Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 37, No. 6. pp. 589~595 2000.

냉간압축 하에서 실리콘 카바이드 분말의 치밀화해석

박 환* · 김기태**
*포항공과대학교 기계공학과 대학원
**포항공과대학교 기계공학과
(2000년 3월 20일 접수)

Densification Analysis for SiC Powder under Cold Compaction

Hwan Park* and Ki Tae Kim**
Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea
(Received March 20, 2000)

초 록

냉간압축 하에서 SiC 분말의 치밀화 거동을 조사하기 위하여 다양한 하중 하에서 삼축압축실험을 수행하였다. 삼축압축실험을 통하여 구한 SiC 분말의 실험결과로부터 캡 형태의 항복함수를 제안하였으며, 이를 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS에 적용하여 냉간압축 하에서 SiC 분말의 치밀화 거동을 조사하였다. 또한, 제안된 구성모델과 Cam-Clay 모델 및 수정된 Drucker-Prager 모델을 유한요소해석에 적용하여 SiC 분말의 치밀화 거동에 대한 실험결과와 비교하였다. 본 논문에서 제안한 구성모델을 냉간금형압축 공정의 유한요소해석에 적용한 결과는 비교적 실험치를 잘 예측하였다. Cam-Clay 모델과 수정된 Drucker-Prager 모델을 냉간금형압축 공정의 유한요소해석에 적용한 결과는 분말성형체의 평균밀도값을 실험치보다 다소 낮게 예측하였다.

ABSTRACT

Densification behavior of SiC powder was investigated under cold compaction. A special form of the Cap model was proposed from experimental data of SiC powder under triaxial compression. To compare with experimental data of SiC powder under cold compaction, the proposed constitutive model was implemented into a finite element program (ABAQUS). Finite element calculations from the Cam-Clay model and the modified Drucker-Prager model were also compared with experimental data of SiC powder. The agreements between experimental data and finite element results obtained from the proposed constitutive model are reasonably good. In die pressing, finite element results obtained from the Cam-Clay model and the modified Drucker-Prager model, however, show lower average density of SiC powder compacts compared to experimental data.

Key Words* : *Cap model, Finite element analysis, Triaxial compression, Die pressing, Cold isostatic pressing

1. 서 론

세라믹은 우수한 기계적 특성을 가지고 있어 구조용 소재로서 그 중요성이 증대되고 있다.[1] 세라믹 소재를 사용한 부품은 일반적으로 냉간금형압축 또는 냉간정수압압축, 소결, 후처리(finishing)의 공정이나 금형압축소결 또는 열간등가압소결, 후처리 공정을 거쳐 제조되고 있다. 냉간정수압압축 성형은 분말에 정수압을 가하여 성형하기 때문에 일반적으로 성형체 내부에 비교적 균일한 밀도분포를 얻을 수 있으며 냉간금형압축으로 제조된 성형체는 금형 벽면과 분말성형체 사이의 마찰로 인하여 불균일한 상대밀도와 잔류응력이 발생하여 최종 부품의 기계적 특성에 영향을 미친다.[2,3]

냉간금형압축과 냉간정수압압축 등의 성형공정으로 세라믹 분말 성형체를 제조할 때 성형체 내부의 밀도구배를 최소화 하거나 최종부품의 형상제어를 위해서는 실험을 통한 시행착오법이 아닌 유한요소해석을 이용한 생산공정의 수치모사가 유용하며 이를 위해서는 세라믹 분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 구성모델의 개발이 필수적이다.[4,5]

구성모델을 이용한 수치모사는 토양역학에서 주로 사용되어 왔고 분말야금학 분야에서도 광범위하게 사용되고 있다. 또한, 세라믹 분말의 치밀화에 대한 구성모델은 현재까지 토양역학 등에서 구한 모델을 사용해 왔는데, Schwartz와 Weinstein[6]은 Mohr-Coulomb 모델을 세라믹 분말에 구성모델로 적용하였고 Bortzmeyer[7]는 선형 캡 모델을 제안하여 이를 유한요소해석에 적용하였다. 캡 모델은 double-surface 모델로 DiMaggio와 Sandler[8]가 토양충격의 영향에 대한 수치해석적인 연구를 수행하는데 적용하였으며, 특히 임계상태를 고려한 캡 모델은 토양역학과 분말야금 분야에서 다양하게 사용되어왔다.[9-11] 임계상태에 대한 개념은 삼축압축 상태에서 토양의 항복거동을 조사하는데 사용되었으며[12,13] 임계상태를 적용한 모델로는 Cam-Clay 모델이 광범위하게 활

용되어 왔다.[14] 최근 이러한 모델을 세라믹분말의 치밀화 거동을 해석하는데 적용하는 연구가 진행되고 있는데, Sun 등[15]은 냉간압축 하에서 Cam-Clay 모델을 적용하여 Si_3N_4 분말의 치밀화 거동을 수치모사하였다. Aydin 등[16]은 Drucker-Prager 모델을 이용하여 Al_2O_3 분말의 냉간금형압축 공정을 유한요소해석하여 실험치와 비교하였다. 또한, Choi와 Kim[17]은 지르코니아 분말과 알루미나 분말에 대하여 삼축압축 실험을 통해 구성 모델을 제안하고 유한요소해석을 통해 이를 검증하였다.

본 논문에서는 실리콘 카바이드 분말의 삼축압축 실험을 수행하여 다양한 하중 조건에서 치밀화 거동에 관한 실험을 하였고 그 실험 결과로부터 구성모델을 제안하였다. 구성모델은 실험식으로, 기존의 타원함수에 근거한 구성모델들과 다른 지수함수 형태로 나타내었다. 또한, 실리콘 카바이드 분말의 냉간금형압축과 냉간정수압압축 공정의 치밀화 해석을 위해, 제안된 모델과 기존의 캡 모델인 Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델을 유한요소해석에 적용하여 공정 후 치밀화에 대한 결과를 비교하였다. 냉간금형압축 공정으로 실험을 수행하여 성형압력에 따른 성형체의 밀도변화와 성형체 내부의 상대밀도 분포를 계산치와 비교하였으며 이를 통해 각 구성모델을 비교하였다.

2. 이 론

2.1. 구성 방정식

본 논문에서 사용한 실리콘 카바이드 분말의 탭 밀도(tap density)는 D=0.315 정도로 비교적 낮은 값을 가지며, 14 MPa의 정수압 하에서 D=0.52의 상대밀도를, 130 MPa하에서는 D=0.58의 상대밀도를 갖는다. 따라서 치밀화의 초기 상태에서 제하 또는 재가압 과정에서 나타나는 비가역 변형을 무시하였다. 또한, 세라믹 분말의 치밀화 거동은 하중속도에는 거의 영향을 받지 않는다고 가정하였다. 이러한 제약 조건으로부터 세라믹 분말의 치밀화 거동을 탄성-비탄성으로 구분하였으며 전체 변형률 속도 성분 $\dot{\varepsilon}_{ij}$는 다음과 같이 쓸 수 있다.[18,19]

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{(el)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(in)} \tag{1}$$

여기서 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(el)}$와 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(in)}$는 각각 탄성변형률 속도 성분과 비탄성 변형률 속도 성분을 나타낸다. 또한, 후크의 법칙으로부터 응력 성분 σ_{ij}는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^{(el)} \varepsilon_{kl}^{(el)} \tag{2}$$

여기서 $D_{ijkl}^{(el)}$는 4차 탄성계수이다.

또한, 비탄성 변형률 속도 성분 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(el)}$는 다음과 같이 구할 수 있다.[12]

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{(el)} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \tag{3}$$

여기서 f는 항복함수이며, λ는 양의 스칼라양이다.

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

$$\dot{D} = -D\dot{\varepsilon}_{kk}^{(in)} \tag{4}$$

상대밀도(D)를 경화변수(hardening parameter)로 사용할 경우[20] 세라믹 분말의 치밀화 거동을 나타내는 항복함수는

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

으로 나타낼 수 있다. 또한, 실리콘 카바이드 분말은 등방성을 가지므로 항복함수 f는 3개의 응력 불변량으로 나타낼 수 있으나 제 3응력 불변량을 무시할 경우[12] 항복함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f(p.q.D) = 0 \tag{6}$$

여기서 p와 q는 정수 응력과 Mises 응력으로, 표준 삼축압축 응력상태에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_2) \tag{7}$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma_{ij}'\sigma_{ij}'} = -(\sigma_1 - \sigma_2) \tag{8}$$

또한, 응력의 편차성분 σ_{ij}'는 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij} \tag{9}$$

본 논문에서는 p, q와 상대밀도(D)와의 관계를 나타내는 구성방정식은 실험적으로 구하였으며 함수형태는 다음과 같다.

$$q + \cosh[A(D) \cdot p] = B(D) \tag{10}$$

3. 실 험

본 논문에서는 실리콘 카바이드 분말(FCP 15RTP, Norton AS, Norway)을 사용하여 실험을 수행하였다. 실리콘 카바이드 분말의 평균 직경은 0.3 μm정도이며 물리적 성질과 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다.[21]

세라믹 분말성형체의 경우 매우 낮은 인장 및 압축 강도로 인하여 냉간금형압축과 냉간정수압압축만으로는 충분한 실험 자료를 얻을 수 없기 때문에 세라믹 분말 성형체의 치밀화 거동을 조사하기 위하여 삼축압축 실험을 수행하였다

Table 1. *Physical Properties and Chemical Composition of FCP 15RTP SiC Powder*

Bulk Properties Young's Modulus [GPa] Bulk Poisson's Ratio	 413 0.24
Theoretical Density [g/cm^3]	3.16
Average Particle Size [μm]	0.3
Average Granular Size [μm]	130
Chemical Composition [wt%]	
Si	0.04
Fe	0.005
Al	0.02
Na	0.01
Ca	0.004

3.1. 삼축압축 실험

삼축압축 실험은 일정한 정수압 하에서 원주 형태의 시편에 축 하중을 가하는 표준 삼축압축(standard triaxial compression) 실험 장치를 사용하였으며 삼축압축 실험을 위한 시편은 다음과 같이 제조되었다.

금형에 5 g의 실리콘 카바이드 분말을 넣은 후 냉간금형압축으로 약 10 MPa의 하중을 가하여 직경 13 mm, 높이 24.5 mm의 원주형 예비성형체를 제조하였으며 이 때 상대밀도는 D_0=0.487이었다. 예비성형체의 위, 아래에 초경 압반을 놓은 후 압력 유체가 시편에 침투하는 것을 방지하기 위해 0.7 mm 두께의 고무 몰드를 사용하여 밀봉하였다. 진공펌프를 사용하여 고무 몰드 내의 공기를 모두 제거한 뒤 시편을 삼축압축 실험장치에 장착하였다. 시편에 20~200 MPa범위의 정수압 형태의 구속압력(P_c, confining pressure)을 가한 후, 0~250 kN범위의 축 하중을 가하였으며 하중을 가하는 압축 편치의 변위 속도는 0.02 mm/s로 일정하게 하였다. 냉간정수압 실험은 삼축압축 실험과 동일한 과정으로 진행하였으며, 축 하중을 가하지 않고 순수 정수압만으로 냉간정수압 실험을 수행하였다.

3.2. 냉간금형압축 실험

실리콘 카바이드 분말의 냉간금형압축 실험은 일방향 압축(single action pressing)으로 성형하였다. 초경으로 제작된 내부 직경 20 mm의 금형에 10 g의 실리콘 카바이드 분말을 채운 후 10~350 MPa의 축 하중을 가하여 압축하였다. 압축된 성형체는 상부 방향으로 이젝트하였으며, 시편의 질량과 부피로부터 상대밀도를 구하였다.

3.3. 밀도분포 측정

분말 성형체의 상대밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있다. Rajab과 Coleman[22]은 복잡한 형상의 순철 분말성형체 내의 밀도분포를 구하기 위하여 비커스 경도계를 사용하였다.

비커스 경도와 상대밀도의 관계를 구하기 위하여 내부직경 13 mm의 금형으로 예비성형체를 제작한 후 이를 냉간정수압으로 100~230 MPa의 압력을 가하여 시편을 제작하였고 이를 1400°C의 온도에서 진공 분위기로 1시간 동안 소결하였다. 이렇게 제작된 시편의 상대밀도를 아르키메데스 방법으로 측정하고, 100 g의 하중을 15초간 가하여 각 시편마다 7개의 경도 값을 측정하였다. 측정한 각 시편의 경도값들을 평균하여 경도와 상대밀도의 관계를 구하였다.

분말성형체 내부의 상대밀도 분포를 구하기 위하여 시편을 절단하고 단면에 대하여 비커스 경도를 측정하였다. 냉간금형압축으로 성형한 시편의 절단면에 55(5×11)개의 요소를 나누고 각 지점에서 경도값을 측정하고 이로부터 시편 내의 상대밀도 분포를 구하였다.

3.4. 유한요소해석

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[23]의 사용자 정의 서브루틴 UMAT을 사용하여 냉간금형압축과 냉간정수압압축 하에서 세라믹 분말의 치밀화 거동을 해석하였다. Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델은 ABAQUS 프로그램에서 제공되는 구성모델로, 유한요소해석에 필요한 여러 상수값은 SiC 분말의 삼축압축 실험치에서 구하였다. 실험치로부터 구한 상수값은 Cam-Clay 모델의 경우 M=1.43, β=1.41, ε_0^{pl}=0.005이며 Drucker-Prager 모델의 경우 α=0.03, β=55°, d=0.4, R=1.293이다. 각 상수에 대한 설명은 ABAQUS manual[21]에 상세히 기술되어 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 삼축압축 실험

Fig. 1은 20~200 MPa의 다양한 구속압력 하에서 축 하

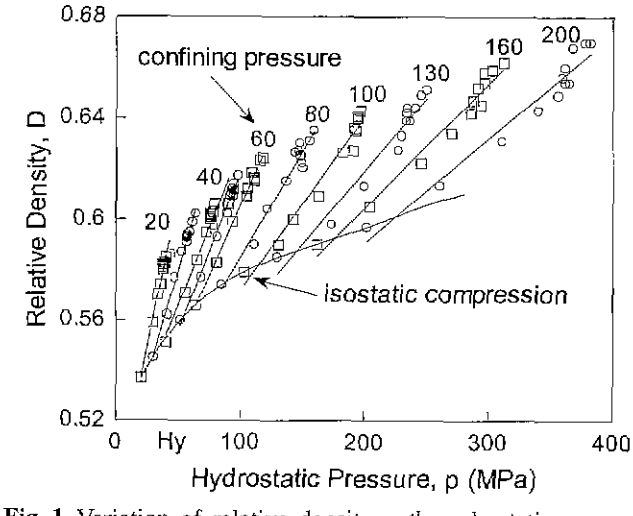

Fig. 1. Variation of relative density with gydrostatic pressure for SiC powder at various confining pressures.

중을 가한 경우 실리콘 카바이드 분말 성형체의 상대밀도 변화를 나타낸다. 단순히 정수압만을 가할 때 보다 전단 응력을 추가하여 삼축압축 형태로 하중을 가할 때 상대밀도가 크게 증가함을 알 수 있다. 또한, 구속압력이 낮을수록 전단 응력이 분말 성형체의 치밀화에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 상대밀도 0.55~0.59 범위의 실리콘 카바이드 분말의 등밀도 곡선을 나타낸다. 상대밀도 실험치는 Fig. 1의 여러 구속압력에서의 상대밀도와 정수응력의 관계로부터 구하여 상대밀도가 같은 값들을 나타내었다. 등밀도 곡선은 이 실험치를 식 (10)으로 곡선접합하여 계수 A와 B를 다음과 같이 상대밀도의 함수로 쓸 수 있다.

$$A(D)=4.2709E\text{-}5 \cdot D^{-12.779} \qquad (11)$$
$$B(D)=52467 \cdot D^{12.318}$$

Fig. 2에서는 축하중이 증가되어도 더 이상 치밀화가 일어나지 않는 임계상태가 존재한다. 이상적인 상태에서는 임계상태를 직선 q=Mp로 나타낼 수 있는데, 본 실험에서 구한 값은 M=1.43이었다. 등밀도 실험치는 정수응력과 편차응력이 증가하면 완만한 곡선형태를 나타내고 있다. 이는 토양이나 금속 분말의 치밀화 거동의 해석에 사용되는 모델 중의 하나인 캡 모델[24]의 형태임을 알 수 있다. 일반적인 캡 모델에서 항복함수는 타원 형태를 사용하고 있으나 본 실험에서는 완만한 곡선 형태를 보인다. Bortzmeyer[25]는 세라믹 분말 성형체의 상대밀도가 경화 변수의 역할을 함을 보였다. 따라서 식 (10)은 실리콘 카바이드 분말성형체의 항복함수를 나타낸다.

항복함수는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 상대밀도가 D=0.55 이상의 실험치를 사용하여 구하였다. 또한 실리콘 카바이드 분말은 초기 탭 밀도가 0.315정도로 매우 낮으며 하중

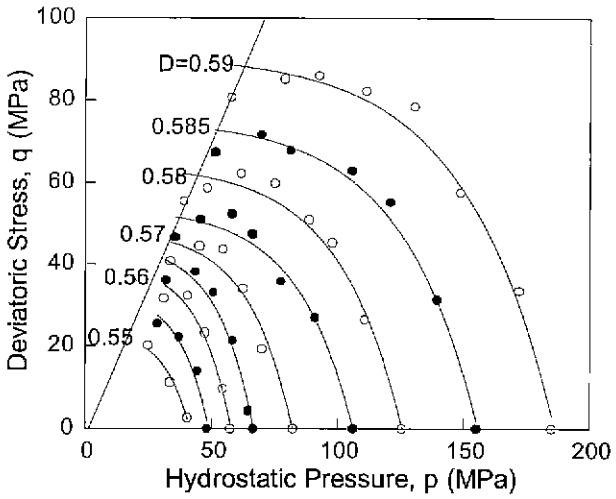

Fig. 2. Measured iso-density data of SiC powder and the fitted curves (solid line).

이 낮은 범위에서 상대밀도변화가 크게 나타난다. 따라서 D=0.55 보다 낮은 상대밀도 범위에서 항복함수를 외삽(extrapolation)하여 유한요소해석에 적용할 때 세라믹 분말의 거동을 정확히 나타내지 못한다. 그러므로, 낮은 상대밀도 범위에 대하여 냉간정수압압축 실험치를 사용하여 등밀도 곡선을 보정하였다. 상대밀도 0.54이하의 낮은 범위에서는 식 (10)의 계수 A(D)와 B(D)를 다음과 같이 곡선접합하여 구하고, 이를 유한요소해석에 적용하였다.

$$A(D)=0.032587 \cdot D^{-2.6464}$$
$$B(D)=23022 \cdot D^{11.777} \qquad (12)$$

위의 값들은 상대밀도가 D=0.55미만의 구간에 적용하였다. 유한요소해석에서 D=0.55를 경계로 서로 다른 함수를 사용하므로, 치밀화 속도의 연속성을 위하여 다음과 같은 혼합법칙(rule of mixture)을 사용하였다.

$$f=\left(\frac{D_2-D}{D_2-D_1}\right)f_1+\left(\frac{D-D_1}{D_2-D_1}\right)f_2=0 \qquad (13)$$

여기서 f_1은 식 (12)의 계수를 사용한 항복함수이며, f_2는 식 (11)의 계수를 사용한 항복함수를 나타낸다. D_1과 D_2는 각각 혼합법칙이 적용되는 상대밀도 구간의 시작되는 값과 끝나는 값을 나타내며, 본 논문에서는 D_1=0.53과 D_2=0.56을 사용하였다.

4.2. 냉간정수압압축

냉간정수압압축의 유한요소해석에서는 100개의 4절점 축대칭요소 (CAX4)를 사용하였다. x 축에 대한 대칭과 y 축에 대한 축대칭조건으로부터 전체 단면의 1/4에 대해서만 해석하였으며 고무 몰드는 두께가 얇으므로 치밀화에 미치는 영향을 무시하였다.

Fig. 3은 냉간정수압압축하에서 정수압에 따른 상대밀도를 나타내는 실험치와 유한요소해석 결과의 비교를 나타낸다. 실험치로부터 압력이 10~20 MPa의 낮은 범위에서 급격한 치밀화를 이루고 이후 완만하게 치밀화가 진전되는 것을 볼 수 있다. 여러 구성모델로부터 구한 계산치는 실험치를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다. 정수응력이 증가할수록 제안된 모델로부터 구한 계산치는 실험치를 다소 높게 예측한 반면 Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델은 낮게 예측하였다.

4.3. 냉간금형압축

냉간금형압축으로 구한 실리콘 카바이드 분말의 실험치를 여러 구성모델로부터 구한 유한요소해석결과와 비교하였다. 시편은 원주형상으로 y축에 대한 축대칭이므로 단면의 1/2에 대하여 해석하였으며, 200(10×20)개의 4절점 축대칭 요소(CAX4)를 사용하였다. 금형은 강성 표면(rigid surface)으

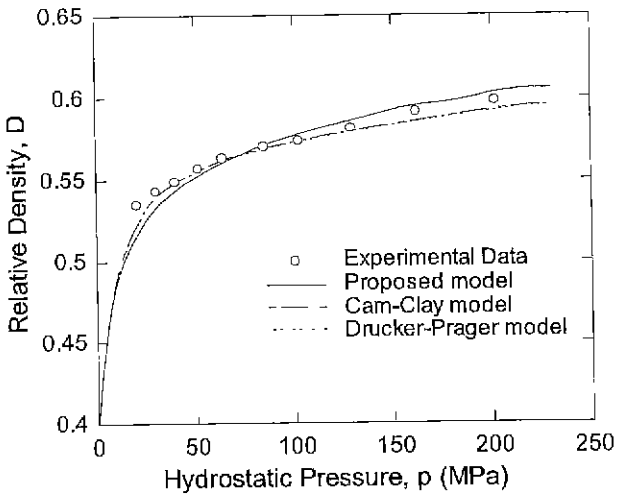

Fig. 3. Comparison between experimental data and finite element calculations from various constitutive models for the variation of relative density with hydrostatic pressure of SiC powder during cold isostatic pressing.

로 취급하였으며, 금형과 분말 사이에는 경계 요소를 사용하였다.

냉간금형압축 공정에서 분말성형체와 금형 벽면 사이의 마찰계수는 Kwon 등[26]의 방법을 사용하여 결정하였다. 즉 일방향으로 냉간금형압축한 분말성형체를 금형에서 이젝트할 때 분말성형체에 가한 성형압에 대한 이젝트 압력의 변화를 마찰계수를 변화시키면서 유한요소해석으로 계산하였다. 계산결과로부터 이젝트 압력의 변화에 대한 실험결과를 가장 잘 예측한 마찰계수를 구하였다. 이러한 방법으로 구한 값은 마찰계수는 μ=0.07이다

Fig. 4는 일방향 압축으로 실리콘 카바이드 분말을 냉간

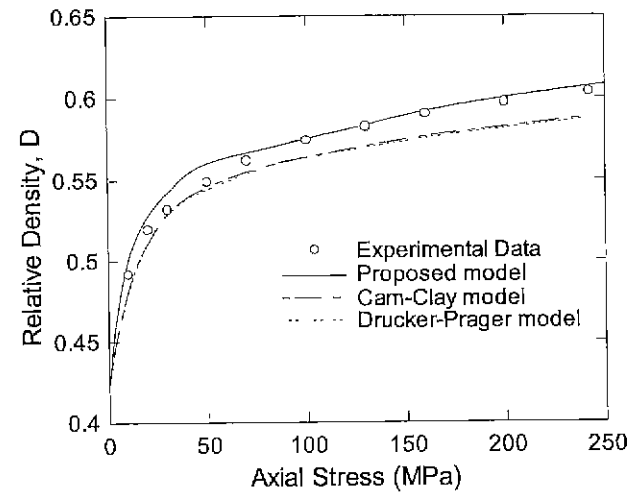

Fig. 4. Comparison between experimental data and finite element calculations from various constitutive models for the variation of relative density with axial stress of SiC powder during die pressing.

금형압축한 경우, 축 응력에 대한 상대밀도의 변화를 나타내는 실험치와 유한요소해석 결과의 비교를 나타낸다. 제안한 구성모델을 유한요소해석에 적용한 결과는 전체적으로 실험치와 잘 일치하고 있으나, 축응력 30~70 MPa 부근에서 실험치보다 조금 높게 예측하고 있다. Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델을 유한요소해석에 적용한 결과는 실험치보다 낮은 상대밀도를 예측하였다. Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델을 유한요소해석에 적용한 결과, Fig. 3의 냉간정수압 공정에 대한 실험치는 잘 예측하였는데 Fig. 4의 냉간금형압축 공정에 대한 실험치를 다소 낮게 예측한 원인은 다음과 같다. Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델의 유한요소해석은 항복함수를 타원함수에 기초로 하고 경화변수를 냉간정수압 실험치를 사용하기 때문에, 편차응력이 나타나지 않는 냉간정수압 공정에 대해서는 비교적 정확한 값을 나타내었다. 반면 냉간금형압축과 같이 편차응력이 상대적으로 크게 나타나는 공정에서는, 항복함수가 타원 형태이기 때문에 편차응력에 의한 치밀화를 낮게 예측하여 상대밀도가 낮은 값을 나타내었다. 본 논문에서 제시한 구성모델은 편차응력이 큰 영역의 삼축압축 실험에서 Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델보다 실험치에 근접한 곡선을 나타내기 때문에, 냉간금형압축 공정의 유한요소해석에 적용한 결과도 상대적으로 정확한 값을 나타내었다.

Fig. 5는 200 MPa으로 일방향 냉간금형압축으로 성형한 분말성형체 내부의 상대밀도 분포에 대하여, 실험치와 여러 구성모델을 이용한 유한요소해석 결과와의 비교를 나타낸다. 상대밀도분포는 금형 벽면과 분말 성형체 사이의 마찰에 의한 영향으로 상부 모서리 부근이 가장 높고, 하부 모서리 부근에서 가장 낮게 나타났다. 이러한 실험결과에 대하여 다양한 구성모델을 적용한 유한요소해석결과는 이를 비교적 잘 예측하였다. 평균 상대밀도에 대하여 본 논문에서 제안한 모델은 비교적 실험치를 잘 예측하였으나, Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델은 전체적으로 낮게 예측하였다. 이 결과는 Fig 4에서 나타난 구성모델의 차이에서 발생한 결과로 편차응력에 의한 치밀화를 낮게 해석하였기 때문이다.

Fig. 6은 200 MPa으로 냉간금형압축한 후 펀치를 제거하고 분말성형체를 이젝트 하여, 시편의 내부에 존재하는 (a) 정수응력과 (b) Mises응력을 본 논문에서 제안한 구성모델로 유한요소해석한 결과를 나타낸다. 유한요소해석을 통하여 예측한 잔류응력은 2~3 MPa 미만으로 냉간금형압축 시 가한 200 MPa의 하중에 비하여 비교적 낮은 값임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 실리콘 카바이드 분말의 삼축압축 실험을 수행하여 세라믹 분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 항복함수를 제안하고, 제안된 항복함수와 함께 Cam-Clay 모

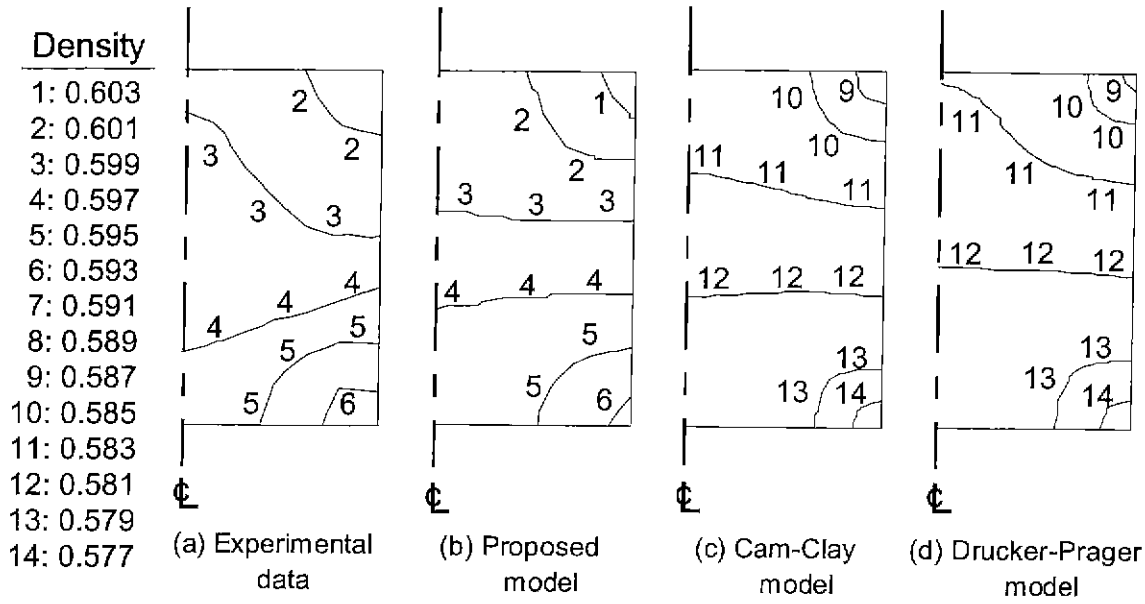

Fig. 5. Comparison between (a) experimental data and finite element calculations from (b) the proposed model, (c) the Cam-Clay model and (d) the Drucker-Prager model for the relative density contour plot of a SiC powder compact by single action die pressing under 200 MPa.

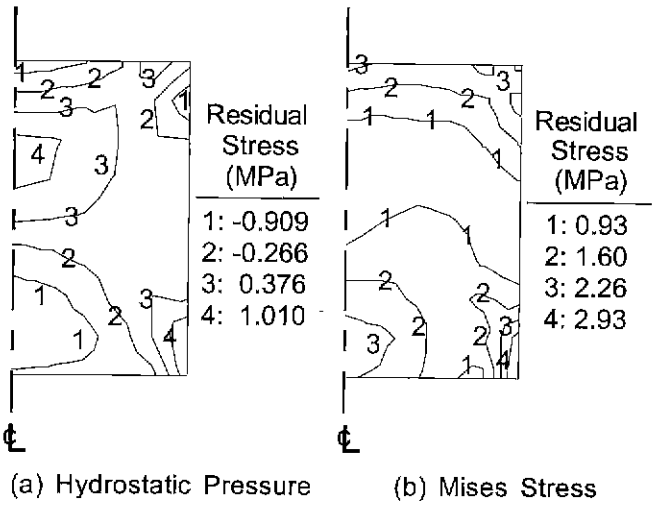

Fig. 6. Finite element calcuations from the proposed model for the distributions of (a) residual hydrostatic pressure and (b) residual Mises stress of a SiC powder compact ejected from the die after compacted by single action die pressing under 200 MPa.

델과 Drucker-Prager 모델을 유한요소해석에 적용하여 냉간 압축 공정을 해석하였으며 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 삼축압축 실험으로부터 정수응력과 편차응력이 증가함에 따라 직선 형태에서 완만한 곡선 형태로 변하는 등밀도 실험치를 얻을 수 있었으며, 곡선접합한 결과 임계상태가 있는 캡 형태의 항복함수를 얻을 수 있었다.

2. 냉간정수압 공정에 대하여 다양한 구성모델을 유한요소해석에 적용한 결과 성형압에 대한 상대밀도의 실험치의 변화를 비교적 잘 예측하였다.

3. 냉간금형압축 공정에서는 본 논문에서 제안한 구성모델을 이용한 유한요소해석결과는 실험치를 잘 예측한 반면 Cam-Clay 모델과 Drucker-Prager 모델을 적용한 유한요소 해석 결과는 다소 낮게 예측하였다.

REFERENCES

1. F. Klocke, "Modern Approaches for The Production of Ceramic Components," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **17**, 457-465 (1997).
2. K. T. Kim and H. T. Lee, "Effect of Friction Between Powder and a Mandrel on Densification of Iron Powder during Cold Isostatic Pressing," *Int J. Mech. Sci.*, **40**(6), 507-519 (1998).
3. P. J. James, *Isostatic Pressing Technology*, Applied Science Publishers, 1983.
4. R. W. Lewis, A. G. K. Jinka and D. T. Gethin, "Computer-Aided Simulation of Metal Powder Die Compaction Processes," *Powder Metall. Int.*, **25**(6), 287-293 (1993).
5. D. T. Gethin, V. D. Tran, R. W. Lewis and A. K. Ariffin, "An Investigation of Powder Compaction Processes," *Int. J. Powder Metall.*, **30**(4), 385-398 (1994).
6. E. G. Scwartz and A. S. Weinstein, "Model for Compaction of Ceramic Powders," *J. Am. Ceram. Soc.*, **48**(7), 346-350 (1964).
7. D. Bortzmeyer, "Modeling Ceramic Powder Compaction," *Powder Tech.*, **72**, 131-139 (1992).
8. F. L. DiMaggio and I. S. Sandler, "Material Model for Granular Soils," *J. Eng. Mech. Div., Proc. ASCE*, **97**(3),

935-950 (1971).
9. R. W. Lewis and A. R. Khoei, "Numerical Modelling of Large Deformation in Metal Powder Forming," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **159**, 291-328 (1998).
10. A. Gajo and D. M. Wood, "Kinematic Hardening Constitutive Model for Sands: The multiaxial formulation," *Int. J. Num. Anal. Methods Geomech.*, **23**(9), 925-965 (1999).
11. A. K. Ariffin, D. T. Gethin and R. W. Lewis, "Finite Element Simulation and Experimental Validation for Multilevel Powder Compact," *Powder Metall.*, **41**(3), 189-197 (1998).
12. C. S. Desai and H. J. Siriwardane, Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 1984.
13. K. H. Roscoe and J. B. Burland, "Engineering Plasicity," (de. Hayman and Leckis), pp. 535-609. Cambridge, Cambridge press, 1968.
14. R. I. Borja and C. Tamagnini, "Cam-Clay Plasticity part III; Extension of the Infinitesimal Model to Include Finite Strains," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **155**, 73-95 (1998).
15. X. K. Sun, K. T. Kim and G. D. Wang, "Simulation of Cold Compaction Densification Behavior of Silicone Nitride Ceramic Powder," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**(12), 3318-3320 (1998).
16. I. Aydin, B. J. Briscoe and K. Y. Sanliturk, "The International Form of Compacted Ceramic Componets: A Comparison of a Finite Element Modelling with Experiment," *Powder Tech.*, **89**(3), 39-254 (1996).
17. 최승완, 김기태, "냉간압축 하에서 세라믹 분말의 치밀화 거동," 대한기계학회논문집(A), **22**(6), 924-938 (1998).
18. S Strijbos and P. A. Vermeer, "Stress and Density Distribution in the Compaction of Powders," pp. 113-123 in *Processing of Crystalling Ceramics*, Ed. by H. Palmour, R.F. Davis and T.M. Hare, *Materials Science Research*, New York, 1987.
19 A. V. G. Brocse and R. C. D. Lissenburg, "Inhomogeneous Density in Die Compaction: Experiments and Finite-Element Calculations," *J. Am. Ceram. Soc.*, **66**(9), c156~c158 (1983).
20. S. Shima and K. Mimura, "Densification Behavior of Ceramic Powder," *Int. J. Mech. Sci.*, **28**(1), 53~59 1986.
21. Ceramic Source '86, 1 AceS, p. 337, 1986.
22. M. Rajab and D. S. Coleman, "Density Distribution in Complex Shaped Parts Made from Iron Powders," *Powder Metall.*, **28**(4), 207-216 (1985).
23. *ABAQUS User's Manual I and II*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, 1996.
24. W. A. M. Brekelmans, "Comparison of Two Drucker-Prager-type Constitutive Models for Granular Material Behavior in Uniaxial Compression," *Powder Tech.*, **62**(1), 21-26 (1990).
25. D. Bortzmeyer, *Compaction des Poures Ceramiques*. Doctoral thesis, Ecole National Superieure des Mines de Paris, 1990.
26. Y. S. Kwon, H. T. Lee and K. T. Kim, "Analysis for Cold Die Compaction of Stainless Steel Powder," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, **119**(4), 366-373 (1997).