig. 2(a)에 비해 실험치에 가깝게 예측함을 알 수 있다.

Fig. 2(c)는 접촉종류에 따른 접촉비율로 항복함수를 혼합하되 Arzt⁽²⁾가 제시한 접촉수의 증가를 고려하여 구한 혼합분말의 항복함수인 (23) 식을 FEM 에 적용하여 해석한 결과이다. Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)와의 비교로부터 알 수 있듯이 실험치에 더욱 근사함을 알 수 있다.

4.3 냉간 금형 압축

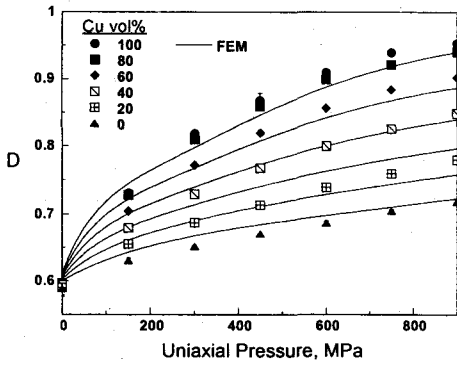
Fig. 3은 여러 혼합비를 갖는 구리와 공구강 혼합 분말의 냉간 금형 압축시 압력에 따른 상대밀도의 변화를 측정된 실험치를 Kim 등⁽¹²⁾의 해석에 의한 계산치와 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)는 구리와 공구강 분말 각각의 항복거동함수를 분말의 부피비에 따라 혼합하여 구한 항복함수인 (13) 식을 FEM 에 적용하여 얻은 금형압축의 해석 결과를 실험치와 비교하여 나타낸 것이다.

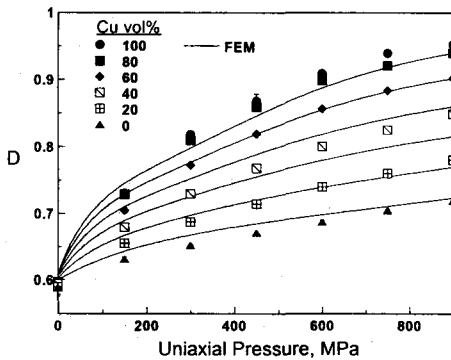
Fig. 4(b)는 접촉 종류에 따른 접촉비율에 따라 항복함수를 혼합하여 얻은 혼합분말의 항복함수인 (20) 식을 FEM 에 적용하여 금형압축에 대해 해석한 결과를 실험치와 비교하여 나타낸 것이다.

5. 결론

혼합분말의 치밀화에 대한 냉간 정수압 압축과 금형 압축 실험과 유한요소 해석을 통해 단일 분말에 대한 항복함수를 혼합분말에 적용하기 위한 혼합방식



(a)



(b)

Fig.4 Experimental data for the variation of relative density of mixed powders with axial stress under cold die compaction and finite element results from the yield function mixed by (a) the volume ratio of each powder and (b) the contact ratio of each contact type

을 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Kim 등⁽¹²⁾의 모델은 같은 크기의 구리와 공구간의 혼합 분말의 냉간 압축 시 초기 치밀화 거동을 비교적 잘 예측하였다.
2. 접촉비율에 따라 항복함수를 혼합한 경우가 부피비율에 따라 항복함수를 혼합한 경우보다 혼합분말의 치밀화를 보다 정확히 예측하였다.
3. 접촉비율에 따른 항복함수의 혼합방식에 있어 분말간 접촉수의 증가를 고려한 경우는 그렇지 않은 경우보다 치밀화를 더 정확하게 예측하였다.

참고문헌

(1) A. L. Gurson, "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, 1977, pp. 2-15.
 (2) E. Arzt, "The Influence of an Increasing Particle Coordination on the Densification of Spherical Powders," Acta Metall., Vol. 30, 1982, pp. 1883-1890.
 (3) N. A. Fleck, L. T. Kuhn and R. M. McMeeking, "Yielding of Metal Powder Bonded by Isolated Contacts," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 40, No. 5, 1992, pp. 1139-1162.
 (4) R. M. Govindarajan and N. Aravas, "Deformation Processing of Metal Powders: Part I-Cold Isostatic Pressing," Int. J. Mech. Sci., Vol. 36, No. 4, 1994, pp. 343-357.
 (5) F. F. Lange, L. Atteraa, F. Zok and J. R. Porter, "Deformation Consolidation of Metal Powders Containing Steel Inclusions," Acta metall. mater., Vol. 39, No. 2, 1991, pp. 209-219.
 (6) J. Besson and A. G. Evans, "The Effect of Reinforcements on the Densification of A Metal Powder," Acta metall. mater., Vol. 40, No. 9, 1992, pp. 2247-2255.
 (7) A. Gurson and T. McCabe, "Experimental determination of Yield Functions for Compaction of blended metal powders," Proc. MPM/APMI World Congress on Powder Metallurgy and Particular Materials, 21-26 June, San Francisco, California, U.S.A., 1992.
 (8) C. D. Turner and M. F. Ashby, "The Cold Isostatic Pressing of Composite Powders -I. Experimental Investigations Using Model Powders," Acta mater., Vol. 44, No. 11, 1996, pp. 4521-4530.
 (9) D. Bouvard, "Modelling The Densification of Powder Composites by Power Law Creep," Acta metall. mater., Vol. 41, No. 5, 1993, pp. 1413-1420.
 (10) A. Zavaliangos and J. Wen, "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, 1997, pp. 179-188.
 (11) B. Storakers, N. A. Fleck and R. M. McMeeking, "The Viscoplastic Compaction of Composite Powders," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 47, No. 4, 1999, pp. 785-816.
 (12) K. T. Kim, J. H. Cho and J. S. Kim, "Cold Compaction of Composite Powders," ASME J. Eng. Mat. Tech., Vol. 122, No. 1, 2000, pp. 119-128.
 (13) Y. S. Kwon, H. T. Lee and K. T. Kim, "Analysis for Cold Die Compaction of Stainless Steel Powder," ASME J. Eng. Mat. Tech., Vol. 119, 1997, 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