

회전 성형법에 의한 분말단조 제품특성에 관한 연구

윤덕재*, 나경환*, 김영은**

* 생산기술연구원 생산기반기술실용화센터

** 단국대학교 기계공학과

A study on the Properties of Cold Forging P/M Products by Incremental Forming Process

D. J. Yoon*, K. H. Na*, Y. E. Kim**

* Production Technology Application Center

Korea Academy of Industrial Technology

** Department of Mechanical Engineering

Dan Kook University

ABSTRACT

Powder metallurgy process has many advantages such as high-efficiency of material, mass productivity and complex shape production with good mechanical properties. Among the powder forming processes, incremental forging allows the consolidation to be achieved with smaller forces than those required by conventional forging. In particular the process known as rotary forging is a unique and predominant process in which the working constraints approximate to those in normal closed die forging.

This study is concerned with the powder compaction by rotary forging process. An experimental rotary forging press with 500kN load capacity has been developed, which is equipped with the rotational conical die inclined to the central axis of the press at arbitrary angle. It is found that the highly densified P/M parts can be obtained by rotary forging process and the material properties are superior to those of the conventional sintered parts. The detailed comparison of the mechanical properties by rotary forging process with those by conventional process are given.

Key Words : Rotary forging, Powder forging, Powder Metallurgy

1. 서론

분말 야금 공정은 기존의 가공 방법으로 생산하기 어려운 복잡한 형상의 제품과 고용점 금속의 제조 및 복합재료의 제조 등에 널리 이용되고 있다. 그러나 분말 야금 제품의 경우 소재 내부에 존재하는 상당량의 잔류기공으로 인하여 단조품이나 기계 가공품에 비해 인장강도, 충격 강도, 내마모성 등의 기계적 성질이 저하되어 고강도가 요구되는 부품으로는 제한적으로 적용되어 왔다.

최근 산업이 발전됨에 따라 복잡한 형상을 갖는 제품의 수요가 증가하고, 제품의 품질과 기계적 성질 등을 높이기 위한 새로운 공정 개발이 요구되고 있다. 1960년대에 분말 야금법으로 예비 성형체를 제작한 후 재가압하여 진밀도에 가까운 제품을 얻으므로써 기계적 성질의 한계성을 극복할 수 있는 공정의 개발에 성공한¹⁾ 이후 단조, 열간 정수압(HIP), 압연, 압출 등의 공정으로 분말 성형을 시도하고 있다. 그러나 낮은 생산성, 소요 에너지 및 제조 원가 등의 문제점으로 인해 실용화가 실현되지 못하고 있는 실정이다.

회전 분말단조 공정은 그림 1-1과 같이 원추 형상을 가진 상부 금형이 프레스의 축 중심에 대하여 일정한 각도로 경사지게 하여 하부금형을 상승시키면 상부 금형과 소재가 순차적으로 접촉하면서 점진 성형하는 공정으로 비교적 작은 하중(종래의 단조 하중대비 1/5 - 1/10)과 장치의 소형화 등 장점을 가지고 있다. 이와 같은 회전성형법을 1970년대부터 폴란드와 일본 등의 선진국에서 분말성형에 적용하기 시작하여 금형과 소재가 순차적인 전단 영역의 이동으로 접촉하기 때문에 가공 한계를 극복하고 분말재의 밀도를 향상시켜서 생산 원가의 절감과 제품의 질적 향상에 효과적이라는 연구사례가 발표되었다²⁾. 최근에는 고강도 기어 제품 및 자동차 부품 등의 대형 고부가가치를 얻을 수 있는 제품에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다³⁾.

한편 국내에서도 최근 회전성형법을 이용한 회전단조기가 개발됨에 따라 모델재를 이용한 변형형상과 성형하중을 예측할 수 있는 상사관계를 규명한 연구가 발표되고⁴⁾, 실용화를 위한 제품개발에 주력하고 있다. 분말 단조의 경우 아직 이에 대한 공정 개발이나 제품 개발의 필요성은 인식되고 있으나, 축적된 기술이 거의 없는 형편이고 일부 정부 출연 연구소와 대학에서 연구 개발이 시도되고 있는 정도이다. 따라서 본 논문에서는 회전 성형법을 이용한 전용 회전 성형 분말 단조 프레스를 개발하여 분말 단조의 적용 가능성을 조사하기 위해 링 형상의 제품을 성형하여 종래의 분말야금법으로 제조된 제품과 기계적 성질인 강도, 경도, 밀도, 조직 등을 비교, 검토하였다.

2. 회전 성형 분말 단조 프레스

회전 성형법은 3차원의 복잡한 성형구조를 갖고 있어 실용적인 성형 이론의 정립이 어렵기 때문에 가공의 성패에 중대한 영향을 주는 가공변수들의 특성과 변수들간

의 관계를 반복적인 실험 방법에 의존하고 있다⁵⁾. 따라서 회전성형 분말단조 프레스의 최적설계 기준은 아직 정립되지 못하여 각 선진국간의 기술적 Know How로 남아 있는 상황이다.

회전 성형 분말 단조기는 회전 성형중 금형의 운동 방법에 따라 여러가지로 분류할 수 있다. 여기서 Standring & Applenton의 분류법⁶⁾에 의하면 3가지로 분류하고 있다. 첫번째는 그림 1-2의 (a)와 같이 양쪽 금형이 모두 그 자신의 축을 중심으로 자전운동(自轉)만을 하면서 이송운동을 하는 구조이며, 두번째는 그림 1-2의 (b)에 보는 바와 같이 한쪽 금형은 고정되어 있고 다른쪽 금형이 자전운동, 궤도운동 및 이송운동을 한다. 세번째 형식은 그림 1-2의 (c)와 같이 상부 금형이 ϕ 만에 의한 요동운동만을 하며 하부 금형은 Z축의 방향으로 직선운동을 한다. 이 운동을 보통 궤도운동(Orbital Motion)이라 한다. 이상과 같이 금형의 여러가지 운동 양식에 따라 각기 다른 특성을 가진 회전 성형 분말 단조기를 만들 수 있다.

본 연구에서 개발된 회전 성형 분말 단조 프레스의 구조는 기존의 회전 단조기를 개선시켜 상부금형이 자전운동(Spin motion)과 궤도운동(Orbital motion)을 할 수 있도록 설계, 제작하였다. 그리고 분말 성형의 다양한 실험과 시제품 생산을 가능하게 하고 분말단조 공정의 제반인자를 파악하기 위하여 상부금형의 경사각은 0-6°까지 조절할 수 있는 가변형으로 설계하였다. 본 실험 장치는 크게 상부 프레임, 볼스터(Bolster), 하부 구조로 나눌수 있으며, 상부 구조는 요동축, 구면 정압베어링 및 이중 편심 슬리브 구조로 구성되어 있다.

이와 같이 개발된 회전 성형 분말 단조 프레스의 최대 성형 하중은 50 ton 이고, 최대 성형 압력은 175 kg/cm²으로 본 실험장치의 단면형상을 그림 2-2에서 보여주고 있으며, 표 2-1에서는 상세한 기계 사양을 나타내고 있다. 회전 분말 단조 공정은 상부 금형이 기계 중심축에 대하여 기울어진 상태로 성형하기 때문에 기계 구조 자체와 금형 가이드 부시가 편심하중에 대하여 충분한 강성을 갖도록 설계되어 있다.

또한 이중 편심 슬리브(Double Eccentric Sleeve)는 상부금형을 여러가지 운동양식으로 구동 시키는 중요한 역할을 한다. 따라서 상부 요동 운동의 개념은 그림 2-3에서 개략적으로 보여주고 있으며, 그림 2-3의 (a)에서 보는 바와 같이 바깥 슬리브(Inner eccentric sleeve)은 안쪽 슬리브(Outer eccentric sleeve)와 함께 기계 축 중심점(O)을 기준으로 회전되고, 동시에 안쪽 슬리브는 A점을 중심으로 바깥 슬리브와 같은 방향 또는 반대 방향으로 회전 하면서 다양한 운동을 한다. 또한 안쪽 슬리브만 회전시키면 요동축은 0-6° 까지 왕복 운동한다. 그림 2-3의 (b)는 바깥 슬리브와 안쪽 슬리브를 구동시키는 기어 변속 장치의 개략적인 구조를 보여주고 있다.

그림 2-4는 금형 조립도를 보여주고 있으며, 금형구조는 펀치(punch), 볼스터(bolster), 부상 금형(floating die),하우징(housing) 등으로 구성되어 있다. 회전 분말 단조 공정은 편심하중이 작용하기 때문에 가이드 플레이트(guide Plate)와 중간 플레이트(medium plate) 사이의 슬라이딩 틈새가 중요시 된다. 만약 이 틈새가 적절하지 않으면 성형중에 금형이 편심되어 소재에 크랙이 발생된다. 특히 부상 금형 소재는 내마모성과 내압축성이 좋은 초경합금(WC-5C)을 사용하였으며, 금형의 내경은

다이아몬드 분말재로 래핑(Lapping)하여 소재면의 거칠기와 취출시 단조 소재의 변형을 방지 하였다.

특히 본 실험장치는 회전 분말 단조 공정에서 제반 인자들의 특성과 소재 변형 특성을 파악하기 위하여 제작하였기 때문에 주요 인자들을 측정하기 쉽도록 설계 하였다. 측정 인자는 성형 하중, 가압속도, 상하부 금형의 회전 속도, 유압 압력 등이며, 여기서 하중 측정장치는 최대 하중이 20,000kgf인 로드 셀(Lode cell) 4개를 설치하였다.

3. 실험

3-1 시편 준비

본 실험에서 사용된 분말 재료는 Fe 합금으로 평균 입도가 300 메시(Mesh)이며, 표 3-1에서 적용된 분말재의 화학적 성분을 보여주고 있다. 예비 성형체의 제조 공정은 분말재를 혼합하고 단축 프레스에서의 성형과 예비 소결 공정순으로 이루어진다. 따라서 혼합(Mixing)은 원료 분말에 합금을 위한 성분 첨가재와 윤활재인 아연 스테아린산(ZnST)을 0.7wt % 첨가하여 더블-콘(Double-Cone)혼합기에서 18 회전수(rpm)로 40분 동안 혼합하였다.

성형공정(consolidation)은 40Ton급의 기계식 성형 프레스에서 수행하였다. 성형 후의 밀도는 6.5 - 6.8 g/cc이고, 예비 성형체(Preform)의 크기와 형상은 그림 3-1에서 보여주고 있다. 예비 소결(presintering)은 1120℃에서 50분간 소결하였으며, 분위기 가스는 일반적으로 소결시 환원이 강한 수소가스(H₂)을 사용하였다.

3-2 회전 분말 단조 실험

회전 분말 단조 실험에 앞서 예비 소결 과정에서 시편의 잔류 응력과 가공 경화(Workharding)를 제거하여 단조시 밀도를 향상시켰고, 크랙의 발생을 방지하기 위해 800℃의 온도에서 1시간 동안 유지시킨후 200℃까지 노냉시켰다. 단조 윤활제로 많이 사용되고 있는 MoS₂를 풀립처리된 시편에 도포하여 성형중에 금형면과 소재사이에 마찰을 줄여 성형 하중의 감소와 제품 취출시에 성형체의 파손을 방지하였다.

그림 2-1과 같이 상부금형이 원추형이므로 소재 단면 위를 가압하면서 회전시키면 소재와 상부금형의 접촉은 그림에서 알 수 있듯이 순간적으로 사선 부분만 접촉하게 된다. 이런 국부 접촉 영역은 일반 단조 공정에서는 볼 수 없는 전단응력의 존재로 분말 단조의 밀집화에 효과적이다. 그러므로 금형과 소재의 접촉영역을 결정하는 상형의 경사각도, 상부 금형의 요동속도 및 하부금형의 이송속도 등이 주요 변수이며 생산 제품의 형상이나, 재료에 따라 결정된다.

본 공정에서 적용된 상부금형의 경사각은 3°이며, 상부 금형의 운동은 궤도 운동(Orbital motion)으로 실험하였다. 1회전당 가압량은 0.3mm/rev과 0.5 mm/rev에서 성형하였다. 그림 3-2와 같이 회전당 가압속도가 0.5 mm/rev이상의 경우 접촉면적이 커지므로 소재와 금형사이가 밀폐되지 않아 성형 상태가 불량하였다. 여기서 상부 회

전속도는 200 rpm으로 회전당 가압량을 맞추기 위해 가압속도를 1.2mm/sec로 조정하여 실험을 수행하였다. 회전 성형된 제품을 1120℃에서 60분 동안 유지시켜 알콘가스 속에서 재소결(Resintering)하였다.

4 결과 및 고찰

분말 단조품의 기계적 특성에 영향을 주는 주요 인자는 분말의 특성, 예비 소결 단조재의 밀도, 금속유동(Metal Flow), 불순물, 제품 형상 및 소재 내부의 잔류기공 분포 등으로 구분할 수 있다. 따라서 회전 성형 분말 단조 공정에서 분말 단조의 적용 가능성과 기계적 성질인 경도, 강도, 밀도, 조직 등을 비교, 검토하였다.

회전 분말 단조 실험 후 치수변화와 무게변화를 표 4-1에서 상세히 나타내고 있다. 예비 성형체의 초기 높이가 9mm인 것을 높이 감소율 약 20%정도인 7.2mm로 감소시켰으며, 단조 후의 내외경 치수변화는 0.12mm 정도이고 무게는 거의 변함이 없었다.

4-1 성형 하중

그림 4-1은 예비성형체의 성형 하중과 밀도사이의 관계를 보여주고 있으며, 밀도가 증가할수록 성형하중도 증가하는 것을 나타내고 있다. 따라서 6.8g/cc의 밀도를 갖는 예비 성형체를 7.5g/cc이상의 밀도로 증가시킬 때는 약 20 ton의 성형하중이 소요되는 것을 보여주고 있다. 이것은 예비성형체의 제조공정에서 알 수 있듯이 40ton 급의 기계식 분말 성형 프레스에서 6.5 - 7.0g/cc을 얻은 반면, 회전 분말 단조기의 경우는 20 ton정도 성형 하중으로 7.5 g/cc이상의 밀도를 얻어 전면 압축법과 비교하여 비교적 작은 하중으로 고밀도의 제품을 얻을 수 있었다.

4-2 미세 조직 및 밀도

그림 4-2는 예비 성형체와 회전 분말 단조품의 단면을 경면가공하여 광학 현미경에서 50배율로 촬영한 그림이며 여기서 작고 검게 보이는 것이 기공이다. 그림 4-2(a)는 6.8g/cc의 밀도를 갖는 예비 성형체의 단면으로 많은 기공을 보여주고 있으며, 그림 4-2(b)는 회전단조 후 밀도가 7.5g/cc로 된 제품의 기공분포를 보여주고 있다. 여기서는 기공의 크기가 상당히 작아진 것을 확인할 수 있었다. 그림4-2(c)는 회전단조 후 재소결한 제품의 단면이다. 그림에서 알 수 있듯이 재소결의 전후로 기공의 크기와 밀도분포가 상당히 작아진 것을 확인할 수 있었다.

4-3 강도 시험

회전 분말 단조 공정에서 다양한 밀도를 갖는 성형체를 가공하여 재소결 전후의 공정에 따른 파괴 하중을 비교하기 위하여 링 형상 제품을 그림 4-3의 오른쪽 상단의 그림과 같이 만능 시험기(20ton)에서 가압하였다. 여기서 밀도가 증가할수록 제품의 파괴 하중이 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 4-4는 회전 단조 공정

에서 재소결한 제품과 종래 분말 야금공정에 의한 제품과의 파괴 하중을 상온에서 500℃까지의 온도 범위에서 비교하였다. 비교한 결과 회전 단조 제품이 종래의 분말 야금제품보다 파괴 강도가 높게 나타났으며, 고온에서도 높은 강도가 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

4-4 경도 시험

그림 4-5에서는 종래 분말 성형품과 회전 분말 단조 공정에서 성형된 링 형상 제품의 단면 경도값을 보여주고 있으며, 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기로 측정하였다. 여기서 종래 제품과 회전 분말 단조 후 재소결한 제품과 두께 방향에 따른 경도 분포를 나타내고 있다. 회전 분말단조 제품이 종래 분말 성형품에 비하여 경도값이 상당히 상승된 것을 알 수 있으며, 종래 제품의 경우 중앙부와 양 끝면에서 경도값의 차이를 보이지 않고 있으나, 회전 분말 단조에서 성형된 제품 단면의 경우 상부면, 아래면 및 중앙부에서 경도차를 볼 수 있다. 상부면은 상부 금형과 소재와의 국부 접촉에 의해 마찰이 적게 되어 금속 유동이 좋은 반면 하부면과 하부금형 부분은 밀폐되기 때문에 발생한 원인으로 사료된다. 그림 4-6에서는 종래 분말 성형품과 회전 단조 공정에서 얻은 제품의 경도 및 밀도 변화를 보여 주고 있다. 종래의 분말야금법에 의해 제조된 제품과 회전 성형 분말단조 공정으로 얻은 예비 성형체 경도는 비커스경도 Hv(30) 220-250정도로 비슷하게 나타내고 있다. 회전 단조후의 경도는 Hv(30) 263-266이고, 이것을 재 소결한 후의 경도는 274-294로 상승하였다.

5. 결론

회전 성형법을 이용한 분말단조 공정에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 최대 성형 하중이 50 Ton인 실험용 회전 성형 분말단조기를 설계 및 제작하였다.
- (2) 7.5g/cc이상의 고밀도를 갖는 제품은 6.5-6.8g/cc의 예비성형체로 부터 회전성형법에 의해 얻을 수 있었다.
- (3) 종래 성형법과 비교하면 작은 성형력으로 높은 파괴 강도를 갖는 제품 및 고밀도 제품을 얻을 수 있었다.
- (4) 따라서 제한된 실험 결과이지만, 본 회전성형 방식에 의한 냉간 분말단조 공정의 우수성은 입증되었으며, 향후 각 공정에 따른 재료의 금속학적인 변화에 대한 보다 상세한 연구가 진행된다면 본 공정의 적용 가능성은 매우 클것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 정형식, 이정환, 이동원, 이영선, 박종진, "분말 단조 기술의 현황", 대한 금속학 회보, Vol.6, No.4, pp.362-375, 1993.

2. Pregowski, J., "Rotary cold repressing", Adv. Powder Metla., Vol.1, pp.341-355, 1990.
3. Standring, P.M., "Rotary forging- a technical review", Met. J., pp.9-16, 1989.
4. 윤덕재, 최석우, 나경환, 김종호, "모델재를 이용한 회전단조 공정의 시뮬레이션", 추계 학술대회 92, 한국소성가공학회, pp.115-119, 1992,
5. Kubo, K., Hirai, Y., Dgiso, S., and Ito, S., "Preliminary Work of Rotary Forging Process with an experimental press", J. Jap. Soc. Tech Plasticity, Vol.14, No 151, pp.648-655, 1973.
6. Standring, P.M. and Appleton, E., "The kinematic relationship between angled die and workpiece in rotary forging", 1st Intl. Conf. on Rotary Metalworking Processes, London, U.K., pp.275-288, 1979.

Table 2-1 Technical data of Rotary forging machine

Pressing force	Max	50 ton
	Working	40 ton
	Ejecting	12 ton
Forging	Rocking shaft speed	0-50 rpm
	Lower die rotary speed	0-50 rpm
	Upper motion of lower	0-30 mm/sec
	Main ram speed	0-15 mm/sec
	Ejecting speed	0-10 mm/sec
Pressure	Main	175 kg/cm ²
	Working	140 kg/cm ²
	Ejecting	140 kg/cm ²
Hydroststic Bearing	Pressure	210 kg/cm ²
	Flow rate	14 l/min
Spin Motor		A.C servo motor (1kw)
Length* Width* Height		900 x 900 x 2500 (mm)
Weight press		5 ton

Table 4-1 Change of dimension between before and after forging

	Outer Dia.	Inner Dir.	Height	Weight
Before forging	35.0 mm	26.0 mm	9.0 mm	24.2 g
After forging	35.02 mm	25.88 mm	7.2 mm	24 g

Table 3-1 Chemical composition

Element	Mo	Cr	Ni	Co	Nb	Other	Fe
Composition (wt %)	5-9	0.8-3.5	3.0-2.0	3.0-7.0	0.5-1.5	< 2.0	Balance

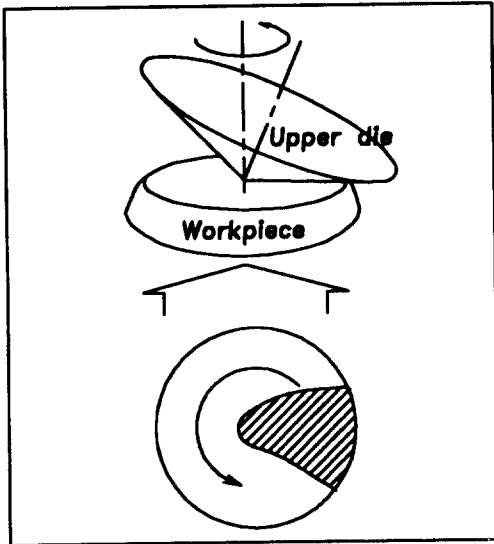


Fig. 1-1 Principle of rotary forging process

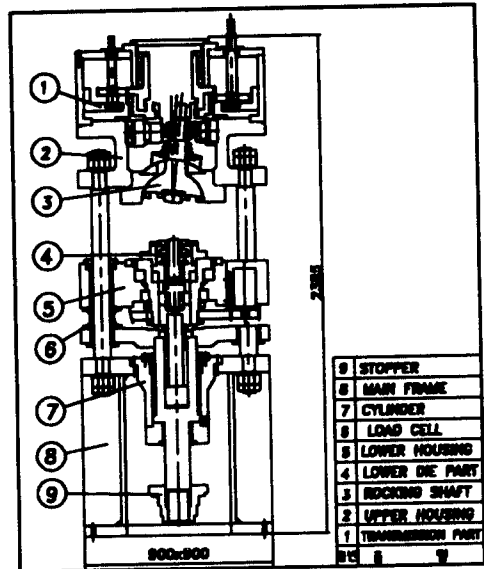


Fig. 2-2 Sectional view of rotary powder forging press

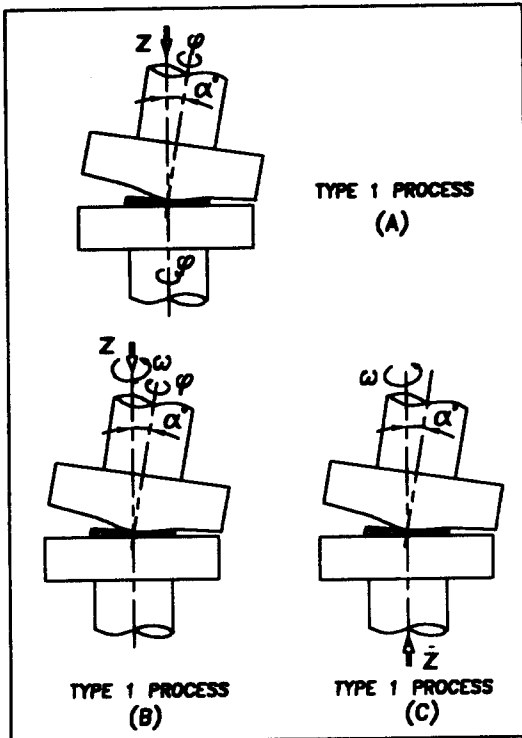


Fig. 2-1 Types of motion produced in rotary forging process

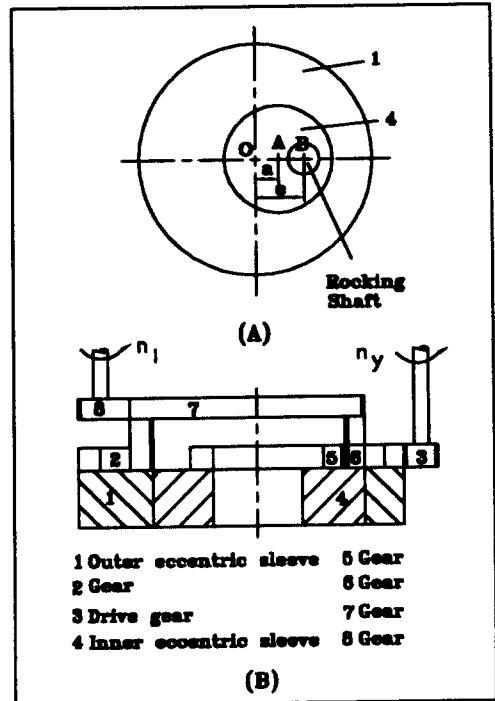


Fig. 2-3 Schematic drawing of double eccentric sleeve in rotary forging process

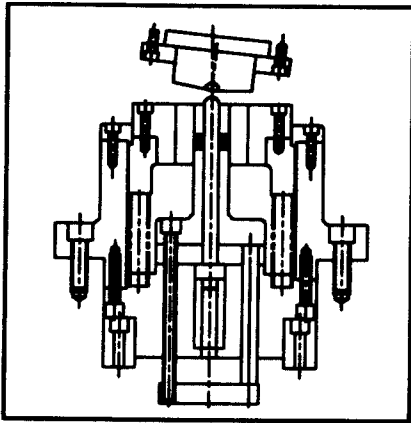


Fig. 2-4 Die assembly

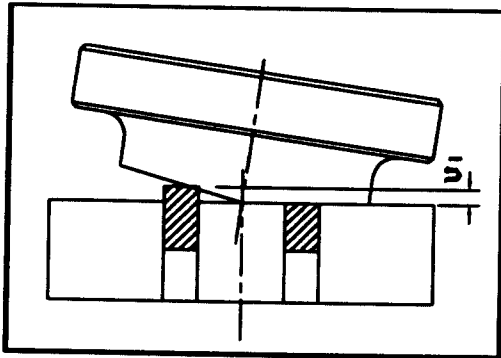


Fig. 3-1 Clearance between preform and forming speed per revolution

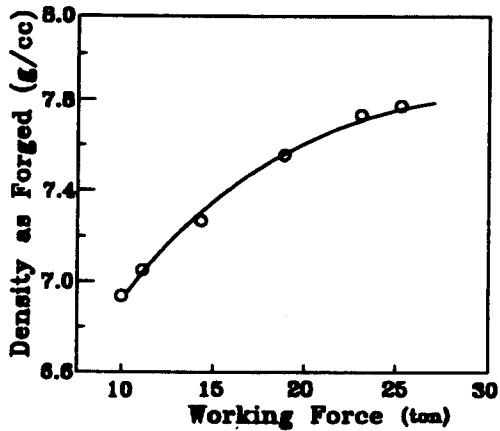
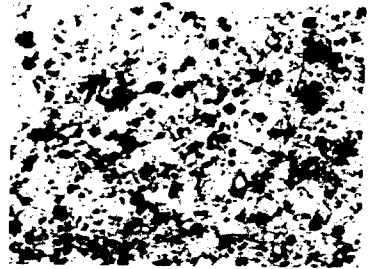
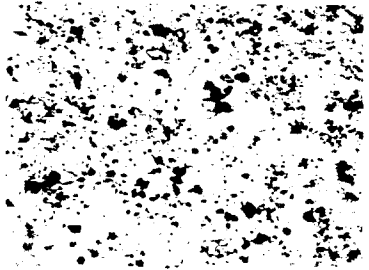


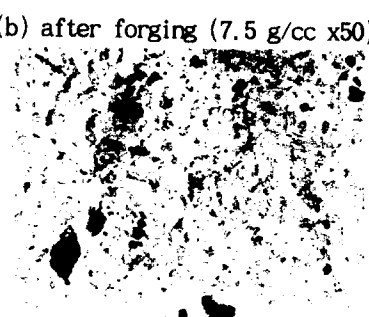
Fig. 4-1 Relation between working force and density



(a) before forging (6.8 g/cc x50)



(b) after forging (7.5 g/cc x50)



(c) after resintering

Fig. 4-2 Microstructures of Valve seat by Powder Rotary Forging

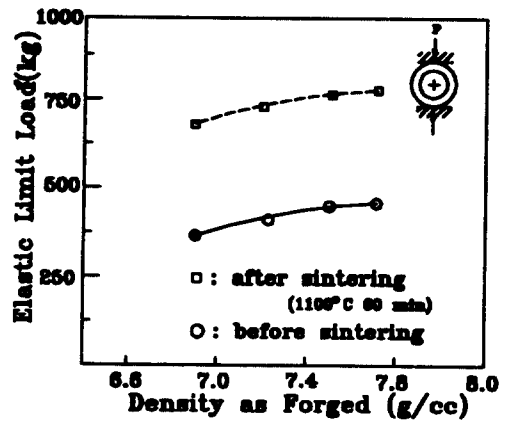


Fig. 4-3 Relation between density and radial crushing load

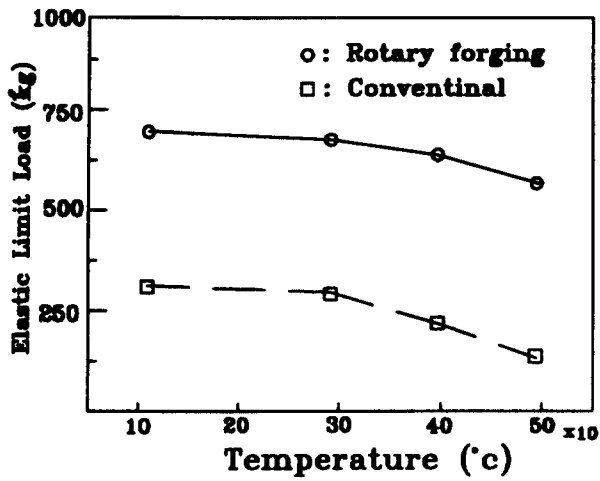


Fig. 4-4 Variation radial crushing load according to temperature change

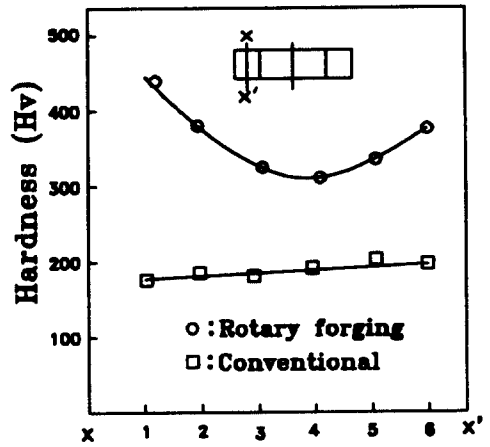


Fig. 4-5 comparison between rotary forging and conventional forging on directional hardness of thickness

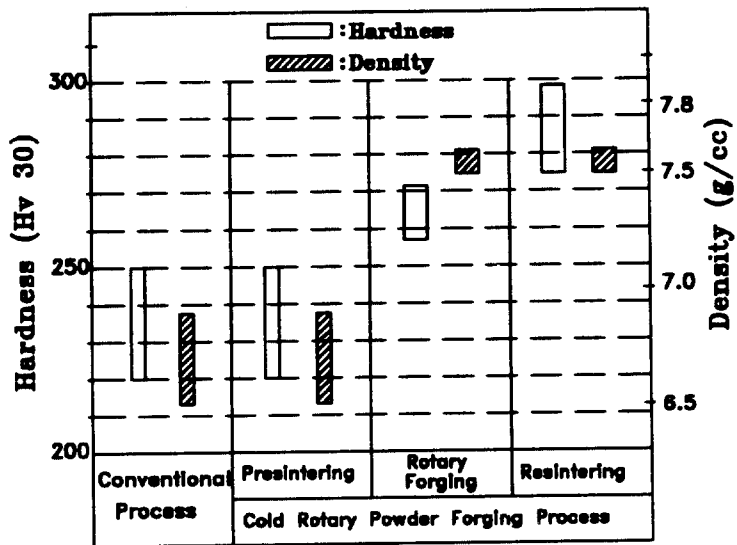


Fig. 4-6 Variation of hardness and density of product by various process