

〈論 文〉

소결분말금속의 항복함수

박 종 진*

(1992년 10월 10일 접수)

A Yield Function for Sintered Porous Metals

J.J. Park

Key Words : Sintered Powder(소결분말), Yield Function(항복함수), Relative Density(상대밀도), Plastic Poisson's Ratio(소성푸아송비), Uniaxial Strain Compression(단축변형률 압축), Hydrostatic Compression(정수압 압축)

Abstract

Several yield criteria for porous materials are compared with each other, defining the apparent yield stress as the yield stress of the porous material in simple compression. It was found that the plastic Poisson's ratio is the parameter needed to define the yield criterion, rather than the relative density. The plastic Poisson's ratio is regarded as a material characteristic that is obtained from a simple compression test. A new form of yield criterion was suggested, and it was applied to hydrostatic compression as well as uniaxial strain compression of sintered Al-2024 powder. The crossover point in the mean stress vs volume change curves of the processes was predicted. It is presented that the flow stress of the fully densified material can be obtained from that of the porous material using relations obtained from the yield criterion.

1. 서 론

소결분말금속의 소성가공법에 의해 생산하는 기계부품과 요소의 가공법이 기계 가공산업의 전반에 걸쳐 각광 받을 것으로 기대된다. 가공공정에 성공여부는 균일한 밀도분포와 크랙의 방지, 플래시의 제거와 같은 요인들에 의해 결정된다. 이와같은 요인들은 다이, 예비성형체, 윤활 등과 같은 공정상태등의 최적 설계에 의해 이루어진다.⁽¹⁾ 이러한 설계를 위해서는 소결분말금속의 다공성 때문에 재래식 구조로부터 가공된 재료의 변형과는 상당히 다른 변형거동을 이해하여야 한다. 다공성은 때로는 필터와 다공성 베어링의 제작에 이용되지만 구조물의 기계적 성질을 고려할 경우에는 결점으로 작용

된다. 특히 동력을 전달하는 부품의 경우에는 기공을 최소화하여야 한다. 따라서 일반적으로 소결분말금속의 소성가공은 가능한 높고 균일한 밀도를 지닌 부품의 생산이 목적이다. 이를 위해서는 소결분말금속의 변형거동의 정량적인 이해가 필요하며, 이를 이용하여 공정조건의 설계가 이루어져야 한다.

일반적으로 소결분말금속의 소성가공은 많은 소성유동을 포함하고 있기 때문에 재료의 기계적 거동은 이상화된 강소성으로 가정하고 있다. 많은 연구자들은 강소성에 근거하여 분말재료에 대한 항복조건을 제안하였다. 원재료(상대밀도 100%인 재료)에 있어서 항복조건은 von Mises의 항복조건과 같이 편차응력의 2차 불변량의 함수로 나타난다. 그러나 소결분말의 재료에 있어서는 편차응력 뿐만 아니라 정수압응력이 재료의 항복에 영향을 미치므

*정회원, 홍익대학교 기계공학과

로 분말재료의 항복조건은 편차응력의 2차 불변량과 정수압응력의 함수로 표현되어야 한다. Drucker⁽²⁾는 단순한 미끄러짐에 필요되는 전단력이 미끄러짐면에 수직인 압력에 선형적으로 의존한다고 가정하였다. 그는 Mohr-Coulomb의 가설을 일반화시킨 것으로 주응력공간에서 정수압응력의 양의 방향으로 원뿔을 이루는 항복함수를 제안했다. 이 항복함수는 정수압응력의 음의 방향으로 열려있으며 이것은 소성변형이 체적의 증가를 동반한다는 것을 나타낸다. Suh⁽³⁾는 주응력공간에서 lemniscate의 회전된 형태를 갖는 항복조건을 제안했다. 이 항복조건은 재료가 변형시 응력상태에 따라 체적의 증가 혹은 감소를 동반한다는 의미를 가지고 있다.

Kuhn⁽⁴⁾은 일련의 MH-100 스폰지 철의 소결분말체의 압축실험을 하여, 소성포아송비가 변형시의 상대밀도의 함수로 나타내지며, 초기상대밀도와는 무관하다는 사실을 발견하였다. 그는 재료상수가 소성포아송비의 함수로 표현되는, 타원체형상의 항복함수를 제안하였다. 그러나 항복함수를 원재료의 항복응력과 관련시키지는 못했다. Green⁽⁵⁾은 완전강소성재료의 구형공간모형을 가정하고 순수한 전단과 정수압상태에서의 항복조건에 대하여 해석하고 두 항복조건을 결합하여 일반적인 응력상태에 대한 항복조건을 제안하였다. Shima⁽⁶⁾는 위에 설명한 것들과 유사한 형태의 항복조건을 가공경화를 포함한 다공질재료에 이용될 수 있게 하였다. 또한 일반 응력상태에 대해 사용될 수 있는 구성방정식을 유도했다. Gurson⁽⁷⁾은 공간을 포함하는 완전강소성 셀(cell)로서 분말재료를 단순화하였다. 상계해석법을 이용하여 긴원통과 구형의 두 공간 기하학적 모형에서 전체소성유동과 부분소성유동에 대한 항복상태를 구하였다. Roman⁽⁸⁾은 Beltrami의 가설을 사용했다. 그것은 탄성변형의 에너지가 어떤 특정한 값에 도달할 때 재료가 소성상태로 되는 것을 의미한다. 그리고 소성상태에 이를 때까지 Hook의 법칙이 타당하게 적용된다고 가정하였다. 그러나 탄성과 소성응력상태에서 포아송비를 혼동하여 사용하였다. Doraivelu⁽⁹⁾는 Roman의 방법과 유사한 방법으로 소성포아송비와 상대밀도의 관계를 유도하였다. 그는 다른 상대밀도를 갖는 시편의 압축실험을 통해 분말원재료와 분말재료의 항복응력사이의 관계를 구하였다. El-Wakil⁽¹⁰⁾은 주응력공간에서 포물선의 회전면을 나타내는 항복조건을 제안하였다. 항복함수로 사용된 상수는 Green에

의해 제안된 수학적 모델에서 유도하였다.

Drucker, Suh와 El-Wakil의 항복곡면은 주응력공간에서 π -평면에 관하여 비대칭이며 항복곡면에 대한 수직벡터는 음의 정수압응력하에서 정수압응력축에 양의 방향으로 기울기를 갖게된다. 하지만 소결된 분말체가 압축될 경우, 체적의 증가를 수반하는 분말입자간의 미끄러짐은 거의 일어나지 않을 것으로 예측된다. 또한 어떤 실험결과에 의하면, 소결분말체의 인장과 압축에서의 항복응력은 거의 같다는 사실이 발견되었다. 따라서 항복곡면은 Kuhn, Green, Gurson, Roman과 Doraivelu의 항복곡면처럼 π -평면에 대해서 대칭이라는 사실이 합당한 것으로 고려된다.

2. 항복함수의 비교

일반적으로 항복조건은 다음의 형태로 표현될 수 있다(Doraivelu에 의해 사용된 형태).

$$F = AJ_2 + BJ_1^2 = Y_R^2 = \delta Y_0^2 \quad (1)$$

여기서 A, B와 δ 는 상대밀도의 함수로 표현되는 재료 상수이다. J_1 은 응력텐서의 1차 불변량이고 J_2 는 편차응력텐서의 2차 불변량이다. Y_R 은 분말재료의 항복응력이고 Y_0 는 원재료의 항복응력이다. Y_R 을 단순압축시의 분말재료의 항복응력으로 놓으면 A와 B의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = 1 - \frac{A}{3} \quad (2)$$

Kuhn과 Roman에 의해 제안된 항복조건은 δ 항을 포함하지 않는다. 그러므로 Green, Gurson, Shima와 Doraivelu의 항복조건을 식(2)의 조건을 적용시켜 식(1)의 형태로 변화시킨 다음 A, B와 δ 를 구하여 비교하였다. (Table 1) Fig. 1에 A의 값이 상대밀도의 함수로 표시되어 있다. 상대밀도의 값이 1이 됨에 따라 A의 값은 3이 된다. Fig. 2에는 B값이 표현되어 있다. 상대밀도가 1이 됨에 따라 B값은 0이 된다. Fig. 1과 2에서 보면 Green과 Gurson의 의해 제안된 A와 B는 서로 유사하다. Fig. 3에는 δ 의 상대밀도에 대한 변화가 나타나 있다. Green과 Gurson의 값과 Shima와 Doraivelu의 값은 각각 서로 근사하다. 상대밀도가 1이 됨에 따라 δ 도 1이 된다. 상대밀도 0.8이

Table 1 Comparison of A, B and δ

	A	B	δ
	$\frac{12}{\alpha^2+4}$	$\frac{\alpha^2}{\alpha^2+4}$	$\frac{4\beta^2}{\alpha^2+4}$
Green ⁽⁵⁾	$\alpha = \frac{3\{1-(1-R)^{\frac{1}{3}}\}}{\{3-2(1-R)^{\frac{1}{4}}\}\ln(1-R)}$		$\beta = \frac{3\{1-(1-R)^{\frac{1}{3}}\}}{3-2(1-R)^{\frac{1}{4}}}$
Gurson ⁽⁶⁾	$\frac{12}{4-R}$	$\frac{1-R}{5-R}$	$\frac{5R^2}{5-R}$
Shima & Oyane ⁽⁷⁾	$\frac{4.32}{2.44-R}$	$\frac{1-R}{2.44-R}$	$\frac{1.44R^5}{2.44-R}$
Doraivelu ⁽⁹⁾	$2+R^2$	$\frac{1}{3}(1-R^2)$	$2R^2-1$

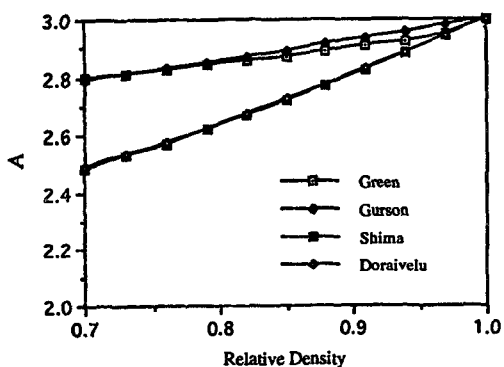


Fig. 1 Variation of A as a function of relative density

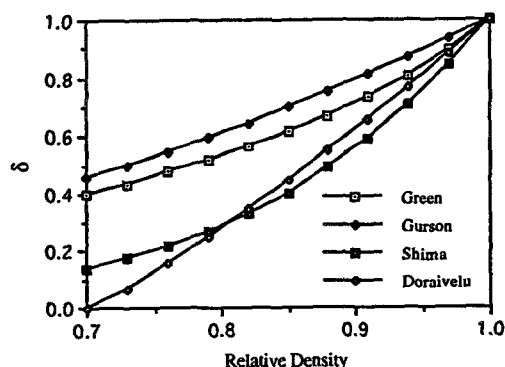


Fig. 3 Variation of δ as a function of relative density

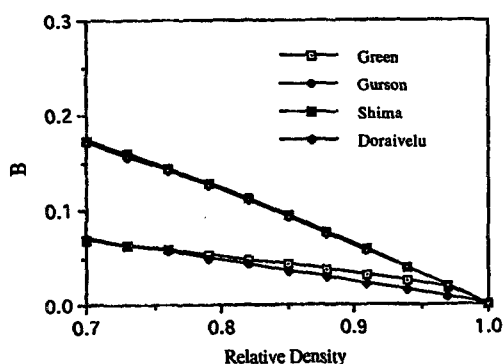


Fig. 2 Variation of B as a function of relative density

하에서는 Doraivelu보다 Shima의 값이 높고 0.8 이상에서는 역전된다. Doraivelu의 δ 값은 상대밀도 0.7에 접근함에 따라 0이 된다. 그 이유는 그가 행한 실험의 관찰에 근거하였는데, 즉 상대밀도 0.7

이하의 시편은 압축됨에 따라 즉시 파괴되었다는 사실이다. 하지만 시편이 충분히 소결되었다면은 일정강도를 보존할 것이다. 이러한 관점에서보면 Shima의 δ 값이 비교적 타당하다는 판단을 할 수 있다. 이러한 항복조건들은 모두 재료의 밀도가 100%가 됨에 따라 von Mises의 항복조건으로 귀착된다. Green과 Gurson의 항복조건은 수학적 모델에 근거를 두었고 Shima와 Doraivelu는 단순압축실험에 근거를 두고 있다. 따라서 Doraivelu와 Shima의 항복조건은 단순압축실험의 결과에 보다 잘 맞는다는 사실을 예상할 수 있다.

위에 언급한 항복조건을 정수압압축에 대해 비교하였다. 정수압 응력상태는 식(1)에서 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$J_1 = \sqrt{\frac{\delta}{B}} Y_0 \tag{3}$$

Fig. 4에서 $\sqrt{\frac{\delta}{B}}$ 의 값이 상대밀도의 함수로 표현되

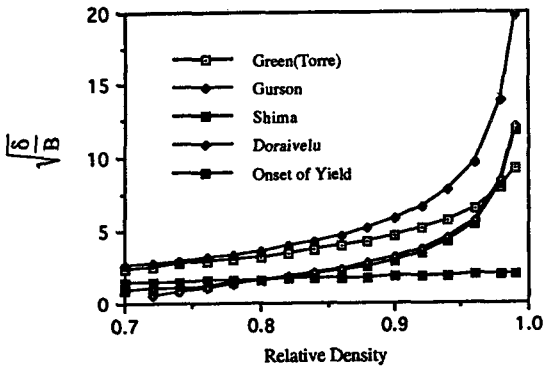


Fig. 4 Variation of $\sqrt{\frac{\sigma_0}{\bar{\sigma}}}$ as a function of relative density

어져 있다. Green의 항복조건은 구형공간을 갖는 구의 전체적인 항복을 이루기 위한 압력의 계산에 근거를 두고 있다. 그림에 보여지다시피 Gurson의 값이 Green의 값보다 높는데, 이것은 Gurson의 값이 너무 높다는 것을 의미한다. 항복의 시작(onset of yield)은 이러한 구형모델에서 초기 항복 상태에 근거를 두고 있다. Shima와 Doraivelu의 값은 상대밀도 0.8이하의 경우를 제외하고는 상당히 비슷하다. 상대밀도가 낮은 범위에 대해서는 항복은 상대적으로 낮은 응력에서 발생하는 국부적인 항복에 기인할 것으로 예상된다. 따라서 실제 항복 응력은 균일하고 규칙적인 구형모델의 완전소성상태로부터 얻어진 응력보다 더 낮을 것이다. 그러나 상대밀도가 높은 범위에서는 밀도는 비교적 균일하게 분포될 것이고 따라서 실제응력은 구형 모델의 경우에 가까울 것으로 예측된다.

위의 언급한 바로 부터 몇가지 사항이 다음과 같이 요약된다: (1)수학적모델과 단순실험으로부터 각각 얻어진 항복조건들의 상대밀도에 대한 의존성이 상호 유사함을 나타내고, (2)수학적 모델은 일반적으로 단순실험의 경우보다 높은 값을 나타내며, (3)상대밀도의 값이 1이 될 때는 모두 von Mises의 항복조건으로 귀착되고, (4)Shima와 Doraivelu에 의해 제안된 A와 B는 거의 같으며 Shima에 의해 제안된 δ 가 비교적 타당하다.

3. 항복함수의 형태

식(1)에서 항복응력을 소성포텐셜로 가정하면 구

성방정식은 유동법칙을 적용하여 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\sigma_{ij} = -\frac{Y_R}{\bar{\epsilon}} \left(\frac{2}{A} \dot{\epsilon}'_{ij} + \frac{\delta_{ij}}{9B} \dot{\epsilon}_{kk} \right) \quad (4)$$

여기서 $\dot{\epsilon}'_{ij}$ 는 편차변형률속도 텐서의 성분이고, $\dot{\epsilon}_{kk}$ 는 체적변형률속도이다. $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률속도로써 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\epsilon}^2 = \frac{2}{A} \dot{\epsilon}'_{ij} \dot{\epsilon}'_{ij} + \frac{1}{9B} \dot{\epsilon}_{kk}^2 \quad (5)$$

단순압축의 응력상태를 고려하면 $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$, $\dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}_{22}$ 이 된다. 여기서 1은 반경방향, 2는 원주방향, 3은 축방향을 나타낸다. 식(4)를 이 응력상태에 적용하면 소성푸아송비 ν 와 A사이의 관계가 다음과 같이 유도된다.

$$\nu = -\frac{\dot{\epsilon}_{11}}{\dot{\epsilon}_{33}} = 1 - \frac{A}{2} \quad (6)$$

즉 이 관계는 식(2)와 더불어 A와 B는 소성푸아송비의 함수로 나타낼 수 있다는 것을 의미한다. 소성푸아송비는 일반적으로 $\nu = 0.5R^n$ 으로 표현되는데, 여기서 R은 상대밀도를 나타낸다.⁽¹¹⁾

재료상수 A, B와 Shima에 의해 제안된 δ 를 소성푸아송비의 함수로 표현하고 $n=2$ 라 가정하면 항복함수의 형태 식(1)은 다음과 같이 표현된다.

$$(2+2\nu)J_2 + \frac{1-2\nu}{3}J_1^2 = Y_R^2 = \frac{8.15\nu^{2.5}}{2.44-1.41\nu^{0.5}} Y_0^2 \quad (7)$$

식(7)의 좌변은 Kuhn의 항복함수와 같으며, $n=2$ 라 가정하면 Doraivelu의 항복함수와 같게된다.

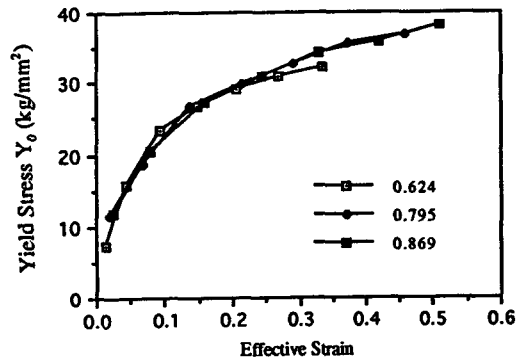


Fig. 5 Flow stress of fully densified copper converted from simple compression data of porous copper with different initial relative density: 0.624, 0.795 and 0.869

만일 가공경화되는 재료라면 식(7)을 사용하기 위하여 Y_0 를 원재료의 유효변형률의 합수로 표현하여야 한다. 이것은 단순압축실험으로부터 얻어진 분말재료의 항복응력(Y_R)과 유효변형률(ϵ)의 곡선을 변환시켜 얻을 수 있다. 에너지 평형을 고려하면 분말재료의 유효변형률 증분($\Delta\epsilon$)과 원재료의 유효변형률 증분($\Delta\epsilon_0$) 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\epsilon_0 = \frac{\sqrt{\delta}}{R} \Delta\epsilon \quad (8)$$

여기서 R 은 다음의 관계에 의해 구하여진다.

$$R = R_0 \exp(-\Delta\epsilon_v) \quad (9)$$

여기서 R_0 는 초기상대밀도를 나타내고, $\Delta\epsilon_v$ 는 체적변형률의 증분을 나타낸다. 식(7), (8)과 (9)를 사용하면 Y_R 과 ϵ 를 각각 Y_0 와 ϵ_0 로 변환시킬 수 있다. 이를 이용하여 단순압축시의 소결구리 분말의 항복곡선을 100% 상대밀도의 구리의 항복곡선으로 변환하였다. Fig. 5에 나타난 이 곡선의 타당

성을 검토하기 위해서는 열과 기계적 이력이 동일한 100% 상대밀도의 구리시편의 압축실험이 필요하다. 하지만 그림에서 보여지듯이 초기밀도가 다른 세가지 시편의 항복곡선이 변환후 거의 하나로 일치함으로 본 연구에서 제안된 변환기법이 타당하다고 사료된다.

4. 압축실험

일반적으로 소성 푸아송비는 $\nu=0.5R^n$ 과 같이 표현되는데 이의 타당성을 검토하기 위해서 Fe와 Fe-36Ni분말의 단순압축 실험을 수행하였다. 사용된 분말에 대한 정보는 Table 2에 나타나 있다. 시편을 소결하기전에 상온에서 원통형의 압축성형체를 만들었다. 크기는 직경과 높이의 비가 1:1이 되도록 성형하였다. 소결로에서 Fe분말은 1120°C에서, Fe-36Ni분말은 1150°C에서 각각 30분간 소결하였다. 압축성형체의 기공에 존재하는 산소를 제거하기 위하여 NH_3 가스로 소결로 분위기를 채

Table 2 Information of Fe and Fe-36Ni powders

분말	성분	Mesh size	Wt(%)	제조업체	full density
Fe	C 0.002%	208 μm 이하 (70Mesh)	0	Hoeganaes -ABC 100.30	7.86 g/cm ³
		147 μm 이하 (100Mesh)	13		
		147 μm -43 μm	70		
		43 μm 이상 (325Mesh)	18		
Fe-36Ni	C 0.02% Ni 36.0% Si 1.0%이하 Mn 1.0%이하	147 μm 이하 (100Mesh)	Max.3	태평양금속 (일본)	8.2 g/cm ³
		104 μm 이하 (150Mesh)	10-15		
		74 μm 이하 (200Mesh)	15-35		
		43 μm 이하 (325Mesh)	15-35		
		43 μm 이상 (325Mesh)	Min.30		

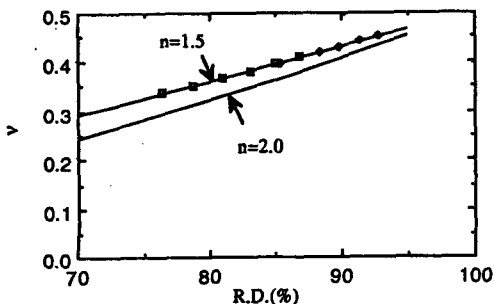


Fig. 6 Poisson's ratio as a function of relative density(Fe powder)

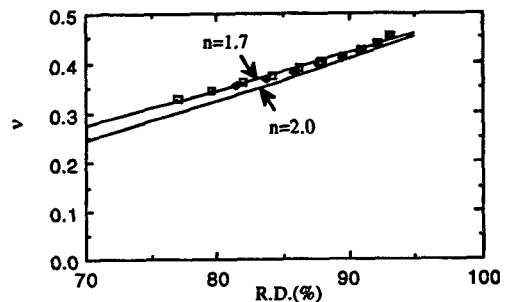


Fig. 7 Poisson's ratio as a function of relative density(Fe-36Ni powder)

Table 3 Values of n for different sintered powders

Material	Value of n
MH-100 sponge iron	1.92 ⁽⁴⁾
Cu	2.3 ⁽⁶⁾
X7091 Al	1.9 or 2.0 ⁽⁹⁾
Fe	1.5 ⁽¹²⁾
Fe-36Ni	1.7 ⁽¹²⁾

왔다. 각각의 분말에 초기밀도가 다른 세가지의 시편을 제작하였다. Fe분말시편의 초기밀도는 0.737, 0.794, 0.837 이고, Fe-36Ni분말시편의 초기밀도는 0.741, 0.789, 0.839 이었다. 압축실험은 만능시험기(Universal testing machine)를 사용하였으며, 윤활제로 Teflon sheet를 사용하였다. 그리고 윤활상태를 잘 유지하기 위하여 매 1mm 압축후 시편의 양단에서 Teflon sheet를 교환하였다.

압축된 시편의 직경과 높이의 측정으로 부터 구한 수직변형률과 원주변형률의 관계를 2차식으로 커브피팅한 식으로 부터 분말원재료의 상대밀도와 소성 푸아송비의 관계를 얻었다. Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있듯이 Fe 분말의 경우에는 $n=1.5$ 가 되고 Fe-36Ni 분말의 경우에는 $n=1.7$ 이 된다. 이 실험결과와 더불어 문헌에 나타나 있는 n 값을 비교하여 보면 Table 3에 나타난 것처럼 재료에 따라 다른 값을 가진다는 사실을 발견할 수 있다. 따라서 소성푸아송비와 상대밀도의 관계는 재료상수로 취급되어야 하며 식(1)의 상수 A, B와 δ 는 상대밀도보다 소성푸아송비의 함수로 표현되어지는 것이 타당하다고 생각된다.

5. 항복함수의 응용

Johnson⁽¹²⁾은 Al-2024 소결분말을 사용하여 정수압 압축과 단축변형률 압축실험을 하였다. 분말의 초기상대밀도는 약 0.77이다. Johnson은 평균응력이 초기압축의 단계에서는 정수압 압축이 단축변형률 압축보다 더 높으나 나중단계에서는 역전된다는 사실을 발견하였다. 이 교차점의 평균응력은 0.275 GPa이고 체적변형률은 0.17이다. 본 연구에서 제안된 항복조건이 타당성을 증명하기 위해 이 두 압

축과정에서의 평균응력과 체적변형률의 관계를 예측하도록 적용하였다. Al-2024 원재료의 유동응력은 $Y_0=390 \text{ MPa}$ (MPa)으로 가정하였다. 이 재료의 소성 푸아송 비와 상대밀도의 관계가 알려져 있지 않으므로 $\nu=0.5R^2$ 로 가정하였으며 식(7)은 다음과 같이된다.

$$(2+R^2)J_2 + \frac{1-R^2}{3}J_1^2 = Y_k^2 = \frac{1.44R^5}{2.44-R} Y_0^2 \quad (10)$$

정수압응력 상태에서는 J_2 항은 제거되고, $\sigma_{11}=\sigma_{22}=\sigma_{33}$, $\dot{\epsilon}_{11}=\dot{\epsilon}_{22}=\dot{\epsilon}_{33}$ 의 관계가 성립된다. 체적변형률 증분을 사용하여 원재료에 측정된 변형률증분과 상대밀도 증가는 각각 식(8)과 식(9)에서 구한다. 항복시의 평균응력은 식(1)에서 얻어진다. 단축변형률 상태에서는 $\dot{\epsilon}_{11}=\dot{\epsilon}_{22}=0$, $\sigma_{11}=\sigma_{22}$ 의 관계가 성립된다. 식(4)에서 다음식을 유도할 수 있다.

$$\sigma_{11} = \frac{R^2}{2-R^2} \sigma_{33} \quad (11)$$

변형률증분 $\Delta\epsilon_{33}$ 에 있어서 원재료에 측정된 변형률증분과 상대밀도는 각각 식(8)과 식(9)로 부터 구하여진다. 단축변형률 압축시의 항복응력은 식(10)과 식(11)로 부터 구하여진다. Fig. 8은 예측된 결과를 보여주고 있다. 정수압 압축에 대한 평균응력은 체적변형률이 0.15보다 클 경우에는 단축변형률 압축의 경우보다 더 높다는 것과 그 아래에서는 역전된다는 사실을 나타내고 있다. 이것은 Johnson의 실험결과와 일치한다. 소결분말의 유동법칙은 항복곡면의 형태에 매우 민감하게 의존하게 되는데, 실험과 일치한다는 사실은 본 연구에서 제안된 항복조건이 정수압압축과 단축변형률압축의

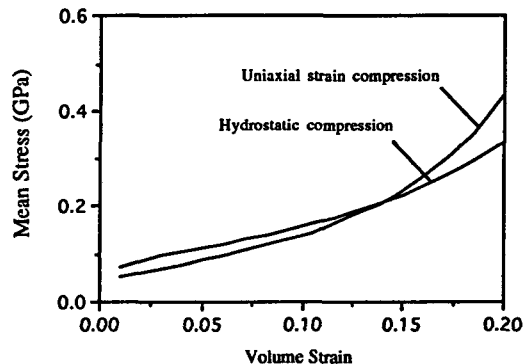


Fig. 8 Prediction of the crossover point in mean stress vs volume strain curves

응력상태에서 정확하다는 사실을 나타낸다고 사료된다.⁽¹³⁾

6. 결 론

소결분말금속의 항복함수는 전단응력과 정수압응력의 항을 포함해야 한다. 분말금속의 형식항복응력을 단순압축에서의 항복응력으로 가정하고, 이를 원재료의 항복응력과 관련지어야 한다. 일반적으로 금속은 가공경화성이 있기 때문에 원재료의 항복응력은 원재료의 변형률의 함수로 표현되어야 한다. 이러한 관점에서 식(1)을 소결분말재료의 일반적인 항복함수의 형태로 가정하였다. 이 식에서 사용된 상수 A, B와 δ 는 보통 상대밀도의 함수로 나타내어져왔다.

항복조건을 비교에서 설명된대로 Shima와 Doraivelu에 의해 제안된 A와 B는 매우 유사하며 Shima에 의해 제안된 δ 가 비교적 타당하는 사실을 알게 되었다. 또한 식(1)을 단순압축의 응력상태에 적용시키면 A와 B는 종속적이며, 이들은 소성푸아송비의 함수로 나타낼 수 있다는 것이다. 소성푸아송비는 상대밀도의 함수로 표현되어 있는데, 이 함수는 본 연구의 실험과 문헌조사에서 나타난 것처럼 재료에 따라 다르다. 따라서 식(7)과 같이 상수 A, B와 δ 가 소성푸아송비의 함수로 표현된 새로운 형태의 항복함수가 제안되었다. 특정 재료에 대하여 항복함수와 유도된 관계를 사용하기 위하여서는 그 재료의 소성푸아송비와 상대밀도의 관계가 필요한데 그것은 단순압축실험을 통해서 쉽게 구할 수 있다.

제시된 항복조건을 정수압압축과 단축변형률압축에서 평균응력과 체적변형률의 곡선에서의 교차점 발생을 예견하기 위해 적용되었다. 예견된 교차점이 실험 결과와 일치된다는 것은 이 항복함수가 이 두가지 응력 상태에 대해 정확하다는 사실을 나타내고 있다. 이 항복함수가 단순압축의 경우에 대해 정확하다는 것은 이미 설명되었다.

참고문헌

- (1) Huppmann, W. J. and Hirschvogal, M., 1978, "Powder Forging," Int. Metals Reviews, No. 5, pp. 209~239.
- (2) Drucker, D. C. and Prager, W., 1952, "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design," Quart. of Applied Math., 10, pp. 157~165.
- (3) Suh, N. P., 1969, "A Yield Criterion for Plastic, Frictional, Workhardening Granular Materials," Int. J. Powder Metallurgy, 5, (1), pp. 69~78.
- (4) Kuhn, H. A. and Downey, C. L., 1971, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials," Int. J. Powder Metallurgy, 7, (1), pp. 15~25.
- (5) Green, R. J., 1972, "A Plasticity Theory for Porous Solids," Int. J. Mech. Sci., Vol. 14, pp. 215~224.
- (6) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," Int. J. Mech. Sci., Vol. 18, pp. 285~291.
- (7) 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," ASME, J. Engin. Materials and Technology, January pp. 2~15.
- (8) Roman, O. V., Doroshkevich, E. A., 1980, Velyuga, L. D., Zvonarev, E. V. and Mekhed, V. I., "Use of Equations of the Theory of Plasticity of a Porous Solid for Determining Stresses in Steady State Processes of Plastic Working of P/M Materials," Scientific-Research Institute of Powder Metallurgy, Belorussian Polytechnic Institute, Translated from Poroshkovaya Metallurgiya, No. 6(210), pp. 15~21.
- (9) Doraivelu, S. M., Gegel, H. L., Gunasekera, J. S., Malas, J. C., Morgan, J. T., and Thomas, J. F., "A New Yield Function for Compressible P/M Materials," Private Communication.
- (10) El-Wakil, S. D., 1983, "A Yield Criterion and a Flow Rule for Sintered Porous Materials," Proc. of NAMRC XI Conference, pp. 166~171.
- (11) Zhdanovich, G. M., Theory of Compacting of Metal Powders, translated from Teorizc Pressovariya Metzllchaskikli Poroshkow, pp. 1~262, 1969, Foreign Technology Division, Wright-Patterson Air Force, OH, 1971 (Translation No. FTD-HC-23-775-70)

- (12) Johnson, J. N., Shipmann, F. H., Green, S. J. and Jones, A. H., "The Influence of Deviatoric Stress in the Compaction of Porous Metals at High Pressure," Proc. 4th Int. Conf. on High Pressures, The Physio-Chemical Soc. of Japan, Kyoto, 1975, pp. 130~137.
- (13) Oh, S. I. and Gegel, H. L., "ALPIDP-Modeling of P/M Forming by the Finite Element Method," Proc. of NAMRCXIV Conference, 1986.