

분말 단조의 기술 현황 분석



이 정 환

(소재성형실 선임연구원)

- '80 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(학사)
- '82 연세대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



이 동 원

(소재성형실 연구원)

- '88 아주대학교 재료공학과 졸업(학사)
- '91 아주대학교 대학원 재료공학과 졸업(석사)
- '91-현재 한국기계연구원 연구원



정 형 식

(재료공정연구부장)

- '70 서울대학교 금속공학과 졸업(학사)
- '77 미국 Drexel대학교 금속공학과 졸업(박사)
- '78-'80 미국 Pfizer Inc. 선임연구원
- '80-'85 미국 United Technologies 선임연구원
- '85-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

분말단조(Powder Forging)란 종래의 분말야금 법으로 예비 성형체를 만든 후 그것을 단조소재로 열간단조를 통하여 최종 제품을 만드는 부품가 공기술이다[1]. 이러한 분말단조 기술은 일부 선진국에서 철계분말 합금의 분말단조에 의한 자동차부품의 양산화와 더불어 그 중요성이 국내까지도 입증되고 있는 실정이다. 종래의 분말야금 부품의 경우, 소재 내부에 존재하는 상당량의 잔류기공 및 기공표면의 산화피막은 충격에너지, 파괴인성 및 연성에 악영향을 미치기 때문에[2] 고강도를 요구하는 부품제작에는 그 개발범위가 제한되어 왔다. 즉, 분말단조의 매력은 최종 정밀단조를 통하여 진밀도(Full Density)를 얻음으로써 분말야금 부품에서의 기계적 특성의 한계성을 극복할 수 있고, 또한 종래 분말야금 기술의 장점인 합금조성의 균일화와 재료비 및 후가공비의 절감 등이다.

표 1) 분말단조에 의한 커넥팅 로드 생산량 및 계획

회 사 명	연 도	생산량 및 계획
◆Ford	1987	V-4 Escort엔진에 적용
	~1992.3	1500만개 생산 (현재 연간 300만개)
	~1994	모든 4기통 엔진에 적용 예정
◆GM	1993	Saturn V-4, V-6엔진
◆Chrysler	1994	V-4엔진, 연간 300만개
◆BMW	1994	V-6, V-8엔진, 연간 85만개
◆Toyota	1981	Celica, Calmy엔진용 양산

분말단조에 의한 부품의 개발은 1960년대 미국 GM사에서 Transmission Stator Cam의 개발을 시작으로, 최근까지 미국, 일본, 서유럽 등지에서는 대형 고부가가치 부품의 개발에 주력하고 있다. 자동차 부품중 차동 피니언기어와 커넥팅 로드 분말단조 공정의 대표적인 부품으로 알려져 있는데 그중에서 표 1에는 선진외국의 커넥팅 로드에 대한 생산량 및 생산계획을 나타내었다. 그림 1은 선진외국의 분말단조 생산추이를 나타내었다.

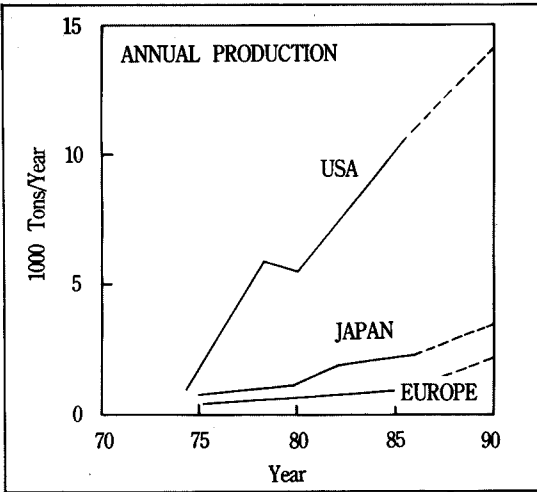


그림 1) 선진 외국의 분말 단조 생산 추이

한편 국내에서도, 최종 기계가공비의 절감에 따라서 최종 부품의 생산원가를 감소시킬 수 있는 분말단조 기술의 보급에 관심을 가지고 있지만 아직까지 정량적인 공정 설계가 되지 않고 있다. 본 고에서는 분말단조의 이해와 선진국에서 개발에 성공한 사례 및 경제성을 조사함으로써 분말단조기술의 현황 파악 및 기술 축적을 도모하고자 하였다.

2. 분말단조의 개요

분말단조가 종래의 열간단조와 비교해서 가질 수 있는 장점은 최종 가공비 및 재료손실의 절감 측면에서 찾을 수 있다. 그러나 분말자체의 가격이 상대적으로 비싸기 때문에 전체공정에 있어서 제품의 원가절감을 위해서는 최적의 분말단조 공정을 개발하여야 한다. 즉, 종래의 보통급 단조와

경쟁하여 가격 및 기계적 특성의 향상에서 유리하려면, 첫째 분말의 특성 및 합금조성의 정확한 분석이 필요하고, 둘째 단조 전의 예비성형체 설계 및 소결공정의 최적 설계가 요구되며, 셋째 최적의 운할 및 단조공정 설계와 최종적으로 요구되는 기계적 특성을 만족시키기 위한 후처리 공정의 최적화가 필요하다.

2.1. 분말단조의 공정

그림 2는 분말단조의 개략적인 공정도를 나타낸다. 종래의 열간 단조의 경우는 단조 후 Flash제거 공정 및 기계가공이 첨가되며 단조 공정 또한 2단계 이상의 공정이 요구된다.

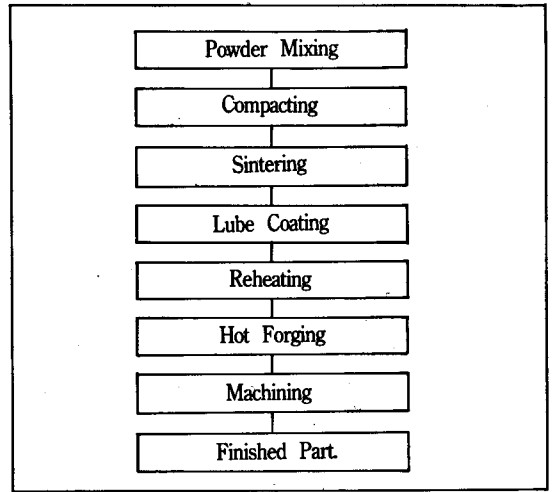


그림 2) 분말 단조 공정도

최종 제품에 대한 재료 회수율을 비교하면 열간단조의 경우가 40~50%이고, 분말단조 공정에서는 90%이상이다. 즉, 분말단조를 이용할 경우 일반 열간단조나 기계가공의 경우에 비해 20% 정도의 생산원가의 절감이 가능하고 또한 종래의 분말야금 부품의 취약점인 피로강도 및 충격 강도의 한계성을 극복할 수 있다.

2.2. 원료분말

분말단조에 있어서 원료분말의 가격은 최종 제조원가의 20~30% 가량을 점유하기 때문에 그

표 2) 전형적인 분말 단조용 저합금강 분말

Company	Designation	Chemical Composition(wt%)				
		Mn	Ni	Mo	Cr	Cu
Hoeganas	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	1.00	-
	KIP 4600	-	1.50	0.50	-	0.50
Sumitomo	SUMIRON 4100S	0.75	-	0.25	1.00	-
	SUMIRON 4600	0.20	2.00	0.50	-	-
	SUMIRON 2000	0.30	0.40	0.70	-	-

들의 합금설계는 최종 제품의 기계적 특성을 향상시키기 위해서 신중히 고려되어야 한다. 또한, 합금조성 이외에 분말 내에 존재하는 산화물과 비금속 개재물 등은 최종 제품의 피로 및 동적 특성에 악영향을 미치기 때문에 산소 농도는 500 ppm이하, 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. 합금조성은 최종제품의 경도 및 기계적 성질에 많은 영향을 미치기 때문에 사용용도 및 목적에 따라 적절한 합금 원소분말의 배합이 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]. 표 2는 외국의 대표적인 분말 제조업체 및 각 분말의 화학조성을 나타낸다. 특히 첨가된 탄소는 소결과 단조시 상당량이 탈탄되므로 최종 탄소 함량을 맞추기 위하여는 충분한 예비실험이 필요하다.

2.3. Preform의 성형과 소결

Preform의 설계는 단조시 강도를 요구하는 부위의 Metal Flow를 조장하고 제품 전체부위에 균일한 진밀도를 얻기 위한 측면에서 매우 중요하다. 구체적으로 최적의 Preform 설계를 함으로써

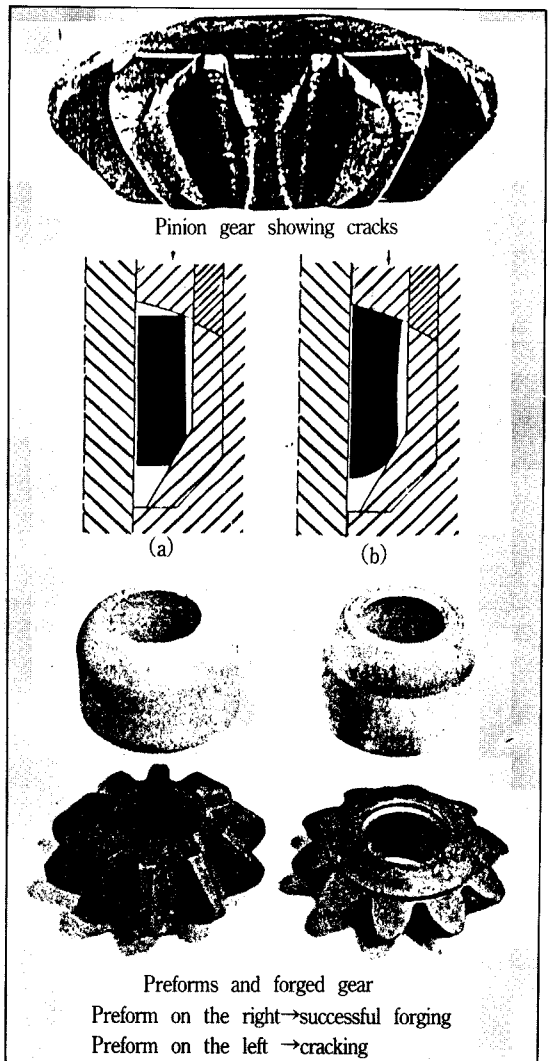


그림 3) 예비형 설계에 따른 단조후 균열발생 유무의 예

소재의 표면 및 내부에 결함 발생을 방지하고 질량 분포를 유도하여 제품 전체에 걸쳐 진밀도를 균일하게 얻을 수 있다. 최근에는, 이러한 Preform 설계시 Trial & Error를 최소화하기 위하여 유한 요소법(FEM)과 같은 컴퓨터를 이용한 Preform 설계가 많이 연구되고 있다. 그림 3은 자동차 Differential Part중 Bevel Gear의 경우 Preform의 형상에 따른 단조후 최종제품의 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 위해

서는 적절한 환원 분위기와 소결온도가 요구된다. 일반적으로 소결시 산화물의 환원은 H₂ 개스에 의한 H₂O의 방출로 이루어지기 때문에 로내의 수증기 분압은 매우 낮아야 한다. 또한 H₂ 개스의 제공을 위해서는 비교적 값이 저렴한 암모니아(NH₃) 개스를 고온에서 분해시킨 분해 암모니아 개스(Dissociated Amonia : N₂+3H₂)가 주로 이용된다[10]. 그림 4는 소결시간이 30분으로 고정될 경우 소결 온도에 따른 산소 농도의 변화를 나타내고 있다.

2.4. Preform의 단조

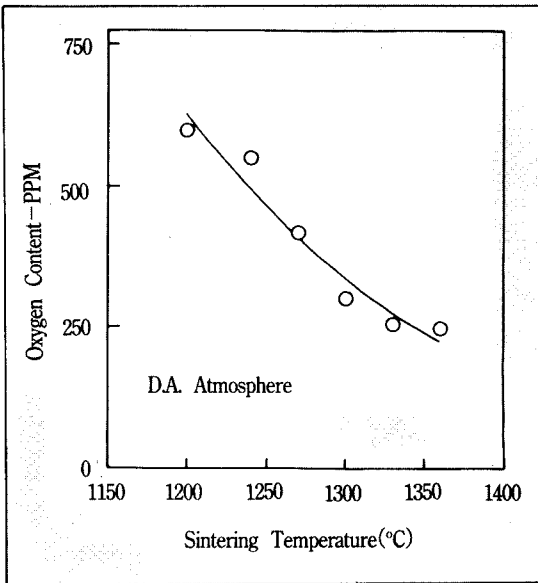


그림 4) 소결 온도에 따른 0.5% Ni-0.5%Mo Steel 시편의 산소량(소결시간 : 30분)

Preform의 단조시 사용되는 프레스는 단조 제어방법 및 단조 속도와 치수정밀도 등의 요구되는 변수에 따라서 선택되어야 한다. 궁극적으로 프레스의 선택은 금형의 Chilling 현상방지와 생산 원가 측면에서 고려할 때 Cyclic 안정성과 치수정밀도가 양호하고 생산성 향상을 위하여 단조 속도가 빠른 프레스가 주로 사용되어 진다. 표 3은 분말단조용 프레스의 종류 및 특성에 대해서 비교하고 있다. 단조 온도까지의 가열시 Preform 표면에 윤활제가 증발하거나 산화막이 형성될 경우 단조시 표면균열의 원인이 될 수 있으며 최종제품의 기계적 특성에 악영향을 미치기 때문에 산화의 방지를 위해서는 가능한한 급속가열이 요구되며 형상 및 요구조건에 따라 분위기 가열을 채택한다. 대표적인 단조 가열방법을 표 4에서 나타내었다. 단조공정에 있어서 Preform의 윤활처리는 금형과의 마찰계수를 줄이고 단조 후

표 3) 분말단조용 프레스의 비교

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

표 4) 분말단조용 가열방법의 비교

항 목	유 도 가 열	복 사 가 열
가열온도	통상 1,400°C 한계	1,200°C 한계
가열시간	복사가열 보다 급속가열 가능	Heater 용량증가에 따른 단시간 가열가능
시편형상	소형 단순 원통형상 유리	형상의 제약 없음
제어특성	응답성이 좋고 제어 용이	자동제어는 용이하지만 승온시간의 단축은 한계가 있음
전력효율	통상 50~60%	유도가열에 비해 떨어짐

이형을 이용하게 하며 표면 산화방지 및 단조 결합방지를 위해서 매우 중요하다. 금형에 윤활 처리를 하는 목적은, 윤활액에 의한 금형온도 강하 효과로 금형의 수명을 연장하고, 재료의 유동을 향상시키며 단조하중의 감소 및 Preform 표면의 산화 현상을 방지하는데 있다. 일반적으로 사용되는 윤활제는 수용성 Graphite계로써, 금형은 주로 자동화된 Spray장치로 윤활 처리되며, Preform은 Spray 또는 Dipping법으로 윤활 처리된다.

그림 5는 Ring 압축 실험에서 윤활제의 중요성 및 효과를 나타낸다. 최종 단조품은 사용 목적에 따라 기계적 성질을 향상시키기 위하여 열처리를 하게 되는데 통상 Q.T.법이 주로 행하여지고, 특히 내마모성 및 피로특성의 향상을 위하여 필요에 따라 개스침탄 처리 및 질화 처리도 요구된다.

2.5. 분말단조품의 기계적 성질[11]

분말단조품의 기계적 특성에 영향을 주는 주요인자는 분말특성, 소결단조, 단조밀도 및 Metal Flow, 개재물 및 불순물 그리고 제품 표면과 내부의 잔류기공 등이다. 그림 6은 분말단조품과 일반 Wrought제품과의 인장강도 및 연성을 비교한 것으로 기계적 특성의 현저한 차이를 보이지 않고 있다. 그림 7은 불순물의 양에 따른 충격에너지의 변화로써 불순물이 대략 0.1vol%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

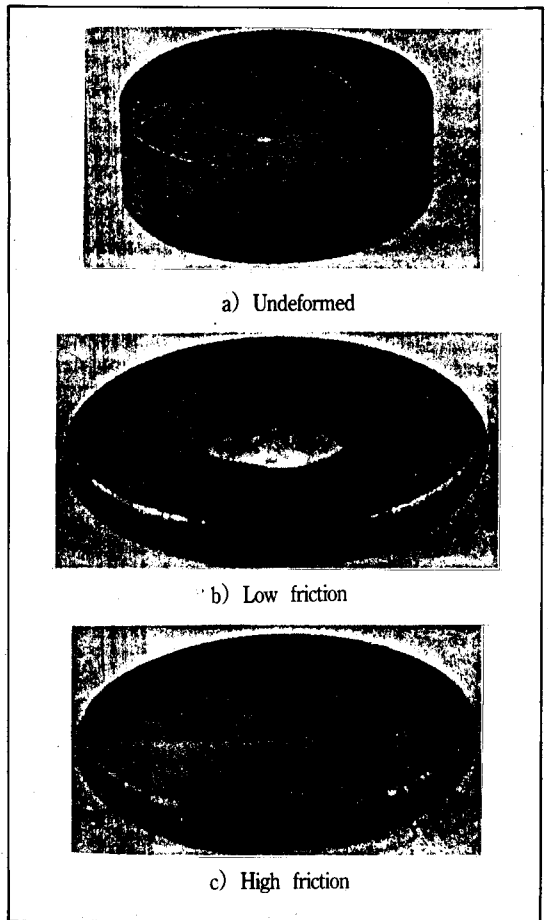


그림 5) 링 압축 실험을 통한 윤활제의 효과

분말제조시 생성된다. 그림 8은 소재 내부의 기공량에 따른 인장강도 및 연신율을 나타낸다. 특히 연신율의 경우 잔류기공량의 증가에 따라 인장강도의 감소율에 비해 더욱 현저하게 감소함을 알 수 있다.

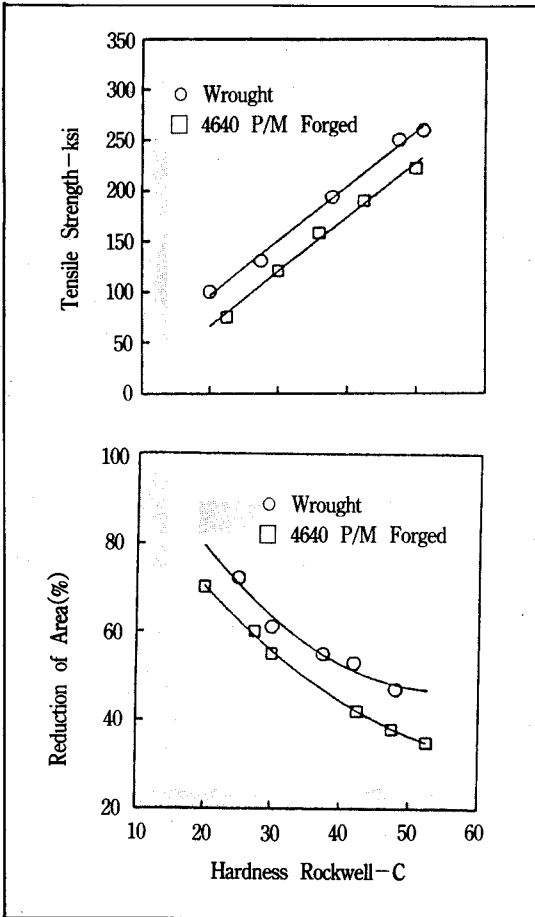


그림 6) 4640 용제재와 분말 단조재의 인장 강도

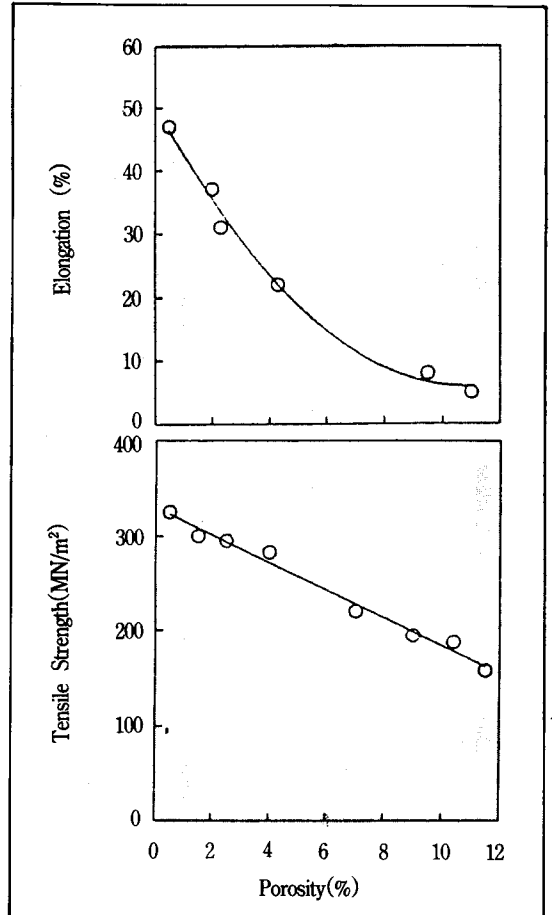


그림 8) 철계 분말 예비성형체의 열간 압축시 밀도와 기계적 성질 관계

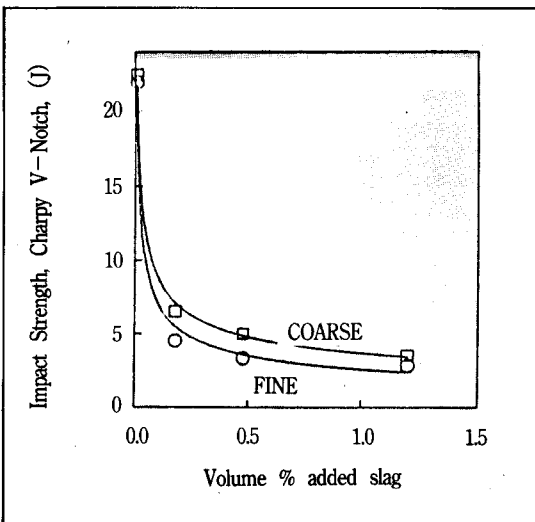


그림 7) 4340강 분말 열간 압축한 시편의 충격 강도

3. 분말단조의 응용

3.1. 분말단조에 의한 자동차부품의 예 [12~14]

분말단조기술은 60년대 미국 GM사에서 Transmission Stator Cam의 개발을 시작으로 최근 10년간 일본, 미국, 서유럽 등지에서 자동차 엔진부품 중 Connecting Rod와 Differential Pinion Gear의 양산화를 성공하면서 개발되어 왔다. 표 5는 분말단조품으로 개발된 대표적인 부품 및 제조회사를 나타낸다. 또한 몇 가지의 분말단조부품의 외관을 그림 9에 나타내었다.

표 5) 분말 단조품의 예

Stator cam Hydraulic 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

3.2. 경제성 고찰

분말단조 공정이 종래의 열간단조 공정과 비교해서 가질수 있는 장점은 재료 및 기계가공비의 절감을 들 수 있다. 그림 10은 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 그림 11[15]에서 나타나듯이 분말단조 공정에 있어서 공정 단순화 및 재료손실의 절감과 최종 기계가공의 현격한 단순화를 볼 수 있다. 이런 측면에서 국내에서도 자동차 공업이 활성화 됨에 따라 종래의 분말야금법 또는 열간 단조법으로 만족할 수 없었던 자동차 부품, 특히 고강도가 요구되는 엔진의 주변부품에 분말단조 공법의 활용 가능성이 높다고 판단되며 그들의 수요 또한 급증할 것으로 판단된다.

3.3. 국내기술 개발 현황

국내의 경우 분말야금 기술은 자동차 부품을

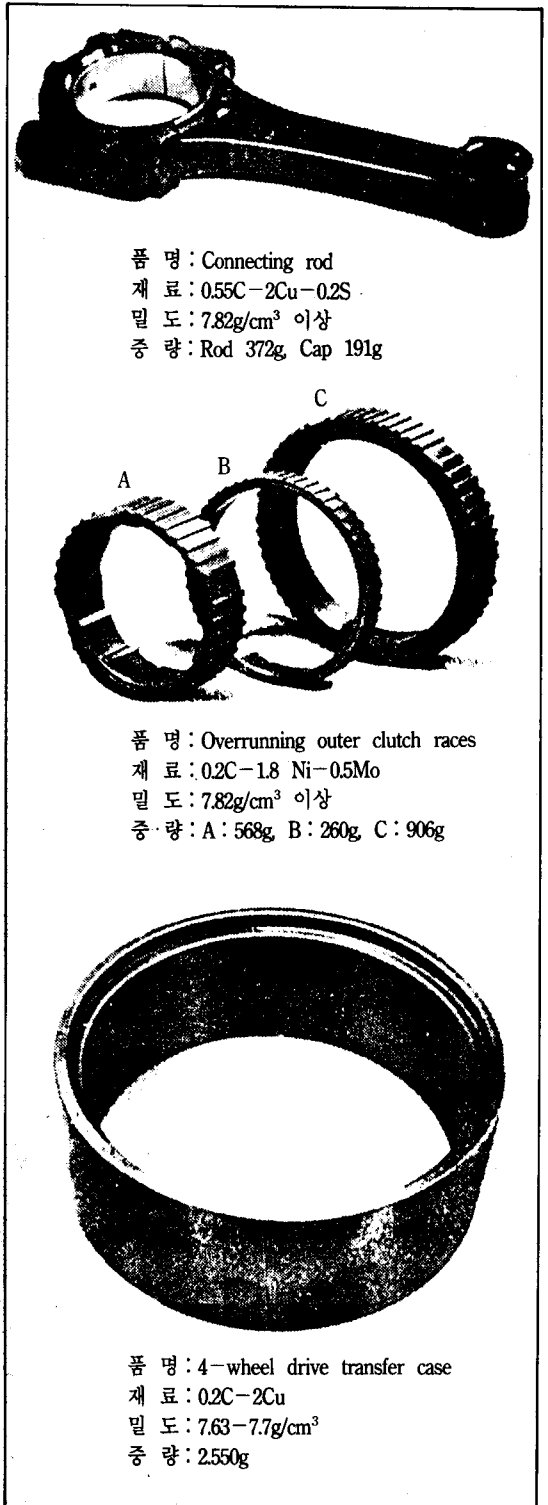


그림 9) 분말 단조품의 외관 예

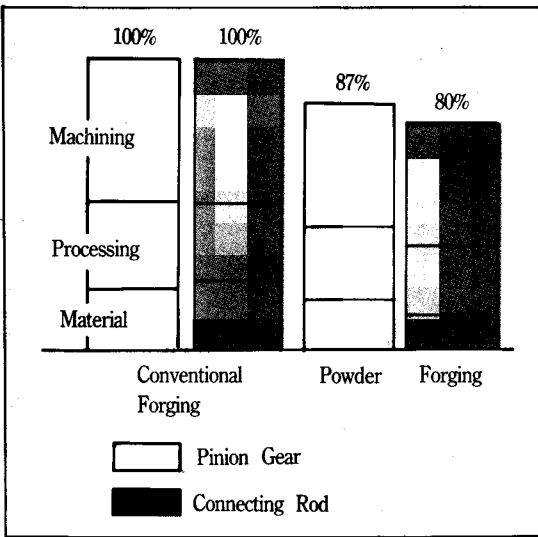


그림 10) 분말 단조와 기존 열간 단조의 경제성 비교

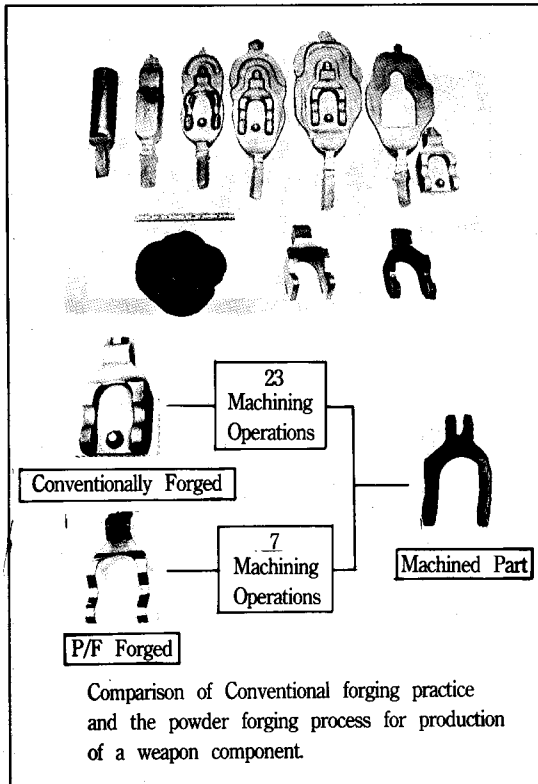


그림 11) 분말 단조와 기존 열간 단조와의 공정수 비교

있다. 그러나 분말단조의 경우에는 개발의 필요성은 인식하고 있으나 축적된 기술이 전무하여 일부 국가 연구소와 기업 연구소에서 2~3년 전부터 연구개발이 시작되고 있는 실정이다. 그러나 국내 자동차 공업이 연간 200만대 수준의 고도의 발전을 함에 따라 소결 단조품의 개발 요구중대 및 분위기가 성숙되고 있다. 그리고 선진 외국에서 기술을 도입할 경우에는 기술료의 과다 지급 요구 및 도입국의 생산설비를 사용함에 따라 시설투자비의 과다 등에 따른 어려움이 있고 국산 자동차의 국제 경쟁력 제고를 위해서도 분말단조 기술의 자체개발 능력 배양이 절실히 요구되고 있다. KIMM에서는 2년전 부터 1차 개발품목으로 승용차용자동차 피니언 기어를 개발 대상 품목으로 선정하여 그림 12에 나타난 것과 같이 시제품 제작에 성공하였으며 현재 특성평가 중에 있다. 2차적으로는 커넥팅 로드를 개발 대상으로 선정하여 분말합금 설계 및 특성최적화를 유도하고 소결단조 공정 확립과 특성평가를 통하여 경합 공정에 비해 경량이고 정밀도가 우수하며 향상된 강도 및 생산성 향상을 꾀하고자 노력을 경주할

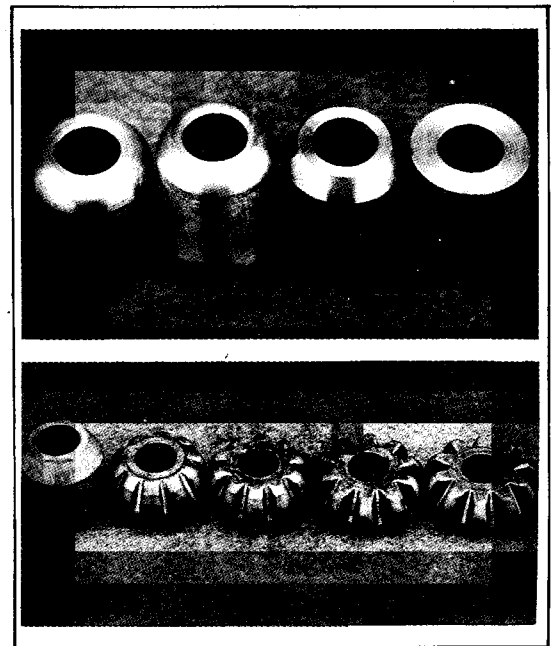


그림 12) 분말 단조용 예비 성형체와 스트로크별 시제품

중심으로 연간 약 1000억원 정도의 시장을 확보하고 있고 업계를 중심으로 빠른 속도로 성장하고

예정이다.

4. 앞으로의 전망

분말단조 공정의 기술축적을 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 자동차업체의 분말단조 기술적용확대
- 2) 생산성 향상 및 원가절감 측면
 - ◆고밀도, 고정도 자동차 및 기계부품 개발에 기여
 - ◆자동차 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 Power 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 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.