

분말단조 해석을 위한 다공질 합금강 프리폼의 고온 업셋

김기태, 조운호

포항공과대학교 기계공학과

분말단조 공정의 해석을 위한 기초연구로서 고온 업셋에 의한 다공질 합금강 프리폼의 치밀화와 소성 변형거동에 관하여 조사하였다. 다공질 프리폼의 소성 유동응력은 온도의 상승에 따라 감소하였고, 변형속도의 증가에 따라 증가함을 보였다. 또한, 다공질 프리폼의 초기밀도가 더 높을수록 동일한 온도와 하중조건에서 더 높은 치밀화를 보였다. 또한, 밀도변화에 따른 프와송 비를 실험치로 부터 구하였고, 베블럼 현상과 체적변화를 고려하여 온도에 따른 진응력-진변형률 관계를 구하였다.

1. 서론

분말야금법에 의해 제조된 제품들은 내부기공이 존재하므로 다른 제조 공정으로 제조된 제품에 비해 전반적인 기계적 성질이 좋지 않다. 따라서, 기계적 성질을 향상시키기 위해서 단조, 압연, 압출 및 인발 등의 가공공정으로 다공질 프리폼의 기공을 제거하는 방법을 고려하게 된다.

분말단조는 통상적인 압축-소결 과정에 의해 제조된 다공질 프리폼을 금형내에서 단조함으로써 기공의 치밀화와 입자의 조밀화 및 최종부품 (near-net shape)으로의 성형이 동시에 이루어지는 공정으로 이론밀도에 가까운 제품을 제조할 수 있을 뿐 아니라 소결과정도 생략할 수 있으므로 기계가공이나 통상적인 단조공정보다 생산단가가 낮고 대량생산도 용이하며 단련된 재료로 제조된 부품에 비하여 기계적 성질이 우수하다.⁽¹⁾

분말단조 공정에서 다공질 프리폼 내부에 존재하는 잔류기공은 복잡한 응력상태하의 소성변형에 의해 극히 짧은 시간내에 소멸되며 기공의 심한 변형에 의한 연성 파괴 및 균열 등의 문제점이 발생할 수 있다. 또한, 다공질 프리폼은 압축시 소성변형에 따른 체적변화를 수반하므로 기공이 없는 금속과는 달리 팽방향의 변형이 작다. 분말단조 공정의 해석을 위해서는 온도에 따른 다공질 프리폼의 치밀화 기구에 대한 체계적인 연구와 기계적 물성치를

정확히 구하는 것이 아주 중요하다.

Kuhn 과 Downey⁽²⁾는 마찰을 최소화한 다공질 금속의 상온 압축실험을 통하여 응력-변형률 관계, 치밀화 과정, 프와송 비 및 소성이론등 전반적인 다공질 금속의 성질을 설명하였다. Shima 와 Oyane⁽³⁾는 다양한 초기 상대밀도를 가진 구리 프리폼의 단계적인 상온압축을 통해 치밀화 과정과 소성 항복이론을 제안하였다. 최근, Spitzig 등⁽⁴⁾ 과 Biner 와 Spitzig⁽⁵⁾은 다양한 초기 상대밀도를 가진 다공질 철 프리폼의 정수압 압축하의 치밀화 거동에 대한 연구와 인장 또는 압축하의 기공도, 기공의 크기 및 형상이 소성변형에 미치는 영향과 기계적 성질에 대하여 조사하였다. Koval'chenko⁽⁶⁾는 다공질 프리폼의 일축압축시 프와송 비를 상대밀도의 함수로 가정하여 압축에 따른 평균 상대밀도와 마찰이 없는 이상적인 경우 균일한 단면적의 변화를 구하였다. 또한, Fishmeister 등⁽⁷⁾은 철 프리폼의 열간 단조실험을 통하여 거시적인 변형거동, 치밀화거동 및 밀도분포를 조사하였다. 한편, 최근에는 국내에서도 분말단조에 대한 관심이 높아져 분말단조 공정의 현상학적 연구와 기초적인 소결단조 실험 등의 연구결과⁽⁸⁻¹⁰⁾가 보고되고 있다.

본 논문은 분말단조 공정의 해석을 위한 기초연구로서 고온 업셋하의 다공질 합금강 프리폼의 치밀화와 소성 변형거동을 조사하였다. 또한, 초기 상대밀도, 변형속도 및 실험온도 등이

다공질 프리폼의 치밀화에 미치는 영향과 변형된 시편의 경도 및 밀도분포를 조사하였다. 큰 소성변형을 수반한 다공질 프리폼의 고온 업셋실험은 마찰에 의한 배בל립 현상과 세척변화를 동시에 수반하므로 비다공질 금속의 압축실험과는 달리 진응력-진변형률의 관계를 구하기가 쉽지 않다. 또한, 고온 업셋하의 다공질 프리폼의 치밀화와 쥬 방향 변형은 세척변화에 기인하며, 세척변화는 프와송비에 따라 달라진다. 따라서, 논문에서는 Kuhn 과 Downey⁽²⁾ 와 Koval'chenko⁽⁶⁾의 접근방법을 이용하여 다공질 프리폼의 밀도변화에 따른 프와송 비를 실험치에 근거하여 구하였고 온도와 변형속도에 따른 진응력-진변형률 관계도 조사하였다.

2. 실험

2.1 시편

본 실험에서 사용한 금속분말은 분말단조용으로 개발된 합금강 분말 (Mannesmann-HF4, 독일)로서 그 화학적 성분은 Table 1 과 같다. 다공질 프리폼의 시편은 초기에 등방성이고 내부의 기공이 균일하게 분포하여야 한다. 금형에서 양단압축에 의해 만들어진 시편은 금형과 시편 사이의 마찰과 불균일한 압력으로 인하여 초기부터 비등방성이며 기공분포가 불균일하여 시편으로 사용하기에 적합하지 않다. 따라서, 본 실험에서는 초기에 균일한 밀도를 갖는 시편의 제조를 위해 변형이 쉬운 고무 모듈에 분말을 채우고 방수막으로 란후 습식 냉간 정수압 성형기 (Wet type, cold isostatic press, Kobe Co., 일본)에서 압축 성형하였다.

시편의 초기 상대밀도가 고온업셋하의 다공질 프리폼의 치밀화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 상대밀도 $D_0 = 0.825 \pm 0.005$ 와 0.88 ± 0.005 인 두 종류의 시편을 제조하였다.

Table 1 Chemical Compositions of Low Carbon Alloy Steel

Ni	Mo	Mn	O	S	C
1.96	0.43	0.21	0.18	0.012	0.22

초기 상대밀도 $D_0 = 0.825 \pm 0.005$ 인 시편은 본 실험에서 사용한 CIP의 압력 3 ton/cm^2 으로 1 회 정수압 성형하여 제조하였다. 또한, 초기 상대밀도가 $D_0 = 0.88 \pm 0.005$ 인 시편은 CIP의 최대압력인 4 ton/cm^2 으로 1 회 정수압 성형하여, 밀도를 높이기 위해 시편을 예비소결한 후 여러차례 정수압 성형을 하여 제조하였다. 성형된 시편은 소결로에서 1150°C 와 수소분위기에서 1시간 소결한 후, 소결로 안에서 서냉하였다. 최종시편의 규격은 직경과 높이가 각각 $11.28 \pm 0.01\text{mm}$ 와 $14.95 \pm 0.05\text{mm}$ 로 가공하였으며, 가공중에 생긴 잔류응력을 제거하기 위해 650°C 의 수소분위기에서 반시간 동안 어닐링하였다. 또한, 시편의 밀도는

아르키메데스 방법으로 측정하였다.

2.2 장치, 조건 및 방법

다공질 프리폼의 고온 업셋실험에는 온도, 하중 및 변형률 속도등을 조합하여 컴퓨터에서 자동으로 제어할 수 있는 Gleeble 1500 열-동적 재료시험기 (Duffers Scientific Inc., 미국)를 사용하였다. 시편의 중간부분에는 두개의 열전대를 1 mm 간격으로 용접하여 부착시키고 측정된 온도와 프로그램된 온도의 차이를 보정하는 온도-서보장치를 통하여 실험온도가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차로 자동으로 제어되었다. 실험중에 고온에서 시편의 산화를 방지하기 위하여 진공상태 (10^{-3} torr)를 유지하였다. 또한, 압축실험시 발생하는 압반과 시편사이의 고온접합을 방지하고, 마찰을 줄이기 위하여 탄탈 (tantalum) 박판을 압반과 시편사이에 삽입하였다. 시편은 압반을 통한 전기저항의 가열장치에 의해 가열되었으며, 고온 열팽창에 의한 시편의 소성변형이 무시될 수 있도록 가열중에 시편이 축방향으로 자유로이 변형할 수 있게 설계된 공기램 (air ram) 을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 시편의 가열속도는 $600 \sim 1200^\circ\text{C/min}$ 범위이며 가열속도가 열 및 기계적 성질에 미치는 영향은 고려하지 않았다. 실험중의 하중, 변위 및 온도 등의 값은 x-y-t 기록계로 시간에 대해 연속적으로 기록하였다.

고온 업셋에 의한 다공질 프리폼의 밀도변화는 배בל립 현상으로 인해 세척측정이 어려우므로 실험후 아르키메데스 방법을 사용하여 잔류밀도를 측정하였다. 본 실험에서는 변형속도 $v = 0.1 \text{ mms}^{-1}$ ($\dot{\epsilon} \approx 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 와 1 mms^{-1} ($\dot{\epsilon} \approx 10^{-1} \text{ s}^{-1}$)로 다양한 온도범위 $600^\circ\text{C} \sim 1200^\circ\text{C}$ 에 대하여 100°C 간격으로 실험하였다.

3. 실험 결과

Fig. 1 은 고온 업셋하의 다공질 합금강의 초기 상대밀도와 온도에 따른 하중 L 과 축 변위 δ 의 관계를 나타낸다. 여기서 점선과 실선은 고정된 축변형 속도 $v = 0.1 \text{ mms}^{-1}$ 와 여러온도에서 초기 상대밀도 $D_0 = 0.88$ 과 0.825 인 시편으로 구한 고온 업셋실험치를 각각 나타낸다. 하중은 800°C 를 제외한 다른 온도에서는 초기 상대밀도에 관계없이 거의 비슷한 크기를 보이는데 이는 초기 상대밀도가 높을수록 같은 크기의 하중으로 프리폼의 밀도를 더 높일 수 있음을 의미한다. 또한, 온도의 상승에 따라 소성변형에 필요한 하중이 감소함을 알 수 있다. 변형량이 증가함에 따라 기공의 변형, 모재의 변형경화 및 쥬방향으로의 변형에 의한 단면적의 증가 등의 원인으로 하중이 급격하게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 2 는 고온업셋하의 다공질 합금강의 축 변형속도와 온도에 따른 하중 L 과 변위 δ 의 관계를 나타낸다. 여기서 점선과 실선은 $D_0 = 0.825$ 인 시편을 사용하여 축 변형속도 $v = 10 \text{ mms}^{-1}$ 와 0.1

mms^{-1} 로 여러 온도에서 구한 고온 업셋실험치를 각각 나타낸다. 변형속도의 증가에 따라 같은 온도에서 하중이 증가함을 볼 수 있다.

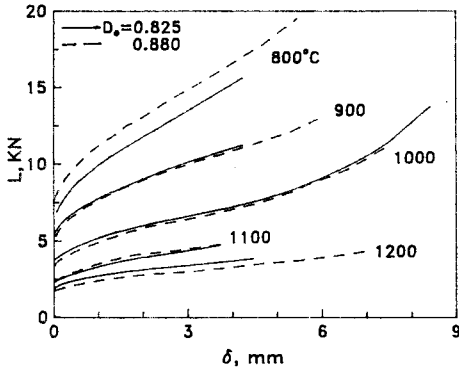


Fig. 1 Effect of initial relative density on load-displacement relations of sintered porous alloy steel during hot upsetting at various temperatures

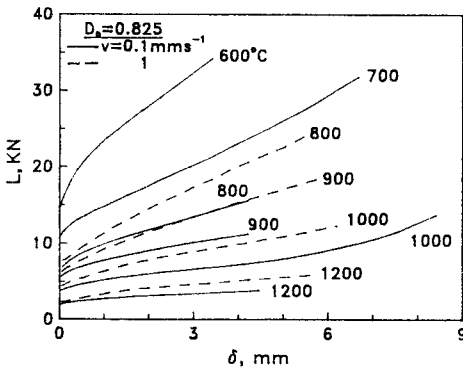


Fig. 2 Effect of axial velocity on load-displacement relations of sintered porous alloy steel, with $D_0 = 0.825$ during hot upsetting at various temperatures

Fig. 3 은 여러 고정된 축 변위 δ 에서 구한 고온업셋하의 다공질 합금강의 하중과 온도의 관계를 나타낸다. 실험치는 $D_0 = 0.825$ 인 다공질 합금강 프리폼의 고온 업셋실험으로 부터 구하였다. 실험온도의 상승에 따라 같은 크기의 축 변위를 얻는데 필요한 하중이 감소함을 알 수 있다. 이러한, 온도상승에 의한 재료의 연화현상은 Kim⁽¹¹⁾ 이 제안한 특수법칙으로 잘 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

다공질 프리폼의 체적 변형률과 상대밀도의 관계는 소성변형중에 입자의 압축성을 무시하면 다음과 같이 쓸 수 있다.^(12,13)

$$D = D_0 \exp(-v^p) \quad (1)$$

여기서, D 와 D_0 는 다공질 프리폼의 상대밀도와 그 초기치를 나타낸다. 또한, v^p 는 소성 체적 변형률을 나타내며 큰 소성변형에서도 사용이 가능한 대수 (logarithmic) 체적 변형률 $v^p = \ln(V_0/V)$ 로 정의하였다. V_0 와 V 는 각각 다공질 프리폼의 초기체적과 소성변형후의 체적을 나타낸다.

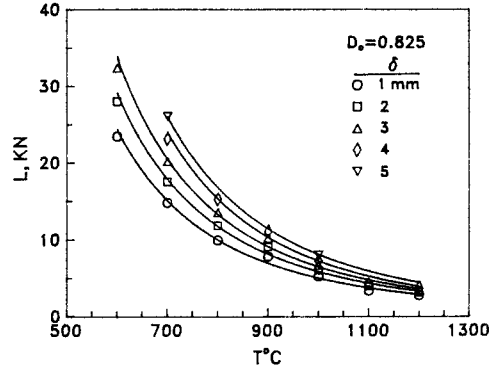


Fig. 3 Load-temperature relations for sintered porous alloy steel, with $D_0 = 0.825$ during hot upsetting at various fixed axial displacements

Fig. 4 는 초기 상대밀도에 따른 다공질 합금강의 소성 체적변형률과 상대밀도의 관계를 나타낸다. 여기서, 실험치들은 초기 상대밀도 $D_0 = 0.88$ 과 0.825 를 갖는 다공질 합금강을 사용하여 변형속도 $v = 0.1 \text{ mms}^{-1}$ 로 여러온도에서 고온 업셋하여 구하였다. 시편의 밀도측정은 실험후에 측정하였으며, 이는 탄성변형이 제거된 잔류밀도를 나타낸다. 점선과 실선은 각각 $D_0 = 0.88$ 과 0.825 를 갖는 시편에 대하여 식 (1)로 부터 구한 계산치를 나타낸다. 실험치와 이론치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

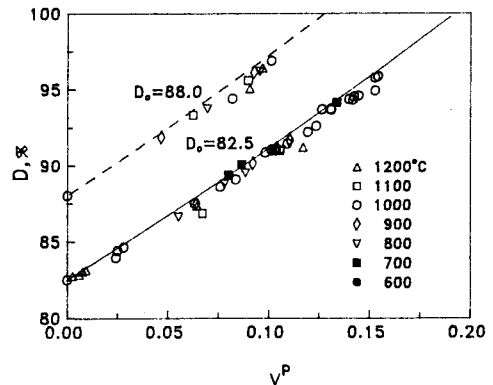


Fig. 4 Effect of initial relative density on plastic volumetric strain-residual relative density relations for sintered porous alloy steel under hot upsetting

다공질 시편의 상대밀도를 나타내기 위하여 때때로 경도측정에 의한 간접적인 방법이 사용된다.^(7,14) 다공질 금속의 경도측정에는 Brinell, Rockwell, Vickers 등 압입경도 측정법이 사용되는데 시편에 함유된 기공의 크기와 시편의 재질에 따라 사용하는 측정법이 다르다. 다공질 합금강의 경도측정에는 일반적으로 Rockwell B형 경도계가 사용된다.⁽¹⁴⁾ 본 논문에서는 변형된 시편의 밀도분포를 간접적으로 조사하기 위하여 Rockwell B형 경도계를 사용하여 1/16 인치 강구압자 (steel ball indenter)로 하중 100 kg 을 30초간 가하여 경도를 측정하였다.

Fig. 5 는 냉간 정수압 성형한 후 소결하여 균일한 밀도분포를 갖는 다공질 합금강의 경도와 밀도의 관계를 나타낸다. 최대압력이 4 ton/cm²인 CIP 로서는 시편의 밀도를 $D_0 = 0.9$ 이상으로 높일 수 없으므로 $D_0 = 0.9$ 이상의 시편은 금형에서 압축한 후 소결하였다. 시편의 경도는 축 방향으로 시편의 중앙을 절단한 시편내부의 여러 부분을 측정하여 평균하였고 측정위치에 따른 경도의 차이는 오차막대 (error bar) 로 나타내었다. 또한, 이론밀도에서의 경도는 본 논문에서 사용한 시편과 비슷한 화학적성분을 갖는 비 다공질 합금강의 경도값을 사용하였다.⁽¹⁵⁾ 이 관계는 변형된 시편내부의 밀도분포를 경도를 측정하여 간접적으로 나타낼 수 있는 척도로 사용될 수 있다.

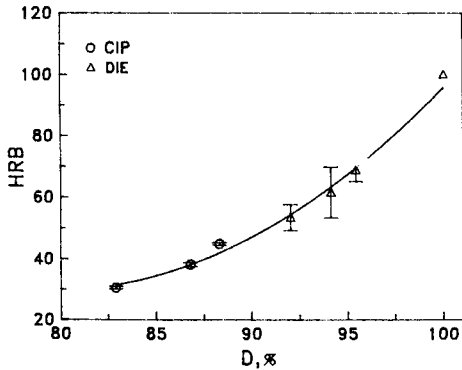


Fig. 5 Variation of Rockwell hardness with relative density for cold isostatically pressed and sintered porous alloy steel

Fig. 6은 고온 업셋으로 변형된 다공질 합금강 시편의 축방향으로 절단된 중앙단면의 경도와 밀도분포를 나타낸다. 여기서 경도는 초기 상대밀도 $D_0 = 0.825$ 를 갖는 다공질 합금강 시편을 1000°C 에서 축 변위 $\delta = 8.36$ mm 까지 고온 업셋하여 최종 평균밀도 $D = 0.907$ 를 갖는 시편으로 부터 Rockwell B형 경도계를 사용하여 측정하였다. (a)는 경도분포를 나타내며 (b)는 밀도분포를 나타내며 (a)의 경도분포와 Fig. 5의 경도와 밀도의 관계로부터 구하였다.

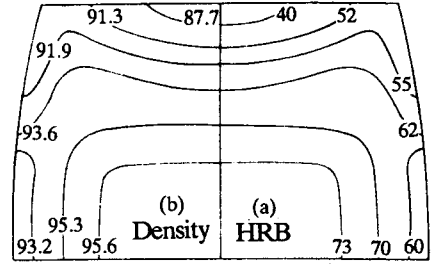


Fig. 6 (a) Isohardness contours and (b) density distribution at center cross section of deformed sintered porous alloy steel by hot upsetting

4. 해석

고온 압축실험에서는 시편의 산화, 가열 및 냉각에 따른 여러 문제점으로 인하여 단계적인 압축실험이나, 마찰을 줄이기 위한 여러 방법들을 적용하기가 쉽지 않다. 따라서, 프와송 비를 실험중에 직접 구하기는 어려우며, 배플립 현상과 채적변형을 고려한 진용력을 구하기는 더욱 어렵다. Koval'chenko⁽⁶⁾는 소성변형중의 프와송비율 $\nu = 0.5D$ 로 가정하여 축 변위에 따른 밀도변화와 마찰이 없는 이상적인 경우의 균일한 단면변화의 관계를 구하였다.

업셋하의 시편의 진 변형률 (true strain) 은 다음과 같이 대수함수로 쓸 수 있다.

$$\epsilon = \ln \left(\frac{h_0}{h} \right) \quad (2)$$

여기서 h 와 h_0 는 임의의 변형률에서 압축된 시편의 높이와 그 초기치를 나타낸다.

한편, 원주형 시편의 경우에 채적 변형률과 축 변형률의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dD}{D} = -\frac{dV}{V} = -\frac{dh}{h} + 2\nu \frac{dh}{h} \quad (3)$$

여기서 D, V, h, A 및 r 은 임의의 변형상태에서 상대밀도, 체적, 높이, 마찰이 없는 균일한 변형에 의한 단면적 및 반경을 나타낸다. 또한, ν 는 프와송의 비 $\nu = -(dr/r)/(dh/h)$ 를 나타낸다.

다공질 프리폼의 밀도변화에 따른 프와송비는 다음 식이 자주 인용된다.⁽²⁾

$$\nu = 0.5D^n \quad (4)$$

여기서, n 은 양의 상수이다.

따라서, 식 (3)와 (4)로 부터 상대밀도와 축 변위의 관계는

다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dD}{D(D^n - 1)} = \frac{dh}{h} \quad (5)$$

마찰이 없는 이상적인 경우에 업셋하의 시편이 초기높이 h_0 에서 임의의 높이 h 로 변형하면 상대밀도는 D_0 에서 D 로 변한다. 따라서, 식 (5) 를 이 구간에 대하여 적분하면 축 변위에 따른 상대밀도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D^n = \frac{(h_0/h)^n}{(h_0/h)^n + (1-D_0^n)/D_0^n} \quad (6)$$

또한, 식 (2)를 사용하면 (6)으로 부터 진 변형률과 상대밀도의 관계를 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉,

$$D^n = \frac{e^{n\epsilon}}{e^{n\epsilon} + (1-D_0^n)/D_0^n} \quad (7)$$

마찰이 없는 이상적인 경우에 축 변위에 따른 단면변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} = -2\nu \frac{dh}{h} = -D^n \frac{dh}{h} \quad (8)$$

식 (5) 를 사용하면 (8) 은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{dA}{A} = \left(\frac{D^{n-1}}{1-D^n} \right) dD \quad (9)$$

시편이 초기 상대밀도 D_0 에서 임의의 상대밀도 D 까지 변형하면 초기 단면적 A_0 는 A 까지 변하므로 이 구간에 대하여 식 (9) 를 적분하면 상대밀도와 단면적의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A = A_0 \left(\frac{D_0^n - 1}{D^n - 1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (10)$$

이제, 업셋하의 다공질 시편의 진변형률, 상대밀도 및 진응력의 관계는 식 (6), (10) 및 하중-축 변위의 실험치로부터 구할 수 있다. Kuhn⁽¹⁶⁾ 는 알루미늄 합금의 고온 압축실험치로부터 $n = 2$ 를 구하였고 Koval'chenko⁽⁶⁾ 는 편리상 $n = 1$ 을 사용하였다. 본 실험에서는 고온업셋하의 다공질 합금강의 실험치 (Fig. 7)와 (7) 및 BMDP 통계 소프트웨어⁽¹⁷⁾를 사용하여 $n = 2.37$ 를 구하였다.

Fig. 7 은 고온 업셋하의 다공질 합금강의 축 변형률과 상대밀도의 관계를 나타낸다. 여기서, 실험치 \circ 는 $D_0 = 0.825$ 인 다공질 합금강 시편을 사용하여 축변형률 $\nu = 0.1\text{mms}^{-1}$ 와 여러 온도 600°C-1200°C 에 대하여 고온 업셋실험으로부터 구하였다. 또한, 실험치 \triangle 은 표면균열의 발생으로 인하여 계산치보다 평균 상대밀도가 낮으며, 축 변형률 $\epsilon = 0.7$ 이상에서 구한 실험치는

배불림이 생기는 시편의 중앙부분에 표면균열이 발생하므로 실험치로서의 신뢰성이 떨어진다. 일점쇄선, 점선 및 실선은 각각 식 (7) 과 $n = 1$, $n = 2$, 및 $n = 2.37$ 로 부터 구한 계산치를 각각 나타낸다.

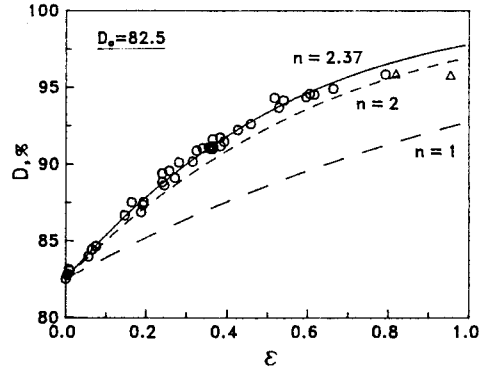


Fig. 7 Comparison between experimental data and theoretical curves for axial strain-relative density relations of sintered porous alloy steel, with $D_0 = 0.825$ at various temperatures. The dash-dotted, dashed and solid curves, respectively, are calculated from (7) when $n = 1, 2$, and 2.37 .

Fig. 8 은 초기 상대밀도에 따른 고온 업셋하의 다공질 합금강의 축 변형률과 상대밀도의 관계를 나타낸다. 실선과 점선은 각각 $D_0 = 0.88$ 과 0.825 인 시편에 대하여 식 (7) 과 $n = 2.37$ 로 부터 구한 계산치를 나타낸다. 초기 상대밀도가 다른 시편에서의 평균밀도의 변화도 식 (7)과 $n = 2.37$ 로 부터 구한 계산치와 잘

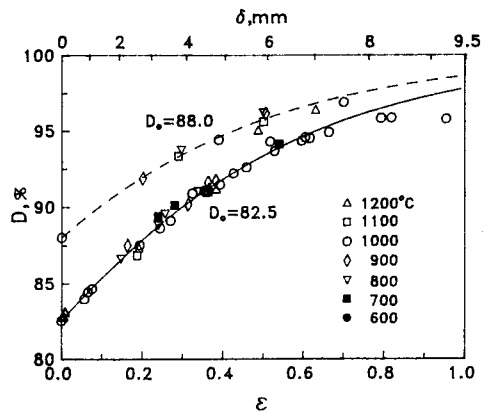


Fig. 8 Comparison between experimental data and theoretical curves for axial strain-relative density relations of porous alloy steel with different initial relative density. The solid and dashed curves, respectively, are calculated from (7) for porous alloy steel, with $D_0 = 0.825$ and 0.88 when $n = 2.37$.

일치함을 알 수 있다.

Fig. 9 는 고온 업셋하의 다공질 합금강의 축변형속도와 온도에 따른 진응력-진변형률의 관계를 나타낸다. 여기서, 진변형률은 탄성변형을 제외한 소성변형만을 고려하였으며 항복강도는 0.2% 업셋으로 택하였다. 온도의 상승에 따라 초기 항복강도와 소성유동 응력이 감소함을 알 수 있다. 또한, 비다공질 합금강의 1100°C 이상의 고온압축에서는 일정 변형률 이상에서 포화경화 현상이 나타나는 반면 다공질 금속에서는 변형률의 증가에 따라 상대밀도가 높아지므로 압축응력이 변형률 증가에 따라 계속 증가함을 알 수 있다.⁽¹⁸⁾

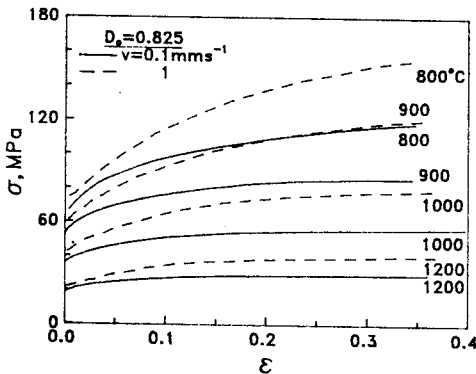


Fig. 9 True stress-true plastic strain curves for sintered porous alloy steel at various temperatures and axial velocities

5. 결론

본 논문에서는 초기 상대밀도, 축 변형속도 및 실험온도에 따른 다공질 합금강 프리폼의 고온 업셋실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다공질 프리폼의 초기 상대밀도가 높을수록 같은 크기의 하중으로 밀도를 효과적으로 더 높일 수 있음을 알 수 있었다.
2. 다공질 프리폼의 상대밀도와 축 변형률의 관계는 실험온도에는 거의 무관함을 알 수 있었다.
3. 프와송 비는 다공질 프리폼의 밀도가 증가함에 따라 증가하며, 합금강의 경우 $\nu = 0.5 D^{2.37}$ 를 구하였다. 이로부터 온도변화에 따른 배분립 현상과 체적변화를 고려한 다공질 프리폼의 진응력-진변형률 곡선을 구할 수 있었다
4. 고온업셋에 의해 변형된 다공질 시편의 밀도분포를 Rockwell 경도를 이용하여 간접적으로 나타내었다.

참고문헌

1. F.V. Lenel: Powder Metallurgy. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey (1980)
2. H.A. Kuhn and C.L. Downey: Int. J. Powder Metall. 7 (1971) 15
3. S. Shima and M. Oyane: Int. J. Mech. Sci. 18 (1976) 285
4. W.A. Spitzig, R.E. Smelser and O. Richmond: Acta Metall. 36 (1988) 1201
5. S.B. Biner and W.A. Spitzig: Acta Metall. 38 (1990) 603
6. M.S. Koval'chenko: Poroshk. Metall. 4 (1990) 256
7. H.F. Fischmeister, B. Aren and K.E. Easterling: Powder Metall. 14 (1971) 144
8. 한국기계연구소, 분말단조 기술개발. 한국 과학기술처 연구 결과 보고서 (1988)
9. 김경협, 백응률, 윤태식, 김기태, 황상무: 철분말 환원공정 및 소결단조 연구. RIST 결과보고서 9142-A (1990)
10. 김기태, 황상무, 조윤호, 김정모, 안 상호: 제3회 분말야금 심포지움, 대한금속학회 (1991) 138
11. K.T. Kim: Res Mechanica 26 (1989) 371
12. K.T. Kim: Int. J. Solids Struct. 24 (1988) 937
13. K.T. Kim and J. Suh: Int. J. Engng. Sci. 27 (1989) 767
14. Hardness Testing, H.E. Boyer, Ed. ASM International (1987) 118
15. Metals Handbook, Ninth Ed. ASM I (1978) 163
16. H.A. Kuhn: The Effects of Voids on Material Deformation. S.C. Cowin and M.M. Carroll, Ed. ASME AMD-16 (1976) 171
17. R. Jennrich: BMDP Statistical Software. W.J. Dixon, Ed., University of California Press (1983) 289
18. K.T. Kim and Y.H. Cho: Int. J. Press. Vessels and Piping, in print (1991)