

## 분말 사출 성형 기술

하태권\*\* · 성환진\*\* · 안상호\*\* · 장영원\*  
(포항공과대학교 신소재공학과\* · 포항산업과학연구원 부품신소재연구센터\*\*)

### Powder Injection Molding Technology

T. K. Ha, H- J. Sung, S. Ahn and Y. W. Chang

#### Abstract

Powder injection molding (PIM) uses the shaping advantage of injection molding but is applicable to metals and ceramics. This process combines a small quantity of polymer with an inorganic powder to form a feedstock that can be molded. After shaping, the polymeric binder is extracted and the powder is sintered, often to near-theoretical densities. Accordingly, PIM delivers structural materials in a shaping technology previously restricted to polymers. The process overcomes the shape limitations of traditional powder compaction, the costs of machining, the productivity limits of isostatic pressing and slip casting, and the defect and tolerance limitations of conventional casting. Since 1980s when major attention was given to PIM process, it has been widening the application area from small parts with complex shape and tailored properties to structural parts requiring strength and ductility as in automotive, military and medical industries.

**Key Words** : Powder Injection Molding, Status of Technology, Binder, Feedstock, Sintering, Vision

#### 1. 서 론

복잡하고 정밀한 플라스틱 제품을 대량 생산하는 제조하는 방법으로는 일반적으로 사출성형이 사용되고 있다. 근래에 이러한 우수한 성형성을 이용하여 금속이나 세라믹 분말을 결합제(고분자, 왁스, 오일 등의 혼합물)와 혼합하여 기존의 플라스틱처럼 사출 성형한 후, 후 공정에서 결합제를 제거하고 분말만을 고온 소결하여 복잡한 형상의 부품을 대량으로 제조하는 새로운 기술이 사용되고 있다. 이때 원료 분말이 금속인 경우를 금속사출성형 (Metal Injection Molding, MIM) 이라고 하고 세라믹인 경우를 세라믹사출성형(Ceramic Injection Molding, CIM)이라 하고 이들을 통칭하여 분말사출성형(Powder Injection Molding, PIM)이라 한다.

이 기술의 장점으로는 분말을 사용하므로 난가 공성이나 구조로는 불가능한 합금의 부품을 제조할 수 있으며 전통 분말야금에서 불가능한 3 차원 복잡 형상의 부품제조, 95% 이상의 고밀도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 0.1~0.3%의 상대 치수정밀도로 대량생산이 가능하기 때문에 절삭가공, 정밀주조, 다이캐스팅 및 전통 분말야금 등의 기술들을 급속히 대체해 나가고 있다.

분말사출성형기술이 비교적 생소한 기술이지만 우리는 실생활에서 이 공정으로 제조한 부품들을 쉽게 접할 수 있다. Fig. 1 에 분말사출성형된 부품의 예를 나타내었는데, 시계 밴드, 치아 교정용 브래킷(Bracket), 자동 헤어 커트, 광통신 커넥터 등이 있고 그 외에도 자동차, 정밀기계 및 전자설비 등의 부품으로 폭 넓게 사용되고 있다.

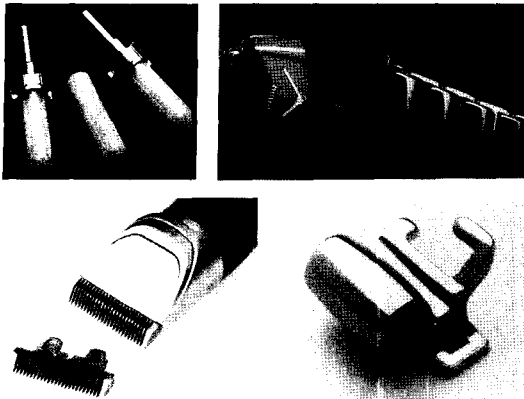


Fig. 1 Examples of parts produced by powder injection molding technology

## 2. 분말사출성형 공정

분말사출성형 공정은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 혼합체 제조 공정, 이를 사출성형기에 넣고 사출성형하는 공정, 결합체 제거 공정 및 소결공정으로 나눌 수가 있다. 이러한 분말사출성형은 우리나라 전통의 도자기 제조 공정과 매우 유사하다. 도자기 제조 공정에서 고운 흙은 금속 또는 세라믹 분말에 해당하고 물은 결합체에 해당된다. 그리고 고운 흙과 물을 반죽한 진흙은 혼합체에 해당된다. 이해를 돕기 위해 분말사출성형의 주요 공정을 도자기 제조 공정과 비교하여 아래에 설명하였다.

### 2.1 분말의 선택

분말사출성형에 사용되는 분말은 소결 후 최종 제품의 물리, 화학적 특성을 결정하는 원료 물질이므로 성공적인 공정 수행을 위해서는 입자 크기 및 분포, 형상, 표면적, 입자간 마찰력, 입자의 내부구조, 화학성분 등의 분말 특성을 확보해야 한다. 이러한 다양한 분말의 특성 중 제조공정에 가장 큰 영향을 미치는 것은 분말의 입도와 형상이다.

일반 금속분말야금에서는 평균 입경이 보통 수십에서 수백  $\mu\text{m}$ 의 비교적 조대한 분말을 사용하지만, 분말사출성형 공정에 사용되는 분말은 사출성형 중 유동성을 확보하고 높은 소결밀도를 얻기 위하여 보통 평균 입경  $20\mu\text{m}$  미만의 미분을 사용한다. 그러나 나노에서 수  $\mu\text{m}$  크기의 분말을 사용하는 세라믹 또는 초경합금의 경우에는 분말

야금이나 분말사출성형에 사용하는 분말의 차이가 없다.

분말사출성형 공정에서 분말이 조대할 경우 가장 문제가 되는 것은 혼합체의 유동성이 떨어지는 것과 소결 후 고밀도의 소결체를 얻을 수 없는 것이다. 도자기 제조 공정에서 흙의 입자가 커지면 점결성이 떨어져 형상을 마음대로 빚을 수 없고 가마에서 도자기가 제대로 구워지지 않는 것과 유사하다. 그러나 분말의 입자가 미세해질수록 소결특성은 향상되지만 분말의 가격이 높아져 제품의 단가를 높하게 되므로 최종 제품의 요구 특성에 맞춰 적절한 분말을 선택해 주어야 한다.

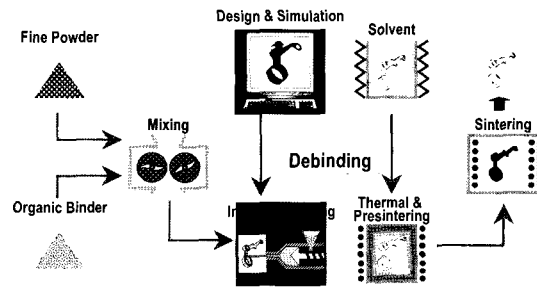


Fig. 2 Schematic illustration of PIM process

### 2.2 혼합체의 제조

혼합체 제조공정은 분말사출성형 공정에서 가장 중요한 공정 중의 하나인데 분말과 결합체의 혼합 비율에 따라 혼합체의 유동 특성이 달라져 사출공정과 결합체 제거공정에 큰 영향을 미치게 되며 최종 부품의 크기도 조절이 된다. 도자기 제조 공정에서 진흙의 반죽 정도를 결정하는 것으로 반죽이 너무 묽거나 진할 경우 도자기의 형상을 제대로 빚을 수 없는 것과 유사하다. 그리고 진흙 반죽이 전체적으로 균일해야 하듯 혼합체 제조 공정에서도 분말과 결합체를 균일하게 혼합하는 것이 매우 중요하다. 균일한 혼합을 위해 혼합체의 제조는 결합체 용점 약간 위에서 결합체와 분말을 균일하게 혼합하며 혼합이 완료되면 냉각하면서 사출하기 적절한 크기(수 mm)로 만들어 준다.

분말사출성형 공정에서 최종 부품의 크기를 결정하는 가장 중요한 요소는 금형의 캐비티(cavit

-y) 크기이고 다음으로는 혼합체의 분말충진율 (혼합체의 부피에서 분말의 부피가 차지하는 비율)이다. 그런데 이 두 요소는 상호보완적인 관계를 가지고 있다.

금형의 캐비티 크기와 분말 충진율이 결정되면 부품의 크기가 결정된다. 그런데 금형의 캐비티 크기를 키우고 충진율을 낮추거나 금형 캐비티를 줄이고 충진율을 높여도 동일한 크기의 부품을 얻을 수 있다. 그러나 일단 분말이 결정되고 나면 특정한 크기의 부품을 얻기 위해 금형 캐비티와 분말 충진율을 임의적으로 조절할 수 있는 것은 아니다. 분말이 선정되면, 즉 분말의 입도와 형상이 결정되고 나면 사출성형에 적합한 유동특성을 갖는 범위가 결정된다. 이 범위 내에서만 금형 캐비티 크기와 분말 충진율이 상호 보완적으로 조절이 가능하다.

이러한 관계들을 이해하기 위해서는 몇가지 요소들을 이해해야 한다. 먼저 분말 부피충진율 ( $\Phi$ )인데 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{\frac{W_P}{\rho_P}}{\frac{W_P}{\rho_P} + \frac{W_B}{\rho_B}}$$

여기서  $W_P$ 와  $W_B$ 는 각각 분말과 결합체의 중량비이고,  $\rho_P$ 와  $\rho_B$ 는 각각 분말과 결합체의 비중이다. 분말 충진율은 일반적으로 부피의 비율(%)로 표현되고 분말사출성형에서는 보통 40-65% 범위 내이다.

다음은 임계 분말 부피충진율이다. 분말 부피충진율이 낮은 경우는 결합체 내에 분말이 각각 분리된 상태로 부유하고 있다. 점차로 분말 부피충진율이 높아지면 분말들 간의 간격이 점차 줄어들게 되고 혼합체의 점도가 점차 높아지게 된다. 어느 단계에 이르면 분말들 간에 결합체 층이 없어지고 분말들이 직접 접촉되면서 점도가 급격히 높아지게 된다. 즉, 혼합체 내에 기공 없이 얻을 수 있는 최고 분말 분말충진율에 도달하게 되는데 이 때를 임계 분말 충진율이라고 부른다. 이 단계를 넘어서게 되면 혼합체의 점도가 기하급수적으로 증가하게 되고 혼합체 내에 기공이 존재하게 된다. 이 상태에서는 최조밀충진(closest packing)된 분말 사이의 공극을 결합체가 완전히 채우지 못하게 된다.

마지막으로 최적 분말 부피충진율인데 임계 분

말충진율 보다 조금 낮은 분말 부피충진율을 말한다. 이 상태에서는 혼합체가 사출성형하기에 충분히 낮은 점도를 가지면서도 분말간의 접촉을 적절히 갖게 되어 공정 중에 충분한 형상 유지능을 갖게 된다. 임계충진율 이하에서의 혼합체 밀도( $\rho_M$ )는 아래와 같이 표현된다.

$$\rho_M = \Phi \rho_P + (1 - \Phi) \rho_B$$

Fig. 3은 결합체에 분말을 부피비로 첨가할 때의 혼합체의 이론밀도와 혼합후의 밀도와의 관계를 나타낸 loading 곡선의 예이다. 낮은 분말 부피 충진율에서는 혼합체의 밀도가 결합체 밀도와 분말 밀도의 혼합규칙을 잘 따르지만 임계 분말 부피 충진율을 넘어서면 오히려 밀도가 떨어지게 된다. 따라서 부품 제조를 위한 분말이 결정되면 이러한 최적 분말 부피 충진율을 먼저 구해야 하고 여기에 맞춰 금형의 캐비티 크기를 결정하여야 한다.

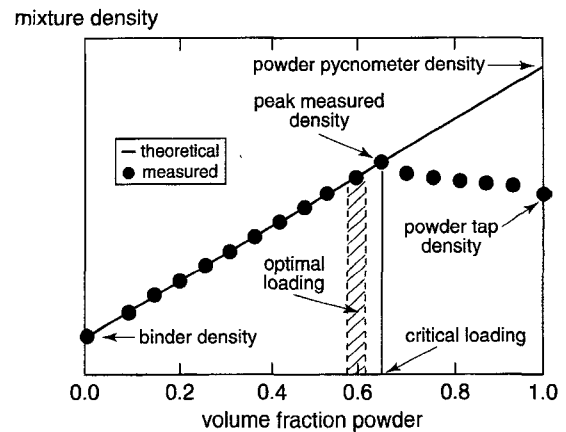


Fig. 3 Relationship between powder volume fraction and mixture density

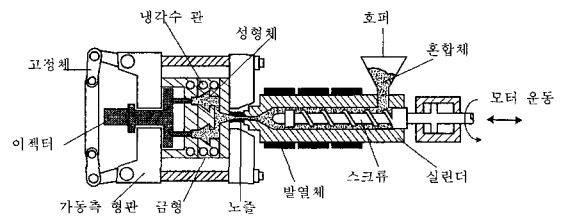


Fig. 4 Schematic diagram of an injection molder

### 2.3 사출성형과정

사출성형 공정은 제조된 혼합체를 실형상으로 성형하는 공정으로 사출성형기와 금형을 필요로 한다. Fig. 4 에 사출성형기 단면을 모식적으로 나타내었다. 혼합체가 호퍼(hopper)를 통해 공급되면 호퍼 하단부의 스크류 회전을 통해 사출기 선단부로 이송된다. 스크류는 Fig. 5 에서와 같이 공급부, 압축부 및 계량부로 구분된다. 스크류를 감싸고 있는 실린더 외부에는 가열장치가 설치되어 있어 혼합체가 스크류를 통해 이송되는 동안 가열된다. 압축부에서는 혼합체의 압축과 탈가스(degassing)공정이 이루어 진다. 기공 없이 용융된 혼합체는 계량부를 거쳐 실린더 선단부에 축적이 된다. 선단부에 용융된 혼합체가 축적됨과 동시에 회전하는 스크류는 미리 설정된 위치에 이를 때까지 후퇴하게 된다. 사출 시에는 이 스크류가 앞으로 전진하여 선단부에 축적된 혼합체를 노즐을 통해 금형으로 사출하게 된다. 그리고 스크류의 선단부에는 스크류 전진시 축적된 혼합체의 역류를 방지하기 위해 체크링과 같은 역류 방지 밸브가 설치되어 있다. 노즐을 통과한 혼합체는 스프루(sprue)와 러너(runner)를 거쳐 게이트를 통해 금형 캐비티에 채워지게 된다. 캐비티 주위에는 사출된 혼합체를 냉각시키기 위해 냉각 시스템이 설치되어 있다.

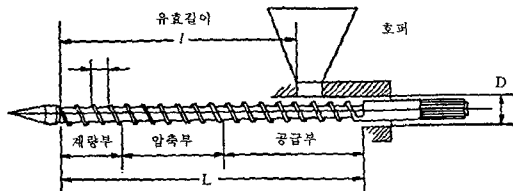


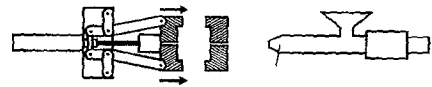
Fig. 5 Structure of the screw

Fig. 6 에 사출성형공정의 1 사이클을 나타내었다. 공정이 시작되면 가동측 금형이 닫히고 사출부가 이동하여 고정측 금형과 노즐을 밀착시킨다. 사출을 통해 금형에 혼합체가 충전된다. 충전과 동시에 혼합체의 냉각이 일어나고 수축이 발생한다. 부피수축의 보정을 위해 계속적으로 용융 혼합체가 유입하도록 높은 압력을 유지하게 되는데, 이를 보압기간이라 한다. 보압이 끝나면 냉각과정을 거치는 동안 사출된 성형체가 고형화 된다. 성형체가 냉각되는 동안 스크류가 회전하여 실린더

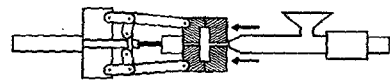
선단부에 혼합체를 다시 계량하게 된다. 냉각이 완료되면 가동측 금형을 열고 이젝터핀(ejector pin)을 돌출시켜 부품을 취출한다.

사출성형의 공정변수들로는 사출온도, 금형온도, 사출속도, 사출압, 보압, 보압 유지시간 및 냉각시간등을 들 수 있다. 이러한 사출조건을 조절하여 싱크, 균열, 잔류응력, 제팅(jetting), 플로마크(flow-mark), 플래쉬(flash) 및 숏샷(short shot) 등의 결함을 제어해 주어야 한다.

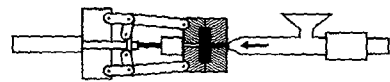
사이클 시작



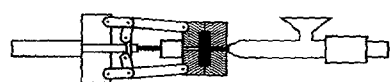
금형 고정



금형 충전



보압 & 계량



사출부 후퇴



이젝터

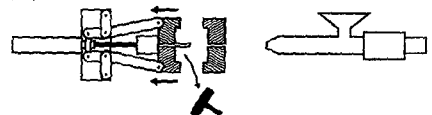


Fig. 6 Schematic illustration of injection molding process

### 2.4 결합제제거공정

사출성형 공정을 통해 부품의 형상이 완성되고 나면 결합제의 역할은 끝났기 때문에 결합제를 제거해 주어야 한다. 이는 도자기 제조 공정에서 도자기를 빚은 후 건조를 통해 수분을 제거하는 것과 같다. 수분은 형상을 빚기 위해 필요할 뿐 다음 공정을 위해서는 반드시 제거되어야 하듯 분말사출성형공정에서도 사출성형 후에는 결합제

를 제거해 주어야 한다. 결합제가 제거 되어도 분말들 간의 접촉과 마찰력으로 인해 형상 유지가 가능하다.

분말사출성형 공정에서 결합제 제거공정은 가장 장시간을 요구하는 공정의 하나인데 결합제 제거 시간을 줄이기 위해 많은 연구들이 진행되어 기술개발 초기에 비해 많은 발전이 되었다. 결합제 제거 공정은 크게 용매추출법(solvent extraction)과 열 분해법(thermal debinding)으로 분류할 수 있다. 모든 결합제 제거공정의 공통점은 초기단계에서 성형체에 충분한 기공을 형성시키는 것인데 이는 이후 열분해 공정에서 증발이나 분해되는 물질들에 의한 증기압을 배출하는 통로 역할을 하여 급격한 팽창으로 인한 균열을 방지하는데 그 목적이 있다.

가장 일반적인 방법이 용매추출과 열분해 2 단계 공정을 거치는 것이다. 용매추출 공정에서는 성형체를 용매에 넣어 결합제 성분중 왁스, 오일 등과 같은 유동성 확보를 위한 성분을 용매로 녹여냄으로써 성형체 내부까지 기공 통로를 만들어 준다. 이후의 열분해 공정에서는 용매추출된 성형체를 로에 넣고 서서히 가열을 하면 나머지 결합제들이 용매추출공정에서 만들어진 기공 통로를 통해 증발된다. 용매추출공정에서는 성형체를 용매에 직접 담그지 않고 용매의 증기를 이용하여 결합제를 추출하는 방법이 사용되기도 한다. 그리고 용매로 사용되는 물질이 독성이 강하여 최근에는 에틸알콜이나 물을 사용하는 방안도 제시되고 있다.

열에 의한 제거법은 가장 많이 사용되는 방법으로서 상압, 진공등의 감압이나 Wicks의 모세관력을 이용하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 그리고 최근에는 환경친화적인 수용성 결합제를 사용하거나 결합제에 물을 첨가하여 겔 상태에서 자연 건조를 통한 결합제 제거방법도 사용되고 있다.

결합제 제거 공정중에 가장 많은 결함이 발생하는데 용매추출 자체의 결함인 경우도 있지만 대부분 이전 공정의 결함이 결합제 제거 공정 중에 나타나는 것이다. 특히 최적 분말부피충진율 선정의 실패로 인한 유동성 불량에 의한 결함과 잘못된 사출성형공정 조건설정으로 인한 잔류응력과 웰드(weld)에서의 균열결함이 많다.

### 2.5 소결공정

소결 공정을 거치는 동안 성형체 내에 결합제가 차지하고 있던 기공들이 분말들간의 결합으로

점차 소멸되면서 등방수축이 일어나게 된다. 상용 분말야금에서는 다이 성형의 경우 다이 벽과의 마찰과 수직 방향이 폭 방향보다 압력을 더욱 많이 받으므로 고온소결시 뒤틀림과 수직 방향과 폭 방향의 불균일한 수축이 불가피하다. 사출성형은 용융 상태에서 가압이 되므로 등압성형이 가능하여 이러한 불균일수축은 최소화 할 수 있으나 결합제 제거 후 초기소결이 진행되는 저온에서는 결합력이 약하여 진동이나 증력에 의한 결함이 발생 할 수 있으므로 목 성장이 빠른 미세한 분말이 바람직하다. 통상적인 사출성형체의 소결밀도는 기계적인 특성의 큰 저하가 없는 이론 밀도의 95%를 최소한의 목표로 한다.

분말사출성형의 소결에는 대기로, 분위기로, 진공로 및 연속소결로 등이 사용되고 있는데 사용된 분말이 특성에 따라 소결로가 결정 되어야 한다. 분말사출성형용 소결로는 상용의 분말야금 공정에서 사용하던 로와 동일한 로를 사용하면 된다. 세라믹 사출성형의 경우 대기로를 사용하고, 산화성이 심한 철계의 경우 보통 수소 /불활성가스 분위기로 또는 진공로가 사용되고 초경의 경우는 진공소결로가 사용된다.

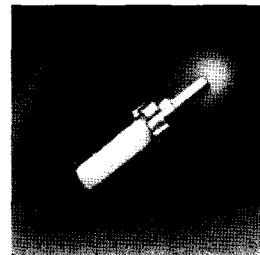
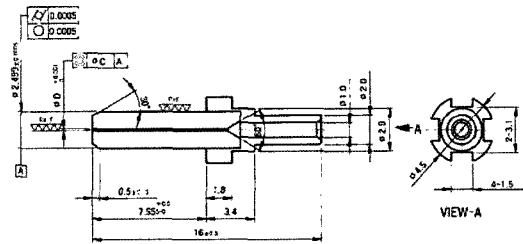


Fig. 7 Ferrule for optical communication

### 3. 분말사출성형공정의 응용

어떤 부품을 제조할 때 분말사출성형 공정을 적용하여야 할까? 이에 답하기 위해서는 분말사

출성형 공정의 특징을 정확히 이해하고 있어야 한다. 분말사출성형공정이 혁신적이고 우수한 기술임은 확실하지만 그 특징에 위배되는 특성을 갖는 부품을 제조할 경우에는 오히려 경쟁력이 떨어지게 된다.

분말사출성형 공정의 가장 큰 특징은 3 차원 복잡형상의 부품을 후 가공 없이 대량 생산 가능하다는 것이므로 다음의 경우에 더욱 더 경쟁력을 갖는다.

- (1) 형상이 복잡할수록
- (2) 소재의 가공이 어려울수록
- (3) 주조가 어렵거나 불가능할 경우
- (4) 생산량이 많을수록
- (5) 부품이 작을수록
- (6) 치수정밀도가 높을수록 (0.1~0.3%)

형상이 단순한 경우에는 상용의 분말야금 공정을 이용하거나 단조, 기계가공 등을 이용하는 것이 유리하다. 그리고 그 형상이 금형을 통해 제조 가능하여야 한다.

부품의 재질이 세라믹, 초경 및 텅스텐 등과 같이 가공이 어려울수록 유리하다. Fig. 7 에 나타낸 것과 같은 광통신 커넥터로 사용되는 지르코니아 페룰(ferrule)의 경우 재질이 지르코니아이고 직경 6mm, 길이 10mm 의 원통형이며 내부에 약 100 $\mu$ m 의 구멍이 10 $\mu$ m 이하의 정밀한 동심도를 가지고 뚫려 있다. 일반 기계가공으로는 이러한 정밀도를 맞추는 것은 거의 불가능하다. 재질이 정밀주조가 불가능할 뿐만 아니라 정밀주조로는 치수 정밀도를 맞추기가 불가능하다. 이와 같이 세라믹, 초경 W-Cu 등과 같이 주조가 불가능한 경우에도 분말사출성형공정이 경쟁력을 갖는다.

분말사출성형에서는 금형의 제작이 필수적이므로 생산량이 많을수록 부품의 단가에서 금형비가 차지하는 비율이 낮아져 경쟁력을 갖게 된다. 일반적으로는 약 수 천개 이상이 요구되고 특별한 경우에는 약 1,000 개 정도만 생산해도 경쟁력을 가질 수 있다. 분말사출성형공정은 일반적으로 배치타입의 설비를 많이 사용하기 때문에 동일한 공간에서 많은 수량을 생산해야만 타 공정과 경쟁을 할 수가 있다. 그리고 분말사출성형 공정과 주로 경쟁하는 공정은 정밀주조 인데 정밀주조의 가장 큰 단점은 낮은 치수 정밀도와 주조 표면상태가 상대적으로 거칠다는 것이다.

#### 4. 분말사출성형 기술의 현재와 미래

금세기의 제 2 산업혁명은 Micro-system Technology (MST)에 의해 이루어 질 것이라는 예상이 결코 과장이 아니다. 정보통신, 수송기기, 바이오, 의료분야 등 일상과 관련된 기계부품의 극소형화는 대단히 급속하게 진행되고 있다. 그러나 Micro-system 시장이 활성화 되기 위하여는 무엇보다도 마이크로 부품을 경제적으로 양산할 수 있는 산업기술의 개발이 동반 되어야 하며, 이에 따라 극미세 분말사출성형(Micro Powder Injection Molding: Micro-PIM)은 금속 또는 세라믹의 초정밀 미세 부품을 양산할 수 있는 산업기술로서 선진국을 중심으로 연구개발이 활발하게 이루어 지고 있다. Fig. 8 에 마이크로 분말사출성형에 의한 부품의 예를 나타내었다.

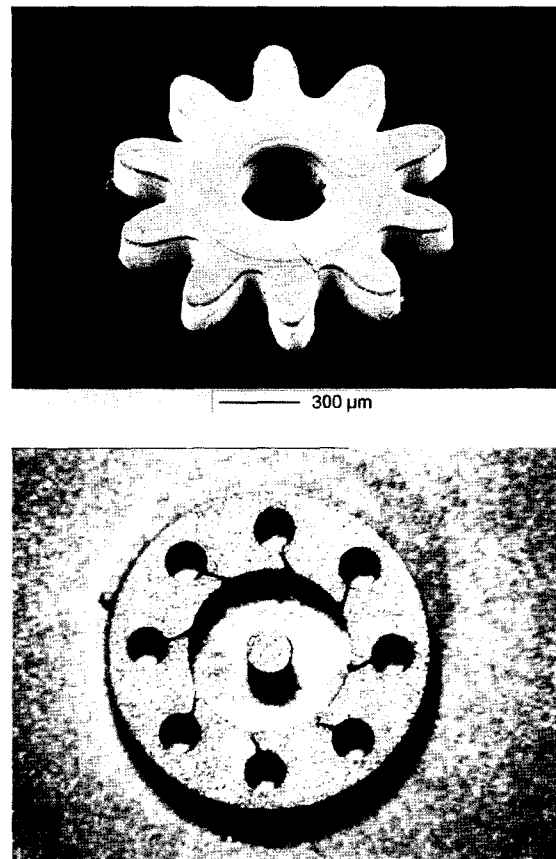


Fig. 8 Part produced by micro-PIM technology

Micro-system 의 극미세부품의 재료로서는 당연히 극미세분말, 즉 나노분말이 요구된다. 현재 시험적으로 제조되는 금속 또는 세라믹 극미세부품의 부분칩수는 수십  $\mu$ m 수준까지 가능하나 아

직 양산은 물론, 치수 정밀도와 표면조도 등에 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 또한 치수의 극미세화를 더욱더 실현하기 위하여 Micro-PIM 공정개발과 더불어 나노크기 분말의 적용은 필수적이다. 또한 역으로 다양한 나노분말을 이용하여 3 차원 복잡형상의 정밀 마이크로 부품을 제조할 수 있는 공정은 기술적으로나 경제적인 측면에서 Micro-PIM 이 유일한 방법이다.

초정밀 분말사출성형기술이 적용 분야를 넓혀가며 해마다 급속히 성장하는 것은 기술의 발전에 따라 점차 고기능성 부품들이 요구되고 경제성 또한 요구되기 때문이다. 기기들이 점차 다양화, 고성능, 소형화 및 경량화가 요구되면서 초정밀 분말사출성형기술의 정밀도, 부품디자인의 폭넓은 자유도, 대량생산성 및 경제성의 특성을 필요로 하는 이 기술이 점차 부각되고 있다. 국내 부품 설계진들이 아직은보수적인 관점에서 기존의 공정에 의존하여 부품을 설계하고 있지만 선진적인 해외 선진국의 설계진들은 이미 분말사출성형의 장점을 십분 활용하여 부품을 설계함으로써 기기의 고성능화, 경제성 확보가 가능하여 경쟁력을 더욱 높이고 있다. 해외에서 급속히 초정밀 분말사출성형 시장이 성장하는 것도 부품 설계진들이 초정밀 분말사출성형 기술을 폭넓은 분야에서 적용되는 기반기술로 활용하기 때문이다.

### 참 고 문 헌

- (1) R. Cornwall, PIM Continues Its March to Maturity, MPR, 1998, 53(7/8), pp. 32~33.
- (2) R. M. German and A. Bose, Injection Molding of Metals and Ceramics, MPIF, 1997.
- (3) A. Bose, The Technology and Commercial Status of Powder-Injection Molding, JOM, 1995, 47(8), pp. 24~30.
- (4) A. Bose, J.J. Valencia, J. Spirko and R. Schmees, Powder Injection Molding of Inconel 718 Alloy, Adv. in Powder Metall. and Particulate Mater., 1997, vol. 3, MPIF, pp. 18.99~18.112.
- (5) J.J. Valencia, T.J. McCabe and H. Dong, Microstructure and Mechanical Properties of Powder Injection Molded 17-4Ph Stainless Steel for Application in Aircraft Engine Components, Adv. in Powder Metall. and Particulate Mater., 1995, vol. 2, MPIF, pp. 6.205~6.214.
- (6) R.M. Schmees and J.J. Valencia, Mechanical Properties of Powder Injection Molded Inconel 718, 1998 Int. Conf. on Powder Metall. And Particulate Mater., Las Vegas, in press.
- (7) R.M. German, Technological Barriers and Opportunities in Powder Injection Molding, Powder Metall. Int, 1993, 25(4), pp. 165~169.
- (8) R. Haynes, The Mechanical Behaviour of Sintered of Sintered Metals, 1981, Freund Publ., London, UK.
- (9) G.F. Bocchini, The Influences of Porosity on the Characteristics of Sintered Materials, Int.J. Powder Metall., 1986, vol. 22(3), pp. 185~202.
- (10) M.J. Balshin, Poroshkovoye metallovegyeniye. Metallurgizdat. Moscow(1948).
- (11) B.Ya. Pines, A.F. Sirenko, I.N. Suchinin, Issiedouani -ya po zharo proischnym splavam. Izdat. Ak Nauk Udssr (1958) Vol.3.
- (12) M. Eudier, "The mechanical properties of sintered low-alloy steel," Powder Metallurgy (1962)278.
- (13) M. Eudier, Second European Symposium on Powder Metallurgy. Stutt(1968) Vol. 1.
- (14) E. Ryshkevitch, J. Amer. Cer., 36 (1953)65.
- (15) W. Duckworth, J. Amer. Cer. Soc., 36(1953)68.
- (16) V. Gallina, G. Mannone, Powder Metallurgy (1968) 73.
- (17) K. K. Schiller, In Mechanical Properties of Non Metallic Brittle Materials. Edited by W. H. Walton, Butterworths Sci. Publ. London (1956) 34.
- (18) J. Krasovskiy, Poroshkovaya Metallurgiya (1964) No. 4, 1.
- (19) R. Haynes, Powder Metallurgy (1971) 64.
- (20) R. Haynes, Powder Metallurgy (1971) 71.
- (21) E. Dudroua, J. Kubelik, Third Int. Powder Metallurgy Conf., Karlouy Vary (1970).
- (22) E. Dudrova: Podroky prashkove metalurgiye VUPM (1971), No. 3, 25.
- (23) F. P. Knudsen, J. Amer. Cer. Soc. 42 (1959) 376.
- (24) D. P. H. Hasselmann, R.M. Fulrath, J. Amer. Cer. Soc., 50 (1967) 399.
- (25) D. J. Millard, Discussion of Schiller's paper. Ref. (8) 45.
- (26) N. I. Shtscherban, Poroshkovaya Metallurgiya (1973) No. 10, 70.
- (27) G. H. Gessinger, H. Metzler, F. Esper, H. E. Exner, Powder Metallurgy (1971) 289.
- (28) M.F. Aksit and D. Lee, A Lumped Parameter Analy

- sis Powder Injection Molding, Int. J. Powder Metall., 1995, vol. 31, pp. 351~363.
- (29) C. I. Chung, B. O. Rhee, M. Y. Cao and C.X. Liu, Requirements for Binder for Powder Injection Molding, in Compendium on Metal Injection Molding II, MPIF, 1989, pp. 67~78.
- (30) T.H. Kwon and S. Ahn, Finite Element Analysis of PIM Filling Process with Slip Characterisation of Powder-Binder Mixtures, Powder Metall., 1998, 40(3), pp. 174~176.
- (31) B.O. Rhee and Y.C. Jung, Bagleys Correction in Rheological Characterization of PIM Feedstocks, Adv. in Powder Metall. and Particulate Mater., 1997, vol. 3, MPIF, pp. 18.23~18.28.
- (32) S. T. Lin and R. M. German, Extraction Debinding of Injection Molded Parts by Condensed Solvents, Powder Metall. Int, 1989, vol.21(5), pp. 19~24.
- (33) R. M. German, Theory of Thermal Debinding, Int. J. Powder Metall., 1987, vol.23(4), pp. 237~245.
- (34) D. I. Bloemacher, MPR, vol.45(2), 1990, p. 117.
- (35) A. Kimura, K.Nakabayashi and T. Shimura, MPR, vol. 45(2), 1990, p. 106.
- (36) C. P. Ashdoun and R. J. Holland, Compendium on Metal Injection Molding II, MPIF, 1989, p. 35.
- (37) F. V. Lenel, Powder Metallurgy-Principles and Applications, MPIF, 1980.
- (38) R. Billet, Net-Shape Full Density P/M Parts by Injection Molding, New Perspective in Powder Metallurgy, vol.8, MPIF, 1987, pp. 497~510.
- (39) R. M. German and K. F. Hens, Identification of The Effects of Key Powder Characteristics on Powder Injection Molding, Powder Injection Molding Symposium -1992, MPIF, pp. 1~16.
- (40) C. Lall, Fundamentals of High Temperature Sintering: Application to Stainless Steels and Soft Magnetic Alloys, Int.J. Powder Metall., 1991, vol.27(4), pp. 315~329.