

압분공정의 유한요소 해석을 위한 AZO 분말의 Closed-die Compaction 실험

김용배¹ · 이종섭¹ · 이상목¹ · 박훈재¹ · 이근안[#]

Closed-die Compaction of AZO Powder for FE Simulation of Powder Compaction

Y. B. Kim, J. S. Lee, S. M. Lee, H. J. Park, G. A. Lee

(Received January 6, 2012 / Revised March 9, 2012 / Accepted June 20, 2012)

Abstract

In this study, powder compaction of AZO (alumina doped zinc oxide) powder was performed with a MTS 810 test system using a cylindrical die having a diameter of 10mm. Pressure-density curves were measured based on the load cell and displacement of the punch. The AZO powder compacts with various densities were formed to investigate the mechanical properties such as fracture stress of the AZO powder as a function of the compact density. Two types of compression tests were conducted in order to estimate the fracture stress using different loading paths: a diametral compression test and a uniaxial compression test. The pressure-density curves of the AZO powder were obtained and the fracture stress of the compacted powders with various densities was estimated. The results show that the compact pressure dramatically increases as the density increases. Based on the experimental results, calibration of the modified Drucker-Prager/Cap model of the AZO powder for use in FE simulations was developed.

Key Words: Densification Behavior, AZO Powder, Closed-die Compaction, Drucker-Prager Cap Model, FE Simulation

1. 서론

초고압력 등방압(ultrahigh isostatic pressing) 성형 기술은 조선, 반도체, 우주항공산업 분야의 다양한 제조 기술과 연계되어 핵심 부품을 제조할 수 있는 원천 핵심기술이다. 초고압력 등방압 성형기술의 등방압 특성을 이용하여 금속분말을 가압 성형하여 굳히고, 가열하여 소결함으로써 목적하는 형태의 금속 제품을 얻은 후 다양한 공정에 적용되고 있다.

초고압력 등방압 성형기술의 대표적인 응용분야로 투명전극(transparent electrode)용 스퍼터링 타겟(sputtering target) 성형공정이 있다. 투명전극은

평판형 디스플레이와 터치패널용과 같은 IT 산업에서 핵심 부품으로 사용되고 있다. 투명전극은 일반적으로 SnO₂, ITO(Indium Tin Oxide) 및 AZO(Aluminum doped Zinc Oxide)와 같은 분말을 재료로 하여 냉간 압분(compact) 및 소결을 통하여 제조된 스퍼터링 타겟에 스퍼터링 공정을 적용하여 제조된다.

한편, 생산성 및 품질 제고를 위하여 스퍼터링 타겟의 고밀도화, 밀도 분포 균일화 및 대면적화 등이 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해서는 소재 금형간의 마찰, 균열, 비틀림 및 불균일 밀도 분포 등의 문제점을 해결하여야 할 필요가 있다. 이를 위해 마찰을 최소화 하기 위한

1. 한국생산기술연구원
교신저자: 한국생산기술연구원, E-mail: galee@kitech.re.kr

등방압 성형공정 및 공정설계를 위한 유한요소해석 기법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

압분공정의 유한요소해석을 위해서 우선적으로, 분말금속의 압분거동을 유한요소해석에 고려할 수 있어야 한다. 일반적인 금속과 분말 금속의 큰 차이점으로 연속성이 유무 차이를 볼 수 있다. 분말 성형공정의 유한요소 해석기법은 일반적인 금속성형 공정에서 사용되는 von Mises 항복기준과 같은 함수로 정의되지 않고, 압력과 밀도의 함수 꼴로 변형거동이 정의 되는데 이는 분말간의 불연속성을 고려하여야 하기 때문이다.

분말 성형공정을 위한 대표적인 구성방정식으로는 Cam-Clay 모델[1]과 DPC(Drucker-Prager Cap) 모델[2]이 존재한다. 두 모델의 큰 차이점으로 파손을 고려하였는지 아닌지를 들 수 있고, DPC 모델이 파손을 고려한 모델이다.

실험 및 해석을 통하여 DPC 모델 계수를 정립하여 다양한 분말 성형공정의 공정설계에 적용하기 위한 연구가 수행되어 왔다[3~7]. 제약분말의 DPC 모델의 정립하여 압분공정 적용하였으며[3~6], 보다 정밀한 모델을 구성하기 위한 금형설계에 대한 연구도 수행된 바 있다[7].

본 연구에서는 AZO 분말의 유한요소 압분 해석을 위한 modified DPC 모델의 계수를 확보하였다. AZO 분말의 원통형 금형을 이용한 closed-die compaction 실험을 통하여, 압분밀도-압분응력 선도와 다양한 밀도의 압분체(compact)를 확보하였다. 또한 확보된 압분체의 파손실험을 통하여, 압분밀도에 따른 파단응력을 측정하였다. 이 결과들을 바탕으로 AZO 분말의 DPC 모델의 계수를 밀도의 함수로 구하였다.

2. Modified DPC model

분말의 압분거동을 정밀하게 고려하기 위하여 본 연구에서는 modified DPC 모델을 사용하였다. DPC 모델은 대표적인 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS[8]에 적용되어 있다. modified DPC 모델은 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 $p-q$ 평면상에서 파손을 고려하기 위한 F_s (shear failure surface), 압력 증가에 따른 항복을 밀도의 증가를 고려하기 위한 F_c (cap surface) 및 F_s 와 F_c 을 부드럽게 이어, 수치적인 안정성을 도모하기 위한 F_t (transition surface)로 구성된다.

F_s 를 정의 하기 위해서는 cohesion d 와 friction

angle β 가 필요하다. 각각의 변수는 F_s 의 q 축과의 절편 및 기울기를 의미한다

두 변수를 결정하기 위해서는 상이한 변형경로/loading path)를 가지는 파단실험을 2가지 이상 수행하여야 한다. 이러한 변형경로는 uniaxial tension, uniaxial compression, simple shear, diametral compression 등이 있다. 본 연구에서는 난이도를 고려, diametral compression과 uniaxial compression 을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 두 실험을 Fig. 2에 나타내었다.

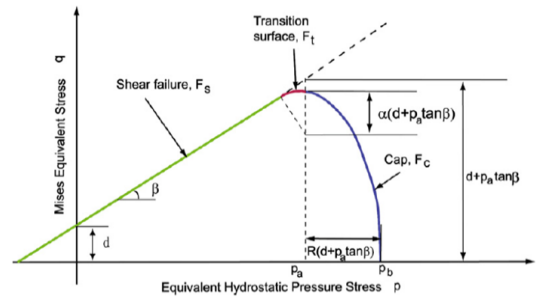
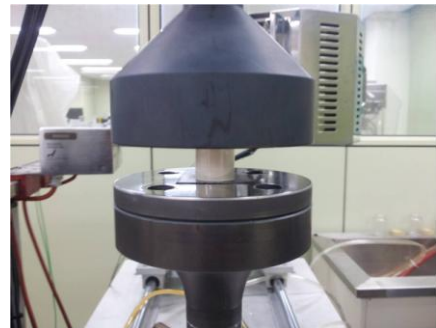


Fig. 1 Modified DPC model in the $p-q$ plane[6]



(a)



(b)

Fig. 2 Experimental set-up for fracture tests: (a) uniaxial compression; (b) diametral compression



Fig. 3 Experimental set-up for closed-die compaction tests

두 실험을 통하여 측정된 특정밀도에 따른 파단 응력으로부터, p, q 값을 아래의 식을 통해 구할 수 있다.

$$p = \frac{2}{3}\sigma_d^f, \quad q = \sqrt{13}\sigma_d^f \quad \text{for diametral compression (1)}$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_c^f, \quad q = -\sigma_c^f \quad \text{for uniaxial compression (2)}$$

여기서 σ_d^f, σ_c^f 는 각각 diametral compression과 uniaxial compression을 통해 정의되는 파단응력이다. $p-q$ 평면에 특정 밀도에서의 p, q 값을 식 (1), (2)를 통해 정의하고 연결하면, 특정 밀도에서 F_s 를 표현할 수 있고, d 와 β 는 식 (3), (4)를 통해 정의된다[3].

$$d = \frac{\sigma_c^f \sigma_d^f (\sqrt{13} - 2)}{\sigma_c^f + 2\sigma_d^f} \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{3(\sigma_c^f + d)}{\sigma_c^f} \right] \quad (4)$$

한편, F_c 는 $p-q$ 평면상에서 타원의 형태로 정의된다. 타원 방정식을 정의 하기 위해서 4가지의 변수가 필요한데, F_c 는 F_s 를 만나야 한다는 전제 하에 하나의 변수가 소거된다. 따라서 타원의 중심인 p_a , 장단축의 비율 R , 단축의 길이를 정의 하는 p_b 가 정의되어야 한다. 본 연구에서는 이 세 변수를 결정하기 위한 Fig. 3과 같은 원통형 금형을 사용한 close-die compaction 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 얻어진 상대변위-압축하중 선도를 통하여 각 변수들을 구할 수 있는 데, 이를

식 (5), 식(6), 식(7)에 정리하였다[6].

$$R = \sqrt{\frac{2(1 + \alpha - \alpha / \cos \beta)^2}{3q_e}} (p_e - p_a)^2 \quad (5)$$

$$p_b = p_a(1 + R \tan \beta) + Rd \quad (6)$$

$$p_a = -\frac{3q_e + 4d \tan \beta A^2}{4(\tan \beta A)^2} + \frac{\sqrt{9q_e^2 + 24dq_e A^2 \tan \beta + 8(3p_e q_e + 2q^2)(\tan \beta A)^2}}{4(\tan \beta A)^2} \quad (7)$$

여기서

$$A = 1 + \alpha - \alpha / \cos \beta \quad (8)$$

한편 α 는 Transition surface를 정의해주는 계수로 0.01~0.1 사이의 값이 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 0.05를 사용하였다. 또한, 식(7)에서의 p_e 와 q_e 는 closed-die compaction 실험에서 얻은 상대밀도-압축하중으로부터 계산된 압력 및 편차 응력을 의미한다. 축대칭조건과 금형을 강체로 가정하였을 때, 이 두 값은 압분체에 작용하는 축방향 응력(axial stress, σ_z)으로 정의될 수 있다[9].

$$p_e \cong -\frac{1}{3}(1 + 2\alpha_s)\sigma_z \quad (9)$$

$$q_e \cong (1 - \alpha_s)\sigma_z \quad (10)$$

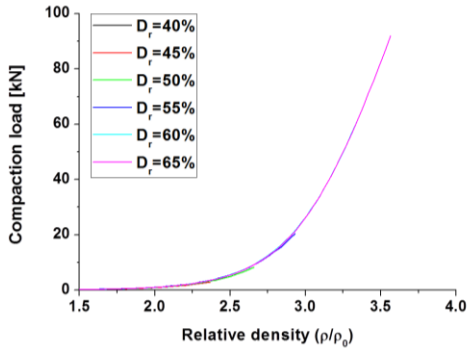
여기서 α_s 는 응력 전달 계수로 축방향 응력과 반경방향 응력(radial stress, σ_r)의 비이며, 0.5를 본 연구에서는 사용하였다.

3. Modified DPC 모델 구성

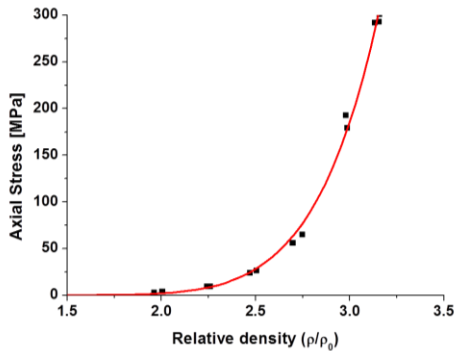
3.1 원통형 금형을 통한 압분실험

본 연구에서 필요한 변수를 구하기 위해 MTS 810 test system 에서 직경 10mm의 원통형 금형을 이용, close-die compaction 실험을 수행하였다. 성형 속도는 0.02mm/sec로 목표한 압분밀도를 얻는 변위를 부과하였다.

실험으로부터 얻어지는 밀도변화에 따른 압분하중을 통해 상대밀도에 따른 축방향 응력을 구할 수 있으며, 가정한 응력전달계수($\alpha_s = 0.5$)에 따라서 반경방향 응력을 측정할 수 있다.



(a)



(b)

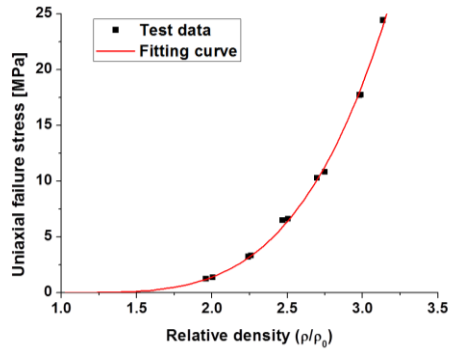
Fig. 4 Results of the close die compaction ($h/D=1.0$): (a) compaction loads; (b) axial stress

실험으로부터 얻은 압분 상대밀도에 따른 압분 하중과 축방향응력을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 ρ_0 는 AZO 분말의 초기 충전밀도로 11g/cm^3 이다. 측정된 축방향응력과 식 (9), (10)을 통하여 p_e , q_e 를 구할 수 있다.

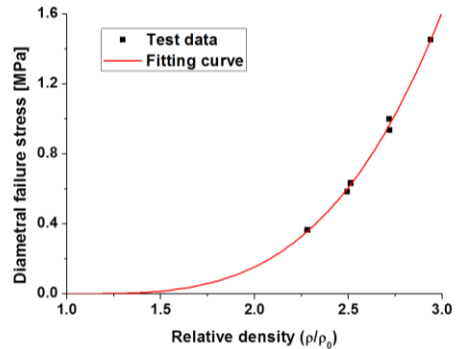
3.2 압분체의 파단실험

압분밀도에 따른 파단응력을 측정하기 위해 diametrical compression과 uniaxial compression을 수행하였다. 원통형 금형을 통하여 다양한 밀도의 압분체를 제작하였다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 uniaxial compression과 diametrical compression을 위해 각각 세장비 1과 0.25의 압분체가 사용되었다. 파단실험은 MTS system 을 이용하여 편치속도 0.02mm/s 로 수행하였다. 시편과 금형간의 마찰을 감소시키기 위해 graphite foil 을 사용하였다.

각각의 실험에 대한 상대밀도-파단응력 선도를 Fig. 5에 도시하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Failure stress curve as a function of relative density: uniaxial compression test

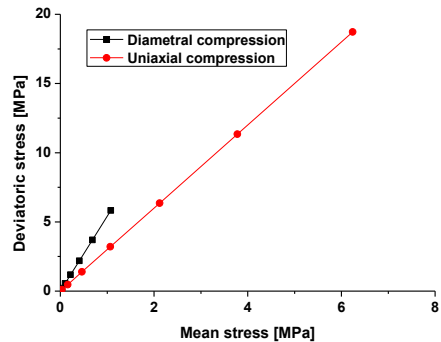
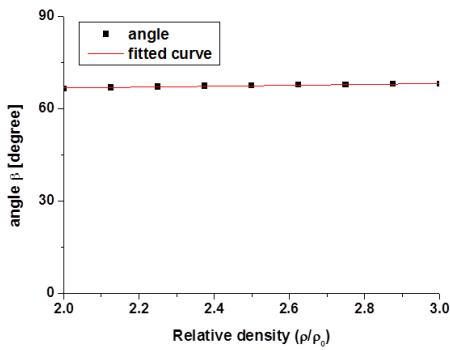
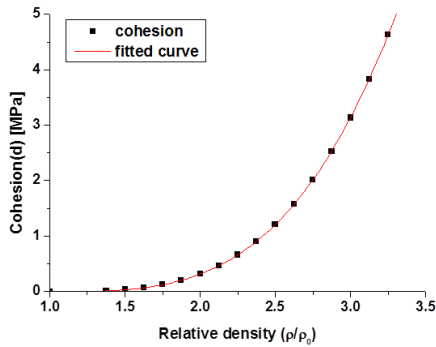


Fig. 6 Variation of fracture stress on the $p-q$ plane

이를 이용하여 식(1), (2)의 p , q 값을 계산할 수 있으며, $p-q$ 평면상에 도시하면 Fig. 6과 같다. 따라서, 동일한 압분밀도의 uniaxial compression과 diametrical compression의 점을 연결한 직선의 기울기가 F_s 의 friction angle β 이며, q 축과 만나는 절편이 cohesion d 가 된다.



(a)



(b)

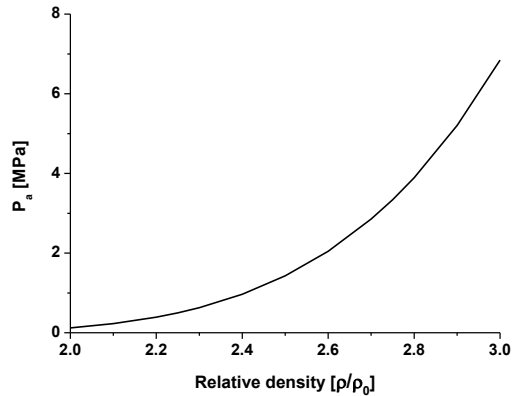
Fig. 7 the cohesion and friction angle

두 변수는 식(3), (4)를 통해 계산할 수 있으며, Fig. 7에 그 결과를 도시하였다. Cap surface를 위한 세 변수들은 위의 결과와 식 (9), (10)의 p_c , q_c 값을 식(5)~식(7)에 적용하여 계산할 수 있다. 이 결과를 Fig. 8에 정리하였다.

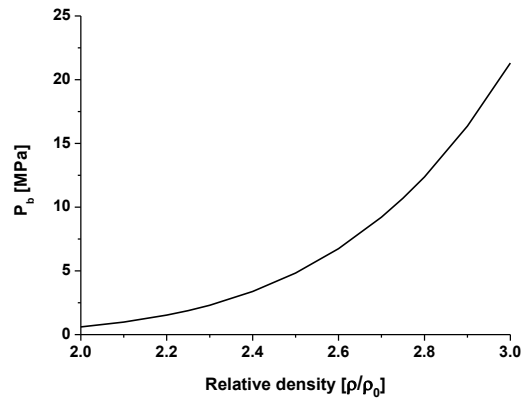
압분실험 및 파단실험을 통하여 정의된 각 변수들을 통하여 modified DPC 모델을 구성할 수 있다. Modified DPC 곡면의 모양을 결정하는 Friction angle과 Cap eccentricity는 상대밀도 변화에 무관하게 거의 일정한 값을 가지는 반면, 곡면의 크기를 결정하는 cohesion, p_a , p_b 는 지수형태로 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 DPC 곡면은 압분밀도가 증가함에 따라, 형태는 유지하되 크기는 지수관계로 증가할 것임을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 9에서도 확인할 수 있다.

4. 결론

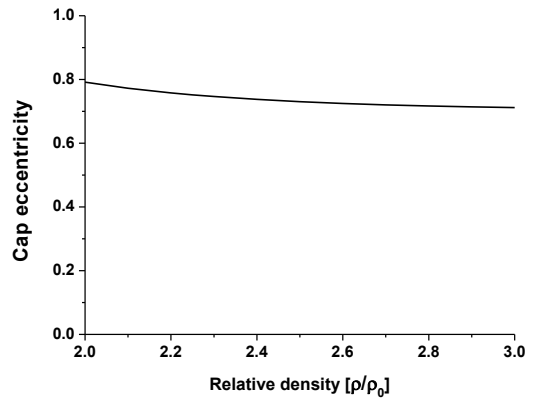
본 연구에서는 냉간 압축공정에서 AZO 분말의



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Parameters for the cap surface: (a) p_a ; (b) p_b ; and (c) R

치밀화 거동에 대하여 원통형 금형을 이용한 압분실험으로부터 얻어지는 각 방향에 따른 응력과 압분체 파단실험을 통한 파단응력을 조사 하

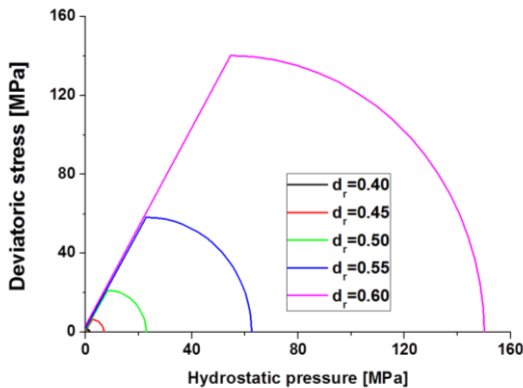


Fig. 9 Modified DPC model of AZO powder

었다. Close die compaction 실험을 통한 밀도변화에 따른 압분 하중을 통해 상대밀도에 따른 축방향 응력을 구할 수 있으며, 가정한 응력전달계수에 따라서 반경방향 응력을 측정하고 modified DPC 모델을 통하여 Cap surface의 매개변수를 정의하였다. 또한 과단실험인 diametral compaction test 및 uniaxial test를 통해 상대밀도에 따른 과단응력을 측정하고 modified DPC 모델의 failure line을 결정하기 위한 매개변수들을 정의하였다. 이를 통해 AZO 분말 성형에 적합한 modified DPC 모델을 제안하였다.

후 기

이 연구는 지식경제부의 기관 고유 임무형 기술개발사업(과제번호: 11E030002)을 통하여 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] R. I. Borja, S. R. Lee, 1990, Cam-Clay Plasticity,

Part 1: Implicit Integration of Elasto-plastic Constitutive Relations, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 78, No. 1, pp. 49~72.

[2] S. Shima, M. Oyane, 1976, Plasticity Theory for Poros Metals, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, No. 6, pp. 285~291.

[3] I. C. Sinka, 2003, The Effect of Wall Friction in the Compaction of Pharmaceutical Tablets with Curved Faces: a Validation Study of the Drucker-Prager Cap Model, *Powder Technol.*, Vol. 133, No. 1, pp. 33~43.

[4] C. Y. Wu, 2005, Modelling the Mechanical Behaviour of Pharmaceutical Powders During Compaction, *Powder Technol.*, Vol. 152, No. 1, pp. 107~117.

[5] C. Y. Wu, 2008, Numerical and Experimental Investigation of Capping Mechanisms During Pharmaceutical Tablet Compaction, *Powder Technol.*, Vol. 181, No. 2, pp. 121~129.

[6] L. H. Han, 2008, A Modified Drucker-Prager Cap Model for Die Compaction Simulation of Pharmaceutical Powders, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 45, No. 10, pp. 3088~3106.

[7] B. Zhang, 2010, Experimental Calibration of Density-dependent Modified Drucker-Prager/Cap Model using an Instrumented Cubic Die for Powder Compact, *Powder Technol.*, Vol. 204, No. 1, pp. 27~41.

[8] ABAQUS Version 6.9-1, 2011, User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, inc., New York, USA.

[9] P. R. Brewin, O. Coube, P. Doremus, J. H. Tweed, 2008, Modeling of Powder Die Compaction, Springer-Verlag, London, pp. 80~81.