

분말단조기술의 자동차부품 적용현황 및 전망

정형식 · 이정환 · 이영선
한국기계연구원 재료공정부

State of the Art for Powder Forging in Automotive Parts

Hyung-Sik Chung, Jung-Hwan Lee and Young-Seon Lee
Korea Institute of Machinery of Metals, Materials Forming Lab.,
Changwon 641-010, Korea

1. 분말단조의 개요

분말단조(powder forging)란 일반적인 분말소결법으로 예비성형체를 만든 후 그것을 단조소재로 밀폐된 금형에서 정밀 열간단조를 통하여 최종 제품을 만드는 부품가공기술이다. 종래의 분말야금 부품의 경우, 소재 내부에 존재하는 상당량의 잔류기공으로 인하여 단조나 가공품에 비해 낮은 충격에너지, 피로특성 및 연성을 갖기 때문에 고강도를 요구하는 동작 부품의 제조에는 그 개발범위가 제한되어 왔다. 이에 반해 분말단조부품의 경우는 최종 정밀단조를 통하여 진밀도(full density)를 얻음으로써 소결 부품에서의 기계적 특성의 한계성을 극복할 수 있고, 또한 기계가공에 비교하여 분말야금 기술의 장점인 합금조성 및 특성의 균일화와 후가공비의 절감 등을 피할 수 있다. 이와같은 장점을 살려, 최근 미국을 중심으로 자동차 부품에의 활용이 급격히 증가되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 관심이 증대되고 있으나 실험실적 규모의 개발노력만이 시도되고 있는 상태로서 기술의 장단점, 특성 및 적용 가능성에 대한 확실한 이해가 부족한 실정이다. 분말단조가 종래의 열간단조와 비교해서 가질 수 있는 장점은 최종 가공비 및 재료손실의 절감측면에서 찾을 수 있다. 그러나 분말자체의 가격이 상대적으로 고가이기 때문에 전체공정에 있어서 생산성 향상 및 제품의 원가절감을 위해서는 최적의 분말단조 공정을 개발하여야 한다. 즉, 종래의 보통금 단조와 경쟁하여 가격 및 기계적 특성의 향상을 유리하려면, 첫째 분말의

특성 및 합금조성의 정확한 분석이 필요하고, 둘째 단조전의 예비성형체 설계 및 소결공정의 최적설계가 요구되며, 셋째 최적의 윤활 및 단조공정 설계와 최종적으로 요구되는 기계적 특성을 만족시키기 위한 후처리 공정의 최적화가 필요하다.

1.1. 원료분말

분말단조에 있어서 원료분말의 가격은 최종 제조 원가의 20~30% 가량을 점유하기 때문에 분말합금 설계는 최종 제품의 기계적 특성을 향상시키기 위해서 신중히 고려되어야 한다. 또한, 합금조성 이외에 분말내에 존재하는 산화물과 비금속 개재물 등은 최종제품의 피로강도 등의 동적 특성에 나쁜영향을 미치기 때문에 산소농도는 500 ppm 이하, 비금속 개재물은 0.002 wt% 이하로 역제가 요구된다. 생산 수량이 많은 자동차 부품 및 기타 구조용 부품의 경우는 수분사법에 의해 제조된 저합금강 분말이 주로 사용된다. 합금조성은 최종제품의 경도 및 기계적 성질에 많은 영향을 미치기 때문에 사용용도 및 목적에 따라 적절한 합금원소 분말의 배합이 요구된다. 저합금강에 첨가되는 주요합금 원소는 Ni, Mo, Mn, Cr 등으로서 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 있어 전자의 합금원소를 함유하는 합금 분말들이 주로 활용되어 왔으나 최근 1300°C 이상에서의 고온 소결이 점차 활용되어지면

Table 1. Examples of material used in the powder forging

	적용분말	열처리	부품 예
탄소강 부품	Fe-C	조질	Con-Rod
	Fe-Cu-C	고주파소입	Wheel hub Housing end
저합금강 부품	4600계	침탄소입	각종 race
	4100계	침탄소입	기어류 Sleeve
알루미늄합금 부품	Al-Si-X	용체화처리 및 인공시효	Scroll rotor Oil pump rotor Piston

서 후자의 합금원소 활용이 늘어날 전망이다. 철계 분말단조 뿐 아니라 Al분말을 이용한 단조품 개발도 활발히 전개되고 있다. 표 1은 대표적인 분말단조용 재료의 종류와 부품예를 나타내고 있다. Al합금은 상대적으로 낮은 강도와 내마모성, 그리고 높은 열팽창량으로 인해 자동차 부품에 적용이 되지 않았으나 최근에는 이러한 제약을 극복할 수 있는 합금과 공정을 개발하여 적극적인 활용이 시도되어지고 있다.

1.2. 예비성형체 성형 및 소결

예비성형체(preform)의 설계는 단조시 강도를 요구하는 부위의 제품윤곽을 따라 연속적인 금속흐름을 형성시키고 제품 전체에 걸쳐 진밀도를 얻기 위한 측면에서 매우 중요하다. 구체적으로 최적의 예비성형체 설계를 함으로써, 소재의 표면 및 내부에 결함 발생을 방지하고 금속흐름을 조절하여 제품전체에 걸쳐 진밀도를 균일하게 얻을 수 있다. 최근에는 이러한 설계시 시행착오를 최소화하기 위하여 유한요소법(FEM)과 같은 컴퓨터를 이용한 설계가 많이 연구되고 있다.

소결(sintering)의 목적은 예비성형체 내부에 존재하는 산화물의 환원 및 밀도증가와 충분한 단조능을 부여하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 환원 분위기와 소결온도 및 시간이 적절히 조절되어야 한다. 일반적으로 소결시 환원성이 강한 수소가스를 포함하여 비교적 값이 저렴한 분해 암모니아 가스(dissociated ammonia: $N_2 + 3H_2$)가 주로 이용되어지나, 경우에 따라 보다 값이 저렴한 엔도

Table 2. Typical heating types in powder forging

항 목	유도가열	복사가열
가열온도	통상 1400°C 한계	1200°C 한계
가열시간	급속가열가능(상대적)	Heater 용량 증가에 따른 단시간 가열 가능
시편형상	소형 단순 원통형상 유리	형상의 제약없음
제어특성	응답성이 좋고 제어 용이	자동제어는 용이하지만 승온시간의 단축은 한계가 있음
전력효율	통상 50~60%	유도가열에 비해 떨어짐
Press Type	Mechanical press Powder forging	Hydraulic press Sinter forging

Table 3. Comparison of repressing mode and forging mode in powder forging

항 목	Repressing mode	Forging mode
성 형	-예비성형체 형상 복잡	-예비성형체 형상이 단순하여 성형 용이
가 열	-형상이 복잡하여 고주파 가열 곤란	-고주파 가열 용이
단 조	-비교적 용이 -금형과의 Locating에 주의	-결함 발생의 위험이 큼 -금형에의 Locating 용이
장단점	-Flashless -금형수명이 상대적으로 향상됨 -표면부위 기공 잔류 가능성이 높음	-Flash 생성 -금형수명 단축 -특성 우수

(endo) 가스나 질소와 수소의 혼합가스를 사용하기도 한다.

1.3. 예비성형체의 단조

예비성형체의 단조시 사용되는 프레스는 단조제어방법 및 단조속도와 치수정밀도 등의 요구되는 변수에 따라서 선택되어야 한다. 궁극적으로 프레스의 선택은 금형에 의한 냉각(die chilling) 현상방지와 생산원가 측면에서 고려할 때 주기적(cyclic) 안정성과 치수 정밀도가 양호하고 생산성 향상을 위하여 단조속도가 빠른 프레스가 주로 사용되어지며 표 2에 나타난 바와 같이 가열방식에 따라 적절한 프레스를 선정해야 한다. 분말아금으로 제조된 예비성형체를

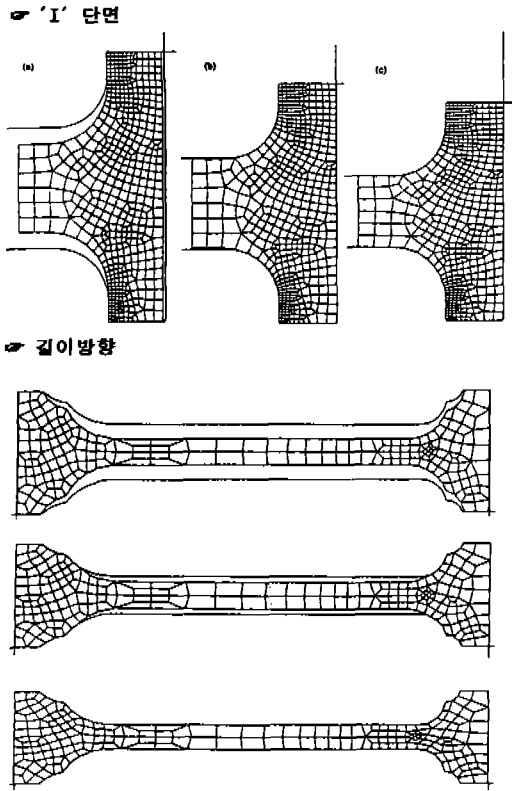


Fig. 1. Optimal deformation mode.

진밀도로 성형하기 위해 필요한 공정의 형태는 변형모드에 따라 크게 재압축(repressing)과 단조(forging) 모드의 2가지로 나뉘며 그 특징은 표 3과 같다. 단조 온도까지의 가열시 예비성형체 표면에 윤활제가 증발하거나 산화막이 형성될 경우 단조시 표면 균열의 원인이 될 수 있으며 최종제품의 기계적 특성에 악영향을 미치기 때문에 산화의 방지를 위해서는 가능한 한 급속가열이 요구되며 형상 및 요구 조건에 따라 분위기 가열을 채택한다. 대표적인 단조 가열방법을 표 2에서 나타내었다. 단조공정에 있어서 예비성형체의 윤활처리는 금형과의 마찰계수를 줄이고 단조 후 이형을 용이하게 하며 표면 산화방지 및 단조결합방지를 위해서 매우 중요하다. 금형에 윤활처리를 하는 목적은 윤활액에 의한 금형냉각 효과로 금형의 수명을 연장하고, 재료의 유동성을 향상시키며 단조하중의 감소 및 제품표면의 산화현상을 방지하는데 있다. 일반적으로 사용되는 윤활제는 수용성 흑연계로서 금형은 주로 자동화된 분사

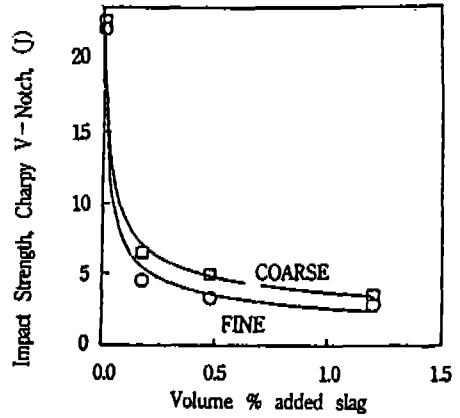


Fig. 2. Impact strength of powder forged 4340 steel.

장치로 윤활처리되며 예비성형체는 분사 또는 침적(dipping)법으로 윤활처리된다.

분말단조에 있어서 금형예열은 다이칠링 현상을 방지하는 측면에서 매우 중요하다. 다이 칠링 현상이란 소재와 금형의 온도차로 인해 단조시 금형에 접촉되는 제품표면이 국부적으로 냉각되므로 결과적으로 표면층의 기공이 잔류하는 현상을 말하는데 이를 방지하기 위한 금형예열은 통상 200~250°C가 적절하며 프레스의 램 속도도 빠른것이 바람직하다.

1.4. 수치해석

커벡팅로드와 같은 비대칭 부품의 경우 분말단조에서 예비성형체의 설계시 부위별 중량비와 단조후 균일한 밀도분포를 제어하는 것이 매우 중요한 과제로서, 최근 이를 위한 수치해석기법이 국내외에서 활발히 연구되어 있다. 그림 1은 FEM 수치해석을 통해 설계한 승용차용 커벡팅로드 예비성형체의 변형과정을 나타내고 있으며 이러한 결과와 실험결과를 종합하여 최적 예비성형체 설계를 얻을 수 있다.

1.5. 분말단조품의 기계적 성질

분말단조품의 기계적 특성에 영향을 주는 주요인자는 분말특성, 단조품의 밀도, 급속하중, 개재물 및 불순물 함량, 그리고 제품표면과 내부의 잔류기공 등이다. 그림 2는 불순물의 양에 따른 충격에너지의 변화로서 불순물이 대략 0.1 vol% 가량 존재함에 따라 충격 에너지는 급격히 감소됨을 알 수 있다. 특히, 동일한 부피분율의 경우 미세한 불순물이 충

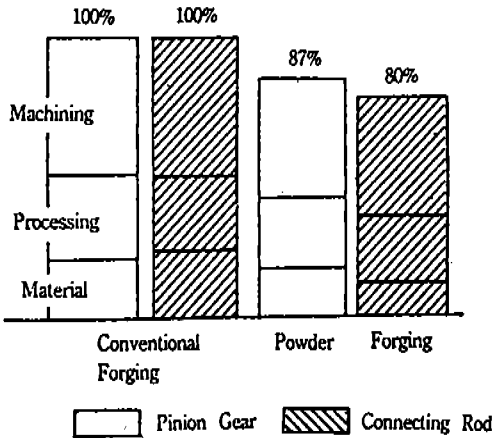


Fig. 3. Comparison of manufacturing costs of pinion gear and connecting rod.

격치에 더욱 민감하게 작용함을 알 수 있다. 이러한 불순물로는 황화물(sulfides)과 규산화물(silicates) 또는 기공표면의 산화물(oxides) 등을 들 수 있으며 주로 수분사 분말제조시 생성된다.

1.6. 분말단조품의 경제성

분말단조공정이 종래의 열간단조공정과 비교해서 가질 수 있는 장점은 재료 및 기계가공비의 절감을 들 수 있다. 그림 3은 미국, 일본 등지에서 고부가 가치 부품으로서 양산화에 성공한 대표적인 자동차 엔진부품인 커넥팅로드와 디퍼렌셜 피니언기어에 있어서 분말단조와 종래의 열간단조 공정에 따른 경제성의 차이를 나타내고 있다. 최종제품에 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 가능하다.

2. 국내외 개발 동향

분말단조기술은 1960년대 미국 GM사의 트랜스미션 스테이터 캠(transmission stator cam)의 개발을 필두로 하여 Federal Mogul, GKN, Ford, Toyota사 등에서도 분말단조 기술 개발에 성공하였고 현재는 세계 각국의 자동차 업체에서 대형 고부가

Table 4. Trends of connecting-rod manufactured by the powder forging

회사명	개발 및 생산 현황
Toyota	-Repressing mode -Fracture splitting 공법 비적용 -적용이유: 낮은 진동 & 소음 -생산량: 250만개/년(추정)
Krebsöge	-Repressing mode -Fracture splitting 공법 적용 (Groove compaction) -적용이유: 중량감소, 원가절감 -생산량: 120만개 Line -성형(유압프레스)→자동선별→소결 →자동이송→단조(유압프레스) -BMW용 생산중 -Jaguar & Volvo용 개발중
Masco Exotic Metals Div.	-Semi forging mode -Fracture splitting 공법적용(V-notch 가공) -적용이유: 중량감소, 원가절감 -생산량: 300~400만개/년(추정) -Mechanical press, Powder forging press -Flash 제거 공정 필요 -현재까지 주로 Ford사 제품 -Chrysler 납품 예정 -제 2공장 건설중(96년 완공 예정)
Federal Mogul	-Semi forging mode -대형 트럭용 Con-Rod 생산중 -주로 Chrysler사에 납품중
Delco Remy	-Semi forging mode -주로 GM사에 납품중

가치의 부품개발에 분말단조 기술의 적용확대를 지속적으로 꾀하고 있다. 자동차부품 중 주로 스테이터 캠(stator cam), 클러치 허브(clutch hub), 싱크로나이즈 링(synchronized ring) 등 중공형 부품들이 먼저 개발되기 시작하였고 차동피니언기어 등의 기어류에 이어 비대칭 부품인 커넥팅로드가 80년대 초반부터 본격적으로 생산 활용되어지고 있다. Table 4는 분말단조부품으로 최근 가장 각광을 받고 있는 커넥팅로드(connecting-rod)의 구체적인 개발사례를 나타내고 있다. 먼저 Ford사의 경우 1981년에 기술개발을 시작하여 종래의 열간단조보다 피로강도가 우수한 커넥팅로드의 제조에 성공한 후 현재는 연간 4,000,000개 정도를 생산하고 있으며, 이로 인하여

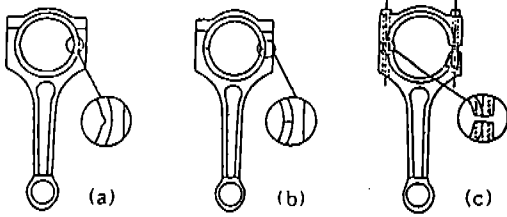


Fig. 4. Fracture splitting process by Krebsöge: (a) V-shape groove shaped during the compaction of preforms, (b) then closed into a short crack, (c) fracture splitting of the cap from the rod.

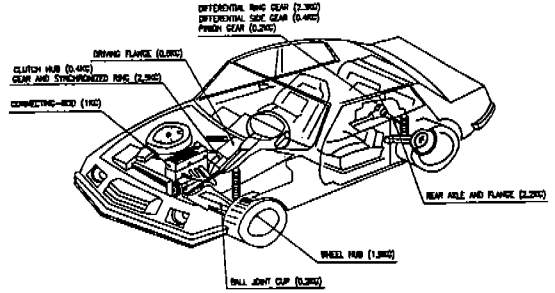


Fig. 5. Powder forged automobile parts.

약 20%의 원가절감을 이룩하였다. 일본의 Toyota 사의 경우 1960년대에 개발을 시작하여 1981년부터 Calmry 엔진의 커넥팅로드를 분말단조품으로 적용하기 시작하면서 아웃터 레이스(Outer race) 부품도 병행 개발하여 현재는 약 250만개 가량 생산중에 있다. 또한 Krebsöge의 한 연구자는 현재 분말단조용 커넥팅로드의 세계 시장점유율이 약 2.5% 수준이지만 1994년부터 GM, Chrysler 등의 미국회사와 BMW, Volvo사 등에서 분말 단조용 커넥팅로드의 적용을 시작하고 있고, 유럽의 Volkswagen과 Ford사 등에서도 연이어 개발 계획을 갖는 등, 2000년에는 약 20~30%까지 증대될 전망이라고 발표하 바 있다. Ford사의 경우는 1987년에 V-4 Escort 엔진에 분말단조 커넥팅로드를 적용하기 시작하여 1996년에는 자사 차량에 있어서 모든 4기통 엔진에 적용할 계획을 갖고 있다.

분말단조용 커넥팅로드의 기존 제조방법은, 대단부를 타원형으로 단조성형 후 절단하여 진원가공 및 볼트체결에 의한 조립순으로 제작되어 왔다. 그러나 최근 동향을 살펴보면 그림 4와 같이 대단부 축을 진원으로 단조성형한 후 취성 충격파괴에 의한 파단분할법을 적용하여 기계가공을 삭감함과 동시에 재료비를 더욱 절감시키면서, 양측 파괴 파단면의 확실한 연결로 소음까지도 감소시키는 목적으로 생산되고 있다. 이러한 공정은 1992년에 독일 Krebsöge사의 특허로 출원되어 현재 세계 각국의 자동차 업체에서는 이와 경쟁하기 위하여 유사한 공정 개발에 대한 연구와 특허를 제출하였으며 그 현황은 표 5와 같다.

국내의 경우 분말야금 기술은 자동차 부품을 중심으로 연간 약 1000억원 정도의 시장을 확보하고

Table 5. International patents of fracture splitting process

년도	출원자	내용
1986	GM	용제재 취성파괴방법(최초, 홈가공)
1989	Krebsöge	분말단조에 파단분할공정 적용
1990	BMW	Cap과 Shank부를 별도로 제작 후 일체형으로 단조
1992	Ford	수소용력 균열로 파단분할 파단균열이 우수한 소재 개발
1993	Schmidt	레이저 빔으로 응력집중용 홈 가공

Table 6. Transitions of manufacturing process in automotive parts

부	품	제조법	
Engine	Connecting-Rod	Hot Forging	Powder Forging
Gear-Box	Synchronized ring	Hot Forging	Powder Forging
	Synchro hub	Hot Forging	Powder Forging
Rear-Axle	Flange	Hot Forging	Powder Forging
	Bevel gear	Hot Forging	Powder Forging
	Side Gear	Hot Forging	Powder Forging

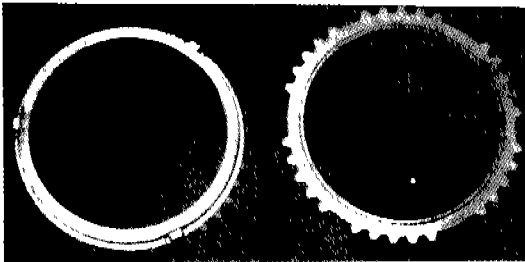
있고 빠른 속도로 성장하고 있다. 한편, 국내 자동차 공업이 연간 200만대 수준의 고도의 발전을 함에 따라 점차적으로 분말 단조품의 개발요구가 증대되어 있으며 원가절감 및 경량화를 위한 개발 분위가 성숙되고 있다. 이러한 배경으로 최근 한국기계연구원과 일부 기업에서는 디퍼렌셜 피니언기어와 커넥팅로드의 분말단조 기술개발에 대한 연구를 수행하

Table 7. Manufacturing companies and powder forged parts

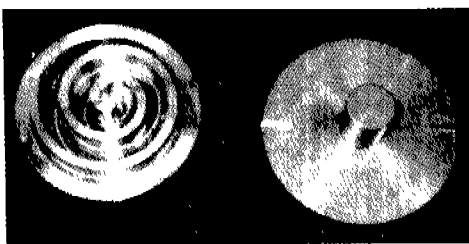
부 품 명	제 조 회 사
Stator cam	Hydrumatic Division of GMC Imperial Clevite
Automotive differential bevel pinion and side gear	Delco Moraine Division of GM Cincinnati, Inc. Gleason, Inc. Keystone Carbon Co. Michigan Powder Metal Products
Connecting rod	Federal Mogul Ford Fiat GKN Toyota



제품명 : Lock Up Converter Parts



제품명 : Fe-based Synchronized Ring



제품명 : Scroll Rotor

Fig. 6. Examples of powder forged parts.

고 있다.

3. 분말단조에 의한 자동차부품의 예

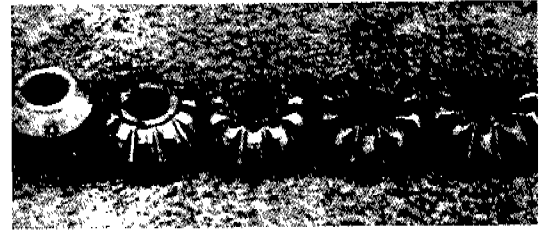
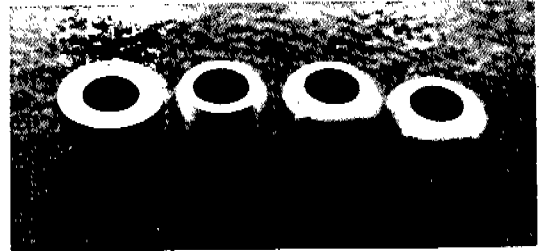


Fig. 7. Several preforms and powder forged parts of differential pinion gear.

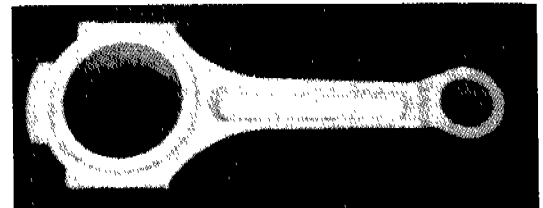


Fig. 8. Prototype of P/F connecting rod.

분말단조공정이 유리한 제품은 복잡한 형상이면서 강도를 요구하는 부품들이므로 자동차부품 가운데 분말단조에 적합한 자동차 부품들은 차동장치용 베벨기어(bevel gear), 커벡팅로드 등이 있으며, 그림 5는 분말단조에 적합한 자동차부품의 예를 나타내 주고 있다. 표 6은 자동차부품 중 분말단조제품으로 제조되고 있는 부품들의 제조공법의 변화추이를 나타내며 표 7은 분말단조제품으로 개발된 대표적인 부품 및 제조회사를 나타내고 있다. 또한 분말단조제품으로 성공한 자동차 부품의 외관은 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 나타나 있는 부품 가운데 철계 싱크로나이즈 링은 버스, 트럭용으로 기계가공품보다 가격이 현저히 낮고 특성 또한 향상되는 장점이 있어 높은 시장점유율을 보이고 있으며, 스크로 로타(scroll rotor)는 분말단조공정의 장점을 최대한 이용한 제품으로 일본의 Sumitomo Electric사에서 알루미늄 합금개발과 함께 수치제어식 공작기계(NC milling machine)로 가공하던 것을 분말단조로 제조하므로써

많은 원가절감과 특성향상 효과를 얻고 있다. 국내에서는 한국기계연구원이 차동피니언기어와 커넥팅로드를 분말단조로 시제품을 제작, 현재 특성평가를 수행중에 있으며, 그림 7은 차동피니언기어의 예비성형체와 성형행정별 단조품의 외관을, 그림 8은 분말단조 커넥팅로드의 예비성형체 외관을 나타내고 있다.

4. 향후전망

자동차 부품중 스테이터 캠(stator cam) 등과 같은 중공형부품 등을 시작으로 비대칭형상의 커넥팅로드가 개발되어 그 수요가 급증되고 있는 분말단조품들은 형상이 복잡해서 기계가공으로는 가공시간 및 비용이 많이 소요되거나 분말야금으로는 요구강도를 만족하지 못하는 부품들의 제조에 적합하기 때문에 복잡형상이면서 고강도가 요구되는 자동차 부품의 생산에 매우 유리하다. 또한, 세계의 많은 자동차 회사들은 제조원가를 낮추기 위하여 제조비용이 절감되고 대량생산에 유리한 공정으로 제조방법을 전환하고 있다. 따라서, 정형가공의 측면에서 유리한 분말단조공정은 그 적용범위가 급증하고 있으며 분말합금조성과 최적공정을 개발하여 이를 더욱 가속화시키고 있다.

분말단조 공정의 기술축적을 토대로하여 얻을 수 있는 기대효과는 분말재료의 고강도 부품적용기술 배양과 분말야금업체, 열간단조업체 및 자동차업체의 분말단조 기술축적이 가능할 것으로 예상되며 고공위 부품의 생산성 향상 및 원가절감에 의한 국내 자동차 및 기계부품의 국제 경쟁력 향상을 기할 수 있다. 그러나 현재까지는 국내에서 분말단조품의 활용이 전무한 상태이지만 자동차업체 등의 수요처에서 최근들어 개발의 필요성을 절감하고 있는 실정이다. 또한 자동차의 경량화 및 원가절감에 대한 욕구가 증대되고 있고 알루미늄, 티타늄 및 복합재료 등의 경량재료 활용이 원가문제 등으로 상당기간 양산화가 어려울 것으로 예상되어지고 있어 선진국의 경우 분말단조와 같은 공정의 현실적 중요성이 새로이 부각되어지고 있는 점을 감안하면 국내에서

도 이에 대한 산업계의 요구가 활발히 대두되어질 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. 서상기 : 분말단조 기술개발, 한국기계연구소 기술보고서 (1988) 4
2. T. P. Cook : *Oxidation, Reduction and Decarburization of Metal Powder Preforms*, Hoeganes Corporation (1972)
3. A. Ken : Metal Powder Report, Feb. (1983) 103
4. C. Tsumuki : *Advanced Technology of Plasticity*, V1 (1984) 339
5. P/M Technology, News Letter, March/April 22 (1993)
6. Donald G : *The Dynamics of Powder Metallurgy*, Industrial Heating, August (1990) 30
7. M. Weber : *Powder Metall. Intern.*, 25 (1993) 125
8. 정형식, 이정환, 이동원 : 분말단조에 의한 자동차 부품개발 (2), 상공부 보고서, 한국기계연구원, MI078-1759, C (1992)
9. 이정환, 이동원, 정형식 : 분말단조의 기술현황 분석, 기계와 재료, 한국기계연구원, V4 Ne (1992) 101
10. R. Koos and S.-E. Grek : *International Powder Metallurgy Conference at Florence*, June (1982) 58
11. 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)
12. M. V. J. Brazenhall : *Metal Powder Report*, September (1990) 600
13. M. N. Ranek and Abadawy : *ibid.*, May (1989) 373
14. 박종진 : 분말 커넥팅로드의 유한요소해석, 소성가공, Sep. 1 (1992) 33
15. H. A. Kuhn : *Powder Forging*, (1990) 23
16. F. T. Lally, I. J. Toth and J. Dibenedetto : *Progress on Powder Metallurgy*, 28 (1972) 275
17. G. Lusa : *Modern Developments in Powder Metallurgy*, 4 (1971) 425
18. R. F. Halter : *1970 Fall Powder Metallurgy Conference Proceedings*, MPIF, New York (1971) 119
19. F. T. Lally and I. J. Toth : *Forging of Metal Powder Gears*, Final Report on Army Contract DAAG 07-72-C-0277 (1974)