

경도를 이용한 소결압축금속분말의 상대밀도 예측

김진영* · 박종진**

(1997년 7월 10일 접수)

Prediction of Relative Density by Hardness in Compressed Sintered-Metal Powder

Jin-Young Kim and Jong-Jin Park

Abstract

Forging process on sintered powder metals has been applied to produce automotive parts which require a high level of strength. In those parts, the measurement of relative density is very important because a low relative density causes deterioration of strength. In the present study, an indentation force equation was proposed by which the result obtained from the hardness measurement is used to evaluate the relative density. This equation was applied to the prediction of the relative density in cylindrical specimens which were first sintered and then forged at the room temperature and at an elevated temperature. The experimental results were compared with predictions with and without consideration of the workhardening effect on the powder.

Key Words : Sintered Powder(소결분말), Forged Sintered Powder(단조소결분말), Relative Density(상대 밀도), Hardness(경도), Indentation(압흔), Finite Element Method (유한요소법)

1. 서론

최근에 들어와 금속분말을 소결하여 부품을 제조하는 분말야금기술과 열간단조 등의 소성가공기술을 접합하는 소결단조기술이 크게 발전하고 있다. 이 기술은 자동차, 산업기계, 가전제품의 부품 중 복잡한 형상과 더불어 고 강도를 요구하는 부품의 생산에 적용되고 있다. 이 기술은 금속분말을 금형속에서 압축하여 형상을 만들고 고온

에서 소결하여 분말간의 강도를 증가시킨 후, 소성가공을 통하여 잔류기공을 압착하여 강도를 재차 증가시키는 기술이다.^[1-3] 일반적으로 소결단조에 의하여 제작된 부품은 잔류기공을 2% 내지 3% 이내로 줄일 수 있으므로 피로 강도, 충격에너지 등의 기계적 강도가 분말야금제품에 비하여 크게 향상된다. 예를 들어 캠, 클러치, 허브, 콘넥팅 로드, 싱크로나이저 링 등의 부품이 있다.^[4,5] 이러한 제품의 기계적 성질은 주로 잔류기공의 평균비율과 더불어 잔

* 현대우주항공

** 홍익대학교 기계공학과

류기공의 분포에 의존한다. 평균비율이 낮다고 해도 국부적으로 잔류기공이 높은 부분이 존재하게 되면 부품의 전체적인 기계적 강도는 저하된다. 따라서 성공적인 소결단조제품을 생산하기 위해서는 제품내 잔류기공 분포의 예측과 이의 측정기술이 매우 중요하다.

위에서 언급하였듯이 소결단조제품은 상대밀도가 높고 균일하여야 한다. 상대밀도는 소결분말의 단위부피당 금속분말이 차지하고 있는 부피의 비율로써, 예를 들어 기공이 10% 존재할 경우의 상대밀도는 90% 또는 0.9로 나타난다. 일반적으로 소결단조제품은 압축금형에 분말삽입시 발생하는 불균일한 밀도분포와 압축과 단조시 금형의 형상과 마찰에 의하여 최종제품은 불균일한 밀도분포를 나타내므로 금형설계와 예비성형체설계시 이러한 점들을 고려하여야 한다.^{16, 17} 분말제품의 전체적인 평균밀도 측정엔 파라핀 침윤법 등을 이용하여 가능하다. 반면에 국부적인 밀도측정은 X 선, gamma 선, image 해석을 이용할 수 있지만 시편의 채취와 가공이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 최근에 제안된 경도를 이용하여 소결단조제품의 상대밀도분포를 예측할 수 있는 기법을 Fe-0.5%C-2%Cu 압축된 소결시편에 적용하여 보았다. 경도는 다른 방법에 비하여 측정이 비교적 용이하므로 부품 전체에 대한 경도측정을 통하여 상대밀도 분포를 예측할 수 있다.

2. 압흔하중식

최근에 소결단조금속의 경도가 상대밀도와 기지금속 유동응력에 의존하는 관계를 이용하여 경도와 상대밀도, 기지금속 유동응력의 관계를 규명한 연구가 수행되었다.^{11, 12} 이 연구에서는 R_B (Rockwell Hardness B Scale) 경도값을 상대밀도 R 과 기지금속 유동응력 식 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ 의 강도계수 K 와 가공경화지수 n 의 식으로 표현하였다. R_B 는 지름이 1/16 인치인 강구를 사용하여 0.98 KN의 하중을 적용하여 측정한다. 이 식을 압흔하중식이라고 부르며 다공성금속의 압흔시 소성변형에 대한 유한요소해석을 사용하여 유도하였다. Fig. 1은 초기상대밀도가 0.8 이었던 소재를 R_B 측정용 강구를 사용하여 압흔하였을 때 발생한 상대밀도분포에 대한 유한요소해석 결과이다. 이와 같은 해석을 여러 가지 n 값과 상대밀도에 대하여 수행하여 압흔하중식을 구하였다. 이 해석에서는 기지금속을 강소성체로 가정하고, 소성변형시 분말간의 미끄러움을 무시한 다공성금속의 관련 유동법칙을 사용하였다.

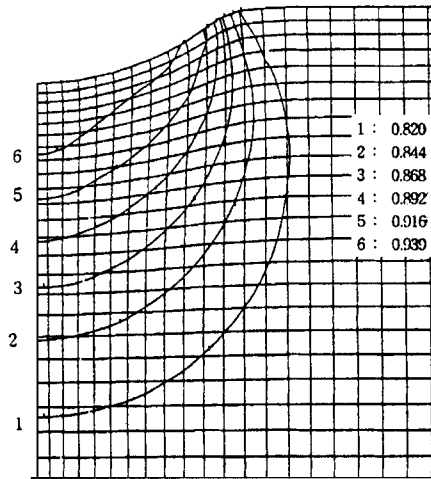


Fig. 1 Predicted relative-density distributions by FEM under ball indentation; initial relative density = 0.8, ball diameter = 1/16 inch, indentation depth = 0.2 mm

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. 소결분말금속의 상대밀도는 대개 0.6과 1.0 사이의 값을 갖는다. 상온에서 기지금속 유동응력식 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ 의 n 은 일반적으로 0.0과 0.3 사이이고 강도계수는 약 1200 MPa 정도이다. 이러한 소재의 소결분말체 경도분포 측정에는 R_B 가 가장 타당한 것으로 판단되었다.¹⁶

압흔하중식을 간단히 요약하면 다음과 같다. 압흔하중 F 와 압흔깊이 d 의 관계를 다음과 같이 멱함수로 가정하였다.

$$F = Ad^m \tag{1}$$

여기서 A 는 n , K 와 R 의 함수로, m 은 n 과 R 의 함수로 가정하였다. A 는 다음과 같이 표현하였다.

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

여기서 A 는 K 에 비례하고, $g'(R)$ 은 $n=0.0$ 일 때의 A 로써 상대밀도 R 의 함수로, $g''(n, R)$ 은 가공경화지수 n 과 상대밀도 R 의 함수로 가정하였다. $g'(R)$ 은 다음과 같은 이차방정식으로 표현할 수 있었다.

$$g'(R) = -146.53R^2 + 300.54R - 137.47 \quad (3)$$

식(1)의 m 과 식(2)의 $g'(R)$ 은 각각 식(4)와 식(5)로써 되었다. 이 식들은 R 은 0.8에서 1.0까지, n 은 0.0에서 0.3까지의 범위에 대하여 커브피팅하여 유도하였다.

$$m = (6.88697n - 4.87891)R^2 - (0.75123n^2 + 11.43621n^2 - 7.83653)R + 0.87624n^2 + 5.0345n - 2.05069 \quad (4)$$

$$g''(n, R) = 14.80058nR^2 - (7.7n^2 + 22.73069n + 0.00014)R + 7.725n^2 + 6.70612n + 1.00011 \quad (5)$$

이와같이 식(3)의 $g'(R)$, 식(4)의 m 과 식(5)의 $g''(n, R)$ 을 통하여 압흔하중을 K, n, R 의 함수로 나타내었다. 따라서 분말소결체 지지금속의 K 와 n 을 알고, R_0 를 측정할 수 있다면 $R_0 = 130 - 500d$ 의 관계로부터 압흔 깊이 d (mm)를 구하고, 식(3), (4), (5)를 상대밀도 R 의 함수로 나타낼 수 있다. 최종적으로 식(1)은 R 의 함수로 표현되며, 이 식의 좌변을 0.98(KN)으로 등치하여 상대 밀도를 구할 수 있다. 역으로 압흔하중식을 사용하여 상대 밀도로부터 경도를 구할 수도 있다.

본 연구에서는 이러한 압흔하중식을 압축된 소결분말체의 상대밀도 예측에 적용하여 보았다. 압축된 시편은 지지금속이 변형을 받아 가공경화를 하였으므로 압흔하중식을 적용할 때 가공경화효과를 고려하여야 한다. Fig. 2에 도

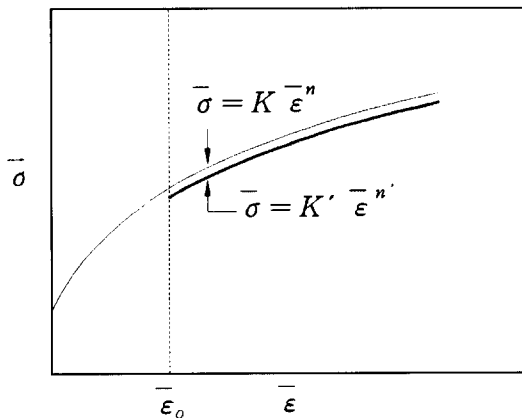


Fig. 2 Modification of flow stress equation for a material point with pre-strain

시되어 있듯이 초기의 지지금속 유동응력이 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ 로 나타난 소결분말이 소성변형을 받아 변형률을 갖게 되면 이 때의 지지금속 유동응력은 $\bar{\sigma} = K'\bar{\epsilon}'^n$ 와 같이 표현된다. 따라서 압흔하중식에서는 K 와 n 대신 K' 와 n' 를 사용하여야 한다.

3. 상대밀도의 예측

위에서 설명한 압흔하중식은 경도와 상대밀도의 관계를 나타낸다. 본 연구에서는 이 식을 이용하여 냉간과 열간에서 압축된 Fe-0.5%C-2%Cu 소결분말체내의 상대 밀도분포를 예측하여 보았다. Fe-2%Cu-0.5%C 분말합금의 절대밀도는 약 7.8 g/cm³이다. 이 분말을 원통형으로 냉간에서 압축한 후 아르곤개스 분위기에서 1050℃, 30분간 소결한 후 서냉하여 지름과 높이가 각각 16 mm 이고 평균초기밀도가 6.2 g/cm³와 6.5 g/cm³인 두가지 종류의 시편을 제작하였다. 이 소결체의 단면을 취하여 R_0 경도분포를 측정하고 압흔하중식을 이용하여 상대밀도분포를 예측하였다. Fig. 3에는 압축 전의 소결체를 정밀선반에서 원주방향으로 미세량씩 절삭제거하여 측정된 상대밀도 분포가 도시되어있다. 상대밀도의 분포를 측정치로 가정하였으므로 단면의 우측반만 사용하여 도시하였다. 6.2 g/cm³ 시편의 경우에는 평균 상대밀도가 0.79로써 최고 0.994에서 최저 0.387의 분포를 나타내며, 반면에 6.5 g/cm³ 시편의 경우에는 평균 상대밀도가 0.83으로써 최고 0.992에서 최저 0.591의 분포를 나타낸다. 두 경우 다 중앙부의 밀도가 높고 상하 바깥쪽 코너가 낮은 불균일한 분포를 나타내고 있다. 이러한 초기 상대밀도 분포를 갖는 시편을 냉간과 열간에서 압축하였을때 상대 밀도와 지지금속 변형률을 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM을 사용하여 구하고 압흔하중식을 이용하여 경도를 예측하여 보았다. 그리고 이를 측정된 경도와 비교하였다. 해석시 초기 시편내의 상대밀도분포는 절삭으로 측정된 불균일분포를 사용하였다.

3.1 냉간압축

압흔하중식을 이용하여 상대밀도를 구하기 위해서는 지지금속의 유동응력을 알아야 한다. 일반적으로 같은 합금 성분이라 하여도 소결분말체 지지금속의 유동응력과 주조 단련된 소재의 유동응력은 다르게 나타난다. 소결분말체 지지금속의 유동응력은 소결분말의 단순압축실험을 통하여 구할 수 있다.^[17] 본 연구에서 사용한 시편의 지지금속

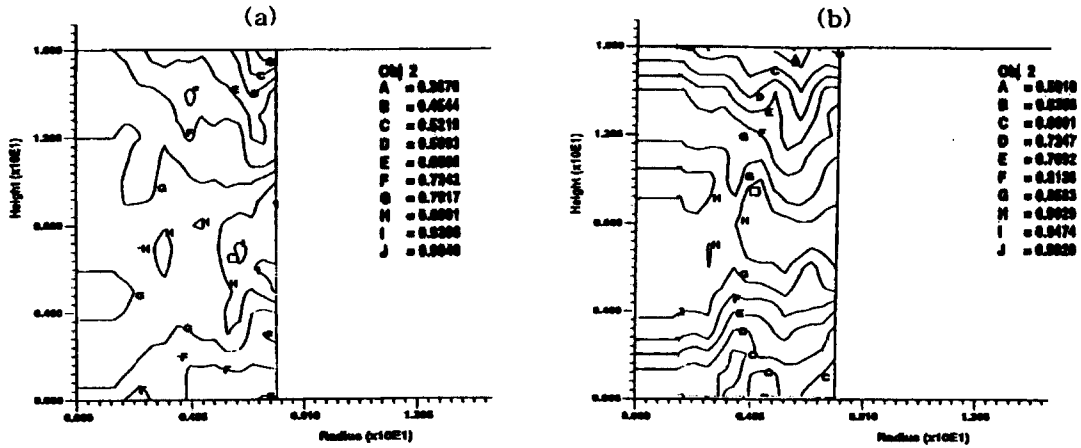


Fig. 3 Measured relative-density distributions of sintered Fe-0.5% C-2% Cu powder: (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

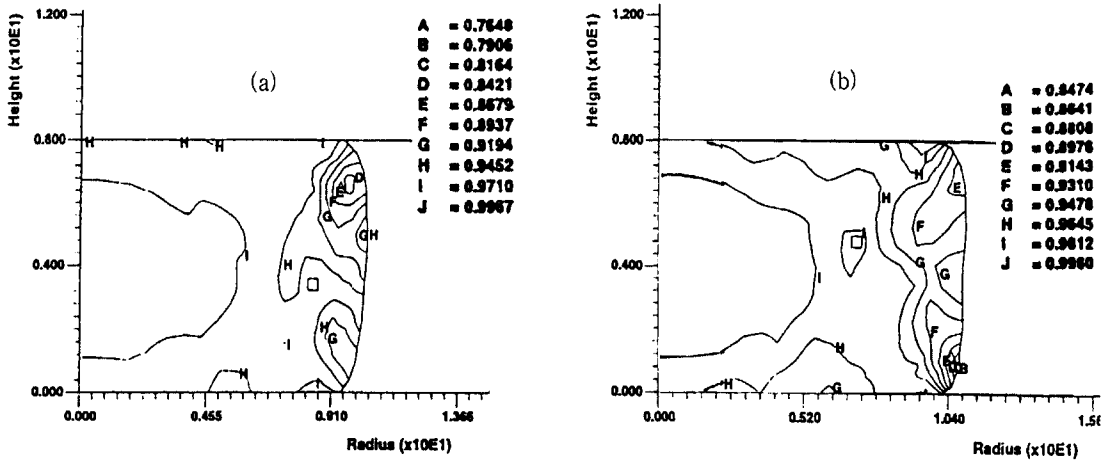


Fig. 4 Predicted relative-density distributions by FEM at 50% reduction in height(cold forged): (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

유동응력은 $Y_v = 1072\bar{\epsilon}_v^{0.13}$ 로 나타났다. Fig. 4의 (a)와 (b)에는 각각 초기밀도가 6.2 g/cm³와 6.5 g/cm³인 시편을 50% 압축하였을때의 상대밀도분포에 대한 유한요소 해석 결과가 도시되어 있다. 두 경우 공통적으로 중앙부가 높고, 상하 바깥쪽 코너로 갈수록 낮게 나타났다. (a)는 최고 0.997에서 최저 0.765로 분포되었고, (b)는 최고 0.998에서 최저 0.847로써 (a)에 비하여 전반적으로 높고 고르게 분포되었다. Fig. 5의 (a)와 (b)에는 기지금속의 변형률에 대한 유한요소해석 결과가 도시되어 있다. 상대밀도의 분포와 유사하게 중앙부에서 높으며, 상하 바깥쪽으로 갈수록 낮게 나타났다. (a)는 최고 0.907에서 최

저 0.277로 분포되었고, (b)는 최고 0.938에서 최저 0.344로 (a)에 비하여 전반적으로 높게 나타났다. Fig. 6의 (a)와 (b)에는 측정된 R_p 경도값이 도시되어 있다. 상대밀도와 변형률의 분포와 유사하게 중앙부가 높으며 상하 코너로 갈수록 낮게 나타났다. 경도분포는 완전하지는 않지만 축대칭 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7에는 상대밀도에 대한 예측된 경도값과 측정된 경도값을 비교하여 보았다. 유한요소해석으로 구한 상대밀도를 가공경화효과를 무시하고 압흔하중식에 대입하여 구한 경도를 실선으로 나타내었으며, 가공경화를 고려하여 구한 경도를 (x)기호로 나타내었다. 실험으로 측정한

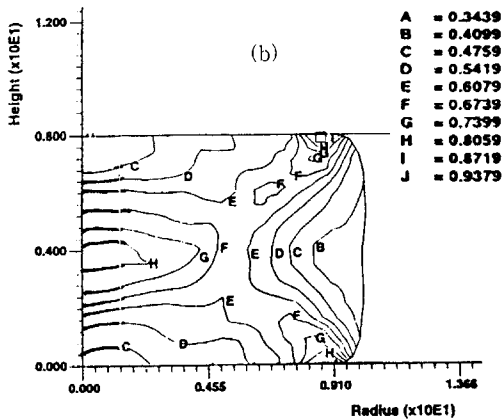
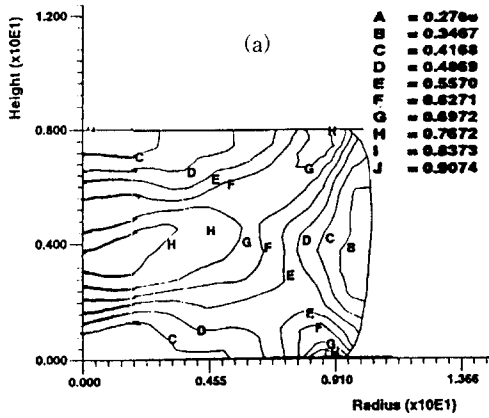


Fig. 5 Predicted distributions of effective strain of matrix material by FEM at 50% reduction in height(cold forged): (a) 6.2 g/cm³, (b) 6.5 g/cm³

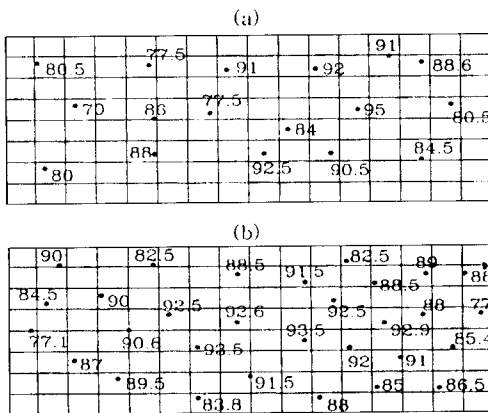


Fig. 6 Measured R_n hardness distributions at 50% reduction in height(cold forged): (a) 6.2 g/cm³, (b) 6.5 g/cm³

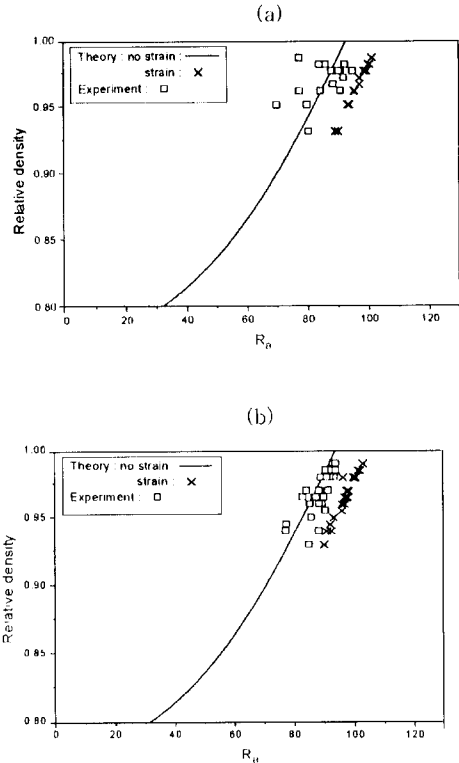


Fig. 7 Relationship between relative density vs RB hardness for sintered Fe-0.5% C-2% Cu powder(cold forged): (a) 6.2 g/cm³, (b) 6.5 g/cm³

경도를 (n)기호로 나타내었다. (a)와 (b)의 두 경우 예측 값과 실험값이 모두 상대밀도가 증가할수록 경도가 증가하는 경향을 나타내며, 가공경화를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 높은 경도를 나타내고 있다. 하지만 예상과 다르게 실험값은 가공경화를 고려하지 않은 경우에 근접하고 있다.

3.2 열간압축

초기밀도가 6.2 g/cm³와 6.5 g/cm³인 시편을 아르곤 개스 분위기에서 900℃, 10분간 가열한 후 상온의 평균 사이에서 부유했 상태로 압축하고 곧 광물유에 넣어 냉각하였다. 단면을 취하여 경도분포를 측정하였다. 이러한 시편의 지지금속 유동응력을 구하기 위하여 동일한 열처리를 수행한 후 압축실험을 통하여 측정하였다. 이 시편의 지지금속 유동응력은 $Y_u = 1188\epsilon^{0.12} (MPa)$ 로써 열처리하지 않은 시편보다 강도계수가 약 11% 크게 나타났으며 가공경화지수는 약간 감소하였다. Fig. 8의 (a)와 (b)에

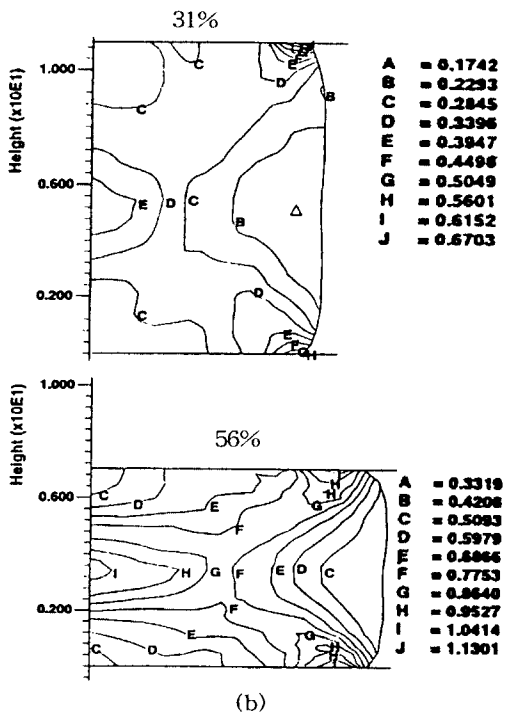
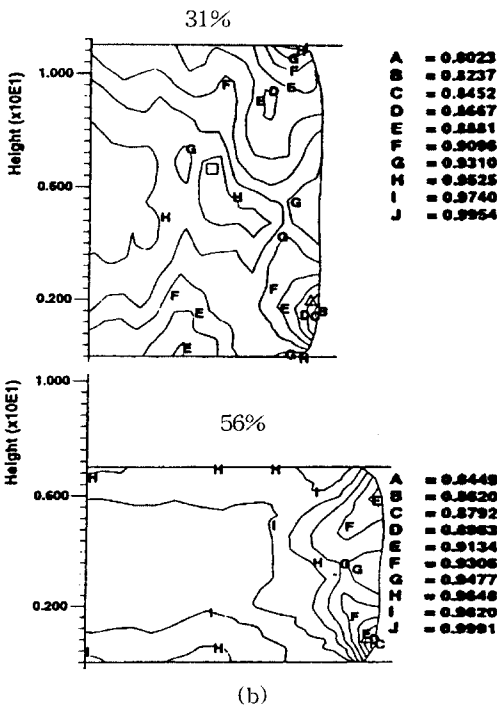
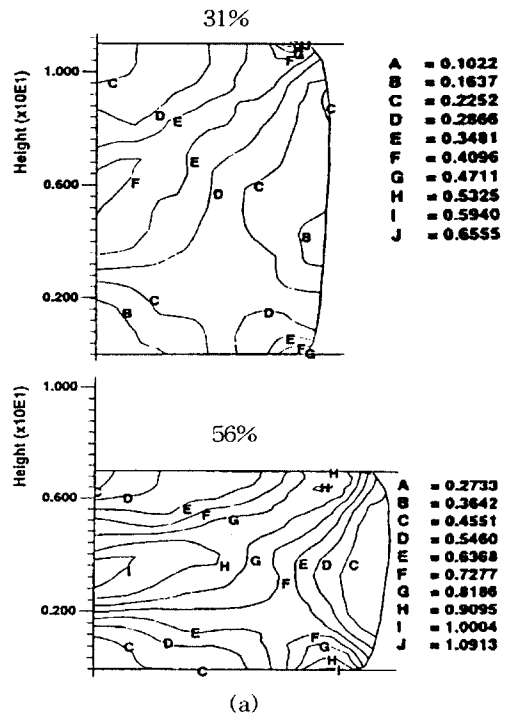
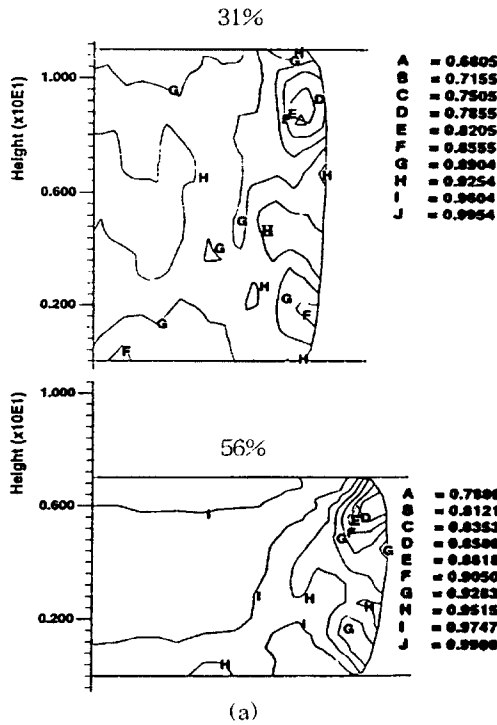


Fig. 8 Predicted relative-density distributions by FEM at 31% and 56% reductions in height(hot forged); (a) 6.2 g/cm³, (b) 6.5 g/cm³

Fig. 9 Predicted distributions of effective strain of matrix material by FEM at 31% and 56% reductions in height(hot forged); (a) 6.2 g/cm³, (b) 6.5 g/cm³

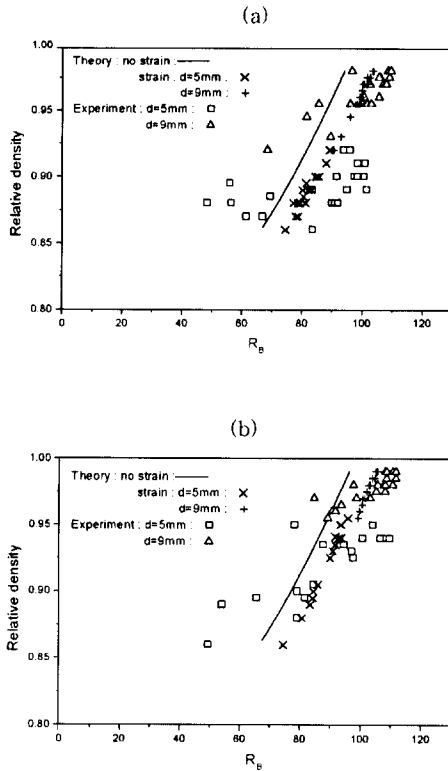


Fig. 11 Relationship between relative density vs R_B hardness for sintered Fe-0.5%C-2%Cu powder(hot forged); (a) 6.2 g/cm³, (b) 6.5 g/cm³

고, 냉간과 열간에서 압축된 원통형 Fe-0.5%C-2%Cu 소결분말체내의 상대밀도 분포를 예측하여 보았다. 실험값과 예측값을 비교하여 본 결과 다음과 같은 결론에 도달하게 되었다. 냉간압축의 경우에는 실험값은 변형률을 고려하지 않은, 즉 가공경화효과를 고려하지 않은 예측치에 더 가깝게 나타났다. 이러한 결과는 예상과 어긋나는 것으로 원인은 유동응력 측정과 초기 상대밀도 측정시 발생하였던 오차에 기인하는 것으로 사료된다. 반면에 열간압축 결과를 보면 예상대로 실험값은 변형률을 고려한, 즉 가공경화효과를 고려한 경우에 더 가깝게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서 제안한 압흔하중식은 상대밀도의 상대적인 또는 정성적인 비교와 상대밀도분포의 경향을 예측하는데 응용될 수 있을 것이다. 실험결과에 따르면 유사한 상대밀도에 대한 경도측정값이 경우에 따라서는 10 내지 20 R_B 정도의 차이를 나타내고 있으므로 압흔하중식에 의하여 정확한 상대밀도를 예측하기는 어려울 것이다.

후 기

이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 핵심연구과제(KOSEF 951-1005-059-2)에 의하여 수행되었습니다. 이 연구수행에 많은 도움을 주신 한국기계연구원 정형식 박사, 이정환 박사, 이영선 연구원, 한상호 기능장께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Fischmeister, H. F., Aren B. and Easterling K. E., 1971, : Powder Metall., 14, p.144.
- (2) James W. B. and Powell R. A., 1983, "Powder Metallurgy Moves Ahead", Machine Design, September.
- (3) Arnhold, V. and Beiss P., 1988, "Krebsoge - Portrait of a P/M Manufacturer", Int. J. Powder Metallurgy, Vol.24, No.1.
- (4) Araki, S., Satoh, T., Takahara, H. and Ochi, T., 1992, "Application of Powder Forging to Automotive Connecting Rods", Kobe Steel Engineering Reports, Vol.42, No.1, p.24.
- (5) Zhiyuan, Z et al., 1993, "Study on Powder Forging Process for the Steel Synchronizer Rings, Proc. 4th ICTP, Beijing, China, p.1476.
- (6) Kuhn, H. A. and Downey, C. L., 1971, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials", Int. J. Powder Metal., 7, p.15.
- (7) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals", Int. J. Mech. Sci., Vol.18, p.285.
- (8) Im, Y. and Kobayashi, S., 1985, "Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Porous Materials", Metal Forming and Impact Mechanics, Editor S. R. Reid, Pergamon Press.
- (9) Oh, S. I., Wu, W. T. and Park J. J., 1987, "Application of the Finite Element Method to P/M Forming Processes", Proc. 2nd Int. Conf. Technology of Plasticity, Stuttgart, West Germany, August.
- (10) Haggblad, H. and Oldenburg, M., 1992, "Simula-

- tion of Cold Pressing of a Hard Metal Powder Component using Explicit Integration Methods", Proc. AEPA, Hong Kong, p.1077.
- (11) Park, J. J., 1992, "Finite Element Analysis of P/M Connecting Rod Forging", J. of KSTP, Vol.1, No.1, p.33.
- (12) Jan. F. S. et al., 1993, "Effects of Temperature and Strain Rate on Flow Stress of Sintered Iron Powder", Proc. 4th ICTP, Beijing, China, p.1487.
- (13) Cho, H. K., Suh, J. and Kim, K. T., 1994, "Densification of Porous Alloy Steel Preforms at High Temperature", Int. J. Mech. Sci., Vol.36, pp.317~328.
- (14) Fleck, N. A., Otoyoy, H. and Needleman, A., 1992, "Indentation of Porous Solids", Int. J. Solid Structures, Vol.29, pp.1613~1636.
- (15) 김진영, 박종진, 1997, "소결분말금속에서 상대밀도와 RB경도의 관계", 한국분말야금학회 제출.
- (16) Boyer, H. E., 1987, Hardness Testing, Ed. ASM International, p.118.
- (17) Park, J. J., 1995, "Constitutive Relations to Predict Plastic Deformations of Porous Metals in Compaction", Int. J. Mech. Sci., Vol.37, No.7, p.709.