〈논 문〉

금속분말 성형체의 크리프 치밀화 거동

송민철* · 김홍기* · 김기태**

(1995년 3월 7일 접수)

Creep Densification of Metal Powder Compacts

M. C. Song, H. G. Kim and K. T. Kim

Key Words: Constitutive Model(구성모델), Power-Law Creep(멱수법칙 크리프), Densification(치밀화), Hot Isostatic Pressing (열간 등가압압축), Uniaxial Compression(일축압축), Hot Pressing(금형압축)

Abstract

The densification behaviors of copper powder under high temperature processing were investigated. Experimental data were obtained for copper powder under hot isostatic pressing, hot pressing and uniaxial compression. Finite element calculations from the constitutive models by McMeeking and co-workers were compared with the experimental data. The agreements between experimental data and theoretical calculations are reasonably good when hydrostatic stress is dominant, but not as good when deviatoric stress increases.

I. 서 론

분말야금법에 의한 제품성형공정은 재료의 절감과 성형후 실제 치수에 가까운 형상을 만들 수 있다는 점에서 최근까지 많은 성형공정들이 개발되고 있다. 고온에서 이루어지는 금속분말 성형체의 성형공정은 분말입자들의 크리프에 의한 치밀화 공정이며 이러한 분말 성형체의 크리프 변형은 확산크리프와 멱수법칙 크리프의 서로 다른 두 치밀화기구에 의해서 기술될 수 있다. 이중 멱수법칙 크리프에 의한 치밀화는 열간 등가압압축이나 금형 압축 등 많은 경우의 금속분말의 치밀화 성형공정에서 주된 치밀화기구로서 작용한다. 멱수법칙 크리프에 의한 금속분말 성형체의 치밀화거동을 해석하기 위해서는 주어진 하중조건하에서 분말성형체의 크리프 변형률속도를 예측할 수 있는 구성모델이 필요하다.

Wilkinson과 Ashby[1]는 정수응력하에서 멱수법칙 크리프에 따른 중공구 모델의 수축에 관한 엄밀해를 구함으로써 분말 성형체의 크리프 치밀화에 대한 구성모델을 제안하였다. Helle 등[2]은 정수응력하에서 소성변형과 확산 및 멱수법칙 크리프가 고려된 구성모델을 제안하였다. 그러나, 분말성형체의 성형공정은 정수압뿐 아니라 일반적인 하중조건하에서 일어나는 경우가 많으며 따라서 일반적인 하중조건에 대한 이들 모델의 확장이 필요하다.

최근 Kuhn과 McMeeking[3]은 미소역학적인 관점에서 금속분말입자의 접촉변형을 고려하여 상대밀도 0.9 이하인 금속분말 성형체의 크리프 변형을 예측할 수 있는 구성모델을 제안하였다. 또한, Sofronis와 McMeeking[4]은 유한요소법을 이용한 중공구모델의 해석을 통하여 일반 하중하에서 상대밀도 0.9 이상인 금속분말 성형체의 크리프 변형을 예측할 수 있는 구성모델을 제안하였다.

구성모델들이 실제 금속분말의 성형공정에 적절

*포항공과대학교 기계공학과
**회원, 포항공과대학교 기계공학과

히 이용되기 위해서는 다양한 하중과 온도조건하의 실험치와 비교검토를 통하여 구성모델의 신뢰성이 확보되어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 열간 등가압압축과 고온 일축압축 및 고온 금형압축 등 여러 하중조건하에서 구리분말 성형체의 치밀화 거동을 조사하였다. 또한, 실험치와의 비교를 위하여 금속분말 성형체의 낮은 밀도에 대해서는 Kuhn과 McMeeking[3]의 구성모델을 높은 밀도에서는 Sofronis 와 McMeeking[4]의 구성모델을 사용하였다. 이 두 구성모델에서 구한 구성방정식들은 유한요소해석을 통하여 여러 실험결과들과 비교검토 되었다.

2. 실 험

실험에 사용된 분말은 환원법으로 제조된 구리분말(100RXM, SCM, Cleveland, Ohio, USA)을 사용하였다. Table 1은 구리분말의 화학적 성분과 물리적 성질을 나타내며 Fig. 1은 구리분말의 광학현미경 사진이다.

2.1 고온 금형압축

고온 금형압축실험에서는 분위기 가열로를 만능재료시험기(UDH-50, Shimadzu)에 장착하여 사용하였다. 금형과 펀치는 열간 금형용으로 사용되는 고속도 공구강(SKD 61)으로 제작하였으며 금형과 시편사이의 마찰을 줄이기 위하여 금형내부는 얇게 흑연코팅을 하였다. 실험온도를 정확하게 측정하기 위하여 금형에는 시편까지의 거리가 5 mm되는 위치까지 금형 외부로부터 구멍을 파고 열전대를 장착하였다. 고온에서 실험중 시편과 발열체의 산화방지를 위하여 가열로 내부는 질소분위기로 유지하였다.

Table 1 Chemical composition and physical properties of Cu powder

Characteristics	Cu
Apparent density (g/cm³)	2.88
Flow rate (sec/50g)	23
Mean Particle size (μm)	15
Melting point (K)	1356
Chemical composition (wt, %)	
Cu	99.62
H2 loss	0.24
Acid insolubles	0.04
Fe	0.04
Pb	0.02
S	0.01
Others	0.03

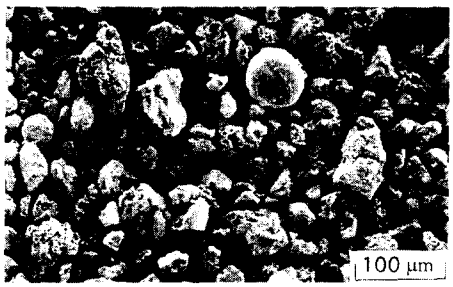


Fig. 1 Optical micrograph of copper powder

실험을 위한 예비성형체는 상온에서 구리분말 7.0±0.001g을 달아 금형에 부어넣고 가열로 내부에 장착하여 275 MPa을 가하여 예비 성형하였다. 고온실험에서는 시편을 실험온도까지 가열한 다음 실험압력까지 가압하고 정해진 시간동안 하중을 일정하게 유지하였다. 정해진 시간이 경과하면 하중을 제거하고 가열로 안에서 냉각시킨 후 시편을 꺼내어 지름과 높이를 측정하고 질량을 달아 성형체의 밀도를 계산하였다.

2.2 고온 일축압축 크리프

고온 일축압축실험에서는 분위기 가열로가 장착된 재료시험기(MTS)가 사용되었으며 가열로 내부는 대기압의 아르곤 분위기로 유지하였다. 예비성형체의 제조는 구리분말을 고무몰드에 담아 냉간정수압 성형기(CIP, wet type)에서 98 MPa의 압력을 가하여 성형하였다. 예비성형체는 다시 650℃의 수소분위기에서 20분동안 소결하였으며 소결된 성형체는 선반가공을 통하여 높이 9.96±0.02 mm, 지름 7.00±0.02 mm의 원기둥 형태로 가공되었다. 선반가공을 거친 성형체는 표면의 결함과 잔류응력을 제거하기 위하여 600℃의 수소분위기에서 1시간동안 어닐링하였다. 일축압축실험중에 야기될 수 있는 시편의 축뒤틀림의 영향을 제거하기 위하여 시편은 graphite 압축지그 안에서 압축되었다. 압

반은 SiC로 제작하였으며 압반과 시편사이의 마찰을 줄이기 위하여 흑연코팅을 하였다.

실험은 먼저 실험온도까지 가열한 다음 가압하고 실험시간동안 하중을 일정하게 유지하였다. 실험이 끝난 시편은 아르키메데스 방법으로 밀도를 측정하였다.

2.3 열간 등가압압축

열간 등가압압축에서 구리분말의 진공밀봉을 위한 용기(can)는 지름 26 mm, 높이 50 mm 및 두께 1 mm 의 고순도의 구리관과 탈개스를 위한 작은 관이 달린 윗마개 및 평평한 아래마개를 사용하여 원통형태로 제작하였다. 가공과정의 잔류응력을 제거하기 위하여 캔은 600℃의 진공에서 어닐링하였다. 구리분말은 캔내부에서 일축압축하고 400℃에서 5시간 동안 진공으로 탈개스 작업을 거친후 용접으로 밀봉되었다.

HIP schedule은 실험압력에 따라서 다음과 같으며 실험초기에는 온도와 압력을 동시에 상승하였다. 50 MPa의 경우는 온도가 350℃에 도달했을때 온도를 일정하게 유지하고 압력만 가하여 실험압력까지 상승시킨후 온도를 다시 실험온도까지 상승하였다. 25 MPa의 경우에는 온도와 압력을 동시에 실험조건까지 상승하였다. 위의 HIP schedule을 Fig. 2에 나타내었다.

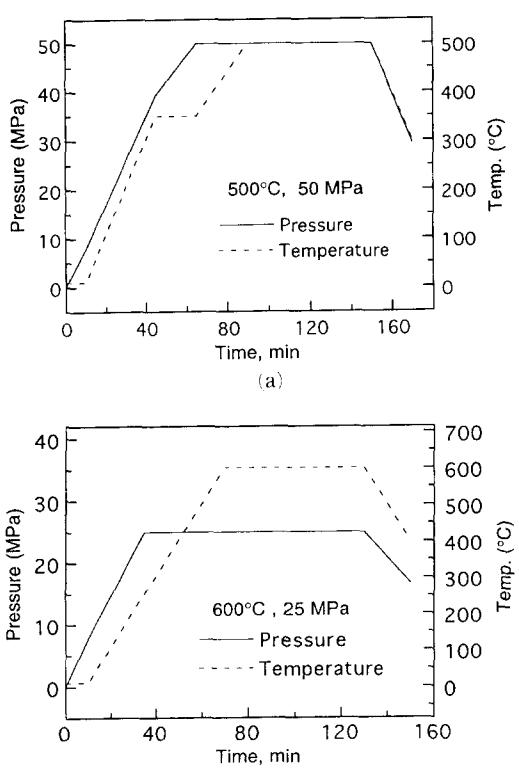


Fig. 2 HIP schedule for (a) 50 MPa and (b) 25 MPa

실험이 끝난 시편은 선반가공을 통하여 원기둥형태로 가공되었으며 시편의 밀도는 아르키메데스 방법으로 측정하였다.

3. 이론적 배경

금속분말의 치밀화 단계는 성형체 내부의 기공의 형태에 따라 크게 다음과 같은 두 단계로 구분하여 고려할 수 있다. 첫번째 단계는 상대밀도가 대략 0.9 이하인 경우의 치밀화 거동을 나타내며 이 범위에서는 주로 분말입자 상호간의 접촉변형에 의하여 치밀화가 되는 단계이다. 이 단계에서 분말입자는 근접한 다른 입자들과 접촉면적을 넓혀가면서 치밀화가 진행되며 입자 사이의 기공들은 서로 연결되어 있는 구조를 가지고 있다. 두번째 단계는 상대밀도가 0.9 이상인 경우의 치밀화 거동을 의미하며 분말입자가 심하게 변형됨에 따라 분말입자 사이의 기공은 고립되어 중공구와 같은 형태로 변형되며 이러한 중공구의 수축에 따라 치밀화가 일어나는 단계를 나타낸다.[5] 따라서 금속분말의 치밀화를 위한 구성모델은 단계별로 다르게 모델링되어야 한다.

3.1 초기 치밀화

멱수법칙 크리프거동을 따르는 재료의 일반적인 응력-변형률 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=\frac{3}{2}\dot{\varepsilon}_o\left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_o}\right)^n\frac{\sigma'_{ij}}{\bar{\sigma}} \tag{1}$$

여기서, $\dot{\varepsilon}_o$과 σ_o는 각각 기준 변형률속도와 응력을 나타내며, σ_{ij}과 $\bar{\sigma}$는 각각 모재의 편차응력과 등가응력을 나타낸다.

Kuhn과 McMeeking[3]은 미소역학적인 접근방법을 사용하여 초기 단계의 치밀화 과정에서 분말입자 상호간의 접촉변형을 모델링함으로써 다음과 같은 크리프 변형률속도를 구하였다.

$$\dot{E}_{ij}=\dot{\varepsilon}_o\frac{27\pi}{16\sqrt{3}}\left(\frac{D-D_o}{1-D_o}\right)^{1/2}\left[\frac{(1-D_o)}{3D^2(D-D_o)}\right]^n$$

$$\times\left[\left(\frac{|\Sigma_m|}{\sigma_o}\right)^{(n+1)/n}+\left(\frac{2\Sigma_e}{3\sigma_o}\right)^{(n+1)/n}\right]^{n-1}$$
$$\times\left[\left(\frac{|\Sigma_m|}{\sigma_o}\right)^{1/n}(\text{sign }\Sigma_m)\frac{1}{3}\delta_{ij}+\left(\frac{2\Sigma_e}{3\sigma_o}\right)^{1/n}\frac{\Sigma'_{ij}}{\Sigma_e}\right] \quad (2)$$

여기서, Σ_m과 Σ_e는 각각 정수응력과 등가응력을 나타내며, D_o는 분말입자가 점접촉을 할때 상대밀도를 나타낸다. 또한, 분말 성형체의 치밀화 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{D}=-D\dot{E}_{kk}$$
$$=-\dot{\varepsilon}_o\frac{27\pi}{6\sqrt{3}}D\left(\frac{D-D_o}{1-D_o}\right)^{1/2}\left[\frac{(1-D_o)}{3D^2(D-D_o)}\right]^n$$
$$\times\left[\left(\frac{|\Sigma_m|}{\sigma_o}\right)^{(n+1)/n}+\left(\frac{2\Sigma_e}{3\sigma_o}\right)^{(n+1)/n}\right]^{n-1}\left(\frac{|\Sigma_m|}{\sigma_o}\right)^{1/n} \quad (3)$$

3.2 말기 치밀화

Sofronis와 McMeeking[4]은 일반적인 하중하에서 균질함수 Φ가 응력공간에서 일정해지는 곡면을 유한요소법을 통해 근사화하여 상대밀도 0.9 이상의 분말 성형체의 변형률속도 $\dot{E}_{ij}$를 다음과 같이 구하였다.[7,6~7]

$$\dot{E}_{ij}=\dot{\varepsilon}_o\left(\frac{\Phi}{\sigma_o}\right)^{n-1}\left\{\left(\frac{2-D}{D}\right)^{\frac{2n}{(n+1)}}\frac{3\Sigma'_{ij}}{2\sigma_o}+\left(\frac{3}{2n}\right)^2\right.$$
$$\left.\times\left[\frac{(1-D)n}{(1-(1-D)^{1/n})^n}\right]^{\frac{2}{(n+1)}}\frac{\Sigma_m}{\sigma_o}\frac{1}{3}\delta_{ij}\right\} \quad (4)$$

여기서,

$$\Phi=\left\{\left(\frac{2-D}{D}\right)^{\frac{2n}{(n+1)}}\Sigma_e^2\right.$$
$$\left.+\left[\frac{(1-D)n}{(1-(1-D)^{1/n})^n}\right]^{\frac{2}{(n+1)}}\left(\frac{3\Sigma_m}{2n}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

위의 구성방정식 (1)~(5)를 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[8]의 사용자 정의 서브루틴 CREEP에 적용하여 그 계산결과를 실험치와 비교하였다. 식 (1)~(5)의 구성방정식들에서의 재료상수 $\dot{\varepsilon}_o$, σ_o, n 값은 수치해석적인 방법을 통하여 각 실험치와 잘 근사하는 값을 선택하였으며 그 값을 Table 2에 나타내었다. 또한 유한요소해석에 사용된 요소는 CAX4R(Axisymetric, 4-node bilinear, reduced element)이다.

Table 2 Material parameters used in FEM

	$\varepsilon_o(s^{-1})$	σ_o(MPa)	n
600℃	0.00263	23	4.0
500℃	0.00109	23	5.0

4. 실험결과 및 해석

본 논문에서는 초기와 말기 치밀화 단계에서 각기 다른 구성모델을 사용하였으므로 적용하는 모델이 달라지는 밀도범위의 경계부근에 대해서는 연속성에 따라 서로 다른 구성모델을 보간하여 줄 수 있는 식이 필요하다. 따라서, Fleck 등[9]이 사용한 다음과 같은 보간식을 사용하였다.

$$\Psi=\left(\frac{D_2-D}{D_2-D_1}\right)\Psi_1+\left(\frac{D-D_1}{D_2-D_1}\right)\Psi_2 \quad (6)$$

여기서, Ψ_1과 Ψ_2는 각각 Kuhn과 McMeeking[3]의 크리프 포텐셜과 Sofronis와 McMeeking[4]의 크리프 포텐셜을 나타내며 D_1과 D_2는 적용되는 구성모델의 특성에 따라서 알맞게 선택되는 값으로서 본 논문에서는 각각 0.8과 0.9를 사용하였다.

4.1 열간 등가압압축

Fig. 3은 열간 등가압압축 실험의 유한요소해석에 사용된 유한요소 격자와 경계조건을 나타낸다. 열간 등가압압축의 경우 x축과 y축에 대해 대칭이므로 그림에서 보는 바와 같이 전체 단면의 1/4만 해석하였다.

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 600℃와 500℃에서 열간 등가압압축한 구리분말의 시간과 상대밀도의 관계

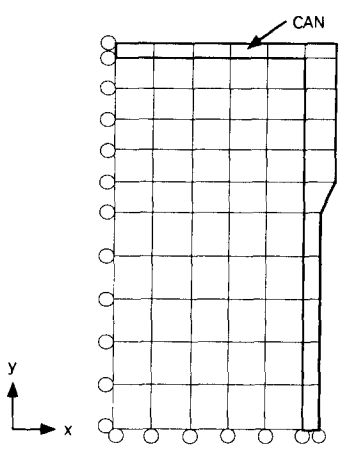
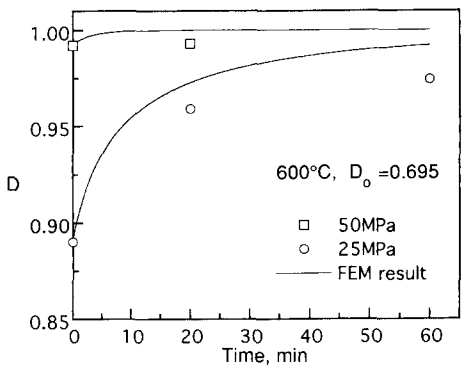
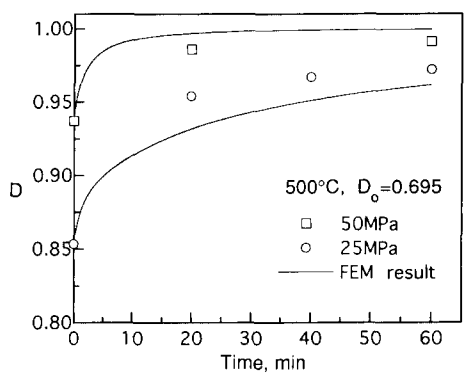


Fig. 3 Finite element mesh and boundary conditions for hot isostatic pressing



(a)



(b)

Fig. 4 Comparisons between experimental data and theoretical calculations for relative density vs. time relations for copper powder under hot isostatic pressing at (a) 600℃ and (b) 500℃

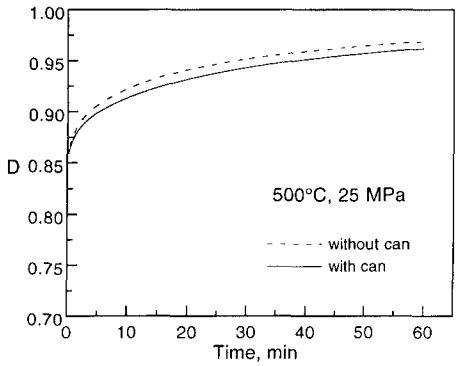


Fig. 5 Comparison between relative density vs. time relations for copper powder with and without canning at 500℃ under hot isostatic pressing

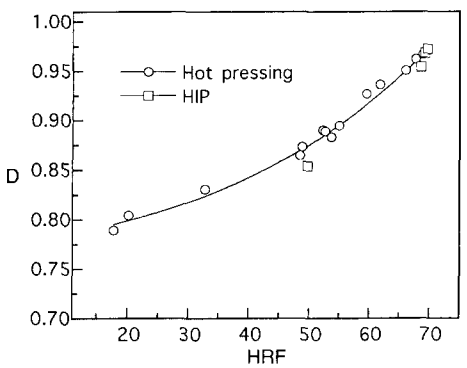


Fig. 6 Relative density vs. Rockwell hardness relations for copper specimens by hot isostatic pressing and hot pressing

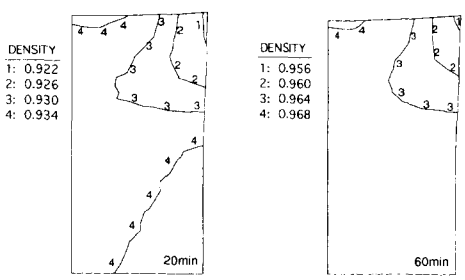


Fig. 7 Relative density distributions of copper powder compacts at 500℃ and 25MPa under hot isostatic pressing after (a) 20 min and (b) 60 min

를 나타낸 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 계산치는 실험치와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 500℃에서 열간 등가압압축시 캔의 유무에 따른 구리분말의 시간과 상대밀도의 관계를 나타낸 계산결과이다. 여기서, 캔의 하중지지 영향으로 구리분말의 치밀화가 약간 떨어짐을 볼 수 있다.

열간 등가압압축시 캔 외부에 가해지는 하중은 순수한 정수압이나 내부의 시편에는 캔의 하중지지 효과 때문에 편차응력성분이 발생하게 된다.[10] 본 논문에서는 이러한 캔의 하중지지 효과가 캔 내부에 있는 시편의 밀도분포에 미치는 영향을 조사하였다.

시편내부의 밀도분포를 간접적으로 조사하기 위하여 선반가공을 거친 시편을 종축방향으로 절단하고 아닐링한 후 단면에 대해서 경도측정을 하였다.[11] 경도는 Rockwell 방식(F-type)을 선택하여 1/16 in 강구압자로 하중 60 kg을 30초간 가하였다.

Fig. 6은 여러 밀도를 갖는 구리 성형체의 경도

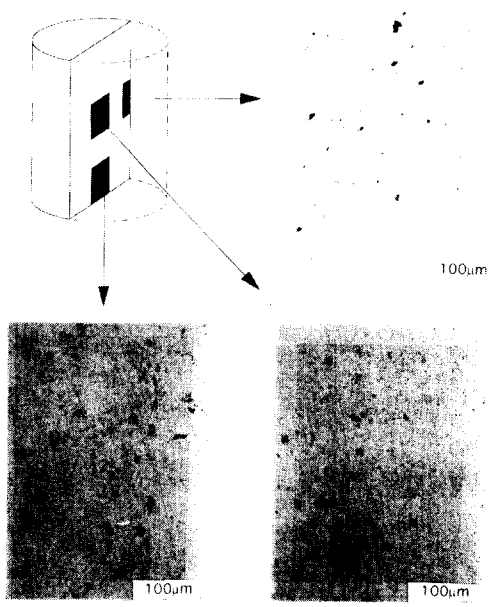


Fig. 8 Optical micrographs of copper powder compact at 500℃, 25 MPa and 20 min under hot isostatic pressing

측정값과 상대밀도와의 관계를 나타낸다. 경도를 측정한 결과 열간 등가압한 구리 압축시편의 경도 편차는 1 HRF 이내로 이 값을 상대밀도로 환산하면 약 1%의 밀도차이에 해당한다.

Fig. 7(a)와 (b)는 각각 500℃, 25 MPa에서 20분과 60분간 열간 등가압한 압축시편에 대한 유한요소해석의 결과를 나타낸다. 시편내부의 상대밀도의 최대차이는 약 1.2%로서 캔의 하중지지 효과는 시편내부의 밀도분포에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 8의 시편단면에 대한 광학현미경사진으로도 확인할 수 있다.

4.2 고온 일축압축 크리프

Fig. 9는 고온 일축압축 크리프실험의 유한요소해석에 사용된 유한요소 격자와 경계조건을 나타낸다. 고온 일축압축 크리프의 경우 x축과 y축에 대해 대칭이므로 그림에서 보는 바와 같이 전체 단면의 1/4만 해석하였다. Fig. 10(a)와 (b)는 각각 600℃와 500℃에서 일축압축하의 구리분말의 시간과 상대밀도의 관계를 나타낸 실험치와 계산치와의 비교를 나타낸다. 계산치는 실험치와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서, 비교적 작은 하중인 2~5 MPa로 일축압축하였는데 이는 500~600℃

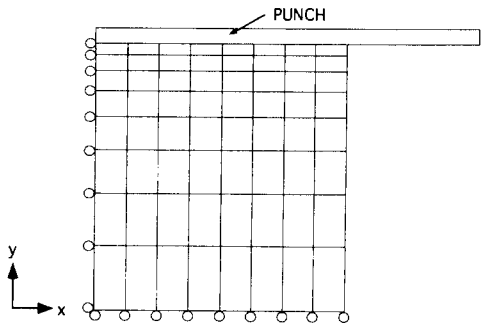


Fig. 9 Finite element mesh and boundary conditions for uniaxial compression

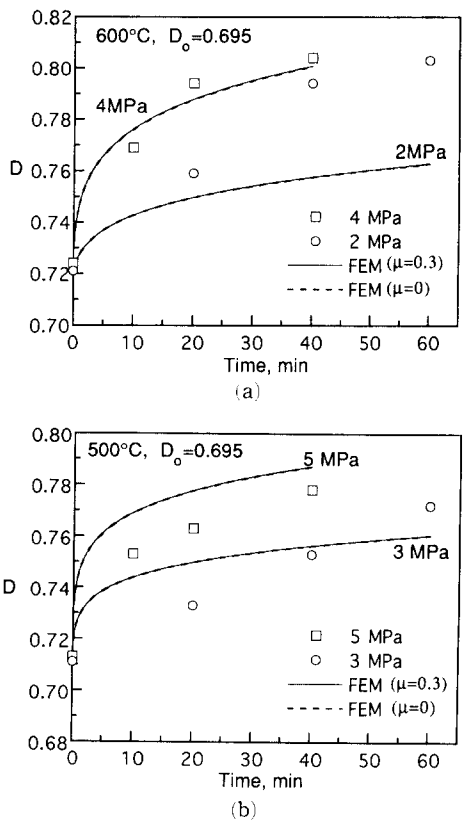


Fig. 10 Comparisons between experimental data and theoretical calculations for relative density vs. time relations of copper powder compacts under uniaxial compression at (a) 600℃ and (b) 500℃

고온의 큰 하중에서는 구리시편의 배불림이 너무 심하여 적절한 일축압축거동을 관찰하기 어렵기 때문이다. 실선은 마찰계수 0.3을 고려한 유한요소해

석의 결과이며 점선은 마찰을 고려하지 않은 결과이다. 압력이 크지 않기 때문에 마찰의 영향은 거의 나타나지 않음을 보인다.

Wadley 등[12]의 구리에 대한 HIP 선도에 따르면 확산 크리프의 영향은 압력의 감소에 따라 증가한다. 일축압축실험에서는 초기하중을 일정하게 유지한다. 따라서 치밀화가 진행됨에 따라 단면적이 넓어지고 시편에 작용하는 응력이 감소하여 충분히 낮아진 응력은 치밀화에 대한 확산 크리프의 영향력을 증대시킨다. 따라서 멱수법칙 크리프만 고려한 구성모델은 실험치를 낮게 예측하는 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 11은 600℃의 일축압축하에서 다공질 구리 시편의 축방향 변형률과 반경방향 변형률에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 계산치는 실

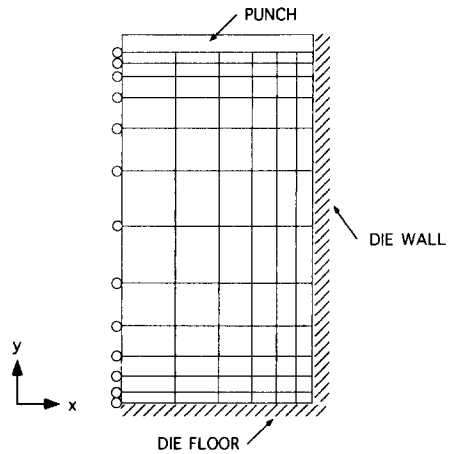


Fig. 12 Finite element mesh and boundary conditions for hot pressing

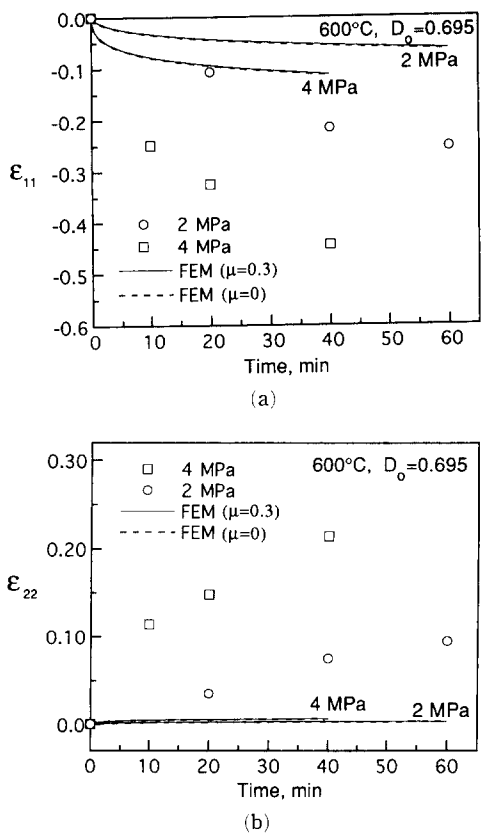


Fig. 11 Comparisons between experimental data and theoretical calculations for (a) axial strain and (b) radial strain vs. time relations of copper powder compacts under uniaxial compression at 600℃

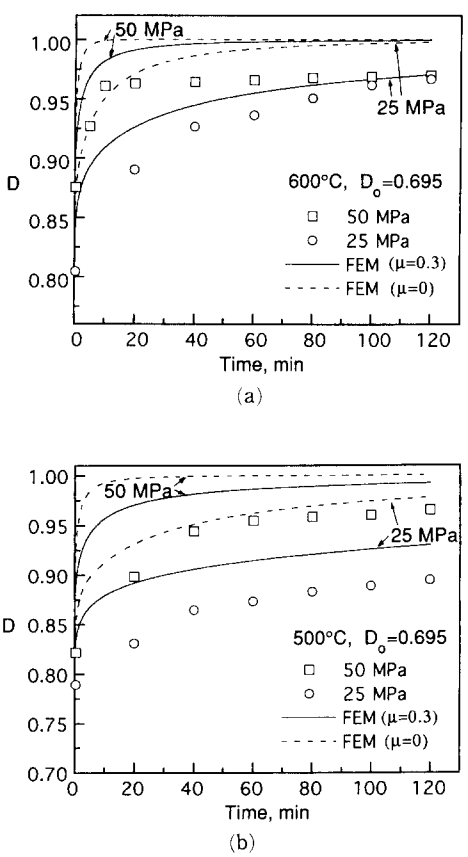


Fig. 13 Comparisons between experimental data and theoretical calculations for relative density vs. time relations of copper powder compacts under hot pressing at (a) 600℃ and (b) 500℃

험치를 낮게 예측함을 알 수 있다. 이러한 차이는 다음과 같은 이유로 설명될 수 있다. 낮은 응력에서 천이 크리프는 응력이 높을때에 비하여 정상상태 크리프보다 더 높은 변형률속도를 보이게 되며 천이 크리프 변형률은 실험이 끝난 후 전체 변형량 중에서 큰 비중을 차지하게 된다.[12] 따라서 아주 낮은 응력상태에서는 천이 크리프에 의한 치밀화의 영향이 더 커지게 된다. 그러나, 본 논문에서 사용한 구성모델들은 정상상태 크리프만을 고려하여 만들어졌기 때문에 천이 크리프가 큰 영향력을 나타내는 실험의 경우에는 변형률을 예측하는데 있어 다소 문제점이 발생하게 된다.

4.3 금형압축

Fig. 12는 금형압축실험의 유한요소해석에 사용된 유한요소 격자와 경계조건을 나타낸다. 금형 압축의 경우 금형벽면의 마찰의 영향이 고려되기 때문에 y축에 대해서만 대칭이 되어 그림에서 보는 바와 같이 전체 단면의 1/2만을 해석하였다. Fig. 13(a)와 (b)는 각각 600℃와 500℃에서 금형압축하의 구리분말의 시간과 상대밀도의 관계를 나타낸 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 위의 점선과 실선은 50 MPa의 계산결과이고 아래의 점선과 실선은 25 MPa의 계산결과이다. 또한 실선은 마찰계수 0.3을 고려한 결과이며 점선은 마찰을 고려하지 않은 결과이다. 마찰을 고려한 계산결과가 실험치를 더 잘 예측하고 있음을 보여준다. 그러나 실험치는 계산치보다 전반적으로 약간 낮음을 볼 수 있는데 이는 성형체 내부의 기공안에 갇힌 잔류가스의 영향으로 보여진다. 치밀화가 충분히 진행되면 기공이 고립되어 기공안의 가스가 갇히게 되어 압력이 높아지게 된다. 높아진 가스의 압력은 치밀화가 더 진행되는 것을 막으며 결국 성형체는 치밀화가 더 진행될 수 없는 한계에 다다르게 된다. 본 실험에서 이러한 한계는 상대밀도 0.97정도임을 알 수 있었다. 따라서, 이론밀도에 가까운 높은밀도를 얻기 위해서는 성형체 내부의 기공이 고립되기 전에 충분한 탈가스작업이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 14(a)와 (b)는 각각 500℃, 25MPa에서 40분과 120분간 금형압축한 구리분말 시편의 경도측정으로부터 구한 상대밀도와 유한요소해석을 통하여 구한 상대밀도 분포와의 비교를 나타낸다. 마찰

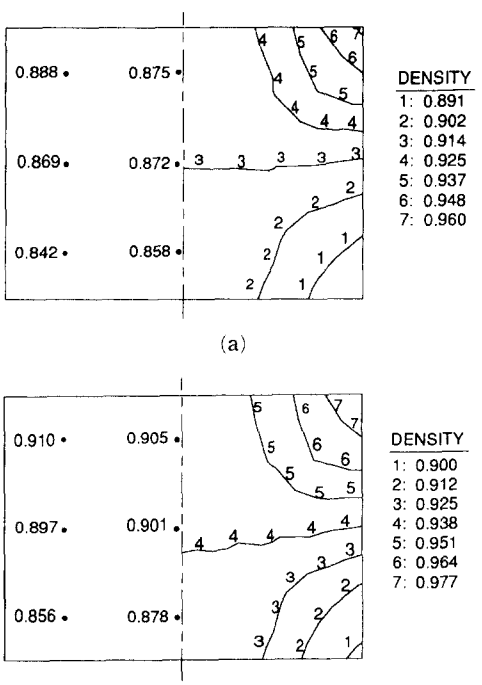


Fig. 14 Comparisons between experimental data and theoretical calculations for relative density distribution of copper powder compacts under hot pressing at 500℃ and 25MPa after (a) 40 min and (b) 120 min

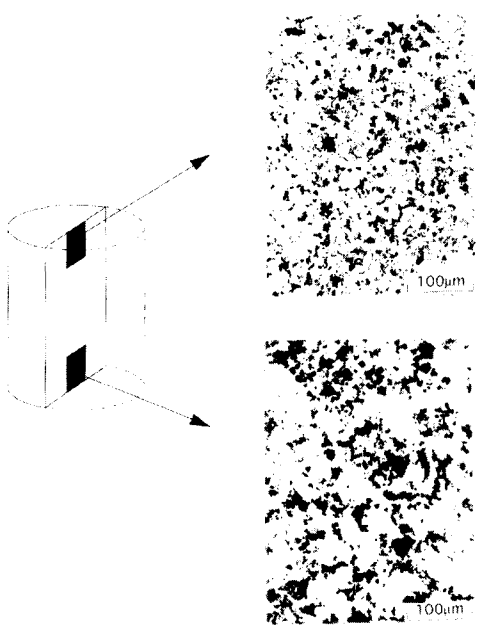


Fig. 15 Optical micrographs of the cross section of copper powder compact under hot pressing

의 영향에 의해서 시편상단에서 하단으로 갈수록 상대밀도가 낮아짐을 알 수 있다. Fig. 15의 시편 단면에 대한 광학현미경사진은 실제로 시편하단의 기공이 상단보다 더 크고 많음을 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 다양한 하중과 온도조건에서 구리 분말의 크리프 치밀화 실험이 수행되었다. 실험치는 구성모델의 유한요소해석으로 구한 계산치와 비교되었으며 실험치와 계산치는 비교적 잘 일치하였다. 실험치와 계산치의 비교에서 정수응력이 지배적인 열간 등가압압축에서는 아주 잘 일치하나 편차응력의 영향이 점차 커지는 열간 금형압축과 고온 일축압축에서는 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. 이는 확산 크리프와 천이 크리프의 영향뿐 아니라 근사해로 구해진 구성모델의 편차응력에 의한 치밀화기구에도 기인한다고 볼 수 있다. 또한, 열간 등가압 압축시 캔의 하중지지 효과는 시편의 치밀화와 밀도분포에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Wilkinson, D. S. and Ashby, M. F., 1975, "Pressure Sintering by Power Law Creep," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 23, p. 1975.

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

(3) Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M., 1992, "Power-Law Creep of Powder Bonded by Isolated Contacts," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 34, p. 563.

(4) Sofronis, P. and McMeeking, R. M., 1992, "Creep of Power-Law Material Containing Spherical Voids," *ASME J. Applied Mech.*, Vol. 59, p. s88.

(5) Ashby, M. F., 1990, "HIP 6.0 Background Reading," University of Cambridge Engineering Department, Trumpington St., Cambridge CB2 IPZ, U.K.

(6) Cocks, A. C. F., 1989, "Inelastic Deformation of Porous Materials," *J. Mech. Phys. Solids.*, Vol. 37, p. 693.

(7) Duva, J. M., 1986, "A Constitutive Description of Nonlinear Materials Containing Voids," *Mechanics of Materials*, Vol. 5, p. 137.

(8) *ABAQUS User's I and II Manual*, 1992, Hibbit, Karlsson and Sorensen.

(9) Fleck, N. A. and Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M., 1992, "Yielding of Metal Powder Bonded by Isolated Contacts," *J. Mech. Phys. Solids.*, Vol. 40, p. 1139.

(10) Xu J. and McMeeking, R. M., 1992, "An Analysis of the Can Effect in an Isostatic Pressing of Copper Powder," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 34, p. 167.

(11) Boyer, H. E., 1987, "Hardness Testing," *ASM International*, p. 118.

(12) Wadley, H. N. G., Schaefer, R. J., Kahn, H., Ashby, M. F., Cloug, R. B., Geffen, Y. and Wlassich, J. J., 1991, "Sensing and Modeling of the Hot Isostatic Pressing of Copper Powder," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 39, p. 979.