

커넥팅 로드의 분말단조를 위한 소결 및 단조특성의 실험적 연구

이 동원, 이 정환, 정 형식, 이 영선, 박 종진*

한국기계연구원

* 홍익대학교 기계공학과

Experimental Research of Powder Forging for Sub-Scale Connecting rods

D. W. Lee, J. H. Lee, H. S. Chung, Y. S. Lee, J. J. Park

Korea Institute of Machinery and Metals

* Dept. of Mechanical Engineering, Hongik University

Key Words : Powder Forging of Connecting Rod, P/M Preform Design, Sintering

ABSTRACT

Powder forged Connecting Rods have become attractive for use in automotive engines. The powder forging process offers beneficial material utilization as well as the minimization of finishing operations over that of conventionally forged rods. In the present work, the sintering behavior of Fe-2Cu-0.6C, optimum preform design and forgeability of various forging variables were investigated.

Our data were generated using a newly proposed sub-scale con-rod developed specifically to simulate the powder forging process.

We obtain optimum condition of sintering and powder forging process.

1. 서 론

분말단조란 일반적인 분말소결법으로 예비성형체를 제작한 후 그 것을 단조소재로 밀폐된 금형에서 정밀열간단조를 통하여 최종제품을 만드는 부품가공기술이다.^{1)~3)} 분말단조품은 진밀도를 얻을 수 있기 때문에 종래의 분말야금품으로서는 요구특성을 만족시킬 수 없었던 한계를 극복할 수 있고, 열간단조품 및 기계가공품에 비하여 합금 및 특성의 균일화를 꾀할 수 있으며, 커넥팅로드와 같이 비대칭 복잡형상 부품의

경우 후가공비의 절감에 의한 원가절감을 기대할 수 있다.

그림 1에는 개략적인 분말단조공정을 나타내었다. 분말단조품에서 기계적특성에 미치는 중요한 요인은 첫째, 단조후 제품 내부 및 표면에 존재하는 산화물의 양이다. 일반적으로 이러한 산화물은 소결시 불충분한 환원에 의해 잔류하며, 피로강도 및 충격강도에 악영향을 미치므로 제품의 산소농도는 약 500ppm 이하로 제어되어야 한다. 둘째는 부위별 밀도분포로써 제품전체에 걸쳐 균일한 진밀도 제품을 얻기 위해서는 단조전 예비성형체 형상 선정이 매우 중요하다. 예비성형체의 형상은 제품의 균열 발생 유무, 제품 내부의 금속흐름(Metal Flow), 분말단조 하중등에 많은 영향을 미친다. 이 밖에도 합금분말의 선정, 금형예열에 의한 Die Chilling 방지와, 단조를 위하여 가열로에서 프레스까지의 이동시간, 최종열처리 등의 효과도 고려된다. 본 연구에서는 자체적으로 설계한 Sub-Scale 커넥팅로드를 위와같은 분말단조 공정 변수중 소결조건 및 예비성형체의 형상을 변화시킨 분말단조 실험 후 성형품의 각 부위별 밀도분포와 성분검사를 수행하였으며 열처리 후 인장 특성을 용제재(S45C)와 비교하였다.

2. 실험 내용

본 연구에서의 실험은 첫째, 소결온도, 시간, 합금조성을 변화시켜 소결특성평가를 수행하였고 둘째, 분말단조 커넥팅로드의 시제품(End Item)을 축소시킨 Sub-Scale 커넥팅로드의 예비성형체 형상을 변화시킨 분말단조 실험을 통하여 단조 제품의 부위별 밀도를 측정하였고 열처리 후에 인장실험을 수행하였다.

2.1 재료 선정

분말합금의 기준조성은 Fe-2Cu-0.5C의 혼합분말이다. Fe Powder는 스웨덴의 Hoeganaes사에서 구입한 수분사법으로 제조된 순철 분말(+100Mesh : 10%max., -325mesh : 25%)을 사용하였고 Cu의 경우는 전해순동(-325mesh : 100%)를 사용하였다. 본 연구에서 Fe-Cu-C계의 분말합금을 선정한 이유는 첫째, 고부하 조건을 요구하는 소결부품에 가장 범용적으로 사용되며 둘째, 철강재료의 평균강도를 갖는 S45C나 S50C와 비교하여 동등 이상의 강도를 가질 수 있으며 세째, Ni, Mo, Mn, Cr 등이 첨가된 저합금강 분말에 비하여 소결시 환원이 용이하고 소결조건이 비교적 명확하기 때문이다.⁹⁾

2.2 소결특성평가

분말단조 커넥팅로드의 내부 산소농도를 500ppm이하로 유지하기 위해서는 소결후 예비성형체에서는 산소농도를 300ppm 이하 수준으로 제어해야 한다. 또한, 성형 후 Spring Back 및 소결 치수 변화량은 분말단조 금형 제작시 예비성형체와 금형 간의 여유량을 결정하는데 매우 중요한 변수이다. 그러므로 Cu와 탄소의 함량 및 소결온도, 시간등의 조건을 그림 2와 같이 변화시켜 실험한 후 치수, 밀도, 경도, 성분 검사 등을 수행하였다.

2.3 Sub-Scale 커넥팅로드 예비성형체 설계 및 성형실험

예비성형체의 형상은 소재의 표면 및 내부에 나타날 수 있는 결함 발생의 유무를 결정하며 제품의 각부위에 걸쳐 균일한 진밀도를 얻을 수 있는 중요한 인자이므로 그 설계가 매우 중요하다. 평면치수는 금형예열시 팽창량과 예비성형체의 팽창량을 고려하여 결정하였고 측면치수는 최종 단조품의 중량비를 고려하여 그림 3과 같이 설계하였다. 최종 분말단조품의 밀도는 7.84 g/cc로, 예비성형체의 밀도는 6.5 g/cc로 결정한 후 예비성형체의 측면부 높이 치수(대.소단부, 목부)를 설계하였고 그 결과에 따라 각 부위별 중량비와 예비성형체의 중량비가 동일하도록 설계할 경우 단조 성형시 대.소단부에서 목부로의 금속흐름은 전혀없이 단순 재압축 모드 (Repressing Mode)에 의해 성형되고 반면에 목부의 중량은 감소시키고 대.소단부의 중량을 증가시킨 예비성형체를 단조할 경우에는 대.소단부에서 목부로의 금속흐름을 그림 4와 같이 유도할 수가 있다. 그림 5는 예비성형체의 부위별 중량비를 변화시킨 Sub-Scale 커넥팅로드 시편의 치수이며 성형실험은 그림 6과 같은 공정을 통해 수행하였고, 사용 금형의 구조는 그림 7과 같다.

분말단조의 기계적 특성은 커넥팅로드의 열간단조재로 가장 널리 사용되고 있는 S45C 용제재와 동일조건으로 열처리 후 인장강도를 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 소결특성평가

Fe-Cu-C계 소결특성평가는 성분조절 및 소결조건에 따른 밀도, 치수, 성형량, 조

직 등을 검토하였다. Cu 및 흑연 분말의 첨가량이 증가하면 입자크기가 작고 철 분말보다 경도가 낮은 Cu와 흑연입자가 철 분말 사이에 존재하면서 압축성이 증대되어 성형압이 감소되었으며 성형 후 Spring Back량은 조성 및 성형밀도에 큰 차이를 보이지 않고 약 2.5% 팽창하였다. 소결시 치수변화량은 두께방향 보다 반경방향의 수축량이 현저하였으며 소결온도와 Cu 함량의 증가에 따라 소결 수축량이 감소되었고, Cu를 2% 첨가시 소결 후 밀도가 0.3 g/cc 정도 증가되었다. 소결체의 산소량은 소결온도, 시간, 혼합탄소량의 첨가량 증가에 300 ~ 400 ppm 수준을 유지하였다. 혼합흑연량에 따라 소결 후 잔류 탄소량은 소결시 탈탄되므로 0.5%의 잔류 탄소량을 얻기 위해서는 혼합탄소량이 0.6%가 되어야 함을 알 수 있었다. 그림 8은 소결 후 미세조직으로 전형적인 중탄소강의 Ferrite와 Pearlite의 복합조직임을 알 수 있다.

3.2 Sub-Scale 예비성형체의 특성평가

본 연구에서 제작된 예비성형체의 외관은 그림 9와 같으며 부위별 밀도는 측정결과 그림 10과 같이 나타났다. 분말단조시 스트로크(Stroke)에 따른 단조압력의 변화는 그림 11에, 시편의 밀도증가 경향은 그림 12에, 스트로크에 따른 부위별 밀도증가경향은 그림 13에 나타내었다. 또한, 각 예비성형체 A, B, C, D 중 조밀화가 가장 용이한 예비성형체를 찾기위해 성형압력을 고정시킨 경우 각 예비성형체의 부위별 밀도 변화는 그림 14에 표시하였으며, 그 결과를 살펴보면 예비성형체A의 경우, 즉, 목부로의 금속흐름이 가장 적은 경우가 전체적으로 가장 균일한 밀도 분포를 나타내었기 때문에 금속흐름을 통한 목부의 밀도 증가를 위해서는 큰 성형압력이 요구됨을 알 수 있다.

커패시터로드의 피로강도에 미치는 효과는 금속흐름도 중요하지만 표면 잔류기공의 존재 유무도 더욱 중요한 역할을 하므로 이를 확인하기 위하여 각 예비성형체에 대한 부위별 기공 분포를 관찰하였고, 대표적으로 예비성형체 A 와 D에 있어서의 기공 분포를 그림 15에 나타내었다. 또한, 기공분포 사진으로 Image분석을 수행하여 기공량을 정량분석한 결과를 그림 16에 나타내었다. 밀도분포 결과에서 예측했듯이 예비성형체 A의 경우가 제품 표면 및 내부에서 가장 적은 기공량을 나타내고 있다. 즉, 목부 표면기공량을 최소화 시키기 위해서는 목부가 최종 성형되는 것을 방지해야 하며, 즉, 대.소단부 및 목부가 동시에 성형되거나 금속흐름이 필요할 경우는 대.소단부에서 목부로의 금속흐름이 아닌 각 부위에서 독립적인 금속흐름의 제어가 바람직할 것으로 생각된다. 예를 들어, 예비성형체와 단조품에 있어서 각 부위의

중량변화없이 대.소단부측은 업세팅 모드, 목부는 후방압출모드를 유도하는 방안이 가장 바람직 할 것으로 예상된다. 이러한 효과는 열처리 후 인장 실험결과에서 판명되었으며, 그림 17과 그림 18에 나타나 있는 각 예비성형체에 따른 인장강도 및 연신률을 비교해보면 예비성형체 A로 갈수록 인장강도 및 연신률이 증가됨을 알 수 있었다. 특히, 연신율의 경우는 그 현상이 크게 나타남을 알 수 있는데, 표면 잔류 기공량의 차이가 인장 실험시 목부의 Necking 현상에 큰 역할을 하기 때문으로 판단된다. 그러나, 용제제 S45C의 연신율은 약 23%로써 분말단조품 보다 크게 향상되어 있는 것으로 보아 표면잔류 기공효과를 무시할 수 없음을 알 수 있다.

단조품의 표면 및 내부에 있어서 성분분석을 수행한 결과는 표1에 나타내었는데, 예비성형체에 비하여 탄소함량이 약간 증가하였고, 산소함량이 다소 감소한 것으로 보아 분위기 단조 가열시 제품 표면에 피복된 흑연 윤활제에 의한 약간의 환원 및 침탄이 발생한 것으로 예측된다.

4. 결론

본 연구에서 수행한 분말단조 커넥팅로드의 소결특성평가 및 Sub-Scale 분말단조 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 성형 후 제품의 Spring Back 량은 조성의 변화에 관계없이 약 2,5% 이었다.
- 2) Fe-2Cu-0.6C의 합금분말성형체에 있어서 1250℃에서 20분 소결할 경우 소결수축량은 반경방향으로 약 6%, 높이 방향으로 약 0.3%이며 소결밀도는 약 0.3 g/cc 증가하였다.
- 3) 소결 후 산소농도는 소결시간, 온도, 혼합 탄소량의 증가에 따라 200ppm에서 400ppm 사이의 범위에서 감소되었다.
- 4) 소결후에 약 0.5%의 잔류탄소량을 얻기 위해서는 혼합탄소량을 약 0.6% 로 첨가해야 한다.
- 5) Fe-2Cu-0.5C의 소결체를 단조하여 7.84g/cc의 진밀도를 얻기 위해서는 약 150 kgf/mm²의 단조압력이 필요하였다.
- 6) 분말단조시 목부로의 금속흐름을 유도할 경우 목부 내부의 경도는 증가하나, 표면측의 잔류기공은 상대적으로 많이 발생하였다. 즉, 목부 표면 기공량을 최소화시키기 위해서는 목부가 마지막으로 성형되는 것을 방지해야 하며 대.소단부 및 목부가 동시에 성형되거나 금속흐름이 필요할 경우는 대.소단부에서 목부

로의 금속흐름이 아닌 각 부위에서 독립적인 금속흐름의 제어가 바람직할 것으로 예상 된다.

- 7) 분말단조품에 있어서의 표면 및 내부 산소농도는 약 200ppm이었고, 탄소의 경우 표면, 내부 모두 약 0.55%로 가열시 탈탄 및 산화현상은 없었던 것으로 판명되었다.
- 8) 분말단조품의 Q/T 처리 후 인장실험에서 가장 양호한 특성을 나타낸 예비성형체는 목부의 금속흐름이 전혀 없는 예비성형체 이었고 이는 목부 표면기공량이 다른 예비성형체에 비하여 적기 때문임을 Image분석으로 확인하였다.

참고문헌

- 1) 서상기 : 한국기계연구소, 기술보고서, "분말단조 기술개발", 1988. 4.
- 2) 정형식, 이정환, 이동원 : "분말단조에 의한 자동차부품개발(2)", 상공자원부보고서, 한국기계연구원, MI078-1759.C, 1992.
- 3) 이정환, 이동원, 정형식 : "분말단조의 기술현황분석", 기계와재료, 한국기계연구원, V4,N3,1992, P101
- 4) Anchi Ken : "Powder Forging at Toyota", MPR, Feb., 1983, P103
- 5) Chiaki Tsumuki : "Application of Powder Forging to Automotive Parts", Advanced Technology of Plasticity, V1, 1984, P339
- 6) P/M Technology, News Letter, V22, No.3, Mar./Apr. 1993
- 7) Donald G : "The Dynamics of Powder Metallurgy", Industrial Heating, Aug., 1990, P30
- 8) M. Weber : "Comparison of Advanced Procedures and Economics for Production of Connecting Rods", PMI, V.25, No.3, 1993, P125
- 9) Shigeomi Araki : "Application of Powder Forging to Automotive Connecting Rod" Kobe Steel Engineering Reports, V.42, No.1, 1992, P23

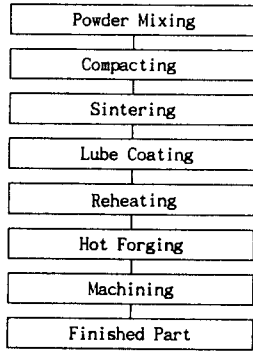


Fig. 1 Powder forging process

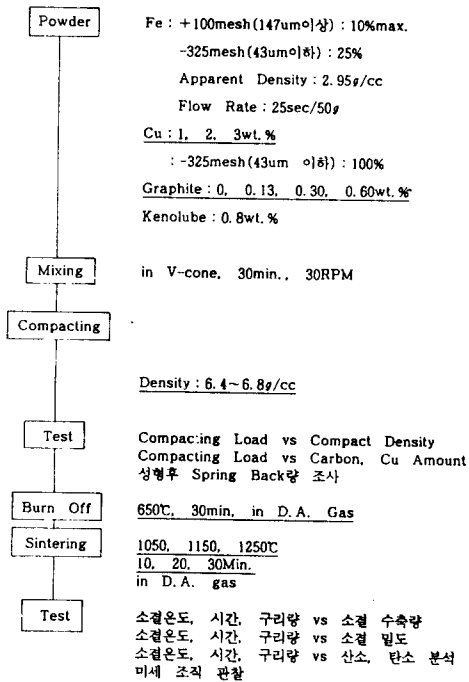


Fig. 2 Flow chart of sintering process

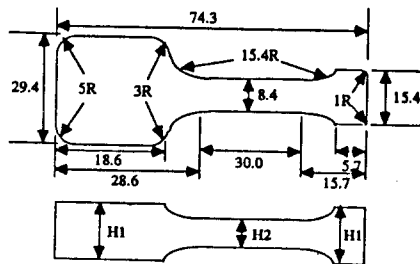


Fig. 3 Dimensions of sub-scale preform

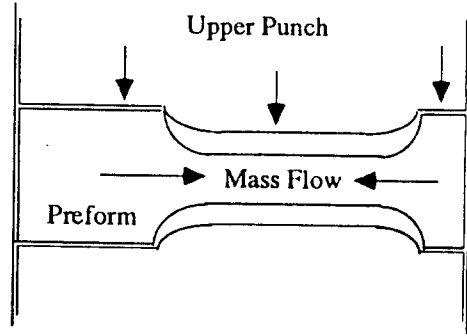
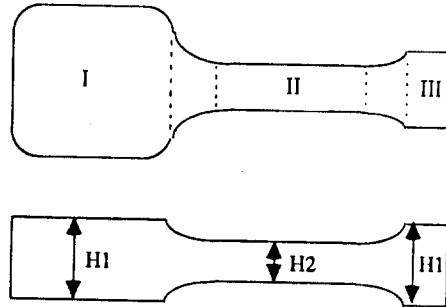


Fig. 4 Schematic Diagram of Forging Mode



시편	치수(mm)		부위별 중량(g)			II zone에서의 중량 분기량
	H 1	H 2	I	II	III	
A	19.44	9.45	66.61	15.27	11.17	0
B	19.77	9.36	67.96	15.12	11.18	1.0
C	20.10	9.30	69.32	15.00	11.19	1.8
D	20.50	8.20	70.70	13.22	11.41	13.4

Fig. 5 Dimensions and weight ratio of sub-scale connecting rods

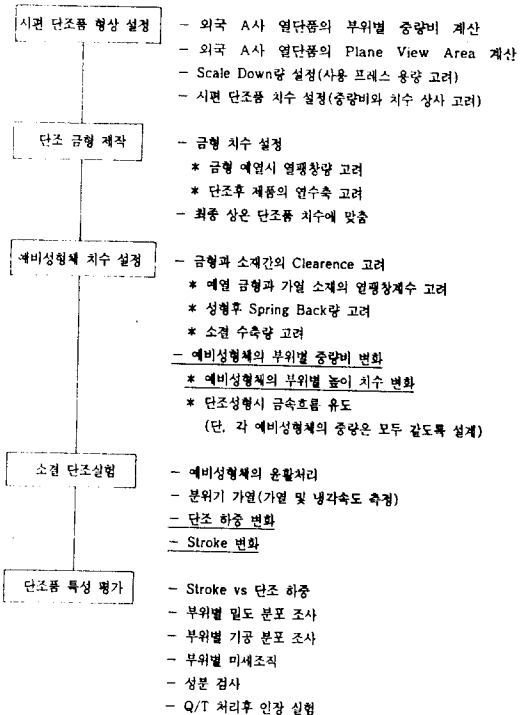


Fig. 6 Flow chart of Forging Process

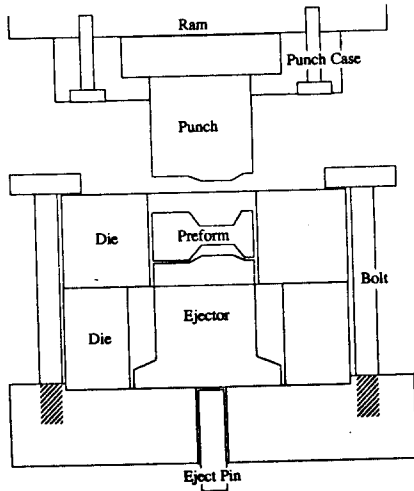
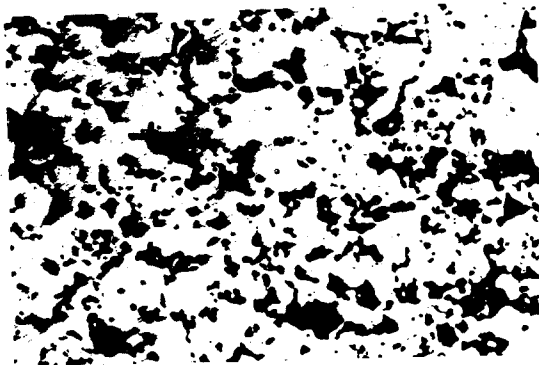
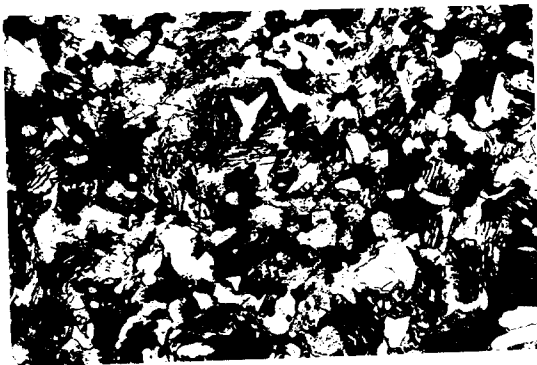


Fig. 7 Schematic diagram of powder forging tooling



a) As Polished $\times 100$



b) As Etched $\times 200$

Fig. 8 Microstructures of sintered specimen (1250°C, 20 min)

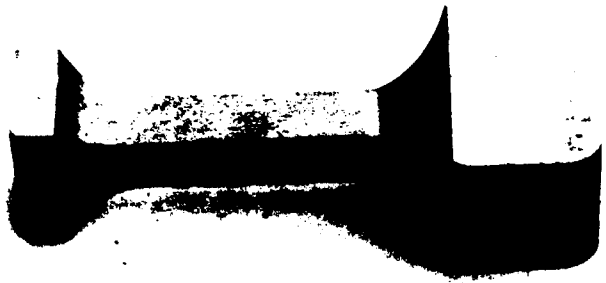


Fig. 9 Appearance of sub-scale connecting rod

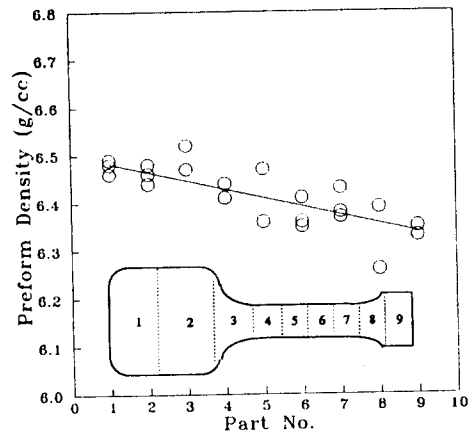


Fig. 10 Density distribution of preform

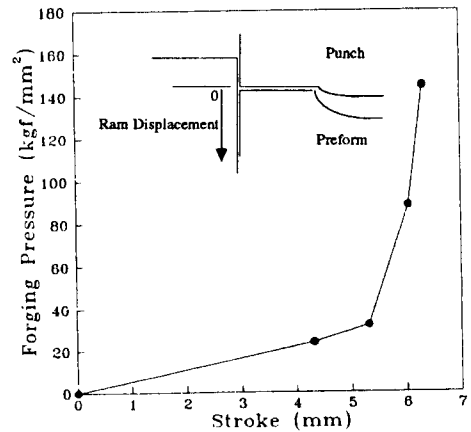


Fig. 11 Relation of forging pressure and stroke

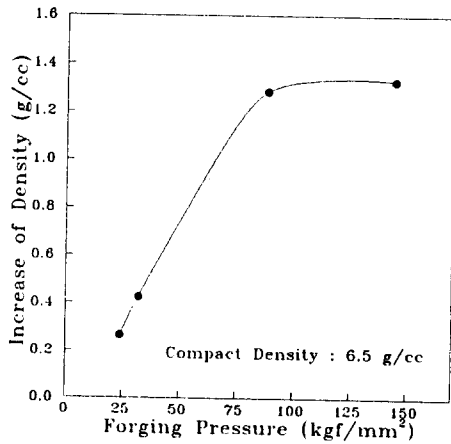


Fig. 12 Relation of forging pressure and density

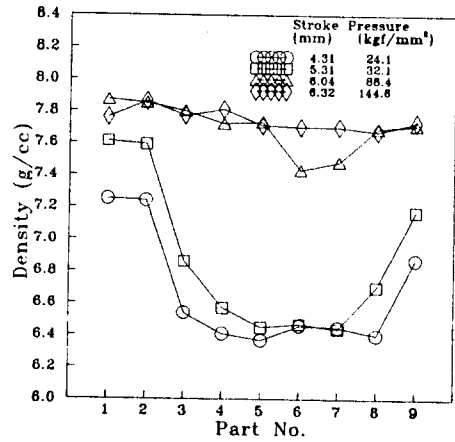


Fig. 13 Relation of stroke and density distribution (preform D)

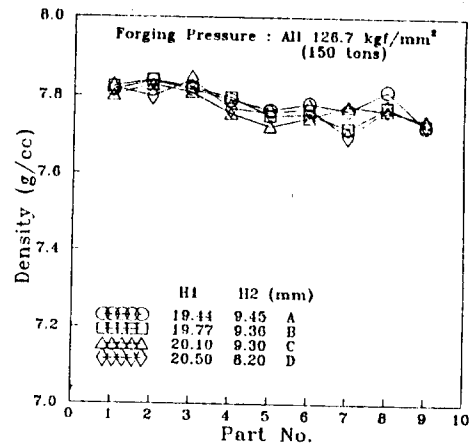
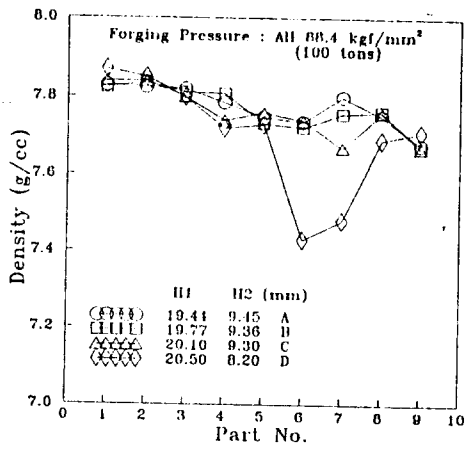
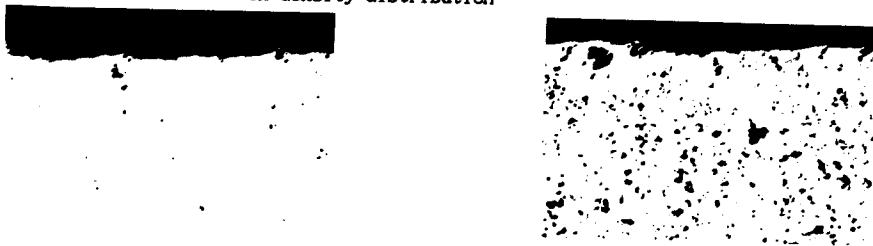


Fig. 14 Effect of preform shape and forging load on density distribution



<surface>

preform B

<center>

preform D

Fig. 15 Pore distribution of powder forged sub-scale connecting rod (Zone 2, X100)

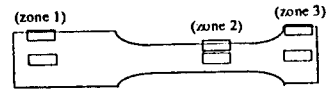
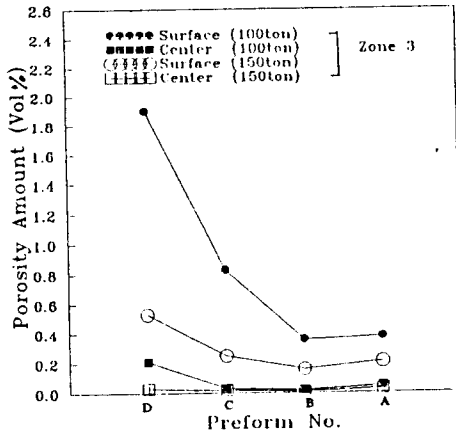
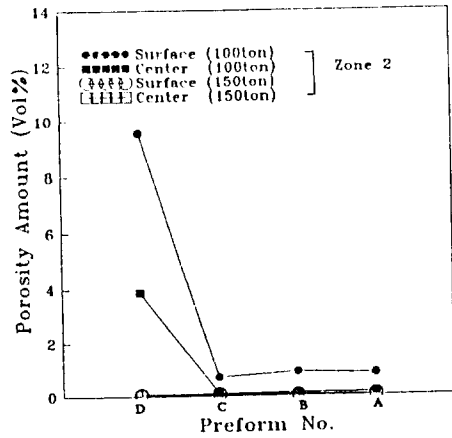
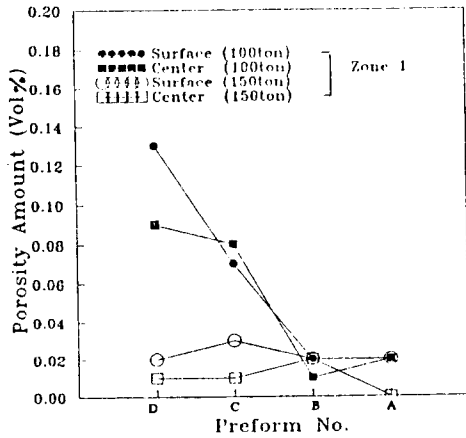


Fig. 16 Image analysis results

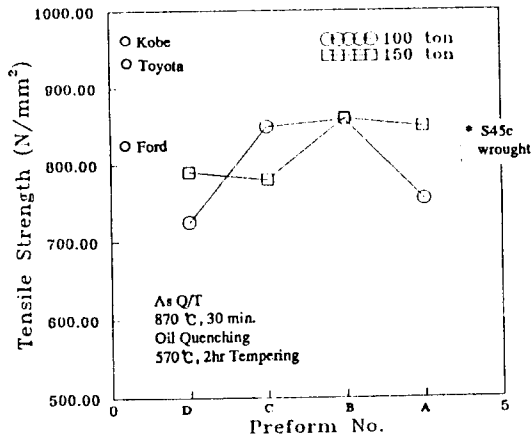


Fig. 17 Comparison of tensile strength in powder forged and wrought materials

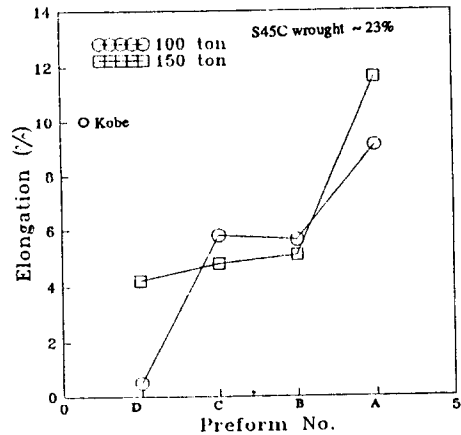


Fig. 18 Comparison of elongation in powder forged and wrought materials

Table 1 Chemical composition of powder forged sub-scale connecting rod

	O ₂ (ppm)	C (wt%)	Cu (wt%)
Surface	204	0.55	2.14
Core	198	0.55	2.08