

금속분말소결체의 경도와 상대밀도 관계

박종진

홍익대학교 공과대학 기계공학과

Relationship between Hardness and Relative Density in Sintered Metal Powder Compacts

Jong-Jin Park

Department of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

Abstract

In the present study, a method for measuring the relative density by the hardness measurement was proposed for sintered metal powder compacts. It is based on the indentation force equation, by which the relative density is related with the hardness, that was obtained by the finite element analysis of rigid-ball indentation on sintered metal powder compacts. For verifying the method, it was applied to prediction of density distributions in sintered and sintered-and-forged Fe-0.5%C-2%Cu powder compacts.

Key Words: Sintered Metal Powder(소결금속분말), Relative Density(상대밀도), Hardness(경도), Indentation(압흔), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

분말야금은 금속분말을 금형속에서 압축하여 성형체(green compact)를 만들고 고온에서 소결(sintering)하여 기공을 제거하여 제품을 생산하는 기술이다. 하지만 잔류기공으로 인하여 충격에너지, 피로저항, 연성 등이 낮게 나타나므로 고강도를 요구하는 부품은 분말야금과 열간단조를 통하여 잔류기공을 압착하여 제거하는 소결단조 기술이 사용된다[1-5]. 소결단조 기술이 지향하는 목표중 하나는 밀도가 높고 밀도분포가 균일한 부품을 생산하는 것이다. 하지만 불균일한 초기 밀도분포와 압축과 단조시 금형벽과의 마찰에 의하여 최종제품은 불균일한 밀도분포를 나타낸다[6-9]. 불균일한 밀도분포는 제품의 기계적 강도를 저하시키므로 이를 미리 측정하여 선별하여야 한다. 분말제품의 밀도측정은 파라핀 침윤법 등을 이용하여 가능하며 그외에 X 선, gamma 선, image 분석을 이용하는 방법등이 있다. 하지만 이러한 방법에서는 시편의 채취와 가공이 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 비교적 측정이 용이한 경도를 이용하여 상대밀도를 예측할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다. 구형압자에 의한 금속분말 소결체의 압흔변형을 유한요소법으로 해석하고, 해석결과로부터 압흔하중을 압흔깊이, 상대밀도, 강도계수, 가공경화지수로 구할 수 있는 압흔하중식을 유도하였다. 그리고 이 압흔하중식을 적용하여 Fe-0.5%C-2%Cu 분말의 소결체와 이 소결체를 냉간 및 열간에서 압축한 시편의 상대밀도 분포를 예측하여 보았다. 이를 위하여 소결체의 단면에 대한 R_{90} 경도를 측정하였고, 또한 정밀선반에서 원주방향으로 미량씩 절삭제거하여 상대밀도 분포를 직접적으로 측정하였다.

2. 압흔하중식

금속분말 소결체의 경도는 상대밀도와 기지금속의 유동응력이 클수록 크게 나타난다. 기지금속의 유동응력은 상온에서 $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$ (MPa)와 같이 표현할 수 있는데, 보통 가공경화지수 n 은 0.0과 0.3 사이의 값을 나타내며, 항복강도는 약 1000 MPa 정도이다. 경도측정에 사용되는 압자가 뿔 형태이면 압흔위치에 따라 측정값이 크게 차이날 수 있으므로 구 형태가 바람직하다고 판단되었다. 하지만 브리넬이나 로크웰 E 스케일에서 사용되는 강구는 국부적인 경도측정에 사용하기에는 너무 크므로 본 연구에서는 R_B (로크웰 B)를 사용하였다. 이는 지름이 1/16 인치인 강구를 사용하여 100Kgf의 하중을 적용하여 측정한다.

강구에 의한 압흔변형을 강소성 유한요소법으로 해석하였다. 강도계수 K 를 1200 MPa로 가정하고, n 을 0.0, 0.1, 0.2, 0.3으로, 상대밀도를 0.8에서 1까지 변화시키면서 수행하였다. 해석결과로부터 압흔하중 F 는 상대밀도 R 와 압흔깊이 d 의 증가에 따라 증가하나, 가공경화지수 n 의 증가에 따라 감소함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 압흔하중 F 를 압흔깊이 d 의 멱함수로 표현하였다[10].

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

여기서 A 는 다음과 같이 표현하였다.

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

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. $g'(R)$ 과 $g''(n, R)$ 은 각각 다음과 같이 표현할 수 있었다.

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

$$g''(n, R) = 14.80058nR^2 - (7.7n^2 + 22.73069n + 0.00014)R + 7.725n^2 + 6.70612n + 1.00011 \quad (4)$$

반면에 m 은 식(5)와 같이 표현된다.

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

여기서 R 은 0.8에서 1.0까지, n 은 0.0에서 0.3까지의 범위에 있다. 따라서 소결체 기지금속의 K 와 n 을 알고, R_B 값을 측정하였다면 $R_B = 130 - 500d$ 의 관계로부터 압흔깊이 d 를 구하고, 식(3), (4), (5)를 상대밀도 R 의 함수로 나타낼 수 있게 된다. 최종적으로 식(1)의 좌변을 980(N)으로 등치하여 상대밀도를 계산할 수 있다.

3. 압흔하중식의 적용

3.1 소결체

압흔하중식의 타당성을 검증하기 위하여 Fe-0.5%C-2%Cu 분말 소결체의 상대밀도 분포 예측에 적용하여 보았다[10]. 분말을 지름과 높이가 각각 16mm인 원통형으로 압축하고 아르곤 개스 분위기에서 1050°C로 30분간 소결한 후 서냉하여 초기밀도가 6.2g/cm³와 6.5g/cm³인 두가지 종류의 시편을 제작하였다. 이 시편 중 일부는 900°C에서 10분간 가열한 후 유냉하는 열처리를 수행하였다. 분말소결체 기지금속의 유동응력과 변형률의 관계는 단순압축실험으로부터 변환과정을 통하여 구할 수 있다[11]. 이로부터 유동응력은 각각

$\bar{\sigma} = 1072 \bar{\epsilon}_0^{0.13}$ (MPa)과 $\bar{\sigma} = 1188 \bar{\epsilon}_0^{0.12}$ (MPa)로 구할 수 있었다.

원통형으로 소결된 시편의 밀도분포를 측정하기 위하여 CNC 정밀선반에서 원주방향으로 소량씩 절삭제거하고, 남은 시편의 부피와 무게를 고려하여 밀도분포를 구하였다. 측정된 두 가지 시편의 상대밀도를 그림 1에 도시하였다. 밀도분포는 중앙부 바깥쪽이 가장 높고 상부 바깥쪽이 가장 낮으나, 상부와 하부의 밀도는 안쪽으로 증가하는 경향이 있다. 평균밀도가 6.5g/cm^3 인 시편에서 약간의 상하대칭성을 볼 수 있다. 또한 이 두가지 시편의 경도분포를 측정였다. 이를 위하여 시편을 축방향으로 절단한 후 단면을 연마기로 경면가공하고 베이클라이트에 마운팅시켜 R_{β} 를 측정하였다. 그림 2와 3에 나타나 있듯이 기지금속의 유동응력과 상대밀도를 압흔하중식에 대입하여 구한 경도값과 측정된 경도값을 비교하여 보면 상대밀도 0.8 이하에서는 큰 차이를 보이고 있으나 0.8 이상에서는 근사하게 나타나고 있다.

3.2 냉간압축된 소결체

그림 4의 (a)와 (b)에는 소결체 시편을 50% 냉간압축하였을 때의 상대밀도분포에 대한 유한요소해석 결과가 도시되어 있다[12]. 두 경우 공통적으로 중앙부가 높고, 상하 바깥쪽 코너로 갈수록 낮게 나타났다. 그림 5의 (a)와 (b)에는 기지금속의 변형률에 대한 유한요소해석 결과가 도시되어 있다. 상대밀도의 분포와 유사하게 중앙부에서 높으며, 상하 바깥쪽으로 갈수록 낮게 나타났다. 그림 6에는 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 측정된 경도를 (o)기호로 나타내었다. (a)와 (b)의 두 경우 예측값과 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.

3.3 열간압축된 소결체

그림 7의 (a)와 (b)에는 소결체 시편을 31%와 56% 열간압축하였을 때의 상대밀도분포에 대한 유한요소해석 결과가 도시되어 있다[12]. 두 경우의 상대밀도는 공통적으로 중앙부가 높고, 상하 바깥쪽 코너로 갈수록 낮게 나타났다. 그림 8의 (a)와 (b)에는 기지금속의 변형률에 대한 유한요소해석 결과가 도시되어 있다. 상대밀도의 분포와 유사하게 중앙부에서 높으며, 상하 바깥쪽으로 갈수록 낮게 나타났다. 그림 9의 (a)와 (b)에는 상대밀도와 경도와의 관계에 대한 예측값과 실험값을 각각 비교하여 보았다. (a)와 (b)의 예측값과 실험값이 모두 상대밀도가 증가할수록 경도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 동일한 상대밀도에 대하여 가공경화를 고려한 경도가 고려하지 않은 경도에 비하여 높게 나타나고 있다. 예상한대로 실험값은 가공경화를 고려한 경도에 조금 더 근접하고 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 경도와 상대밀도와의 관계를 나타내는 압흔하중식을 제안하였다. 이 방법의 타당성을 검증하기 위하여 원통형 Fe-0.5%C-2%Cu 분말소결 시편을 제작하고, 냉간 및 열간에서 압축된 시편의 단면의 경도를 측정하고 상대밀도를 예측하였다. 소결체의 경우에 예측치와 측정치를 비교하여 본 결과 상대밀도 0.8 이상의 영역에서는 전반적으로 양호하게

나타났다. 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 열간압축결과를 보면 예상한대로 실험값은 변형률을 고려한, 즉 가공경화효과를 고려한 경우에 더 가깝게 나타나고 있다.

결론적으로 압흔하중식은 상대밀도의 상대적인 또는 정성적인 비교와 상대밀도 분포의 경향을 예측하는데 응용될 수 있을 것이다. 하지만 유사한 상대밀도에 대한 R_{13} 정도값이 10 내지 20 정도의 차이를 나타내고 있으므로 압흔하중식에 의하여 정확한 상대밀도를 예측하기는 어려울 것으로 예상된다.

후기; 이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 핵심연구과제(KOSEF 951-1005-059-2)에 의하여 수행되었습니다. 이 연구에 많은 도움을 주신 한국기계연구원의 정형식 분원장님, 이정환 박사, 이영선 연구원, 한상호 기능장에게 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. Fischmeister, H. F., Aren B. and Easterling K. E. : Powder Metall., 14, p.144, 1971
2. James W. B. and Powell R. A., "Powder Metallurgy Moves Ahead," Machine Design, September, 1983
3. Arnhold, V. and Beiss P., "Krebsoge - Portrait of a P/M Manufacturer," Int. J. Powder Metallurgy, Vol.24, No.1, 1988
4. Araki, S., Satoh, T., Takahara, H. and Ochi, T., "Application of Powder Forging to Automotive Connecting Rods," Kobe Steel Engineering Reports, Vol.42, No.1, p.24, 1992.
5. Zhiyuan, Z dt.al., "Study on Powder Forging Process for the Steel Synchronizer Rings," Proc. 4th ICTP, Beijing, China, p.1476, 1993
6. Kuhn, H. A. and Downey, C. L., "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials," Int. J. Powder Metal., 7, p.15, 1971
7. Shima, S. and Oyane, M., "Plasticity Theory for Porous Metals," Int. J. Mech. Sci., Vol.18, p.285, 1976
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. 김진영, 박종진, "압흔하중식에 의한 금속분말소결체내에서의 밀도분포 예측", 한국분말야금학회, 4권, 3호, p.188, 1997
11. Park, J. J., "Constitutive Relations to Predict Plastic Deformations of Porous Metals in Compaction", Int. J. Mech. Sci., Vol.37, No.7, p.709, 1995
12. 김진영, 박종진, "경도를 이용한 소결압축분말의 상대밀도 예측," 한국소성가공학회, 6권, 6호, p.508, 1997

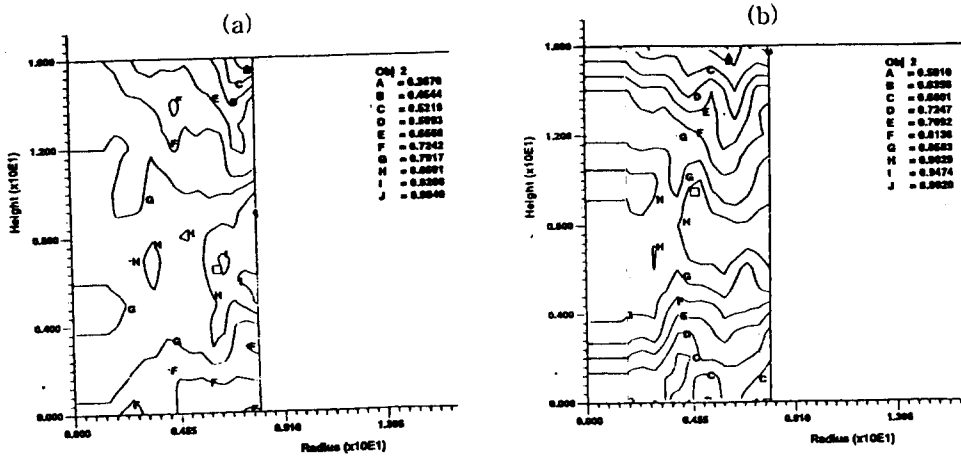


Fig.1 Measured relative density distributions by machining: (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

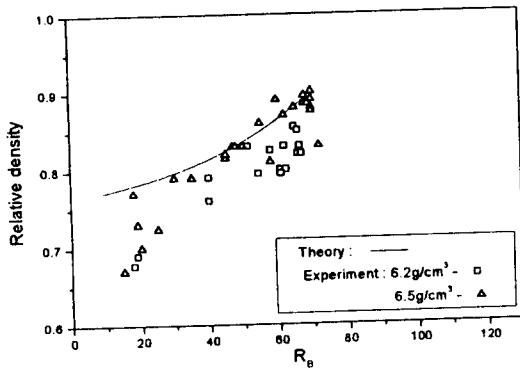


Fig.2 Relative density vs R_B hardness (no heat treatment)

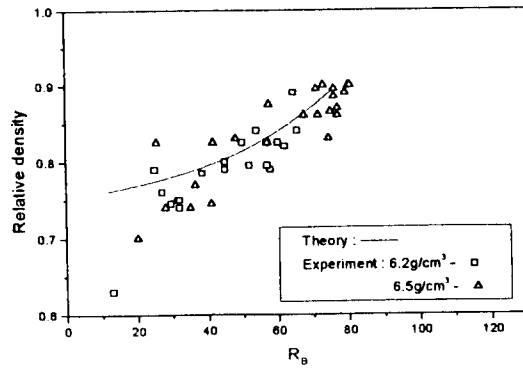


Fig.3 Relative density vs R_B hardness (heat treatment)

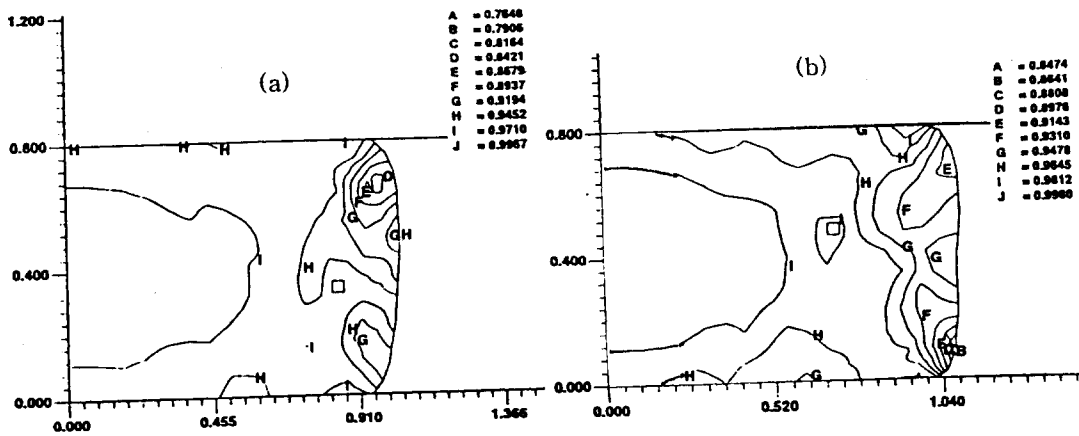


Fig.4 Predicted relative density distributions by FEM at 50% reduction in height (cold forged): (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

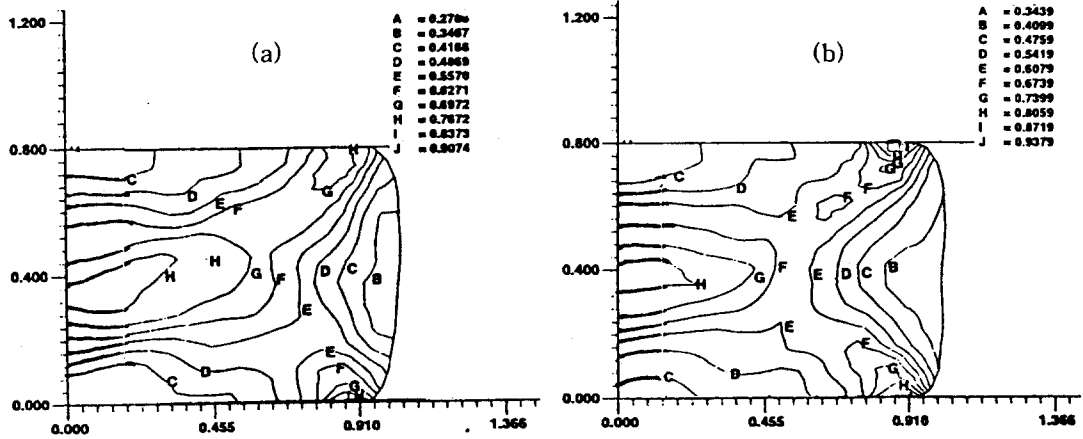


Fig.5 Predicted effective strain distributions by FEM at 50% reduction in height(cold forged): (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

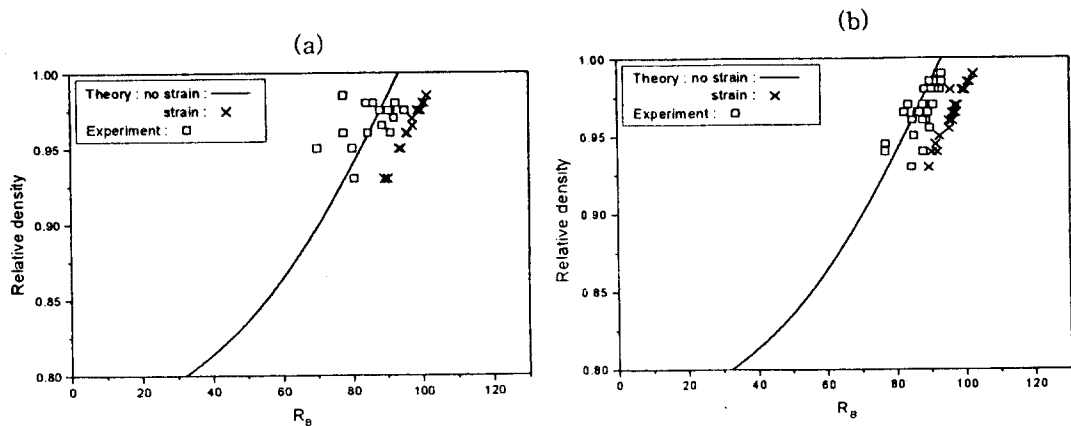


Fig.6 Relative density vs R_B hardness(cold forged): (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

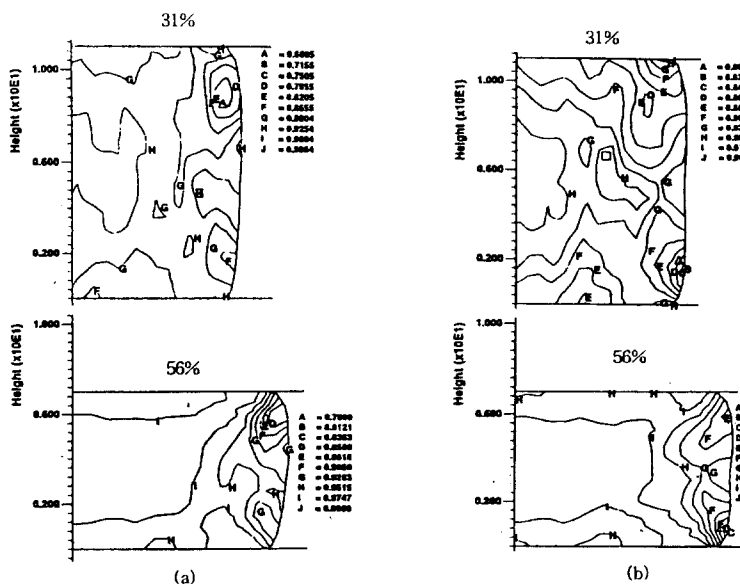


Fig.7 Predicted relative density distributions by FEM at 31% and 56% reductions in height(hot forged): (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

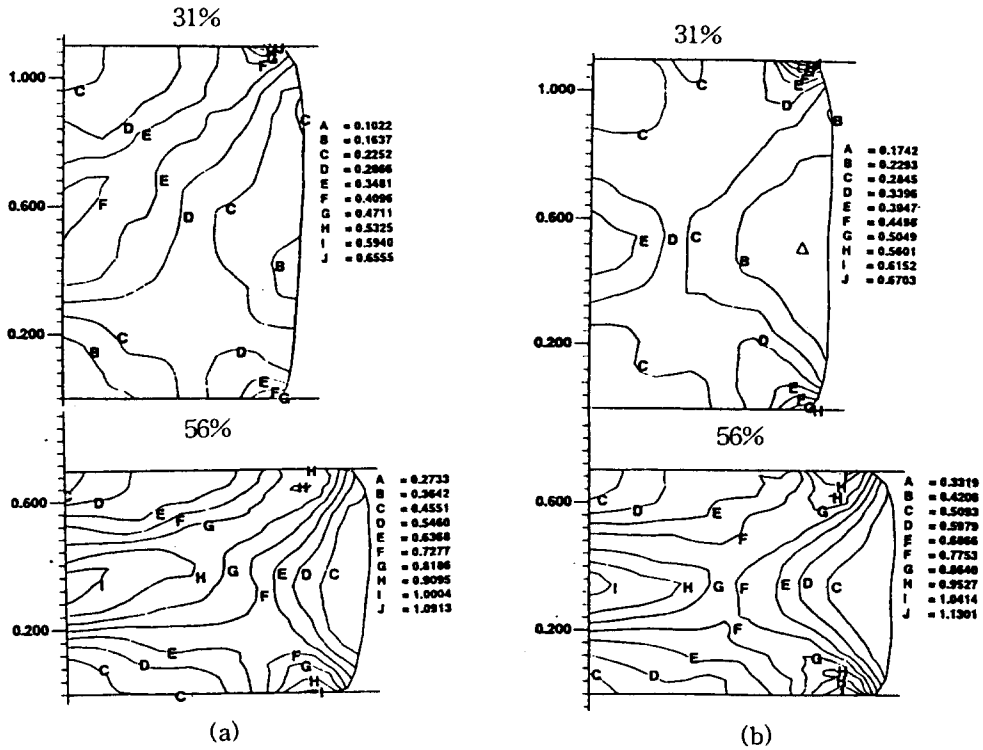


Fig.8 Predicted effective strain distributions by FEM at 31% and 56% reductions in height(hot forged): (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³

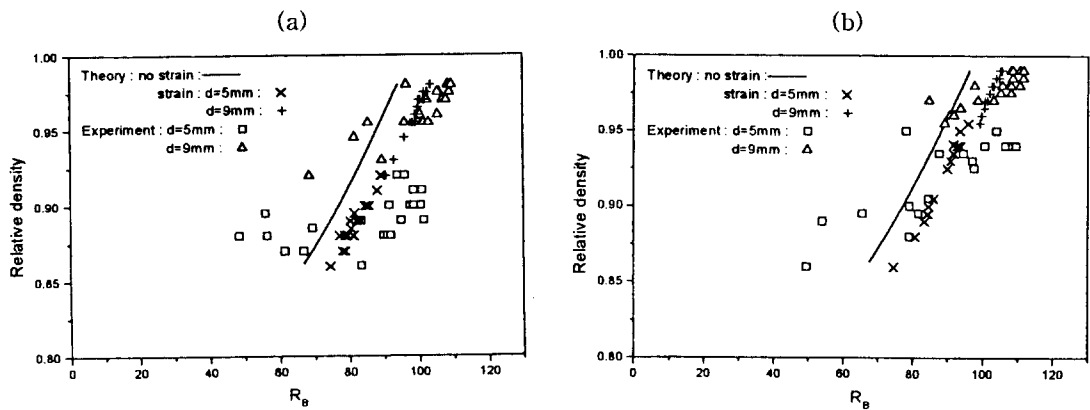


Fig.9 Relative density vs R_B hardness(cold forged): (a) 6.2g/cm³, (b) 6.5g/cm³