

분말단조에 의한 자동차 부품의 개발

Development of Automotive Parts by Powder Forging Process

정 형 식, 이 정 환, 이 동 원
H.S.Chung, J. H. Lee, D. W. Lee



정 형 식

- 1948년 9월생
- 분말단조, 분말압연 및 이온 이 용한 전자재료 개발과 초전도 재료개발 등의 연구
- 한국기계연구소 소재성형실



이 정 환

- 1958년 2월생
- 자동차 및 항공기 부품의 정밀 단조, 알루미늄합금의 정밀단조, 분말단조, Gear 단조 등 연구
- 한국기계연구소 소재성형실



이 동 원

- 1965년 8월생
- 분말단조, 알루미늄 합금의 정 밀단조, 가공 열처리 등의 연구
- 한국기계연구소 소재성형실

1. 서 론

분말단조(powder forging)란 종래의 분말 야금법으로 예비 성형체를 만든 후 그것을 단 조 소재로 열간단조를 통하여 최종 제품을 만 드는 부품가공기술이다.¹⁾ 이러한 분말단조 기 술은 일부 선진국에서 철계분말 합금의 분말 단조에 의한 자동차부품의 양산화와 더불어 그 중요성이 국내까지도 점점증되고 있는 실정 이다. 종래의 분말야금 부품의 경우, 소재 내

부에 존재하는 상당량의 잔류 기공 및 기공표 면의 산화 피막은 충격에너지, 파괴인성 및 연 성에 악영향을 미치기 때문에²⁾ 고강도를 요 구하는 부품제작에는 그 개발범위가 제한되어 왔다. 즉, 분말단조의 매력은 최종 정밀단조 를 통하여 진밀도(full density)를 얻음으로써 분말야금 부품에서의 기계적 특성의 한계 성을 극복할 수 있고, 또한 종래 분말야금 기 술의 장점인 합금조성의 균일화와 재료비 및 후가공비의 절감 등이다. 일부 선진국, 특히 일본, 미국 등지에서는 이러한 분말단조의 장 점 때문에 지난 10년간의 기술 축적을 통하 여 자동차 엔진 부품 중 Connecting Rod와 Pinion Gear를 중심으로^{3,4)} 기타 자동차 기어 류 부품의 양산화에 성공하였다. 한편 국내에 서도, 최종 기계가공비의 절감에 따라서 최종 부품의 생산 원가를 감소시킬 수 있는 분말 단조 기술의 보급에 관심을 가지고 있지만 아직까지 정량적인 공정 설계가 되지 않고 있다. 본 고에서는 분말단조의 이해와 선진국에서 개 발에 성공한 사례 및 경제성을 조사함으로써 분말단조기술의 현황 파악 및 기술 축적을 도 모하고자 하였다.

2. 분말단조의 개요

분말단조가 종래의 열간단조와 비교해서 가

질 수 있는 장점은 최종 가공비 및 재료 손실의 절감 측면에서 찾을 수 있다. 그러나 분말 자체의 가격이 상대적으로 비싸기 때문에 전체공정에 있어서 제품의 원가절감을 위해서는 최적의 분말단조 공정을 개발하여야 한다. 즉, 종래의 보통급 단조와 경쟁하여 가격 및 기계적 특성의 향상 측면에서 유리하려면, 첫째 분말의 특성 및 합금조성의 정확한 분석이 필요하고, 둘째 단조 전의 예비성형체 설계 및 소결 공정의 최적 설계가 요구되며, 셋째 최적의 윤활 및 단조 공정 설계와 최종적으로 요구되는 기계적 특성을 만족시키기 위한 후처리 공정이 필요하다.

2.1 분말단조의 공정

Fig.1은 분말단조의 개략적인 공정도를 나타낸다. 종래의 열간 단조의 경우는 단조 후 Flash 제거 공정 및 기계가공이 첨가되며 단조 공정 또한 2단계 이상의 공정이 요구된다. 최종 제품에 대한 재료 회수율을 비교하면 열간 단조의 경우가 40~50%이고, 분말단조 공정에서는 90% 이상이다. 즉, 분말단조를 이용할 경우 일반 단조나 기계가공에 비해 20

% 정도의 생산원가의 절감 효과를 볼 수 있고 또한 종래의 분말 야금 부품의 취약점인 피로 강도 및 충격 강도의 한계성을 극복할 수 있다.

2.2 원료 분말

분말단조에 있어서 원료 분말의 가격은 최종 제조원가의 20~30% 가량을 점유하기 때문에 그들의 합금설계는 최종 제품의 기계적 특성을 향상시키기 위해서 신중히 고려되어야 한다. 또한, 합금 조성 이외에 분말 내에 존재하는 산소와 비금속 개재물 등은 최종 제품의 피로 및 동적 특성에 악영향을 미치기 때문에 산소 농도는 500ppm 이하, 비금속 개재물은 0.002wt.% 이하의 분말 합금 설계가 요구된다. 생산 수량이 많은 자동차 부품 및 기타 공작기기 부품의 경우 수분사법에 의해 제조된 저합금강 분말이 많이 사용된다. 합금 조성은 최종 제품의 경도 및 기계적 성질에 많은 영향을 미치기 때문에 사용용도 및 목적에 따라 적절한 합금 원소의 첨가가 요구된다. 저합금강에 첨가되는 주요합금원소는 Ni, Mo, Mn, Cr 등으로써 이들은 모두 철강재료에서 경화능 및 인성(toughness)을 향상시키는 원소로 알려져 있다. Ni과 Mo는 환원이 용이한 장점을 갖고 있고, Mn과 Cr은 상대적으로 값은 저렴하지만 소결시 환원이 어려운 단점이 있다.^{5,6)} Table 1은 외국의 대표적인 분말 제조업체 및 각 분말의 화학 조성을 나타낸다. 특히 첨가된 탄소는 소결과 단조시 상당량이 탈탄되므로 최종 탄소 함량을 맞추기 위하여는 충분한 예비실험이 필요하다.

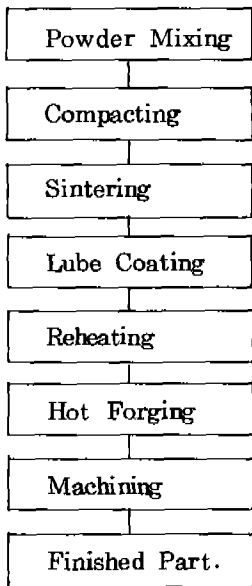


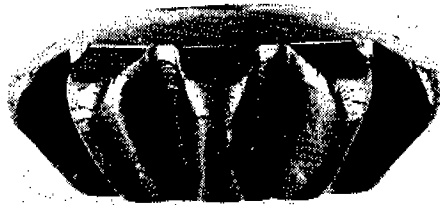
Fig.1 Flow chart of powder forging process.

Table 1 Typical low-alloy steel powder

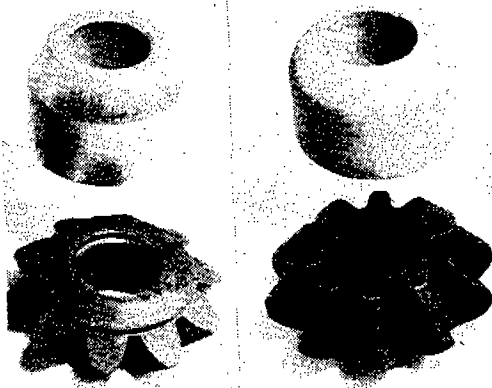
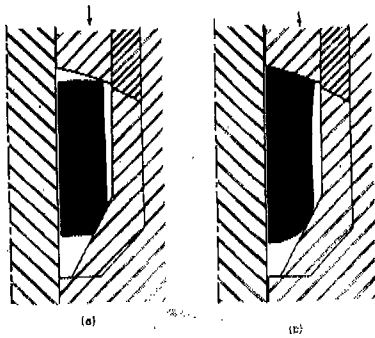
Company	Designation	Chemical Composition (wt%)				
		Mn	Ni	Mo	Cr	Cu
Hocganaacs	ASTALOY A	0.25	1.90	0.50	0.08	-
	ASTALOY D	0.35	0.25	0.30	0.18	-
Kawasaki	KIP 4100	0.08	-	0.25	1.0	-
	KIP 4600	-	1.5	0.5	-	0.5
Sumitomo	SUMIRON 4100S	0.75	-	0.25	1.0	-
	SUMIRON 4600	0.20	2.0	0.50	-	-
	SUMIRON 2000	0.3	0.4	0.7	-	-

2.3 Preform의 성형과 소결 7,8,9)

Preform의 설계는 단조시 강도를 요구하는 부위의 Metal Flow를 조장하고 제품 전체부위에 균일한 진밀도를 얻기 위한 측면에서 매우 중요하다. 구체적으로 최적의 Preform설계를 함으로써 소재의 표면 및 내부에 결함 발생을 방지하고 질량 분포를 유도하여 제품



Pinion gear showing cracks



Preforms and forged gear

Preform on the right → successful forging
Preform on the left → cracking

Fig.2 Typical example of successful and failed forging preform—design for pinion gear

전체에 걸쳐 진밀도를 균일하게 얻을 수 있다. 최근, 이러한 Preform 설계시 Trial & Error를 최소화하기 위하여 유한요소법(FEM)과 같은 컴퓨터를 원용한 Preform 설계가 많이 연구되고 있다.

Fig.2는 자동차 Differential Part 중 Bevel Gear의 경우 Preform의 형상에 따른 단조후 최종 제품의 균열 발생 여부를 나타내고 있다.

소결(sintering)의 목적은 Preform 내부에 존재하는 산화물의 환원 및 밀도 증가와 단조를 위한 이송시 파괴를 방지할 수 있는 강도를 유지하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 적절한 환원 분위기와 소결온도가 요구된다. 일반적으로 소결시 산화물의 환원은 H₂개스에 의한 H₂O의 방출로 이루어지기 때문에 토내의 수증기 분압은 매우 낮아야 한다. 또한 H₂개스의 제공을 위해서는 비교적 값이 저렴한 암모니아(NH₃)개스를 고온에서 분해시킨 분해 암모니아 가스(dissociated ammonia: N₂ + 3H₂)가 주로 이용된다.¹⁰⁾ Fig. 3은 소결시간이 30분으로 고정될 경우 소결온도에 따른 산소 농도의 변화를 나타내고 있다.

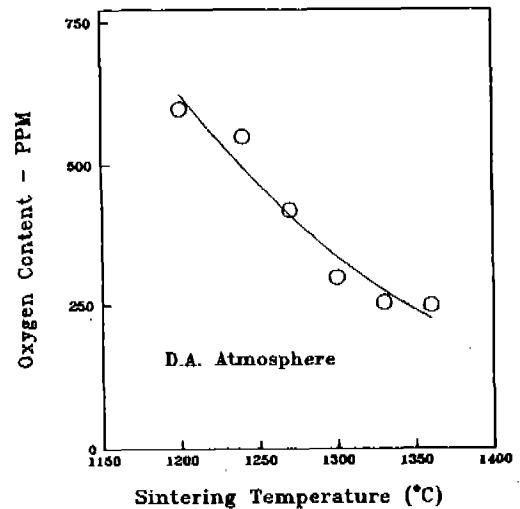


Fig.3 Oxygen contents of forged 0.5% Ni-0.5% Mo steel powder billets as a function of sintering temperature (Sintering time: 30 min.)

Table 2 Comparison of press for a powder forging

기 종	제어방법	단조속도	Cycle 수	Cycle 안정성	치수정밀도	가 격
Mechanical Press	Stroke	중	다	양호	양호	고
Screw Press	Energy	중	중	"	"	중
Hydraulic Press	Load	저	소	"	열등	고
High Velocity Forging Press	Energy	고	다	열등	"	중
Hammer	Energy	고	다	불량	불량	저

Table 3 Comparison of heating method for a powder forging

항 목	유 도 가 열	복 사 가 열
가열 온도	통상 1,400℃ 한계	1,200℃ 한계
가열 시간	복사가열 보다 급속가열 가능	Heater 용량증가에 따른 단시간 가열가능
시편 형상	소형 단순 원통형상 유리	형상의 제약 없음
제어 특성	응답성이 좋고 제어 용이	자동제어는 용이하지만 승온시간의 단축은 한계가 있음
전력 효율	통상 50~60%	유도가열에 비해 떨어짐

2.4 Preform의 단조

Preform의 단조시 사용되는 프레스는 단조 제어방법 및 단조 속도와 치수 정밀도 등의 요구되는 변수에 따라서 선택되어야 한다. 궁극적으로 프레스 급형의 Chilling 현상 방지와 생산원가 측면에서 고려할 때 Cyclic안정성과 치수 정밀도가 양호하고 생산성 향상을 위하여 단조 속도가 빠른 프레스가 주로 사용되어진다. Table 2는 분말 단조용 프레스의 종류 및 특성에 대해서 비교하고 있다. 단조 온도까지의 가열시 Preform 표면에 윤활제가 증발하거나 산화막이 형성될 경우 단조시 표면 균열의 원인이 될 수 있으며 최종 제품의 기계적 특성에 악영향을 미치기 때문에 산화의 방지를 위해서는 가능한한 급속가열이 요구되며 형상 및 요구조건에 따라 분위기 가열을 채택한다. 대표적인 단조 가열방법을 Table 3에 나타내었다. 단조 공정에서 Preform의 윤활 처리는 급형과의 마찰계수를 줄이고 단조 후 이형을 이용하게 하며 표면 산화의 방지 및 단조 결함 방지를 위해서 매우 중요하다. 급형에 윤활 처리를 하는 목적은,

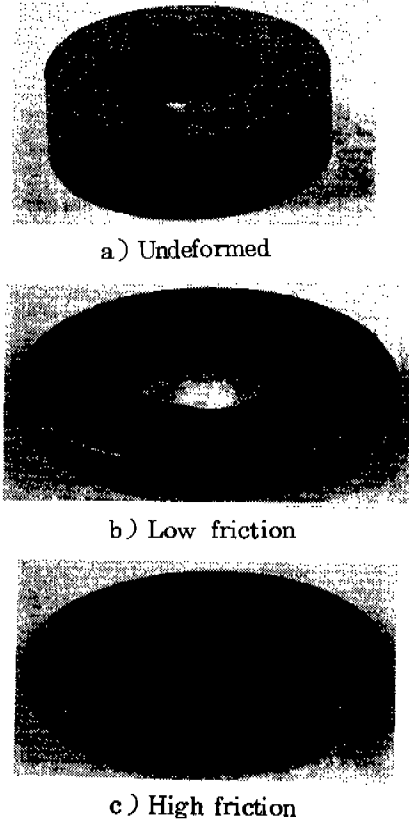


Fig.4 Effect of lubrication through the illustration of the ring test.

운환액에 의한 금형온도 강하 효과로 금형의 수명을 연장하고, 재료의 유동을 향상시키며 단조하중의 감소 및 Preform 표면의 산화 현상을 방지하는데 있다. 일반적으로 사용되는 운환제는 수용성 Graphite 계로써, 금형은 주로 자동화된 Spray 장치로 운환 처리되며, Preform은 Spray 또는 Dipping 법으로 운환 처리된다. Fig.4는 Ring 압축 실험에서 운환제의 중요성 및 효과를 나타낸다. 최종 단조제품은 사용 목적에 따라 기계적 성질을 향상시키기 위하여 열처리를 하게 되는데 통상 Q/T 법이 주로 행하여지고, 특히 내마모성 및 피로 특성의 향상을 위하여 필요에 따라 가스 침탄 처리 및 질화 처리도 요구된다.

2.5 분말단조품의 기계적 성질¹¹⁾

분말단조품의 기계적 특성에 영향을 주는 주요인자는 분말 특성, 소결조건, 단조 밀도

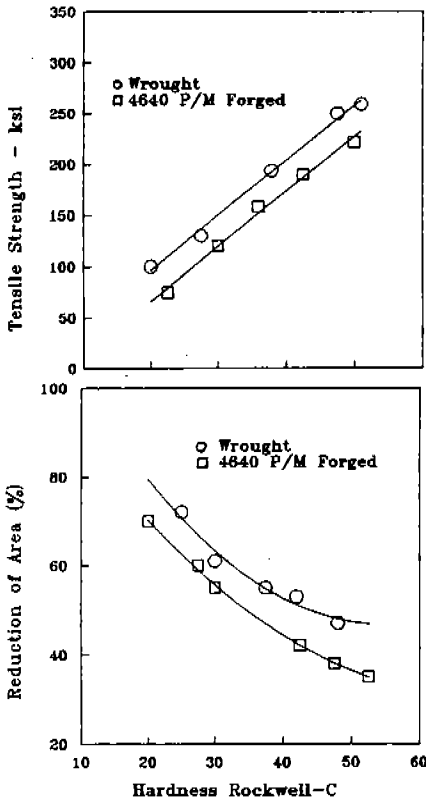


Fig.5 Tensile properties of P/M forged 4640 and typical properties of wrought 4640.

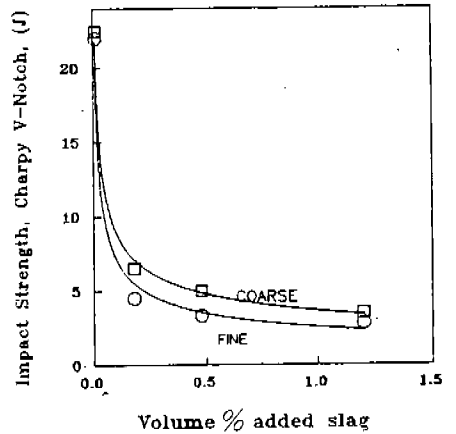


Fig.6 Impact strength of hot repressed 4340 steel powder with admixed slag inclusions. Coarse particles are approximately 100 microns and fine particles are 20 microns in diameter.

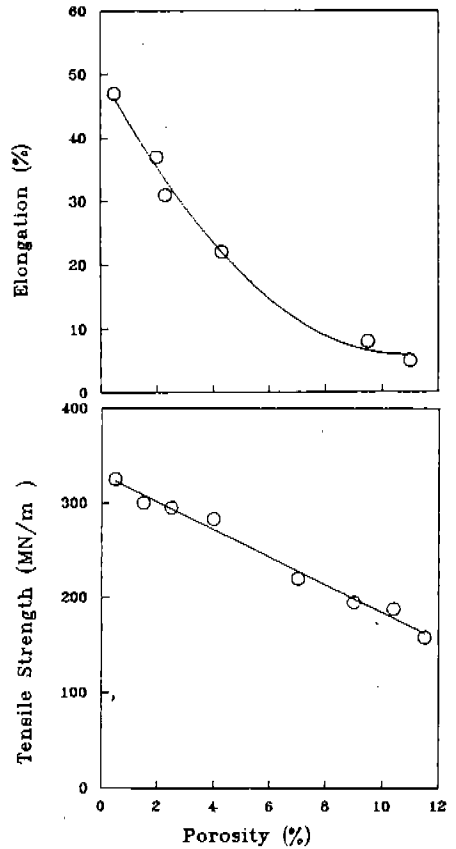
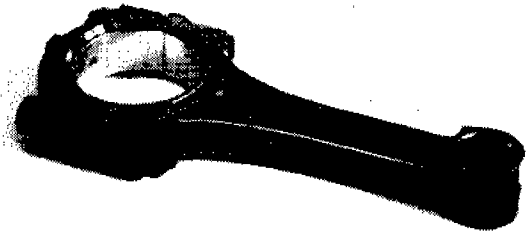


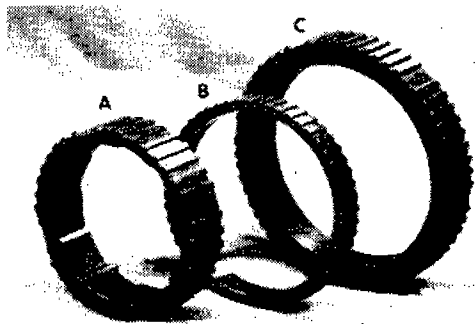
Fig.7 Effect of density on the static strength and tensile ductilities of billets hot repressed from iron preforms.

및 Metal Flow, 개재물 및 불순물 그리고 제품 표면과 내부의 잔류 기공 등이다. Fig. 5는 분말 단조품과 일반 Wrought 제품과의 인장 강도 및 연성을 비교한 것으로 기계적 특성의 현저한 차이를 보이지 않고 있다.

Fig.6은 불순물의 양에 따른 충격에너지의 변화로써 불순물이 대략 0.1 vol %가량 존재함에 따라 충격에너지는 급격히 감소됨을 알 수 있다. 특히, 동일한 부피분율의 경우 미세한 불순물이 충격치에 더욱 민감하게 작용함을 알 수 있다. 이러한 불순물로는 Sulfides와 Silicates 또는 기공 표면의 Oxides 등을 들 수 있으며 주로 수분사 분말제조시 생성된다. Fig.7은 소재 내부의 기공량에 따른 인장강도 및 연신율을 나타낸다. 특히 연신율의 경우 잔류기공량의 증가에 따라 인장강도의 감소율에 비해 더욱 현저하게 감소함을 알 수 있다.



품 명 : Connecting rod
 재 료 : 0.55 C - 2Cu - 0.2S
 밀 도 : 7.82g/cm³ 이상
 중 량 : Rod 372g, Cap 191g



품 명 : Overrunning outer clutch races
 재 료 : 0.2C - 1.8 Ni - 0.5 Mo
 밀 도 : 7.82g/cm³ 이상
 중 량 : A : 568g, B : 260g, C : 906g

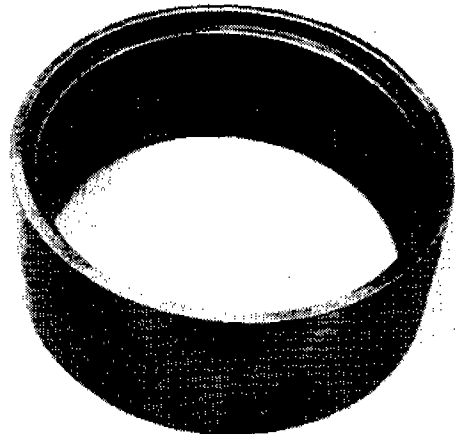
3. 분말단조의 응용

3.1 분말단조에 의한 자동차부품의 예^{12,14)}

분말단조기술은 60년대 미국 GM사에서

Table 4 Example of P/F parts.

Stator cam Hydramatic Division of GMC Imperial Clevite
Automotive differential bevel pinion and side gear Delco Moraine Division of G.M Cincinnati, Inc. Gleason, Inc. Keystone Carbon Co. Michigan Powder Metal Products
Connecting Rod Federal Mogul Ford Fiat GKN Toyota



품 명 : 4-wheel drive transfer case
 재 료 : 0.2C - 2Cu
 밀 도 : 7.63 - 7.7g/cm³
 중 량 : 2.550g

Fig.8 Appearance of P/F parts.

Transmission Stator Cam의 개발을 시작으로 최근 10년간 일본, 미국, 서유럽 등지에서 자동차 엔진부품 중 Connecting Rod와 Differential Pinion Gear의 양산화를 성공하면서 발달되어 왔다. Table 4는 분말단조품으로 개발된 대표적인 부품 및 제조회사를 나타낸다. 또한 몇 가지의 분말단조부품의 외관을 Fig.8에 나타내었다.

3.2 경제성 고찰

분말단조 공정이 종래의 열간 단조 공정과 비교해서 가질 수 있는 장점은 재료 및 기계 가공비의 절감을 들 수 있다. Fig.9는 미국, 일본 등지에서 고부가가치 부품으로써 양산화에 성공한 대표적인 자동차 엔진부품인, Connecting Rod와 Differential Pinion Gear에 있어서 분말단조와 종래의 열간단조 공정에 따른 경제성의 차이를 나타내고 있다. 또한 자동차 부품 중 Accelerator의 경우를 예를 들면 Fig.10¹⁵⁾에서 나타나듯이 분말단조 공정에 있어서 공정의 단순화 및 재료손실의 절감과 최종 기계가공의 현격한 단순화를 볼 수 있다. 이런 측면에서 국내에서도 자동차 공업이 활성화됨에 따라 종래의 분말야금법은 열간 단조법으로 만족할 수 없었던 자동차 부품, 특히 고강도가 요구되는 엔진의 주변부품에 분말단조 공법의 활용 가능성이 높다고 판단되며 그들의 수요 또한 급증할 것으로 판단된다.

4. 앞으로의 전망

분말단조 공정의 기술 축적을 토대로 하여 얻을 수 있는 기대효과는 다음과 같다.

1) 기술수준 향상에의 기여도 및 관련사업에의 기술적 파급효과 측면

- 분말재료의 고강도 부품적용기술 배양
- 국내 자동차 및 기계부품의 국제경쟁력 향상

• 분말야금업체, 열간단조업체 및 자동차 업계의 분말단조 기술적용 확대

2) 생산성 향상 및 원가절감 측면

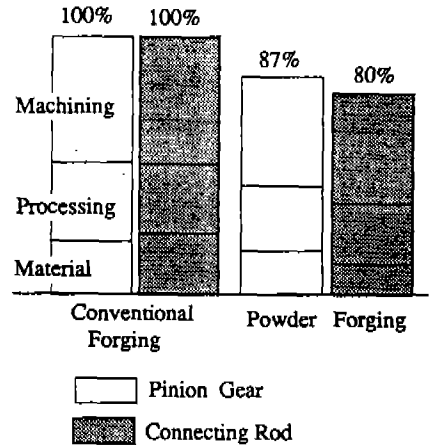


Fig.9 Comparison of economic costs on the pinion gear and connecting rod produced by conventional and powder forging process.

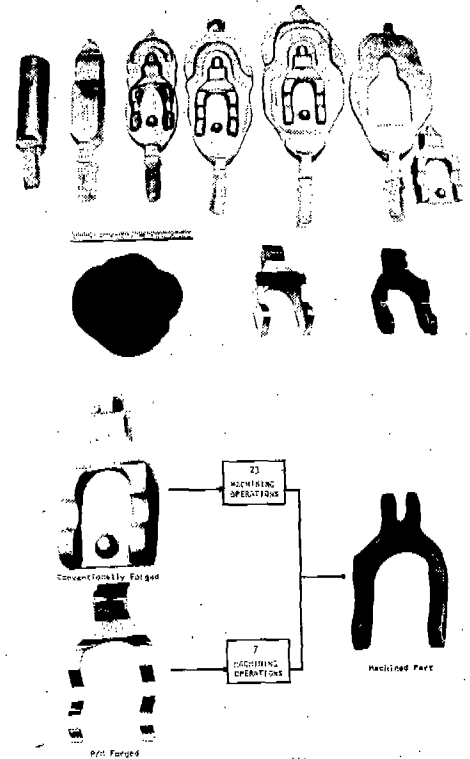


Fig.10 Comparison of the number of required processing and machining operations for conventional and P/F forged part.

- 고밀도, 고정도 자동차 및 기계부품 개발에 기여
- 자동화 용이 및 자동화에 의한 생산성 향상
- 공정의 단축에 의한 생산성 향상

참 고 문 헌

1. 서상기, 한국기계연구소, 기술보고서, "분말단조 기술개발", 1988. 4.
2. Tohn P. Cook; "Oxidation, Reduction and Decarburization of Metal Powder Preforms", Hoeganaes Corporation, 1972.
3. P.C. Eloff and L.E. Wilox; "Fatigue Behavior of Hot Formed Powder Differential Pinion", Gleason Works, Rochester, New York, U.S.A.
4. S. Corso and Ciordano; "Development of Differential Pinion Gear by PM Hot forging Process." Powder Metallurgy, 1977, No. 3, 89.
5. R. Koos and S-E Grek; "Surface Oxidations on Low Alloy Atomized Powders and their Influence on Impact Properties of P/F - Steels. International Powder Metallurgy Conference at Florence, June, 1982, 58.
6. F.T. Lally and I.J. Toth; "Isothermal Forging of Precision Metal Powder Conference" Final Technical Report on Contract DAA 01-72-C-0502, 1973.
7. J.S. Hirschhorn, Introduction to Powder Metallurgy APMI, New York, 1969.
8. F. Lenel, Powder Metallurgy, MPIF, 1980.
9. R.M. German, Powder Metallurgy Science, MPIF, Princeton, NJ, 1984.
10. M.V.J. Brazenhall; "Furnace Atmospheres for Sintering", MPR September, 1990, 600.
11. Haward A. Kuhn; "Powder Forging" 1990, pp. 23-54.
12. G. Lusa, "Differential Gear by P/M Hot Forging", Modern Developments in Powder Forging Vol. 4, Plenum Press, NY, pp. 425-430, 1971.
13. R.F. Halter; "Pilot Production System for Forging P/M Preforms", 1970 Fall Powder Metallurgy Conference Proceedings, MPIF, New York, pp. 119-133, 1971.
14. F.T. Lally and I.J. Toth; "Forging of Metal Powder Gears", Final Report on Army Contrace DAAE 07-72-C-0277, 1974.
15. F.T. Lally, I.J. Toth and J. Dibenedetto; "Forging of Steel Powder Products", Progress in Powder Metallurgy, Vol. 28, pp. 275-302, 1972.