

마이크로 금속분말사출성형 기술

김순욱 · 류성수* · 백응률**
 (주)하이닉스반도체 시스템IC 연구소
 *(주)삼성전기 전자소자사업부
 **영남대학교 재료금속공학부

Micro Metal Powder Injection Molding Technology

Soon-Wook Kim, Sung-Soo Ryu*, Eung-Ryul Baek**

System IC R&D Center, Hynix Semiconductor Inc., Cheongju 361-725, Korea

*Passive Component Team, Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd, Suwon 443-743, Korea

**School of Metallurgy and Materials Engineering, Yeungnam University, 214-1 Dae-dong, Kyongsan, Kyongbuk 712-749, Korea

1. 서 론

통상적인 금속분말의 성형은 분말야금 공정으로 이루어지기 때문에 복잡한 형상의 부품을 구현하는 데는 제약이 있다. 하지만, 1970년대 후반 이래 새로운 금속분말의 성형기술로 크게 각광을 받으며 연구되고 있는 금속분말사출성형(Metal Powder Injection Molding, MIM) 기술을 이용하면 다양한 형태의 부품을 성형할 수 있다. 최근에는 이러한 MIM 기술을 이용하여 다양한 산업분야에 응용될 수 있는 마이크로 부품을 제조하고자 하는 연구개발이 주목받고 있다.¹⁾

현재까지는 마이크로 부품을 제조하는 원천기술이 반도체 공정기술이나 마이크로 기계가공기술에 크게 의존하고 있다.^{2,3)} 특히, 경제적 효율성이라는 관점에서 수 마이크로 이하의 극미세 구조물은 반도체 공정기술을 이용하여 성형하는 것이 유리하며, 1mm의 치수를 갖는 미세 구조물은 마이크로 기계가공기술로 제조하는 것이 적합하다(그림 1). 하지만, 수십 마이크로에서 수백 마이크로의 치수를 갖는 구조물 제조에 있어서 앞선 두 공정기술은 응용 재료의 종류와 복잡한 형상의 대량생산에 한계가 있다. 비록 반도체 공정기술에서 박막 증착과 전기화학적 도금기술을 이용한 표면미세가공 기술에 의해 수십 마이크로 이내의 치수를 갖는 미세 구조물을 정밀하게 성형하지만,^{4,5)} 수백 마이크로 크기의 치수를 반도체 공정기술로 구현하기는 곤란하다. 또한, 마이크로 기

계가공기술도 높은 가공 정밀도를 유지하며 수백 마이크로 크기의 구조물을 가공할 수 있지만 복잡한 모양의 형태를 대량생산하기에는 적합하지 않다.

이러한 문제의 해결방안으로 마이크로 MIM 기술이 최근 주목받고 있다. 마이크로 MIM 기술은 금속분말을 마이크로 단위의 치수를 갖는 3차원 형태의 부품으로 성형할 수 있는 기술이다. 마이크로 MIM은 기존 MIM과 마찬가지로 금속분말과 결합제의 혼합, 마이크로 몰드를 이용한 성형과 이형(離型, demolding), 마이크로, 마이크로 성형체의 결합체 제

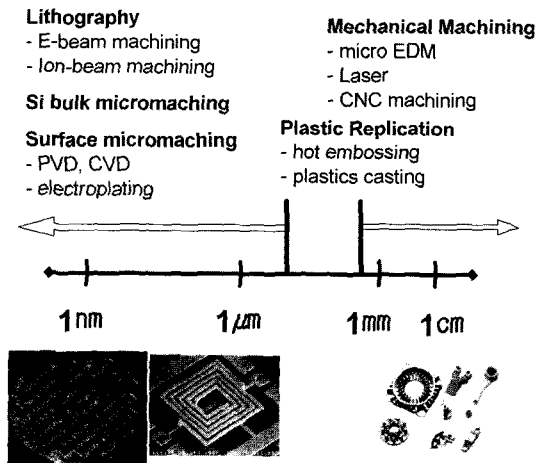


Fig. 1. Microfabrication technology according to product linear size.

거, 조밀화 등의 네가지 공정으로 이루어진다. 그러나, 마이크로 MIM의 각 공정은 성형체 내부 치수가 수 마이크로미터로 작아지는 것을 감안하여 적절이 조절되거나 새로운 응용 공정을 도입하여야 한다. 무엇보다도 마이크로 MIM을 위해서는 마이크로 구조를 갖는 몰드 인서트(mold insert)의 제작과 이 마이크로 금형에 적합한 금속분말사출성형 공정을 확립하는 것이 중요하다. 본고에서는 마이크로 MIM에 필수적인 마이크로 몰드 인서트 제작방법과 그 제조공정의 특성 및 향후 응용발전 전망에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 마이크로 몰드 인서트의 제작

마이크로 MIM 공정을 구현하기 위해서는 근본적으로 마이크로 구조물을 갖는 몰드 인서트가 요구된다. 금형의 미세 구조물 크기가 마이크로 단위로 매우 미세하기 때문에 기존의 금형 공구 제작 방법으로 마이크로 몰드 인서트를 만드는 것은 매우 어렵다. 그래서, Si 에칭기술,⁶⁾ 마이크로 레이저 가공기술,⁷⁾ LIGA(Lithographic Galvanofarming Abfarmung) 공정기술⁸⁾ 등이 마이크로 몰드 인서트의 가공기술로 소개되고 있다.

먼저, 고종횡비(high aspect ratio)를 갖는 Si 마이크로 몰드 인서트는 기존의 반도체 공정기술에 기반을 둔 Si 에칭기술로 제조된다. 이 공정의 이점은 노하우가 잘 정립된 Si 몸체 미세가공기술을 이용한다는 것으로 경우에 따라 박막증착이나 전기화학적 도금으로 미세성형을 할 수도 있다. 수십 마이크로 이내의 크기에서 Si 몰드 인서트는 유용한 결과를 보여주고 있으나, 복잡한 모양이나 미세 구조물의 벽면 기울기가 음의 값을 가질 때는 충전된 나노금속분말의 이형이 불가능한 문제점이 있다. 한편, 레이저 가공기술로 제조되는 마이크로 몰드 인서트는 그 모양의 설계에 있어 제한이 따르지만, 금형 공구강으로 제조될 때 우수한 내마모성과 내구성을 나타낸다. 마이크로 몰드 인서트 가공에 널리 활용되려면, 레이저 가공기술은 구현 가능한 미세 구조물의 최소 치수, 고종횡비 및 표면 조도 등의 문제점을 개선하여야 한다.

싱크로트론 방사광을 이용하여 상대적으로 두꺼운 X-ray 감광재를 필요한 패턴으로 노광, 현상한 후 전해주조, 몰딩을 통해 마이크로 성형을 하는 LIGA

공정기술(그림 2)에서 얻어지는 마이크로 몰드 인서트는 두 가지 종류로 분류될 수 있다. 전해주조로 얻어지는 마이크로 금속몰드 인서트와 이를 이용하여 사출성형된 플라스틱 몰드 인서트이다. 전자의 경우는 실제 마이크로 부품을 제조하기 위한 금속몰드 인서트이지만, 후자의 경우는 일반적인 몰드 인서트의 개념과 다르게 단 한번밖에 사용되지 못하는 몰드 인서트로써 희생몰드(sacrificial mold or lost mold)라고도 불리어진다.⁹⁾

이상에서 마이크로 MIM을 위해서 필연적으로 요구되는 마이크로 몰드 인서트의 제조기술에 관하여 간략히 살펴보았다. 다양한 응용분야에 마이크로 MIM 기술을 적용하기 위해서는 가장 적합한 마이크로 몰드 인서트를 선택하여야 한다.

3. 제조공정 기술

3.1. 금속분말과 결합제의 혼합 공정

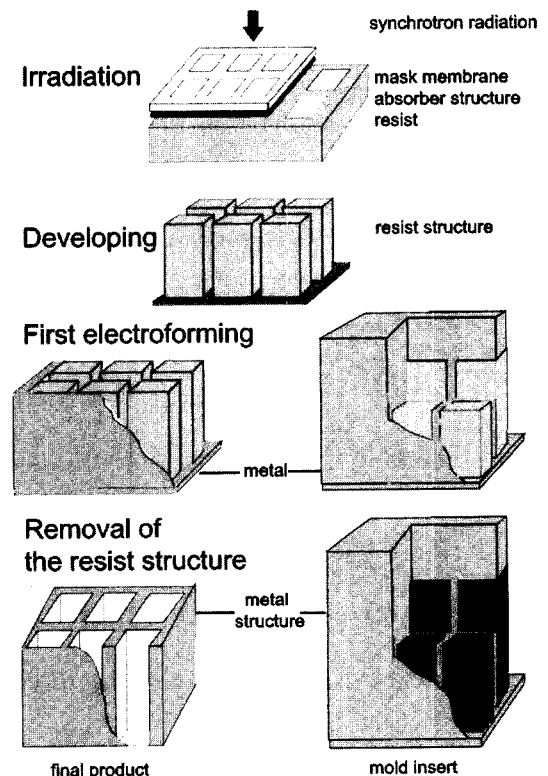
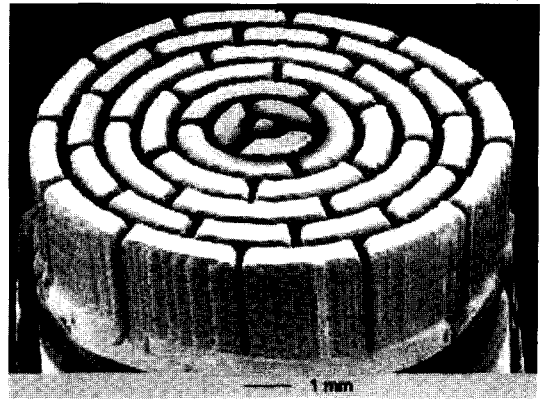


Fig. 2. Basic LIGA technique process steps x-ray deep-etch lithography and electroforming.

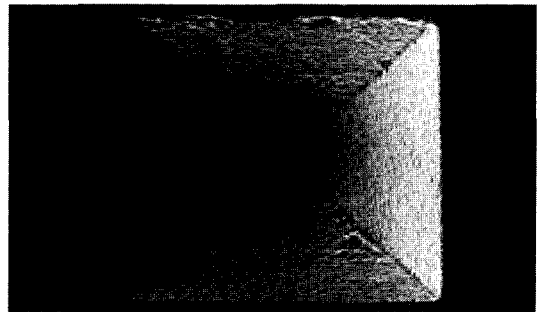
마이크로 MIM을 위한 원료분말은 마이크로 구조물의 크기가 수 마이크로미터 이내이기 때문에 매우 균질도가 우수함과 더불어 최소 구조물의 치수보다 10배 이상 작은 입자크기를 가져야 한다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 또한, 원료분말의 크기는 미세 구조물의 최소 크기뿐만 아니라 고종횡비에도 영향을 준다. 그림 3은 다양한 철분말의 크기에 따라 구현 가능한 고종횡비를 구조물의 종류 별로 나타낸 Rota의 연구결과이다.¹¹⁾ 마이크로 구조물의 모양에 관계없이 명확한 사실은 분말의 평균입도가 작을수록 더 높은 고종횡비를 구현할 수 있다는 것이다. 원료분말의 크기에 따라 마이크로 구조물의 최소 크기에 충전되는 분말의 개수가 결정되기 때문에 실제적 응용에 있어서 원료분말은 크기가 미세하면 할수록 더 좋을 것이다. 즉, 수 마이크로 크기보다는 나노크기의 분말이 마이크로 MIM에 더 적합할 것이다.

이러한 의미에서 마이크로 분말사출성형은 금속분말보다는 세라믹분말을 이용한 연구가 더 활발히 진행되었다.¹²⁻¹⁵⁾ 즉, 세라믹분말은 나노크기로 제조 및 합성하는 것이 상대적으로 금속분말보다 용이할 뿐만 아니라, 취급 시에도 폭발성이나 산화 등과 같은 문제가 거의 없기 때문에 이를 이용한 마이크로 부품의 성형에 관한 많은 관심과 연구가 있었다. 그림 4는 다양한 종류의 세라믹분말을 이용한 마이크로 분말사출성형체의 실험상을 나타내는 것이다.¹⁶⁾

나노금속분말은 화학적으로 안정한 세라믹분말과 다르게, 취급시 산화와 같은 오염문제가 있다. 특히, 나노금속분말과 결합체의 혼합은 결합체 용점 이상



(a)



(b)

Fig. 4. Various ceramic micro component prepared by micro powder injection molding; (a) PZT transducer, and (b) ZrO₂ micro nozzle.

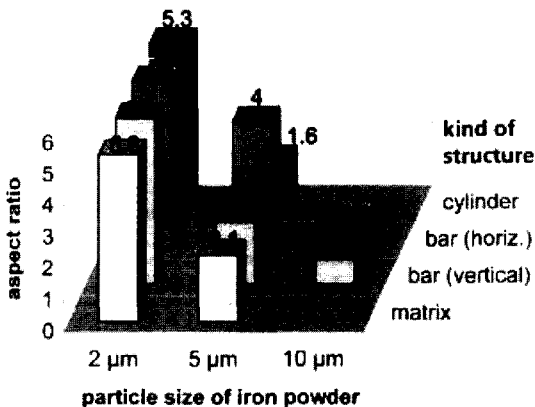


Fig. 3. Attainable aspect ratio for different iron powders with varying particle size.

인 100-150°C에서 이루어지기 때문에 대기 중에서 혼합공정은 나노금속분말의 버닝(burning)과 산화를 초래한다. 따라서 나노금속분말과 결합체의 혼합은 불활성 분위기로 제어가 가능한 혼합기나 글로브 박스 내에서 진행되어야 한다. 다시 말해 나노금속분말을 마이크로 MIM에 응용하기 위해서는 원료분말의 제조 및 합성뿐만 아니라 결합체와 혼합과정까지 불활성 분위기에서 일련의 연속공정으로 진행할 수 있는 기술 개발이 필수적이다. 한편, 최종 응용단계의 마이크로 성형체에서 단일성분이 아닌 복합성분의 특성이 요구될 때는 마이크로 MIM을 위한 나노복합분말이 수십 나노이하에서 매우 균일한 혼합도를 유지하여야 한다. 분말과 결합체의 혼합도도 중요하지만, 복합성분일 경우에는 마이크로 단위의 구조물을 구성하는 나노복합분말 자체의 혼합도가 우선적으로 해

결되어야 할 사항이다.

3.2. 마이크로 사출성형과 이형 공정

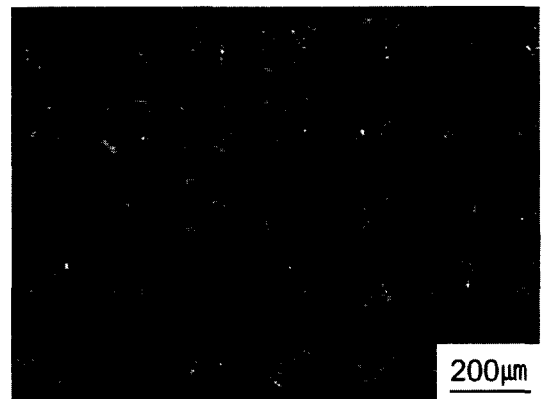
마이크로 몰드 인서트는 매우 큰 표면적을 갖고 있을 뿐만 아니라, 제조상의 특수성으로 인하여 금형의 분리선(parting line)이나 벤트(vent) 부분이 없기 때문에 장입재료의 완전 충전에 관한 문제가 대두된다. 또한, 표면적 증가의 영향으로 마이크로 몰드 인서트와 장입재료의 마찰력이 커지기 때문에 장입재료가 마이크로 몰드 인서트에 달라붙어 마이크로 성형체의 이형이 곤란한 경우도 발생할 수 있다. 이와 같이 마이크로 사출성형 공정은 장입재료의 완전 충전과 더불어 이형 공정의 문제도 함께 고려해야 한다. 이러한 관점에서 영구적으로 사용하는 마이크로 금속몰드 인서트보다는 용매로 쉽게 이형할 수 있는 플라스틱 희생몰드를 이용한 마이크로 MIM이 더 많은 이점을 가진다.

우선, 사출성형으로 높은 고중량비를 갖는 복잡한 형상의 미세 극소형 구조물 내부를 장입재료로 완전히 충전시키기 위해서는 마이크로 희생몰드의 특성을 잘 이해하여야 한다. 마이크로 희생몰드는 매우 큰 표면적을 갖고 있을 뿐만 아니라, 제조상의 특성으로 인하여 분리선이나 벤트 부분이 없기 때문에 소위 “blind hole” 형태의 몰드로 명명된다.^{12,17)} 즉, 사출성형과정에서 높은 마찰력과 각주 몰드 끝부분에 갇힌 공기에 의해서 불완전한 충전이 일어날 수 있다.¹⁸⁾ 이러한 마이크로 몰드의 완전 충전을 위해서는 진공사출성형 공정의 도입이 요구된다. 그림 5는 진공사출성형에 따른 마이크로 구조물의 충전 특성의 향상을 나타내는 것이다.¹⁹⁾ 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 일반 사출성형에서는 장입재료가 국부적으로 마이크로 구조물 가장자리에는 완전히 충전되지 못했으나, 진공사출성형 후에는 그림 5(b)와 같이 완전 충전됨을 알 수 있다.

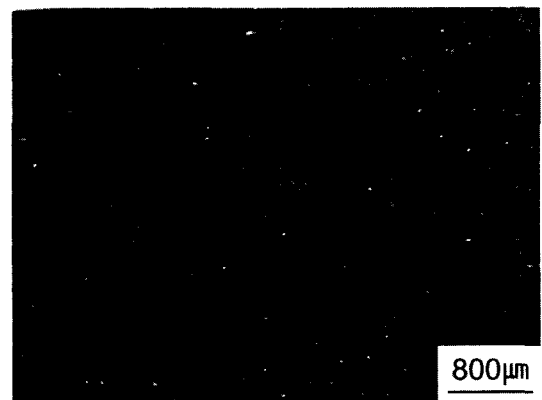
마이크로 MIM에서 성형체의 이형공정은 기계적 이형, 열적 이형, 화학적 이형의 3가지 형태로 분류될 수 있다.¹⁵⁾ 기계적 이형은 마이크로 몰드 인서트를 재사용할 수 있는 이점을 가지고 있다. 그러나 마이크로 구조물에 손상을 주지 않고 몰드 인서트를 물리적으로 분리하여 성형체를 얻는 것은 상당히 어렵다. 실제로 구조물의 고중량비가 증가하면 접촉 계면적이 급격히 증가하여 몰드 인서트와 사출성형체가

서로 물리적 영향을 미치지 않고 기계적으로 이형되는 것은 매우 어렵다. 반면에 몰드 인서트가 플라스틱 희생몰드로 용매에 녹여 내거나 고온에서 열분해하여 제거할 수 있다면, 결함이 적은 마이크로 구조물을 쉽게 얻을 수 있을 것이다.

이때 플라스틱 희생몰드는 용매에 용해되어 완전히 제거될 뿐만 아니라 사출성형 공정에 가해지는 압력과 온도에서도 견딜 수 있어야 한다. 표 1은 희생몰드로 널리 사용되는 PMMA의 물성을 나타내는 것이다.⁹⁾ PMMA 희생몰드는 장입재료를 사출하기 위해서 주어지는 압력과 온도 조건 아래에서 충분한 견딜 수 있는 강도와 열변형에 대한 저항성을 갖는다. 또한, 희생몰드를 완전히 녹여낼 수 있는 적절한



(a)



(b)

Fig. 5. Effect of vacuum injection molding process on the feedstock filling characteristics; (a) locally unfilled micro component and (b) completely filled micro component.

Table 1. Property of polymethylmethacrylate(PMMA) plastics.

	PMMA
tensile strength (MPa)	47-77
hardness (Rockwell)	M85-105
heat conductivity(Wm-1°C-1)	0.50
thermal expansion(×10-5°C-1)	5.0-9.0
heat resistance (continuous)(°C)	60-93
solvent	acetone or chloroform

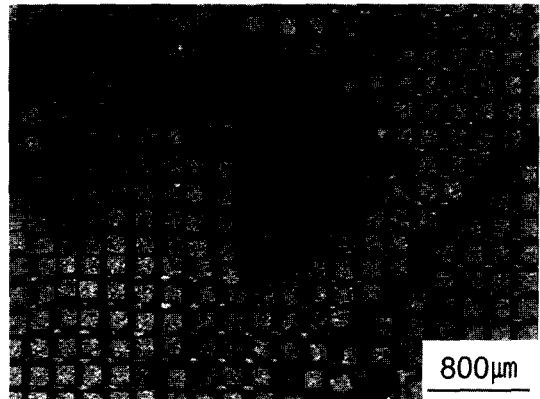
Source: After J. Agranoff, Modern Plastics encyclopedia, McGraw-Hill, 1989.

용매가 존재하고, 이 용매는 결합제 성분에 대해 용해도가 없어야 한다.

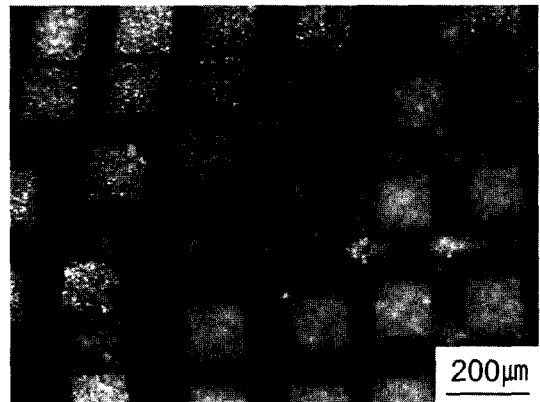
3.3. 마이크로 사출성형체의 결합제 제거 공정

마이크로 사출성형체는 크기는 작고 표면적은 넓기 때문에 짧은 시간에 결합제가 제거될 수 있다. 하지만, 나노금속분말은 입자들 사이의 분자간력(van der Waals force)이 조대한 분말에 비해 크게 작용하기 때문에 쉽게 응집되어, 결합제 제거 공정에 적합한 기공구조를 형성하지 못하며 상대적으로 긴 기공채널 경로를 갖는다. 이러한 나노금속분말 사출성형체의 불균일한 기공분포와 긴 기공채널은 결합제 제거 공정시간을 지연시키고, 경우에 따라서 결합제 제거 공정에서 결합을 발생시킬 수 있다. 즉, 나노금속분말로 구현된 마이크로 사출성형체에서 결합제 제거 공정은 매우 중요한 공정 단계이다.

일반적으로 사출성형체의 결합제 제거 공정은 결합제의 다성분을 고려하여 설계된다. 낮은 점도의 결합제와 골격체를 형성하는 결합제에 각각 적합한 공정을 도입한다. 낮은 점도의 왁스류 결합제의 경우는 모세관 현상을 이용한 wicking 방법이나 용매를 이용한 용매추출 방법이 적용되고, 골격체를 형성하는 결합제의 경우는 잔류 결합제와 함께 제거하기 위하여 열분해(thermal decomposition) 방법이 사용된다. 여기서, 왁스류 결합제를 모세관 현상에 의해서 제거시키는 wicking 방법은 마이크로 사출성형체의 결합제 제거 공정에 적합하지 않다. 왜냐하면, wicking 분말에 의한 시편 표면의 오염과 마이크로 단위의 구조물 사이의 공간에 wicking 분말을 균일하게 충전하는 것이 상당히 어려우며, 그 과정에서 마이크로 구조물의 파손이 있을 수도 있기 때문이다. 따라서,



(a)



(b)

Figure 6. Defect of micro column array debound in the n-octane at the temperature of 30°C during the initial thermal debinding stage; (a) low magnification and (b) high magnification.

마이크로 사출성형체의 결합제 제거 공정은 다성분 결합제의 완전한 제거와 더불어 마이크로 구조물의 형태 안정성도 유지하기 위해서는 용매추출과 열분해의 2단계 결합제 제거 공정이 적합하다.

한편, 개별 마이크로 구조물로 사출성형되는 것이 아니라 보조물(substrate or auxiliary structure)과 함께 사출되는 마이크로 사출성형체의 경우에는 보조물의 결합제 제거 거동도 고려되어야 한다. 그림 6은 기계적 합금화한 W-30wt%Cu 복합분말로 마이크로 사출성형된 마이크로 각주를 옥탄(octane)에서 용매 추출한 후 열분해 초기 과정에 그 형상을 관찰한 것이다.¹⁹⁾ 그림에서 보는 바와 같이 마이크로 각주 배열에서 부풀음과 균열이 발생하였다. 좀 더 확대해서

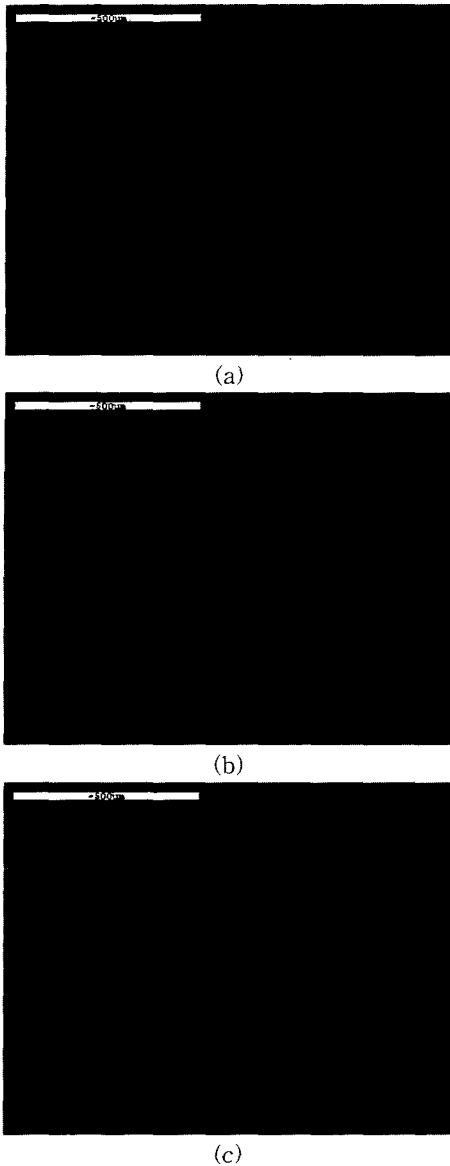


Fig. 7. SEM micrographs of W-30wt%Cu micro component sintered for 0 h in the hydrogen atmosphere; (a) at 1050°C, (b) 1085°C and (c) 1100°C.

관찰한 그림 6(b)를 보면 개별 마이크로 각주에는 결합이 없는 것을 알 수 있다. 즉, 부풀음과 균열 같은 결합이 마이크로 각주에서 생기는 것이 아니라 이들을 지지하는 보조물에서 생기는 것이었다. 이와 같이 마이크로 사출성형체에서 성공적으로 결합제를 제거하기 위해서는 마이크로 구조물과 이를 지지하는 보

조물의 결합제 제거가 함께 고려되어야 한다.

3.4. 마이크로 성형체의 소결 공정

Olevsky는 중력 효과에 의해서 고상소결 단계에서 이방성 수축(anisotropic shrinkage)이 일어나고 액상소결 단계에서는 형태의 뒤틀림이 발생한다고 보고하였다.^{20,21)} 이와 같이 소결과정에 발생하는 수축 이방성이나 형태 뒤틀림은 시편의 크기가 마이크로 단위로 작아지면 매우 중요한 변수가 된다. 통상적인 소결 제품은 0.1 mm(100 µm)의 허용범위 안에서 수축 이방성이나 형태 뒤틀림을 제어하면 된다. 하지만, 이러한 허용공차가 시편의 크기와 유사한 마이크로 구조물은 수축거동을 수 마이크로 이하의 단위에서 제어하여야 한다.

특히 액상소결 기구로 사출성형체의 조밀화가 이루어지는 경우에는 액상이 시편 표면으로 흘러나오는 현상도 제어해야 한다. 액상소결 과정에서 성형체 표면으로 액상이 흘러나오는(exuding) 현상은 고상입장에 대한 액상의 젖음성(wettability)과 이면각(dihedral angle)에 의존한다.²²⁾ 표면으로 스며져 나오는 액상은 매크로한 소결 제품에서 표면조도를 나쁘게 하지만, 마이크로 부품에서 이러한 액상은 표면조도가 아니라 마이크로 구조물의 형태 안전성에 치명적인 영향을 미친다. 그림 7은 기계적 합금화한 분말로 제조된 W-30wt%Cu 마이크로 각주 구조물을 소결온도 1050°C, 1085°C와 1100°C까지 각각 승온 후 냉각한 시편의 형상을 SEM으로 관찰한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최종 소결온도가 Cu의 액상 온도 이상인 1085°C이면 Cu가 마이크로 각주 사이로 빠져나오며, 최종 소결온도가 1100°C일 경우에는 마이크로 각주 대부분이 Cu로 묻혀 버려 그 형상을 알아볼 수가 없다.

4. 마이크로 MIM 기술의 전망

현재까지는 마이크로 부품을 제조하는 원천기술이 top-down 접근방식의 반도체 박막기술(특히, 리소그래피(lithography)와 에칭기술)로 제한되어 있었다. 그러나 마이크로 MIM 기술을 확립한다면 bottom-up 접근방식으로 마이크로 부품을 제조할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것이다. 분말로 얻어지는 다양한 재료를 마이크로 MIM 기술에 응용하여, 가장 효율

성이 좋은 방식으로 마이크로 부품을 양산한다면, 마이크로 MIM 기술은 향후 우리나라의 산업을 짊어질 기술로 우뚝 서게 될 것이다.

특히, 첨단화되고 있는 다양한 산업분야의 요구, 즉 소형 경량화, 복잡 형상화, 고성능화 및 복합 기능화와 같은 요구기능을 동시에 충족시킬 수 있는 최적의 방안으로 마이크로 MIM 기술이 개발되어야 한다. 나노금속분말이 다기능성을 가질 수 있는 마이크로 부품 형태로 성형된다면, 높은 부가가치를 창출할 수 있는 기능성 마이크로 나노소재 부품이 될 수 있을 것이다. 이러한 나노분말의 성형 및 벌크화 기술 측면에서 향후 마이크로 MIM 기술은 큰 응용잠재력을 가질 것으로 기대된다.

참고문헌

1. R. Ruprecht, T. Gietzelt, K. Muller, V. Piotter, J. Hausselet: *Microsystem Techn.*, **8** (2002) 351.
2. 특허청: “2000 신기술동향조사 보고서-마이크로머신”, (2000).
3. 특허청: “2001 신기술동향조사 보고서-마이크로시스템 응용기술”, (2001).
4. Gregory T. A. Kovacs: *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, (1998).
5. H. Gerischer, C. W. Tobias(Eds.): *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, VCH, Weinheim, (1994).
6. M. Kohler: *Etching in Microsystem Technology*, Wiley-VCH, (1999).
7. N. Maluf: *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Artech House, Inc., (2000).
8. M. J. Madou: *Fundamentals fo Microfabrication*, CRC press, (2002).
9. R. H. Chen and C. L. Lan: *J. Microelectromechanical Sys.*, **10** (2001) 62.
10. Z. Y. Liu, N. H. Loh, S. B. Tor, K.A. Khor, Y. Murakoshi, and R. Maeda: *J. of Mater. Sci. Letters*, **20** (2000) 307.
11. A. Rota, T. V. Duong, T. Hartwig: *Microsystem Techn.*, **8** (2002) 323.
12. V. Piotter, T. Gietzelt, K. Plewa, R. Ruprecht, J. Hausselet: *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials-2001*, **4** (2001) 199.
13. H. J. Ritzhaupt-Kleissl, W. Bauer, E. Gunther, J. Laubersheimer, J. Haußelt: *Microsystem Techn.*, **2** (1996) 130.
14. W. Bauer, H.J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Haußelt: *Microsystem Techn.*, **4** (1998) 125.
15. W. Bauer, H.J. Ritzhaupt-Kleissl, J. Hausselet: *Ceramics Int.*, **25** (1999) 201.
16. V. Piotter, W. Bauer, T. Benzler, A. Emde: *Microsystem Techn.*, **7** (2001) 99.
17. V. Piotter, T. Gietzelt, L. Merz, R. Ruprecht, J. Hausselet: *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials-2002*, **10** (2002) 43.
18. 김순욱, 양주환, 박순섭, 김영도, 문인형: 한국분말야금학회지, **9** (2002) 267.
19. 김순욱: 한양대학교 박사학위논문, (2003).
20. E. A. Olevsky and R. M. German: *Acta Mater.*, **48** (2000) 1153.
21. E. A. Olevsky, R. M. German and A. Upadhyaya: *Acta Mater.*, **48** (2000) 1167.
22. R. M. German: *Sintering Theory and Practice*, John Wiley & Sons., (1996).