혼합 금속 분말의 고온 치밀화 거동

조 진 호 *, 김 기 태 **

(1999 년 4 월 14 일 접수)

Densification Behavior of Mixed Metal Powders under High Temperature

JinHo Cho and KiTae Kim

Key Words : Constitutive Model(구성모델), Densification(치밀화), Finite Element Analysis(유한요소 해석), Hot Isostatic Pressing(열간 등가압 소결), Hot Pressing(금형 압축), Mixed Metal Powders(혼합 금속 분말), Power-Law Creep(멱수법칙 크리프)

Abstract

Densification behaviors of mixed metal powder under high temperature were investigated. Experimental data of mixed copper and tool steel powder with various volume fractions of Cu powder were obtained under hot isostatic pressing and hot pressing. By mixing the creep potentials of McMeeking and co-workers and of Abouaf and co-workers originally for pure powder, the mixed creep potentials with various volume fractions 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 for densification of mixed powder under hot isostatic pressing and hot pressing. Finite element calculations by using the creep potentials of Abouaf and co-workers agreed reasonably well with experimental data, however, those by McMeeking and co-workers underestimate experimental data as observed in the case of pure metal powders.

1. 서 론

분말야금법은 주조나 단조와 같은 기존의 성형 방법에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 특히 서로 다른 물질의 혼합이 용이하다는 장점은 다른 제조 방법에 의해서는 얻을 수 없는 우수한 물리적, 기계적 특성을 가진 제품의 생산을 가능하게 한다. 그 예로 용접봉, 용접 총의 접촉 침과 같이 우수한 전도성을 가지면서도 고강도인 텅스텐-구리 복합체[1,2]는 텅스텐의 열팽창계수가 작은 단점과 구리의 기계적 강도가 낮은 단점이 보완된 복합재료의 대표적인 예이다. 이러한 복합체의 제조는 강성재료와 연성재료는 용융점이 크게 다르기 때문에 분말 야금(powder metallurgy)에 의한 방법이 가장 적절하다. 그러나 혼합분말의 성형은 그 치밀화 기구가 복잡하기 때문에 동종 분말에 비해 그 연구가 많이 되어 있지 않고 최근에 와서 주로 국외에서 연구가 진행되고 있는 실정이다.

Bouvard,[3] Storakers 등[4] 및 Kim 등 [5]은 Arzt[6]의 모델을 바탕으로 혼합분말의 치밀화에 대한 이론적 모델을 제안하였다. Bouvard[3]는 같은 크기를 갖는 구형의 연성분말과 강체분말이 섞인 혼합분말이 멱수법칙 크리프를 따른다는 가정 하에서 정수압 하에서의 치밀화 거동을 예측하는 모델을 제안하였다. Storakers 등[4]은 서로 다른 크기를 갖는 구형의 연성분말과 강성분말이 같은 경화계수와 멱수법칙 크리프계수를 갖는다는 가정 하에서 정수압과 금형 압축 하에서의 혼합 금속분말의 치밀화 거동을 예측하는 모델을 각각 제안하였다. 또한 Kim 등[5]은 냉간 정수압 압축과 냉간 금형 압축에서 다양한 구리의 혼합비를 가지는 구리와 텅스텐 혼합 금속분말의 치밀화 거동을 예측하는 식을 유도하였다.

* 포항공과대학교 대학원
** 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : korean@postech.ac.kr
TEL : (0562)279-2164 FAX : (0562)279-5899

최근에 Yamaguchi 등[7]은 혼합분말의 부피 분율과 소결 온도가 소결체의 밀도와 경도에 미치는 영향을 조사하였다. Delie 와 Bouvard[8]는 구형분말과 다양한 모양을 가지는 강체분말의 배열에 관한 유한 요소 해석을 통해 150℃의 정수압 압축과 금형 압축에서의 혼합분말의 치밀화 거동을 해석하였다. 그러나 이러한 모델은 일반적인 하중하에서의 혼합분말의 거동을 파악하는데에 직접적으로 사용할 수 없는 것이고 고온에서 구성모델을 사용한 유한요소해석과 실험치의 비교는 실험치가 부족하고 혼합분말의 치밀화 과정이 복잡하여 아직까지 시도된 적이 없었다.

본 논문에서는 고온에서의 혼합분말의 치밀화 거동을 예측하기 위하여 구리와 텅스텐의 열간 등가압 소결과 고온 금형 압축 실험을 수행하였다. 또한, Abouaf 등[9]과 McMeeking 등[10,11]이 제안한 멱수 법칙 크리프에 대한 각각의 구성 모델을 혼합분말에 적용하기 위하여 각 모델의 크피프 포텐셜을 연성 분말과 강성 분말 각각의 부피분율에 따라 혼합하여 혼합 분말의 치밀화 모델로 제안하였다. 혼합된 크리프 포텐셜을 유한요소해석에 적용하여 열간 등가압 소결에서 용기의 영향과 고온 금형 압축에서 마찰의 효과를 조사하였고 혼합분말 성형체의 밀도분포와 비교 하였다.

2. 실 험

본 실험에서 연성분말로 사용된 구리 분말(Pyron, USA)은 가스분사법으로 제조된 125~150μm 사이의 입자 크기를 가진 구형의 분말이며 이론 밀도는 8.94g/cm^3 이다. 강성분말로 사용된 D7 공구강 분말(Anval Inc., Sweden)은 가스 분사법으로 제조된 125~150μm 사이의 입자 크기를 가진 구형의 분말이며 이론 밀도는 7.6g/cm^3 이다.

분말 표면의 산화막과 불순물을 제거하기 위해 구리 분말을 300℃에서 45 분 동안 수소분위기에서 환원처리를 하였다. 구리 분말과 공구강 분말을 중력 혼합기(gravity mixer)를 이용하여 균일하게 섞어 공구강 분말 부피에 대해 0, 25, 50, 75, 100%의 구리 분말의 혼합비율을 갖는 혼합분말을 만들었다.

2.1 열간 등가압 소결 실험

실험에 사용된 열간 등가압 소결장치(Kobelco System 30T, Kobe steel)는 온도와 압력을 프로그램하여 자동으로 제어할 수 있다. 열간 등가압 소결에 사용되는 시편을 제조하기 위하여 안지름 23.4mm, 두께 1mm 의 스테인리스 강(Stainless Steel 304)용기와 위아래를 막을 수 있는 두께 1mm 의 뚜껑, 탈 가스 작업시 배기관으로 사용되는 지름 8mm 의 스테인리스 강관을 사용하였다. 용기는 분말을 채우기 전에 불순물의 제거를 위해 묽은 염산으로 세척하였다. 용기에 분말 115g 을 채우고 충진기로 충전하여 초기 상대밀도가 0.62 가 되도록 하였다. 그 후 용기의 윗뚜껑을 용접하고 용기 내부와 분말에 있는 불순물을 제거하기 위하여 400℃를 유지하면서 5 시간 동안 탈가스 작업을 하였다. 탈가스 작업 후 프레스로 배기관(스테인리스 스틸관)을 압착하여 누른 후 이 부분을 용접하였다.

열간 등가압 소결은 600℃에서 50 MPa 과 25 MPa 로 각각 60 분까지 실험하였다. 실험 스케줄은 실험압력에 따라서 다음과 같으며 실험초기에는 온도와 압력을 동시에 상승시켰다. 50MPa 의 경우는 온도가 300℃에 도달했을때 온도를 일정하게 유지하고 압력만 가하여 실험압력까지 상승시킨후 온도를 다시 실험온도까지 상승하였다. 25MPa 의 경우에는 온도와 압력을 동시에 실험조건까지 상승하였다. 열간 등가압 소결중 실험의 시작점은 온도와 압력이 모두 실험조건에 도달한 때이며 유지시간은 시작점으로부터 온도와 압력을 일정하게 유지한 시간이다.

시편의 밀도는 부피와 질량으로 구하였으며 상대밀도는 혼합분말의 이론밀도를 사용하였다.

$$\rho_{mixed} = f_S\rho_S + f_H\rho_H \quad (1)$$

여기서 ρ_S 와 ρ_H 는 각각 연성분말과 강성분말의 이론 밀도를 나타내며 f_S 와 f_H 는 각각 연성분말과 강성분말의 부피분율을 나타낸다.[3~5]

2.2 고온 금형 압축 실험

고온 금형 압축 실험은 MTS 재료 시험기(MTS Axial-Torsional Servohydraulic Tester)에 진공로를 부착하여 사용하였다. 고온압축에 사용한 금형과 펀치는 흑연으로 제작하였으며 금형의 내경은 11.28mm 이고 외경은 38.00mm 이다.

실험을 위한 예비성형체는 혼합분말 7g 을 금형에 부어 넣고 하중과 하중 속도제어가 가능한 만능재료시험기(UDH-50, Shimadzu, Japan)를 사용하여 50 MPa 의 압력으로 가압하였다. 이 상태에서 가열로 내부에 분말이 담긴 금형을 장착한 후 진공상태(10^{-4}torr)에서 실험 온도까지 10℃/min 로 승온하였다. 실험 온도에 도달하면 시편이 열적 평형상태가 되도록 20 분 동안 온도를 유지한 후 실험하중까지 압축하고 정해진 시간동안 하중을 일정하게 유지하였다.

실험 후 하중을 제거하고 가열로 안에서 시편과 금형을 서서히 냉각시켰다. 성형체의 밀도는 열간 등가압 소결과 같은 방법을 사용하여 구하였다. 실험은 600℃에서 50MPa 과 25MPa 의 압력을 각각 가하여 최장 60 분까지 유지하였다.

2.3 고온 압축 크리프 실험

멱수 법칙 크리프에서의 크리프 지수 n 과 Dorn 상수 A 는 모재의 일축 인장 크리프 혹은 압축 크리프 실험에 의해 결정할 수 있다. 본 논문에서는 이론 밀도를 갖는 구리 모재의 시편을 만들기 위해 구리 분말을 열간 등가압 소결한 후 기계 가공하였다. 가공된 시편의 최종치수는 직경 7mm 와 높이 10mm 이다.

고온 압축 크리프 실험은 가열로가 장착되어 있는 MTS 재료 시험기로 600℃의 다양한 하중하에서 수행하였고 고온 변위측정 장치를 사용하여 변형률을 측정하였다.[12]

3. 이 론

3.1 Abouaf 등[9]의 모델

Abouaf 등[9]은 분말 성형체의 치밀화에 영향을 미치는 상당 Mises 응력 σ_{eq}을 정수응력, 편차응력 및 상대밀도의 함수로 나타내었다.[9,13]

$$\sigma_{eq}^{\ 2} = f(D)\sigma_{kk}^{\ 2} + c(D)\sigma_e^{\ 2} \tag{2}$$

여기서 $f(D)$와 $c(D)$는 각각 상대밀도의 함수로서 실험을 통하여 구할 수 있다. $f(D)$와 $c(D)$는 이론 밀도 $D=1$에서는 각각 0 과 1 의 값을 갖게 되며 등가응력 σ_{eq}는 통상적인 유효 응력(Mises stress)이 된다.

Abouaf 등[9]은 크리프 변형률 속도를 등가응력과 온도에 의존하는 점소성 포텐셜로부터 다음과 같이 구하였다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{\sigma_{eq}}\frac{\partial\Omega}{\partial\sigma_{eq}}\left[\frac{3}{2}c(D)\sigma'_{ij} + f(D)\sigma_{kk}\delta_{ij}\right] \tag{3}$$

또한, Besson 과 Evans[13]는 모재에 대한 점소성 구동력과 분말 성형체에 대한 점소성 구동력이 같다는 가정으로부터 식 (3)를 다음과 같이 나타내었다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{D\dot{\varepsilon}_o\sigma_{eq}^{\ n-1}}{\sigma_o^{\ n}}\left[\frac{3}{2}c(D)\sigma'_{ij} + f(D)\sigma_{kk}\delta_{ij}\right] \tag{4}$$

3.2 McMeeking 등[10,11]의 모델

McMeeking 등[10,11]은 일반적으로 금속 분말의 치밀화 거동을 상대밀도가 0.9 이하의 초기 단계와 0.9 이상인 말기 단계의 두 단계로 크게 나누어 다음과 같은 치밀화 구성방정식들을 유도하였다.

초기단계에서 금속 분말의 치밀화 거동을 위해 Kuhn 과 McMeeking[10]은 접촉된 상호 입자의 크리프 변형을 모델링하여 크리프 포텐셜 Ψ과 크리프 변형률 속도식 $\dot{\varepsilon}_{ij}$을 각각 다음과 같이 구하였다.

$$\Psi = \frac{\dot{\varepsilon}_o\sigma_o}{n+1}\frac{27\pi}{16\sqrt{3}}\left(\frac{D-D_o}{1-D_o}\right)^{1/2} \times\left\{\frac{(1-D_o)}{3D^2(D-D_o)}\left[\left(\frac{|\sigma_m|}{\sigma_o}\right)^{(n+1)/n} + \left(\frac{2\sigma_e}{3\sigma_o}\right)^{(n+1)/n}\right]\right\}^n \tag{5}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_o\frac{27\pi}{16\sqrt{3}}\left(\frac{D-D_o}{1-D_o}\right)^{1/2}\left\{\frac{(1-D_o)}{3D^2(D-D_o)}\right\}^n \times\left\{\left(\frac{|\sigma_m|}{\sigma_o}\right)^{(n+1)/n} + \left(\frac{2\sigma_e}{3\sigma_o}\right)^{(n+1)/n}\right\}^{n-1} \times\left\{\left(\frac{|\sigma_m|}{\sigma_o}\right)^{1/n}(\mathrm{sign}\sigma_m)\frac{1}{3}\delta_{ij} + \left(\frac{2\sigma_e}{3\sigma_o}\right)^{1/n}\frac{\sigma'_{ij}}{\sigma_e}\right\} \tag{6}$$

식 (5)과 (6)에서 D_o, σ_m , σ'_{ij} 및 σ_e는 각각 분말 성형체의 초기 상대밀도, 정수 응력, 편차 응력 및 등가 응력을 나타내며 $\dot{\varepsilon}_o$, σ_o 및 n 는 각각 모재의 기준 변형률 속도와 기준 응력 및 멱수법칙 크리프 상수이다.

또한, 말기 단계에서의 치밀화 거동을 위해 Sofronis 와 McMeeking[11]은 응력 공간에서 에너지 소산율(energy dissipation rate) $\tilde{\Omega}$가 일정해지는 곡면을 유한요소해석에서 근사화 하여 크리프 포텐셜 Ψ과 크리프 변형률 속도식 $\dot{\varepsilon}_{ij}$을 각각 다음과 같이 구하였다.

$$\Psi = \frac{\dot{\varepsilon}_o\sigma_o}{n+1}\left(\frac{\tilde{\Omega}}{\sigma_o}\right)^{n+1} \tag{7}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_o\left(\frac{\tilde{\Omega}}{\sigma_o}\right)^{n-1}\left\{\left(\frac{2-D}{D}\right)^{2n/n+1}\frac{3\sigma'_{ij}}{2\sigma_o} + \left(\frac{3}{2n}\right)^2\left[\frac{(1-D)n}{(1-(1-D)^{1/n})^n}\right]^{2/n+1}\frac{\sigma_m}{\sigma_o}\frac{1}{3}\delta_{ij}\right\} \tag{8}$$

여기서 $\tilde{\Omega}$는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tilde{\Omega}=\left\{\left(\frac{2-D}{D}\right)^{2n/n+1}\sigma_e{}^2 + \left[\frac{(1-D)n}{(1-(1-D)^{1/n})^n}\right]^{2/n+1}\left(\frac{3\sigma_m}{2n}\right)^2\right\}^{1/2} \quad (9)$$

3.3 유한요소해석

본 논문에서는 혼합 분말의 열간 등가압 소결과 고온 금형 압축 하에서 고온 치밀화 거동을 해석하기 위하여 Abouaf 등[9]과 McMeeking 등[10,11]이 제안한 구성모델을 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[13] 사용자 정의 서브루틴인 CREEP에 적용하였다. 이때, Abouaf 등[9]과 McMeeking 등[10,11]이 제안한 멱수법칙 크리프에 대한 각각의 구성모델을 혼합 분말에 적용하기 위해서 각 모델에서의 크리프 포텐셜은 연성분말과 강성분말의 분말의 종류에 따라 부피분율로 혼합하여 사용하였다.[3-5]

$$\Psi_{mixed}=f_S\Psi_S+f_H\Psi_H \quad (10)$$

여기서 Ψ_S와 Ψ_H는 각각 연성분말과 강성분말의 크리프 포텐셜을 나타내며 f_S와 f_H는 각각 연성분말과 강성분말의 부피분율을 나타낸다.

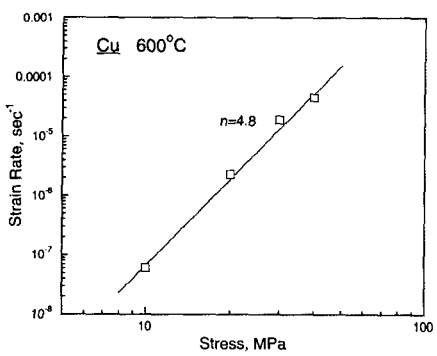


Fig. 1 Variation of logarithmic creep rate with logarithmic stress for solid copper during uniaxial compressive creep at 600℃

4. 실험 및 유한요소해석 결과의 비교

Fig. 1은 600℃의 고온 일축 압축 크리프 실험에서 구한 구리 모재의 변형률 속도와 응력의 관계를 나타낸다. 공구강 분말의 크리프 상수들은 Helle 등[14]의 실험치로부터 구하였다. Table 1은 유한요소해석에 사용된 구리와 공구강 분말의 600℃에서의 크리프 상수들을 나타낸다.

Abouaf 등[9]이 제안한 구성 모델에 필요한 계수 $f(D)$와 $c(D)$는 구리 분말의 경우는 Nohara 등[15]이 제안한 식에 Besson과 Evans[16]가 구한 구리 분말의 일축 압축 실험치를 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$f(D)=\frac{0.694(1-D)}{D^{8.3}}, \qquad c(D)=\frac{1}{D^{8.3}} \quad (11)$$

또한, 공구강 분말의 경우는 Bouaziz 등[17]의 실험결과를 사용하였다.

$$f(D)=0.16\left(\frac{1-D}{D-0.69}\right)^{1.1}, \qquad c(D)=1+5.23\left(\frac{1-D}{D-0.69}\right)^{0.914} \quad (12)$$

한편, McMeeking 등[10,11]의 구성모델을 유한요소해석에 적용할 때, 상대밀도 0.9 전후로 구성 모델이 달라지므로 크리프 포텐셜의 연속성을 위하여 천이구간을 고려하였으며 이 구간에서의 크리프 포텐셜 Ψ는 혼합법칙(rule of mixture)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.[18]

$$\Psi=\frac{(D_2-D)}{D_2-D_1}\Psi_1+\frac{(D-D_1)}{D_2-D_1}\Psi_2 \quad (13)$$

식 (13)에서 Ψ_1과 Ψ_2는 각각 초기 단계와 말기 단계에서의 크리프 포텐셜이며 D_1과 D_2는 각각 천이구간이 시작되는 상대밀도와 천이구간이 끝나는 상대밀도를 나타낸다. 본 논문에서는 $D_1=0.80$와 $D_2=0.90$을 사용하였다.

Table 1 Power-law creep properties of copper and D7 tool steel powders at 600℃

Material	Material Parameter / Temp.(℃)	McMeeking		Abouaf	n
		$\dot{\varepsilon}_0(sec^{-1})$	σ_0(MPa)	A(MPa,sec)	
Cu	600	3.61×10^{-6}	23	1.05×10^{-12}	4.8
D7 Tool Steel[14]	600	1.32×10^{-9}	92	2.47×10^{-24}	7.5

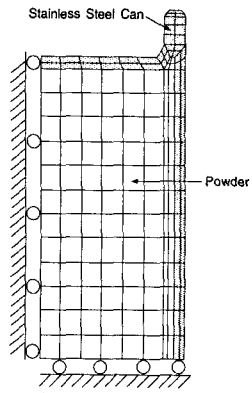
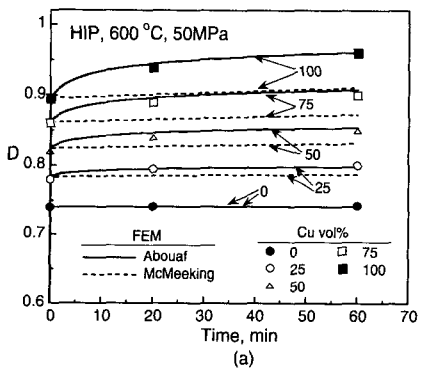


Fig. 2 Finite element meshes and boundary conditions for mixed powder under hot isostatic pressing



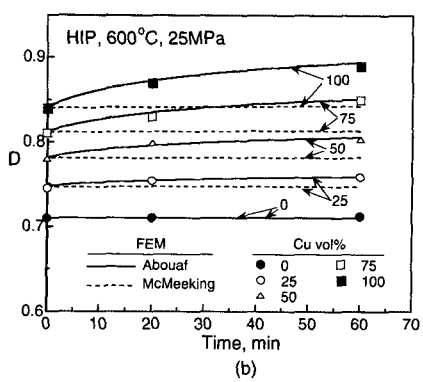


Fig. 3 Comparison between experimental data and finite element results by using the model of Abouaf and co-workers and that of McMeeking and co-workers for the variation of relative density with time for mixed powder compacts with various volume fractions of copper powder under hydrostatic pressure of (a) 50MPa (b) 25MPa during HIPing at 600℃

4.1 열간 등가압 소결 실험

Fig. 2는 열간 등가압 소결 공정의 해석을 위해 유한요소해석에 사용한 경계조건과 유한요소 격자를 나타내며, 총 158개의 CAX4T(4-node axisymmetric thermally coupled quadrilateral, bilinear displacement and temperature)요소가 사용되었다.[13]

Fig. 3(a)와 (b)는 여러 Cu vol%의 혼합분말을 600℃에서 50 MPa과 25 MPa로 열간 등가압 소결한 시편들의 유지 시간에 따른 상대밀도 변화의 실험치와 Abouaf 등[9]과 McMeeking 등[10,11]의 구성방정식들에 의한 계산치들의 비교를 각각 나타낸다. Fig. 3에서 실험치의 초기 상대 밀도는 구리분말이 100%인 경우와 공구강 분말이 100%인 각 경우의 실험치에 의한 초기밀도를 부피분율로 섞은 후 혼합분말의 이론밀도로 나누어 구하였다. Abouaf 등[9]의 구성 모델에 의한 계산치는 실험치들을 비교적 근사하게 예측하는 반면 McMeeking 등[10,11]의 구성 모델에 의한 계산치는 실험치를 낮게 예측함을 알 수 있다.

Fig. 4는 Cu 75 vol%의 혼합분말을 600℃에서 50MPa로 열간 등가압 소결하여 20분이 경과한 후 변형된 시편 형상에 대한 (a) 실험결과와 (b) Abouaf 등[9] 및 (c) McMeeking 등[10,11]의 모델에 의한 계산치의 비교를 각각 나타낸다. 실험치와 계산치 모두 용기의 위 모서리부분에서 가장 작은 변형이 일어났음을 알 수 있다. 이는 열간 등가압 소결 실험 중 시편을 둘러싸고 있는 용기에 가해지는 하중은 순수한 정수응력 상태이나 용기의

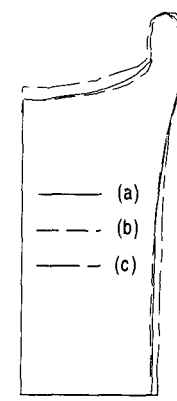
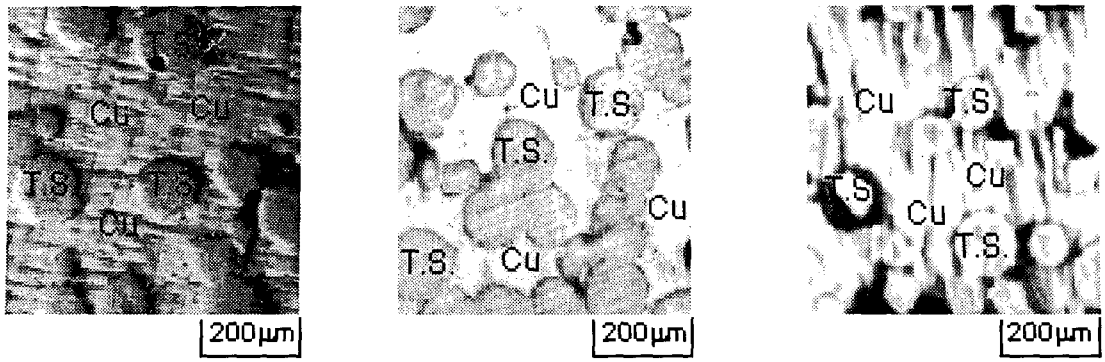


Fig. 4 Comparison between (a) experimental result and finite element calculations by using (b) the model of Abouaf and co-workers and (c) that of McMeeking and co-workers for deformed shape of a mixed powder compact with 75 vol % of copper powder after 20min during HIPing at 600℃ under 50MPa



(a) 75% (b) 50% (c) 25%

Fig. 5 Optical micrographs of mixed powder compacts with various volume fractions of copper powder after 20min during HIPing at 600℃ under 50MPa

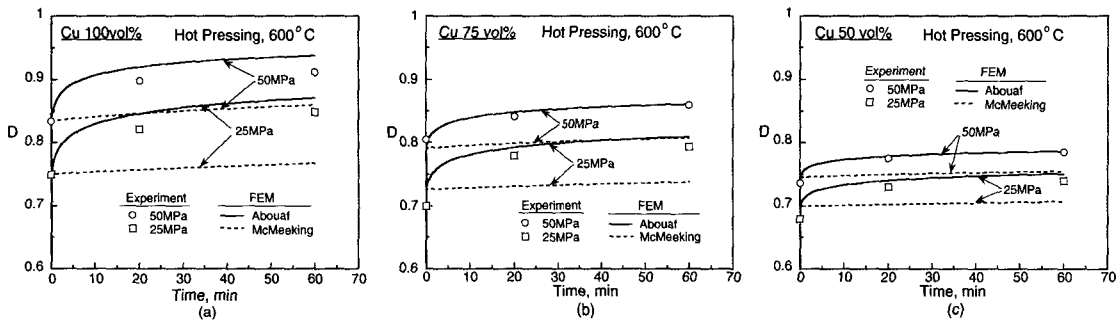


Fig. 6 Comparison between experimental data and finite element calculations by using the model of Abouaf and co-workers and that of McMeeking and co-workers for the variation of relative density with time for (a) 100 (b) 75 (c) 50 vol% of copper powder under hot pressing with axial stress of 50MPa and 25MPa at 600℃

영향으로 용기와 시편 내부에 편차응력 성분이 발생하게 되어 시편이 불균일하게 변형했기 때문이다. 변형된 형상의 실험결과와 유한요소해석결과로부터 Abouaf 등[9]의 구성모델에 의한 해석결과는 실험치를 비교적 잘 예측하였으며, McMeeking 등[10,11]의 구성모델에 의한 해석결과는 실험치보다 작은 변형이 일어남을 Fig. 4 에서 확인할 수 있다.

Fig. 5(a), (b) 및 (c)는 Cu 의 혼합비가 75%, 50% 및 25%인 혼합분말을 각각 600℃에서 50MPa 로 열간 등가압 소결하여 20 분간 유지 한 시편 내부의 광학현미경 사진이다. 여기서 둥근 형상을 유지하고 있는 것은 공구강 분말이고 그 주위에 변형된 형상은 구리분말을 나타내며 검은색으로 보이는 부분은 기공이다. Fig. 5 에서 구리 분말은 접촉 부위에서 크게 변형하였으나 공구강 분말은 거의 변형하지 않았음을 보이고 공구강의 혼합비가 증가할수록 분말성형체가 보다 많은 기공을 포함하고 있음을 알 수 있다. 또한, 공구강의 혼합비가 증가하여 공구강 분말이 많이 포함되어 있는 경우에는 공구강 분말끼리 서로 접촉하는 부분이 많아져서 구형의 형상을 제대로 유지하지 못하고 접촉 변형함을 알 수 있다.

4.2 고온 금형 압축 실험

Fig. 6(a), (b) 및 (c)는 각각 Cu vol%가 100%, 75% 및 50%인 혼합분말을 600℃에서 50MPa 와 25MPa 로 고온 금형 압축한 경우 시간에 따른 상대밀도 변화의 실험치와 Abouaf 등[9]과 McMeeking 등[10,11]의 구성방정식에 의한 계산치의 비교를 나타낸다. 마찰의 영향을 고려하여 금형 벽면과 펀치 및 시편 사이의 마찰 계수를 $\mu=0.3$[19]으로 가정하여 계산하였다. Fig. 6 에서 Abouaf 등[9]의 구성 모델에 의한 계산치는 실험치를 약간 높게 예측하며 McMeeking 등[10,11]의 구성 모델에 의한 계산치는 실험치를 낮게 예측함을 알 수 있다. 이와 같이 실험치와 구성모델에 의한 계산치가 다른 것은 구성 모델의 유도에 사용된 가정 때문이다. McMeeking 등[10,11]의 구성 모델에서는 분말 사이에 반지름 방향으로의 변형만을 고려하기 때문에

편차응력이 존재하여 접선방향으로의 변형을 무시할 수 없을때에는 실험치를 낮게 예측하게 된다. 편차응력의 영향이 커지는 고온 금형 압축에서 McMeeking 등[10,11]의 구성 모델에 의한 계산치가 실험치를 잘 예측하지 못하는 것은 구리 분말에 대한 Song 등[20]의 결과와 공구강 분말에 대한 Kim 과 Jeon[21]의 결과에서 확인된 바 있다.

분말 성형체의 상대밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있다.[21] 분말 성형체의 경도와 상대밀도의 관계를 구하기 위하여 본 논문에서는 로크웰 B 형 경도계 (Rockwell 523T, Wilson, U.S.A.)를 사용하였는데 열간 등가압 소결로 제조한 시편을 아르키메데스방법으로 상대밀도를 측정하고 각 시편의 좌우 반경방향에 대하여 1 ㎜ 간격으로 구분한 후 각 시편마다 5 개의 경도 값을 측정하였다 측정한 각 시편의 경도 값들을 평균하여 상대밀도와 경도의 관계식을 구하였다.

Fig. 7 은 Cu 75vol%의 혼합분말의 상대밀도와 로크웰 B 형 경도치(HRB)의 관계를 나타내며 실험치을 보간하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$D = 2.1853\times10^{-3}HRB + 0.7225 \qquad (14)$$

Fig. 8 은 각각 Cu 75 vol%의 혼합분말에 대하여 600℃에서 50 MPa 로 고온 금형압축하였을 경우 60 분 경과 후 성형체 내부의 상대밀도 분포에 대한 (a) 실험치와 (b) Abouaf 등[9]과 (c) McMeeking 등[10,11]의 구성방정식에 의한 유한요소해석 결과이다. Fig. 8 에서 금형과 성형체 사이의 마찰의 영향으로 상대밀도는 성형체와 상부펀치 접촉면의 모서리 부근에서 가장 높고 금형 하부 접촉면의 모서리 부근에서 가장 낮음을 알 수 있다. Abouaf 등[9]의 구성모델에 의한 해석결과는 실험치와 비교적 잘 일치하는 반면, McMeeking 등[10,11]의 구성모델에 의한 해석 결과는 실험치보다 낮게 예측하고 있음을 알 수 있다.

고온 금형 압축에서 제조한 시편의 밀도분포를 구하기 위하여 시편을 높이 방향으로 절단한 후 절단면에서 로크웰 경도를 측정하고 경도와 상대밀도의 관계식으로부터 시편 내의 상대밀도 분포를 구하였다. 전체의 1/2 단면에 대하여 가로방향은 1.4mm 의 간격으로 8 개씩 세로방향은 2mm 의 간격으로 6 개씩 총 48 개의 격자를 생성한 후 격자들의 적분점(integral point)을 따라 1.58mm (1/16inch) 강구압자(hardened steel ball indentor)로 하중 100kg 을 20 초간 가하여 측정하였다. 이때, 가로 방향으로는 강구압자의 크기에 비해 격자가 작아 측정시 서로 간섭이 생기게 되는데 이를 없애

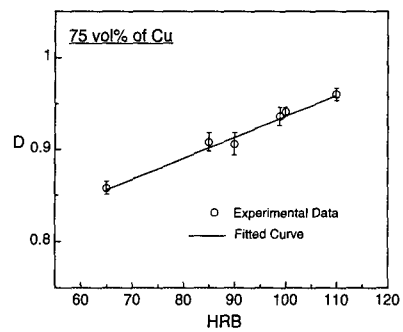


Fig. 7 Variation of relative density with Rockwell hardness for mixed powder compacts with 75 vol% of copper powder

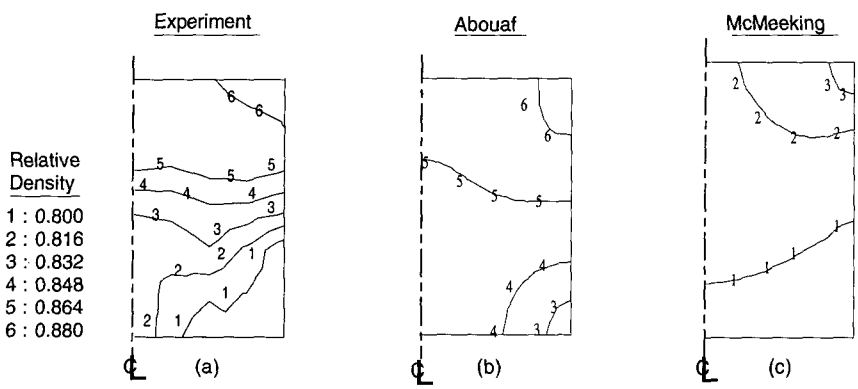


Fig. 8 Comparison between (a) experimental data and finite element calculations by using (b) the model of Abouaf and co-workers and (c) that of McMeeking and co-workers for relative density contour plot of a mixed powder compact with 75 vol% of copper powder after 60min during hot pressing at 600℃ under 50MPa

기 위해 가로방향에 대해서는 시편의 정중앙을 기준으로 서로 엇갈리게 배열하여 격자간의 간격이 2.8mm가 되게 하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 고온에서의 혼합분말의 치밀화 거동을 예측하기 위하여 Abouaf 등[9]의 구성모델과 McMeeking 등[10,11]의 구성 모델을 유한요소해석에 적용하고 실험치와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정수압 응력성분이 큰 열간 등가압 소결 실험의 경우 Abouaf 등[9]의 구성 모델은 실험치를 비교적 잘 예측하나, McMeeking 등[10,11]의 구성 모델은 실험치보다 다소 낮게 예측하였다.

(2) 편차 응력이 존재하는 금형 압축의 경우 Abouaf 등[9]의 구성 모델은 실험치를 비교적 잘 예측하나, McMeeking 등[10,11]의 구성 모델은 단일 금속 분말에 대한 Kim 등[20,21]의 결과와 마찬가지로 실험치를 낮게 예측하였다.

(3) 분말의 종류에 따른 크리프 포텐셜을 연성분말과 강성분말의 부피분율에 따라 혼합하여 적용한 유한요소해석은 편차 응력이 포함되어 있는 일반적인 하중 상태하에서 혼합 분말의 치밀화 거동을 파악할 수 있는 유용한 접근 방법이다.

참고문헌

(1) Kaczmar, J., 1989, "Effect of Production Engineering Parameters on Structure and Properties of Cu-W Composite Powders," *Powder Metall.*, Vol. 32, No. 3. pp. 171~175.

(2) Johnson, J. L. and German, R. M., 1993, "Phase Equilibria Effects on the Enhanced Liquid Phase Sintering of Tungsten-Copper," *Metall. Trans. A*, Vol. 24A, pp. 2369~2377.

(3) Bouvard, D., 1993, "Modelling the Densification of Powder Composites by Power Law Creep," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 41, No. 5, pp. 1413~1420.

(4) Storakers, B., Fleck, N. A. and McMeeking, R. M., 1999, "The Visco-plastic Compaction of Composite Powders," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, pp. 785~815.

(5) Kim, K. T., Cho, J. H. and Kim, J. S., 1999, "Cold Compaction of Composite Powders," submitted.

(6) Arzt, E., 1982, "The Influence of an Increasing Particle Coordination on the Densification of Spherical Powders," *Acta Metall.*, Vol. 30, pp. 1883~1890.

(7) Yamaguchi, K., Takakura, N. and Imatani, S., 1997, "Compaction and Sintering Characteristics of Compostie Metal Powders," *J. Mater. Process. Solids*, Vol. 63, pp. 364~369.

(8) Delie, F., Bouvard, D., 1998, "Effect of Inclusion Morphology on the Densification of Powder Composites," *Acta. Mater.*, Vol. 46, No. 11, pp. 3905~3913.

(9) Abouaf, M., Chenot, J. L., Raisson, G. and Bauduin, P., 1988, "Finite Element Simulation of Hot Isostatic Pressing of Metal Powder," *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol. 25, pp. 191~212.

(10) Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M., 1992, "Power-Law Creep of Powder Bonded by Isolated Contacts," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 34, No. 7, pp. 563~573.

(11) Sofronis, P. and McMeeking, R. M., 1992, "Creep of Power-Law Material Containing Spherical Voids," *J. Appl. Mech.*, Vol. 59, pp. s88~s95.

(12) Kim, J. H., Han, D. B. and Kim, K. T., 1996, "High Temperature Creep Behavior of Cr_3C_2 Ceramic Composite," *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. A212, pp.87~93.

(13) ABAQUS User's I, II and III Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Pawtucket, U.S.A., 1997.

(14) Helle, A. S., Easterling, K. E. and Ashby, M. F., 1985, "Hot-Isostatic Pressing Diagrams: New Developments," *Acta Metall.*, Vol. 33, pp.2163~2174.

(15) Nohara, A., Nakagawa, T., Soh, T. and Shinke, T., 1988, "Numerical Simulation of the Densification Behavior of Metal Powder During Hot Isostatic Pressing," *Int. J. Numer. Meth.*, Vol. 25, pp. 213~225.

(16) 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.

(17) Bouaziz, O., Dellis, C. and Stutz, P., 1996, "Creation of a Material Data File for Modeling HIPing of an Austenitic Stainless Steel," *Proc. of Int'l Workshop on Modeling of Metal Powder Forming Processes*, Grenoble, France, pp. 67~75.

(18) 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.

(19) Kobayashi, S. and Oh, S. I., 1989, *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press.

(20) Song, M. C., Kim, H. G. and Kim, K. T., 1996, "Creep Densification of Copper Powder Compact," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 38, No. 11, pp. 1197~1208.

(21) Kim, K. T. and Jeon, Y. C., 1998, "Densification Behavior and Grain Growth of Tool Steel Powder under High Temperature," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 46, No. 16, pp. 5745~5754.