

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.4.333

## 온간금형 압축시 구리 분말의 치밀화에 대한 알루미늄 몰드의 영향

이성철\* · 박태욱\* · 김기태†  
(2007년 8월 16일 접수, 2008년 3월 3일 심사완료)

### The Effect of an Aluminum Mold on Densification of Copper Powder Under Warm Pressing

Sungchul Lee, Taeuk Park and Kitae Kim

**Key Words :** Aluminum Mold(알루미늄 몰드), Densification(치밀화), Finite Element Analysis(유한요소해석), Warm Pressing(온간 금형 압축)

#### Abstract

Densification behavior of copper powder was investigated to study the effect of an aluminum mold under warm pressing. The low flow stress of an aluminum mold is appropriate to apply hydrostatic stress to powder compacts during compaction under high temperature. The suggested powder metallurgy process is very useful under high temperature since copper powder compacts have higher relative density over axial stress of 100 MPa and show more homogeneity as compared with conventional warm pressing. Elastoplastic constitutive equation proposed by Shima and Oyane was implemented into a finite element program (ABAQUS) for densification behavior under warm pressing by using a metal mold. Finite element results agreed well with experimental data for densification and deformation of copper powder compacts in the mold.

#### 1. 서 론

분말야금공정은 상온에서 금형 압축, 정수압 압축을 가한후 상압소결하거나 고온에서 열간등가압소결, 일축 압축 소결을 거쳐 제품을 생산하게 된다. 그러나 분말 야금에 의한 부품 성형시 분말과 금형 사이에 발생하는 마찰은 성형체 내부에 불균일한 밀도구배와 잔류응력을 생성하여, 소결시 성형체에 불필요한 크랙과 뒤틀림을 초래한다. 따라서 밀도 분포의 불균일을 최소화하는 공정의 개발은 분말 야금의 중요한 연구 주제 중의 하나이다.

산업체에서는 상온에서 정수압 압축 공정을 이용하여 균일한 밀도와 높은 상대밀도를 지닌 부품을 제조해 왔다. 최근에는 온간에서의 분말 성형공정이 개발되었으며 온간성형공정은 낮은 성형압력으로도 높은 상대 밀도를 얻을 수 있고, 성형 후 강도의 향상, 성형체 내부의 균일한 밀도 분포, 시편 제거의 용이성 등의 장점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(1-2)</sup> 이러한 온간 성형의 장점과 고무 몰드를 이용한 등가압 성형을 결합한 온간에서의 고무 등가압 성형 공정(Rubber Isostatic Pressing)이 개발되었다.<sup>(3)</sup> 이러한 성형 공정은 냉간 등가압 성형 및 열간 등가압 성형 공정에 비해 고무의 비압축성으로 인해 일축압축공정으로 정수압 조건을 구현 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 고무 몰드의 성형 온도에 제한이 있고, 고무 몰드와 분말 성형체 사이의 흡착으로 인한 최종 성형체의 파손 등의 문제점이 발생할 수 있다.

\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과  
† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과  
Email: korean@postech.edu  
Tel: (054) 279-2164 Fax: (054) 279-5899

최근에 Park과 Kim<sup>(4)</sup>은 납몰드를 이용하여 스테인레스 강 분말에 대해 온간 등가압 성형을 수행하였다. 온간에서 몰드의 낮은 유동 응력은 가압 시 분말의 치밀화에 정수압 조건을 구현하는데 유용하다.<sup>(3)</sup> 특히 납몰드는 200~300°C에서 낮은 유동응력을 지녀 균일한 밀도를 지닌 성형체 제조가 가능하다. 그러나 200~300°C에서도 고무를 이용한 온간등가압 성형이 가능하며 보다 높은 온도에서는 납의 낮은 용융점으로 성형이 어려운 단점이 있었다. 또한 공정후 스테인레스 강 분말 성형체의 상대밀도는 0.75이하의 낮은 값을 보였다.

따라서 본 논문에서는 온간 금형압축시 균일한 밀도를 지닌 분말성형체 제조에 대한 연구를 수행하였다. 구리분말을 몰드에 충전후 온간에서 금형압축성형을 수행하여 0.9이상의 높은 밀도를 지닌 성형체를 구하고자 하였다. 몰드로 사용된 알루미늄 합금(Al6061)은 600°C이하에서 낮은 유동응력을 지니며 구리 분말의 치밀화시 정수압 효과를 가할 수 있다. 또한 몰드로 인하여 구리 분말에 작용하는 마찰력이 작아 밀도가 균일한 성형체를 얻을 수 있다.

온간에서 금속 분말의 금형압축 공정은 열점소성 변형과 크리프 및 확산 등의 복잡한 치밀화 기구가 요구된다. 그러나 본 실험에서는 일반적인 소결공정에 비해 압력유지시간이 매우 짧기 때문에 분말의 치밀화에 크리프와 확산의 영향은 무시하였다. 또한 압축속도의 영향은 고려하지 않았으므로 점성효과를 무시할 수 있다. 따라서 금속 분말의 치밀화 및 변형 예측시 준정적 압축 모델로 Shima-Oyane의 구성 모델<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 온간에서 일반적으로 많이 사용되는 금형 압축과 금속 몰드를 이용한 금형압축 성형 공정에 대해 다양한 하중 조건에서 실험을 수행하였다. 유한요소 해석치는 분말성형체의 최종 형상과 평균밀도 및 밀도 분포에 대하여 실험 결과와 비교 분석하였다.

## 2. 실험

본 논문에서는 평균 입자 크기가 40  $\mu\text{m}$  인 구리 분말을 사용하여 실험하였다. 이 때 구리 분말의 이론 밀도는 8.96  $\text{g}/\text{cm}^3$ 이다.

### 2.1 알루미늄 몰드의 물성 실험

알루미늄 몰드의 변형률-응력 곡선을 얻기 위하여 고온 분위기의 진공로(vacuum furnace)와 고온 변위 측정 장치(LVDT)가 장착된 재료 시험기를 이용하여 일

축 압축 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 시험편은 직경 8 mm 와 높이 12 mm 로 가공하였다. 고온 분위기의 진공로를 이용하여 진공상태에서 10°C/min의 승온 속도로 550~590°C 까지 가열한 후 시편이 열적 평형상태가 되도록 시험 온도를 약 30 분간 유지하였다. 압축 시 시편과 압반 사이의 마찰을 줄이기 위하여 탄탈륨 박판(tantalum sheet)을 삽입하였다. 모든 압축 실험은 10<sup>2</sup> mm/s의 변위 속도로 실험하였다.

### 2.2 금형 압축 실험

금형 압축 실험은 가열로가 장착된 MTS 재료 시험기를 이용하였으며, SKD11 으로 제작된 내경 9.1 mm 인 금형을 사용하였다. 구리 분말 2.7 g 을 금형에 충전한 후 상부 펀치와 함께 가열로를 이용하여 진공상태에서 10°C/min 의 승온 속도로 580°C 까지 가열한 후 30 분간 유지하였다. 가압은 175 MPa 까지 일방향 압축하였다.

### 2.3 알루미늄 몰드를 이용한 압축 성형 실험

알루미늄 몰드를 이용한 압축 성형 실험은 MTS 재료 시험기에 가열로를 장착하고 진공상태에서 580°C 까지 가열한 후 수행하였다. 실험에 사용된 알루미늄 몰드는 외경 11.28 mm, 두께 1.1 mm, 높이 13 mm 이며, 내경 11.28 mm 의 금속 금형 안에 삽입하여 실험하였다. 구리 분말을 몰드에 충전시킨 직후의 상대 밀도는 0.51 이며, 175 MPa 까지 일방향 압축하였다.

### 2.4 분말 성형체의 밀도 분포 측정

분말 성형체의 상대 밀도 분포는 경도와 상대 밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 구할 수 있으며, 경도 측정에 비커스 경도계를 사용하였다.<sup>(6)</sup> 금형압축과 알루미늄몰드를 이용한 압축 성형에서 제조된 시편에 대해 상대 밀도와 경도의 관계를 구하였다. 성형된 분말 성형체의 질량과 부피를 측정하여 상대 밀도를 구하였다.<sup>(4,6)</sup> 다이아몬드 휠 (ISOMET low speed saw, Buehler, U.S.A.)을 사용하여 준비된 시편을 높이 방향으로 절단한 후 단면을 연마하였다. 경도 측정은 300g 의 하중을 10 초간 가하여 각 시편마다 10 개의 경도 값을 측정하여 평균한 뒤 경도와 밀도사이의 관계를 구하였다.

알루미늄 몰드를 이용한 성형 시편의 밀도 분포를 측정하기 위하여, 가로 세로 방향으로 각각 1 mm, 0.6 mm 의 간격으로 총 56 개의 격자를 생성한 후 격자들의 적분점에서 경도를 측정하였다. 금형 압축 시편에 대해서도 총 56 개의 격자를 생

성하여 격자들의 적분점에서 경도를 측정하였다.’

### 3. 이론

#### 3.1 금속 분말의 구성 방정식

금속 분말의 전체 변형률 속도 성분  $\dot{\epsilon}_{ij}$  은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

여기서  $\dot{\epsilon}_{ij}^e$  와  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  는 각각 탄성 변형률 속도 성분과 소성 변형률 속도 성분을 나타낸다. 또한, Hooke의 법칙으로부터 응력성분  $\sigma_{ij}$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \epsilon_{kl}^e \quad (2)$$

여기서  $D_{ijkl}^e$  는 4 차 탄성계수 텐서이다.

소성 변형률 속도 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

여기서  $\Phi$  와  $\dot{\lambda}$  는 각각 분말 재료의 항복 함수와 양의 스칼라 양이다.

질량 불변의 관계로부터  $\dot{D}$  은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{D} = -D\dot{\epsilon}_{kk}^p \quad (4)$$

상대밀도를 경화변수(hardening parameter)로 사용할 경우 금속 분말의 치밀화 거동을 나타내는 항복함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\sigma_{ij}, D) = 0 \quad (5)$$

또한 금속 분말이 등방성을 가질 경우 항복함수  $f$  는 3 개의 응력 불변량으로 나타낼 수 있으나, 제 3 응력 불변량을 무시할 경우 항복함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(p, q, D) = 0 \quad (6)$$

여기서 정수응력  $p$  와 편차응력  $q$  는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p = -\frac{\sigma_{kk}}{3}, \quad q = \sqrt{\frac{3\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}{2}} \quad (7)$$

Shima 와 Oyane<sup>(5)</sup>은 금속 분말을 위한 항복함수를 다음과 같이 제안하였다.<sup>(10)</sup>

$$\Phi(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + 2.49^2 (1-D)^{1.028} \left(\frac{p}{\sigma_m}\right)^2 - D^5 = 0 \quad (8)$$

여기서  $\sigma_m$  및  $\bar{\epsilon}_m^p$  은 각각 분말 재료에 가해지는

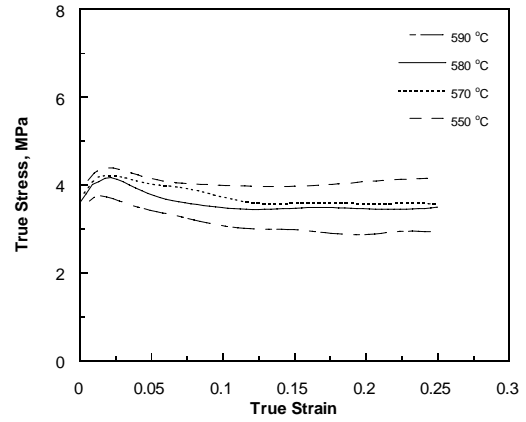


Fig. 1 True stress-true strain response of aluminum alloy under uniaxial compression at various temperature

정수 응력과 유효 응력, 모재의 유동 응력과 유효 소성 변형률이다.

금속 분말의 치밀화 거동은 Shima-Oyane<sup>(5)</sup>의 구성 방정식을 ABAQUS<sup>(7)</sup>의 사용자 정의 서브루틴인 UMAT 에 적용하여 해석하였다.

### 4. 실험 결과 및 해석

#### 4.1 알루미늄 몰드 모재의 기계적 성질

Fig. 1 은 550~590 °C 에서 몰드로 사용된 알루미늄 합금의 유동응력과 진변형률의 관계를 나타내고 있다. 온도가 높을수록 변형에 필요한 유동 응력이 낮아지며 분말의 등가압 성형에 필요한 하중이 낮아지게 됨을 알 수 있다. 590°C 이상의 온도에서는 열에 의한 몰드 상부의 뒤틀림이 관측되어 몰드를 이용한 금형압축 공정 온도를 580°C 로 설정하였다. 580°C 에서 알루미늄 모재에 대한 탄성계수와 프와송비는 타 문헌<sup>(8,9)</sup>의 자료를 참고하였으며 E=46.8GPa, 프와송비는 0.368 을 유한요소 해석에 사용하였다.

#### 4.2 구리 모재의 기계적 성질

580°C 에서 구리 모재 시편에 대한 인장 응력과 소성 변형률의 관계는 Andrade 등<sup>(10)</sup>의 실험결과를 이용하였으며 Fig. 2 에서 점선으로 나타내었다. 실선은 금형압축과 몰드를 이용한 금형 압축시 유한요소해석 결과가 실험치를 잘 예측하도록 유동 응력을 보정한 값을 나타낸다. 이 때 보정된 유동응력과 소성변형률의 관계는 다음과 같은 Ludwik 의 식으로 잘 나타낼 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$\sigma_m = 33.5 + 151.6 (\bar{\epsilon}_m^p)^{0.4285} \quad (9)$$

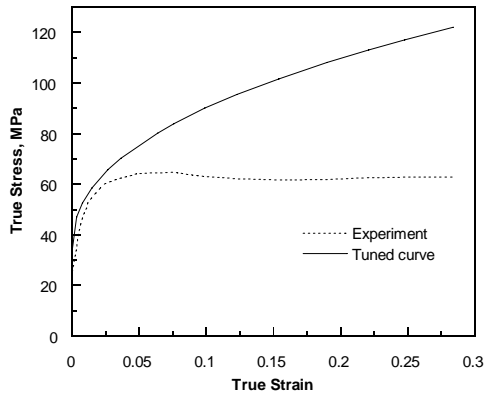


Fig. 2 True stress-true strain response of copper under uniaxial compression at 580°C

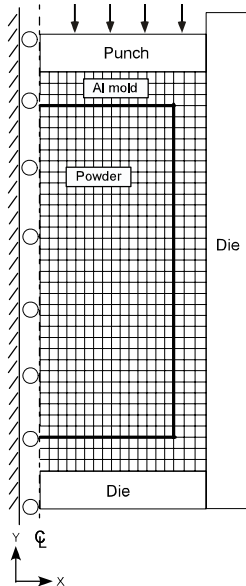


Fig. 3 Finite element meshed and boundary conditions for warm pressing by using a mold

구리 분말의 금형 압축 및 알루미늄 몰드를 이용한 압축 성형 시 가압력 증가에 따른 치밀화를 해석하기 위하여 구리 분말의 유동 응력에 대한 식 (9)를 Shima-Oyane<sup>(5)</sup>의 구성 모델에 적용하였다. 580°C 에서 해석시 탄성계수와 포아송비는 각각 95.1 GPa, 0.397<sup>(8,9)</sup>을 사용하였다.

#### 4.3 금형 압축 및 몰드를 이용한 압축 성형

Fig. 3 은 몰드를 이용한 압축 성형에 사용된 유한요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. 축 대칭 조건으로부터 전체 단면의 1/2 만을 해석하였으며, 분말 성형체와 몰드는 각각 450 과 198 개의 4 절점 2 차 축 대칭 요소인 CAX4(4-node axisymmetric quadrilateral, biquadratic displacement) 를 사용하였다.

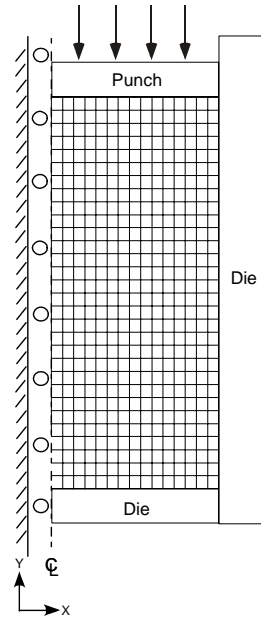
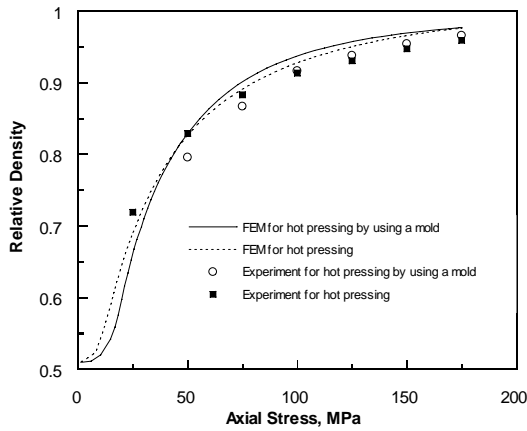


Fig. 4 Finite element meshes and boundary conditions for warm pressing

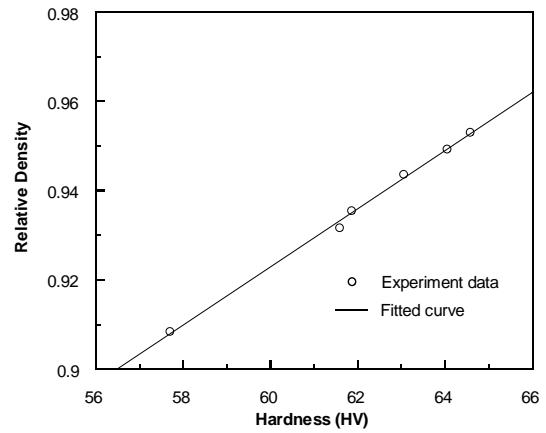
금속 분말의 치밀화거동의 해석을 위해서는 Shima-Oyane 의 모델<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 분말과 몰드의 계면조건은 완전접합으로 가정하였다. 또한 금형과 몰드사이의 마찰 계수는 0.3 으로 해석에 적용하였다.<sup>(12-13)</sup> 시편의 치수는 높이 13 mm, 지름 11.28 mm 이며, 시편의 초기 밀도는 실험을 통해 구한 0.51 을 사용하였다.

Fig. 4 는 구리 분말의 압축 성형에 사용된 유한요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. 축 대칭 조건으로부터 전체 단면의 1/2 만을 해석하였으며, 분말 성형체는 450 개의 4 절점 2 차 축 대칭 요소인 CAX4(4-node axisymmetric quadrilateral, biquadratic displacement) 를 사용하였다. 구리 분말과 금형 사이의 마찰 계수는 0.3 으로 가정하였다.<sup>(12,13)</sup>

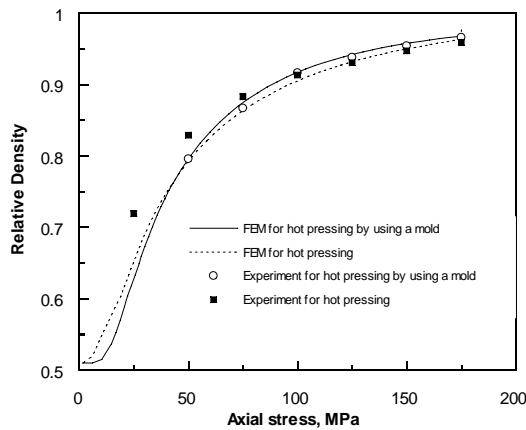
Fig. 5 는 580°C 에서 금형 압축과 몰드를 이용한 압축 공정 시 구리 분말 성형체에 대한 가압력에 따른 상대 밀도 변화를 나타내는 실험치와 유한요소해석 결과를 나타내고 있다. 낮은 압력에서는 몰드를 이용한 경우 상대적으로 낮은 밀도를 보였으나 100 MPa 이상에서는 높은 밀도를 보임을 알 수 있다. 이는 치밀화 초기에 알루미늄몰드의 하중지지 효과로 치밀화를 방해하기 때문이다. 압력이 높아질수록 하중 지지효과는 감소한다. 또한 구리 분말에 금형에 의한 마찰력이 작용하지 않고 압력이 높아질수록 몰드에 의해 정수압응력에 가깝게 하중이 가해지면서 분말성형체는 높은 밀도를 보이게 된다. 문헌<sup>(10)</sup>의 유동응력을 참고한 해석치는 실험치를 비교적 높게 예측함을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6 에서



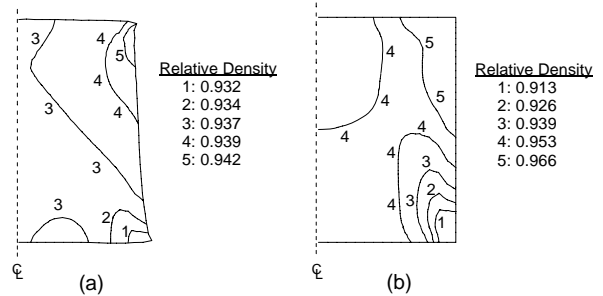
**Fig. 5** Comparison between experimental data and finite element calculations for the variation of relative density with axial stress at 580 °C



**Fig. 7** Variation of Vickers hardness (HV) with relative density for copper powder compacts



**Fig. 6** Comparison between experimental data and finite element calculations for the variation of relative density with axial stress by using tuned up flow stress at 580 °C



**Fig. 8** Comparison between experimental data during (a) warm pressing by using a mold and (b) warm pressing under axial stress of 150 MPa at 580 °C

식 (9)의 보정된 유동응력을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 몰드를 이용한 압축 공정의 경우 실험치를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 금형 압축의 경우 낮은 밀도에서는 다소 실험치를 낮게 예측하나 실제 제품으로 제조되는 정도의 고밀도 부근에서는 실험치를 잘 예측하고 있다.

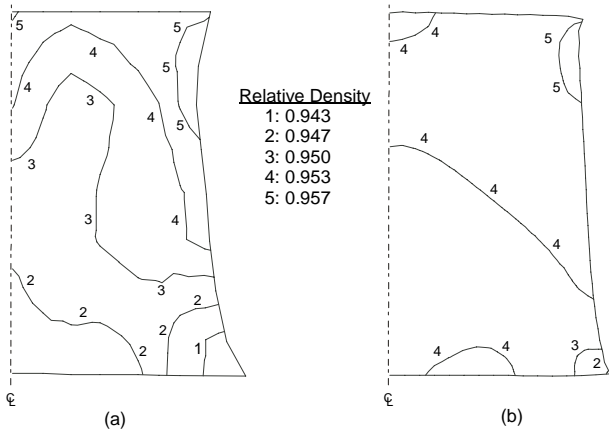
Fig. 7은 580°C에서 금형 압축과 몰드를 이용한 압축 성형후 절단된 구리 분말 성형체의 상대 밀도와 비커스 경도의 관계를 나타낸다. 실험치를 이용하여 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$D = 0.5314 + 0.00653(Hv) \quad (10)$$

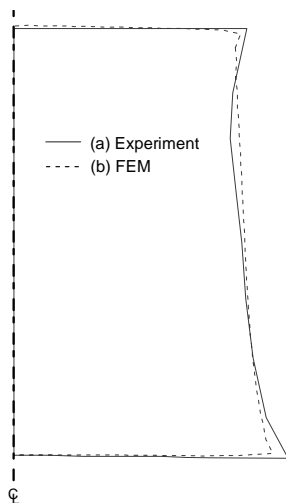
Fig. 8은 580°C에서 150 MPa의 하중으로 일반금형 압축과 몰드를 사용한 온간금형압축을 수행한 후 구리분말성형체의 상대 밀도 분포와 변형에 대한 실험

치의 비교를 나타낸다. Fig. 8의 실험치는 식 (10)의 관계식과 경도 분포의 측정치로부터 구하였다. 금형 압축으로 성형된 분말성형체 내부는 0.913~0.967의 밀도 분포를 보이며 금형과 분말 사이의 마찰력으로 상부모서리 부분에는 높은 밀도를 보였다. 가압력이 높아 질수록 몰드 내부에 정수압에 가까운 하중이 가해진다. 따라서 몰드를 이용한 경우 시편 전반에 걸쳐 균일한 밀도가 분포함을 알 수 있다. 일축압축시 알루미늄몰드는 몰드안쪽으로 변형이 발생하며, 몰드와 금형의 마찰로 몰드상부쪽의 변형이 크게 발생한다. 따라서 구리 성형체의 중상부 부분은 몰드의 영향으로 반경 안쪽반향으로 변형이 심함을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 580°C에서 150 MPa의 하중으로 몰드를 이용하여 압축 성형을 수행한 구리분말성형체의 상대 밀도 분포에 대한 실험치와 유한요소해석 결과의 비교를 나타낸다. 해석결과는 상대밀도의 분포를 비교적 잘 예측하고 있다. 상대 밀도는 0.943~0.957사이로 균일하게 분포하고 있다. 성형시 알루미늄몰



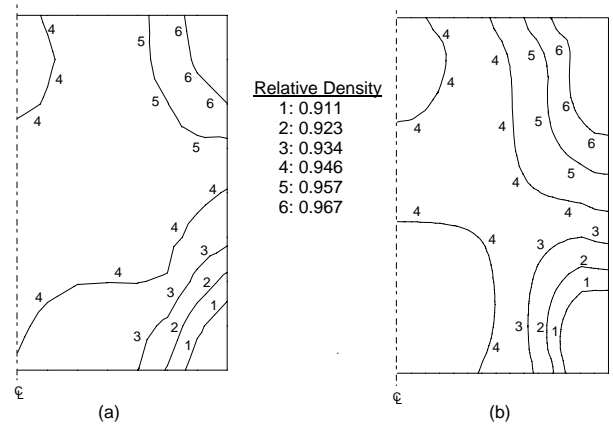
**Fig. 9** Comparison between (a) experimental data and (b) finite element calculations for relative density contour plot during warm pressing by using a mold under axial stress of 150 MPa at 580 °C



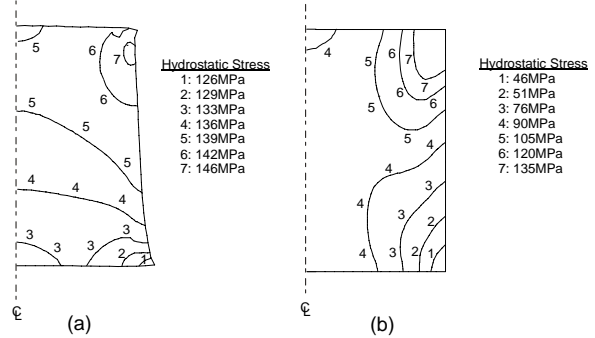
**Fig. 10** Comparison between (a) measured deformed shape and (b) calculated result during warm pressing by using a mold under axial stress of 150 MPa at 580 °C

드가 안쪽으로의 변형하면서 성형체 모서리 상부부분이 상대적으로 높은 밀도가 분포함을 확인할 수 있으며 해석치는 이를 잘 예측하고 있다. Fig. 10에서 변형 형상에 대한 유한요소해석은 실험치에 비해 모서리 부근에서 변형을 비교적 작게 예측하지만 전반적으로 잘 예측함을 확인할 수 있다. Fig. 11에서 금형압축의 경우 해석치는 측정된 밀도구배를 잘 예측하고 있으며, 몰드를 이용한 압축성형에 비해 밀도구배가 심함을 확인할 수 있다.

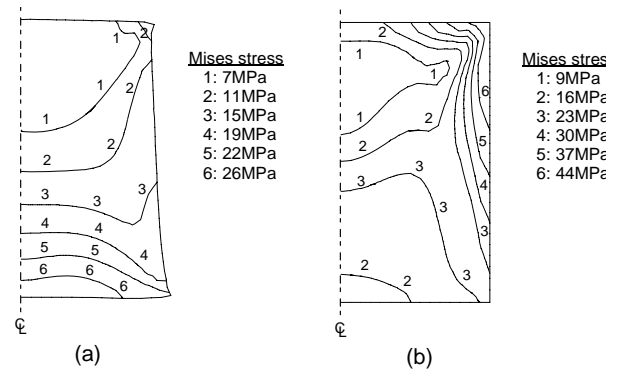
Fig. 12와 Fig. 13은 580°C에서 150 MPa의 하중으로 금형 압축과 몰드를 이용한 압축 성형을 수행한 후 구리분말성형체내부의 정수응력과 편차응



**Fig. 11** Comparison between (a) experimental data and (b) finite element calculations for relative density contour plot during warm pressing under axial stress of 150 MPa at 580 °C



**Fig. 12** Finite element calculation for distributions of residual hydrostatic stress during (a) warm pressing by using a mold and (b) warm pressing under axial stress of 150 MPa at 580 °C



**Fig. 13** Finite element calculation for distributions of residual Mises stress during (a) warm pressing by using a mold and (b) warm pressing under axial stress of 150 MPa at 580 °C

력 분포를 나타낸다. 몰드를 이용한 압축 성형의 경우 모서리 부분을 제외하면 비교적 균일한 정수 응력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 편차 응력도 상대적으로 작은 값을 보이고 있다. 구리 분말성형체 내부의 밀도 구배와 정수압, 편차응력의 분포를 통해 알루미늄 몰드는 정수압에 가까운 하중 조건을 조성하여 균일한 내부 밀도 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 온간 금형 압축 과 알루미늄 몰드를 이용한 온간 금형압축 공정시 구리 분말의 치밀화에 대한 연구를 수행하여 다음과 결론을 얻었다.

(1) Shima-Oyane 의 구성 모델<sup>(5)</sup>을 사용하여 유한 요소해석을 수행한 결과는 알루미늄 몰드를 이용한 압축 성형과 금형 압축에서의 치밀화 경향과 최종 형상을 잘 예측하였다.

(2) 온간에서 몰드의 유동응력이 낮아 높은 가압력시 성형체 내부에 정수압에 가까운 응력이 분포하였다. 또한 몰드로 인해 구리 분말과 금형사이의 마찰이 작아 균일하고 높은 밀도를 지닌 구리 성형체를 제조할 수 있었다.

(3) 온간에서 몰드를 이용한 금속 분말 성형 공정은 일반적인 금형 압축 성형에 비해 균일하고 높은 상대밀도를 지닌 성형체 제조에 매우 유용한 공정이다.

## 참고 문헌

- (1) Arbstedt, P., 1986, "Developments in Iron and Steel Powder Production," *Metal Powder Reports*, Vol. 41, No. 1, pp. 64~67.
- (2) St Laurent, S. and Chagnon, F., 1999, "Behaviour of

- Steel Powder Mixtures Processed by Warm Compaction," *Metal Powder Report*, Vol. 54, No. 3, pp. 42.
- (3) Yang, H. C., Lee, J. W. and Kim, K. T., 2004, "Rubber Isostatic Pressing of Metal Powder under Warm Temperatures," *Powder Technol.*, Vol. 139, pp. 240~251.
- (4) Park, J. G. and Kim, K. T., 2004, "Densification Behavior of Metal Powder under Warm Isostatic Pressing by Using a Metal Mold," *Trans. Of KSME (A)*, Vol. 28, No. 6, pp. 838~847.
- (5) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (6) Kim, K. T., Choi, S. W. and Park, H., 2000, "Densification Behavior of Ceramic Powder Under Cold Compaction," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 122, No. 4, pp. 238~244.
- (7) ABAQUS User's I, II and III Manual, 2001, Ver. 6.2, H.D. Hibbitt, I. Karlsson and E.P. Sorenson, USA.
- (8) Augereau, F., Laux, D., Allais, L., Mottot M. and Caes, C., 2007, "Ultrasonic Measurement of Anisotropy and Temperature Dependence of Elastic Parameters by a Dry Coupling Method Applied to a 6061-T6 alloy," *Ultrasonics*, Vol. 46, pp. 34~41.
- (9) Ledbetter, H. M., 1982, "Temperature Behaviour of Young's Moduli of Forty Engineering Alloys," *Cryogenics*, pp. 653~656.
- (10) Andrade, U. R., Meyers, M. A. and Chokshi, A. H., 1994, "Constitutive Description of Worand Shork-Hardened Copper," *Scripta Mater.*, Vol. 30, No. 7, pp. 933~938.
- (11) Ludwik, P., 1909, "Elemente der Technologischen Mechanik," *Springer*, Berlin.
- (12) Kim, K. T., Yang, H. C. and Hong, S. T., 2001, "Densification Behavior of Titanium Alloy Powder Compacts at High Temperature," *Powder Metall.*, Vol. 44, No. 1, pp. 34~40.
- (13) 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.