

금속 분말의 항복조건에 관한 연구

박성준*, 한흥남**, 오규환*, 이동녕*

* 서울대학교 공과대학 재료공학부

** 신소재 박막가공 및 결정성장 연구센터

A Study on the Yield Criterion of Metal Powders

Seong-Jun Park, Heung Nam Han, Kyu Hwan Oh and Dong Nyung Lee

Abstract

A new yield criterion for metal powder compaction based on continuum mechanics has been proposed. It includes three parameters to characterize the geometrical hardening of powder compact and strain hardening of incompressible metal matrix. The elasto-plastic finite element method to describe compaction of metal powders has been formulated using the new yield criterion. The values of parameters in the yield criterion can be determined using cold isostatic pressing(CIP). The finite element method can simulate compaction behavior of various copper powders.

Key Words : Yield Criterion, Powder Compaction, Geometrical Hardening, Strain Hardening, Cold Isostatic Pressing(CIP)

1. 서론

분말야금에서 제품 제조의 기본 공정 중 하나인 압축성형 공정은 최종제품이나 중간제품을 생산하는 데에 많이 사용된다. 압축성형 공정의 효율적인 설계 및 제어와 제품의 품질 향상을 위하여, 최근 컴퓨터를 이용한 수치적 공정해석에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이를 위해서는 분말집합체의 변형거동을 나타낼 수 있는 항복조건이 필요하다. 다양한 모델로부터 얻어진 여러 항복조건들이 제안되어 있으나, 서로 다른 특성을 지니는 분말에 공통적으로 적용하기에는 아직 어려운 실정이다. 항복조건이 어떤 분말집합체의 변형을 보다 정확히 나타내기 위해서는, 그 분말의 항복곡면과 경화특성을 잘 나타낼 수 있도록 실험적으로 구해지는 파라미터가 필요하다. 이 연구에서는 분말의 입도, 형상등의 인자들이 분말집합체의 기하학적 경화특성에 미치는 영향을 반영할 수 있는 파라미터를 항복조건에 도입하고, 구리분말에 대한 정수압 압축시험을 통하여, 분말과 금형간의 마찰의 영향이 포함되지 않는 분말 항복조건의 파라미터를 얻었다. 이렇게 결정된 항복조건

을 이용하여 일축 압축공정에 대한 유한요소해석을 하고, 이를 실험결과와 비교하였다.

2. 이론

일반적인 다공성금속의 항복조건은 다음과 같이 표현된다.

$$2(1+\nu)J_2' + \frac{1-2\nu}{3}J_1^2 = Y_R^2 \quad (1)$$

여기서 $J_2' = \frac{1}{6}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2$

$$J_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$$

여기서 ν 와 Y_R 은 각각 결보기 프와송비와 분말집합체의 1축항복응력이다. Zhdanovich [1]는 다공성금속에 대하여 상대밀도와 프와송비 사이에 다음과 같은 관계가 성립한다고 제안하였다.

$$\nu = 0.5R^a \quad (2)$$

Kuhn [2]은 다공성 소결금속에 대한 실험결과로부터 식 (2)의 a 가 2에 가깝다고 보고하였다. 그러므로 다공성 소결금속의 항복조건은 식 (1)로부터 다음과 같이 상대밀도의 함수로 나타내어질 수 있다.

$$(2+R^2)J_2' + \frac{1-R^2}{3}J_1^2 = Y_R^2 \quad (3)$$

이동녕과 김형섭 [3]은 실험결과로부터 다공성 소결금속의 항복응력이 상대밀도에 비례함을 관찰하고, 이와 같은 기하학적 경화를 나타내는 파라미터, η , 를 이용하여 다음과 같은 항복조건을 제안하였다.

$$(2+R^2)J_2' + \frac{1-R^2}{3}J_1^2 = \eta Y_0^2 \quad (4)$$

$$\eta = \frac{Y_R^2}{Y_0^2} = \left(\frac{R - R_C}{1 - R_C} \right)^2 \quad (5)$$

여기서 R_C 는 재료에 따라 달라지는 실험적인 파라미터로 다공성 소결금속의 강도가 영이 되는 임계상대밀도이다. 식 (4)와 (5)는 다공성 소결금속에 적용되어 여러 가지 소성변형의 해석에 이용되었다 [4,5]. 분말집합체의 경우에는 주된 변형 메커니즘이, 상대밀도가 낮을 때에는 입계 미끄러짐과 입자 표면의 국부적 소성변형이며, 상대밀도가 높을 때에는 전체적으로 보다 균일하게 일어나는 소성변형이다 [6]. 따라서, 분말집합체에 대해서는 식 (4)와 (5)의 항복조건을 적용할 수 없다. 또한, 분말입자를 이루는 기지금속의 물성이 표면산화막과 제조공정등의 영향으로 각각 다를 것이나, 이를 직접 측정하여 알 수가 없다. 이 연구에서는 분말집합체의 밀도가 두드럼밀도와 같을 때부터 강도를 갖는다고 가정하고, 식 (4)과 (5)의 항복조건을 분말집합체에 적용하기 위하여, η 와 Y_0 를 각각 다음과 같이 표현하였다.

$$\eta = \frac{Y_R^2}{Y_0^2} = \left(\frac{R - R_T}{1 - R_T} \right)^m \quad (6)$$

$$Y_0 = K \bar{\epsilon}_0^n \quad (7)$$

여기서 R_T 와 $\bar{\epsilon}_0$ 은 각각 분말의 두드림 상대밀도(tap relative density)와 분말을 이루는 기지금속의 소성변형률이다. 식 (6)과 (7)의 m , K , n 은 분말집합체의 기하학적 경화와 기지금속의 변형경화를 나타내는 파라미터들로, 정수압 압축시험결과에서 비선형근사법으로 구하였다. 정수압 조건에서 식 (6) 과 (7)을 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$3(1-R^2)P^2 = \left(\frac{R - R_T}{1 - R_T} \right)^m \left\{ K \left[\int \left(\frac{R - R_T}{1 - R_T} \right)^{m/2} \frac{1}{\{3(1-R^2)\}^{1/2} R^2} dR \right]^n \right\}^2 \quad (8)$$

3. 실험방법

항복조건에 포함된 m , K , n 등의 파라미터를 결정하기 위하여, 30 - 170MPa의 압력 범위에서 정수압 압축시험을 하였다. 사용한 분말은 평균입도와 입자 형상이 다른 전해동분(electrolytic copper powder)과 수분사동분(water atomized copper powder)이고, 각 분말의 특성은 표 1.에 나타내었다. 분말의 형상은 그림 1에서 보는 바와 같이 수분사동분은 구형에 가깝고, 전해동분은 수지상(dendritic form)이다. 정수압 시험결과 얻어진 압분체의 밀도는 아르키메데스의 원리를 이용하여 측정하였다. 결정된 항복조건을 이용한 유한요소해석 결과를 일축 압축시험에서 비교하였다. 압축성형에 사용한 금형의 지름은 15mm이며, Instron 인장압축시험기를 이용하여, 1mm/min의 크로스헤드 속도로 하중이 5.5톤에 이르도록 압축하였다.

4. 결과 및 고찰

그림 2는 정수압 압축시험결과 얻어진 구리분말들의 정수압력과 상대밀도의 관계이다. 약 90Mpa이상의 정수압력하에서는 상대밀도가 모든 분말에서 비슷하게 나타나고 있으며, 이것은 입계 미끄러짐이나 입자표면에 국부적으로 집중된 소성변형보다는 전체적으로 균일하게 소성변형이 일어나고 있음을 나타내고 있다. 이와 같은 변형거동은 다공성 소결금속의 변형거동과 유사하며, 따라서 그림 3 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 m 값을 2로 고정하고 90Mpa 이상의 정수압하에서 얻어진 실험결과와 다공성 소결구리의 임계상대밀도를 이용하여, 수분사동과 전해동의 기지금속의 물성, K 와 n 을 결정하였다. 이와 같이 결정된 각 분말의 물성을 이용하여, 모든 압력 범위의 정수압 압축시험결과를 최적화 함으로써 각 분말의 기하학적 경화지수를 결정하였다. 각 분말의 결정된 파라미터

값들은 표 2.에 나타내었다. 그림 4 (a)-(d)는 미세한 수분무동분 및 전해동분의 정수압 압축시험결과와 이에 식 (8)을 최적화한 곡선을 나타내고 있다. 표 2.에 나타낸 파라미터 m 의 값은, 구형의 수분사동분의 경우가 수지상의 전해동분의 경우보다 더 작아 소결금속의 그것인 2에 가까운 값을 나타내고 있다. 이것은 전해동분의 경우 입자간 마찰이 작고, 표면의 불규칙한 거칠기가 적으므로, 두드림(tapping) 이후 압축 초기에 입계 미끄러짐 및 표면의 국부적인 소성변형이 적기 때문인 것으로 생각된다.

각 분말에 대해 결정된 항복조건을 시험하기 위하여, 일축 압축공정을 탄소성 유한요소 해석하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 그림 5는 유한요소해석에 사용된 초기 요소망이다. 그림 6 (a)-(d)에 미세한 수분사동분 및 전해동분의 일축 압축실험결과 얻어진 편치의 이동거리에 대한 하중의 증가를 계산결과와 비교하여 나타내었다. 실험결과와 계산결과가 좋은 일치를 보이고 있으며, 이것은 구리분말의 경우 정수압 상태에서 결정된, 기하학적 경화를 나타내는 파라미터, m , 에 의해 다른 응력상태에서의 분말집합체의 변형거동도 잘 표현되고 있음을 나타낸다.

5. 결론

금속분말집합체의 변형거동을 예측하기 위하여 다공성 금속에 적용되는 항복조건을 수정하였다. 수정된 항복조건은 분말의 다양한 입도 및 형상이 변형거동에 미치는 영향을 반영할 수 있는 기하학적 경화에 관한 파라미터와 기지금속의 변형경화를 나타내는 파라미터들을 포함하고 있으며, 이러한 파라미터들은 항복조건을 정수압 압축시험 결과에 최적화시킴으로써 결정하여 분말과 금형간의 마찰의 영향을 배제하였다. 기하학적 경화를 표현하는 파라미터 m 은 분말 형상이 복잡한 전해동의 경우가 더욱 커서 좋은 초기압축성을 나타내었으며, 수분무동의 경우는 소결금속의 값인 2에 가까운 압축초기부터 전체적으로 거의 균일하게 소성변형이 일어남을 나타내었다. 분말집합체의 항복조건을 이용하여 일축 압축공정의 탄소성 유한요소해석을 하였으며, 해석결과는 실험결과와 좋은 일치를 보였다.

참고문헌

1. G. M. Zhdanovich : *Theory of compaction of metal powders*, Translated from *Teorize Pressovaniya Metzllichaskikli Poroshkov*, pp. 1-262, (1969) by the Foreign Technology Division, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1971.
2. H. A. Kuhn : *Powder Metallurgy Processing*, Academic Press, New York, 1978, pp. 99 - 138.
3. D. N. Lee and H. S. Kim : *Powder Metall.*, 1992, vol. 35, pp. 275 - 279.
4. H. N. Han, H. S. Kim and D. N. Lee : *Scr. metall. mater.*, 1993, vol. 29, pp. 1211 - 1216.

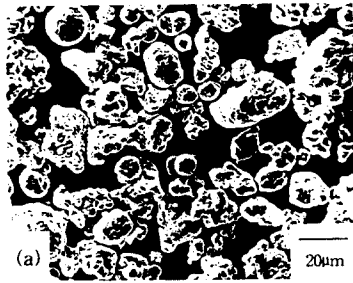
5. H. N. Han, H. S. Kim, K. H. Oh and D. N. Lee : *Powder Metall.*, 1994, vol. 37, pp. 140 - 146.
 6. P. J. James : *Powder Metall.*, 1977, vol. 20, pp. 199 - 204.

Table I. Characteristics of powders

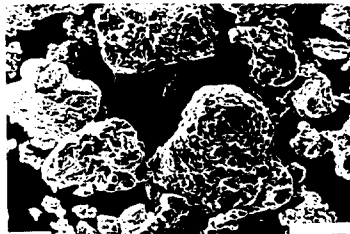
	Fine Water Atomized Copper Powder	Coarse Water Atomized Copper Powder	Fine Electrolytic Copper Powder	Coarse Electrolytic Copper Powder
Apparent Relative Density	0.395	0.356	0.203	0.161
Tap Relative Density	0.449	0.427	0.239	0.24
Purity	Cu 99.92%	Cu 99.88%	Cu 99.86%	Cu 99.95%
Particle Size Distribution (U.S. standard sieve, wt%)				
-140		1.0		
-140 ~ +200	1.4	20.8		0.7
-200 ~ +325	23.3	34.1	1.4	32.2
-325	75.3	44.1	98.6	67.1

Table II. The values of K, n, m, R_c and R_T for four different copper powders

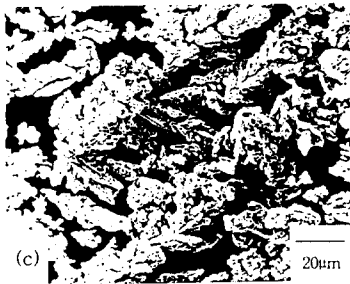
	K	n	m	R _c	R _T
Water-atomized Copper Powders at high pressure range	538.7	0.1996	2.000	0.45	-
Electrolytic Copper Powders at high pressure range	401.5	0.0731	2.000	0.45	-
Fine Water-Atomized Copper Powder	538.7	0.1996	2.026	-	0.449
Coarse Water-Atomized Copper Powder	538.7	0.1996	2.148	-	0.427
Fine Electrolytic Copper Powder	401.5	0.0731	3.255	-	0.239
Coarse Electrolytic Copper Powder	401.5	0.0731	3.464	-	0.240



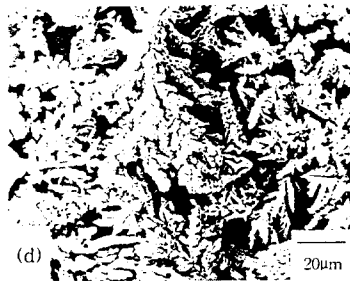
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1 Scanning electron micrographs of (a) fine water-atomized, (b) coarse water-atomized, (c) fine electrolytic and (d) coarse electrolytic copper powders.

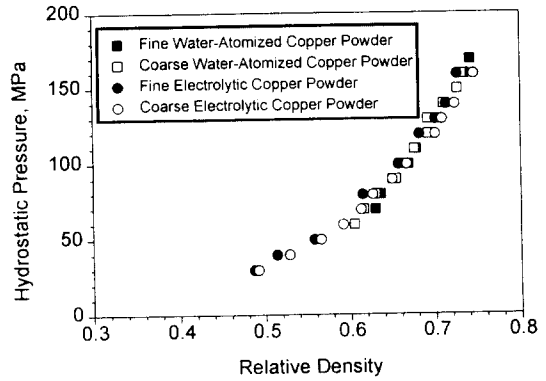
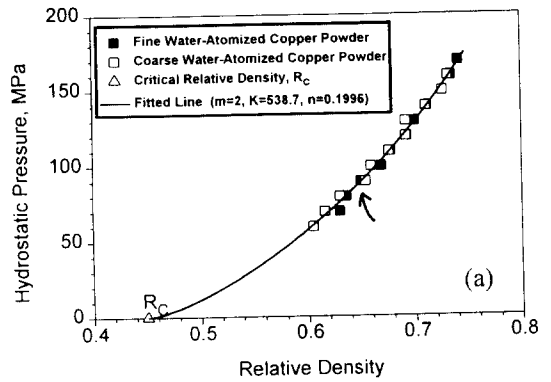
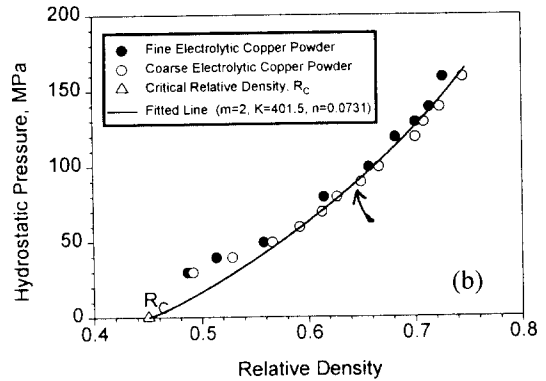


Fig. 2 Hydrostatic pressure as a function of relative density in cold isostatic pressing of copper powders.



(a)



(b)

Fig. 3 Hydrostatic pressure as a function of relative density in cold isostatic pressing of (a) water-atomized and (b) electrolytic copper powders. Arrow indicates a boundary at 90MPa.

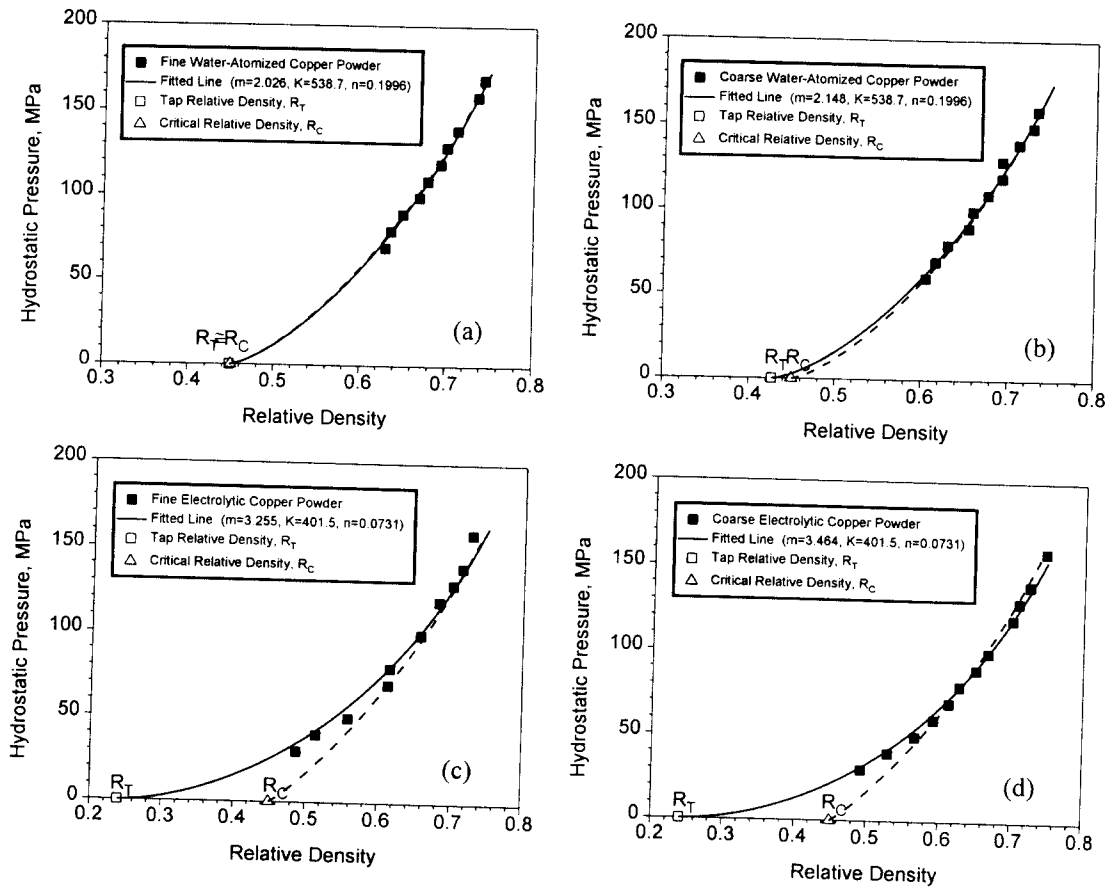


Fig. 4 Hydrostatic pressure as a function of relative density in cold isostatic pressing of (a) fine water-atomized, (b) coarse water-atomized, (c) fine electrolytic and (d) coarse electrolytic copper powders.

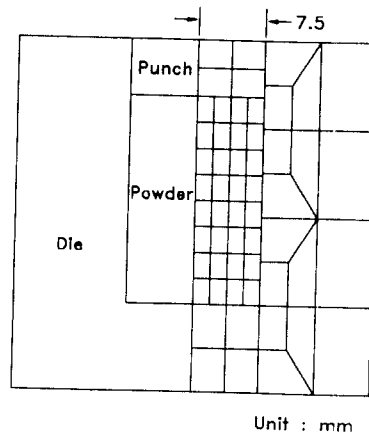


Fig. 5 Initial mesh for finite element analysis of single-action uniaxial powder compaction.

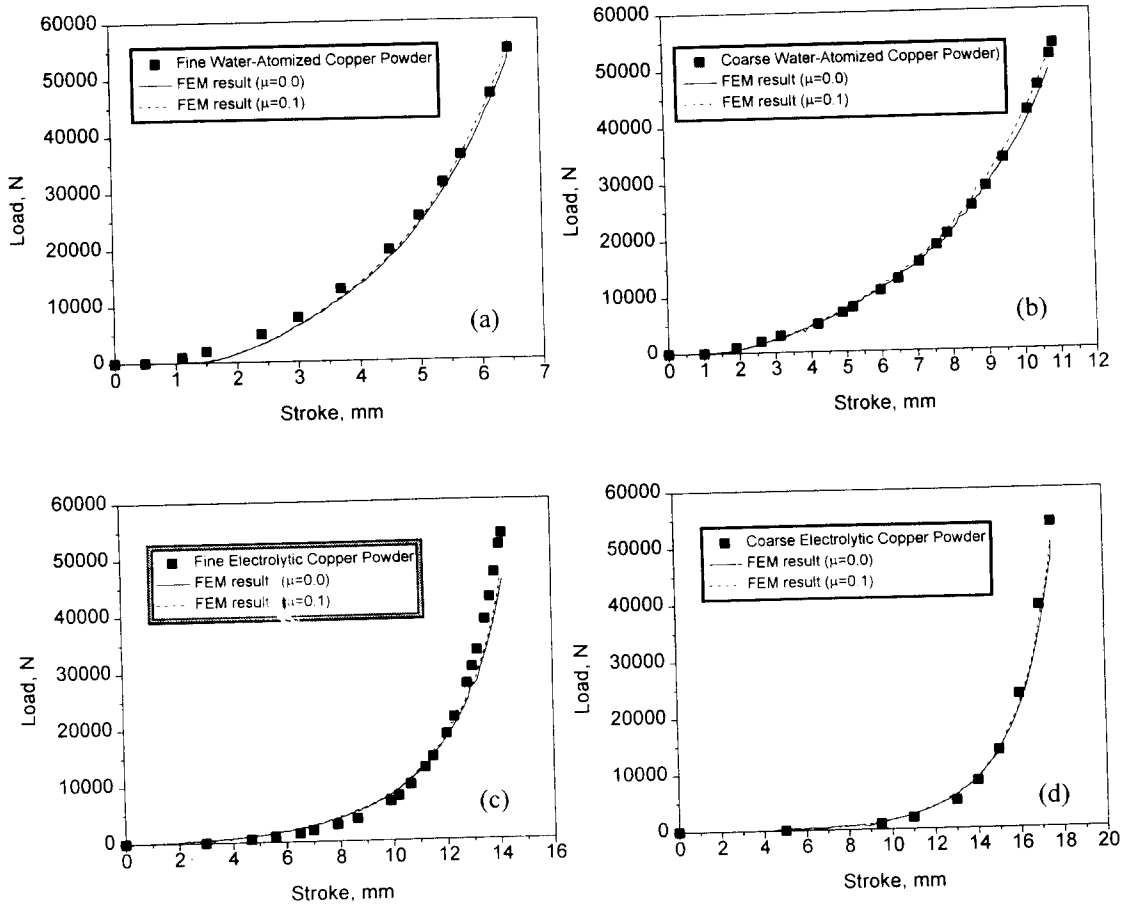


Fig. 6 Load as a function of stroke in single action uniaxial compaction of (a) fine water-atomized, (b) coarse water-atomized, (c) fine electrolytic and (d) coarse electrolytic copper powders.