

냉간 압축 하에서 금속 분말의 치밀화 거동

이 성 철* · 김 기 태†

(2001년 4월 4일 접수, 2001년 9월 22일 심사완료)

Densification Behavior of Metal Powder Under Cold Compaction

Sung Chul Lee and Ki Tae Kim

Key Words : Cap Model(캡모델), Cold Die Compaction(냉간금형압축), Cold Isostatic Pressing(냉간정수압압축), Constitutive Model(구성모델), Densification(치밀화), Finite Element Analysis(유한요소해석), Stress Path(응력궤적), Triaxial Compression(삼축압축)

Abstract

Densification behavior of aluminum alloy(Al6061) powder was investigated under cold compaction. Experimental data were obtained under triaxial compression with various loading conditions. A special form of the Cap model was proposed from experimental data of Al6061 powder under triaxial compression. The proposed yield function and several yield functions in the literature were implemented into a finite element program (ABAQUS) to compare with experimental data for densification behavior of Al6061 powder under cold isostatic pressing and die compaction. The agreement between finite element calculations from the proposed yield function and experimental data is very good under cold isostatic pressing and die compaction.

1. 서 론

분말야금법은 우수한 물성을 갖는 기계부품을 추가적인 가공 없이 정형(near-net-shape)에 가깝게 성형할 수 있는 장점을 지닌다. 분말야금법에 의해 성형할 경우 상온에서 임의의 형상으로 성형한 후, 고온에서 상압소결이나 단조등을 거쳐 제품을 완성하게 된다. 상온에서 분말 성형시 분말과 분말사이, 분말과 금형사이에 발생하는 마찰은 성형체 내부의 불균일한 밀도구배와 류응력을 생성하여, 고온에서 소결이나 단조시 성형체의 균열과 뒤틀림을 초래한다. 특히 자동차부품, 항공기엔진 부품등의 복잡한 형상의 제품과 중형비가 큰 링, 노즐등의 경우 냉간 성형시 성형체 내부의 높은 불균일성(inhomogeneity)때문에 소결이나 단조 후 제품의 형상제어는 쉽지 않다. 따라서 상온에서

냉간금형압축과 냉간정수압압축 등의 성형공정중에 발생하는 분말성형체 내부의 밀도구배를 최소화하고 최종부품의 적절한 형상제어를 위해서는 유한요소해석을 통한 수치모사는 매우 중요하며^(1,2) 정확한 수치모사를 위해서는 분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 적절한 구성모델의 개발이 절실히 요구된다.

현재까지 여러 연구자들에 의해 금속분말의 치밀화 거동을 예측하기 위한 구성모델들이 다음과 같이 연구되었다. 첫째, 금속 모재 소성항복식인 von Mises 항복식에 다공질재료의 치밀화에 영향을 주는 정수응력성분을 추가한 항복식이 연구되어 Kuhn 과 Downey,⁽³⁾ Shima 와 Oyane,⁽⁴⁾ Doraivelue 등⁽⁵⁾은 소결한 금속분말 성형체의 압축실험을 통해 거시적 구성모델을 제안하였다. 한편 Brown 과 Weber⁽⁶⁾는 소결한 분말성형체와 소결하지 않은 분말성형체의 치밀화거동이 다름을 밝혔으며 은 밀도일수록 두 성형체 간에 큰 응집력(cohesion) 차이가 발생하므로 이들 모델의 냉간압축실험 적용은 한계를 지닌다. 둘째, 균일한 크기의 동종 분말에 대해 한 분말에 접촉하는 분말수의 증가에 따른 치밀화거동을 제안한 Arz⁽⁷⁾의 모델을 바탕

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail : korean@postech.ac.kr
TEL : (054)279-2164 FAX : (054) 279-5569

으로 Fleck 등⁽⁸⁾은 분말의 상호접촉시 분말의 미시적 소성변형을 고려하여 거시적 구성모델을 이론적으로 제안하였다. 이 구성모델은 냉간금형압축시 강성분말에 비해 연성분말의 치밀화거동을 잘 예측하지 못한 한계를 지녔다.^(9,10) 토양역학의 구성모델을 금속 분말에 적용한 연구도 발표되었는데 Crawford 등,⁽¹¹⁾ Watson 등,⁽¹²⁾ Chtourou 등⁽¹³⁾은 캡(Cap) 모델을 각각 텅스텐카바이드분말, 알루미늄분말, 철분말에 적용했으며 Sun 등⁽¹⁴⁾은 Cam-clay 모델을 구리분말과 철분말에 적용했으나, 각 모델의 검증에 적용된 실험치가 국부적인 하중범위나 밀도범위로 한정되어 각 모델의 검증에 한계가 있었다.

충분한 삼축압축실험치로 구한 캡 모델은 매우 낮은 밀도부터 소결하지 않은 분말성형체의 치밀화거동을 예측할 수 있으며, 응집력이 높은 연성분말에도 적용할 수 있는 장점을 지닌다.^(13,15)

따라서 본 논문에서는 캡 모델을 적용하여 분말의 치밀화거동을 다음과 같이 조사하였다.

다양한 하중 조건에서 AI 합금분말의 치밀화 거동에 관한 삼축압축실험을 수행하여 그 실험 결과로부터 구성모델을 제안하였다. 제안된 소성항복곡선과 문헌에 발표된 여러모델들 즉, Shima-Oyane, Fleck-Gurson, Cam-clay, Drucker-Prager/Cap 모델 등의 소성항복곡선을 삼축압축실험치와 비교하였다.

또한 AI 합금분말의 냉간정수압압축과 냉간금형압축의 실험치를 제안된 소성항복식 및 문헌상의 여러 모델들의 해석치와 비교하였다.

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 편차응력 (deviatoric 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} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

2.2 구성 방정식의 수치 적분

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁶⁾의 사용자 정의 서브루틴 UMAT 을 사용하여 냉간정수압축과 냉간금형압축 하에서 금속 분말의 치밀화 거동을 해석하였다. 유한요소법을 이용한 구성 방정식의 수치 적분은 Aravas⁽¹⁷⁾에 의하여 제안된 후방 오일러법(backward Euler method)에 의하여 수행되었다. 후방오일러법은 다른 여러가지 수치적분 기법에 비하여 안정적인 알고리즘을 갖고 있으며 대변형의 소성 유한요소해석에 적합하다고 알려져 있다.⁽¹⁷⁾

임플리시트(implicit) 시간적분법을 사용하는 유한요소해석 프로그램에서는 평형방정식이 비선형이 되므로 방정식을 풀기 위하여 Newton-Raphson

Table 1 Physical property and chemical composition of Al6061 powder

Average size [μm]	55
Chemical composition[wt%]	
Cr	0.07
Cu	0.25
Fe	0.25
Mg	0.89
Mn	0.03
Si	0.65
Ti	0.02
V	0.01

Table 2 Mechanical Properties of Al6061 powder

Theoretical density [g/cm^3]	2.70
Young's Modulus [GPa]	69.7
Poisson's ratio	0.33

반복법이 사용되며, 이를 위하여 다음과 같은 선형 모듈(linearization moduli) J 가 필요하다.⁽¹⁸⁾

$$J = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \right)_{t+\Delta t} \quad (10)$$

따라서 구성 방정식을 사용자 서브루틴 UMAT에 적용할 때 선형 모듈 J 의 값을 계산하여야 하며, 본 논문에서는 Govindarajan⁽¹⁹⁾에 의하여 유도된 선형 모듈 값을 사용하였다.

3. 실험

본 논문에서는 가스분사법으로 제조된 Al6061 분말(aluminum alloy powder, Valimet inc., U.S.A.)을 사용하여 실험을 수행하였다. 이 분말의 물리적 성질과 화학적 조성은 Table 1에 나타내었고 기계적 물성치는 Table 2에 나타내었다.

3.1 모재 시편제조와 상온 일축압축 실험

Shima와 Oyane, Fleck-Gurson의 소성항복식을 사용한 유한요소해석결과를 구하기 위해서는 모재의 항복강도 및 유동응력 등의 기계적 특성이 필요하다. Al 합금 모재는 열간 등가압소결에 의해 제조되었으며 제조공정은 다음과 같다. Al 합금분말을 내경 23mm, 두께 1mm인 구리 캔에 넣은 후 450°C에서 5시간 탈가스(degassing) 작업 후 진공 밀봉하였다. 진공밀봉된 캔을 열간 정수압 성형

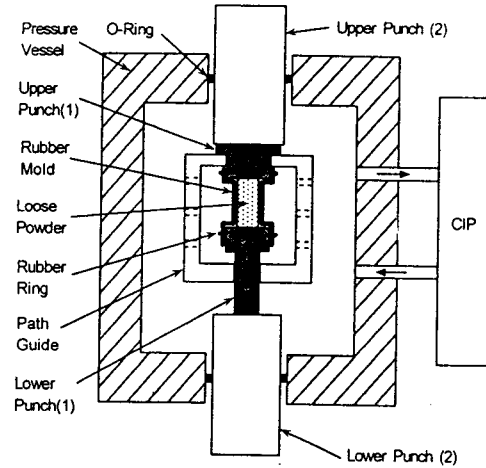


Fig. 1 A schematic drawing of the triaxial compression test apparatus

기(Kobelco System 30T, Japan)에서 520°C, 100MPa의 압력으로 2시간 동안 열간 등가압소결하였다. 소결 후 모재 시편은 높이 13mm, 직경 10mm의 원통형으로 가공하였고, 190°C의 온도와 진공분위기에서 1.5시간 동안 어닐링하였다. Archimedes 법으로 측정된 시편의 최종 상대밀도는 0.995 이상이었다.

모재의 상온 일축압축실험은 MTS 재료시험기를 사용하여 100N/sec의 하중속도로 수행하였다. 항복강도와 탄성계수의 측정을 위하여 시편 표면에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였으며, 유동응력을 측정하기 위하여 시편을 일정한 하중까지 압축한 후 하중을 제거하여 압축된 시편의 높이와 직경을 측정한 후 다시 시편을 압축하는 반복실험을 하였으며, 반복실험중 마찰의 영향을 줄이기 위하여 테프론을 계속 교체하였다.

3.2 삼축압축 실험

본 논문에서는 Al 합금분말이 든 실리콘고무몰드에 일정한 구속압력을 주고 축 하중을 가하는 표준삼축압축(standard triaxial compression)실험장치를 사용하였다.

삼축압축 실험에 쓰이는 시편은 다음과 같이 제조하였다. Fig. 1처럼 1mm 두께의 실리콘고무몰드 아래부분을 하부압반으로 밀봉시키고, Al 합금 분말 5.4g을 직경 11.28mm, 높이 20mm의 부피의 고무몰드에 충전시킨후 진공펌프를 이용하여 실리콘고무몰드내의 공기를 빼고 윗부분도 상부압반으로 밀봉시켰다. 삼축압축 실험에서 축 하중시 압반의 불균형한 움직임은 시편의 뒤틀림을 야기하므로 두 압반에 가이드를 놓아 부정확한 축배

열에 의해 시편에 굽힘모멘트와 불필요한 편차응력이 작용하는 것을 방지토록 하였다.

삼축압축 실험은 우선 냉간정수압압축기 (ABB Autoclave Systems inc.)로부터 10~200MPa 범위의 구속압력(P_c , confining pressure)을 가한 후, MTS 재료 시험기로 0~150kN 범위의 축하중을 가하였다. 이때 하중경로는 (p , q)평면에서 $q=3p$ 의 직선형태를 보였다.

삼축압축 실험용기와 압축편치 사이에 누수방지를 위해 사용된 O 링에서는 구속압력에 따라 다른 마찰력이 발생했다. 따라서 정수압시 정수압 압축기에서 측정되는 압력과 MTS 시험기로 측정된 축하중의 차이로 구한 마찰력(1~1.4kN)을 고려하여 실제 시편에 작용하는 축하중을 구하였다. 하중을 가하는 압축편치의 변위속도는 0.02mm/s로 일정하게 실험하였다.

3.3 냉간정수압압축 실험

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

3.4 냉간금형압축 실험

Al 합금분말의 냉간금형압축실험은 일방향압축(single action pressing)으로 하였다. 초경으로 제작된 내부 직경 20mm 의 금형에 13g 의 Al 합금분말을 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.

3.5 분말성형체 내부의 밀도분포측정

본 논문에서는 로크웰경도와 상대밀도와의 상관관계를 구하기 위해 정수압 150~300MPa 를 가하여 Al 합금시편을 성형하였다. 성형된 시편은 소결전과 상대밀도 차이가 나지 않도록 520°C에서 20 분간 소결후 중앙단면을 절단하였다. 절단된 시편은 190°C에서 1.5 시간 어닐링 한 후 1.58mm(1/16inch) 강구압자(hardened steel ball indenter)로 15kg 중의 하중을 30 초간 가하여 각 시편마다 10 개의 경도 값을 측정하였다. 측정된 각 시편의 경도 값들을 평균하여 상대밀도와 로크웰경도의 상관관계를 구하였다.

일방향 냉간금형압축으로 성형된 금속분말 성형체의 상대밀도분포를 유한요소해석결과와 비교

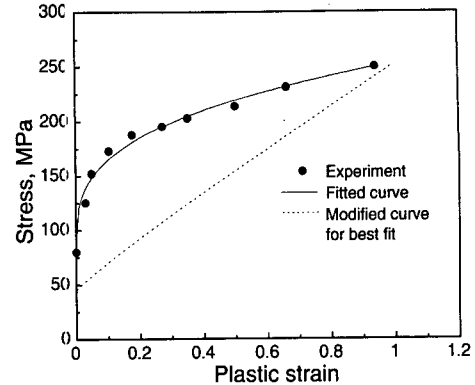


Fig. 2 A schematic drawing of the triaxial compression test apparatus

하기 위하여 분말성형체 단면의 로크웰경도를 측정하고 경도와 상대밀도의 상관관계를 이용하여 시편 내의 상대밀도분포를 구하였다. 경도측정시 전체의 1/2 단면에 대하여 2.5mm 간격으로 28(4x7) 개의 격자를 만든 후 적분점(integral point)을 따라 경도값을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 모재 상온일축압축

모재의 일축압축실험으로 구한 탄성계수는 69GPa 이며, 항복강도는 80MPa 이다. Fig. 2 은 모재의 일축압축시 압축진응력과 소성변형률의 관계를 나타낸다. 여기서 실험치는 Ludwik⁽²⁰⁾의 실험식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = 80 + 172.64(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.3103} \quad (11)$$

Fleck 등의 모델은 연성금속분말의 치밀화 거동을 예측하지 못하므로⁽¹⁴⁾ Al 합금분말의 냉간정수압축실험치를 최적적합(best fit)하는 물성치를 선택하여 Fleck 등의 모델에 적용해 보았다.

이 때 최적적합하는 물성치는 Fig. 2 에 나타내었고 다음과 같다.

$$\sigma_m = 45 + 207.16(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.9117} \quad (12)$$

4.2 삼축압축

분말성형체의 치밀화 거동을 유한요소해석하기 위해서 상대밀도 변화에 따른 탄성계수가 필요하다. 탄성계수의 관계식은 여러 정수압하에서 성형된 시편에 대해 일축압축 실험을 수행하여 다음식으로부터 구하였다.⁽²¹⁾

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

여기서,

$$E_0 = 69\text{GPa}, b = 19.351, c = -11.936$$

식 (10)에서 E_0 는 모재(matrix)의 탄성계수이며, b 와 c 는 상수값, ϕ 는 분말성형체의 기공률($\phi=1-D$)을 나타낸다. 유한요소해석시 푸아송비는 0.33 으로 일정하게 적용하였다.

Fig. 3 은 10~200MPa 의 구속압력에서 축하중을 가했을 때 Al 합금분말성형체의 상대밀도 변화를 나타낸다.

금속 분말의 삼축압축시 일정체적, 일정밀도를 유지하면서 변형은 계속되지만 응력은 더 이상 증가하지 않는 임계상태를 볼 수 있는데⁽²²⁾ 이러한 임계상태는 Fig. 3 의 각 구속압력에서 전단응력의 증가에도 불구하고 밀도가 크게 증가하지 않는 부분에서 확인할 수 있다. 임계상태는 Fig. 4 의 (p, q)평면에서 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$q = Mp \tag{14}$$

Al 합금분말의 삼축압축 실험을 통해 $M = 2$ 의 값을 구하였다.

Fig. 5 는 상대밀도 0.725~0.925 범위에서 Al 합금

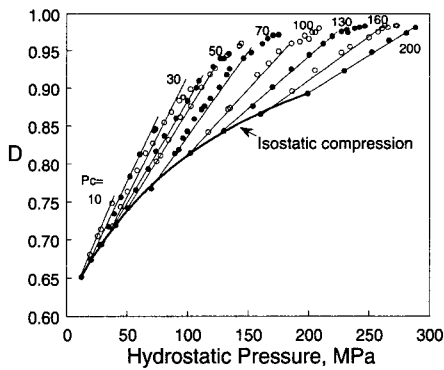


Fig. 3 Variation of relative density of Al alloy powder with hydrostatic stress at various confining pressures (P_c)

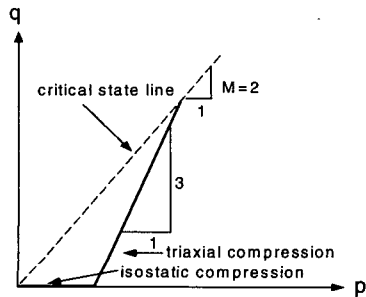


Fig. 4 Stress path in the (p, q) plane during triaxial compression

분말의 등밀도곡선을 나타낸다. 상대밀도실험치 (●, ○)는 Fig. 3 의 여러 구속압력하에서 상대밀도 실험치와 정수응력의 관계를 내삽(interpolation)하고 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 구하였다. Fig. 5 의 등밀도곡선(-)은 실험치를 곡선접합하여 제안한 다음식으로부터 구하였다.

$$q + A(D) \cdot \cosh\{B(D) \cdot p\} = C(D) \tag{15}$$

여기서,

$$A(D) = 67.136 \cdot D^{3.9429}, B(D) = 0.0052114 \cdot D^{-7.3903}$$

$$C(D) = 401.027 \cdot D^{3.8420} \tag{16}$$

상대밀도가 경화변수의 역할을 하므로 식 (15) 의 등밀도 곡선은 Al 합금분말 성형체의 항복함수를 나타낸다.

금속분말의 초기 치밀화 단계에서는 분말간의 미끄러짐에 의해 재배열 경향이 지배적이어서 응집력이 아주 작은 입상분말의 거동을 보인다. 따라서 Fig. 5 에서 곡선접합하여 얻은 등밀도 곡선은 낮은 상대밀도에서는 실험치와 차이를 보여 유한 요소해석을 수행할 경우 이 구간에서 Al 합금분말의 치밀화거동을 정확히 예측할 수 없다. 또한 실험치들이 낮은 응력범위에서 적은 수가 존재하여 식 (15)로 곡선접합시 일정한 계수값을 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 낮은 상대밀도 ($D=0.725$ 이하)에서는 식 (15)의 축약된 형태로서 응집력이 없는 입상분말과 비슷한 거동을 보이는 세라믹 분말에서 얻은 항복식⁽²³⁾을 도입하여 이 구간에서의 삼축압축 실험치를 곡선접합하여 다른 등밀도곡선을 구하였다.

$$q + \cosh\{A(D) \cdot p\} = B(D) \tag{17}$$

여기서 구한 $A(D)$ 와 $B(D)$ 값은 다음과 같다.

$$A(D) = 0.0079144 \cdot D^{-8.3183}$$

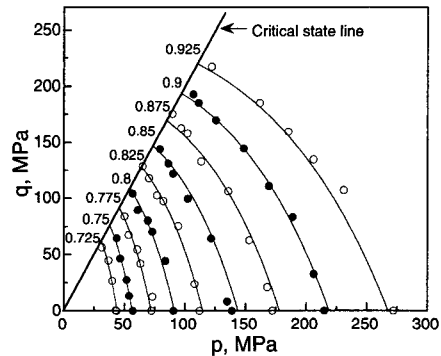


Fig. 5 Experimental iso-density data(●,○) of Al alloy powder and fitted iso-density curve (-)

$$B(D) = 1322.4 \cdot D^{8.8093} \quad (18)$$

Fig. 6은 식 (17)를 사용한 등밀도곡선이 식 (15)를 이용할 때보다 실험치와 잘 일치함을 보여준다. 유한요소해석시 $D=0.725$ 를 경계로 하여 서로 다른 항복함수를 사용하여 계산할 때의 급격한 변화를 피하기 위해 다음과 같은 혼합법칙(mixed rule)을 사용하였다.

$$f = \left(\frac{D_2 - D}{D_2 - D_1}\right)f_1 + \left(\frac{D - D_1}{D_2 - D_1}\right)f_2 = 0 \quad (19)$$

여기서, f_1 은 식 (17)을 사용한 항복함수이며, f_2 는 식 (15)의 항복함수를 나타낸다. D_1 과 D_2 는 각각 혼합법칙이 적용되는 구간이 시작되는 상대밀도와 끝나는 상대밀도를 나타내며 본 논문에서는 $D_1=0.715$ 와 $D_2=0.74$ 를 사용하였다.

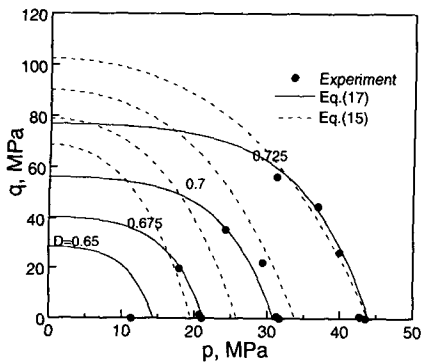


Fig. 6 Fitted iso-density curves (-) and experimental data(●) for low density samples

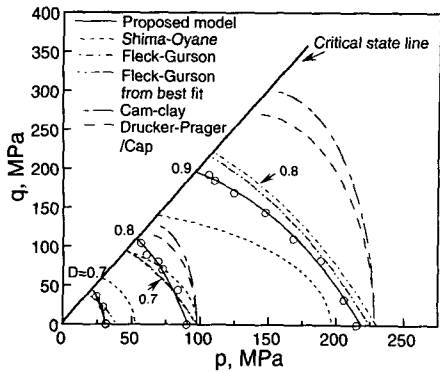


Fig. 7 Comparisons between the proposed yield function and other models in the (p, q) plane

Fig. 7은 (p, q)평면에서 삼축압축 실험치와 제안된 모델 및 여러 구성모델의 비교를 나타낸다. Fleck 등의 모델 적용시 분말성형체가 상대밀도 0.9 이상일때 Gurson 모델⁽²⁴⁾을 도입하였으며 Fleck-Gurson과 Shima-Oyane 모델로 냉간정수압압축 해석시에는 각 밀도에 상응하는 유동응력을 찾아 등밀도곡선을 구하였다. 제안된 모델의 항복곡선은 실험치와 잘 일치하였다. Fleck-Gurson 모델의 항복곡선($D=0.7, 0.8$)은 실험치를 전혀 예측하지 못했으나, 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 모델의 항복곡선은 실험치와 대체로 일치했으며 높은 밀도구간($D=0.9$)에서 문헌상의 다른 모델에 비해 실험치와 잘 일치하였다. 반면 Shima-Oyane의 항복곡선은 일축압축실험으로 결정되므로 다양한 일반하중에서 실험치와 차이를 보였으며 특히 낮은 밀도($D=0.7$)에서 실험치와 상대적 차이가 컸다.

기존 토양역학 모델인 경우 정수압실험과 삼축압축실험으로 구한 체적변형률 및 곡률을 Cam-clay, Drucker-Prager/Cap 모델의 항복곡선에 적용했으나 이들 모델은 밀도 증가에 따른 곡률의 변화를 예측하지 못하여 실험치와 차이를 보였다. 이 같은 차이는 다른 모델이 다양한 일반하중에 대해 금속분말의 치밀화거동을 정확히 예측하지 못함을 보여준다.

4.3 냉간정수압압축

Fig. 5의 등밀도실험치와 항복함수는 정수응력축과 수직으로 교차하지 않음을 볼 수 있다. 따라서 정수응력에서 삼축응력으로 이동시 변형률의 불연속점이 존재하며, 조합유동법칙을 이용할 경우 순수정수압 하중하에서 변형률은 체적변형률 성분뿐만 아니라 편차변형률 성분까지 포함하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Govindarajan과 Aravas⁽²⁵⁾에 의하여 사용된 방법과 같이 항복함수의 정수응력 축부근을 정수응력 축과 수직으로 교차하는 작은 구형의 항복함수로 대체하여 해석하였다.

Fig. 8은 초기 상대밀도 0.51을 갖는 Al 합금분말의 냉간정수압 압축 하에서 압력과 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 식 (15)와 (17)의 항복함수를 사용하여 유한요소해석으로 구한 계산치는 실험치를 잘 예측하였다. 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 모델의 계산치는 서두에서 기술한 바와 같이 실험치를 잘 예측함을 확인할 수 있다. Shima-Oyane 모델의 계산치는 실험치를 비교적 잘 예측하나 소결하지 않은 분말성형체와 소결한 분말성형체의 응집력 차이가 큰 낮은 밀도에서 실험치를 다소 낮게 예측하였다. 반

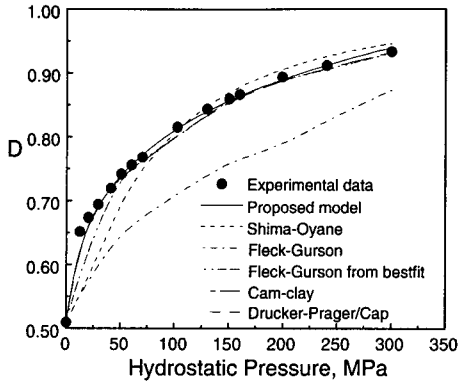


Fig. 8 Comparison between experimental data and calculation results from various models for the variation of relative density with hydrostatic pressure of Al alloy powder during CIP

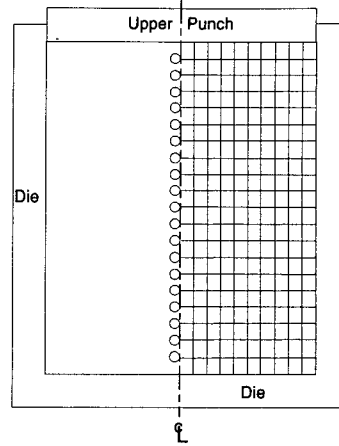


Fig. 9 Finite element meshes and boundary conditions for single action pressing of Al alloy powder

면 실제 모재의 물성치를 이용한 Fleck-Gurson 모델의 계산치는 실험치와 많은 차이를 보였다. Cam-clay, Drucker-Pager/Cap 모델의 경우 분말성형체의 냉간정수압 기 때문에 계산치는 실험치를 잘 예측하였다.

4.4 냉간금형압축

Fig. 9 는 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 분말 사이의 경계조건을 금형압축시 접촉을 유지하도록 경계요소(interface element)를 사용하여 해석하였으며 y 축의 축대칭조건에 의해 시편 단면의 1/2 에 대해서만 해석하였다.

Fig. 10 은 Al 합금분말을 일방향으로 냉간금형압축할 때 가압력에 따른 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 유한요소해석에서의 평균상대밀도는 다음의 관계식으로부터 구하였다.

$$D_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^M D_j V_j}{\sum_{j=1}^M V_j} \quad (20)$$

여기서 D_j , V_j 및 M 은 각각 j 번째 요소의 상대밀도, 체적 및 전체 요소의 개수를 나타낸다. Shima-Oyane 의 모델은 연성분말의 치밀화거동을 비교적 잘 예측함이 보고되었으므로⁽¹⁰⁾ 유한요소

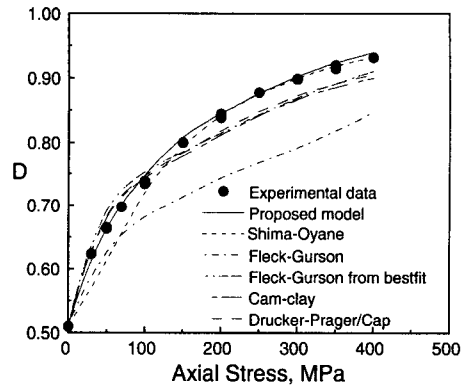


Fig. 10 Comparisons between experimental data and calculation results from various models for the variation of relative density with axial stress of Al alloy powder during cold die compaction

해석시 분말성형체와 초경금형과의 마찰계수는 Shima-Oyane 의 모델의 계산치가 실험치를 잘 예측하는 마찰계수($\mu = 0.24$)를 적용하였다. 식 (15) 와 (17)의 항복식의 계산치는 초기밀도부터의 냉간금형압축 실험치를 아주 잘 예측하였다. Shima-Oyane 의 모델은 일축압축실험으로 유도된 항복함수이므로 해석치는 냉간정수압에 비해 일축압축 실험치를 비교적 잘 예측하였으나 낮은 밀도에서는 실험치를 다소 낮게 예측하였다. 반면 모재 물성치를 이용한 Fleck-Gurson 항복식은 실험치를 전혀 예측하지 못했으며, 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 모델도 높은밀도에서 실험치와 차이를 보였다. Cam-clay 및 Drucker-Prager/Cap 모델의 계산치는 분말 간 응집력이 작은 낮은 밀도에

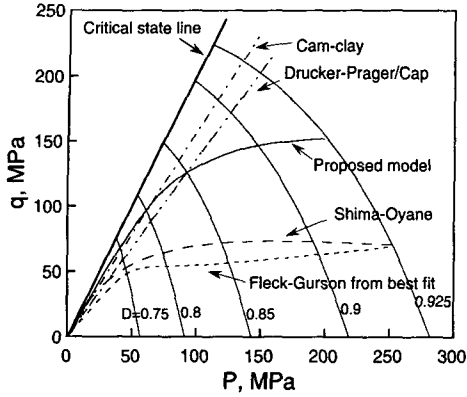


Fig. 11 Stress paths during frictionless single action die pressing of Al alloy powder from various models

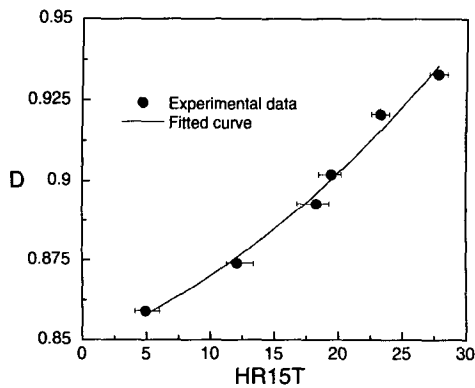


Fig. 12 Variation of relative density with Rockwell hardness for Al alloy powder compacts

록(약 $D=0.75$ 이상) 응집력 증진에 따른 항복곡선 곡률의 변화를 고려하지 못해 실험치를 낮게 예측하였다.

Fig. 11 은 마찰이 없을 때 (p, q) 평면에서 일방향 냉간금형압축에 대한 각 모델의 유한요소해석시 분말성형체 내부의 응력궤선을 나타낸다. 각 모델은 입계상태 이내의 응력 범위에서 분말의 치밀화 거동을 예측하여 해석결과가 타당함을 알 수 있다. 제안된 모델, Shima-Oyane, 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 모델의 응력궤선을 살펴보면 낮은 밀도에서 상대밀도가 증가할수록 정수응력과 편차응력의 비율은 선형적으로 증가하나, 상대밀도가 어느 한계점을 지나면 정수응력과 편차응력의 비율은 달라짐을 보였다. 여기서 Shima-Oyane 의 응력궤선은 Fig. 7 에서 등밀도 실험치를 비교적 잘 예측하는 항복곡선 지점(50~70MPa)을 지나므로 해석치가 냉간금형압축 실험치를 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다. 한편 Cam-clay 와 Drucker-Prager/Cap 모델의 응력궤선의 경우 정수응력과 편차응력의 비율이 선형적으로 계속 증가하여 상대밀도에 따라 응력궤적이 영향을 받지 않음을 보여준다.

Fig. 12 는 Al 합금분말의 로크웰경도 값과 상대 밀도의 관계를 나타내며 식은 다음과 같다.

$$D = 0.8492 + 1.5 \times 10^{-3} \cdot HR15T + 5.78 \times 10^{-5} \cdot HR15T^2 \quad (21)$$

Fig. 13 은 300MPa 의 가압력으로 일방향 냉간금형압축한 후 Al 합금분말을 하부에서 상부방향으로 이젝트하였을 때 분말 성형체 내부의 상대밀도 분포를 나타내는 실험치와 유한요소해석결과를 나타낸다. Fig. 13 (a)에서 금형과 분말 성형체 사이의 마찰의 영향으로 상대밀도는 성형체의 상부모서리부근에서 가장 높고, 하부 모서리부근에서 가장 낮음을 알 수 있다. 제안된 모델, Shima-Oyane 모델의 계산치는 낮은 밀도구배 구간에서는 실험

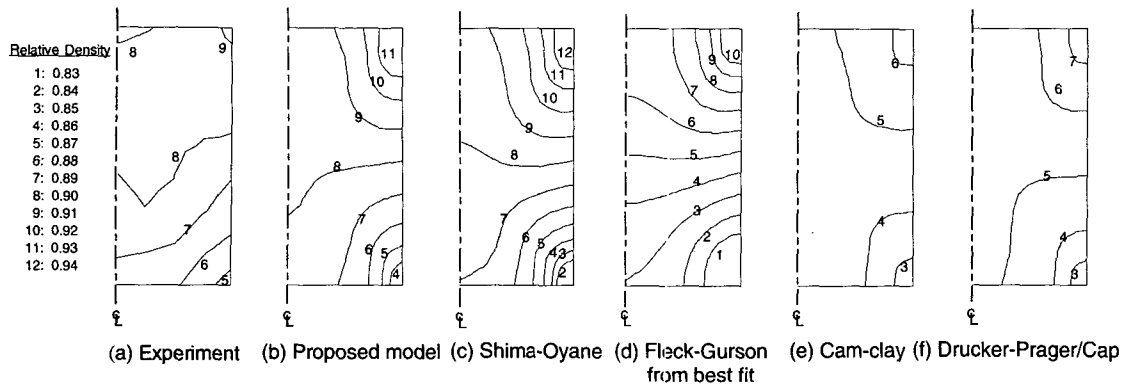


Fig. 13 Comparison between experimental data and finite element results for relative density contour plot of a Al alloy powder compact by single action pressing under axial stress of 300MPa

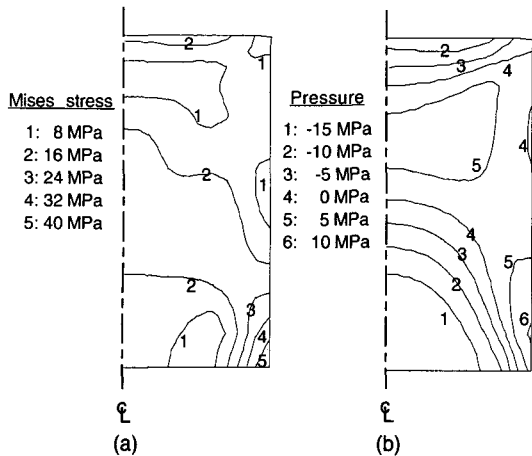


Fig. 14 Finite element calculation for distributions of (a) residual Mises stress and (b) residual hydrostatic stress of a Al alloy powder compact ejected from the die after pressed under 300MPa by single action pressing

치를 비교적 잘 예측하나 전체적으로는 실험치를 정확히 예측하지는 못하여 우측상부모서리의 상대 밀도 계산치는 실험치보다 높았다. 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 의 구성모델, Cam-clay, Drucker-Prager/Cap 모델의 계산치는 Fig. 10 의 해석결과에서 알 수 있듯이 전체적으로 상대밀도값을 낮게 예측하였다.

Fig. 14 는 Al 합금분말을 300MPa 의 가압력으로 일방향 냉간금형압축 후, 분말 성형체를 하부에서 상부방향으로 이젝트한 후 성형체 내부에 존재하는 잔류 Mises 응력과 잔류 정수응력 분포를 나타내는 유한요소해석 결과이다. 잔류 Mises 응력은 우측 하부모서리에서 가장 큰 값을 보였으며 잔류 정수응력은 우측 하부모서리와 중심 상단부에서 5~10MPa 의 가장 큰 값을 보였으며 가압력에 비해 작은 값을 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 Al 합금분말의 삼축압축 실험을 수행하여 금속분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 항복식을 제안하고 제안된 항복곡선과 다른 모델의 항복곡선을 삼축압축실험치와 비교하였으며 각 모델을 유한요소해석에 적용하여 냉간정수압압축 공정과 냉간금형압축 공정을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 삼축압축실험을 수행하여 얻은 등밀도 실험치를 제안한 모델식으로 곡선접합하여 캡형태의 항복함수를 구할 수 있었다. 제안된 항복함수는 (p, q)평면에서 등밀도 실험치를 잘 예측하였으나,

다른 모델은 실험치를 잘 예측하지 못하여 다양한 일반하중에서 금속분말 치밀화거동의 예측에 한계를 지님을 알 수 있었다.

(2) 제안된 항복함수를 사용한 유한요소해석치는 금속 분말의 냉간정수압 압축시 정수압에 따른 상대밀도의 실험치를 아주 잘 예측하였으며, Shima-Oyane 모델의 해석치는 실험치와 다소 차이를 보였다. 기존의 토양역학 모델은 정수압실험치로 체적변형률을 보정했기 때문에 실험치를 아주 잘 예측하였다.

(3) 제안된 항복함수를 사용한 유한요소해석치는 금속분말의 냉간금형압축시 가압력에 따른 상대밀도의 실험치를 잘 예측하였다. Shima-Oyane 모델의 해석치도 실험치를 비교적 잘 예측하였으나 낮은 밀도구간에서는 다소 차이를 보였다. 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 모델의 해석치는 실험치와 차이를 보였으며 기존의 토양역학 모델의 해석치도 밀도변화에 따른 항복곡선 곡률의 변화를 고려하지 못하여 실험치를 낮게 예측하였다. 분말성형체의 밀도구배에 대해서도 제안된 모델, Shima-Oyane 모델의 해석치는 다른 모델에 비해 실험치를 비교적 잘 예측하였다.

참고문헌

- (1) Lewis, R. W., Jinka, A. G. K and Gethin, D. T., 1993, "Computer-Aided Simulation of Metal Powder Die Compaction Processes," *Powder Metall. Int.*, Vol. 25, No. 6, pp. 287~293.
- (2) Gethin, D. T., Tran, V. D., Lewis, R. W. and Ariffin, A. K., 1994, "An Investigation of Powder Compaction Processes," *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 30, No. 4, pp. 385~398.
- (3) Kuhn, H. A. and Downey, C. L., 1971, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials," *Int. J. Powder Metall.*, Vol 7, No 1, pp. 15~25.
- (4) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (5) 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," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 26, pp. 527~534.
- (6) Brown, S. B. and Weber, G. A., 1988, "A Constitutive Model for the Compaction of Metal Powders," *Mod. Dev. Powder Metall.*, Vol. 18, No. 21, pp. 465~476.
- (7) Arzt, E., 1982, "The Influence of an Increasing Particle Coordination on the Densification of Spherical Powders," *Acta Metall.*, Vol. 30, pp. 1883~1890.
- (8) Fleck, N. A., Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M., 1992, "Yielding of Metal Powder Bonded by Isolated

- Contacts," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40, No. 5, pp. 1139~1162.
- (9) Kim, K. T. and Kim, J. S., 1998, "Stage 1 Compaction Behavior of Tool Steel Powder Under Die Pressing," *Powder Metallurgy*, Vol. 41, pp. 199~203.
- (10) Kwon, Y. S., Lee, H. T. and Kim, K. T., 1997, "Analysis for Cold Die Compaction of Stainless-Steel Powder," *J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 119, pp. 366~373.
- (11) Crawford, J. and Lindskog, P., 1983, "Constitutive Equation and Their Role in the Modeling of the Cold Pressing Process," *Scand. J. Metall.*, Vol. 12, pp. 271~281.
- (12) Watson, T. J. and Wert, J. A., 1993 "On the Development and Application of Constitutive Relations for Metallic Powders," *Metallurgical Trans.*, Vol. 24A, pp. 2071~2081.
- (13) Chtourou, H., Guillot, M., Gakwaya, A. and Guillot, M., 1999, "Modeling of the Metal Powder Compaction Process Using the Cap Model. Part I: Experimental Material Characterization and Validation," *Int. j. solids struct.*, Submitted for Publication.
- (14) Sun, X. K., Chen, S. J., Xu, J. Z., Zhen, L. D. and Kim, K. T., 1999, "Analysis of Cold Compaction Densification Behaviour of Metal Powders," *Mater. sci. eng.*, Vol. 267, pp. 43~49.
- (15) Trasorras, J., Krauss, T. M. and Fergusson, B. L. 1989, "Modeling The Powder Compaction Using The Finite Element Method," *Proceedings of the 1989 International Conference on Powder Metallurgy*, San Diego, CA, pp. 85~104.
- (16) *ABAQUS User's I and II Manual*, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, 1998.
- (17) Aravas, N., 1987, "On The Numerical Integration of A Class of Pressure-dependent Plasticity Models," *Int. J. Num. Meth. Engrg.*, Vol. 24, pp. 1395~1416.
- (18) 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," *Int. J. Plasticity*, Vol. 5, pp. 521~549.
- (19) Govindarajan, R. M., 1992, *Deformation Processing of Porous Metals*, Doctoral thesis, University of Pennsylvania, U. S. A.
- (20) Ludwik, P. 1909, *Element der Technologischen Mechanik*, Springer, Berlin.
- (21) Wang, J. C., 1984, "Young's Modulus of Porous Materials," *J. Mater. Sci.*, Vol. 19, pp. 801~814.
- (22) Schofield, A. and Wroth, P., 1968, *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London.
- (23) Kim, K. T., Choi, S. W. and Park, H., 2000, "Densification Behavior of Ceramic Powder Under Cold Compaction," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 122, pp. 238~244.
- (24) Gurson, A. L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth-Part 1. Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 99, pp. 2~15.
- (25) Govindarajan, R. M. and Aravas, N., 1994, "Deformation Pressing of Metal Powders: Part I - Cold Isostatic Pressing," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 36, No. 4, pp. 343~357.