

〈 논문 〉

냉간 압축 하에서 금속 및 세라믹 분말에 대한 캡 모델의 연구

이 성 철* · 김 기 태†

(2006년 3월 6일 접수, 2006년 8월 16일 심사완료)

A Study of the Cap Model for Metal and Ceramic Powder under Cold Compaction

SungChul Lee and KiTae Kim

Key Words : Cap model(캡모델), Cold Isostatic Pressing(냉간정수압압축), Constitutive Model(구성모델), Densification(치밀화), Die Compaction(금형압축), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

Densification behavior of various metal and ceramic powders was investigated under cold compaction. The Cap model was proposed by using the parameters involved in the yield function for sintered metal powder and volumetric strain evolution under cold isostatic pressing. The parameters for ceramic powder can also be obtained from experimental data under triaxial compression. The Cap model was implemented into a finite element program (ABAQUS) to compare with experimental data for densification behavior of various metal and ceramic powders under cold compaction. The agreement between finite element calculations from the Cap model and experimental data is very good for metal and ceramic powder under cold compaction.

1. 서 론

금속이나 세라믹 분말을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 제조하기 위하여 일반적으로 금형압축 공정이나 정수압공정이 요구된다. 그러나 복잡한 형상의 제품 성형시 균일한 압력으로 성형할 수 없으므로 성형체 내부의 불균일한 밀도 구배를 초래하기 쉽고 이는 소결과정중 불균일한 수축과 크랙을 발생시킬 수 있다. 따라서 밀도구배와 균열을 최소화하기 위해 분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 적절한 모델이 필요하다.

여러 연구자들은 분말의 치밀화 거동을 예측하기 위한 여러 구성 모델들을 제안하였으나 금속분

말과 세라믹 분말에 대해 각기 다른 형태의 모델을 적용해 왔다. 금속 분말에 대해서는 금속 소재에 대한 항복식에 정수응력과 상대밀도 함수를 추가한 모델들이 제안되었다. 세라믹 분말의 경우 세라믹의 취성 특성상 유동응력을 측정하기 어려우므로 분말의 삼축 압축 실험을 이용하는 여러 모델들이 제안 되었다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 금속과 세라믹 분말 전체에 대해 치밀화를 예측할 수 있는 동일한 형태의 항복 모델에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구자들은 알루미늄 합금분말의 삼축압축 실험치를 바탕으로 제안된 Cap 모델을 이용하여 알루미늄 합금분말의 치밀화 거동을 예측하였다.⁽⁴⁾ 이 모델은 삼축압축실험치를 통해 세라믹 분말이 아닌 금속 분말도 예측할 수 있었다는 장점이 있었다. 그러나 삼축압축치는 타 금속 분말에 대해 동일하지 않으므로, 실험에 이용된 알루미늄 합금 분말 이외의 타 종류의 금속 분말에는 적용할 수 없는 한계가 존재한다. 또한 분말의 재질, 성분,

* 포항공과대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: korean@postech.ac.kr

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

크기, 형태에 따라 모델의 계수를 결정해야 하기 때문에 특정 분말의 치밀화를 예측하기 위해서는 일반응력하에서 반복적으로 다량의 삼축 실험을 수행해야 하는 한계를 지닌다. 또한 모델에 요구되는 다수의 계수를 정확하게 곡선접합하기는 쉽지 않다.

한편 일반적으로 금속분말에 적용되었던 항복식⁽⁵⁻⁷⁾처럼 일축압축실험에 의해 계수를 결정하게 되면 경계조건에 의해 일축이 아닌 다축의 응력상태에서 수행되는 금형압축실험과 정수압성형시^(4,8) 분말의 치밀화를 정확하게 예측하기가 쉽지 않다. 동종의 분말 재료 사이에도 열처리 및 입계 크기와 모양 등이 다르기 때문에 측정된 모재의 유동응력도 차이가 발생할 수 있다. 또한 모재는 주로 등가압소결을 통해 제조되지만 공정이 복잡하고 생산단가가 높은 단점이 있으며 고온에서 액상소결하는 분말에 대해서는 등가압소결로 모재를 제조하기가 쉽지 않다.

Yang 등⁽⁹⁾은 금형압축과 정수압 압축시 분말의 치밀화 예측을 위해 Shima-Oyane 모델에 최적접합(tuned-up)한 유동응력을 이용하여 해석하였다. 또한 Kwon 등⁽¹⁰⁾은 금형과 분말성형체가 무마찰인 경우 금형압축 실험치를 최적접합하는 상수와 유동응력을 구하여 유한요소해석을 수행하였다. 하지만 응력상태가 다른 금형압축과 정수압압축공정 모두에 대해 실험치를 잘 예측하는 계수와 유동응력을 최적접합하기는 쉽지 않다. 또한 금형 압축 실험시 분말성형체의 높이가 작더라도 금형과 분말 성형체사이의 무마찰 가정은 한계를 지닌다

따라서 본 논문에서는 성형체의 주변형률과 부피변형률의 관계를 통해 기존의 모델과 달리 세라믹 분말과 금속 분말 전체에 적용할 수 있으며, 동종 분말 뿐만 아니라 다양한 타 종류의 분말에 대해서도 치밀화를 예측할 수 있는 새로운 Cap 모델을 제안하였다. 금속 분말과 세라믹 분말에 대해 대표하는 재료 상수는 각각 알루미늄 분말과 실리콘 카바이드 분말의 삼축 압축 실험을 통해 구하였다. 또한 제안된 캡 모델은 타 종류의 금속 및 세라믹 분말에 대해서 유동응력 실험치가 필요 없고, 다량의 삼축압축 실험 없이 정수압 실험치를 통해 치밀화를 예측할 수 있는 장점이 존재한다. 다양한 하중 조건에서 금속 분말과 세라믹 분말의 치밀화 실험치를 제안된 Cap 모델의 해석치와 비교하였다. 특히 일축압축실험치로 유도된 기존의 금속분말에 대한 모델과 비교하기 위해 정수압 영향이 큰 공정인 RIP(rubber isostatic pressing) 공정에 대해 실험치와 각 모델의 해석치를 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 캡 모델에서 모델계수 유도

상대밀도 D 를 경화변수로 사용할 경우 분말의 치밀화에 대한 Cap 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(4,11-14)

$$A(D)J_1' + B(D)J_2' = C(D) \quad (1)$$

여기서, J_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 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 p 는 정수응력, q 는 유효응력, $f(D)$ 와 $k(D)$ 는 밀도함수를 나타낸다.

이때 분말 성형체의 주변형률 증가분 $d\epsilon_1$, $d\epsilon_2, d\epsilon_3$ 과 부피변형률 증가분 $d\epsilon_v$ 는 다음과 쓸 수 있다.

$$d\epsilon_1 = d\lambda' \frac{\partial F}{\partial \sigma_1} = d\lambda \{ \sigma_1 - (1 - \frac{2}{9} f(D)^2) p \}$$

$$d\epsilon_2 = d\lambda' \frac{\partial F}{\partial \sigma_1} = d\lambda \{ \sigma_2 - (1 - \frac{2}{9} f(D)^2) p \}$$

$$d\epsilon_3 = d\lambda' \frac{\partial F}{\partial \sigma_1} = d\lambda \{ \sigma_3 - (1 - \frac{2}{9} f(D)^2) p \}$$

$$d\epsilon_v = d\epsilon_1 + d\epsilon_2 + d\epsilon_3 = -d\rho / \rho = d\lambda (\frac{2}{3} f(D)^2) p \quad (3)$$

식 (3)에 일축 압축 응력상태의 주응력을 대입하면 다음과 같은 관계식에서 $f(D)$ 를 구할 수 있다.

$$f(D) = \frac{\sqrt{2}}{3} (\frac{d\epsilon_1 - d\epsilon_2}{d\epsilon_v})^{1/2} \quad (4)$$

또한 식 (2)에 정수압 상태의 주응력을 대입하면 다음과 같은 관계식이 유도되고, 식 (4)에서 $f(D)$ 가 결정되면 정수압실험을 통해 $k(D)$ 를 구할 수 있다.

$$p = f(D)k(D) \quad (5)$$

2.2 고무의 구성 방정식

고무는 변형이 일어나는 동안 항상 등방성의 성질을 가지고 있다고 가정함으로써 초탄성체의

변형률 에너지 포텐셜을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다. Ogden 변형률 에너지 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_o = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (6)$$

여기서 $\bar{\lambda}_i$, λ_i , J^{el} 과 N 은 각각 편차 주 연신율, 주 연신율, 탄성 체적비와 재료상수를 나타낸다. 또한 μ_i , α_i 과 D_i 는 온도에 의존하는 재료상수이다.

2.3 구성 방정식의 수치 적분

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁵⁾의 사용자 정의 서브루틴 UMAT 을 사용하여 정수압축과 금형압축 하에서 분말의 치밀화 거동을 해석하였다. 유한요소법을 이용한 구성 방정식의 수치 적분은 타 논문⁽¹⁶⁻¹⁸⁾에 자세히 설명되어 있다.

3. 실험

본 논문에서는 다양한 금속과 세라믹분말을 사용하여 실험을 수행하였다. 분말의 물리적 성질과 기계적 물성치는 Table 1 에 나타내었다.

3.1 냉간정수압압축 실험

직경 13 mm, 높이 25 mm 인 실리콘볼드안에 금속 분말을 충전시킨후 진공밀봉하였다. 냉간정수압압축기로 10~350 MPa 의 정수압을 가했으며, 파라핀으로 시편을 코팅한 후 Archimedes 법에 의하여 성형체의 상대밀도를 구하였다.

3.2 금형압축 실험

금속 분말의 금형압축실험은 일방향압축(single action pressing)으로 하였다. 초경으로 제작된 내

Table 1 Physical property and mechanical properties of powder

Materials	Particle size [μm]	Theoretical density [g/cm ³]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's ratio
Al6061	55	2.7	69.7	0.33
Iron	100	7.65	215	0.33
Cu	60	8.93	110.3	0.36
ZrO ₂	0.53	6.08	206	0.31
Al ₂ O ₃	0.4	3.98	406	0.27
SiC	0.3	3.16	413	0.24

부 직경 20 mm 의 금형에 분말을 충전한 후 50~500 MPa 의 축 하중을 가하여 압축하였다. 압축시 금형 벽면과 분말사이의 마찰을 줄이기 위해 탄소 윤활제를 금형 벽면에 얇게 칠했다. 압축된 성형체는 상부 방향으로 이젝트하였으며, 시편의 질량 및 직경과 높이를 측정하여 상대밀도를 구하였다.

4. 모델 계수 결정 및 해석

4.1 모델 계수 결정

본 연구자들은 알루미늄 합금 분말에 대해 삼축 압축실험을 수행하여 일반응력하에서 분말의 치밀화 실험치를 구하였다.⁽⁴⁾ 삼축압축시 실린더 형상의 시편에 대해 구속압력 σ_c 가 가해지면 유효응력 $q = -(\sigma_1 - \sigma_2) = -(\sigma_1 - \sigma_c)$ 의 관계와 식 (3)에 의해 삼축압축시 $f(D)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(D) = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)p}{d\varepsilon_v q} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Shima 와 Oyane 은 금속 분말에 대해 $D_f = 1$ 인 다음과 같은 함수에서 곡선접합을 했으며 이때 $a = 2.49$, $m = 0.514$ 를 구하였다.

$$f(D) = \frac{1}{a(D_f - D)^m} \quad (8)$$

Fig. 1 은 본 연구자들의 삼축압축실험과 식 (7) 을 이용하여 구한 실험치 및 곡선접합을 나타낸다.⁽⁴⁾ 이 때 계수 $a = 2.39$, $m = 0.472$ 를 구하였으며,

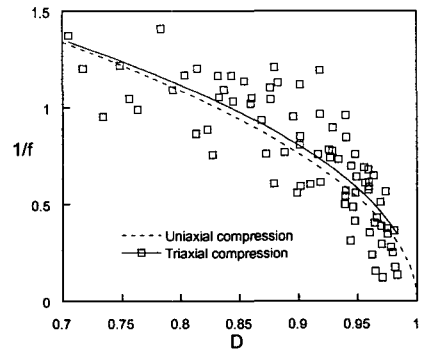


Fig. 1 Comparison between 1/f obtained by triaxial compression test and uniaxial compression test for Al6061 powder

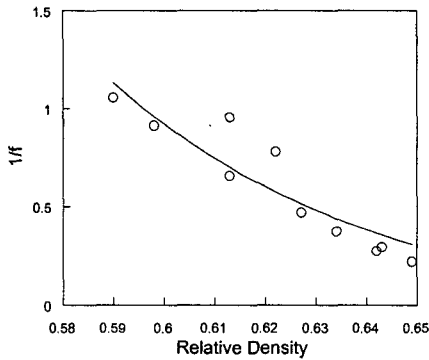


Fig. 2 Relationship between $1/f$ obtained by triaxial compression test and relative density for silicon carbide powder

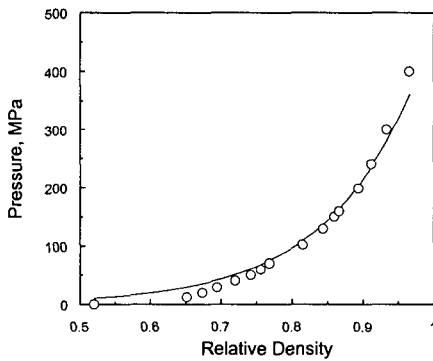


Fig. 3 The relationship between pressure and relative density of Al6061 powder

Fig. 1 에서 보듯 Shima 와 Oyane 이 구한 계수 a 와 m 의 값과 차이가 없음을 알 수 있다.

연성 금속 분말의 경우 일축압축실험을 통해 보편적으로 사용할 수 있는 계수를 Shima 와 Oyane 은 실험적으로 구하였다. 또한 Fig. 1 에서 보듯 삼축실험으로 얻은 $f(D)$ 는 일축압축실험에서 얻은 계수와 비슷한 값을 보였다. 따라서 세라믹 분말의 경우도 주변형을 증가분과 식 (7)을 이용하여 삼축압축하에서 분말성형체의 거동을 통해 금속 분말 경우와 같이 보편적으로 사용할 수 있는 Cap 모델의 계수를 구하고자 하였다.

Fig. 2 는 Park 과 Kim⁽¹⁹⁾이 실리콘 카바이드 분말에 대해 수행한 삼축압축실험치와 삼축압축시 분말성형체의 변형률을 이용하여 구한 상대밀도와 $f(D)$ 의 실험치와 곡선접합을 나타낸다. 이때 식 (8)을 이용하여 곡선접합한 결과 $a = 21.445$, $m = 1.1885$, $D_f = 0.672$ 를 구하였다.

Table 2 Determined parameters, $k(D)$ for various powders

Powders	$k(D)$
Al6061	$0.4138 \exp(7.9621D)(1-D)^{0.514}$
Iron	$2.8914 \exp(6.7477D)(1-D)^{0.514}$
Cu	$1.0839 \exp(7.3412D)(1-D)^{0.514}$
ZrO ₂	$(3.50E+2) \exp(14.119D)(1-D)^{8.3269}$
Al ₂ O ₃	$(7.49E-4) \exp(34.535D)(1-D)^{8.3269}$
SiC	$(3.99E-2) \exp(26.784D)(1-D)^{8.3269}$

Table 3 Used parameters of E_0 , b and c in Eq. (9)⁽¹⁹⁻²¹⁾

Materials	b	c
Al6061	19.351	-11.936
Iron, Cu	5.56	4.29
ZrO ₂	9.3	3.69
Al ₂ O ₃	3.01	17.65
SiC	12.6	-6.99

Fig. 3 은 정수압실험 시 알루미늄합금 분말에 대한 정수압과 상대밀도의 관계식을 나타낸다. 다양한 금속과 세라믹 분말에 대한 정수압 실험치와 $f(D)$ 를 식 (5)에 대입하여 구한 $k(D)$ 의 값은 Table 2 에 나타내었다.

분말성형체의 치밀화 거동을 유한요소해석하기 위해서 상대밀도 변화에 따른 탄성계수가 필요하다. 탄성계수의 관계식은 다음 식으로부터 문헌을 참고하여 구하였다.⁽¹⁹⁻²¹⁾

$$E = E_0 \exp[-(b\phi + c\phi^2)] \tag{9}$$

식 (9)에서 E_0 는 모재(matrix)의 탄성계수이며, b 와 c 는 상수값, ϕ 는 분말성형체의 기공률($\phi = 1 - D$)을 나타낸다. 이때 각 분말에 대한 E_0 은 Table 1 에서 구할 수 있으며 b 와 c 는 Table 3 에 나타내었다.

4.2 해석 모델링

정수압 및 일축압축공정 해석시 일방향압축에 사용된 4 절점 축대칭요소(CAX4R element)를 갖는 유한요소격자를 이용하였다. 일축압축공정시 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.

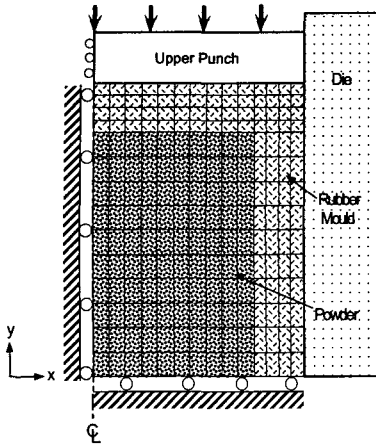


Fig. 4 The finite element meshes and boundary conditions for a powder compact and a rubber mould with 5 mm in during cold compaction

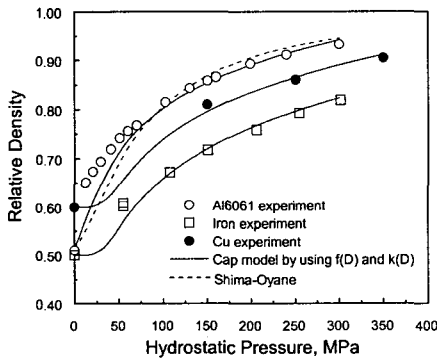


Fig. 5 Comparisons between experimental data of metal powders and finite element calculations from the Cap model for the variation of relative density with axial stress during cold isostatic pressing

Fig. 4 는 고무 몰드를 이용한 등가압 성형시 유한 요소해석을 위해 사용된 유한요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. 일정 두께를 지닌 바이톤 고무 몰드를 이용한 금형압축과 냉간정수압성형(RIP)의 해석시 분말 성형체는 8 절점 2 차 축대칭요소(CAX8), 고무몰드는 CAX8H 요소를 사용하였다. 금속 분말의 변형거동 해석시 고무는 Ogden 변형을 에너지 포텐셜 모델을 사용하였으며, 고무와 분말 성형체의 경계는 완전 접합으로 가정하였다.⁽⁸⁾

4.3 금속 분말의 해석 결과

Fig. 5 와 6 는 금속분말의 냉간정수압 압축과 금형압축 하에서 압력과 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. Shima-Oyane 가 제안한 항복함수(Φ)는 다음과 같이 나타낼 수

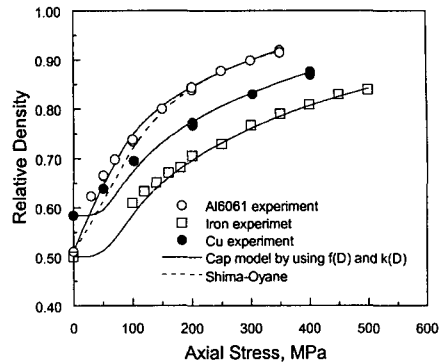


Fig. 6 Comparisons between experimental data and finite element calculations from the Cap model for the variation of relative density with axial stress of metal powders during die compaction

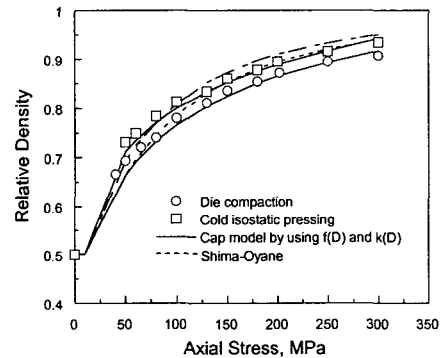


Fig. 7 Comparison between experimental data of iron powder and finite element calculations for the variation of relative density with axial stress during cold compaction for viton rubber mould with 5 mm in thickness

있으며 여기서 σ_m, p, q 는 각각 유동응력, 정수응력, 유효응력이다.

$$\Phi(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + 2.49^2(1-D)^{1.028} \left(\frac{p}{\sigma_m}\right)^2 - D^5 = 0 \tag{10}$$

Fig. 5 와 6 에서 보듯 식 (2), (4), (5)의 항복함수와 계수를 사용하여 유한요소해석으로 구한 계산치는 다양한 금속 분말에 대한 실험치를 잘 예측하였다. Shima 와 Oyane 모델은 Al6061 분말에 대한 실험치를 비교적 잘 예측하였으나, 낮은 밀도 범위에서는 실험치를 낮게 예측하였다. 이 모델의 경우 모재변형시 완전소성거동이라 가정하여 모델을 유도하였고 소결한 분말 성형체와 모재의 일축압축 및 인장실험등의 일축 변형모드에서만 실험을 수행하였으므로 특히 정수압하에서 분말의

Table 4 Used parameters in Eq. (6)

	α_i		μ_i		D_i	
계수값	α_1	-0.24663	μ_1	19.0665	D_1	3.34615×10^{-3}
	α_2	5.66625	μ_2	2.20108×10^{-2}	D_2	8.83737×10^{-5}
	α_3	-0.41460	μ_3	-16.7419	D_3	-2.86151×10^{-5}

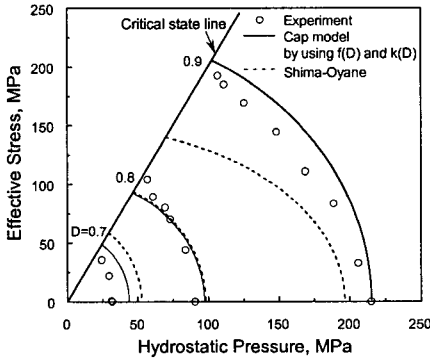


Fig. 8 Comparisons between the yield surface of models and experimental data for Al alloy powder compacts under triaxial compression in the (p, q) plane

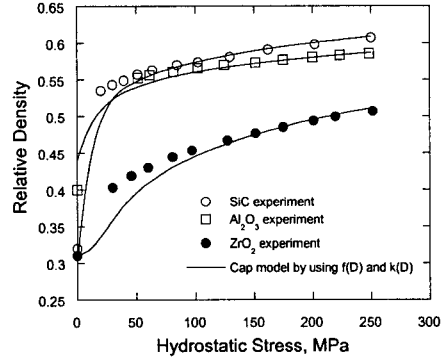


Fig. 10 Comparison between experimental data of ceramic powders and finite element calculations from the Cap model for the variation of relative density with axial stress during cold isostatic pressing

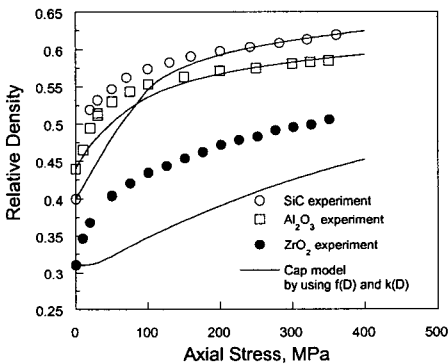


Fig. 9 Comparison between experimental data of ceramic powders and finite element calculations from the Cap model for the variation of relative density with axial stress during cold isostatic pressing

치밀화를 정확히 예측하기 어려운 것이 사실이다. 이같은 경향은 정수응력이 주로 가해지는 RIP(rubber isostatic pressing) 공정에 대한 철분말의 실험치와 해석치를 나타내는 Fig. 7에서도 확인할 수 있다.

Fig. 7은 철분말을 두께 5 mm 바이톤 고무 물드에 충전시킨 후 금형압축시 실험치와 해석치를 나타낸다. 유한요소해석시 Ogden 변형률 에너지 포텐셜을 위한 계수값들은 $\dot{\epsilon} = 10^{-3}/s$ 변형률 속도의

실험치를 이용하여 구하였으며 Table 4에 나타내었다. 이때 비압축성과 등방성의 고무의 특성상 일축응력을 가했을 경우에도 정수응력이 작용하게 된다. 따라서 Fig. 5의 정수압실험과 비슷한 해석 결과를 보였으며, 특히 제안된 캡모델은 높은 응력에서 실험치를 잘 예측함을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 (p, q) 평면에서 알루미늄 합금 분말의 삼축압축 실험치와 제안된 모델의 비교를 나타낸다. 낮은 응력과 높은 응력에서 Shima와 Oyane 모델은 실험치를 정확하게 예측하지 못했다. 일축압축시 분말 성형체의 변형률 관계만으로 항복 함수를 유도한 Shima와 Oyane 모델보다 정수압실험을 통해 $k(D)$ 의 계수를 구한 캡모델이 일반화중 하에서 실험치를 잘 예측함을 확인할 수 있다.

4.4 세라믹 분말의 해석 결과

Fig. 9은 세라믹 분말의 금형 압축 하에서 축응력과 상대 밀도의 변화에 대한 실험치와 해석치의 비교를 나타낸다. 실리콘 카바이드와 알루미늄 분말의 경우 해석결과는 낮은 응력에서 실험치를 낮게 예측하지만 전반적으로 비교적 잘 예측함을 확인할 수 있다. Fig. 2에서 주변형률과 부피 변형률에 대한 실험치는 상대적으로 높은 밀도에서 구해졌기 때문에 낮은 응력에서 실험치와 해석치의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 반면 지르코

니아 분말의 경우 전반적으로 실험치와 해석치가 차이가 발생함을 확인 할 수 있다. 세라믹 분말의 치밀화는 분말의 재배열, 분말의 분쇄(fragmentation), 소성변형에 의하여 이루어진다. 실리콘 카바이드분말과 알루미늄 분말의 경우 파괴인성은 각각 3.5, 2.3 MPa·√m 인 반면 지르코니아 분말은 8-15 MPa·√m 으로 상대적으로 높은 값을 지닌다.⁽²²⁾ 실리콘 카바이드 분말과 알루미늄 분말, 지르코니아 분말은 Table 1 에서 보듯 각각 비슷한 크기의 마이크론 분말이다. 하지만 Fig. 9 에서 지르코니아 분말이 타 분말에 비해 밀도가 낮은 이유는 높은 파괴인성으로 인해 분말의 적은 분쇄(fragmentation)로 분말의 재배열이 효과적으로 수행되지 못했기 때문이다. 따라서 실리콘 카바이드 분말의 실험으로 구한 계수를 이용했을 때 해석결과는 파괴인성값이 비슷한 알루미늄 분말의 실험치를 비교적 잘 예측했으나 지르코니아 분말의 경우 낮게 예측함을 확인할 수 있다. Fig. 10 는 세라믹분말의 냉간정수압 압축 하에서 정수압과 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 정수압 실험을 통해 식(5)에서 계수의 값을 결정했으므로 제안된 Cap 모델은 세라믹 분말의 치밀화를 잘 예측함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 Cap 모델을 바탕으로 금속 분말 성형체의 주변변형률과 부피변형률 증가분의 관계에서 Shima 와 Oyane 이 일축압축실험으로 구한 실험치와 정수압 실험치를 통해 계수를 결정하였다. 세라믹 분말에 대해서는 실리콘 카바이드 분말의 삼축실험을 통해 계수를 구하였다. 또한 구해진 계수를 이용한 해석결과가 타 종류의 분말에 대해서도 다양한 하중조건과 성형공정에서 실험치를 잘 예측하는지 확인하였다.

(1) 일반적인 Cap 모델을 바탕으로 금속분말의 경우에는 일축압축실험, 세라믹분말의 경우에는 삼축압축실험을 통해 계수를 결정하였다. 또한 금속분말의 경우 정수압실험을 통해 모재의 물성 측정 없이 일반 하중하에서 분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있었다.

(2) 제안된 계수를 이용한 Cap 모델의 해석결과는 금속 분말의 경우 금형압축실험과 고무를 이용한 등가압성형 실험치를 잘 예측하였으며, 특히 정수압이 주응력으로 작용할 경우 기존 Shima-

Oyane 모델보다 실험치를 잘 예측하였다.

(3) Cap 모델의 계수를 구한 실리콘 카바이드 분말과 파괴인성이 비슷한 세라믹 분말에 대해 냉간 압축실험의 해석을 수행한 결과 해석치는 실험치를 비교적 잘 예측하였다. 이는 치밀화에 영향을 주는 분말의 분쇄(fragmentation)가 파괴인성의 차이에 의해 결정되기 때문이다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Stribos, 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. No. 6, pp. 287~293.
- (3) DiMaggio F. L. and Sandler I. S., 1971, "Material Model for Granular Soils," *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, Vol. 97, pp. 935~950.
- (4) 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.
- (5) Kuhn, H. A. and Downey, C. L., 1971, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials," *International Journal of Powder Metallurgy*, Vol. 7, No. 1, pp. 15~25.
- (6) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (7) Doraivelu, S. M, Gelgel, H. L., Gunasekera, J. S., Malas, J. C. and Morgan, J. T., 1984, "A New Yield Function for Compressible P/M Materials," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 26, pp. 527~534.
- (8) Shima, S., Sakamoto, Y. and Kotera, H., 2002, "Simulation of rubber isostatic pressing and shape optimization of rubber mold," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 1603~1623.
- (9) Yang, H. C., Kim, J. K. and Kim, K. T., 2004, "Rubber Isostatic Pressing and Cold Isostatic Pressing of Metal Powder," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 382, pp. 41~49.
- (10) Kwon, Y. S., Chung, S. H., Sanderow, H. I., Kim, K. T. and German, R. M., 2003, "Numerical Analysis and Optimization of Die Compaction Process," *PM2TEC*, Las Vegas.
- (11) Shima, S. and Mimura, K., 1986, "Densification Behavior of Ceramic Powder," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28. No. 1, pp. 53~59.
- (12) Bortzmeyer, D., 1990, *Compaction des Poudres Ceramiques*, Doctoral Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) *ABAQUS User's I and II Manual*, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, 1998.
- (16) Aravas, N., 1987, "On The Numerical Integration of A Class of Pressure-dependent Plasticity Models," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, pp. 1395~1416.
- (17) Lush, A. M., Weber, G. and Anand, L., 1989, "An Implicit Time-integration Procedure for a Set of Internal Variable Constitutive Equations For Isotropic Elasto-Viscoplasticity," *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, pp. 521~549.
- (18) Govindarajan, R. M., 1992, *Deformation Processing of Porous Metals*, Doctoral thesis, University of Pennsylvania, U. S. A.
- (19) Park, H. and Kim, K. T., 2001, "Consolidation Behavior of SiC Powder under Cold Compaction," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 299, pp. 116~124.
- (20) Wang, J. C., 1984, "Young's Modulus of Porous Materials," *Journal of Materials Science*, Vol. 19, pp. 801~814.
- (21) Kim, K. T., Choi, S. W. and Park, H., 2000, "Densification Behavior of Ceramic Powder Under Cold Compaction," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 122, pp. 238~244.
- (22) Tennery, V. J., 1989, *Ceramic Materials and Components for Engines*. The American Ceramic Society, pp. 1480~1494.