

〈 논문 〉

냉간 압축 하에서 나노 세라믹 분말의 치밀화 거동

이 성 철* · 김 기 태†

(2006년 3월 6일 접수, 2006년 7월 21일 심사완료)

Densification Behavior of Nanocrystalline Ceramic Powder under Cold Compaction

SungChul Lee and KiTae Kim

Key Words : Cap Model(캡모델), Cold Compaction(냉간압축), Constitutive Model(구성모델), Densification(치밀화), Finite Element Analysis(유한요소해석), Nano Powder(나노분말), Triaxial Compression(삼축압축)

Abstract

Densification behavior of nanocrystalline titania powder was investigated under cold compaction. Experimental data were obtained under triaxial compression with various loading conditions. Lee and Kim proposed the Cap model by developing the parameters involved in the yield function of general Cap model and volumetric strain evolution under cold isostatic pressing. The parameters in the Drucker/Prager Cap model and the proposed model were obtained from experimental data under triaxial compression. Finite element results from the models were compared with experimental data for densification behavior of nanocrystalline ceramic powder under cold isostatic pressing and die compaction. The proposed model agreed well with experimental data under cold compaction, but the Drucker/Prager Cap model underestimated at the low density range. Finite element results, also, show the relative density distribution of nanocrystalline ceramic powder compacts is severe compared to conventional micron powder compacts with the same averaged relative density.

1. 서 론

세라믹은 내마모성, 내산화성, 내열성, 크리프 저항성등의 우수한 물리적, 기계적 특성을 지니고 있어 구조용 소재로 널리 적용되고 있다. 특히 결정립 크기가 100 nm 이하인 나노 세라믹은 일반 마이크론 크기의 결정립을 지니는 세라믹에 비해 강도, 경도, 확산, 연성과 인성의 증가 및 열전도도 감소 등의 장점을 지닌다.⁽¹⁻⁵⁾

분말 제품은 냉간압축후 상압소결, 일축압축소결, 가압소결 등의 고온공정을 거쳐 제조된다. 그러나 일반 마이크론 세라믹 분말에 비해 나노 분

말의 경우 냉간압축시 증가된 분말표면적에 의해 분말 사이의 높은 마찰력이 발생하여 분말성형체 내부에 낮은 밀도 및 불균일한 밀도 구배와 심한 잔류응력을 야기시킨다. 특히 나노 분말성형체 내부에 증가된 불균일성(inhomogeneity) 때문에 고온성형공정시 제품의 뒤틀림, 크랙, 파괴등의 악영향을 초래하기 쉽다. 또한 나노 분말성형체의 낮은 초기밀도로 인해 소결후 최종제품은 초기형상에 비해 변형이 심하다.

따라서 냉간성형공정중에 발생하는 나노분말성형체 내부의 밀도구배를 최소화하고 최종부품의 적절한 형상제어를 위해서는 유한요소해석을 통한 수치모사는 매우 필요하다.

지금껏 많은 연구자들은 상온에서 마이크론 세라믹 분말의 치밀화 거동을 예측하기 위한 여러 모델들을 제안하였다. Schartz 와 Weinstein⁽⁶⁾은 Mohr-Coulomb 모델을 Strijbos 등⁽⁷⁾은 모래분말에

* 포항공과대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: korean@postech.ac.kr

TEL: (054) 279-2164 FAX: (054) 279-5569

대해 개발된 double hardening 모델을 사용하였으며, Shima 와 Mimura⁽⁸⁾는 순철 분말과 구리 분말로부터 유도된 모델을 세라믹 분말에 적용하였다. Secondi⁽⁹⁾는 고전의 압력밀도법칙(pressure-density law)을 연속체 개념으로 유도되는 구성모델로 확장시켜 세라믹분말의 치밀화 거동을 예측하였다. Kim 등⁽¹⁰⁾은 hyperbolic 모델과 다른 토양역학 모델을 적용하여 세라믹분말의 삼축압축실험치를 비교하기도 하였다.

상온에서 나노 분말에 대한 치밀화 모델은 최근 Kim⁽¹¹⁾이 전위밀도를 바탕으로 한 점소성모델을 제안한 바가 있다. 그러나 상온에서 나노 세라믹 분말의 치밀화 거동에 대한 이론 및 실험적 연구가 미흡한 현실이다. 특히 현재까지 일반응력상태에서 나노 분말의 치밀화거동을 관찰할 수 있는 삼축압축실험은 없으므로 나노 세라믹 분말에 적용되는 여러 모델의 정확한 검증은 쉽지 않다. 현재 토양역학 모델중 Drucker/Prager Cap 모델과 Cam-Clay 모델 경우 마이크로 세라믹 분말에 적용하여^(10,12,13) 비교적 타당하게 이용할 수 있음을 밝혔으나 나노 분말에 대해서는 아직 해석적 연구가 부족한 현실이다.

최근에 Lee 와 Kim 은 금속과 세라믹 분말 성형체의 일축 실험치와 정수압실험치로 계수를 결정하여, 모재의 물성측정 없이 일반 하중하에서 분말의 치밀화 거동을 예측할수 있는 Cap 모델을 제안하였으나 나노 세라믹 분말에 대해서는 적용해 보지 못하였다. 따라서 본 논문에서는 삼축압축실험을 통해 다양한 하중 조건에서 나노 티타니아 분말의 치밀화 거동을 관찰하였다. 또한 Lee 와 Kim⁽¹⁴⁾이 제안한 Cap 모델과 Drucker/Prager Cap 모델을 이용하여 나노 티타니아 분말의 치밀화 거동을 예측한 후 일반 마이크로 분말과의 거동 차이를 비교하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 구성방정식

변형률 속도 성분 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{(el)} + \dot{\epsilon}_{ij}^{(in)} \quad (1)$$

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

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

여기서 $D_{ijkl}^{(el)}$ 는 4 차 탄성계수이다.

상대밀도(D)를 경화변수로 사용할 경우, 분말의 치밀화 거동을 나타내는 항복함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(\sigma_{ij}, D) = 0 \quad (3)$$

또한, 금속 분말은 등방성을 가질때 항복함수 F 는 3 개의 응력 불변량으로 나타낼 수 있으나 제 3 응력 불변량을 무시한다고 가정하면 항복함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(p, q, D) = 0 \quad (4)$$

삼축압축실험시 방향 1 을 축방향, 방향 2, 3 을 반경방향으로 선택할 때 정수응력 p 와 유효응력 (effective stress) q 는 다음과 같다.

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_2) \quad (5)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}} = -(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (6)$$

여기서, 응력의 편차성분 σ'_{ij} 는 다음과 같다

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij} \quad (7)$$

비탄성 거동은 실험으로부터 구한 항복함수에 조합유동법칙(associated flow rule)을 적용하여 해석하였다. 따라서, 비탄성 변형률 속도 성분 $\dot{\epsilon}_{ij}^{(in)}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{(in)} = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (8)$$

여기서 F 는 항복함수이며, $\dot{\lambda}$ 는 양의 스칼라이다.

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

$$\dot{D} = -D\dot{\epsilon}_{kk}^{(in)} \quad (9)$$

상대밀도 D 를 경화변수로 사용할 경우 분말의 치밀화에 대한 Cap 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(8,15-18)

$$A(D)J_2 + B(D)I_1^2 = C(D) \quad (10)$$

여기서, I_1 은 제 1 응력 불변량, J_2 는 편차응력의 제 2 불변량, $A(D), B(D), C(D)$ 는 각각 밀도함수를 나타낸다.

분말의 치밀화 거동을 나타내는 항복함수 F 는 식 (10)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \{(p/f(D))^2 + q^2\}^{1/2} - k(D) \quad (11)$$

Table 1 Physical properties and chemical composition of n-TiO₂ powder

Crystal phase	Anatase(≥80%)
Specific surface area	45 m ² /g ± 5m ² /g
Average particle size	34 nm
Purity	99.9%
Morphology	Spherical
Theoretical density	3.95 g/cm ³
Apparent density	0.10 g/cm ³

여기서 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 은 주응력, p 는 정수응력, q 는 유효응력, $f(D)$ 와 $k(D)$ 는 밀도함수를 나타낸다.

Drucker/Prager Cap 모델을 이용하여 해석 수행시 항복곡선은 다음과 같이 쓸 수 있다.⁽¹⁹⁾

$$F_c = \sqrt{[p - p_a]^2 + \left[\frac{Rq}{(1 + \alpha - \alpha / \cos \beta)} \right]^2} \quad (12)$$

$$-R(d + p_a \tan \beta) = 0$$

여기서 F_c 는 캡 항복함수, R 은 캡 편심률 상수, α 는 천이곡면상수, d 는 물질 응집력, p_a 는 발전 상수(evolution parameter), β 는 물질 마찰각을 나타낸다.

3. 실험

본 논문에서는 평균 입자 크기가 34 nm 인 티타니아 분말(NanoTek Titanium Dioxide, Nanophase Tech. Corp., U.S.A)을 사용하였으며 이 분말의 물리적 성질과 각 상에서의 이론밀도 등은 Table 1 에 나타나 있다.

3.1 삼축압축 실험

본 논문에서는 나노 티타니아 분말이 든 실리콘 고무몰드에 일정한 구속압력을 주고 축 하중을 가하는 표준삼축압축(standard triaxial compression)실험장치를 사용하였다.

삼축압축 실험에 쓰이는 시편은 다음과 같이 제조하였다. Fig. 1 처럼 1 mm 두께의 실리콘고무몰드 아래부분을 하부압반으로 밀봉시키고, 분말을 직경 11.28 mm, 높이 20 mm 부피의 고무몰드에 충전시켰다. 진공펌프를 이용하여 실리콘고무몰드내의 공기를 빼고 윗부분도 상부압반으로 밀봉시켰다.

냉간정수압압축기(CIP, ABB Autoclave Systems Inc.)로 20~170 MPa 범위의 구속압력(P_c)을 가한 후,

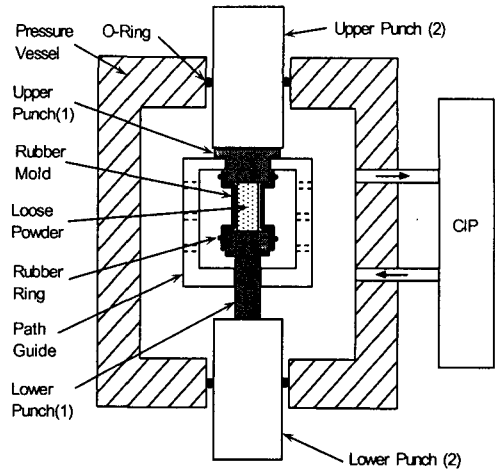


Fig. 1 A schematic drawing of the triaxial compression test apparatus

MTS 재료 시험기로 0~120 kN 범위의 축 하중을 가하였다. 하중을 가하는 압축편치의 속도는 0.02 mm/s 로 일정하게 실험하였다. 정수압실험은 축 하중이 제거된 상태에서 구속압력만 가해 이루어 졌다. 분말성형체의 밀도는 아르키메데스의 비중법을 이용하여 측정하였다.

3.2 금형압축 실험

나노 티타니아 분말의 금형압축 실험은 일방향 압축(single action pressing)으로 하였다. 초경으로 제조된 내부 직경 11.28 mm 의 금형에 분말을 채운후 20~300 MPa 의 축 압력을 가하여 압축하였다 상대밀도는 시편의 질량, 직경 및 높이를 측정하여 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 삼축압축

소결하지 않은 분말 성형체는 매우 낮은 압축 강도로 인하여 일축압축실험을 수행하기가 어려우므로 삼축 압축실험으로부터 탄성계수를 측정하였다. 즉, 일정한 구속 압력에서 축 하중을 가한후 축하중을 약간 제거하였을 때 나타나는 축방향 응력의 변화량과 축방향 변형률의 변화량의 비 ($E = \Delta\sigma_1 / \Delta\epsilon_1$) 로부터 탄성계수를 구하였다. 탄성계수의 관계식은 삼축압축실험시 여러 정수압하에서 성형된 시편에 대해 일축압축을 가하여 다음 식으로부터 구하였으며⁽²⁰⁾ Fig. 2 에 실험치와 곡선 접합이 나타나 있다.

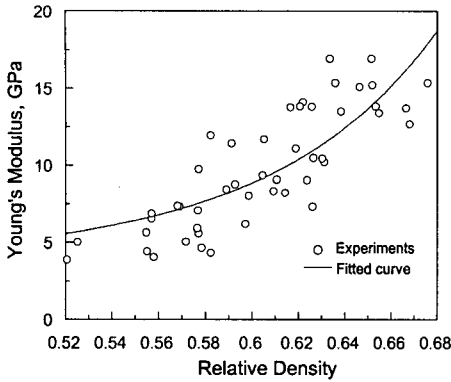


Fig. 2 Variation of Young's modulus with relative density obtained from triaxial compression test of n-TiO₂ powder

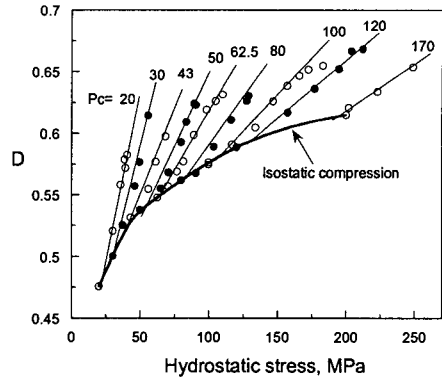


Fig. 4 Variation of relative density of n-TiO₂ powder with hydrostatic stress at various confining pressures (P_C)

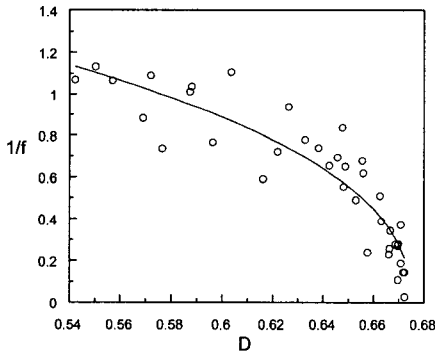


Fig. 3 Relationship between $1/f(D)$ and relative density of n-TiO₂ powder obtained from triaxial compression test

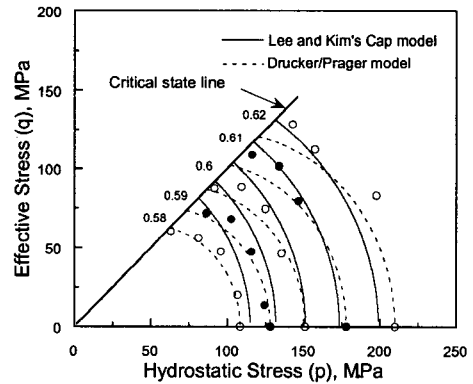


Fig. 5 Experimental iso-density data(●,○) of n-TiO₂ powder and yield surfaces of the Cap models in (p,q) plane

$$E = E_0 \exp[-(b\phi + c\phi^2)] \quad (13)$$

여기서,

$$E_0 = 283 \text{ GPa}, \quad b = 19.141, \quad c = -22.276$$

식 (13)에서 E_0 는 모재(matrix)의 탄성계수이며, b 와 c 는 상수값, ϕ 는 분말성형체의 기공률($\phi = 1 - D$)을 나타낸다.

식 (11)에서 $f(D)$ 는 삼축압축시 다음과 같은 관계를 나타낼 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$f(D) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)p}{d\varepsilon_v q} \right)^{1/2} \quad (14)$$

여기서 p 와 q 는 각각 정수 응력과 유효응력을 나타내며 $d\varepsilon_1$, $d\varepsilon_2$ 는 주 변형률 증가분, $d\varepsilon_v$ 는 부피변형률 증가분을 나타낸다. Fig. 3 은 삼축 압축 수행시 각 분말 성형체에 대한 $f(D)$ 와 상대밀도

D 의 실험치를 나타내며 이 식을 다음의 함수를 통해 곡선접합을 하였다.

$$f(D) = \frac{1}{a(D_f - D)^m} \quad (15)$$

여기서 $a = 2.6984$, $m = 0.42902$, $D_f = 0.675$ 를 구하였다. 이 때 정수압 실험시 나노 티타니아 분말에 대한 정수압과 상대밀도 관계에 의해 $k(D)$ 를 나타낼 수 있으며 다음과 같이 구하였다.⁽¹⁴⁾

$$k(D) = 0.133525 \times \exp(13.347D)(0.675 - D) \quad (16)$$

Fig. 4 는 20~170 MPa 구속압력시 축하중을 가했을 때 나노 티타니아 분말 성형체의 상대밀도 변화를 나타낸다. 동일한 구속압력에서 정수압만을 가할 때 보다 축하중이 추가될 때 상대밀도가 증가함을 알 수 있다. 또한 0-20 MPa 의 낮은 정수압하에서 초기 밀도 0.1 에서 0.475 으로의 급속한 치밀화가 발생하였다. 기존의 연구를 통해^(10,12)

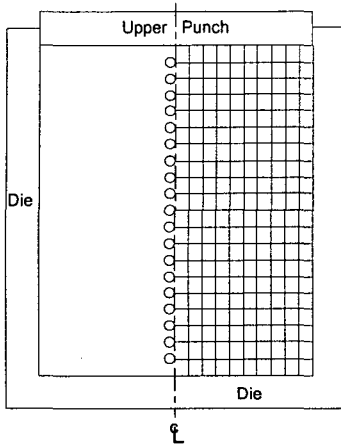


Fig. 6 Finite element meshes and boundary conditions for single action pressing of n-TiO₂ powder

마이크론 세라믹과 금속분말의 삼축압축실험시 낮은 구속압력하에서 축하중이 분말 성형체의 치밀화에 큰 영향을 미치는 것을 관찰해왔다. 그러나 나노분말의 경우 Fig. 4 에서 보듯 구속압력이 20, 30 MPa 일때 축하중이 가해질 경우 기존 마이크론분말에 비해^(10,12) 더욱 급속히 치밀화가 발생함을 알 수 있다. Fig. 5 는 상대밀도 0.58~0.62 범위에서 나노 티타니아 분말의 실험치에 대해 제안된 Cap 모델과 Drucker/Prager Cap 모델의 항복함수를 나타낸다. 상대밀도실험치(●, ○)는 Fig. 4 의 여러 구속압력하에서 상대밀도실험치와 정수응력의 관계를 내삽(interpolation)하고 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 구하였다. Fig. 5 에서 보듯 제안된 Cap 모델은 실험치를 비교적 잘 예측하였다. Drucker/Prager Cap 모델의 항복곡선은 삼축압축 실험치를 곡선접합하여 Cap 편심률 상수(R=0.93)를 얻었다. 상수 α , β , d 는 각각 0.01, 52.4°, 0.01 이며, 각 상수에 대한 설명은 ABAQUS manual⁽¹⁹⁾에 상세히 기술되어 있다. 알루미늄합금 금속 분말의 삼축압축 실험치에 대해 Drucker/Prager Cap 모델 같은 기존의 토양역학 모델은 밀도 증가에 따른 Cap 편심률의 변화를 예측하지 못하였다.⁽¹⁴⁾ 그러나 Song 등⁽²¹⁾은 세라믹 분말에 대해서는 편심률(R)과 다른 상수등은 편차가 없이 일정한 값을 지님을 연구하였다. Kim 등⁽¹⁰⁾과 Park 과 Kim⁽¹²⁾도 지르코니아, 알루미늄, 실리콘카바이드 분말의 삼축압축 실험을 통해 Drucker/Prager Cap 모델이 실험치를 큰 편차없이 예측함을 확인하였다. 나노 티타니아 분말의 경우도 Fig. 5 에서 보듯 곡선접합한 Drucker/Prager Cap 모델은 삼축실험치를 비교적 잘 예측함을 확인할 수 있다.

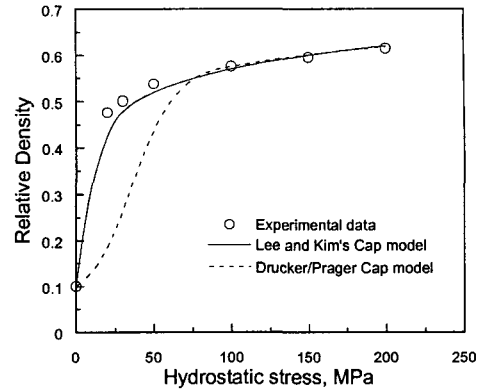


Fig. 7 Comparison between experimental data and calculation results from Lee and Kim's Cap and Drucker/Prager Cap models for the variation of relative density with hydrostatic pressure of n-TiO₂ powder during cold isostatic pressing

4.2 냉간압축

Fig. 6 은 일방향압축에 사용된 200 개의 4 절점 축대칭요소(CAX4R element)를 갖는 유한요소격자 및 경계조건을 나타낸다. 여기서 초경 금형 벽과 상·하부 펀치는 강성표면(rigid surface)으로 가정하였고 금형벽과 분말사이, 바닥과 분말사이의 경계조건을 금형압축시 접촉을 유지하도록 경계요소(interface element)를 사용하여 해석하였으며 y 축의 축대칭조건에 의해 시편 단면의 1/2 에 대해서만 해석하였다.

Fig. 7 은 나노 티타니아 분말의 냉간정수압 압축 하에서 압력과 상대밀도 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 유한요소해석에서의 평균상대밀도는 다음의 관계식으로부터 구하였다.

$$D_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^M D_j V_j}{\sum_{j=1}^M V_j} \quad (17)$$

여기서 D_j , V_j 및 M 은 각각 j 번째 요소의 상대 밀도, 체적 및 전체 요소의 개수를 나타낸다.

Fig. 7 에서 0~20 MPa 의 작은 응력하에서 급속히 밀도가 증가하고, 50 MPa 부근부터 밀도증가가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 제안된 모델은 실험치를 전 구간에서 잘 예측하였다. 그러나 Drucker/Prager Cap 모델은 100 MPa 이상의 높은 응력하에서는 실험치를 잘 예측하나, 낮은 응력하에서는 실험치를 낮게 예측하였다.

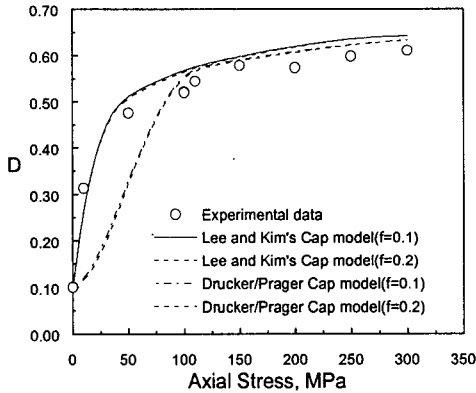


Fig. 8 Comparisons between experimental data and calculation results from Lee and Kim's Cap and Drucker/Prager Cap models for the variation of relative density with axial stress of n-TiO₂ powder during die compaction

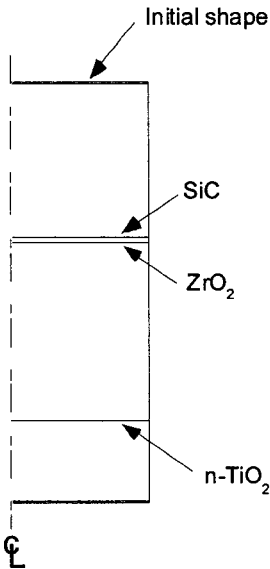


Fig. 9 Comparisons between finite element results for deformed shapes of various powder compacts with $D=0.5$ during die compaction

Fig. 8 은 나노 티타니아 분말을 일방향으로 냉간금형압축할 때 가압력에 따른 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 마찰계수 0.1 과 0.2 의 변화에 따라 해석결과는 차이가 없음을 확인할 수 있다. 두 모델은 100 MPa 이상에서 비교적 실험치를 높게 예측하였다. 그러나 낮은 응력하에서 Drucker/Prager Cap 모델은 실험치를 낮게 예측함을 확인할 수 있다.

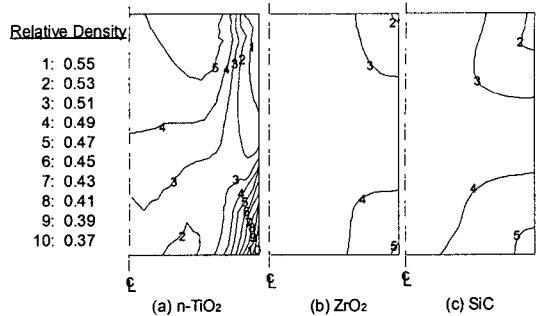


Fig. 10 Comparisons between finite element results for relative density distributions of various powder compacts with averaged relative density of 0.5 under die compaction

Fig. 9 는 금형압축후 분말성형체의 평균상대밀도가 0.5 일 때 성형체의 변형정도를 각 분말에 대해 제안된 Cap 모델로 해석한 결과이다. 실리콘 카바이드, 지르코니아 분말은 마이크론 크기의 분말로 초기상대밀도는 각각 0.31, 0.315 이었으며, 해석에 필요한 모델상수는 타 논문에서 구할 수 있다.^(10,12) 초기 상대밀도($D_0=0.1$)가 현저히 낮은 나노 티타니아 분말은 동일한 상대밀도($D=0.5$)를 얻기 위해 마이크론 세라믹 분말에 비해 많은 변형이 요구되며, 이는 나노분말을 이용하여 적절한 형상으로 부품을 제조하기가 쉽지 않음을 보여준다.

Fig. 10 은 금형압축후 평균상대밀도가 0.5 인 분말성형체 내부의 밀도구배에 대한 해석결과이다. 나노 티타니아, 지르코니아, 실리콘 카바이드 분말성형체가 상대밀도 0.5 에 도달할 때 각각 67.5, 330, 21.1 MPa 의 가압력이 요구되었으며, 해석시 마찰계수에 대해 $\mu=0.2$ 를 적용하였다. 마이크론 크기의 분말성형체에 비해 나노 티타니아 분말 성형체 내부에서 더욱 불균일한 밀도 구배를 관찰할 수 있다. 이는 나노 분말사이의 비교적 높은 마찰과 Fig. 9 에서 보듯 나노 분말 성형체의 대변형시 발생하는 금형과 성형체의 지속적인 마찰에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 나노 티타니아 분말의 삼축 압축 실험을 수행한 후 제안된 Cap 모델과 Drucker/Prager Cap 모델의 항복곡선을 삼축압축 실험치와 비교하였으며 유한요소해석에 적용하여 냉간정수압압축 공정과 금형압축 공정을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제안된 Cap 모델과 Drucker/Prager Cap 모델은 (p, q)평면에서 나노 티타니아 분말의 등밀도

실험치를 비교적 잘 예측하였다.

(2) 제안된 Cap 모델을 이용한 유한요소해석치는 나노 티타니아 분말의 냉간정수압과 금형압축 시 실험치를 비교적 잘 예측하였으나, Drucker/Prager Cap 모델의 경우 낮은 응력부분에서 나노 분말의 급속한 치밀화를 예측하기는 어려웠다.

(3) 금형압축후 나노 분말 성형체는 동일한 평균 상대밀도를 지니는 마이크론 분말성형체보다 변형이 더욱 심하였다. 또한 마이크론 분말 성형체보다 밀도 구배가 매우 불균일함을 유한 요소해석을 통해 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Mayo, M. J., 1996, "Processing of Nanocrystalline Ceramics from Ultrafine Particles," *International Materials Reviews*, Vol. 41, No. 3, pp. 85~115.
- (2) Rittner, M. N. and Abraham, T., 1997, "The Nanostructured Materials Industry," *American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 76, No. 6, pp. 51~53.
- (3) Suryanarayana, C., 1995, "Nanocrystalline Materials," *International Materials Reviews*, Vol. 40, No.2, pp. 41~64.
- (4) Verweij, H., 1998, "Nanocrystalline and Nanoporous Ceramics," *Advanced Materials*, Vol. 10, No. 17, pp. 1483~1486.
- (5) Gell, M., 1995, "Application Opportunities for Nanostructured Materials and Coating," *Materials Science and Engineering A*, Vol. A204, pp. 246~251.
- (6) Schwartz, E. G. and Weinstein, A. S., 1964, "Model for Compaction of Ceramic Powders," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 48, No. 7, pp. 346~350.
- (7) Srijbos, S., Broese, A. V. G. and Vermeer, P. A., 1979, "Recent Progress in Understanding Die Compaction of Powders," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 62, pp. 57~59.
- (8) Shima, S. and Mimura, K., 1986, "Densification Behavior of Ceramic Powder," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28, No. 1., pp. 53~59.
- (9) Secondi, J., 2002, "Modeling Powder Compaction from a Pressure-Density Law to Continuum Mechanics," *Powder Metallurgy*, Vol. 45, No. 3, pp. 213~217.
- (10) Kim, K. T., Choi, S. W. and Park, H., 2000, "Densification Behavior of Ceramic Powder under Cold Compaction," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 122, pp. 238~244.
- (11) Kim, H. S., 2003, "Densification modeling for nanocrystalline metallic powders," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 401~406.
- (12) Park, H. and Kim K. T., 2001, "Consolidation Behavior of SiC Powder under Cold Compaction," *Materials Science and Engineering A*, Vol. A299, pp. 116~124.
- (13) Reiterer, M., Kraft, T., Janosovits, U. and Riedel, H., 2004, "Finite Element Simulation of Cold Isostatic Pressing and Sintering of SiC Components," *Ceramics International*, Vol. 30, pp. 177~183.
- (14) Lee, S. C. and Kim, K. T., 2006, "A Study of the Cap Model for Metal and Ceramic Powder under Cold Compaction," *Materials Science and Engineering A*, submitted for publication.
- (15) Lee, S. C. and Kim, K. T., 2001, "Densification Behavior of Aluminum Alloy Powder under Cold Compaction," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 1295~1308.
- (16) Bortzmeyer, D., 1990, *Compaction des Poudres Ceramiques*, Doctoral Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- (17) Chtourou, H., Guillot, M., Gakwaya, A. and Guillot, M., 2002, "Modeling of the Metal Powder Compaction Process Using the Cap Model. Part I: Experimental Material Characterization and Validation," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 1059~1075.
- (18) Tszeng, T. C. and Wu, W. T., 1996, "A Study of The Coefficients in Yield Functions Modeling Metal Powder Deformation," *Acta Materialia*, Vol. 44, No. 9, pp. 3543~3552.
- (19) *ABAQUS User's I and II Manual*, Hibbit, Karlsson, and Sorensen, 1998.
- (20) Wang, J. C., 1984, "Young's Modulus of Porous Materials," *Journal of Materials Science*, Vol. 19, pp. 801~814.
- (21) Song, H. J. and Chandler, H. W., 1990, "The Determination of Some Properties of Ceramic Powders Using a Simple Cylindrical Apparatus," *British Ceramic Transactions*, Vol. 89, pp. 49~52.