

## 압흔하중식에 의한 금속소결분말체내에서의 밀도분포 예측

박종진 · 김진영\*

홍익대학교 기계공학과, 현대우주항공\*

## Prediction of Density Distribution in Sintered Metal Powder Compacts by Indentation Force Equation

Jong-Jin Park and Jin-Young Kim\*

(Received June 26, 1997)

**ABSTRACT** In most of sintered metal powder compacts, the sintered density distribution is controlled to be as high and uniform as possible to ensure the required mechanical properties. In general, the density distribution in the compacts is not uniform and not easy to measure. In the present study, a method for measuring the density distribution was developed, based on the indentation force equation by which the hardness and the relative density were related. The indentation force equation, expressed as a function of strength constant, work-hardening coefficient and relative density, was obtained by finite element analysis of rigid-ball indentation on sintered powder metal compacts. The present method was verified by comparing the predicted density distribution in the sintered Fe-0.5%C-2%Cu compacts with that obtained by experiments, in which the density distribution was directly measured by machining the compacts from the outer surface progressively.

### 1. 서 론

최근에 들어와 자동차, 산업기계, 가전제품의 부품 생산에 분말야금과 소결단조 기술이 적용되고 있다. 분말야금은 금속분말을 금형속에서 압축하여 성형체를 만들고 고온에서 소결하여 기공을 제거하는 기술인데 소결후에도 상당한 잔류기공으로 인하여 충격 에너지, 피로저항, 연성 등이 낮게 나타나는 문제점이 있다.<sup>1,3)</sup> 따라서 고강도를 요구하는 부품은 분말야금 후, 단조 등의 소성가공을 통하여 기공을 압착하여 제거하는 소결단조 기술이 사용된다. 소결단조에 의하여 제작되는 자동차 부품으로는 캠, 클러치, 허브, 콘넥팅로드, 신크로나이저 링 등이 있다.<sup>4,5)</sup> 소결단조기술의 핵심중의 하나는 밀도가 높고 균일한 부품을 제작하는 것이다. 하지만 일반적으로 불균일한 초기 밀도분포의 영향과 압축과 단조시 금형벽과의 마찰의 영향으로 최종제품은 불균일한 밀도분포를 나타낸다.<sup>6-14)</sup> 이러한 불균일한 밀도분포는 부품의 기계적 성질을 저하시키므로 주의하여야 한다. 따라서

제품내에서의 밀도분포 측정은 매우 중요하다. 보통 분말제품의 평균밀도 측정은 파라핀 침윤법 등을 이용하여 가능하다. 국부적인 밀도는 X선, gamma선, image 해석을 이용하는 방법등이 있지만 시편의 채취와 가공이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 실용적인 방법으로써 경도를 이용하여 상대밀도를 예측할 수 있는 방법을 제안하였는데, 그 이유는 경도 측정이 용이하므로 부품 전체에 대한 경도측정을 통하여 상대밀도 분포를 예측할 수 있기 때문이다. 상대밀도는 단위부피당 금속분말이 차지하고 있는 부피의 비율로써, 기공이 10% 존재할 경우의 상대밀도는 90% 또는 0.9로 나타낸다.

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다. 금속분말 소결체의 소성변형을 해석할 수 있는 유한요소해석 프로그램을 사용하여 강구에 의한 압흔시 압흔깊이와 압흔하중의 관계를 구하였다. 이 프로그램은 기지 금속을 강소성으로 가정하고, 소성변형시 분말간의 미끄럼을 무시한 다공성금속의 관련 유동법칙을 사용하였다. 압흔하중은 강구의 크기와 압흔깊이, 그리

고 상대밀도와 기지금속의 유동응력에 의존한다. 기지금속의 유동응력은 멱함수로 가정하여 강도계수와 가공경화지수로 나타낼 수 있다.  $R_B$ (Rockwell Hardness B Scale)에 사용하는 강구에 의한 압흔변형의 유한요소해석 결과로부터 압흔하중식을 압흔깊이와 상대밀도, 강도계수, 가공경화지수의 함수로 유도하였다. 따라서 분말제품의 상대밀도는 기지금속의 유동응력을 알면 압흔하중식을 사용하여  $R_B$  값으로부터 예측할 수 있다. 이러한 경도를 이용한 상대밀도 예측방법의 타당성을 검증하기 위하여 Fe-0.5%C-2%Cu 분말 소결체를 만들고, 이 소결체의 단면에 대한  $R_B$  경도분포를 측정하여 상대밀도분포를 예측하였다. 그리고 이 소결체를 정밀선반에서 원주방향으로 미량씩 절삭제거하여 상대밀도분포를 직접적으로 측정하고, 이를 이론적 예측치와 비교하였다.

## 2. 압흔하중식의 유도

일반적으로 경도측정은 강구 또는 뿔형태의 압자를 소재표면에 대고 일정한 하중을 가하여 발생하는 압흔깊이를 측정하여 구한다. 이러한 압흔변형에서는 탄성변형을 무시할 수 있으므로 경도는 소재표면이 가지고 있는 소성변형에 대한 저항성으로 설명할 수 있다. 따라서 경도는 상대밀도와 기지금속의 유동응력이 클수록 크게 나타난다. 금속분말 소결제품의 상대밀도는 대개 0.6과 1.0 사이의 값을 갖는다. 상온에서 기지금속의 유동응력은  $\sigma = Ke^n$ (MPa)와 같이 변형률의 멱함수로 가정할 수 있다. 공업용 금속들의 가공경화지수  $n$ 은 대개 0.0과 0.3 사이이고 항복강도는 약 1000 MPa 정도이다. 비커스경도, 누프경도나 로크웰 A, C, D 경도의 압자는 뿔형태로써 압흔위치에 따라 경도값이 크게 차이날 수 있으므로 압흔위치에 비교적 둔감한 강구의 압자가 바람직하다. 하지만 브리넬경도나 로크웰 E 경도의 강구는 국부적인 경도측정에 사용하기에는 너무 크다. 따라서 위와 같은 유동응력을 갖는 기지금속으로 이루어진 분말소결체의 경도측정은 로크웰 B 또는 G 경도의 강구가 알맞는 것으로 판단된다. 본 연구에서는  $R_B$ 를 사용하였는데, 이는 지름이 1/16 인치인 강구를 사용하여 100 Kgf의 하중을 적용하여 측정한다.<sup>15)</sup>

본 연구에서는 강소성 유한요소법을 사용하여  $R_B$  측정용 강구로 압흔할 때 분말소결체의 변형을 해석

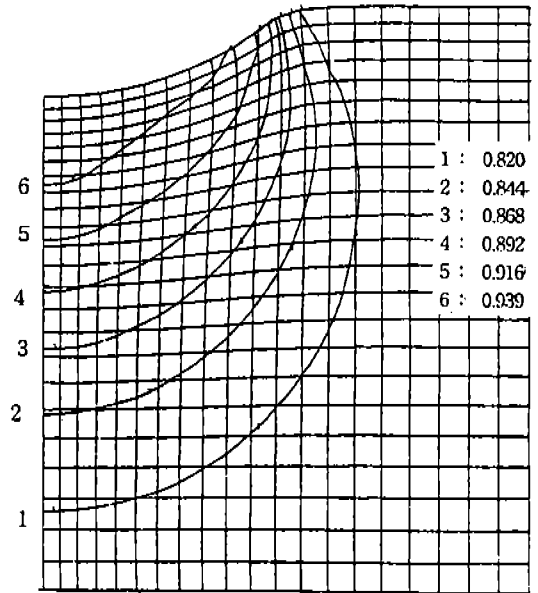


Fig. 1. Predicted density distribution by FEM under ball indentation; initial relative density=0.8, ball diameter=1/16 inch, indentation depth=0.2 mm.

하고 필요한 하중을 계산하였다. 그림 1에 강소성 유한요소법으로 구한 초기 상대밀도가 0.8인 분말소결체를 강구로 압흔하였을 때의 밀도변화가 도시되어 있다. 상대밀도는 강구와 접촉하고 있는 부위에서 가장 높으며, 강구에서 멀어질수록 점점 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 유한요소해석을 강도계수  $K$ 를 1200로 가정하고, 0.0, 0.1, 0.2, 0.3의  $n$ 값에 대하여, 0.8에서 1까지 0.05씩 상대밀도를 증가시키면서 수행하였다. 그림 2에 해석으로부터 구한 압흔하중과 압흔깊이의 관계를 도시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 압흔하중  $F$ 는 상대밀도  $R$ 과 압흔깊이  $d$ 의 증가에 따라 증가하나, 가공경화지수  $n$ 의 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 압흔하중  $F$ 와 압흔깊이  $d$ 의 관계는 다음과 같이 멱함수형태로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$F = Ad^m \quad (1)$$

여기서  $A$ 는  $n$ ,  $K$ 와  $R$ 의 함수로,  $m$ 은  $n$ 과  $R$ 의 함수로 가정하였다.  $A$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A = \frac{K}{1200} \left( \frac{A_n}{A_{n=0}} \right) = \frac{K}{1200} g'(R) g''(n, R) \quad (2)$$

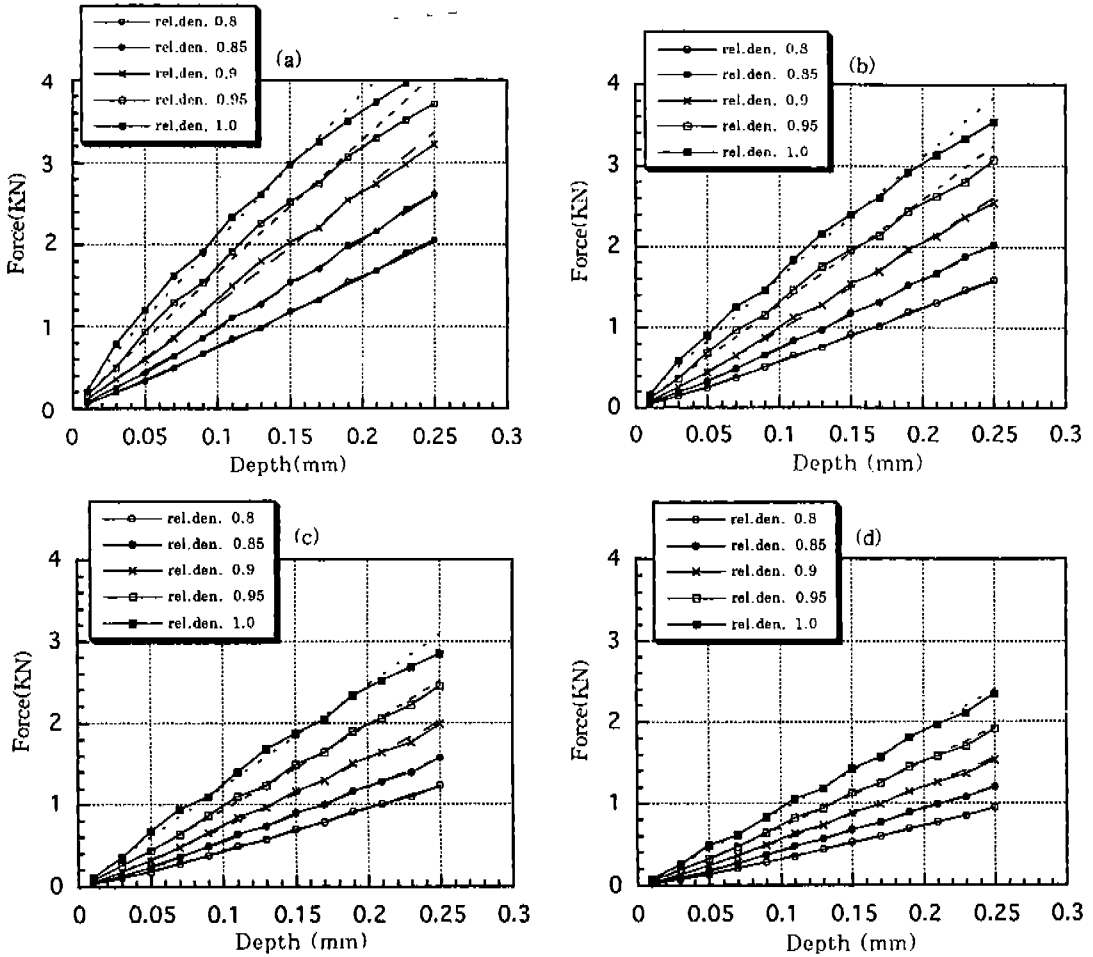


Fig. 2. Predicted force vs depth curves by FEM for various relative densities: (a) n=0.0, (b) n=0.1, (c) n=0.2, (d) n=0.3.

여기서 A는 K에 비례하고,  $g'(R)$ (또는  $A_{n=0}$ )은  $n=0.0$ 일 때의 A로써 상대밀도 R의 함수로,  $g''(n,R)$ 은 가공경화지수 n과 상대밀도 R의 함수로 가정하였다. 그림 2의 결과로부터 여러 가지 n 값에 대하여 상대 밀도와 A의 관계를 구하여 그림 3에 도시하였다.  $g'(R)$ 은 여러 가지 곡선중  $n=0.0$ 일 때의 곡선을 나타내며, 다음과 같은 이차방정식으로 표현할 수 있다.

$$g'(R)=A_{n=0}(KN)=-146.53R^2+300.54R-137.47 \quad (3)$$

만약 두개의 분말소결체가 기지금속의 강도계수만  $K_1$ 과  $K_2$ 로 다른 경우에는 기지금속 유동응력은 각각  $\bar{\sigma}_1=K_1\bar{\epsilon}^n$ ,  $\bar{\sigma}_2=K_2\bar{\epsilon}^n$ 으로 나타나며, 압흔하중은  $F_1=A_1d^m$ ,  $F_2=A_2d^m$ 으로 표현되므로  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{K_1}{K_2}$ 의 관계가 성립한다.

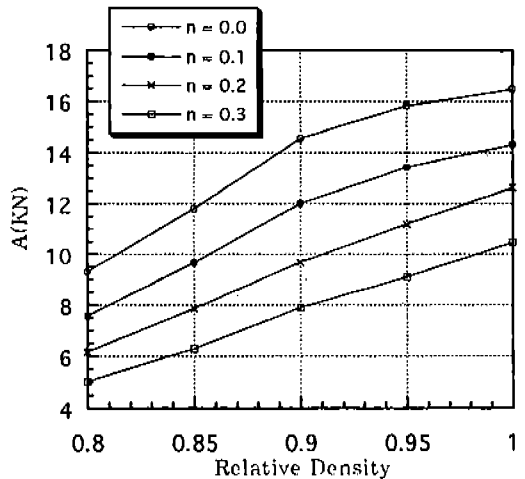


Fig. 3. A vs relative density curves for various n values.

식 (1)의 m과 식 (2)의  $g''(n, R)$ (또는  $A_n/A_{n=0}$ )은 그림 2로부터 n과 R의 함수로 나타낼 수 있다. 이들은 m 또는  $g''(n, R)$  n과 R을 좌표축으로 하는 삼차원 직각좌표공간에 곡면으로 나타난다. 이러한 곡면과 R 축과 n축에 각각 수직인 두 개씩의 평면들과의 교선을 고려하여 보면, 이 곡면은 네 개의 곡선변으로 이루어진 곡면(또는 패취)들의 조합으로 표현될 수 있다. 즉,  $(A_n/A_{n=0})$ -R-n 곡면은  $(A_n/A_{n=0})$ -n 곡선과  $(A_n/A_{n=0})$ -R 곡선으로 나타나는 곡면들의 조합으로, m-R-n 곡면은 m-n 곡선과 m-R 곡선으로 나타나는 곡면들의 조합으로 표현될 수 있다.

이러한 방법으로 구한  $(A_n/A_{n=0})$ -R-n 곡면은 아래의 식 (4)와 같이 표현된다. 여기서 R은 0.8에서 1.0까지, n은 0.0에서 0.3까지의 범위에 있다.

$$A_n/A_{n=0} = 14.80058nR^2 - (7.7n^2 + 22.73069n + 0.00014)R + 7.725n^2 + 6.70612n + 1.00011 \quad (4)$$

이 식을 사용하여 여러 가지 n과 R에 대하여 구한  $A_n/A_{n=0}$  값과 그림 2에 도시된 원래값들을 비교하여 보았는데, 최대오차가 약 2%로써 식 (4)가 정확하게 유도되었음을 알 수 있었다. 반면에 m-R-n 곡면은 아래의 식 (5)와 같이 표현된다. 여기서 R은 0.8에서 1.0까지, n은 0.0에서 0.3까지의 범위에 있다.

$$m = (6.88697n - 4.87891)R^2 - (0.75123n^2 + 11.43621n - 7.83653)R + 0.87624n^2 + 5.0345n - 2.05069 \quad (5)$$

이 식을 사용하여 여러 가지 n과 R에 대하여 구한 m 값과 그림 2에 도시된 원래값들을 비교하여 보면 최대오차가 약 1.4%로써 식 (5)가 정확하게 유도되었음을 알 수 있었다.

이와같이 식 (3)의  $A_{n=0}$ , 식 (4)의  $A_n/A_{n=0}$ 와 식 (5)의 m을 통하여 압흔하중을 K, n, R의 함수로 나타내었다. 따라서 분말소결체 지지금속의 K와 n을 알고, RB를 측정할 수 있다면  $R_B = 130-500d$ 로부터 압흔깊이 d(mm)를 구하고, 식 (3), (4), (5)를 상대밀도 R의 함수로 나타낼 수 있다. 최종적으로 식 (1)의 좌변을  $980(N)$ 으로 등치하여 상대밀도를 계산할 수 있다.

### 3. 금속분말소결체의 기계적 거동

#### 3.1 항복조건

일반적으로 다공성 금속의 항복함수 F는 다음과

같은 형태를 갖는다.<sup>16)</sup>

$$F = AJ_2 + BJ_1^2 = Y_R^2 = \delta Y_0^2 \quad (6)$$

여기서  $J_2$ 는 편차응력의 제2불변량,  $J_1$ 는 응력의 제1불변량이며,  $Y_R$ 는 분말소결체의 유동응력,  $Y_0$ 는 지지금속의 유동응력을 나타내며,  $\delta$ 는 상대밀도 R의 함수이다. 이 식에서  $Y_R$ 을 단축압축강도로 가정하면 A와 B사이에는  $B=1-A/3$  관계가 있음을 알 수 있다. 식 (6)을 분말소결체의 소성포텐셜(plastic potential)로 가정하면 응력과 변형률속도의 관계는 다음의 수직법칙을 적용하여 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \lambda \quad (7)$$

여기서  $\partial$ 는 편미분율,  $(\cdot)$ 은 시간에 대한 미분율,  $\sigma_{ij}$ 는 응력텐서의 성분율,  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률속도텐서의 성분율을 의미한다. 그리고  $\lambda$ 는 양의 비례상수이다.

원통형 분말소결체의 단순압축시에는  $\sigma_{11} = \sigma_{22} = 0$ ,  $\dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}_{22}$ 가 성립한다. 여기서 1, 2, 3은 극좌표계에서의 반경방향, 원주방향, 축방향을 나타낸다. 식 (7)에 이 응력상태를 적용하면 소성포아송비  $\nu$ 와 A의 관계가 다음과 같이 유도된다.

$$\nu = -\frac{\dot{\epsilon}_{11}}{\dot{\epsilon}_{33}} = 1 - \frac{A}{2} \quad (8)$$

따라서 A와 B는 소성포아송비의 함수로 표현된다. 일반적으로 분말소결체의 압축실험에 의하면 소성포아송비는  $\nu = 0.5R^n$ 와 같이 상대밀도의 함수로 표현된다. 지수 n은 재료에 따라 다르게 나타나므로 압축실험을 통하여 n을 구하여야 한다. 식 (8)과 Shima가 제안한  $\delta$ 를 사용하면 식 (6)은 다음과 같이 나타난다.

$$F = (2 + 2\nu)J_2 + \frac{1 - 2\nu}{3} J_1^2 = Y_R^2 = \frac{1.44R^5}{2.44 - R} Y_0^2 \quad (9)$$

#### 3.2 지지금속의 유동응력

경도를 이용하여 상대밀도를 구하기 위해서는 지지금속의 유동응력을 알아야 한다. 일반적으로 같은 합금성분이라 하여도 분말소결체 지지금속의 유동응력과 주조단련된 재료의 유동응력은 다르게 나타난다. 분말소결체 지지금속의 유동응력은 단순압축실험을 통하여 압축하중과 소성포아송비를 상대밀도의

함수로 구하고, 이를 식 (9)에 적용하여 구할 수 있다. 본 연구에서 사용된 재료는 Fe-2%Cu-0.5%C 분말합금으로써 기지금속의 절대밀도는 7.8 g/cm<sup>3</sup>이다. 이 분말을 원통형으로 압축한 후 아르곤가스 분위기에서 1050℃, 30분간 소결하여 지름과 높이가 각각 16 mm이고 평균초기밀도가 6.2 g/cm<sup>3</sup>와 6.5 g/cm<sup>3</sup>인 두 가지 종류의 시편을 제작하였다. 이러한 두 가지 시편들의 반은 900℃에서 10분간 가열한 후 유냉하는 열처리를 수행하였다. 열처리하는 시편의 밀도분포에 영향을 미치지 않으나 기계적 강도에는 영향을 미치므로 열처리를 하지 않은 시편과 상대밀도와 경도의 관계를 비교하기 위해서이다.

원통형 시편의 압축시 식 (8)의 분자와 분모는 각각  $\dot{\epsilon}_{11} = \ln\left(\frac{d}{d_0}\right)$ ,  $\dot{\epsilon}_{33} = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$ 으로 나타나며, d<sub>0</sub>와 h<sub>0</sub>는 각각 초기시편의 지름과 높이를, d와 h는 각각 측정시 시편의 지름과 높이를 나타낸다. 본 연구에서 수행한 실험에 의하면 Fe-2%Cu-0.5%C 분말소결의 소성포아송비는 식(10)과 같이 표현되었다.

$$v = 0.5R^{2.4} \quad (10)$$

기지금속 유효응력(Y<sub>0</sub>)은 기지금속 유효변형률(ε<sub>0</sub>)의 함수로 표현하여야 하는데, 이는 분말소결체의 유효응력(Y<sub>R</sub>)과 유효변형률(ε<sub>R</sub>)의 관계를 다음과 같이 변환시킴으로써 구할 수 있다. 우선 식 (10)의 소성포아송비를 이용하여 축방향 변형률증분(Δε<sub>33</sub>)에 대한 지름방향(Δε<sub>11</sub>)과 원주방향(Δε<sub>22</sub>)의 변형률증분을 구하고, 체적변형률증분(Δε<sub>v</sub>)을 구한다. 이에 따른 유효 변형률증분(Δε<sub>R</sub>)은 다음 식을 이용하여 구한다.

$$\overline{\Delta\epsilon_R^2} = \frac{2}{A} \Delta\epsilon_{ij}' \Delta\epsilon_{ij}' + \frac{1}{9B} \Delta\epsilon_v^2 \quad (11)$$

이러한 변형증분후의 상대밀도 R은 식 (12)를 이용하여 구한다.

$$R = R_0 \exp(-\Delta\epsilon_v) \quad (12)$$

δ는 식 (9)을 이용하여 구할 수 있고, 기지금속의 유효응력은 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다. 기지금속의 유효변형률증분은 아래의 식 (13)을 이용하여 구한다.

$$\overline{\Delta\epsilon_0} = \frac{\sqrt{\delta}}{R} \overline{\Delta\epsilon_R} \quad (13)$$

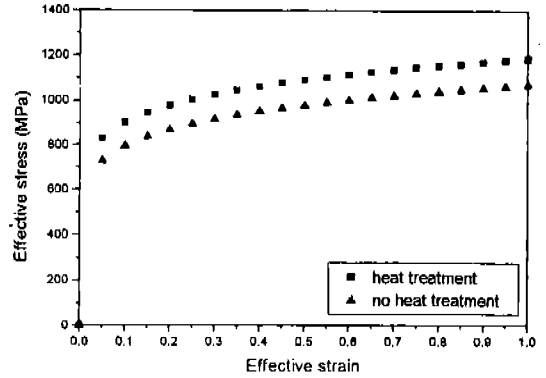


Fig. 4. Flow-stress curves of the matrix material of sintered Fe-0.5% C-2% Cu powder.

단순압축실험으로 구한 분말소결체의 유효응력과 변형률의 관계를 위와 같은 변환과정<sup>16)</sup>을 통하여 Fe-2%Cu-0.5%C 분말소결체 기지금속의 유효응력을 그림 4와 같이 구하였다.

#### 4. Fe-2%Cu-0.5% C 분말소결체의 상대밀도

일반적으로 분말소결체내의 밀도분포는 불균일하다. 그 이유는 압축금형에 투입된 분말의 초기밀도가 우선 불균일하며, 금형과의 마찰에 의하여 또한 금형 형상에 의하여 압축이 불균일하게 진행되기 때문이

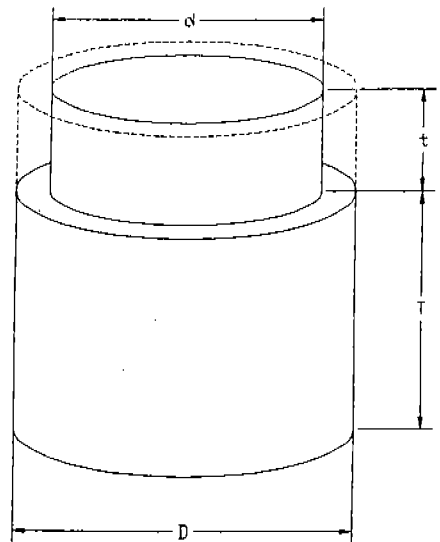


Fig. 5. Schematic diagram to represent the machining method for measurement of density distribution.

다. 소결후 단조와 같은 소성변형을 통하여 전체적인 밀도증가를 유도할 수 있으나, 불균일한 밀도분포를 수정하기는 매우 어렵다. 때로는 소성변형시 더욱 불균일한 밀도분포를 초래할 수도 있다.

본 연구에서는 원통형으로 소결된 Fe-2%Cu-0.5% C 시편의 밀도분포를 측정하기 위하여 절삭제거법을 사용하였다. 시편의 밀도분포는 축대칭으로 가정하였다. 그림 5에 도시되어 있듯이 원통형 시편을 CNC 정밀선반에서 원주방향으로 소량씩 절삭제거하고, 남은 시편의 부피와 무게를 고려하여 밀도분포를 구하였다. 시편은 평균밀도가 6.2 g/cm<sup>3</sup>와 6.5 g/cm<sup>3</sup>

인 두가지를 사용하였는데 지름과 높이가 각각 16 mm이었다. 절삭작업을 용이하게 하기 위하여 절삭 깊이가 1 mm 씩 진행될 때마다 척에 물리는 부분을 교대하였다. 시편지름이 4 mm 이하로 작아지면서 절삭이 곤란하였으므로 이 후에는 반경방향만으로 절단작업을 수행하였다. 밀도분포는 축대칭으로 가정하였으므로 시편단면의 오른쪽 반에 도시하였다. 이와같이 측정된 두 가지 시편의 상대밀도를 그림 6에 도시하였다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 밀도분포는 중앙부 바깥쪽이 가장 높고 상부 바깥쪽이 가장 낮으나, 상부와 하부의 밀도는 안쪽으로 증가하는 경향이 있다. 평균밀도가 6.5 g/cm<sup>3</sup>인 시편에서 약간의 상하

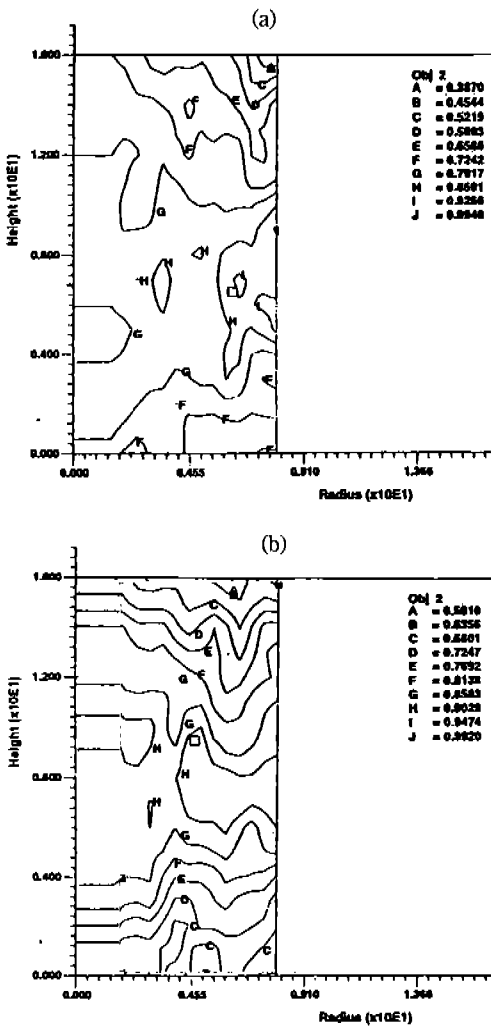


Fig. 6. Measured relative-density distributions of sintered Fe-0.5%C-2%Cu powder with two initial densities: (a) 6.2 g/cm<sup>3</sup>, (b) 6.5 g/cm<sup>3</sup>.

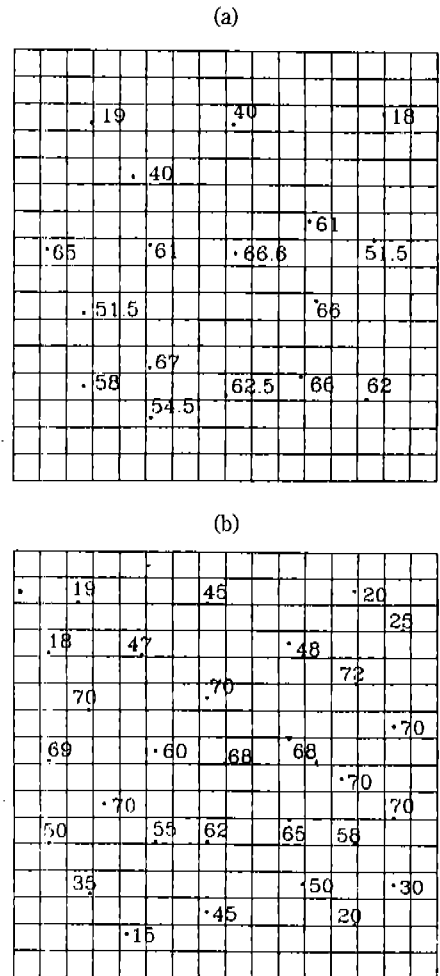


Fig. 7. Measured R<sub>k</sub> hardness distributions of sintered Fe-0.5%C-2%Cu powder with two initial densities(no heat treatment): (a) 6.2 g/cm<sup>3</sup>, (b) 6.5 g/cm<sup>3</sup>.

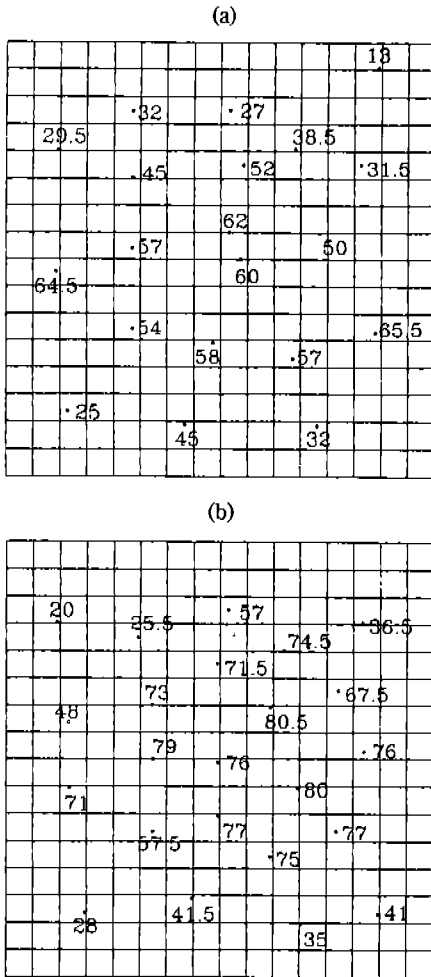


Fig. 8. Measured  $R_B$  hardness distributions of sintered Fe-0.5%C-2%Cu powder with two initial densities (heat treatment): (a) 6.2 g/cm<sup>3</sup>, (b) 6.5 g/cm<sup>3</sup>.

대칭성을 볼 수 있다.

이 두가지 시편의 경도분포를 측정했다. 이를 위하여 시편을 측정방향으로 절단한 후 단면을 연마기로 경면가공하고 베이크라이트에 마운팅시켜  $R_B$ 를 측정하였다. 그림 7과 8에 도시되어 있듯이 경도분포는 하부가 상부보다 높고, 안쪽이 바깥쪽보다 높게 나타났다. 그리고 대체적으로 시편의 중심축을 중심으로 좌우 대칭적인 분포를 보이고 있다. 이러한 분포는 위에서 구한 상대밀도 분포와 유사한 경향이다.

경도실험으로 측정된  $R_B$ 경도와 절삭실험으로 측정된 상대밀도와의 관계를 그림 9에 도시하였다. 예상한대로 상대밀도가 증가함에 따라 경도는 증가하

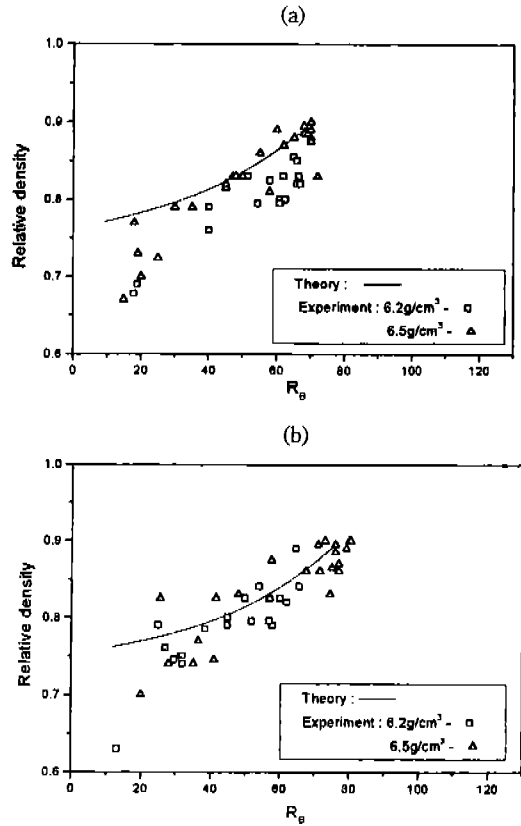


Fig. 9. Relationship between relative density vs  $R_B$  hardness for sintered Fe-0.5%C-2%Cu powder: (a) no heat treatment, (b) heat treatment.

지만 경도증가율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 기지 금속의 유동응력과 상대밀도를 압흔하중식에 대입하여 구한 경도값과 측정된 경도값을 비교하여 보면 상대밀도 0.8 이하에서는 큰 차이를 보이고 있으나 0.8 이상에서는 근사하게 나타나고 있다. 따라서 상대밀도 0.8 이상의 영역에서는 본 연구에서 유도한 압흔하중식을 이용하여 상대밀도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 상대밀도 0.8 이하에서 차이가 발생하는 이유는 압흔하중식을 유도하는 과정에서 상대밀도 0.8 이상을 기준으로 하였기 때문이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 금속분말 소결체의 밀도분포를 측정하는 방법으로써 경도를 이용하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 경도와 상대밀도의 관계를 나타내는

압흔하중식에 근거하고 있는데, 이 식은 강소성 유한 요소해석기술을 이용하여 유도하였다. 이 방법을 이용하기 위해서는 기지금속의 유동응력식을 알고 있어야 한다. 이 방법의 타당성을 검증하기 위하여 원통형 Fe-0.5%C-2%Cu 분말소결 시편을 제작하고, 시편 단면의 경도를 측정하고 압흔하중식을 적용하여 상대밀도를 예측하였다. 그리고 시편을 원주방향으로 절삭하여 상대밀도의 분포를 측정하였다. 예측치와 측정치를 비교하여 본 결과 상대밀도 0.8 이상의 영역에서는 전반적으로 양호하게 나타났다. 하지만 상대밀도 0.8 이하의 영역에서는 압흔하중식을 보완하여야 할 필요가 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 상대밀도 0.8 이상을 기준으로 압흔하중식을 유도하였기 때문이다.

본 연구에서 제안한 경도측정에 의한 상대밀도 예측방법을 실용적인 단계로 향상시키기 위해서는 많은 분말재료에 대한 실험적인 연구를 더 수행할 필요가 있다. 또한 상대밀도 0.8 이하의 영역에 대해서는 압흔하중식을 재유도하여야 할 것이다.

### 후 기

이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 핵심연구과제(KOSEF 951-1005-059-2)에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Fischmeister, H. F., Aren B. and Easterling K. E.: Powder Metall., **14** (1971) 144.
2. James W. B. and Powell R. A., "Powder Metallurgy Moves Ahead," Machine Design, September, 1983.
3. Arnold, V. and Beiss P., "Krebsoge-Portrait of a P/M Manufacturer," Int. J. Powder Metallurgy, **24**(1) (1988)

- 1.
4. Araki, S., Satoh, T., Takahara, H. and Ochi, T., "Application of Powder Forging to Automotive Connecting Rods," Kobe Steel Engineering Reports, **42**(1) (1992) 24.
5. Zhiyuan, Z dt.al., "Study on Powder Forging Process for the Steel Synchronizer Rings," Proc. 4th ICTP, Beijing, China, (1993) 1476.
6. Kuhn, H. A. and Downey, C. L., "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials," Int. J. Powder Metal., **7** (1971) 15.
7. Shima, S. and Oyane, M., "Plasticity Theory for Porous Metals," Int. J. Mech. Sci., **18** (1976) 285.
8. Im, Y. and Kobayashi, S., "Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Porous Materials", Metal Forming and Impact Mechanics, Editor S. R. Reid, Pergamon Press, (1985).
9. Oh, S. I., Wu, W. T. and Park J. J., "Application of the Finite Element Method to P/M Forming Processes", Proc. 2nd Int. Conf. Technology of Plasticity, Stuttgart, West Germany, August, (1987).
10. Kim, K. T. and Cho, Y. H., "분말단조해석을 위한 다공질 합금강 프리폼의 고온업셋," 단조 심포지움 '91, 한국소성가공학회, 한국단조공업협동조합, (1991) 14.
11. Kim, H. S. and Lee, D. N., "분말단조의 유한요소해석," 단조심포지움 '91, 한국소성가공학회, 한국단조공업협동조합, (1991) 7.
12. Haggblad, H. and Oldenburg, M., "Simulation of Cold Pressing of a Hard Metal Powder Component using Explicit Integration Methods," Proc. AEP, Hong Kong, (1992) 1007.
13. Park, J. J., "Finite Element Analysis of P/M Connecting Rod Forging", J. of KSTP, **1**(1) (1992) 33.
14. Jan. F. S. et al., "Effects of Temperature and Strain Rate on Flow Stress of Sintered Iron Powder," Proc. 4th ICTP, Beijing, China, (1993) 1487.
15. Boyer, H. E., Hardness Testing, Ed. ASM International, (1987) 118.
16. Park, J. J., "Constitutive Relations to Predict Plastic Deformations of Porous Metals in Compaction", Int. J. Mech. Sci., **37**(7) (1995) 709.