

삽입된 세라믹 볼이 금속분말성형체의 치밀화에 미치는 영향

박 환* · 유요한** · 김기태***
(1998년 8월 27일 접수)

Effect of Ceramic Ball Inclusion on Densification of Metal Powder Compact

Hwan Park, Yo Han Yoo and Ki Tae Kim

Key Words : Cold Isostatic Pressing(냉간 정수압 성형), Hot Isostatic Pressing(열간 등가압 소결), Power-Law Creep(멱수법칙 크리프), Pressureless Sintering(상압소결), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

The effect of a ceramic ball inclusion on densification behavior of a metal powder compact was investigated under cold isostatic pressing, pressureless sintering and hot isostatic pressing. To simulate those processes, proper constitutive models were implemented into a finite element program (ABAQUS). Measured density distributions of metal powder compacts were also compared with finite element results and showed the same trend with simulated results. Residual stress distributions were calculated by finite element analysis to study the effect of ceramic ball inclusions with different thermal expansion coefficients. The higher residual stress was observed in a metal powder compact when the difference between thermal expansion coefficients for a ceramic ball and metal powder became larger. Samples produced by HIPing showed more uniform density distributions and lower residual stresses compared to those by sintering after cold isostatic pressing. For various sizes of ceramic ball inclusions, densification and deformation of powder compacts were also studied during hot isostatic pressing.

1. 서론

세라믹은 압축강도가 우수하기 때문에 기존의 금속재질을 이용하던 기계 구조물에 세라믹 재질을 적용할 경우 강도가 우수한 부품의 제조가 가능하다.⁽¹⁾ 그러나 금속과 세라믹은 열팽창계수와 탄성계수 등의 기계적물성에 큰 차이가 있으므로 제조공정에서 두 재료의 경계면 부근에 응력집중과 잔류응력이 발생할 수 있다. 따라서 이종재료를 이용한 구조물의 기계적특성을 예측하는데 있어서 금속과 세라믹의 경계면 근처에서의 잔류응력분포를 이해하는 것이 중요하다.

기계적 물성이 서로 다른 세라믹과 금속의 복

합성형체를 제조하기 위해서는 부품을 정밀정형(near-net-shape)할 수 있는 분말야금공정을 이용하는 것이 적합하다.⁽²⁻⁵⁾ 분말야금공정을 통해 임의의 형상으로 성형하는 방법에는 냉간금형압축(cold die compaction), 냉간정수압성형(cold isostatic pressing), 열간등가압소결(hot isostatic pressing) 등이 있다.

냉간정수압성형은 분말에 정수압을 가하여 성형하기 때문에 비교적 균일한 밀도를 갖는 성형체를 제조할 수 있다.^(6,7) 이와 같이 성형된 분말성형체는 소결공정을 거치며, 소결공정은 최종부품의 기계적 특성에 큰 영향을 미친다.^(8,9) 소결에 의한 부품의 제조는 가공공정이 간단하므로 제조원가가 적게 들며, 용점이 높거나 고순도가 요구되는 금속부품의 제조에 유용하게 사용될 수 있다. 한편, 열간등가압소결은 분말을 용기에 담아 균일한 압력을 가하는 동시에 소결을 하기 때문에 치밀하고 균일한 밀도분포를 갖는 성형체를 제조할 수 있다.

금속분말성형체의 고온치밀화성형에 대한 구성 모델은 멱수법칙 크리프(power-law creep)와 확산 크리프(diffusional creep)를 주로 고려한다.⁽¹⁰⁾ 멱수

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

** 국방과학연구소

*** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

Email : korean@postech.ac.kr

TEL : (0562)279-2164 FAX : (0562)279-5899

법칙 크리프는 고온에서 높은 하중상태의 치밀화 공정해석에 주로 사용되고 확산 크리프는 고온에서 낮은 하중상태의 치밀화공정해석에 주로 사용되며 소결 포텐셜(sintering potential)이 주된 치밀화 기구로 작용한다.

본 논문에서는 세라믹 불이 삽입된 금속분말성형체를 제조하기 위해 시편을 냉간정수압성형한 후 소결하거나 열간등가압소결을 하였다. 냉간정수압성형한 시편의 치밀화를 해석하기 위해서는 Shima와 Oyane⁽¹¹⁾가 제안한 소성항복조건식을 사용하였으며, 소결공정의 치밀화해석에는 Besson과 Abouaf⁽¹²⁾가 제안한 확산 크리프에 의한 구성모델을 사용하였다. 또한, 열간등가압소결하의 치밀화를 해석하기 위해서 Abouaf 등⁽¹³⁾이 제안한 멱수법칙 크리프에 의한 구성모델을 사용하였으며 각각 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁴⁾에 적용하여 세라믹 불이 삽입된 금속분말성형체의 치밀화와 변형거동 및 잔류응력을 해석하였다.

냉간정수압성형 후 소결한 시편에 대해 삽입된 세라믹 불이 금속분말성형체 내의 잔류응력에 미치는 영향을 조사하기 위해 비교적 열팽창계수의 차이가 큰 Al_2O_3 와 WC로 만든 세라믹 불을 각각 삽입한 경우에 대하여 유한요소해석을 통해 시편 내의 잔류응력분포를 계산하여 비교하였다. 또한, 열간등가압소결한 Al_2O_3 불이 삽입된 시편의 잔류응력 및 치밀화거동을 유한요소해석하여 냉간정수압성형 후 소결을 거친 시편의 해석결과와 비교하였으며 Al_2O_3 불의 크기를 변화시키며 금속분말성형체의 치밀화거동도 해석하였다. 끝으로 경도시험을 통해 간접적으로 측정된 시편내의 상대밀도의 분포를 유한요소해석의 결과와 비교하였다.

2. 실험

본 논문에서는 철(96.5%), 니켈(3.0%) 및 탄소(0.5%) 등이 혼합된 금속분말 내부에 알루미늄 또는 텅스텐 카바이드 불을 삽입하여 냉간정수압성형 후 상압소결과 열간등가압소결을 이용하여 세라믹 불이 삽입된 금속분말성형체를 제조하였다.

2.1 냉간정수압성형과 소결

냉간정수압성형과 소결을 위한 시편을 만들기 위해 내경 78mm, 내부높이 85mm 및 두께 6mm의 고무몰드에 금속분말 1240 g과 직경 30mm의 알루미늄 불 또는 텅스텐 카바이드 불을 넣고 고무몰드를 라텍스로 싼 후에 내부를 진공상태로 만들었다. 시편을 냉간정수압성형기에서 20 MPa/min의 압력속도로 300 MPa의 정수압을 가한 후 2분

동안 유지하고 서서히 압력을 제거하였다. 냉간정수압성형이 끝난 후 세라믹 불을 제외한 시편의 상대밀도는 0.772이었다.

성형된 시편은 1150℃의 진공 분위기에서 2시간 동안 소결하였으며 소결 후 금속분말성형체의 평균 직경과 높이는 각각 61.7mm와 63.8mm이었고 상대밀도는 0.775이었다.

2.2 열간등가압소결

실험에 사용된 열간등가압소결장치(Hot Isostatic Press ; System 30T, Kobelco, Japan)는 아르곤 가스로 가압하며 압력과 온도를 프로그램으로 제어할 수 있다. 열간등가압소결을 위한 시편을 만들기 위해서 내경 82mm, 높이 95mm, 두께 1mm의 스테인리스 강 용기와 위, 아래를 막을 수 있는 두께 1mm의 뚜껑, 탈가스작업시 배기관으로 사용되는 직경 8mm와 두께 1mm의 스테인리스 강 튜브를 사용하였다. 용기는 분말을 채우기 전에 붉은 염산으로 세척하였다.

금속분말 1365 g을 용기에 채우며 세라믹 불을 용기의 중심부에 삽입하고 진동장치를 이용하여 분말이 최적 충전되도록 하였다. 분말을 채운 용기가 기밀을 유지하도록 뚜껑과 용기를 용접하고 불순물 제거를 위해 400℃에서 6시간 동안 탈가스작업을 거쳤으며 진공이 유지되도록 배기관을 압착하고 끝부분을 용접하였다.

열간등가압소결에서는 아르곤 가스를 주입하여 내부의 압력이 7.84 MPa에 도달하면 가스 압축기가 작동하며 동시에 10℃/min으로 가열을 시작하였다. 압력이 50 MPa에 도달하면 가압을 중지하여 유지하고, 온도가 1100℃에 이르면 온도유지 시간을 30분과 120분의 두 경우에 대하여 실험하였으며 냉각속도는 약 20℃/min이었다.

2.3 금속모재의 일축압축실험

금속분말모재의 탄성계수와 항복강도를 측정하기 위해 열간등가압소결을 통해 이론밀도를 갖는 모재를 만들었고 재료시험기를 사용하여 하중속도 200 N/sec로 일축압축실험을 하였다. 시편 표면에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였으며 마찰의 영향을 최소화하기 위해 시편과 압반 사이에 테프론막을 삽입하였다.

3. 이론

세라믹 불이 삽입된 금속분말성형체의 치밀화 공정을 해석하기 위해 다음과 같은 구성모델을 사용하였다. Shima와 Oyane⁽¹¹⁾가 제안한 다공질금속에 대한 소성항복조건식을 사용하여 냉간정수압성

형공정을 해석하였고, Besson 과 Abouaf⁽¹²⁾가 제안한 확산 크리프에 의한 치밀화 구성모델을 사용하여 소결공정을 해석하였다. 또한, Abouaf 등⁽¹³⁾이 제안한 멱수법칙에 의한 치밀화 구성모델을 사용하여 열간등가압소결공정을 해석하였다.

3.1 냉간정수압성형

금속분말성형체의 소성항복조건식은 다음과 같은 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

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

여기서 D, p, q, σ_m, N 및 $\bar{\epsilon}_m^p$ 는 상대밀도, 정수 응력, 유효응력, 모재의 유동응력, 재료상수 및 모재의 등가소성 변형률속도를 나타내며 F 는 상대밀도의 함수이다. Shima 와 Oyane⁽¹¹⁾는 구리분말성형체의 일축압축실험으로 $F = 1/\{2.49(1-D)^{0.514}\}$ 와 $N = 2.5$ 를 결정하여 소성항복조건식을 제안하였다.

3.2 상압소결

상압소결을 해석하기 위해 Abouaf 등⁽¹²⁾은 소결 포텐셜을 고려하여 다음과 같은 확산크리프에 의한 변형률속도식을 제안하였다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{DA_{diff} \exp(-\tilde{Q}/RT)}{TG^3} \left\{ f(\sigma_{kk} - 3\sigma_s) \delta_{ij} + \frac{3}{2} c s_{ij} \right\} \quad (2)$$

여기서 $\sigma_s, A_{diff}, T, G, R$ 및 \tilde{Q} 는 소결포텐셜, 확산 크리프 계수, 절대온도, 결정립 크기, 기체상수 및 확산 활성화 에너지를 나타낸다.

3.3 열간등가압소결

Abouaf 등⁽¹³⁾은 고온에서 멱수법칙 크리프에 의한 치밀화거동을 예측할 수 있는 변형률 속도를 상당 Mises 응력 σ_{eq} 를 이용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} &= \frac{D\dot{\epsilon}_o \sigma_{eq}^{n-1}}{\sigma_o^n} \left(f_1 \delta_{ij} + \frac{3}{2} c s_{ij} \right) \\ &= DA \sigma_{eq}^{n-1} \left(f_1 \delta_{ij} + \frac{3}{2} c s_{ij} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$$\sigma_{eq}^2 = f_1^2 + 3cJ_2 \quad (4)$$

또한 식 (3), (4)에서 $s_{ij} = \sigma_{ij} - 1/3 \sigma_{kk} \delta_{ij}$, $I_1 = \sigma_{kk}$, $J_2 = 1/2 \sigma_{kk} \sigma_{ij}$ 이며 A, δ_{ij}, n 및 D 는 각각 Dorn 상수, Kronecker delta, 재료상수 및 상대밀도를 나타낸다. c 와 f 는 각각 상대밀도의 함수이며, 실험을

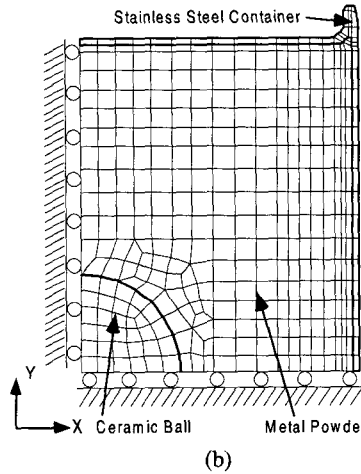
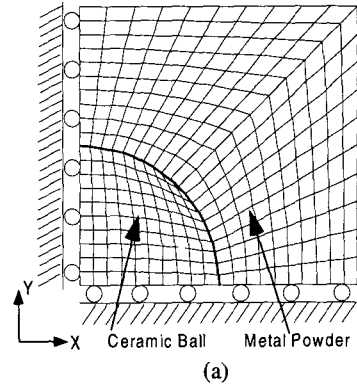


Fig. 1 Finite element meshes and boundary conditions for (a) cold isostatic pressing, pressureless sintering and (b) hot isostatic pressing of a metal powder compact with a ceramic ball inclusion

통해 구할 수 있다. 비다공질 재료인 경우 c 와 f 는 각각 1과 0을 가지며 본 논문에서는 Svoboda 등⁽¹⁵⁾의 결과를 사용하였다. 이 경우 상당 Mises 응력 σ_{eq} 는 통상적인 Mises 응력이 된다.

다공질 재료에서 상대밀도 ρ 는 변형률 속도식 으로부터 구할 수 있는데 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\rho} = -\rho \dot{\epsilon}_{kk} \quad (5)$$

3.4 유한요소해석

세라믹 볼이 삽입된 금속분말성형체의 치밀화 거동과 잔류응력에 대한 유한요소해석에서 세라믹 볼과 금속분말성형체의 경계면은 서로 분리되거나 미끄러짐이 일어나지 않는다는 가정하에 접하고있는 요소는 절점을 서로 공유하게 하였다. 또한 세라믹 볼은 각 공정에서 소성변형은 하지 않고 열-탄성변형을 한다고 가정하였다.

Fig. 1은 세라믹 볼이 삽입된 금속분말성형체의

(a) 냉간정수압성형 및 상압소결과 (b) 열간등가압소결의 치밀화 해석에 사용된 유한요소격자와 경계조건을 나타내며 각각 300 개의 CAX4T(4-node axisymmetric thermally coupled quadrilateral, bilinear displacement and temperature)요소를 사용하였다. 각 공정에 사용된 시편의 단면은 모두 x 축에 대한 대칭 조건과 y 축에 대한 축 대칭조건으로부터 전체 단면의 1/4 에 대해서만 유한요소해석을 하였다.

4. 실험결과와 유한요소해석결과의 비교

본 논문에서는 냉간정수압성형 후 상압소결과 열간등가압소결을 이용하여 금속분말 내에 Al₂O₃ 또는 WC 의 세라믹 불을 삽입한 시편을 제조하였다. 또한, 3 장에서 기술한 치밀화 구성모델들을 ABAQUS⁽¹⁴⁾의 사용자 정의 서브루틴 CREEP 에 적용하여 금속분말성형체의 치밀화거동을 유한요소 해석하고 실험치와 비교하였으며 공정 후의 잔류 응력의 분포에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 2 는 상온 일축압축하에서 금속분말 소재의 응력과 변형률의 관계를 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = 209 + 354.8(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.4737} \quad (5)$$

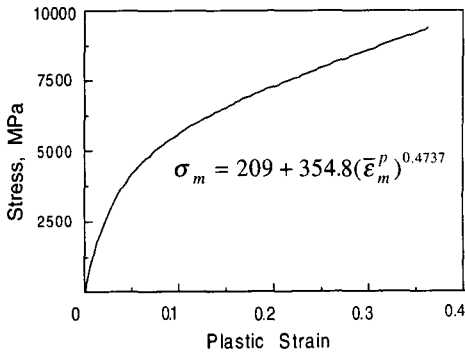


Fig. 2 Uniaxial stress-plastic strain relation for the matrix of metal powder

Table 1 Mechanical properties for the matrix of metal powder⁽¹⁶⁾

Material Property	Unit	Value
Young's Modulus	GPa	217
Poisson's ratio		0.2875
Thermal Conductivity	J/msK	13.8
Thermal Expansion Coefficient	/K	18.2 × 10 ⁻⁶
Specific Heat	J/kgK	1223

Table 1 은 금속분말 소재의 기계적성질을 나타내며 Table 2 는 변형률속도식 (2)에 사용된 확산 크리프에 대한 상수들을 나타낸다. Table 3 과 Table 4 는 각각 열간등가압소결공정의 해석에서 금속분말과 용기에 사용된 스테인리스 강의 크리프 지수와 Dorn 상수를 나타내고 Table 5 는 세라믹 불의 a 물성을 나타낸다.

4.1 냉간정수압성형과 상압소결

텅스텐 카바이드 불이 삽입된 분말성형체 내의 상대밀도분포에 대한 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였고 유한요소해석을 통해 알루미늄 불과 텅스텐 카바이드 불이 삽입된 분말성형체의 소결공정 후 발생하는 잔류응력을 비교하였다.

금속분말성형체 내의 상대밀도분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있으며 금속분말성형체의 경도측정에는 로크웰

Table 2 Diffusional properties for the matrix of metal powder⁽¹⁶⁾

Diffusional Property	Unit	Value
Diffusion Constant	m ³ K/sMPa	6.15 × 10 ⁻⁹
Activation Energy	kJ/mol	419
Grain Size	μm	14.142
Gas Constant, R	kJ/kgK	8.314

Table 3 Creep properties for metal powder⁽¹⁷⁾

Temp.(°C)	Exp.	Dorn Constant
600	6.9	6.85 × 10 ⁻¹⁷
850	6.9	3.08 × 10 ⁻¹³
1100	4.5	5.54 × 10 ⁻¹⁰

Table 4 Creep properties for 304 stainless steel⁽¹⁷⁾

Temp.(°C)	Exp.	Dorn Constant
600	7.5	2.37 × 10 ⁻²⁴
900	7.5	1.63 × 10 ⁻¹⁹
1100	7.5	3.35 × 10 ⁻¹⁷

Table 5 Material properties of ceramic balls⁽¹⁸⁾

Material Property	Unit	Al ₂ O ₃	WC
Young's Modulus	GPa	403	696
Poisson's Ratio		0.26	0.22
Density	kg/m ³	3940	14400
Thermal Conductivity	J/msK	6.0	71.4
Thermal Expansion Coef.	/K	9.3 × 10 ⁻⁶	5.2 × 10 ⁻⁶
Specific Heat	J/kgK	237.7	131.3

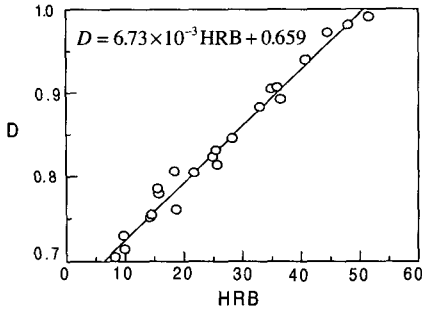


Fig. 3 Variation of relative density with Rockwell hardness(HRB) for metal powder compacts

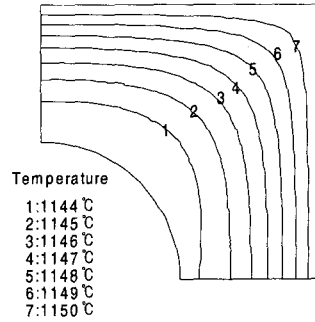


Fig. 5 Temperature distribution of a metal powder compact with an Al₂O₃ ball inclusion

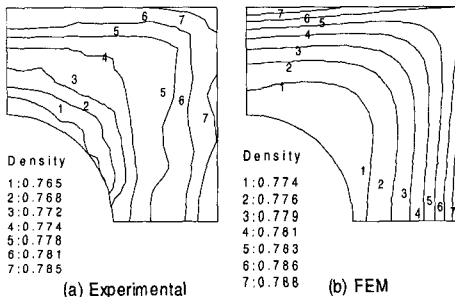


Fig. 4 Comparison between (a) experimental data and (b) finite element calculations for relative density distributions of a metal powder compact with a WC ball inclusion after cooling

(Rockwell) 경도계가 주로 사용된다.^(19,20) 본 논문에서는 로크웰 B형 경도계를 사용하여 1.58mm(1/16 inch) 강구압자로 하중 60 kg을 20 초간 가하여 경도치를 측정하였다. Fig. 3은 금속분말성형체의 상대밀도와 로크웰 B형 경도치(HRB)의 관계를 나타내며, Fig. 3의 실험치(○)를 보간하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$D = 6.73 \times 10^{-3} \text{HRB} + 0.659 \quad (6)$$

Fig. 4는 텅스텐 카바이드 볼이 삽입된 시편의 소결 후 상대밀도분포를 나타낸다. Fig. 4(a)는 로크웰 경도실험치와 식 (6)을 이용하여 구한 상대밀도분포의 실험치이며 Fig. 4(b)는 유한요소해석으로 구한 상대밀도분포를 나타낸다. 유한요소해석의 결과는 실험으로 구한 상대밀도 분포를 잘 예측하고 있으며 실험치보다 조금 높은 밀도값을 나타낸다.

Fig. 5는 냉간정수압성형 공정을 거친 세라믹 볼이 삽입된 금속분말성형체의 소결 과정에서 시편이 실험온도인 1150℃에 도달한 직후 금속분말성형체 내부의 온도분포를 나타내는 유한요소해석

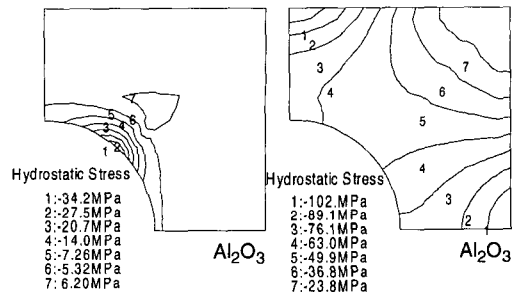


Fig. 6 Residual hydrostatic stress distributions of a metal powder compact with an Al₂O₃ ball inclusion (a) before and (b) after cooling under pressureless sintering

결과이다. 여기서 금속분말성형체의 바깥 부분과 세라믹 볼과의 경계면 사이의 온도차는 약 6℃ 정도임을 알 수 있다.

Fig. 6(a)는 온도유지가 끝난 직후 시편 내부의 잔류정수응력을 나타내며 이는 금속분말성형체 내의 온도차이에 의한 열응력 외에 세라믹 볼과의 경계면의 형상으로 인해 잔류응력이 경계면 주위에 발생하였다. 특히 구형형상으로 인해 세라믹 볼과의 경계면에 -34.2 MPa의 잔류응력이 작용함을 알 수 있다. 여기서 -부호는 인장응력을 의미한다. Fig. 6(b)는 상온으로 냉각된 시편에서의 잔류정수응력을 나타낸다. Fig. 6(a)에 비해 응력집중이 세라믹 볼 경계면에서 금속분말성형체의 표면으로 이동하고 특히 옆면의 중앙과 윗면의 중앙에서 인장응력이 증가함을 보이며 시편내에 응력값이 전반적으로 증가하였다. 이는 시편의 소결 후 냉각이 시작되면 금속분말성형체 내에 온도차가 발생하여 잔류응력이 발생하고 금속분말에 비해 열팽창계수가 낮은 세라믹 볼이 상대적으로 수축이 작게 일어나서 세라믹 볼 주위의 인장응력이 분산되기 때문이다. 따라서 금속분말성형체의 최종 응력

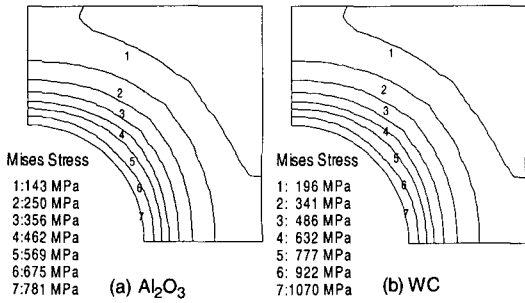


Fig. 7 Residual effective stress distribution of a metal powder compact with (a) Al_2O_3 and (b) WC ball inclusion before cooling

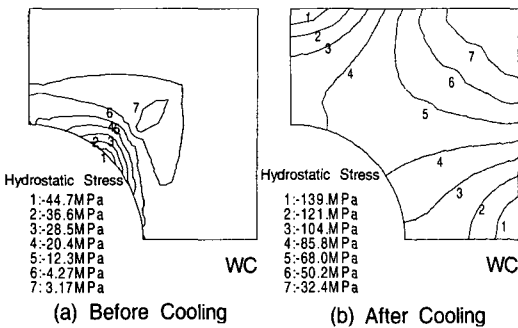


Fig. 8 Residual hydrostatic stress distributions of metal powder compact with a WC ball inclusion (a) before and (b) after cooling under pressureless sintering

상태는 열팽창계수의 차이, 세라믹과 접하는 경계면의 형상, 시편의 형상 및 냉각과정에서 생기는 시편내부의 온도편차에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 Al_2O_3 볼이 삽입된 시편이 소결 후 상온으로 냉각된 상태에서의 잔류 Mises 응력을 나타낸다. 금속분말성형체와 세라믹 볼의 경계면에 가장 큰 잔류 Mises 응력이 작용함을 알 수 있으며 이는 경계면에서 열팽창계수의 차이와 냉각과정에서의 온도구배에 의한 것임을 알 수 있다.

열팽창계수가 다른 세라믹 볼이 금속분말성형체 내부의 잔류응력분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 알루미늄 볼에 비해 열팽창계수가 더 낮은 텅스텐 카바이드 볼이 삽입된 금속분말성형체에 대하여 응력상태를 유한요소해석하였다. Fig. 7(b)는 WC 볼이 삽입된 시편의 소결 후 상온으로 냉각된 상태에서의 잔류 Mises 응력을 나타낸다. 잔류응력 분포 형태는 Fig. 7(a)와 유사하나 잔류응력이 전체적으로 더 큰 값을 보임을 알 수 있다. 이는 WC의 열팽창 계수가 Al_2O_3 에 비하여 더 낮

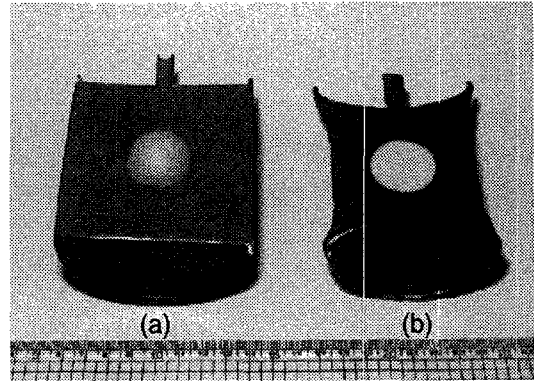


Fig. 9 Comparison between (a) undeformed shape and (b) deformed shape of a metal powder compact with an Al_2O_3 ball inclusion under hot isostatic pressing at 50MPa and 1100°C

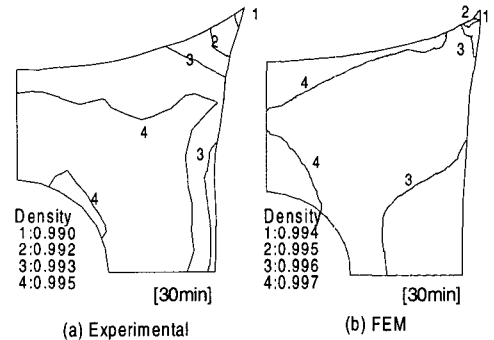


Fig. 10 Comparison between (a) experimental data and (b) finite element calculations for relative density distributions of a metal powder compact with an Al_2O_3 ball inclusion after 30 min during hot isostatic pressing at 1100°C under 50 MPa

기 때문에 금속분말의 열팽창계수와 차이가 더 커져서 열응력이 더 크게 발생한 것이다.

Fig. 8(a)는 온도유지가 끝난 직후 시편내부의 잔류정수응력 분포를 나타내며 WC 볼과 금속분말성형체 사이의 경계면에서 약 45 MPa 정도의 인장응력이 작용함을 알 수 있다. 온도구배는 Al_2O_3 볼이 삽입된 경우와 비슷하나 Al_2O_3 에 비해 WC의 열팽창계수가 더 낮기 때문에 잔류정수응력이 더 크게 발생하였음을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 상온으로 냉각된 시편 내부의 잔류정수응력의 분포를 나타낸다. Fig. 4(b)의 알루미늄 볼이 삽입된 경우와 마찬가지로 세라믹 볼 주위에 발생했던 잔류응력은 냉각 후 금속분말성형체의 표면으로 분산됨을 알 수 있다. 또한, 냉각과정에서 시편 내의 온도구배에 의한 열응력이 발생

하여 소결온도의 유지시간이 끝난 직후의 상태보다 큰 잔류정수응력이 발생하였다. 특히 알루미늄나 불을 삽입한 경우에 비해 더 큰 값의 응력분포를 보이는데 이는 텅스텐 카바이드의 열팽창계수가 알루미늄의 열팽창계수보다 낮아서 금속분말성형체의 열팽창계수와와의 차이가 커지기 때문이다

4.2 열간등가압소결

Fig. 9은 알루미늄나 불이 삽입된 금속분말성형체의 열간등가압소결 후 초기 형상과 변형된 형상의 비교를 나타낸다. 용기의 영향으로 각 모서리는 수축이 크게 되지않고 뚜껑과 원통의 측면 중앙이 크게 수축된 형상을 보인다

Fig. 10은 알루미늄나 불이 삽입된 금속분말성형체의 열간등가압소결 시 온도 유지시간 30분 후 금속분말성형체 내의 상대밀도 분포를 나타내는

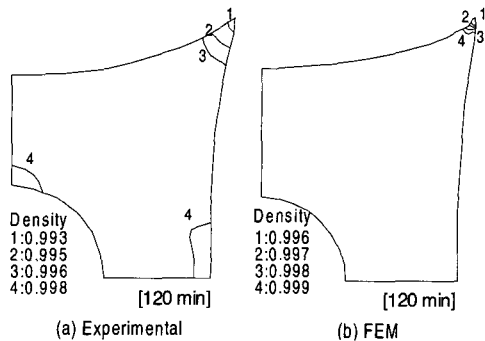


Fig. 11 Comparison between (a) experimental data and (b) finite element calculations for relative density distributions of a metal powder compact with an Al_2O_3 ball inclusion after 120 min during hot isostatic pressing at $1100^\circ C$ under 50 MPa

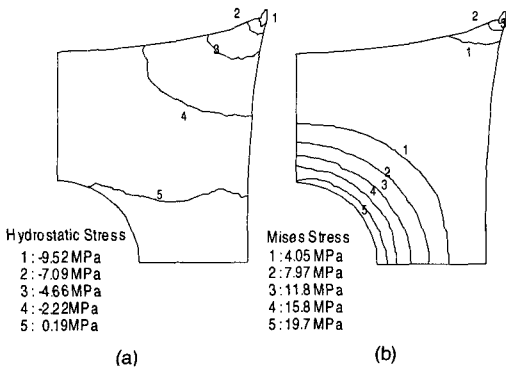


Fig. 12 (a) Residual hydrostatic stress and (b) residual effective stress of a metal powder compact with an Al_2O_3 ball inclusion after 120 min during hot isostatic pressing at 50MPa and $1100^\circ C$

(a) 실험치와 (b) 유한요소해석의 결과를 나타낸다. Fig. 10(a)에서 상대밀도는 용기의 영향으로 모서리 부분에서 낮으며 볼 주위의 내부에서 높은 밀도값을 보인다. Fig. 10(b)의 유한요소해석 결과는 이러한 실험치를 잘 예측하고 있다. Fig. 10은 Fig. 4의 냉간정수압성형한 시편과 비교하여 비교적 균일하고 치밀한 상대밀도분포를 보임을 알 수 있다.

Fig. 11은 알루미늄나 불이 삽입된 금속분말성형체의 열간등가압소결 시 온도 유지시간 120분 후 금속분말성형체 내의 상대밀도 분포를 나타내는 (a) 실험치와 (b) 유한요소해석의 결과를 나타낸다. 모서리에서 발생하는 밀도구배와 전체적인 형상을 잘 예측하였다. Fig. 10의 결과보다 금속분말성형체가 더욱 치밀화되었으며 밀도구배 또한 용기의 모서리 부근을 제외하면 거의 균일한 값을 나타낸

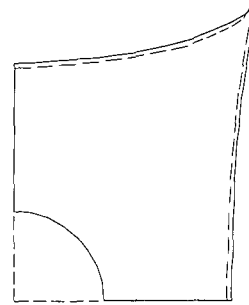


Fig. 13 Final deformed shape of metal powder compacts with a ceramic ball inclusion (solid line) and without a ceramic ball (dashed line) after 60 min during hot isostatic pressing at 50MPa and $1100^\circ C$

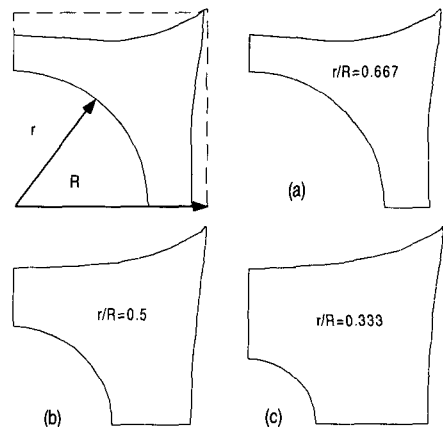


Fig. 14 Deformed shape of metal powder compact with various ratios of ball radius(r) to inner container radius(R); (a) $r/R = 0.667$, (b) $r/R = 0.5$ and (c) $r/R = 0.333$

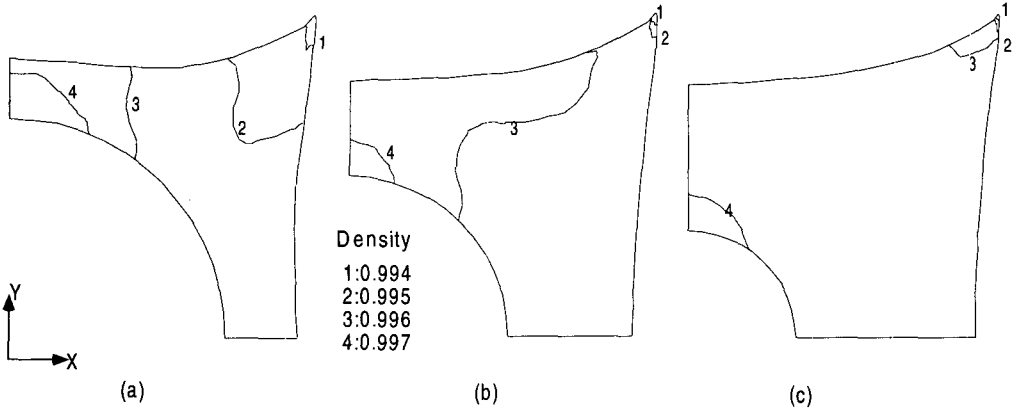


Fig. 15 Relative density distributions of metal powder compacts with various ratios of ball radius(r) to inner container radius(R) ; (a) $r/R = 0.667$, (b) $r/R = 0.5$ and (c) $r/R = 0.333$

다.

Fig. 12(a)와 (b)는 알루미늄이 삽입된 금속분말성형체의 열간등가압소결 시 온도 유지시간 120분 후 금속분말성형체 내의 잔류정수응력과 잔류 Mises 응력의 분포를 나타낸다. 정수압성형 후 소결한 시편의 유한요소해석결과인 Fig. 6 과 Fig. 7의 잔류응력 값과 비교하면 Fig. 12(a)와 (b)는 전반적으로 낮은 값을 보이며 응력분포도 구배가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 열간등가압소결은 고온에서 정수압에 의해 치밀화가 진행되므로 열응력에 의해 발생하는 잔류응력이 작으며 Fig. 6에서와 같이 잔류응력은 인장응력의 상태로 발생하나 열간등가압소결과정에서는 50MPa의 정수압에 의한 압축응력이 가해지므로 잔류응력이 감소하게 된다.

Fig. 13은 유한요소해석을 통하여 세라믹 불이 삽입된 시편(실선)과 불이 없는 시편(점선)의 열간등가압소결 후 형상의 비교를 나타낸다. 열간등가압소결공정의 조건은 50 MPa 정수압 하에 1100℃에서 60분 유지시켰다. 세라믹 불이 없는 경우는 세라믹 불이 삽입된 경우에 비해 전반적으로 수축이 더 많이 일어났으나 형상변화에는 큰 차이가 없다. 이는 삽입된 세라믹 불이 충분히 크지 않아서 금속분말성형체의 형상변화에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Fig. 14는 열간등가압소결 하에서 금속분말성형체 내의 세라믹 불의 크기에 따른 시편의 형상변화를 나타낸다. 시편은 높이와 내경이 같고 알루미늄이 삽입되었으며 온도와 압력은 Fig. 13과 동일한 조건이다. 원통용기의 초기반경 R 에 대한 불의 반경 r 의 비율이 Fig. 14(a), (b) 및 (c)에서 각각 0.667, 0.5 및 0.333이다. Fig. 14(b)와 (c)는 형

상변화가 비교적 작으며 세라믹 불이 차지하는 부피가 가장 큰 Fig. 14(a)의 경우에 형상의 변화가 비교적 크게 나타난다. 본 논문에서 실험한 시편의 원통직경에 대한 불의 직경 비는 0.365로 Fig. 14(c)의 경우에 제일 근접하다. 또한 Fig. 12의 결과에서 금속분말성형체의 형상변화에 불의 영향이 작았던 것은 내부에 불이 차지하는 비율이 상대적으로 작았던 것과 관련된다.

Fig. 15는 세라믹 불의 크기가 금속분말성형체의 치밀화에 미치는 영향을 조사하기 위해 유한요소해석으로 구한 상대밀도분포의 결과이다. 세 경우 모두 불 주위의 y 축 방향으로 치밀화가 많이 일어났으며 불의 크기가 작을수록 치밀화가 전반적으로 균일하게 일어났음을 알 수 있다. 이로부터 세라믹 불이 클수록 시편 내의 밀도구배가 커져 금속분말성형체의 치밀화에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 금속분말성형체 내부에 세라믹 불을 삽입하여 잔류응력과 치밀화에 대한 유한요소해석을 수행하고 치밀화 거동에 대한 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 소결 후 잔류응력은 금속분말성형체 내의 온도구배, 세라믹 불과 금속분말성형체 사이의 열팽창계수의 차이 및 경계면 형상에 의한 영향으로 발생함을 알 수 있었다.

(2) 유한요소해석에 사용된 구성모델들은 시편의 형상변화와 치밀화거동에 대한 실험결과를 잘 예측하였다.

(3) 금속분말성형체의 열팽창계수와 차이가 더 큰 열팽창계수를 갖는 텅스텐카바이드 불이 알루

미나 볼에 비해 더 큰 잔류응력을 금속분말성형체 내에 발생하였다.

(4) 열간등가압소결로 시편을 성형하는 방법이 냉간정수압성형 후 상압소결하는 방법보다 더 균일하고 치밀한 상대밀도를 갖는 성형체를 얻을 수 있으며 잔류응력 또한 비교적 낮게 분포함을 알 수 있었다.

(5) 시편내부에 삽입된 세라믹 볼의 크기가 클수록 시편의 형상변화에 더 큰 영향을 보이며 분말성형체의 내부에 밀도구배가 더 커짐을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Schwartz, M.M., 1992, *Handbook of Structural Ceramics*, McGraw-Hill Inc.
- (2) Randall, M.G., 1994, *Powder Metallurgy Science*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, U.S.A.
- (3) Lenel, F.V., 1980, *Powder Metallurgy-Principles and Applications*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, U.S.A.
- (4) German, R.M., 1994, *Powder Metallurgy Science*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, U.S.A.
- (5) Kuhn, H.A. and Ferguson, B.L., 1990, *Powder Forging*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, U.S.A.
- (6) Kim, K.T., and Lee, H.T., 1998, "Effect of Friction Between Metal Powder and a Mandrel on Densification of Iron Powder during Cold Isostatic Pressing," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 40, No. 6, pp. 507~518.
- (7) 정진원, 김기태, 1998, "냉간 정수압 하에서 금속분말의 치밀화에 미치는 고무몰드의 영향," 대한기계학회 논문집(A), 제 22 권, 제 2 호, pp. 330~342.
- (8) Lewis, R.W., Jinka, A.G.K. and Gethin, D.T., 1993, "Computer-Aided Simulation of Metal Power Die Compaction Processes", *Powder Metall. Int.*, Vol. 25, No. 6, pp. 287~293.
- (9) Gethin, D.T., Tran, V.D., Lewis, R.W. and Ariffin, A.K., "An Investigation of Powder Compaction Processes", *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 30, No. 4, pp. 385~398.
- (10) Kim, K.T. and Jeon, Y.C., 1998, "Densification Behavior of 316L Stainless Steel Powder Under High Temperature," *Mat. Sci. Eng. A*, Vol. A245, pp. 64~71.
- (11) Shima. S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (12) Besson, J. and Abouaf, M., 1992, "Rheology of Porous Alumina and Simulation of Hot Isostatic Pressing," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 75, No. 8, pp. 2165~2172.
- (13) Abouaf, M., Chenot, J.L., Raison, G. and Bauduin, P., 1988, "Finite Element Simulation of Hot Isostatic Pressing of Metal Powder," *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 25, pp. 191~212.
- (14) ABAQUS User Manual, Ver. 5.5, 1996, Pawtucket, Hibbitt, Karlsson and Sorensen.
- (15) Svoboda, A., Haggblad, H. and Nasstrom, M., 1996, "Simulation of Hot Isostatic Pressing of Metal Powder Components to Near Net Shape," *Engineering Computations*, Vol. 13, Issue 5, pp. 13~37.
- (16) Metals HandBook, Vol. 7, 1984, Ohio, Am. Soc. Metals.
- (17) Frost, H. J. and Ashby, M. F., 1982, *Deformation Mechanism Maps, the Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*, Pergamon Press.
- (18) Ceramic Sources '89, 1989, Vol. 4, Am. Ceram. Soc.,
- (19) Cho, H.K., Suh, J. and Kim, K.T., 1994, "Densification of Porous Alloy Steel Preforms at High Temperature," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 36, No. 4, pp. 317~328.
- (20) Boyer, H.E., 1987, "Hardness Testing," *ASM International.*, pp. 118.