금속 몰드를 이용한 금속 분말의 온간 등가압 성형

박중구* • 김기태†

Densification behavior of metal powder under warm isostaic pessing with metal mold

JungGoo Park and KiTae Kim

Key Words : Densification(치밀화), Finite Element Analysis(유한요소해석), Metal Mold(금속 몰드), Metal Powder(금속 분말), Warm Isostatic Pressing(온간 정수압 성형), Warm Die Pressing(온간 금형 압축)

Abstract

The effect of the metal mold on densification behavior of stainless steel 316L powder was investigated under warm isostatic pressing with metal mold. We use lead as metal mold and obtain experimental data of metal mold property. To simulate densification of metal powder, the elastoplastic constitutive equation proposed by Shima and Oyane was implemented into a finite element program (ABAQUS) under warm die pressing and warm isostatic pressing with metal mold. Finite element results were compared with experimental data for densification and deformation of metal powder under warm isostatic pressing and warm die pressing.

1. 서 론

분말 야금(PM: Powder Metallurgy)은 최종 성형체의 기계적, 재료적 성질을 향상 시킬 수 있는 매우 유용한 공정으로 알려져 있다.[1-2] 그러나 분말 야금에 의한 부품의 성형시, 금형과 분말 사이의 마찰로 인한 밀도 분포의 불균일은 성형체 내부의 잔류 응력을 생성시키고, 소결시 불균일한 변형 등의 원인이 된다. 따라서 밀도 분포의 불균일을 최소화하는 공정의 개발은 분말 야금의 중요한 연구 주제 중의 하나이다.

온간에서의 분말 성형 공정은 적은 성형 압력으로도 높은 상대 밀도를 얻을 수 있고, 성형 후 강도의 향상, 성형체 내부의 균일한 밀도 분포, 시편제거의 용이성 등의 장점이 있는 것으로 알려져 있다.[4-5] 최근에는 이러한 온간 성형의 장점과 고무 몰드를 이용한 등가압 성형을 결합한 온간에서의 고무 등가압 성형 공정(RIP: Rubber Isostatic Pressing)이 소개되고 있다.[6] 이러한 성형 공정은 냉간 및 열간 등가압 성형에 비해 쉽게 정수압 조건을 구현할 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 있어, 그 적용에 한계가 있다.

본 논문에서는 금속 몰드를 이용하여 온간 등가압 성형 공정을 개발하였다. 금속 몰드를 이용한 분말 성형체의 치밀화 공정은 높은 성형 온도에서 정수압 조건을 얻을 수 있고, 형상 제어를 통해 최종 부품으로의 정밀 정형에 이용될 수 있다.

온간에서 몰드의 낮은 유동 응력은 작은 가압력으로도 정수압 조건을 구현하는데 매우 유용하다. 본 논문에서는 온간에서 낮은 유동 응력을 나타내는 납을 금속 몰드로 사용하였다. 납의 온도에 따른 물성에 대해서는 여러 연구자들의 연구 결과가 있다. Y. dai 등[7]은 납-비스무트 합금에 대해 온도에 따른 그 특성을 연구한 바 있고, Park 등[8]은 납 모델링 실험을 통해 온간에서는 납 시편과 금형이 거의 무 마찰 상태가 됨을 밝힌 바 있다.

금속 분말의 치밀화 및 변형 예측을 위해서 Shima-Oyane 의 구성 모델[9]을 사용하였다. 또한 일반적으로 많이 사용되는 온간 금형 압축의 경우

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

와 금속 몰드를 이용한 온간 등가압 성형 공정을 200 °C 와 300 °C 의 온도 조건에서 비교하였다.

2. 실 험

본 논문에서는 수 분사법으로 제조된 평균 입자 크기가 8 μm 인 스테인레스강 분말(stainless steel 316L, Pamco Co., Japan)을 사용하여 실험을 수행하였다. 분말의 물리적 성질과 화학적 조성은 다른 논문에서 쉽게 찾을 수 있다.[10]

2.1 스테인레스강 모재의 고온 인장 실험

유한요소 해석을 수행하기 위해서는 모재의 항복강도와 탄성계수 등 기계적 특성에 대한 자료가 필요하다. 냉간 정수압 성형을 통해 얻은 초기 성형체를 수소 분위기로에서 1200°C 에서 4 시간 동안 소결하여 기계 가공 후 인장 시편을 얻었다. 시편의 최종 상대밀도는 $D \geq 0.985$ 이다.

스테인레스강 모재 시편의 고온 인장 실험은 재료 시험기(MTS servo-hydraulic tester)에 고주파 가열 장치(induction heating system)를 장착하여 수행하였다. 가열 장치를 이용하여 10°C/min 의 승온 속도로 각각 200°C 와 300°C 로 가열한 후 10^{-3}/s 의 일정한 변형률 속도로 인장하였다.

2.2 납 몰드의 기계적 성질

납 모재의 변형률-응력 곡선을 얻기 위하여 아르곤 분위기의 진공로(vacuum furnace)와 고온 변위 측정 장치(LVDT)[17]가 장착된 재료 시험기를 이용하여 일축 압축 실험을 하였다. 압축 실험은 고온의 진공로에서 수행하였고, 납 시편과 압반 사이의 마찰을 줄이기 위하여 탄탈륨 박판(tantalum sheet)을 삽입하였다. 200°C 와 300°C 의 온도에서 10^{-3} mm/s 의 일정한 변위 속도로 실험하였다.

2.3 납 몰드를 이용한 등가압 성형

실험에 사용된 납 몰드는 외경 43 mm, 두께 5 mm, 높이 60 mm 이며, 내경 43 mm 의 금형 안에 삽입하여 실험하였다. 스테인레스강 분말의 초기 충진 밀도는 0.44 이며 200°C 및 300°C 의 온도에서 400 MPa 까지의 가압력으로 일방향 압축하였다.

2.4 온간 금형 압축 실험

스테인레스강 분말의 온간 금형 압축 실험은 가열로가 장착된 재료 시험기를 이용하였으며, 초경으로 제작 된 직경 26 mm 인 금형을 사용하였다. 각각 200°C, 300°C 에서 실험하였고, 분말과 금형 사이의 마찰을 줄이기 위하여 금형 벽면에 흑연 윤활제를 사용하였다. 가압은 400 MPa 까지 일방향 압축하였다.

2.5 분말 성형체의 밀도 분포

분말 성형체의 상대밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계[13]를 이용하여 간접적으로 구할 수 있으며, 경도측정에는 로크웰 경도계(Rockwell FR-3, Future-Tech Corp., Japan)를 사용하였다.[11] 자세한 실험 방법은 Jeon 등[10]의 논문에서 찾을 수 있다.

3. 이 론

3.1 금속 분말의 구성 방정식

금속 분말의 변형률 속도 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \dot{\lambda}\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \tag{1}$$

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

Shima 와 Oyane 은 금속 분말을 위한 항복함수를 다음과 같이 제안하였다.[9]

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

여기서 p, q, σ_m 및 $\bar{\varepsilon}_m^p$ 은 각각 분말 재료에 가해지는 정수 응력과 유효 응력, 모재의 유동 응력과 유효 소성 변형률이다.

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

$$\dot{D} = -D\dot{\varepsilon}_{kk}^{p} \tag{3}$$

금속 분말의 치밀화 거동은 Shima-Oyane 의 구성 방정식[9]을 ABAQUS[12]의 사용자 정의 서브루틴인 UMAT 에 적용하여 해석하였다.

4. 실험 결과 및 해석

납 몰드의 압축시 일어나는 변형 특성을 파악하여 유한요소 해석에 적용하기 위해 일축 압축 실험을 하였다. 온간 금형 압축과 납 몰드를 이용한 온간 성형에서 금형, 납 몰드 및 분말 성형체는 균일한 온도 분포로 가정하였다.

4.1 납 몰드의 기계적 성질

Fig. 1 은 각각의 온도에서 10^{-3} mm/s 의 일정한 변형률 속도로 일축 압축 하였을 때의 대수 변형률과 진 응력의 변화를 나타낸다. 온도가 높을수

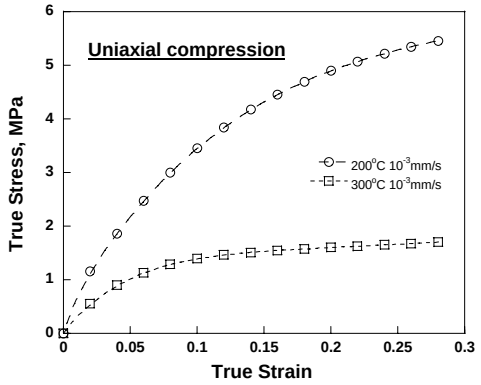

Fig. 1 Variation of true stress with true strain for lead specimen under uniaxial compression test at 200°C and 300°C

록 변형에 필요한 유동 응력이 낮게 나타남을 알 수 있다. 납 몰드의 낮은 유동 응력은 온간 성형 시 낮은 성형 압력에서도 높은 상대 밀도 분포를 갖게한다. 유한요소 해석을 위한 납 모재의 탄성계수는 압축 응력과 소성 변형률 곡선의 0.2% offset 으로 구하였고, 프와송비는 문헌[16]의 값을 인용하였다. 즉, 200°C 에서 E=35.20 GPa, 300°C 에서 E=14.35 GPa 이며, 프와송비는 0.45 를 사용하였다.

4.2 모재의 온간 일축 압축

스테인레스강 모재 시편을 200°C 와 300°C 에서 일정한 변형률 속도로 일축 인장하여 인장 응력과 소성 변형률의 관계를 구하였다. 그리고 금형 압축시 유한요소 해석 결과가 실험치를 잘 예측 할 수 있도록 유동 응력의 크기를 계산하여 실험식을 수정하여 적용하였다. 실험식과 수정된 식은 다음과 같은 Ludwik 의 식으로 잘 나타낼 수 있다. 즉, 200°C 에서

$$\sigma_m = \begin{cases} 112.48 + 964.06\left(\bar{\varepsilon}_m^p\right)^{0.57569} & (4) \\ 279.28 + 1377.3\left(\bar{\varepsilon}_m^p\right)^{0.54997} & (5) \end{cases}$$

300°C 에서

$$\sigma_m = \begin{cases} 60.652 + 805.19\left(\bar{\varepsilon}_m^p\right)^{0.4285} & (6) \\ 285.98 + 1214.4\left(\bar{\varepsilon}_m^p\right)^{0.61821} & (7) \end{cases}$$

로 나타낼 수 있다.

수정된 식 (5)와 (7)을 Shima-Oyane 의 구성 모델[9]에 적용하여 온간 성형시 가압력에 따른 치밀화 거동을 해석하였다. 유한요소 해석을 위한 탄성계수 및 항복강도는 응력과 변형률 곡선에서 구하였으며, 프와송비는 문헌[16]의 값을 인용하여 0.33 을 사용하였다.

4.3 금형 압축에 의한 온간 성형

Fig. 2 는 스테인레스강 분말의 온간 금형 압축

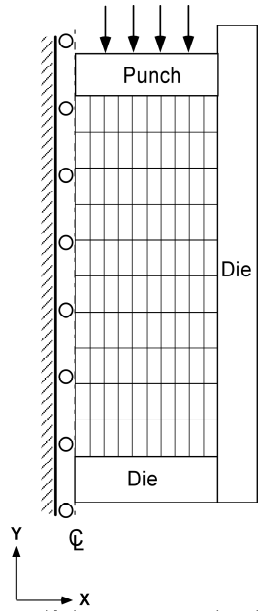

Fig. 2 Finite element meshes and boundary conditions for warm die pressing

에 사용된 유한요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. x 축 대칭 조건으로부터 전체 단면의 1/2 만을 해석하였으며, 분말 성형체는 100 개의 4 절점 2 차 축 대칭 요소인 CAX4(4-node axisymmetric quadrilateral, biquadratic displacement element)와 25 개의 축 대칭 강 요소인 RAX2(axisymmetric rigid element)를 사용하였다.[12] 금속 분말의 변형거동을 위해서는 Shima-Oyane 의 구성 모델[9]을 사용하였으며, 금형과 스테인레스강 분말 사이의 마찰계수는 0.17 로 가정하였다.[15-16]

Fig. 3 은 각각 200°C 와 300°C 에서 금형 압축시 스테인레스강 시편의 가압력에 따른 상대 밀도 변화를 나타내는 실험치와 Shima-Oyane 의 구성 모델[9]에 의한 유한요소 해석 결과의 비교를 나타내고 있다. 식 (4)와 (6)을 사용한 유한요소 해석 결과는 실험치보다 높은 밀도 분포를 예측 하였다. 따라서, 유한요소 해석을 이용한 스테인레스강 분말 성형체의 정확한 거동 예측을 위해서는 식 (5)와 (7)로 수정하여 사용하여야 하며, 이를 금형 압축 및 납 몰드를 이용한 온간 성형에 적용하였다.

4.4 납 몰드를 이용한 온간 성형

Fig. 4 는 납 몰드를 이용한 스테인레스강 분말의 온간 성형에 사용된 유한요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. x 축 대칭 조건으로부터 전체 단면의 1/2 만을 해석하였으며, 분말 성형체와 납 몰드는 각각 100 개와 124 개의 4 절점 2 차 축 대칭 요소인 CAX4 를 사용하였고, 금형을 위해서 25 개의 축 대칭 강 요소인 RAX2 를 사용하였다.[12]

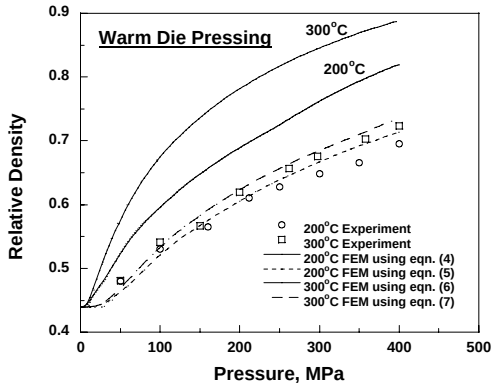

Fig. 3 Comparisons between experimental data and finite element results for the variation of relative density with axial stress during warm die pressing at 200°C and 300°C

금속 분말의 변형거동을 위해서는 Shima-Oyane 의 구성 모델[9]을 사용하였으며, 스테인레스강 분말과 납 몰드 사이의 마찰 계수는 0.17 로 가정하였다.[14-15]

Fig. 5 는 200°C 와 300°C 에서의 납 몰드를 이용한 스테인레스강 분말의 온간 성형시 가압력에 따른 상대 밀도의 변화를 나타내는 실험치와 유한요소 해석 결과와의 비교를 나타낸다. 금형의 온도가 300°C 이상일 때는 납과 금형은 거의 무마찰 상태가 됨이 알려져 있으며[8], 유한요소 해석에 무마찰 조건을 적용하였다. 납 몰드의 치수는 높이 60 mm, 외경 43 mm 이며 두께는 5 mm 로 하였다. 분말 성형체의 초기 밀도는 실험을 통해 구한 0.44 를 사용하였다. 금형 압축을 통해 수정된 유동 응력 식을 이용한 유한요소 해석 결과는 실험치를 잘 예측하고 있다. 200 °C 의 경우, 무마찰 조건과 마찰계수를 0.1 로 가정하였을 때[14]의 해석 결과는 약간의 차이가 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 납 몰드를 이용하여 300°C 에서 250 MPa 의 성형 압력으로 온간 성형한 스테인레스강 분말 성형체의 형상과 유한요소 해석 결과의 비교를 나타낸다. 해석 결과는 실험 결과를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

4.5 분말 성형체의 밀도 분포

4.5.1 경도와 상대 밀도와의 관계

스테인레스강 분말 성형체의 상대 밀도와 로크웰 경도의 실험치를 이용하여 다음과 같은 상관관계[10]로 표현 할 수 있다.

$$D = 0.5559 + 0.00174 \cdot HRF + 1.089 \times 10^{-5} \cdot HRF^2 \qquad (8)$$

4.5.2 금형 압축에 의한 온간 성형

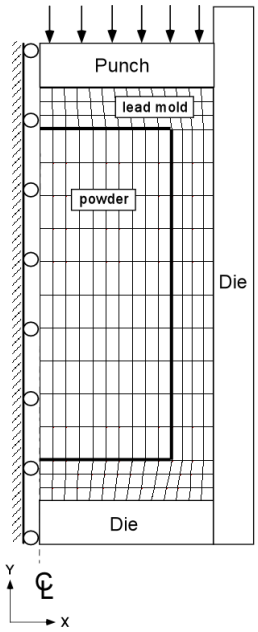

Fig. 4 Finite element meshes and boundary conditions for a powder compact in the metal mold isostatic pressing

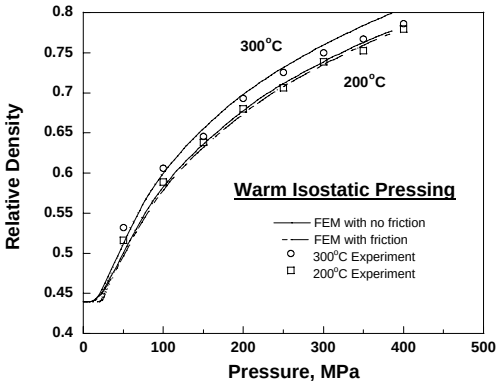

Fig. 5 Comparisons between experimental data and finite element results for the variation of relative density with axial stress during metal mold warm isostaitc pressing at 200°C and 300°C

Fig. 7 의 (a)와 (b)는 200°C 에서 250 MPa 의 하중으로 성형한 시편의 상대 밀도 분포에 대한 실험치와 유한요소 해석 결과의 비교를 나타낸다. 유한요소 해석 결과는 실험치를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8 의 (a)와 (b)는 300°C 에서의 금형 압축 시편과 유한요소 해석 결과와의 비교를 나타낸다. 200°C 의 경우보다 높은 상대 밀도 분포를 나타내지만, 밀도 구배는 감소하지 않는다. 온간 금형 압축 시 나타나는 밀도 구배는 소결 등의 후처리 공정시 성형체의 불균일한 변형을 발생시키는 원인이 된다.

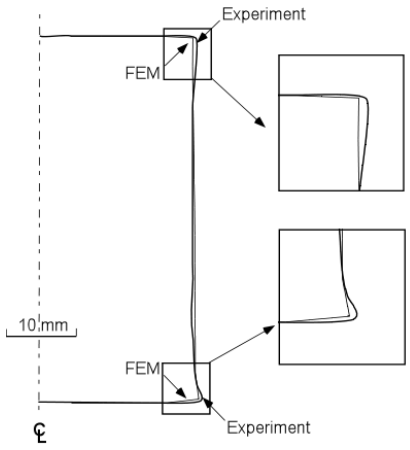

Fig. 6 Comparisons between experimental data and finite element result of deformation under 250 MPa during metal mold isostatic pressing at 300°C

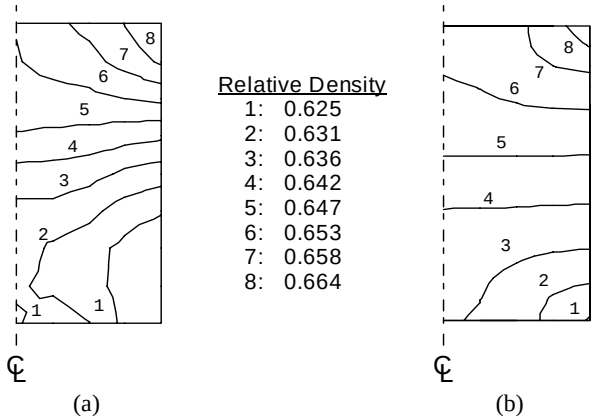

Fig. 7 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during warm die pressing at 200°C

4.5.3 금속 몰드를 이용한 온간 성형

Fig. 9 (a)와 (b)는 200°C 에서 금속 몰드를 사용하여 250 MPa 의 가압력으로 성형한 시편의 실험치와 유한요소 해석 결과의 비교를 나타낸다. Fig. 9(a)의 실험 결과는 Fig. 7 의 금형 압축 결과보다 균일한 밀도 분포를 보여주고 있으며, 유한요소 해석 결과는 이러한 경향을 잘 예측하고 있다. 유한요소 해석시 납 몰드와 금형 사이의 무마찰 조건을 사용하였고, 실험 결과와의 비교에서 형상의 차이를 볼 수 있다. 그러므로 200°C 에서는 납 몰드와 금형 사이에 미세한 마찰이 존재하며, 이를 유한요소 해석에 고려해야 함을 알 수 있다.

Fig. 10 (a)와 (b)는 300°C 에서 금속 몰드를 사용하여 250 MPa 의 가압력으로 성형한 시편의 실험치와 유한요소 해석 결과의 비교를 나타낸다. 200°C 의 경우와 같이 균일한 밀도 분포를 나타내

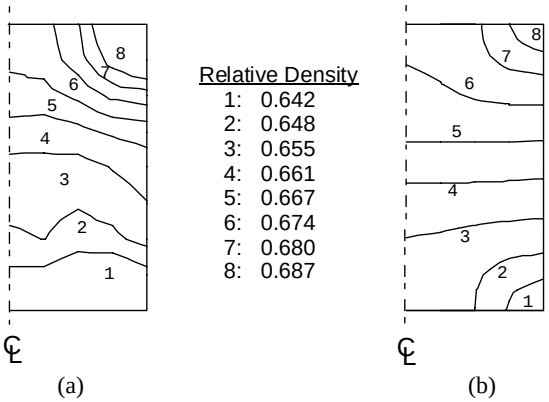

Fig. 8 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during warm die pressing at 300°C

며, 중앙 부분의 상대 밀도가 가장 높으면서 상하 대칭의 경향을 보여주고 있다. 유한요소 해석시 금형과 몰드 사이의 마찰을 무시하여 수행하였고, 이는 실험 결과의 비교로부터 적절한 가정임을 알 수 있다. 또한, 온도의 증가에 의해 스테인레스강과 납 몰드의 유동성이 증가하여 300°C 에서 상대 밀도가 높게 나타나고, 밀도 분포도 더욱 균일함을 볼 수 있다.

온간 금형 압축에 의한 결과와 금속 몰드를 이용하여 온간 성형한 결과로부터, 금속 몰드의 온간에서의 낮은 유동 응력은 적은 하중으로도 정수압에 가까운 하중 조건을 조성하며, 금형과의 마찰이 줄어들어 균일한 내부 밀도 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 스테인레스강 분말의 금형 압축시 금속 분말의 치밀화와 금속 몰드를 이용한 온간 성형 공정에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Shima-Oyane 의 구성 모델[9]을 사용하여 유한요소 해석을 수행한 결과는 금속 몰드를 이용한 금속 분말의 온간 성형에서의 분말의 치밀화와 최종 형상을 비교적 잘 예측하였다.

(2) 온간에서의 금형 압축 시 납 몰드의 사용은 몰드와 분말의 유동 응력을 줄이고, 금형과 몰드 사이의 마찰을 작게하여, 성형체내의 밀도 구배를 최소화 시키는 새로운 정수압 공정으로 활용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

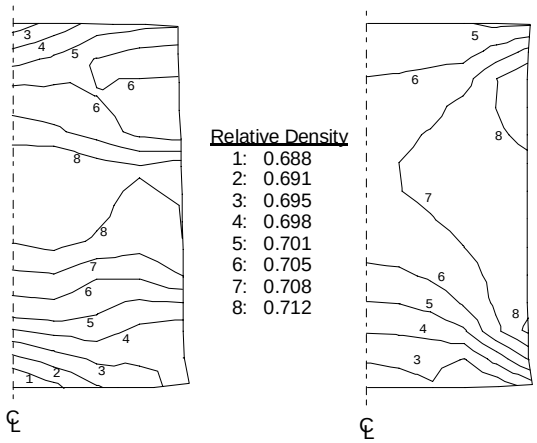

Fig. 9 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during metal mold isostatic pressing at 200°C

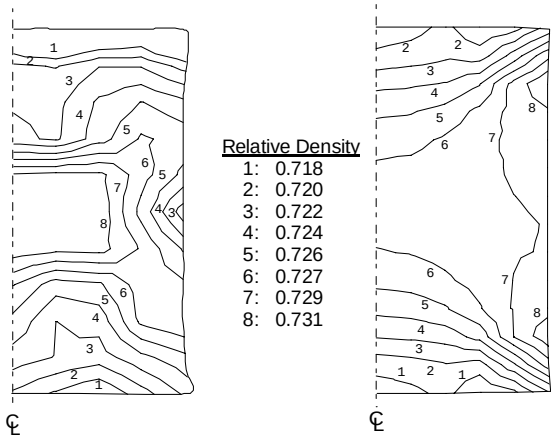

Fig. 10 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during metal mold isostatic pressing at 300 °C

(1) P. Arbstedt, 1986, "Developments in Iron ans Steel Powder Production," *Metal Powder Reports,* Vol. 41, No. 1, pp. 64~67.

(2) D. Whittaker, 1995, "PM Routes to High Performance Parts," *Metal Powder Reports,* Vol. 50, No. 1, pp. 14~24.

(3) James, P. J., 1983, *Isostatic Pressing* Applied Sci. Publishers.

(4) S. St Laurent and F. Chagnon, 1999, "Behaviour of steel powder mixtures processed by warm compaction," *Metal Powder Report,* Volume 54, Issue 3, pp. 42.

(5) Jens Wahnschaffe, 1998, "New compaction approaches to higher density PM: warm or cold," *Powder Metallurgy*, Vol. 41, No. 4, pp. 250~252.

(6) Yang, H. C., Kim, J. K. and Kim, K. T., 2003, "Effect of a rubber mould on densification and deformation of metal powder during warm isostatic pressing," *Powder Tech.*, accepted.

(7) Y. Dai, F. Barbagallo and F. Groeschel, 2003, "Compression properties of lead-bismuth," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 317, Issues 2-3, pp. 252~255.

(8) Park, C. Y., Yang, D. Y., Lee, K. H. and Eun, I. S., 1994,"Process Development of ths Large size Dome Shape Forging-Products Using the Incremental and Combined Forming Method," *Transactions of KSME*, A18, No. 7, pp. 1685~1696.

(9) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.,* Vol. 18, pp. 285~291.

(10) Jeon, Y. C. and Kim, K. T., 1999, "Near-net-shape forming of 316L stainless steel powder under hot isostatic pressing," *Int. J. Mech. Sci*., Vol. 41, pp. 815~830.

(11) Abe, O., Kanzaki, S., Ohashi, M. and Tabata, H., 1987, "Influence of size and shape on homogeneity of powder compacts formed by cold isostatic pressing (part 1): Press forming of thick cylinders," *International Journal of High Technology Ceramics*, Vol. 3, Issue 3, pp. 257~258.

(12) ABAQUS User's I, II and III Manual, 2001, Ver. 6.2, H.D. Hibbitt, I. Karlsson and E.P. Sorenson, USA.

(13) Yang, H. C., and Kim, K. T.,2000,"Densification Behavior of Ti-6Al-4V Powder Compacts by Hot Isostatic Pressing," *Transactions of KSME*, A24, No. 2, pp. 394~402.

(14) Han, H. N., Lee, Y. G., Oh, K. H. and Lee, D. N., 1996, "Analysis of Hot forging of Porous Metals," *Mat. Sci. Eng. A*, A206, pp. 81~89.

(15) Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., 1983, *Metal Forming: Fundamentals and Application*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, pp. 1~353.

(16) ASM Handbook Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1998, Vol. 2, Tenth edition.

(17) 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*, A212, pp. 87~93.