

Bi-Sn 합금을 이용한 3차원 미세 구조물의 제작기술 개발

정성일*·박선준**·임용관**·최재영**·정해도†

(2003년 12월 6일 접수, 2004년 3월 13일 심사완료)

Fabrication of Real 3D Shape Components Using Bi-Sn Alloys

Sungil Chung, Sunjoon Park, Yonggwon Im, Jaeyoung Choi and Haedo Jeong

Key Words: Microstereolithography(미세광조형), Silicone Rubber(실리콘 고무), Bi-Sn Alloys(Bi-Sn 합금), Microgear(미세기어)

Abstract

In this paper, new replication techniques for a metal microcomponent having a real 3D shape were introduced. Helical gear was selected as one of a real 3D microcomponents for this study. The helical gear, which was made of photo-curable resin, was fabricated as a master pattern by microstereolithography technology. Then, a silicone rubber mold was fabricated from the master pattern. Lastly, a final bismuth alloy pattern was transferred from the silicone rubber mold by the microcasting process. In this paper, the replication technique is described in detail from the master pattern to the final pattern with some investigation on factors related to the technique.

1. 서 론

현재까지의 대부분의 미세 구조물 제작 기술은 실리콘웨이퍼의 박막 가공 또는 후막 가공과 같은 반도체 공정에서 비롯되었다.^(1,2) 이들 공정들은 필연적으로 포토리소그래피(photolithography) 기술을 사용한다. 그러나 이 기술은 복잡한 3차원의 형상을 갖는 구조물의 제작에는 적용이 불가능하다. 그러므로 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 포토리소그래피 기술을 사용하지 않는 미세 구조물 제작에 관한 연구들이 활발히 이루어지고 있다.⁽³⁾

현재까지 높은 세장비(aspect ratio)를 갖는 미세

금속 구조물을 제작하는데 적용되고 있는 공정으로 리가 (LIGA) 기술을 들 수 있다. 그러나 LIGA 기술은 UV이나 X-ray를 이용해 패터닝하는 공정이기 때문에 복잡한 3차원 형상의 구조물을 제작하는 데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 미세광조형 (MSL, microstereolithography) 기술을 이용하여 마스터 패턴을 제작한 후 실리콘 고무형을 이용한 미세복제기술을 이용하여 복잡한 형상의 금속 재질의 3차원 구조물을 제작해보았다. 일반적인 캐속조형(rapid prototyping) 기술을 바탕으로 개발된 미세광조형기술은 1990년 초반에 개발되었다.⁽⁴⁾ 미세광조형기술은 Fig. 1에 나타난 적층 방법을 이용하기 때문에 복잡한 형상의 구조물을 하나의 공정으로 제작할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 현재까지 개발된 미세광조형기술은 적용 가능한 소재가 광경화성 수지에 제한된다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 미세광조형기술을 이용하여 광경화성 수지 패턴을 마스터 패턴으로 제작한 다음, 실리콘 고무를 이용한 미세복제기술을 이용하여 150℃의 용점을 갖는 Bi-Sn 합금(Bi-Sn alloys)으로 이루어진 최종 패턴을 제작하게 된다.

† 책임저자, 회원, 부산대학교정밀정형및금형가공연구소
E-mail: hdjeong@pusan.ac.kr
TEL: (051)510-2463 FAX: (051)518-8442

* LG 생산기술원 자동화기술그룹

** 부산대학교 정밀기계공학과

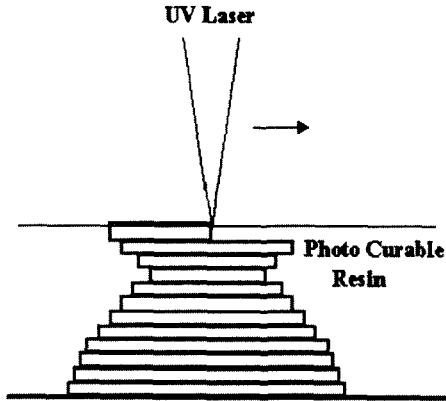


Fig. 1 Schematic diagram of microstereolithography process

본 논문에서는 복잡한 3차원 구조물의 한 예로 미세기어를 선정하였으며, 광조형기술을 이용한 마스터 패턴의 제작에서 시작하여 저융점 금속으로 이루어진 최종패턴의 제작까지의 공정을 소개하고, 그 특성을 평가해 보았다.

2. 마스터 패턴의 제작

본 연구에서 마스터 패턴의 제작에 사용된 미세광조형 기술은 기존의 광조형 기술을 그 근원으로 하고 있다. 즉, 광경화성 수지가 UV에 노출되어, 광개시제(photo-initiator)가 광경화성 수지 내부의 모노머(monomer)를 중합시키게 되면, 그 결과로 광경화성 수지가 경화되는 원리를 이용한다. Fig. 2에 본 연구에서 사용된 미세광조형 장비의 대략적인 개략도를 나타내었다. 광원으로는 아르곤 레이저 (Ar+ Laser, Spectra-Physics BeamLok 2065-4S)가 사용되었는데, 이 광원의 파장은 351.1nm이며 0.85mm의 Gaussian half-width 값을 갖는다. 이 레이저의 최대출력은 351.1nm의 파장에서 460 mW 이며, 그 출력은 함께 부착된 제어기에 의해 연속적으로 제어될 수 있다.

Fig. 3은 본 연구에서 제작되어진 미세 헬리컬 기어의 SEM 이미지를 나타내고 있으며, Table 1에 기어의 제작에 필요한 실험 조건을 나타내었다. 광경화성 수지로는 Vantico사에서 제조된 SL-5180 이라는 수지가 사용되었고, 레이저 출력은 100 mW, 레이저 빔의 스캔 속도는 10 mm/min

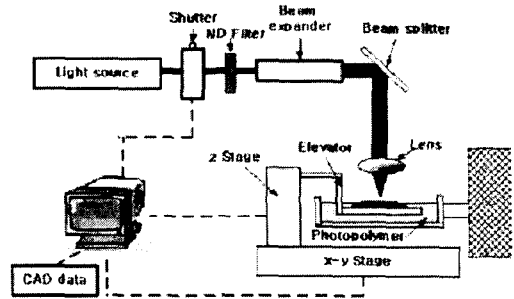
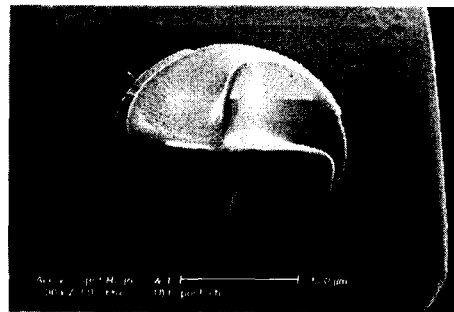
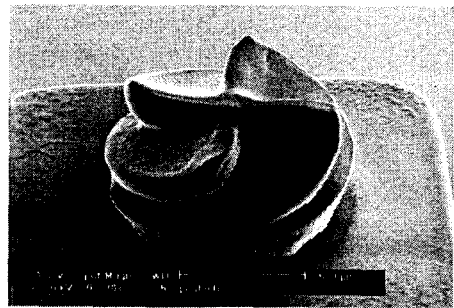


Fig. 2 Schematic illustration of the microstereolithography apparatus



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 3 SEM image of a helical gear fabricated by MSL technology

으로 설정되어 작업하였으며, 각 층은 30 μm 의 두께로 적층되어 최종적인 기어형상을 얻었다.

3. 실리콘 고무형의 제작

3.1 재료의 선정

Table 1 Experimental condition for fabrication of a helical gear

Photopolymer	SL-5180 (produced by Vantico)
Laser power	100 mW
Scanning speed of laser beam	10 mm/min
Layer thickness	30 μm

본 연구에서는 실리콘 고무형을 제작하기 위해서 미국의 다우코닝에서 제조한 S-RTV를 이용하였다. Fig. 3에서 나타낸 것과 같은 복잡한 형상의 3차원 구조물을 복제하는데 사용되어지는 형의 재료가 반드시 갖고 있어야 할 특성으로 높은 탄성과 낮은 표면 에너지를 들 수 있다. 실리콘 고무 이외에도 많은 엘라스토머(elastomer)가 다양한 산업에 쓰이고 있다. 그러나 탄소를 주성분으로 하는 일반적인 엘라스토머는 대체로 실리콘 고무에 비해서 높은 표면에너지 값을 갖는다. 본 연구에서는 탄소를 주성분으로 하는 엘라스토머 중에서 대표적으로 널리 쓰이는 폴리우레탄(polyurethane)과 본 연구에서 사용된 실리콘 고무의 표면에너지를 각각 측정해 보았다.

일반적으로 고체 재료의 표면에너지는 접촉각을 측정하여 평가하는 방법이 널리 쓰인다. 샘플의 표면에너지(γ_s)와 접촉각(θ)의 사이에는 아래의 식이 성립한다.

$$\gamma_s = \gamma_L \cos \theta + \gamma_{LS} \quad (1)$$

여기서, γ_L 은 평가에 사용된 용액의 표면에너지 값이고, γ_{LS} 은 미지의 고체샘플과 평가 용액의 상호간의 에너지 값이다. 위 식에서 γ_{LS} 를 제거하기 위해서 많은 방법들이 고안되었는데, 본 연구에서는 그 중에서 기하학적 평균 방정식(Geometric Mean Equation)을 이용하였다.

$$\gamma_{LS} = \gamma_s + \gamma_L - (\sqrt{\gamma_s^d \gamma_L^d} + \sqrt{\gamma_s^p \gamma_L^p}) \quad (2)$$

여기서, 첨자 d와 p는 각각 dispersion 성분과 polar 성분을 나타내며, 본 실험에 사용된 용액의 표면장력 데이터는 Table 2에 나타내었다.⁽⁵⁾ 접촉

Table 2 Data of surface tension and component of the test liquids used in this study

Term	Liquid	
	CH ₂ I ₂	H ₂ O
γ_L	50.80	72.80
γ_L^d	50.80	21.80
γ_L^p	0	51.00

각 측정은 Surface Electro Optics의 Phoenix 300을 이용하여 측정하였다. 용매로는 물과 디요드메탄(diiodomethane)이 사용되었다. Fig. 4는 접촉각의 측정 결과를 나타내는데, 폴리우레탄의 경우에 물에 대해서는 75° and 디요드메탄에 대해서는 110°를 각각 나타내었다. 반면에 실리콘 고무의 경우에는 물에 대해서는 110°, 디요드메탄에 대해서는 60°의 값을 나타내었다.

이러한 결과를 바탕으로 측정된 표면에너지 값은, 폴리우레탄의 경우에는 49 mN/m 값을 나타내었으며, 실리콘 고무의 경우에는 폴리우레탄의 경우보다 20 mN/m이 낮은 29 mN/m의 값을 나타내었다. 이러한 결과는 실리콘 고무가 화학적으로 안정된 표면을 가지고 있기 때문에 폴리우레탄보다 더 좋은 이형성을 가질 수 있다는 것을 의미한다.

한편, 본 연구에서 최종패턴의 재료로 선정할 저융점 금속은 150°C의 용점을 갖는 Bi-Sn 합금이다. 따라서 최종 패턴의 제작을 위해서 본 연구에 적용될 엘라스토머는 150°C 이상의 온도에서 열에 의한 변형이나 손상이 없이 견딜 수 있어야 한다. 일반적으로 실리콘 고무처럼 실리콘을 함유한 폴리머는 탄소를 주성분으로 하는 고분자에 비해서 열적 특성이 우수한 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 따라서 본 논문에서는 다우코닝에서 생산하는 부가형 실리콘 고무인 S-RTV를 미세복제기술을 위한 고무형의 소재로 선택하였다.

3.2 실리콘 고무형의 제작

본 연구에서 실리콘 고무형의 제작을 위해 사용한 공정은 진공주형(vacuum casting)이다.⁽⁷⁾ 경화되기 전의 액상의 실리콘 고무는 높은 점도 값을 갖기 때문에 일반적인 대기 분위기에서의 주입만으로는 미세한 부분까지 전사해 내는 것이 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 5

에서 보여지는 진공주형 공정을 적용하였다. 먼저 주재와 경화제를 잘 섞어 액상의 실리콘 고무를 준비한다. 이렇게 준비된 액상의 재료를 대기압에서 마스터 패턴 위에 붓게 되면 실리콘 고무의 고점도 때문에 마스터 패턴의 표면과 실리콘 고무 사이에 미성형 부분이 남게 된다. 이러한 미성형 부분은 최종 패턴에 그대로 전사되기 때문에 반드시 제거되어야만 하는데, 이러한 문

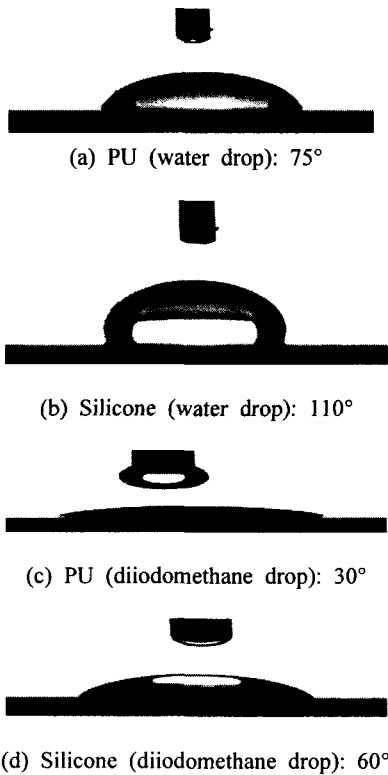


Fig. 4 Contact angle measured using a water and diiodomethane drop

제점을 해결하기 위해서 적용되는 공정이 진공주형이다. 대기압에서 주입과정을 마친 마스터 패턴과 실리콘 고무를 경화과정이 이루어지기 전에 진공 분위기에 놓아두면, Fig. 5에서 보여지는 것처럼 실리콘 고무의 외부는 빠른 시간 내에 진공이 되지만, 실리콘 고무의 내부의 기포들은 대기압을 유지하기 때문에 이러한 기압차에 의해서 기포들이 서서히 실리콘 고무의 외부로 배출되게 된다. 이때 생기는 공간들은 실리콘 고무가 천천히 메워나가면서 미성형 부분을 제거하게 되는 것이다. 이와 같은 탈포 과정을 충분히 거친 후에, 공기를 다시 주입시켜 진공 분위기를 제거시키고, 마스터 패턴과 액상의 실리콘 고무를 건조로에 넣어 경화 과정을 거치게 된다. 본 연구에서는 15분의 탈포 과정 후에 60°C가 유지되는 건조로에서 2시간의 경화과정을 거쳤다. 완전한 경화가 이루어진 후, 실리콘 고무로부터 마스터 패턴을 제거하면 Fig. 6에서 나타내는 실리콘 고무형을 얻을 수 있다. 마스터 패턴을 제거해 내는 과정에서 높은 탄성과 낮은 표면에너지 값이 필수적이기 때문에 본 연구에서는 실리콘 고무형을 선정하였으며, 이러한 공정에 의해 제작된 실리콘 고무형을 이용하면, Bi-Sn 합금을 이용한 미세주조(microcasting) 기술의 적용과 더불어 미세기어를 제작할 수 있다.

3.3 실리콘 고무형의 전사성 평가

앞에서 살펴본 바와 같이 실리콘 고무는 탄성, 표면에너지, 내열성등의 측면에서 형의 소재로서 탁월한 특성을 가지고 있다. 이외에 진공주형에 의해 제작된 실리콘 고무형의 장점으로 높은 전사성을 들 수 있다. 실리콘 고무형의 전사성을 평가함에 있어서 본 연구에서는 표면 전사성

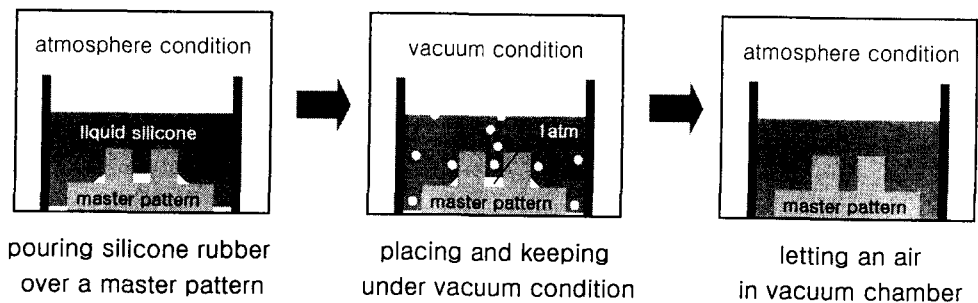


Fig. 5 Mechanism of vacuum casting process

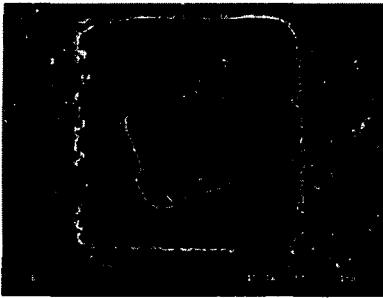


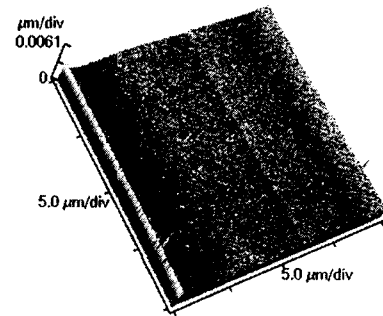
Fig. 6 SEM image of silicone rubber mold for a helical gear

(surface transferability)과 패턴 전사성 (pattern transferability)으로 나누어 평가해보았다. 표면 전사성을 위해서는 고품질의 경면을 갖는 폴리싱된 실리콘웨이퍼가 마스터 패턴으로 사용되었고, 패턴 전사성을 평가하기 위해서는 $1\mu\text{m}$ 크기의 패턴에 표면에 에칭되어진 패턴 웨이퍼가 마스터 패턴으로 사용되었다. 이렇게 준비된 마스터 패턴에 진공주형을 이용하여 실리콘 고무를 전사시킨 후, 마스터와 실리콘 고무의 표면의 형상을 AFM을 이용하여 그 결과를 비교함으로써 전사성 평가를 수행하였다. Fig. 7은 표면의 전사성을 평가한 결과이다.

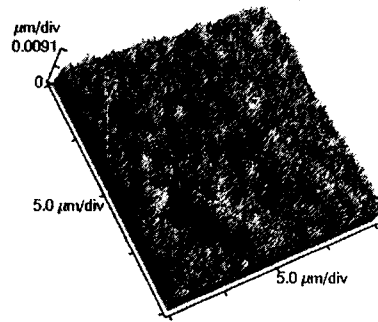
폴리싱된 실리콘웨이퍼는 Fig 7(a)에서 보여진 것과 같은 표면 형상을 갖고 있는데, 0.3nm 의 표면거칠기(Ra)값을 갖는 고품질의 경면(mirror surface)의 표면을 갖고 있다. Fig 7(b)는 Fig. 7(a)에서 나타낸 마스터에 진공주형을 이용하여 전사시킨 실리콘 고무형의 표면의 형상이다. 실리콘 고무형의 표면의 거칠기값은 1.3nm 으로 측정되었는데 이는 폴리싱된 실리콘웨이퍼와 거의 똑같은 고품질의 경면이다. 따라서 진공주형을 이용해 제작된 실리콘 고무형은 매우 뛰어난 표면 전사성을 가짐을 확인할 수 있었다.

4. Bi-Sn 합금을 이용한 미세주조기술

현재까지 주철, 알루미늄, 마그네슘 등과 같은 많은 금속들이 금속 구조물의 제작을 위해 주조공정에 적용되고 있다. 그러나, 이들 금속은 높은 용점과 액상에서 고상으로의 상변화 과정에서 수반되는 수축 때문에 미세 구조물의 제작에 적용



(a) Surface of polished silicon wafer



(b) Surface of silicone rubber mold

Fig. 7 Results of surface transferability test

되기에는 많은 문제점을 가지게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 Bi-Sn 합금 (METSPEC 281/338 ALLOY, MCP MetalSpecialties Inc.)을 주조를 위한 재료로 선정하였다. Table 3에 본 연구에서 사용된 Bi-Sn 합금의 대표적인 물성을 나타내었다.

Fig. 8은 Bi-Sn 합금의 상변태도(phase diagram)를 나타내는 그림이다.⁽⁸⁾ 이 변태도에 따르면, Bi가 60wt%인 합금에서의 용점이 대략 150°C 를 나타낸다. Bi-Sn 합금의 이와 같은 용점은 실리콘 고무의 내열온도는 200°C 에 미치지 못하기 때문에 실리콘 고무형을 이용한 주조공정을 가능하게 한다. Fig. 9는 본 연구에서 사용된 미세주조기술의 대략적인 공정도를 나타낸다.

Fig. 9에서 보여진 것처럼 전체적인 공정은 실리콘 고무형의 제작과정에서 적용된 진공주형 공정과 거의 유사하다. 다만, 진공주형에서는 상온에서 진공분위기가 유지된 반면에 미세주조기술

Table 3 Properties of Bi-Sn alloys: This data was acquired in website of MCP MetalSpecialties Inc

Density	8.21 g/cm ³
Brinell hardness	23-24
Melting range	135-170°C
Tensile strength	60 Mpa
Thermal Conductivity	0.3 J/sec·cm·°C
Electrical Resistivity	34 mU·cm

에서는 금속의 용점 이상의 온도에서 진공이 유지된다는 것만 다르다. 본 연구에서 사용된 Bi-Sn 합금의 경우 Fig. 9의 상태도에서 보여진 것처럼 150°C의 용점을 갖고 있다 그러나, 본 연구에서의 주조온도는 170°C로 선정되었는데, 일반적으로 액상 재료의 점도는 온도에 반비례하기 때문에 주조시 용융 금속의 온도가 높으면 높을수록 실리콘 고무의 미세한 부분까지의 침투가 가능하게 때문에 본 연구에서는 주조 금속의 용점보다 다소 높은 170°C를 주조온도로 선정하였다.

Fig. 10에 150°C의 온도에서 주조공정을 거친 제품의 SEM 사진을 나타내었는데, 기어의 모서리 부분에서 완전한 성형이 이루어지지 않았음을 확인할 수 있다. Fig. 10에서 보여지는 기어의 모서리 부분은 Fig. 6에 나타난 실리콘 고무형에서는 골부분에 해당되는데, 용융 금속의 상대적으로 높은 점도에 의해서 미세한 부분까지 금속이 채워지지 못했음을 의미한다. Fig. 11은 주조 온도를 170°C로 선정하여 제작한 결과를 나타내는 SEM사진인데, Fig. 3에서 보여진 미세광조형 기술을 이용해 제작된 마스터패턴의 형상을 충실히 전사시켜내고 있음을 확인할 수 있다.

마지막으로, 위와 같은 공정의 전사성을 평가해보았다. Fig. 12에 평가 방법을 나타내었는데, 경면을 갖는 실리콘 웨이퍼를 마스터 패턴으로 하여 실리콘 고무형을 복제하고, 최종적으로 주조공정을 적용하여 Bi-Sn 합금 시편을 제작하여 실리콘 웨이퍼와 Bi-Sn 합금 시편의 표면 거칠기를 비교하는 방법으로 전사성 평가를 수행하였다. Fig. 13에 그 결과를 나타내었다. Fig. 13(a)는 실리콘 웨이퍼의 표면 거칠기를 나타내고 있다.

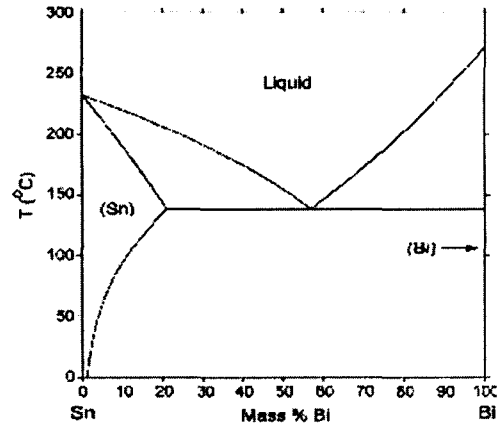


Fig. 8 Phase diagram of Bi-Sn system

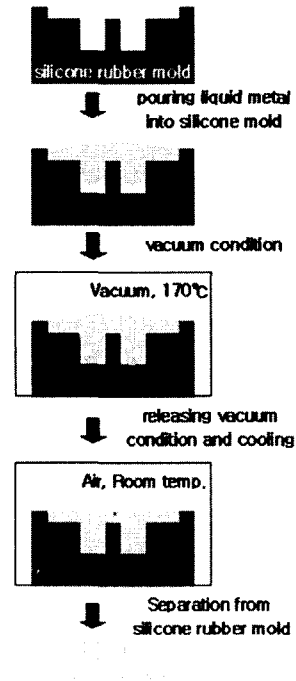
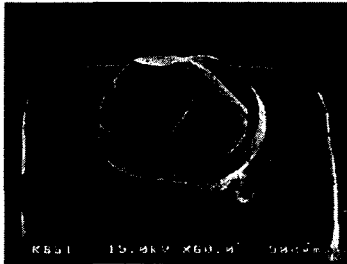


Fig. 9 Schematic diagram of microcasting process

평균 표면 거칠기 값은 0.01 μ m이며, 측정 영역에서의 최대 거칠기 값은 0.1 μ m로 나타났다. Fig. 13(b)는 전사된 Bi-Sn 합금의 표면 거칠기를 나타내고 있는데, 평균 표면 거칠기 값은 0.29 μ m을 나타내었으며, 측정 영역내에서의 최대 표면 거칠기 값은 1.73 μ m을 나타내었다. 실리콘 웨이퍼의 표면과 비교하면 다소 거칠기 값이 증가하였으



(a) Top view



(b) Side view

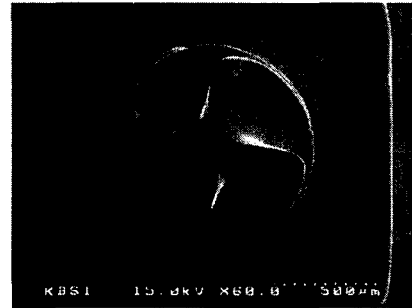
Fig. 10 Helical gear made erroneously by micro-casting process(Materials: Bi-Sn alloys, casting temperature 150°)

나, 0.29 μ m의 표면 거칠기 값 역시 경면을 의미하는 값이므로, 이러한 공정을 이용하여 미세 금속 구조물을 제작하는 데에는 적용이 가능한 것으로 판단된다.

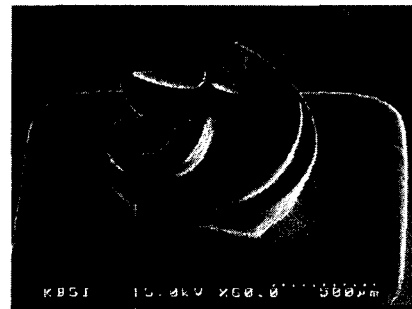
5. 결론

본 연구는 금속 재료를 이용하여 복잡한 3차원 형상의 미세 구조물을 제작할 수 있는 공정을 개발하였다. 복잡한 3차원의 미세구조물의 한 예로 헬리컬 기어를 선정하였다. 먼저 미세광조형 기술을 이용하여 광경화성 에폭시 수지로 헬리컬 기어 형상의 마스터 패턴을 제작하였다.

그 마스터 패턴으로부터 진공주형 공정을 이용하여 탄성을 갖는 고무형을 제작하였다. 본 연구에서는 높은 탄성과 내열성, 낮은 표면 에너지, 우수한 전사성 등을 고려하여 실리콘 고무를 형의 재료로 선정하였다. 실리콘 고무는 경면을 갖는 표면을 거의 동일하게 전사시킬 수 있으며,



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 11 Helical gear made exactly by micro-casting process(Materials: Bi-Sn alloys, casting temperature 170°)

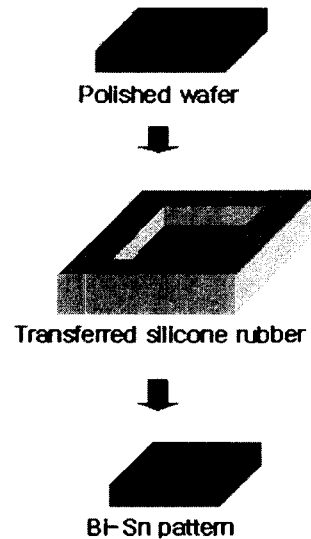
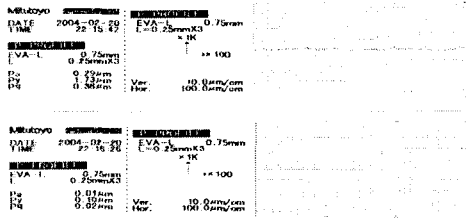
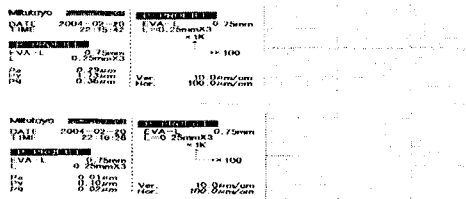


Fig 12 Transferability test of Bi-Sn alloys

참고문헌



(a) Surface of silicon wafer



(b) Surface of Bi-Sn alloys

Fig. 13 Transferability test of Bi-Sn alloys

또한 $1\mu\text{m}$ 의 크기의 매우 작은 패턴까지 훌륭하게 전사시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 실리콘 고무형과 Bi-Sn 합금과 같은 재료에 본 연구에서 개발된 미세주조기술을 적용함으로써, 최종적으로 금속 재질의 헬리컬 기어를 제작해 낼 수 있었다. 또한 본 연구에서 개발한 미세복제기술은 금속, 기능성 고분자뿐만 아니라, 더 나아가 세라믹까지 다양한 주조 소재의 개발과 함께 다양한 분야에서의 적용 가능성을 가지고 있기 때문에 향후에 보다 많은 연구가 수행되어질 것으로 생각되어진다.

후 기

본 연구의 수행에 도움을 주신 포항공대 관계자 여러분과 (주) 일범 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

- (1) Bustillo J.M., Howe R.T., and Muller R.S., 1998, "Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems," *Proceedings of the IEEE* Vol. 86, No. 8, pp. 1552~1574.
- (2) Zhang, J., Tan, K.L., and Gong, H.Q., 2001 "Characterization of the Polymerization of SU-8 Photoresist and Its Applications in MEMS," *Polymer test*, Vol. 20, pp. 693~701.
- (3) Yamaguchi, K., 2003, "Generation of Three Dimensional Microstructure by Metal Jet," *Microsystem Technology*, Vol. 9, pp. 215~219.
- (4) Ikuta, K., and Hirowatari, K., 1993, "Real Three-Dimensional Micro Fabrication Using Stereolithography and Metal Forming," *Proc. of IEEE International Workshop on MEMS 93*, pp. 42~47.
- (5) Gindl, M., Shin, Gindl, W. Reiterer, A. and Tschegg, S. 2001, "A Comparison of Different Methods to Calculate the Surface Free Energy of Wood Using Contact Angle Measurements," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 181, pp. 279~287
- (6) Richard, G.J., Wataru, A., and Julian, C., 2000, "Silicon-Containing Polymers," *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, The Netherlands pp.185~212.
- (7) Chung, S., Im, Y., Kim, H., Choi, J., and Jeong, H., 2003, "Development of Micromolding Technology Using Silicone Rubber Mold," *Transactions of the KSME, A*, Vol 27, NO. 8, pp. 1380~1387.
- (8) Lee, B., Oh, C., and Shim, J., 1996, "Thermodynamic Assessments of the Sn-In and Sn-Bi Binary Systems," *J. Electron. Mater.* Vol. 25, pp. 983~991.