

자유분말금속 압축시 소성변형예측을 위한 구성방정식의 유도

김진영* · 박종진**

(1997년 7월 29일 접수)

Derivation of Constitutive Equations of Loose Metal Powder to Predict Plastic Deformation in Compaction

Jin-Young Kim and Jong-Jin Park

Abstract

In the present investigation, it is attempted to derive a yield function and associated flow rules of loose metal powders to predict plastic deformation and density change during compaction. The loose metal powders yield by shear stress as well as hydrostatic stress and the yield strength is much smaller in tension than compression. Therefore, a yield function for the powders is expressed as a shifted ellipse toward the negative direction in the hydrostatic stress axis in the space defined by the two stresses. Each of parameters A, B and δ used in the yield function is expressed as a function of relative density and it is determined by uniaxial strain and hydrostatic compressions using Cu powder. Flow rules obtained by imposing the normality rule to the yield function are applied to the analyses of unidirectional, bidirectional and hydrostatic compressions, resulting in an excellent agreement with experiments. The yield function is further examined by checking volume changes in plane stain, uniaxial strain and shear deformations.

1. 서론

분말야금(powder metallurgy)이란 원하는 조성으로 혼합된 분말을 임의의 형상을 갖춘 금형에 넣고, 이를 상온에서 압축하여 압축체를 만든 뒤, 이를 금형으로부터 추출하고, 소결과정을 거쳐 입자 사이의 결합력을 증가시키고 기공을 감소시킴으로써 제품을 완성하는 기술이다.^(1,2) 강도가 높은 제품을 만들 경우에는 소결과정을 거친 후 재차 금형에 삽입하여 단조와 같은 재성형을 통하여 기공을 입착제거한다. 그러나 일반적으로 분말제품은 내부에 존재하는 잔류기공으로 인해 소결시 뒤틀림이

유발되어 치수정도가 저하되고, 균일하고 높은 밀도를 갖지 못하면 기계적 강도가 저하하게 된다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해서는 압축, 소결, 재성형의 각 공정에서 발생하는 밀도변화, 즉 분말체의 소성변형거동을 예측하는 기술이 필요하다.⁽³⁾

자유분말금속(loose powder metal)의 소성변형을 이해하기 위해서 많은 연구가 수행되었다. 이러한 연구의 목적은 항복조건과 구성방정식을 유도하고, 유한요소법에 적용하여 압축시 발생하는 밀도분포를 해석하고자 하는 것이다. 소결시 밀도가 낮은 부분은 높은 부분에 비해 수축이 많이 발생하기 때문에 해석을 통하여 결합을 예측할 수 있게 된다. 이러한 결합이 예측되면 압축방법을 수정하고, 이를 유한요소법으로 다시 검증할 수 있게 된다.

*현대우주항공(주)

**회원, 홍익대학교 기계공학과

본 연구에서는 구리분말에 대한 정수압 압축과 일축변형률 압축실험을 수행하고 이를 이용하여 항복조건을 유도하고 응력과 소성변형률 증분의 관계를 나타내는 구성방정식을 유도하였다. 이 구성방정식의 타당성을 검토하기 위하여 몇 가지 응력상태에 적용하고 실험결과와 비교하여 보았다.

2. 항복조건

분말금속의 강도는 상대밀도와 기지금속의 유동응력에 의존한다. 자유분말금속의 압축시 낮은 상대밀도에서는 입자간의 미끄러짐이 두드러지고 반면에 높은 상대밀도에서는 기지금속의 변형이 두드러진다. 또한 인장강도가 압축강도에 비하여 매우 작다. 이러한 자유분말에 대하여 제안된 항복조건들중 대표적인 것은 다음과 같다. Hsieh,⁽⁴⁾ Banerjee,⁽⁵⁾ Liang⁽⁶⁾ 등은 세라믹 분말입자 사이의 미끄러짐에 대한 연구를 수행하여 두개 이상의 함수로 표현되는 복잡한 형태의 항복조건을 제안하였다. Suh⁽⁷⁾는 물방울(lemniscate) 형태로 나타나는 항복곡선을 제안하고 구성방정식을 유도하였다. Okimoto 등⁽⁸⁾은 구리분말을 사용하여 여러 응력조건하에서 소성변형과 밀도분포를 측정하였다. Schwedes⁽⁹⁾는 전단응력에 의한 항복현상을 규명하기 위하여 정수압응력의 변화에 따라 전단응력을 실험으로 측정하였다. Carroll⁽¹⁰⁾은 Shapiro와 Torre의 식을 기본으로 중심부에 공동을 가지고 있는 구형모형을 사용하여 상대밀도와 압축하중의 관계를 유도하고, 이를 가공경화재료에 대하여 발전시켰다. Fischmeister⁽¹¹⁾와 Moon⁽¹²⁾ 등은 실제의 분말거동은 구형모형과 다르게 나타남을 밝히고 압축하중과 입자간의 접촉면적, 기지재료 강도사이의 관계를 연구하였다. Morimoto⁽¹³⁾는 금형내의 분말거동을 Oyane의 항복조건을 적용하여 강소성 유한요소법으로 해석하였으며, Park⁽¹⁴⁾은 타원형으로 나타나는 항복곡선을 사용하여 탄소성 유한요소법으로 해석하였다. Hwang⁽¹⁵⁾은 타원형의 항복곡선을 정수압응력의 음의 방향으로 변위시켜 인장과 압축에서의 상이한 강도를 묘사하고 유한요소해석을 수행하였다. 그는 변위량을 간접 인장실험으로 측정된 냉간압축체의 인장강도를 기준으로 결정하였다. 박성준⁽¹⁶⁾은 인장과 압축에서의 동일한 강도를 가정하고 타원형 항복곡선을 적용하여 유한요소해석을 시도하였다.

이들의 연구결과를 종합하여 보면 다음과 같다. 자유분말금속의 항복조건은 정수압응력과 전단응력을 두 축으로 하는 평면에서 정수압응력의 음의 방향으로 변위된 물방울형태와 유사하게 나타난다. 하지만 이 형태는 구성방정식이 복잡하게 유도되어 수치해석에 적용하는데 어려움이 따른다. 따라서 Hwang⁽¹⁵⁾은 항복조건을 변위된 타원으로 가정하였다. 여기서 중요한 것은 타원의 장축과 단축의 관계와 금속분말체 항복강도와 기지금속 항복강도의 관계를 정하는 계수들을 결정하는 것이다. 그는 이러한 계수들을 소결 분말금속 항복조건의 계수들과 동일하다고 가정하였으므로 해석결과는 실제거동과 차이가 날 수 있다. 본 연구에서는 Hwang이 제안한 항복함수형태를 기본으로 하여 식 (1)과 같이 제안하였다. 이 식은 Fig. 1에 도시되어 있듯이 정수압응력축의 음의 방향(또는 압축방향)으로 이동된 타원으로 나타난다.

$$F = AJ_2^2 + B(J_1 - s)^2 = \bar{\sigma}_k^2 = \delta \bar{\sigma}_0^2 \quad (1)$$

여기서, 계수 A , B , δ 는 정수압 압축과 일축변형압축 실험을 통하여 상대밀도의 함수로 표현되며, J_2 과 J_1 은 각각 편차응력의 이차불변량, 응력의 일차불변량이다. 그리고 $\bar{\sigma}_0$ 와 $\bar{\sigma}_R$ 는 각각 기지금속 일축응력 압축에서의 항복강도와 분말체 일축변형압축에서의 항복강도이다. 많은 연구자들은 $\bar{\sigma}_R$ 을 분말체 일축응력 압축에서의 항복응력으로 정의하였지만 실제 측정이 어려웠다. 일반적으로 자유분말의 인장강도는 0에 가까운 값을 나타내고 상대밀도에 거의 무관하므로 본 연구에서는 인장강도를 항상 0으로 가정하였다. 따라서 변위량 s 는 타원 장축길이의 반이 되므로 $s = -\frac{\bar{\sigma}_R}{\sqrt{B}}$ 의 관계가 성립한다. 변형중 입자간의 미끄럼발생이 무시할

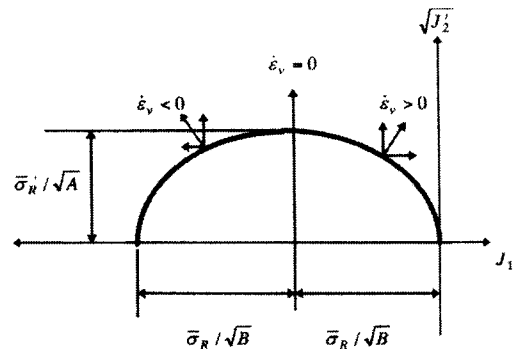


Fig. 1 Proposed yield locus of loose metal powder.

정도로 작아지는 상대밀도를 임계상대밀도라고 정의하고, 두드림밀도와 동일하다고 가정하였다. 또한 기지급속 항복강도를 기지급속 변형률의 함수로 나타내어 가공경화효과를 나타낼 수 있도록 하였다.

3. 구성방정식

식 (1)로 표현되는 항복함수는 이차 균일함수(second order homogeneous function)로써 오일러 정리에 의해 $(\sigma_{ij}(\partial F/\partial \sigma_{ij})/2F(\sigma_{ij}))$ 이 성립한다. 식 (1)에 수직법칙을 적용하여 응력과 변형률속도의 관계를 구하면 식 (2)와 같다.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{A\lambda} \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{1}{\lambda} \left[\frac{1}{18B} - \frac{1}{3A} \right] \dot{\epsilon}_{ij} \delta_{ij} - \frac{S}{3} \delta_{ij} \quad (2)$$

그리고 단위체적당 소성일률은 아래와 같이 유도된다.

$$\dot{W} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = \bar{\sigma}_R \dot{\bar{\epsilon}}_R = 2\dot{\lambda} \bar{\sigma}_R^2 + \frac{S}{3} \dot{\epsilon}_{kk} \quad (3)$$

식 (3)을 비례상수 $\dot{\lambda}$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= \frac{1}{2\bar{\sigma}_R^2} \left(\bar{\sigma}_R \dot{\bar{\epsilon}}_R - \frac{S}{3} \dot{\epsilon}_{kk} \right) \\ &= \frac{1}{2\bar{\sigma}_R} \left(\dot{\bar{\epsilon}}_R - \frac{S}{3\bar{\sigma}_R} \dot{\epsilon}_{kk} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 아래와 같이 비례상수 $\dot{\lambda}$ 가 유도된다.

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\bar{\sigma}_R} \left[\frac{1}{2A} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{1}{36B} \dot{\epsilon}_{kk}^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)로부터 다음과 같이 유효변형률 속도를 구할 수 있다.

$$\dot{\bar{\epsilon}}_R = 2 \left[\frac{1}{2A} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{1}{36B} \dot{\epsilon}_{kk}^2 \right]^{1/2} + \frac{S}{3\bar{\sigma}_R} \dot{\epsilon}_{kk} \quad (6)$$

계수 B 는 다음과 같이 결정할 수 있다. 정수압 압축응력 P 를 항복함수에 대입하면 편차응력의 제이 불변량항은 0이 되고, 응력의 제이 불변량항만 존재한다. 이를 B 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B &= \left(\frac{-2\bar{\sigma}_R}{3P} \right)^2 \\ &= \left[\frac{-2\sqrt{\delta} K \left(\int \frac{-2\sqrt{\delta}}{R} \frac{1}{\sqrt{B}} d\epsilon_3 \right)^n}{3P} \right]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_R &= \sqrt{\delta} \bar{\sigma}_b, \quad \bar{\sigma}_b = K \bar{\epsilon}_b^n \\ d\bar{\epsilon}_b &= \frac{\sqrt{\delta}}{R} d\bar{\epsilon}_R, \quad d\bar{\epsilon}_R = \frac{-2d\epsilon_3}{\sqrt{B}} \end{aligned}$$

일축변형의 응력($\sigma_1 = \sigma_2$, $\sigma_3 = -\bar{\sigma}_R$)을 항복함수에 대입하면 식 (8)을 유도할 수 있다. 여기서 1은 반경방향, 2는 원주방향, 3은 축방향을 나타낸다.

$$\frac{A}{6} [2(\sigma_3 - \sigma_1)^2] + B(2\sigma_1 + \sigma_3 - s)^2 = \sigma_3^2 \quad (8)$$

일축변형에서 반경방향과 원주방향의 변형률이 0이라는 조건($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$, $\epsilon_3 \neq 0$)을 이용하면 식 (2)로부터 식 (9)와 같이 σ_1 과 σ_3 의 관계를 구할 수 있다.

$$\sigma_1 = \left(\frac{A - 6B + 6\sqrt{B}}{A + 12B} \right) \sigma_3 \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입하면, 다음과 같이 A 와 B 의 관계를 유도할 수 있다.

$$(3B - 2\sqrt{B})A^2 + 4(9B^2 - 6B\sqrt{B} - B)A - 48B^2 = 0 \quad (10)$$

상대밀도에 따른 B 의 값을 식 (7)로 구하여 식 (10)에 대입하면 A 의 이차방정식이 된다. 이 방정식의 근을 구하면 상대밀도에 따른 A 의 값을 결정할 수 있다.

식 (6)으로부터 일축변형 압축시 분말체 유효변형률 증분은 식 (11)로 나타낸다.

$$\delta \bar{\epsilon}_R = 2 \left[\frac{1}{3A} (\delta \epsilon_3^2) + \frac{1}{36B} \delta \epsilon_3^2 \right]^{1/2} - \frac{\delta \epsilon_3}{3\sqrt{B}} \quad (11)$$

에너지보존의 법칙에 의하여 분말체 유효변형률 증분과 기지급속 유효변형률 증분사이의 관계는 식 (12)와 같다.

$$\delta \bar{\epsilon}_b = \frac{\sqrt{\delta}}{R} \delta \bar{\epsilon}_R \quad (12)$$

따라서 식 (1)과 식 (12)를 사용하여 분말체 일축변형 압축실험으로 구한 응력과 유효변형률의 관계로부터 기지급속의 유동응력을 기지급속의 유효변형률의 함수로 나타낼 수 있다.

식 (1)의 계수 A , B , δ 를 상대밀도의 함수로 나타내기 위하여 구리분말에 대한 일축변형과 정수압 실험을 수행하였고, 실험결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 2를 보면 압축강도는 상대밀도 0.6이상에서 급격히 증가하며 윤환에 따른 차이

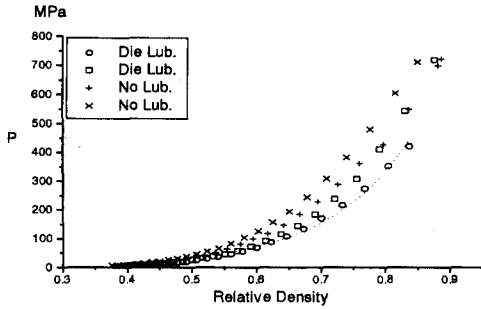


Fig. 2 Pressure vs relative density curves in unidirectional compression (Cu).

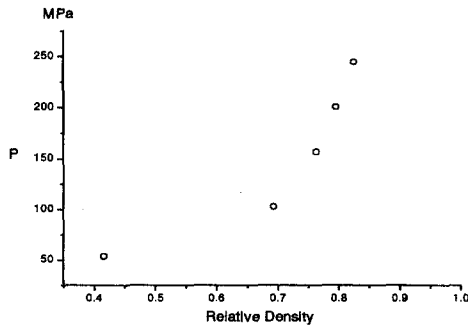


Fig. 3 Pressure vs relative density curves in hydrostatic compression (Cu).

도 상대밀도가 증가함에 따라 뚜렷이 나타난다. 식 (1)로부터 다음과 같은 관계를 알 수 있다.

$$\bar{\sigma}_R^2 = \delta \bar{\sigma}_b^2 \quad (13)$$

δ 는 다음의 두 가지 조건을 만족하여야 한다. 첫째, $\bar{\sigma}_R$ 는 일축변형 압축에서의 항복강도이므로 상대밀도가 1에 근접할수록 δ 는 무한대가 되어야 한다. 둘째, 임계상대밀도 이전까지는 δ 가 0이라는 것이다. 즉, 임계상대밀도는 자중 또는 진동에 의하여 충진된 상대밀도로서 이 때의 압축강도를 0으로 기준한다. 따라서 δ 는 임계상대밀도와 상대밀도 1의 구간에서 0에서 무한대로 단순증가하는 함수이어야 한다. Fig. 2로부터 구한 δ 는 식 (14)와 같이 나타났다. 구리분말 기지금속의 유동응력은 분말특성이 유사한 수분사 환원동에 대한 실험⁽¹⁶⁾에서 구한 식을 사용하였다.

$$\delta = \frac{\bar{\sigma}_R^2}{\bar{\sigma}_b^2} = \frac{2.5(R - R_T)^{1.8}}{1 - R^5} \quad (14)$$

여기서, 임계상대밀도, 즉 두드림밀도는 실험결과^(7,16)를 이용하여 0.45로 결정하였다. 식 (14)를 사용하여 Fig. 2의 결과로부터 다시 구한 구리 기지금속

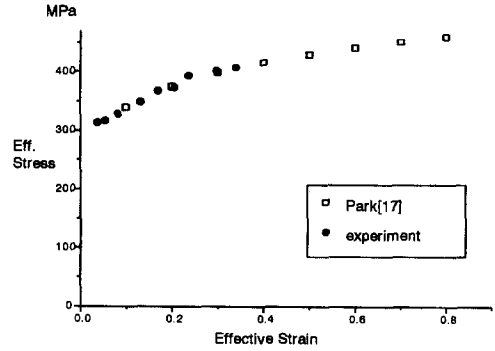


Fig. 4 Comparison of flow stress of base metal (Cu) with that in ref. (26)

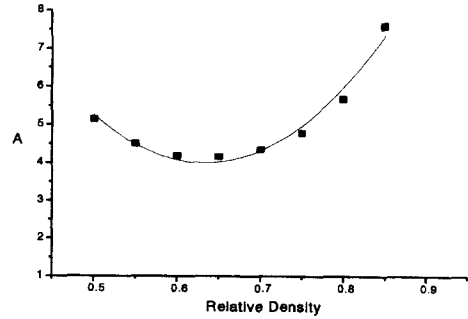


Fig. 5 Variation of constant A for relative density.

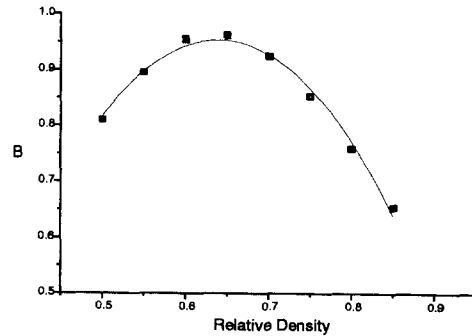


Fig. 6 Variation of constant B for relative density.

의 유동응력은 식 (15)와 같다. 이를 Fig. 4에 실험치⁽¹⁶⁾와 비교하였다.

$$\bar{\sigma}_b = 435.33 \bar{\epsilon}^{0.1343} \quad (15)$$

Fig. 2의 결과와 식 (7)을 사용하여 구한 B는 Fig. 5에 도시되어 있듯이 상대밀도의 이차함수인 포물선모양이며, 0.6과 0.7사이에서 최대값을 가지며, 이후에 급격히 감소한다. 식 (10)으로부터 구한 A는 Fig. 6에 도시되어 있듯이 상대밀도 0.6과

0.7사이에서 최소값을 보이고 있으며, 이후 급격히 증가하고 있다. A 와 B 를 상대밀도의 이차함수로 표현하면 다음과 같다.

$$B = -19.2 + 8.98R - 7.03R^2 \quad (16)$$

$$A = 32.45R^2 - 89.86R + 70.96 \quad (17)$$

A 와 B 의 특징은 이차함수로 매우 근사하게 표현된다는 점과 두 함수가 거의 같은 상대밀도에서 최대값과 최소값을 보이고 있는 점이다.

이로써 자유분말금속의 항복조건을 구리분말실험결과를 기준으로 완성하였다. Fig. 7에 상대밀도 증가에 따른 항복곡선의 변화를 지지금속의 가공경화를 고려하지 않았을 경우와 고려하였을 경우로 구분하여 $\sigma_m^* - \tau_m^*$ 상에서 도시하였다. 여기서 $\tau_m^* = \sqrt{2J_2}$, $\sigma_m^* = I_1/\sqrt{3}$ 이다.

4. 항복조건과 구성방정식의 검토

Fig. 1에 도시되어 있듯이 항복곡선에 수직법칙을 적용하면 꼭지점을 중심으로 좌측부분은 체적이 감소하고 우측부분은 체적이 증가한다. 체적변형률 속도는 식 (2)로부터 아래와 같이 구해진다.

$$\epsilon_v = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 - s}{6B\lambda} \quad (18)$$

여기서, $B > 0$, $\lambda > 0$ 이다. 체적변형률속도가 양, 0, 음의 값을 갖기 위한 조건은 각각 아래와 같다.

(a) $\epsilon_v < 0 \quad |\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3| > |s|$

(b) $\epsilon_v = 0 \quad |\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3| = |s|$

(c) $\epsilon_v > 0 \quad |\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3| < |s|$

본 연구에서 구한 항복조건과 구성방정식을 이용하여 이러한 응력상태에 따른 체적변화를 예측하는 지를 검토하여 보았다.

(1) 평면변형률 압축 ($\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 \neq \sigma_3 \neq 0$, $\epsilon_3 = 0$) ; 상대밀도를 0.6, 지지금속의 유동응력을 265 MPa 라고 가정하였을 때 A 는 4.08, B 는 0.94, δ 는 0.089, s 는 -81.54 MPa이다. ϵ_3 가 0임을 이용하여 σ_2 와 σ_3 의 응력관계를 유도하고 이를 항복조건에 대입하면 σ_2 는 -74.92 MPa이고 σ_3 는 -24.86 MPa이다. 이 응력상태는 항복곡선의 꼭지점 좌측에 존재하는 부분으로써 식 (18)을 통해 체적이 감소함을 알 수 있다.

(2) 일축변형 압축 ($\sigma_1 = \sigma_2$, σ_3 , $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$, $\epsilon_3 \neq 0$) ; 상대밀도와 지지금속의 유동응력은 (1)의 경우

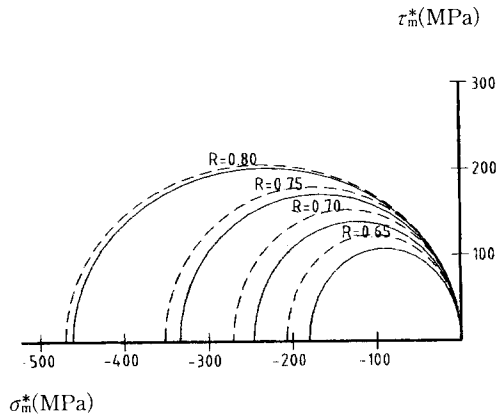


Fig. 7 Changes of proposed yield locus for copper powder in bidirectional compression : (a) without strain hardening effect (solid line), (b) with strain hardening effect (dashed line).

와 같다고 가정하고, ϵ_1 가 0임을 이용하여 σ_1 와 σ_3 의 응력관계를 유도하고 이를 항복조건에 대입하면 σ_1 는 -22.14 MPa이고, σ_3 는 79.06 MPa이다. 이 응력상태도 항복곡선의 꼭지점 좌측에 위치하며, 식 (18)을 통해 체적이 감소함을 알 수 있다.

(3) 작은 정수압에 전단응력이 작용하는 경우 ; 상대밀도와 지지금속의 유동응력은 (1)의 경우와 같다고 가정하였다. $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa이고, σ_{xy} 가 100 MPa일때 이 응력상태는 항복곡선의 꼭지점 우측에 위치하며, 식 (18)을 통해 체적이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8에 도시되어 있는 일축변형, 이축변형, 정수압의 세 가지 압축상태에 항복조건과 구성방정식을 적용하여 압축응력을 구하고 실험결과와 비교하였다. 각 상태에서의 압축응력은 식 (19), 식 (20), 식 (21)로 나타난다. 각 경우의 응력과 변형률조건을 식 (6)에 대입하여 분말금속의 유효변형률증분을 구하고 식 (12)로부터 지지금속의 유효변형률 증분을 구하였다. 다음 식 (15)로부터 지지금속의 항복응력을 구하고 식 (14)로부터 δ 의 값을 구한 뒤 분말금속의 항복응력을 식 (13)으로부터 구하였다. 이렇게 구한 분말금속의 항복응력, A , B 의 값을 아래식들에 대입하여 압축응력을 구하였다.

(i) 일축변형 압축시 ($\sigma_3 = -P_{D1}$, $\epsilon_1 = 0$, $\epsilon_2 = 0$)

$$P_{D1} = \frac{\bar{\sigma}_R}{\sqrt{\frac{108AB^2 - 72AB\sqrt{B} + 12AB + A^2 - 6A^2\sqrt{B} + 9A^2B}{(A+12B)^2}}} \quad (19)$$

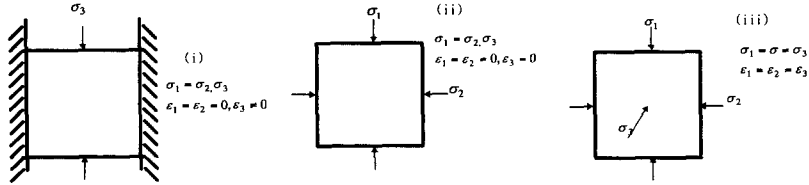


Fig. 8 Stress and strain conditions in different modes of compression: (i) unidirectional compression, (ii) bidirectional compression, (iii) hydrostatic compression.

(ii) 이축변형 압축시 ($\sigma_1 = \sigma_2 = -P_{D2}$, $\dot{\epsilon}_3 = 0$)

$$\begin{aligned} & \left[\frac{A}{3} \left(\frac{-9B}{A+3B} \right)^2 + B \left(\frac{3A}{A+3B} \right)^2 \right] P_{D2}^2 \\ & - 2 \bar{\sigma}_R \left[\frac{A}{3} \left(\frac{9B}{A+3B} \right) \left(\frac{3\sqrt{B}}{A+3B} \right) \right. \\ & + B \left(\frac{3A}{A+3B} \right) \left(\frac{A}{(A+3B)\sqrt{B}} \right) \left. \right] P_{D2} \\ & + \left[\frac{A}{3} \left(\frac{3\sqrt{B}}{A+3B} \right)^2 + B \left(\frac{A}{(A+3B)\sqrt{B}} \right)^2 - 1 \right] \bar{\sigma}_R^2 \\ & = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

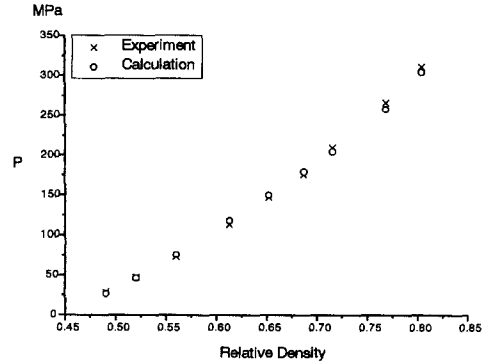
(iii) 정수압 압축시 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -P_{D3}$)

$$P_{D3} = \frac{2\sqrt{B}}{3} \bar{\sigma}_R \quad (21)$$

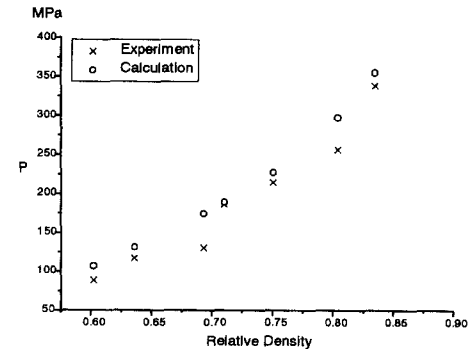
위 식들에 의한 예측결과와 실험결과를 Fig. 9에 비교하였다. 일축변형과 정수압 압축의 경우에는 거의 일치하며, 이축변형 압축의 경우에도 매우 근접함을 볼 수 있다. 실험과 예측의 차이는 공통적으로 상대밀도의 증가에 따라 약간 증폭되고 있는데, 이것은 실제 분말금속간의 미끄러짐, 이방성, 불규칙한 분말의 배열, 분말과 금형간의 마찰에 기인한다고 사료된다.

5. 결 론

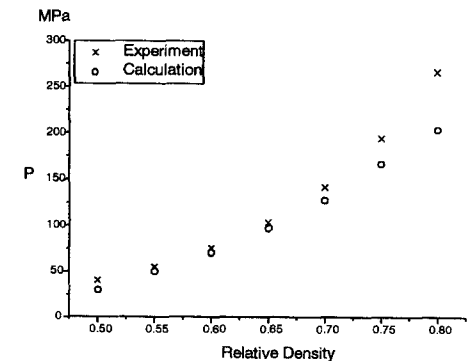
자유분말금속의 압축시 발생하는 소성변형과 상대밀도분포를 예측하기 위하여 항복함수를 유도하고 수직법칙을 사용하여 구성방정식을 유도하였다. 이 항복함수는 정수압응력축과 전단응력축상에서 정수압응력의 압축방향으로 이동된 타원으로 나타내며, 계수 A , B , δ 는 상대밀도의 함수로 표현된다. 본 연구에서는 자유분말금속의 인장강도를 상대밀도와 무관하며 항상 0이라고 가정하였다. 항복조건에 사용된 계수들은 구리분말을 사용하여 수행한 일축변형과 정수압 압축실험을 수행하여 결정하였다. 이 항복함수의 유도응력은 일축변형 압축시의 항복응력으로 정의하였고, 기지금속 유도응력은



(a) Unidirectional compression



(b) Bidirectional compression



(c) Hydrostatic compression

Fig. 9 Relationships between pressure and relative density (Cu).

기지금속 유효변형률의 함수로 표현하였다. 이 항복조건으로부터 유도된 구성방정식을 일축변형, 이축변형, 정수압 압축변형에 대하여 적용하여 얻은 결과는 실험결과와 잘 일치하였다.

본 연구에서는 분말체의 강도를 상대밀도와 기지금속 유동응력에만 의존하는 것으로 가정하였다. 하지만 강도는 금속분말의 형태와 크기에도 의존하므로 추후 이에 대한 실험을 수행하여 이들의 영향을 정량적으로 표현할 수 있는 항복조건을 구하여야 할 것이다. 그리고 항복조건에서 사용된 계수중 A 와 B 는 소재에 비교적 무관한데 비하여 δ 는 소재에 크게 영향을 받는 것으로 사료된다. 따라서 δ 에 대한 연구가 더 필요하다. 또한 제안된 항복조건과 구성방정식을 유한요소법에 적용하는 기술과 이를 분말성형공정에 응용하는 해석기술의 개발을 추구하여야 할 것이다. 그리고 해석에 의하여 예측되는 상대밀도분포를 측정할 수 있는 방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구 조성비(기계공학 : ME96-E-43)에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) German, R. M., 1996, *Powder Metallurgy Science*, 2nd edition, MPIF, pp. 16~240
- (2) 대한금속학회, 분말야금학, 회중당, 1989, pp. 2~67.
- (3) Herrmann, W., 1971, "Constitutive Equations for Compaction of Porous Materials," *SCDC-714134*.
- (4) Hsieh, H., Kavazanjian, E. and Borja, R., 1990, "Double-Yield Surface Cam Clay Plasticity Model," *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 116, No. 9, pp. 1381~1401.
- (5) Banerjee, S., Davis, R. and Sribalaskandarah, K., 1992, "Simple Double-Hardening Model for Geomaterials," *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 118, No. 6, pp. 889~901.
- (6) Liang, Y. and Ma, F., 1992, "Anisotropic Plasticity Model for Undrained Cyclic Behavior of Clays," *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 118, No. 2, pp. 229~245.
- (7) Suh, N. P., 1969, "A Yield Criterion for Plastic, Frictional, Work-Hardening Granular Materials," *Int. J. Powder Metallurgy*, Vol. 5, pp. 69~78.
- (8) Okimoto, K., Oyane, M. and Shima, S., 1975, "Study on Compacting of Metal Powders(1st Report)," *Jap. Soc. Powder, Powder Metallurgy*, Vol. 22, pp. 177~184.
- (9) Schwedes, J., 1975, "Shearing Behaviour of Slightly Compressed Cohesive Granular Materials," *Powder Tech.*, Vol. 11, pp. 59~67.
- (10) Carroll, M. M. and Kim, K. T., 1984, "Pressure-Density Equation for Porous Metals and Metal Powder," *Powder Metallurgy*, Vol. 27, No. 3, pp. 153~159.
- (11) Fischmeister, H. F. and Arzt, E., 1983, "Densification of Powders by Particle Deformation," *Powder Metallurgy*, Vol. 26, No. 2, pp. 82~88.
- (12) Moon, I. H. and Kim, K. H., 1984, "Relationship between Compacting Pressure, Green Density and Green Strength of Copper Powder Compacts," *Powder Metallurgy*, Vol. 27, No. 2, pp. 80~84.
- (13) Morimoto, Y., Hayashi, T. and Takei, T., 1982, "Mechanical Behavior of Powders during Compaction in a Mold with Variable Cross Sections," *Int. Powder Metallurgy & Powder Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 129~145.
- (14) Park, J. K., 1985, "Die Compaction of Powder: Constitutive Modeling and Finite Element Calculations," Ph. D. Thesis, College of Engineering, North Carolina State University, Raleigh.
- (15) Hwang, B. B., 1985, "Deformation Characterization of Powdered Metals in Compaction and Application of the Finite Element Method to Compaction Processes," Ph. D. Thesis, College of Engineering, U. C. Berkeley.
- (16) 박성준, "금속분말의 압축성형 해석," 1996, 석사논문, 금속공학과, 서울대학교, 서울.