

## 폴리머 몰드를 이용한 금속 나노분말의 미세부품 제조

이우석<sup>a, b</sup> · 김상필<sup>a</sup> · 이혜문<sup>a</sup> · 배동식<sup>b</sup> · 최철진<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>한국기계연구원 분말재료연구센터, <sup>b</sup>창원대학교 나노신소재공학부

### Fabrication of Micro Component of Metallic Nano Powder Using Polymer Mold

Woo-Seok Lee<sup>a, b</sup>, Sang-Phil Kim<sup>a</sup>, Hye-Moon Lee<sup>a</sup>, Dong-Sik Bae<sup>b</sup> and Chul-Jin Choi<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>Powder Materials Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials,

<sup>b</sup>Ceramic Science & Engineering, Changwon National University

(Received June 4, 2007; Accepted June 17, 2007)

**Abstract** Novel polymer mold process for fabrication of microcomponents using metal nanopowders was developed and experimentally optimized. Polymer mold for forming green components was produced by using a hard master mold and polydimethylsiloxane (PDMS). In the preparation of metallic powder premix for the green components without any defect, 90 wt.% 17-4PH stainless steel nanopowders and 10 wt.% organic binder were mixed by a ball milling process. The green components with very clear gear shape were formed by filling the powder premix into the PDMS soft mold in surrounding at about 100°C. Cold isostatic pressing (CIP) was very potent process to decrease a porosity in the sintered microcomponent. The microgear fabricated by the improved process showed a good dimension tolerance of about 1.2%.

**Keywords** : Soft mold, Nanopowder, Microcomponent, Process

## 1. 서 론

기계 산업 기술의 발달로 인해 정보 통신기기를 포함한 다양한 제품들이 소형화되고 있으며, 소형화된 제품은 더욱 작고, 정밀한 부품을 필요하게 되었다. 마이크로 전자기계시스템(microelectromechanical system; MEMS) 등에 사용되는 기계류 부품은 마이크로미터 단위의 초소형 정밀 구조물 형태로 제조되어야 하므로 최근에는 이와 관련된 마이크로시스템기술(microsystem technology; MST)에 대한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다<sup>1-5)</sup>.

3차원 형상의 금속 미세부품 (micro-component) 제조를 위해 사용되는 대표적인 기술로는 LIGA (lithographie, galvanoformung, abformung)<sup>1)</sup> 전해주조(electroforming)<sup>2)</sup>, 마이크로 캐스팅(micro investment casting)<sup>3)</sup>, 마이크로 분말사출성형(micro powder

injection molding)<sup>4)</sup> 등이 있다. 이중 마이크로 사출 성형기술은 타 기술에 비해 공정비용면에서 경제적이며, 기술 대상 재료가 금속으로 한정되어 있지 않다는 장점을 지녀 다양한 종류의 미세부품 제조에 주로 활용되고 있으나<sup>5)</sup> 마이크로 사출성형기술 역시 물리적 이형공정에서 미세부품의 손상이 쉽게 일어날 수 있고, 미세하고 복잡한 부품의 경우 금형제작이 용이하지 않은 문제점을 지니고 있다.

기존 공정기술의 한계를 극복하고 보다 간단한 공정을 통해 미세하고 정밀한 부품을 제조하기 위해 최근에는 고분자를 활용한 새로운 공정기술 개발에 많은 관심과 연구가 집중되고 있다. Kim *et al.*<sup>6)</sup> 과 Zhang *et al.*<sup>7)</sup>은 SU-8과 Polydimethylsiloxane(PDMS) 2종류의 고분자를 이용하여 미세부품 성형몰드를 제조하고 유기바인더 및 마이크로 분말 혼합용액을 PDMS 성형몰드에 충전-건조시키는 방법을 수차례

\*Corresponding Author : [Tel : +82-55-280-3532; E-mail : cjchoi@kmail.kimm.re.kr]

반복하여 미세부품을 성형, 소결하는 공정을 개발하였다. 고분자를 이용한 미세부품 성형몰드 제조기술은 기계적 가공기술의 한계로 미세부품 금형제작이 불가능하다는 기존 마이크로 사출성형기술의 문제점을 해결했다는 점에서는 커다란 의미를 둘 수 있으나, 유기바인더 및 분말 혼합용액을 성형몰드에 주입하여 용액 내에 존재하는 분말을 미세부품 성형몰드 내로 침전시켜 미세부품을 성형하는 방법은 오랜 공정시간이 소요되는 단점을 지니고 있다.

물리·화학적으로 우수한 특성을 지니는 나노분말을 이용하여 미세부품을 제조할 경우 마이크로 분말을 이용한 공정에 비해 소결온도가 낮아 성형부품의 소결공정에서 소모되는 에너지 절감이 가능할 뿐만 아니라, 제품의 기계적 특성 또한 우수하다. 본 연구에서는 plasma arc discharge(PAD) 공정<sup>8)</sup>에 의해 제조된 금속나노분말을 폴리머 몰드를 이용한 비가압 성형공정에 적용해 미세부품 제조를 위한 기초실험을 수행해 본 결과 마이크로 분말을 이용했을 때보다 부품 성형시간은 더욱 늘어나는 반면, 만들어진 성형체 내부에 많은 기공이 존재하여 성형체 일부가 쉽게 부서지는 문제가 발생했으며, 소결과정을 거치면서 치수정밀도가 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 금속나노분말을 이용하여 미세하고 정밀한 부품을 제조하기 위해 기존의 폴리머를 이용한 미세부품 제조 공정 중 나노분말과 유기바인더 혼합공정, 혼합분말을 이용한 미세부품 성형공정을 개선하였으며, 개선된 공정을 통해 제조된 직경 4 mm 이하의 미세기어를 제조하고 특성을 평가하였다.

## 2. 실험방법

나노분말을 이용한 기어형상의 미세부품 성형을 위

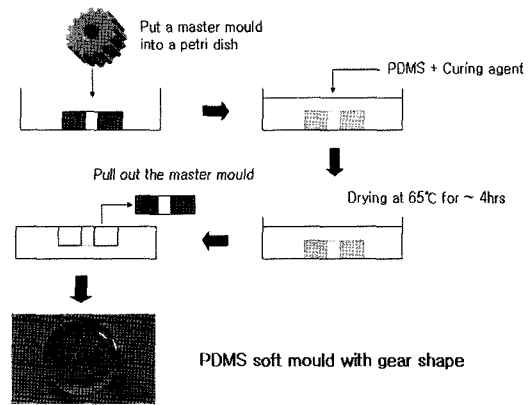


Fig. 1. Schematic diagrams of PDMS mold manufacturing.

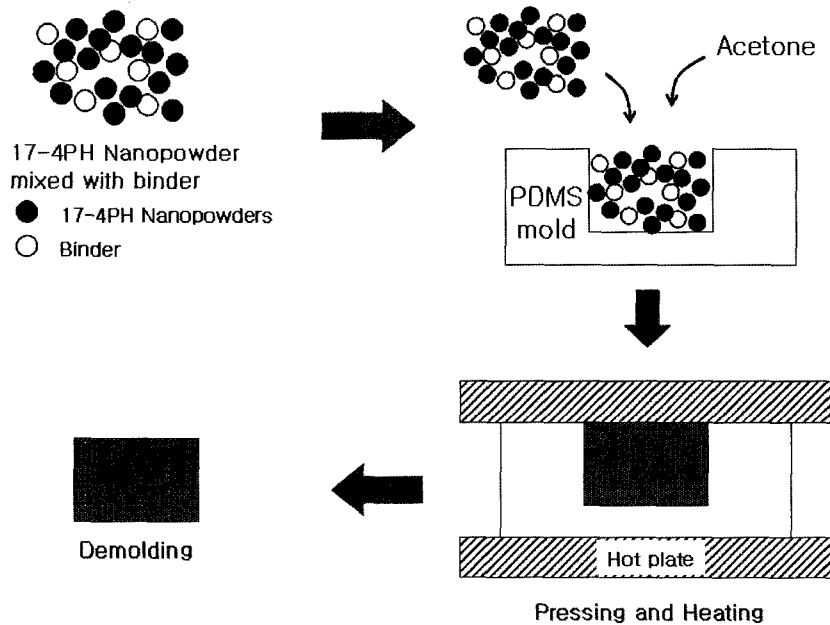


Fig. 2. Schematic of PDMS molding process.

해 그림 1과 같이 분말야금 공정 또는 SU-8 폴리머를 이용해 제조된 직경 4 mm 기어형상의 마스터 몰드를 petridish에 놓고 무게비 10:1로 혼합된 PDMS와 경화제를 채운 후 65°C의 건조로에서 약 4시간 동안 건조시킨 뒤 마스터 몰드를 제거하는 방법으로 PDMS 소프트 몰드를 제조하였다.

미세부품 제조를 위해 본 연구팀에서는 PAD 공정을 통해 제조한 약 70 nm의 평균입경을 지닌 구형 17-4PH 스테인리스 스틸 분말에 과립형의 유기바인더를 혼합하여 사용하였으며, 미세부품 성형은 그림 2와 같이 일정량의 혼합분말을 약 100°C로 가열된 hot plate 위에 놓인 PDMS 성형몰드에 채웠다. 성형틀에 채워진 혼합분말에 소량의 아세톤을 첨가하고 상부에서 PDMS 성형몰드의 변형이 일어나지 않을 정도의 약한 압력을 약 5분간 가한 후 성형몰드에서 형성된 성형체를 탈착하는 공정을 통해 이루어졌다.

나노분말에 첨가되는 유기 바인더의 양 및 혼합방법 그리고 완성된 성형체의 소결법은 미세 부품의 정밀도를 결정하는 중요한 인자로 작용한다. 그러므로

본 실험에서는 미세부품 성형을 위한 나노분말 및 유기바인더의 혼합조건 최적화를 위해 17-4PH 나노분말에 첨가되는 유기 바인더의 양을 5-20 wt.%로 조절하고 막자사발 및 밀링공정을 각각 이용하여 혼합분말을 제조한 후 위에서 언급한 성형공정을 통해 제조된 미세기어 성형체의 형상을 조사하였다.

최적의 혼합조건에 의해 제조된 혼합분말 미세부품의 내부 기공율을 최소화하고 치수 정밀도를 유지하기 위해 미세기어 성형체의 탈지공정 전 또는 후에 CIP(cold isostatic pressing) 공정을 수행하고 1250°C의 수소분위기에서 3시간 소결처리한 후 광학현미경을 통해 소결체 내부기공도를 관찰하였으며 치수정밀도를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 17-4PH 스테인리스 스틸 나노분말에 5, 8, 10, 20 wt.%의 유기바인더가 혼합된 분말을 이용하여 제조한 기어형상의 미세부품 성형체를 보여준다. 유기바인더의 함유량이 5, 8 wt.%인 혼합분말

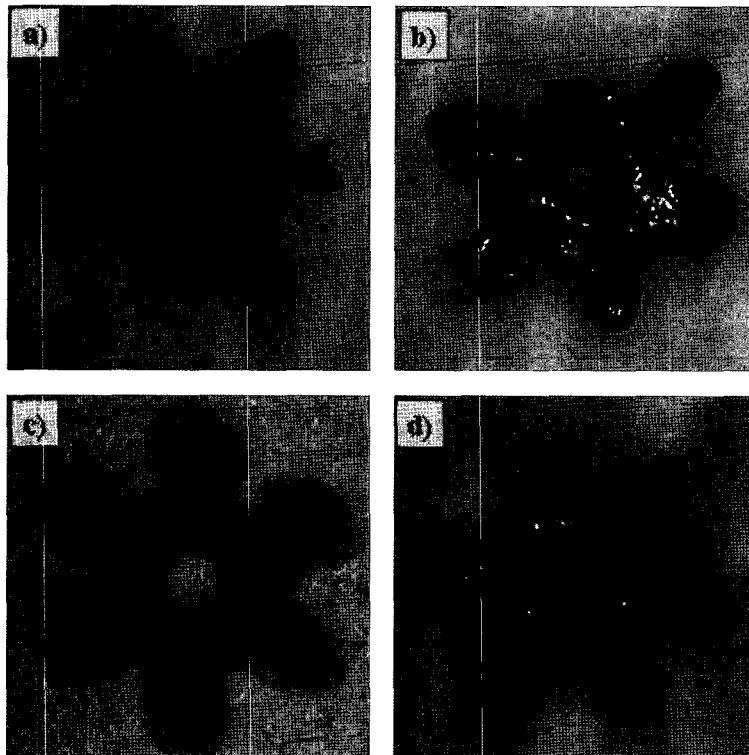


Fig. 3. OM images of green components with different binder wt.%. a) 5 wt.% b) 8wt.% c) 10 wt.% d) 20 wt.%

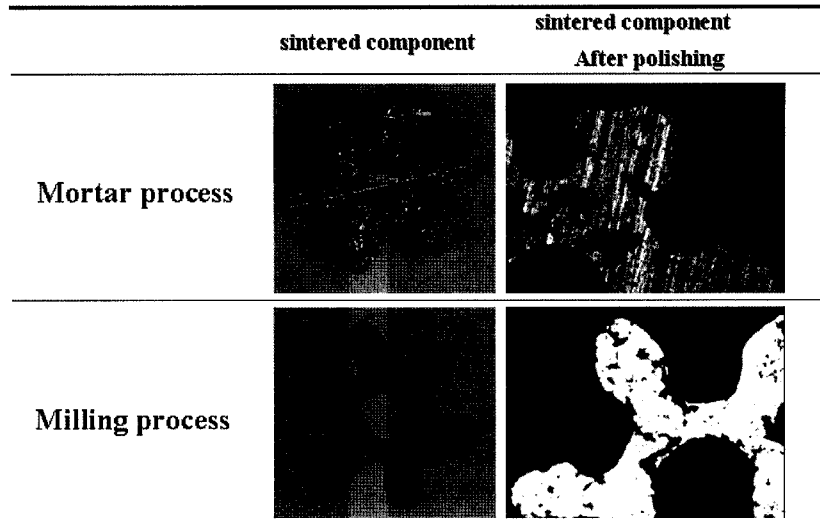


Fig. 4. OM image of different mixing process.

로 제조된 성형체의 경우 기어를 구성하는 톱니 중 일부가 손상되어 있었으며, 손상된 톱니부분의 PDMS 성형몰드에 원료분말이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 압력이 거의 가해지지 않는 성형공정의 특성상 혼합분말에 첨가된 바인더의 양이 충분하지 않았기 때문이라 판단되어 유기 바인더 첨가량을 10, 20 wt.%로 증가시켜 동일 실험을 수행하였다. 그림 3의 c)와 d)에서 보여주듯이 바인더 함유량이 10, 20 wt.%인 두 조건 모두에서 손상이 전혀 없는 깨끗한 미세기어 형상의 성형체를 얻을 수 있었으나, 유기 바인더의 양은 미세부품 소결체의 내부기공 발생 및 치수정밀도에 직접적인 영향을 줄 수 있어 본 연구에서는 미세부품의 형상을 유지할 수 있는 최소의 유기 바인더 첨가량인 10 wt.%가 적합하다고 판단하였다.

그림 4는 막자사발 및 볼밀링 공정으로 제조된 미세기어 소결체 형상과 광학현미경으로 관찰된 소결체 내부기공을 보여준다. 소결체의 형상은 두가지 혼합분말로 제조된 성형체 모두 손상이 없는 깨끗한 기어형상을 보였으나, 소결체 내부 기공은 막자사발에 의해 혼합된 분말 소결체(Mortar process)의 경우 커다란 기공이 소결체 특정부위에 편중되어 있는 반면, 밀링공정에 의해 혼합된 분말 소결체(Milling process)의 경우 비교적 작은 기공이 소결체 내부에 고르게 분포되어 있었다. 혼합분말 제조에 사용된 유기바인더는 약 0.5-1.0 mm 크기의 과립상태로 존재하므로

혼합과정을 통해 미세하게 분쇄되지 않고 분말의 혼합이 적절하게 이루어지지 않을 경우 미세부품 성형시 특정부위에 유기바인더가 편중되어 소결과정을 거친 미세부품 소결체 내부 특정부위에 기공이 편중되어 형성될 수 있다. 이러한 편을 고려할 때 미세부품 제조를 위한 혼합분말제조에는 볼밀링 공정이 막자사발을 통한 공정보다 더욱 효과적이었음을 알 수 있었다. 밀링공정을 통해 제조된 혼합분말 소결체 내부에 존재하는 기공은 비교적 크기가 작고 고르게 분포되어 있지만 미세부품의 기계적 특성과 치수정밀도에 적지 않은 영향을 줄 수 있어 미세부품 소결체의 내부기공율을 최소화하기 위해 혼합분말로 제조된 성형체의 유기바인더 탈지공정 전 및 후에 2.0 ton의 CIP 공정을 수행한 후 열처리된 소결체 내부의 기공을 관찰하였다.

그림 5는 탈지공정 전과 후에 CIP 공정을 수행하고 소결처리된 미세부품의 표면을 보여주는 결과로 CIP 공정을 거치지 않은 미세기어 소결체에 비해 기공의 수와 크기가 감소한 것을 볼 수 있으며, 특히 탈지과정을 거친 후 CIP 공정이 수행된 소결체의 경우 광학현미경뿐만 아니라 고배율의 전자현미경 관찰에서도 기공이 관찰되지 않았다. 이러한 결과를 통해 CIP 공정이 본 연구에서 사용된 미세부품 제조공정에서 소결체의 기공을 제거하는데 매우 효과적임을 알 수 있었으나, CIP 공정 중 가해지는 압력은

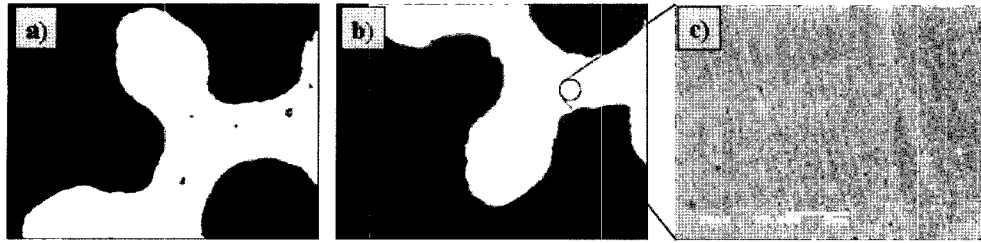


Fig. 5. OM and SEM image of different condition by CIP process. a) CIP before burn-out b) CIP after burn-out c) SEM image of CIP after burn-out

Table 1. Shrinkage rate and gear standard deviation of micro gear teeth.

Process	Sample	AVG <sup>1)</sup> [mm]	STD <sup>2)</sup> [mm]	DT <sup>3)</sup> %
No CIP	GC <sup>4)</sup>	0.722	0.0023	0.32
	SM <sup>5)</sup>	0.501	0.0060	1.21
CIP before burn-out	GC	0.710	0.0025	0.35
	SM	0.524	0.0057	1.10
CIP after burn-out	GC	0.686	0.0037	0.53
	SM	0.531	0.0063	1.18

<sup>1)</sup>AVG: Average

<sup>2)</sup>STD: Standard deviation

<sup>3)</sup>DT: Dimensional tolerance

<sup>4)</sup>GC: Green component

<sup>5)</sup>SM: Sintered material

미세부품의 치수정밀도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 각각의 조건에서 제조된 미세기어 성형체 및 소결체를 구성하는 6개의 톱니 폭을 측정하여 상대 치수정밀도를 구하였고, 그 결과를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 성형체와 소결체는 CIP 공정과 상관없이 각각 0.5% 내외 그리고 1.2% 내외의 상대 치수정밀도를 보였다. 이러한 결과는 정밀부품 제조에 주로 사용되는 분말사출성형공정의 상대 치수정밀도인 0.3% 내외에는 미치지 못했으나, 정밀도 측정 대상이었던 미세기어 소결체의 평균 톱니 폭이 약 0.5 mm인 점을 고려할 때 약 0.006 mm의 평균 치수오차를 의미하는 상대 치수정밀도 1.2%는 미세부품 제조 공정에 있어 비교적 양호한 치수 정밀도임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존의 폴리머 이용한 미세부품 제

조 공정 중 나노분말과 유기바인더 혼합방법 및 혼합분말을 이용한 미세부품 성형공정을 개선하였으며, 실험을 통해 최적화된 나노분말 혼합과정 및 미세부품 제조공정은 다음과 같다.

1) 17-4PH 스테인리스 스틸 나노분말에 첨가되는 유기 바인더의 양이 10 wt.% 이상으로 유지될 때 손상이 없는 깨끗한 미세부품 성형체를 얻을 수 있었다.

2) 볼밀링 공정에 의해 제조된 혼합분말을 미세부품 제조에 사용할 경우 미세화된 유기바인더가 성형체 내부에 고르게 분포되어 미세부품 내부의 기공발생을 최소화할 수 있었다.

3) CIP 공정은 성형체내의 미세 유기바인더에 의해 형성되는 미세부품 소결체내의 기공을 제거하는 데 매우 효과적이었으며, 특히 탈지공정 후 수행한 CIP 공정은 소결체 내의 기공을 거의 완벽히 제거하였다.

4) 본 연구에서 개발된 미세부품 제조공정에 의해 제조된 미세기어 형상의 소결체는 1.2% 내외의 비교적 양호한 상대 치수정밀도를 보였다.

이러한 결과들을 고려할 때 본 연구에서 개발된 폴리머 몰드를 이용한 금속 나노분말 미세부품 제조공정은 기존의 미세부품 제조공정에 비해 경제적이고 간편한 방법으로 1% 내외의 상대 치수정밀도를 지닌 미세부품을 제조하는 데 매우 유용하게 사용될 수 있으리라 기대되며, 추후에는 개발된 공정을 이용하여 지름 1 mm 이하의 MEMS용 초미세 기어 제조를 위한 연구를 수행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업인 '나노소재기술개발사업단'의 지원(과제번호 : 07K1501-00310)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

1. H. S. Cho, K. J. Hemker, K. Lian, J. Goettert, and G. Dirras: *Sens. Actuators A: Phys.*, **103** (2003) 59.
2. S. H. Hong, J. H. Lee, H. Lee: *Microelectronic Engineering.*, **84** (2007) 977-979.
3. G. Baumeister, K. Mueller, R. Ruprecht, and J. Hausselt: *Microsystem Technologies.*, **8** (2002) 105.
4. S. Supriadi, E. R. Baek, C. J. Choi. B.T. Lee: *Journal of Materials Processing Technology.*, **187-188** (2007) 270-273.
5. S. W. Kim, J. H. Yang, S. S. Park, Y. D. Kim, I. H. Moon: *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute.*, **4** (2002) 267-272.
6. J. S. Kim, K. Jiang, and I. Chang: *Advanced Engineering Materials.*, **1-2** (2006) 38-41.
7. D. Zhang, B. Su, Tim. W. Button: *Journal of the European Ceramic Society.*, **27** (2007) 645-650.
8. W. Y Park, C. S. Youn, J. H. Yu, Y. W. Oh, C. J. Choi: *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute.*, **6** (2004) 510-514.