

냉간 압축 하에서 금속 분말의 치밀화 거동

이 성 철 * · 김 기 태 **

Densification Behavior of Metal Powder under Cold Compaction

SungChul Lee and KiTae 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

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 연구되었는데 Kuhn 과 Downey,⁽¹⁾ Shima 와 Oyane,⁽²⁾ Doraivelue 등⁽³⁾은 소결한 금속분말 성형체의 압축 실험을 통해 거시적 구성모델을 제안하였다. 한편 Brown 과 Weber⁽⁴⁾는 소결한 분말성형체와 소결하지 않은 분말성형체의 치밀화거동이 다름을 밝혔으며 낮은 밀도일수록 두 성형체 간에 큰 응집력(cohesion) 차이가 발생하므로 이들 모델의 냉간 압축실험 적용은 한계를 지닌다. 둘째, 균일한 크기의 동종 분말에 대해 한 분말에 접촉하는 분말

수의 증가에 따른 치밀화거동을 제안한 Arzt⁽⁵⁾의 모델을 바탕으로 Fleck 등⁽⁶⁾은 분말의 상호접촉시 분말의 미시적 소성변형을 고려하여 거시적 구성모델을 이론적으로 제안하였다. 이 구성모델은 냉간금형압축시 강성분말에 비해 연성분말의 치밀화거동을 잘 예측하지 못한 한계를 지녔다.⁽⁷⁾ 토양역학의 구성모델을 금속 분말에 적용한 연구도 발표되었는데 Crawford 등,⁽⁸⁾ Watson 등,⁽⁹⁾ Chtourou 등⁽¹⁰⁾은 캡(Cap) 모델을 각각 텅스텐카바이드분말, 알루미늄분말, 철분말에 적용했으며 Sun 등⁽¹¹⁾은 Cam-clay 모델을 구리분말과 철분말에 적용했으나, 각 모델들을 금속 분말에 적용시키기에 삼축압축 실험치는 충분치 못했다.

충분한 삼축압축실험치로 구한 캡 모델은 매우 낮은 밀도부터 소결하지 않은 분말성형체의 치밀화거동을 예측할 수 있으며, 응집력이 높은 연성 분말에도 적용할 수 있는 장점을 지닌다.^(10,12)

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

다양한 하중 조건에서 AI 합금분말의 치밀화 거

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

** 정희원, 포항공과대학교 기계공학과

동에 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 Al 합금분말의 냉간압축 실험치를 제안된 소성항복식 및 문헌상의 여러 모델들의 해석치와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 구성방정식

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

$$f(\sigma_{ij}, D) = 0 \quad (1)$$

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.

$$f(p, q, D) = 0 \quad (2)$$

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

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

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}} = -(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (4)$$

여기서, 응력의 편차성분 σ'_{ij} 는 다음과 같다

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij} \quad (5)$$

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.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{(in)} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (6)$$

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

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

$$\dot{D} = -D\dot{\epsilon}_{kk}^{(in)} \quad (7)$$

2.2 구성 방정식의 수치 적분

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹³⁾의 사용자 서브루틴 UMAT 을 구성방정식에 적용하여 냉간 압축공정을 해석하였다. 유한요소법에 적용하는 구성방정식의 수치적분은 다른 논문⁽⁷⁾에서 찾을 수 있으므로 본 논문에서는 언급하지 않았다.

3. 실험

본 논문에서는 가스분사법으로 제조된 Al6061 분말(aluminum alloy powder, Valimet inc., U.S.A.)을 사용하여 실험을 수행하였다.

3.1 모재 시편제조와 상온 일축압축 실험

Shima 와 Oyane, Fleck-Gurson 의 소성항복식을 사용한 유한요소해석결과를 구하기 위해서는 모재의 항복강도 및 유동응력 등의 기계적 특성이 필요하다. Al 합금 모재는 열간 등가압소결에 의해 높이 13 mm, 직경 10 mm 의 원통형으로 제조되었다. 모재의 상온 일축압축실험은 MTS 재료시험기를 사용하여 100 N/sec 의 하중속도로 수행하였다.

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. 1 처럼 1 mm 두께의 실리콘고무몰드 아래부분을 하부압반으로 밀봉시키고, Al 합

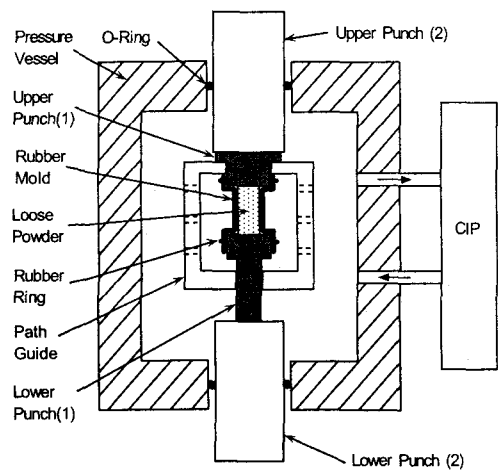


Fig. 1 A schematic drawing of the triaxial compression test apparatus.

금 분말 5.4 g 을 직경 11.28 mm, 높이 20 mm 의 고무몰드에 충전시킨후 진공펌프를 이용하여 실리 콘고무몰드내의 공기를 빼고 윗부분도 상부압만으로 밀봉시켰다.

삼축압축 실험은 우선 냉간정수압압축기 (ABB Autoclave Systems inc.)로부터 구속압력(P_c , confining pressure)을 가한 후, MTS 재료 시험기로 축하중을 가하였다.

3.3 냉간금형압축 실험

Al 합금분말의 냉간금형압축실험은 일방향압축 (single action pressing)으로 하였다. 압축된 성형체는 상부 방향으로 이젝트하였으며, 시편의 질량 및 직경과 높이를 측정하여 상대밀도를 구하였다.

3.4 밀도분포측정

본 논문에서는 로크웰경도와 상대밀도와의 상관관계를 구하기 위해 정수압을 가하여 Al 합금시편을 성형하였다. 시편의 경도 값들을 평균하여 상대밀도와 로크웰경도의 상관관계를 구하였다.

일방향 냉간금형압축으로 성형된 금속분말성형체 단면의 로크웰경도를 측정하고 경도와 상대밀도의 상관관계를 이용하여 시편 내의 상대밀도분포를 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 모재 상온일축압축

일축압축실험으로 구한 모재의 탄성계수는 69 GPa 이며, 항복강도는 80 MPa 이다. 여기서 실험치는 Ludwik⁽¹⁴⁾의 실험식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = 80 + 172.64(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.3103} \quad (8)$$

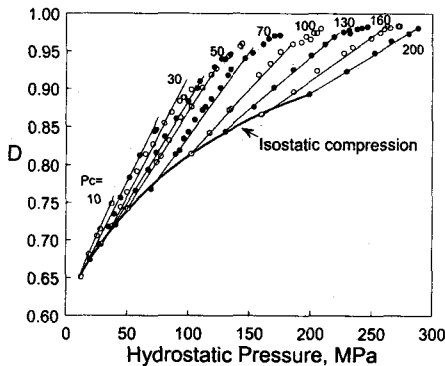


Fig. 2 Variation of relative density of Al alloy powder with hydrostatic stress at various confining pressures (P_c).

Fleck 등의 모델은 연성금속분말의 치밀화 거동을 예측하지 못하므로⁽⁷⁾ Al 합금분말의 냉간정수압축실험치를 최적접합(bestfit)하는 물성치를 선택하여 Fleck 등의 모델에 적용해 보았다. 최적접합하는 물성치는 다음과 같다.

$$\sigma_m = 45 + 207.16(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.9117} \quad (9)$$

4.2 삼축압축

Fig. 3 은 상대밀도 0.725~0.925 범위에서 Al 합금분말의 등밀도곡선을 나타낸다. 상대밀도실험치 (●, ○)는 Fig. 2 의 여러 구속압력하에서 상대밀도 실험치와 정수응력의 관계를 내삽(interpolation)하여 구하였다. Fig. 3 의 등밀도곡선(-)은 실험치를 곡선접합하여 제안한 다음식으로부터 구하였다.

$$q + A(D) \cdot \cosh\{B(D) \cdot p\} = C(D) \quad (10)$$

여기서,

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

$$C(D) = 401.027 \cdot D^{3.8420} \quad (11)$$

상대밀도가 경화변수의 역할을 하므로 식 (10)의 등밀도 곡선은 Al 합금분말 성형체의 항복합수를 나타낸다.

금속분말의 초기 치밀화 단계에서는 분말간의 미끄러짐에 의한 재배열 경향이 지배적이어서 응집력이 아주 작은 입상분말의 거동을 보인다. 따라서 Fig. 3 에서 곡선접합하여 얻은 등밀도 곡선은 낮은 상대밀도에서 실험치와 차이를 보여 유한요소해석을 수행할 경우 이 구간에서 Al 합금분말의 치밀화거동을 정확히 예측할 수 없다. 또한 실험치들이 낮은 응력범위에서 적은 수가 존재하여 식 (10)로 곡선접합시 일정한 계수값을 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 낮은 상대밀도($D=0.725$ 이

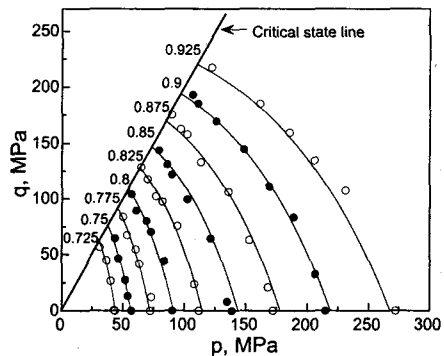


Fig. 3 Experimental iso-density data(●,○) of Al alloy powder and fitted iso-density curve(-).

하)에서는 식 (10)의 축약된 형태로서 응집력이 없는 입상분말과 비슷한 거동을 보이는 세라믹 분말에서 얻은 항복식⁽¹⁵⁾을 도입하여 이 구간에서의 삼축압축 실험치를 곡선접합하여 다른 등밀도곡선을 구하였다.

$$q + \cosh\{A(D) \cdot p\} = B(D) \quad (12)$$

여기서 구한 $A(D)$ 와 $B(D)$ 값은 다음과 같다.

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

$$B(D) = 1322.4 \cdot D^{8.8093} \quad (13)$$

유한요소해석시 $D=0.725$ 를 경계로 하여 서로 다른 항복함수를 사용하여 계산할 때의 급격한 변화를 피하기 위해 혼합법칙(mixed rule)을 사용하였다.

Fig. 4 는 (p, q) 평면에서 삼축압축 실험치와 제안된 모델 및 여러 구성모델의 비교를 나타낸다. Fleck 등의 모델 적용시 분말성형체가 상대밀도 0.9 이상일때 Gurson⁽¹⁶⁾이 제안한 항복식을 도입하였다. 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 일치했다. 반면 Shima-Oyane 의 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 변화

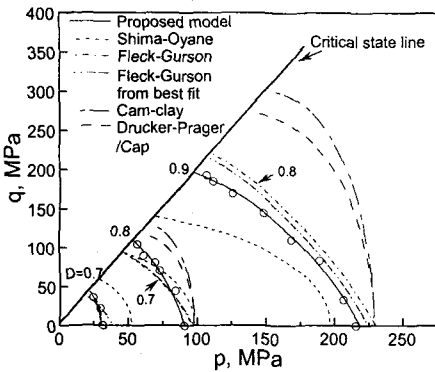


Fig. 4 Comparisons between the proposed yield function and other models in the (p, q) plane.

를 예측하지 못하여 실험치와 차이를 보였다. 이 같은 차이는 다른 모델이 다양한 일반하중에 대해 금속분말의 치밀화거동을 정확히 예측하지 못함을 보여준다.

4.3 냉간정수압압축

Fig. 5 는 초기 상대밀도 0.51 을 갖는 Al 합금분말의 냉간정수압 압축 하에서 압력과 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. 제안된 항복함수를 사용하여 유한요소해석으로 구한 계산치는 실험치를 잘 예측하였다. 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 모델의 계산치는 4.1 절에서 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. 반면 실제 모재의 물성치를 이용한 Fleck-Gurson 모델의 계산치는 실험치와 많은 차이를 보였다. Cam-clay, Drucker-Prager/Cap 모델의 경우 분말성형체의 냉간정수압 실험치로 체적변형률을 보정한 후 유한요소해석에 적용했기 때문에 계산치는 실험치를 잘 예측하였다.

4.4 냉간금형압축

일방향압축에 사용된 200 개의 4 절점 축대칭요소 (CAX4R element)를 y 축의 축대칭조건에 의해 시편 단면의 1/2 에 대해서만 해석하였다.

Fig. 6 은 Al 합금분말을 일방향으로 냉간금형압축할 때 가압력에 따른 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 계산치의 비교를 나타낸다. Shima-

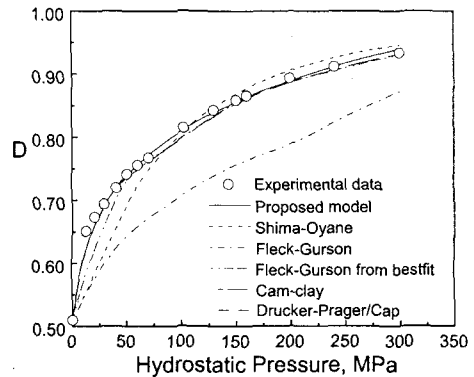


Fig. 5 Comparison between experimental data and calculation results from various models for the variation of relative density with hydrostatic pressure of Al alloy powder during CIP.

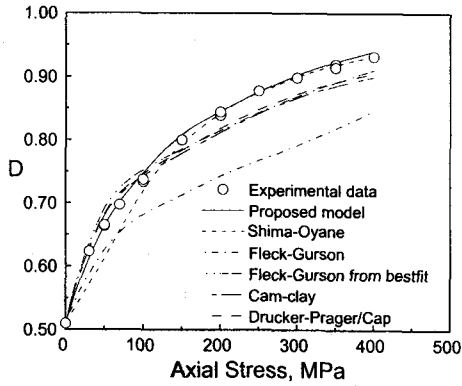


Fig. 6 Comparisons between experimental data and calculation results from various models for the variation of relative density with axial stress of Al alloy powder during cold die compaction.

Oyane의 모델은 연성분말의 치밀화거동을 비교적 잘 예측함이 보고되었으므로⁽⁷⁾ 유한요소해석시 분말성형체와 초경금형과의 마찰계수는 Shima-Oyane의 모델의 계산치가 실험치를 잘 예측하는 마찰계수($\mu=0.24$)를 적용하였다. 제안된 항복식의 계산치는 초기밀도부터의 냉간금형압축 실험치를 아주 잘 예측하였다. Shima-Oyane의 모델은 일축압축 실험으로 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 높은 밀도에서 실험치와 차이를 보였다. Cam-clay 및 Drucker-Prager/Cap 모델의 계산치는 분말 간 응집력이 작은 낮은 밀도에서는 실험치를 잘 예측하나 상대밀도가 높아 질수록(약 $D=0.75$ 이상) 응집력 증진에 따른 항복곡선 곡률의 변화를 고려하지 못

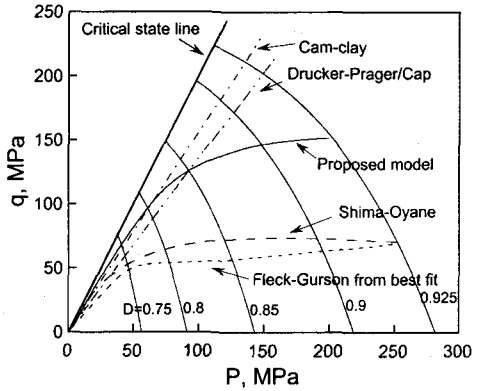


Fig. 7 Stress paths during frictionless single action die pressing of Al alloy powder from various models.

해 실험치를 낮게 예측하였다.

Fig. 7은 마찰이 없을 때 (p, q) 평면에서 일방향 냉간금형압축에 대한 각 모델의 유한요소해석시 분말성형체 내부의 응력궤적을 나타낸다. 각 모델은 임계상태 이내의 응력 범위에서 분말의 치밀화 거동을 예측하여 해석결과가 타당함을 알 수 있다. 제안된 모델, Shima-Oyane, 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 모델의 응력궤적을 살펴보면 정수 응력과 편차응력의 비율이 어느 임계 지점 이후 비선형으로 변하는 반면, Cam-clay와 Drucker-Prager/Cap 모델의 응력궤적의 경우 정수응력과 편차응력의 비율이 선형적으로 계속 증가하여 상대 밀도에 따라 응력궤적이 영향을 받지 않음을 보여 준다. 여기서 Shima-Oyane의 응력궤적은 Fig. 4에서 등밀도 실험치를 비교적 잘 예측하는 항복곡선 지점($q=50\sim70$ MPa)을 지나므로 해석치가 냉간금형압축 실험치를 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Al 합금 분말 성형체의 로크웰경도 값과 상대밀

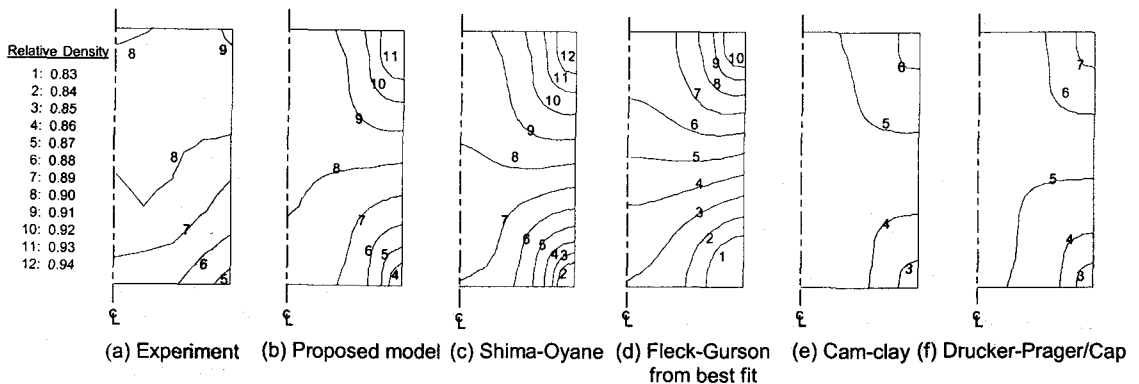


Fig. 8 Comparison between experimental data and finite element results for relative density contour plot of an Al alloy powder compact by single action pressing under axial stress of 300 MPa.

도의 관계식은 다음과 같다.

$$D = 0.8492 + 1.5 \times 10^{-3} \cdot HR15T + 5.78 \times 10^{-5} \cdot HR15T^2 \quad (14)$$

Fig. 8 은 300 MPa 의 가압력으로 일방향 냉간금형압축한 후 Al 합금분말성형체를 하부에서 상부 방향으로 이젝트하였을 때 분말 성형체 내부의 상대밀도분포를 나타내는 실험치와 유한요소해석결과를 나타낸다. 제안된 모델, Shima-Oyane 모델의 계산치는 다른 모델에 비해 실험치를 비교적 잘 예측하였다. 최적접합으로 구한 Fleck-Gurson 의 구성모델, Cam-clay, Drucker-Prager/Cap 모델의 계산치는 전체적으로 상대밀도값을 낮게 예측하였다.

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 냉간압축공정을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

삼축압축실험을 수행하여 얻은 등밀도 실험치를 제안한 모델식으로 곡선접합하여 캡형태의 항복함수를 구할 수 있었다. 제안된 항복함수의 해석치는 냉간압축시 Al 합금분말의 치밀화거동을 잘 예측함을 확인할 수 있었다. Shima-Oyane 모델의 해석치는 낮은 밀도에서 냉간압축 실험치를 낮게 예측하였고, 기존 토양역학 모델의 해석치는 높은 밀도에서 냉간금형압축 실험치를 낮게 예측하였다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285-291.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Arzt, E., 1982, "The Influence of an Increasing Particle Coordination on the Densification of Spherical Powders," *Acta Metall.*, Vol. 30, pp. 1883~1890.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) *ABAQUS User's I and II Manual*, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, 1998.
- (14) Ludwik, P. 1909, *Element der Technologischen Mechanik*, Springer, Berlin.
- (15) 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.
- (16) 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.