

동분말이 함유된 에폭시 수지를 이용한 마이크로 기어의 제작에 관한 연구

정성일*, 박선준**, 이인환***, 정해도#, 조동우***

A Study on a Microreplication Process for Real 3D Structures Using a Soft Lithography

Sungil Chung*, Sunjoon Park**, Inhwan Lee***, Haedo Jeong# and Dongwoo Cho***

ABSTRACT

In this paper, a new replication technique for a real 3D microstructure was introduced, in which a master pattern was made of photo-curable epoxy using a microstereolithography technology, and then it was transferred onto an epoxy-copper particle composite. A helical gear was selected as one of the real 3D microstructure for this study, and it was replicated from a pure epoxy to an epoxy composite. In addition, the transferability of the microreplication process was evaluated, and the properties of the epoxy composite were compared to that of the pure epoxy, including hardness, wear-resistance and thermal conductivity.

Key Words: Microreplication process (미세복제 기술), A helical gear (헬리컬 기어), hardness (경도), Wear-resistance (내마모성), Thermal conductivity (열전도도)

1. 서론

최근에 반도체, 전자, 광학, MEMS, 생체의학에 이르기까지 많은 분야에서 복잡한 형상을 갖는 3차원 구조물에 대한 요구가 늘어나고 있다. 지금까지의 대부분의 미세구조물 제작공정은 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)의 박막가공(surface-machining) 및 후막가공(bulk-machining)과 같은 반도체 공정에서 비롯되었고^{1,2}, 이들 공정은 불가피하게 노광(photolithography) 공정을 필요로 한다. 비록 노

광 공정이 가장 큰 영향력을 가지고 현장에서 적용이 되고는 있지만, 이 공정이 모든 미세구조물 제작기술에 적용 가능한 완벽한 공정은 아니다.

노광 공정은 고비용을 유발하며, 또한, 평탄하지 못한 표면을 가진 소재에는 적용하기 곤란하며, 또한 재료적인 측면에서도 많은 제약이 따른다. 그러므로 이러한 노광 공정을 사용하지 않는 미세구조물 제작기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 대표적인 사례가 미세절삭가공(microcutting)이나, 미세방전가공(microEDM)과

접수일: 2003년 9월 23일; 게재승인일: 2004년 9월 9일

* LG 생산기술원 자동화기술그룹

** 부산대학교 정밀기계공학과

*** 포항공과대학교 기계공학과

부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

E-mail: hdjeong@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-3210

같은 기계적인 방법에 의한 가공이다^{3,5}. 기존의 광조형(Stereolithography) 기술에서 비롯된 미세광조형(MSL, microstereolithography) 기술도 미세구조물 제작을 위해 연구되고 있는데⁶, 이 MSL 기술은 1990년대 초반에 일본의 Ikuta 등에 의해서 최초로 소개되었다⁷. 이 공정은 Fig. 1에서 보여지는 2D 데이터의 적층에 의해서 복잡한 단면을 갖는 3차원 구조물을 제작할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이러한 방법에 의해서는 광경화성 수지를 제외한 다른 재료를 이용해서는 원하는 구조물을 제작하기가 곤란하다는 단점을 갖고 있다. 만약에 광경화성 수지로 제작된 패턴을 다른 재질로 복제할 수 있는 기술이 개발되어 MSL과 접목된다면 그 적용 범위는 매우 넓어질 수 있을 것이다. 그러므로, 본 연구에서는 광경화성 수지를 이용해 제작된 마스터 패턴(master pattern)을 금속 보강재를 이용해 강화된 에폭시로 전사시키는 공정을 개발하였다. 또한 금속 보강재를 이용한 에폭시 복합재료의 기계적, 열적 특성에 대한 평가도 함께 수행되었다.

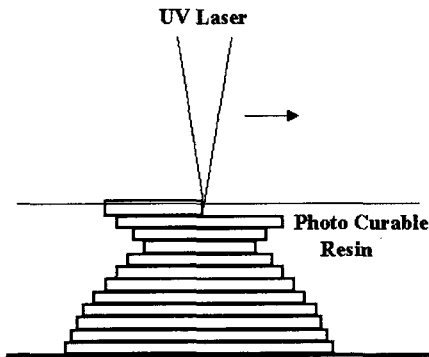


Fig. 1 Schematic diagram of microstereolithography process

2. 미세복제 공정

Fig. 2는 미세복제 기술의 대략적인 개념도를 나타낸다⁸. 우선 최종적으로 얻고자 하는 패턴의 형상과 동일한 형상을 갖는 마스터 패턴을 제작해야 한다. 다음으로, 액상의 실리콘 고무를 마스터 위에 부은 후 경화시키는 공정에 의해 실리콘 고무형을 제작한다. 마지막으로 이 실리콘 고무형으로부터 최종 패턴을 제작하게 되는데, 최종 패턴

의 형태는 마스터 패턴과 동일하게 되며, 단지 재료만 필요에 의해 바뀌어지게 된다.

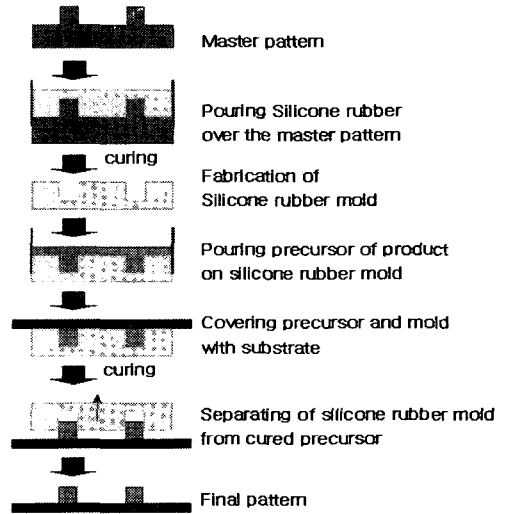


Fig. 2 Schematic illustration of microreplication process

본 연구에서는 MSL 기술로 제작된 광경화성 수지 패턴이 마스터 패턴으로 이용되었고, 그 마스터를 이용하여 실리콘 고무형을 만든 후, 최종적으로 금속 보강재가 함유된 에폭시 복합재료로 이루어진 최종 패턴을 얻었다.

2.1 마스터 패턴의 제작

본 연구에서 마스터 패턴의 제작에 사용된 MSL 기술은 기존의 광조형을 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. 3은 본 연구에서 사용된 MSL 장비의 대략적인 개략도를 나타낸다. A CW (continuous wave) 아르곤 레이저 (Ar+ Laser) (Spectra-Physics BeamLok 2065-4S)가 광원으로 사용되었는데 파장은 351.1nm이며 0.85mm의 Gaussian half-width 값을 갖는다. 이 레이저의 최대출력은 351.1nm의 파장에서 460 mW이며, 그 출력은 함께 부착된 제어기에 의해 연속적으로 제어될 수 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 제작되어진 미세 헬리컬 기어의 SEM 이미지를 나타내고 있으며, Table 1에 기어의 제작에 필요한 실험 조건을 나타내었다.

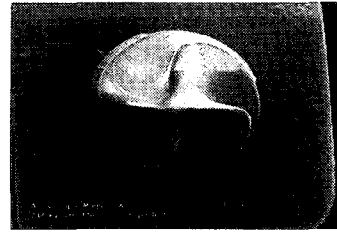
광경화성 수지로는 Vantico 사에서 제조된 SL-5180 이라는 수지가 사용되었고, 레이저 출력은 100 μW, 레이저 빔의 스캔 속도는 10 mm/min 로 설정되어 작업하였으며, 각 층은 30 μm 의 두께로 적층되어 최종적인 기어형상을 얻었다.

Table 1 Experimental conditions for fabrication of a helical gear

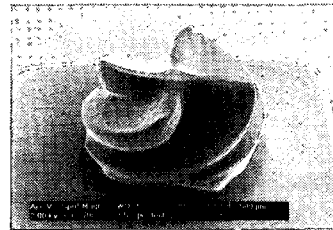
Photopolymer	SL-5180 (produced by Vantico)
Laser power	100 μW
Scanning speed of laser beam	10 mm/min
Layer thickness	30 μm

2.2 실리콘 고무형의 제작

본 연구에서는 실리콘 고무형을 제작하기 위해서 미국의 다우코닝에서 제조한 S-RTV 를 이용하였다. Fig. 4 에서 나타난 것과 같은 복잡한 형상의 3 차원 구조물을 복제하는데 사용되어지는 형의 재료가 반드시 갖고 있어야 할 특성으로 높은 탄성과 낮은 표면에너지를 들 수 있다. 실리콘 고무는 탄성이 높은 고무 재질이기 때문에 마스터 패턴 또는 최종 패턴으로 실리콘 고무형을 이형해 내는데 유리하다 (Fig. 5). 실리콘 고무 이외에도 많은 엘라스토머 (elastomer)가 다양한 산업에 쓰이고 있다. 그러나 이러한 탄소를 주성분으로 하는 엘라스토머는 대체로 실리콘 고무에 비해서 높은 표면에너지 값을 갖는다.



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 4 SEM image of a helical gear fabricated by MSL technology

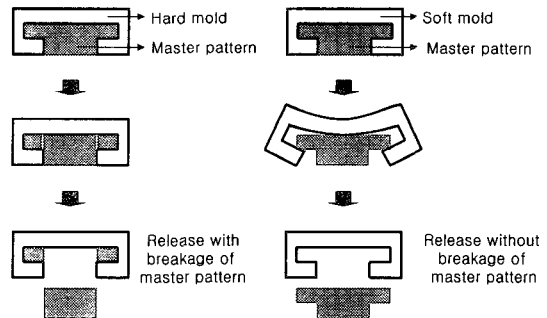


Fig. 5 Advantage of an elastomeric mold

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

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

여기서, γ_L 은 평가에 사용된 용액의 표면에너지 값이고, λ_{LS} 은 미지의 고체샘플과 평가 용액의 상호간의 에너지 값이다. 위 식에서 γ_L 를 제거하기 위해서 많은 방법들이 고안되었다. 본 연구에서는 그 중에서 아래에 표현된 수식을 이용하였다 (Geometric Mean Equation).

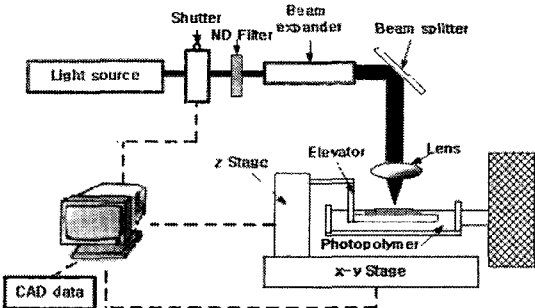


Fig. 3 Schematic illustration of the microstereolithography apparatus

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

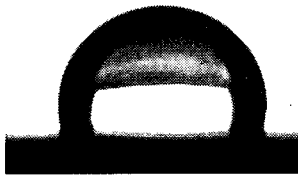
여기서 첨자 d 와 p 는 각각 dispersion 성분과 polar 성분을 나타내며, 본 실험에 사용된 용액의 표면장력 데이터는 Table 2 에 나타내었다⁹. 접촉각 측정은 Surface Electro Optics 의 Phenix 300 을 이용하여 측정하였다. 용매로는 물과 디이오드메탄 (diiodomethane)이 사용되었다.

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



(a) PU (water drop): 75°



(b) Silicone (water drop): 110°



(c) PU (diiodomethane drop): 30°



(d) Silicone (diiodomethane drop): 60°

Fig.6 Contact angle measured using a water and diiodomethane drop

Fig. 6 은 접촉각의 측정 결과를 나타내는데, 폴리우레탄의 경우에 물에 대해서는 75°, 그리고 디이오드메탄에 대해서는 110° 를 각각 나타내었다. 실리콘 고무의 경우에는 물에 대해서는 110° 를, 디이오드메탄에 대해서는 60° 의 값을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 측정된 표면에너지 값은, 폴리우레탄의 경우에는 49 mN/m 값을 나타내었으며, 실리콘 고무의 경우에는 폴리우레탄의 20 mN/m 이 낮은 29 mN/m 의 값을 나타내었다. 이러한 결과는 실리콘 고무가 화학적으로 안정된 표면을 가지고 있기 때문에 폴리우레탄보다 더 좋은 이형성을 가질 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 실리콘 고무를 형의 재료로 선정하게 되었다. Fig. 7 은 마스터 패턴으로부터 제작된 실리콘 고무형의 SEM 사진을 나타낸다.

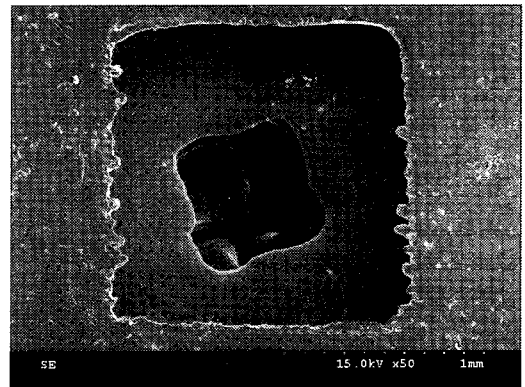


Fig. 7 SEM image of silicone rubber mold for a helical gear

2.3 에폭시 복합재료를 이용한 전사공정

본 연구에서 사용된 에폭시는 일본의 Nissin Resin 에서 제조된 X-0799 이다. 이 에폭시는 주제와 경화제를 혼합하여 경화시키는 이액형의 에폭시 수지이다. 금속 보강재로는 일본의 KOJUNDO CHEMICAL LAB.에서 제조된 동분말을 사용하였다. Fig. 8 은 본 연구에 사용된 동분말의 입도 분포를 나타낸다. 금속 보강재는 에폭시 수지의 40 vol%가 첨가되었다. 우선 에폭시 주제와 동분말을 혼합기(stirrer)를 이용하여 1 시간동안 혼합한다. 그런데 에폭시 수지의 주제는 점도가 매우 높기 때문에 45°C 까지 예열하여 사용하였다. Fig. 9 는 온도 에 따른 에폭시 주제의 점도의 변화를 나타내는

데 45°C 까지 온도가 증가함에 따라 점도는 급격히 감소함을 알 수 있다. 주재와 보강재를 혼합한 후에 경화제를 첨가한 후에 진공분위기에서 10 분 동안 혼합함으로써 에폭시 복합재료를 제조하였다. 이러한 공정을 통해 제조된 에폭시 혼합재를 실리콘 고무형에 부어 넣어 60°C 에서 1 시간 동안의 경화과정을 거치게 되면 최종적인 패턴의 제작이 가능하게 된다. Fig. 10 은 실리콘 고무형으로부터 전사된 금속 보강재가 함유된 에폭시 복합재료로 이루어진 헬리컬 기어의 SEM 사진을 나타낸다



Fig. 10 SEM image of a helical gear fabricated with epoxy composite

3. 미세복제 기술의 평가

3.1 전사성 평가

본 논문에서 개발된 미세복제 기술의 평가를 위해서 폴리싱된 실리콘 웨이퍼를 마스터패턴으로 선정하였다. Fig. 11 은 마스터로 사용된 실리콘 웨이퍼의 표면을 AFM(Atomic Forces Microscopy)으로 측정된 결과이다. 이 실리콘 웨이퍼는 한변의 길이가 20 μm 인 정사각형 영역에서 0.3 nm 의 평균 표면거칠기 값을 갖는다. 이 마스터 패턴을 이용하여 실리콘 고무형을 만들고, 다시 에폭시 복합재를 이용하여 전사해 보았다. 그 결과는 각각 Fig. 12 와 Fig. 13 에 각각 나타내었다.

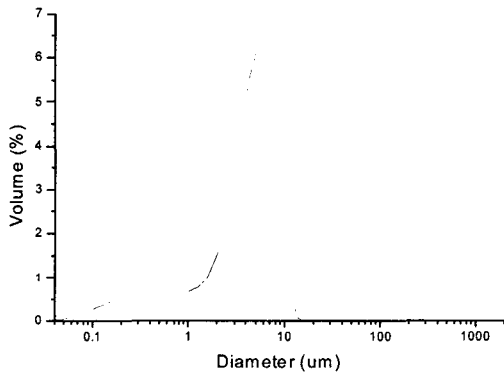


Fig. 8 Diameter distribution of copper particles; this data was measured by the LS230 & N4PLUS, particle size analyzer of Coulter Corporation.

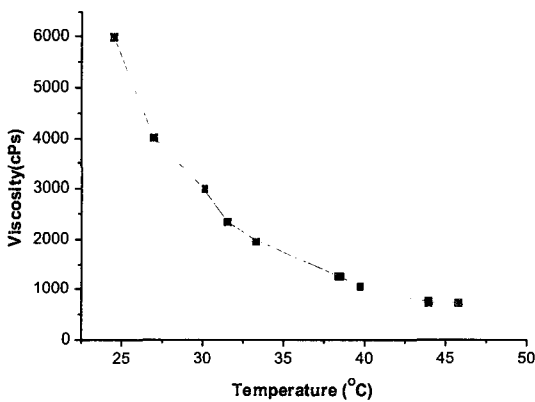


Fig. 9 Viscosity change of the base material of epoxy resin according to temperature; this data was measured by Brookfield DV-11 of Brookfield Engineering Laboratories

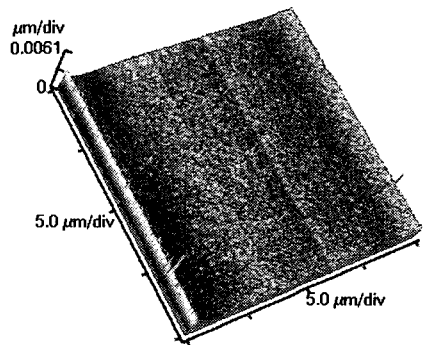


Fig. 11 AFM image on the surface of a polished silicon wafer; this data was measured by AutoProbe CP Research System of TM Microscopes

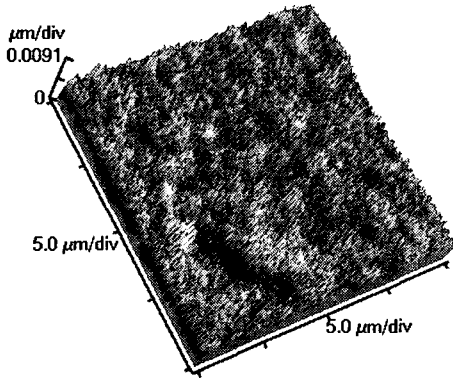


Fig. 12 AFM image on the surface of silicone rubber

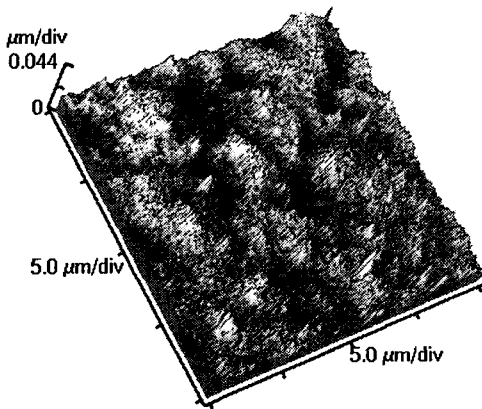


Fig. 13 AFM image on the surface of epoxy-copper particle composite

실리콘 고무형의 표면은 1.3nm의 평균 표면거칠기 값을 나타내었고, 에폭시 복합재료의 경우에는 6nm의 평균 거칠기 값을 나타내었다. 마스터에 비하면 다소 높은 값이지만, 다른 기계적 가공에 비해서는 매우 양호한 값을 나타내었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 개발된 공정은 경면을 갖는 표면까지 전사가 가능하다는 것을 알 수 있었다. Fig. 14는 에폭시 복합재료의 단면의 SEM 사진을 나타내고 있는데 동분말이 매우 균일한 분포를 이루며 에폭시 수지 사이사이에 분포되어 있음을 확인할 수 있었는데 이와 같은 균일한 분포는 에폭시 수지와 동분말을 혼합할 때 1시간 정도의 시간을 들여 충분히 혼합함으로써 얻어질 수 있었다.

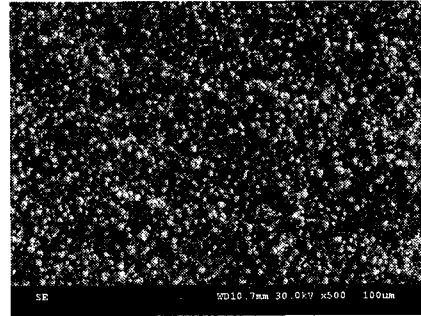


Fig. 14 Cross-sectional SEM image of epoxy composite

3.2 에폭시 복합재료의 기계적 특성 평가

일반적으로, 고분자에 함유된 보강재는 그 복합재료의 특성을 향상시키는 것으로 보고되고 있다¹⁰⁻¹². 본 연구에서는 기계적 특성으로서 경도와 내마모성이 평가되었다. 경도는 마이크로 비커스 경도계(micro Vickers, Buehler, Model Micromet 2100)를 이용하여 측정하였다. 250g의 하중을 15초 동안 136°의 경사각을 갖는 피라미드 형상의 다이아몬드 팁을 이용하여 샘플의 표면에 가하였다. 비커스 경도값은 다음의 식에 의해 계산된다.

$$H_v = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

여기서, H_v 는 비커스 경도값을, F 는 하중(N)을, d 는 마름모꼴의 평균 대각선의 길이를 의미한다. 430 μm의 평균대각선을 가지는 압흔이 순수한 에폭시(X-0799)의 시편의 표면에서 관찰되었다. 반면에 에폭시 복합재료의 표면에선 340 μm의 압흔 길이가 관찰되었다. 이 수치를 위 경도식에 대입하면, 에폭시 복합재료의 경도는 40을 의미하며, 순수한 에폭시의 경우에는 25를 의미한다. 따라서 에폭시에 금속 보강재를 함유함으로써 15만큼의 경도 상승을 가져올 수 있었다.

내마모성은 20 rpm의 속도로 회전하는 # 600 사포의 표면에 3.5 kgf의 하중으로 20분 동안 시편을 연마했을 때의 질량의 감소량을 측정함으로써 평가하였다. 평가시편은 직경 25mm, 높이 10mm의 원통형 시편이다. 마모량의 측정은 다음의 식에 의해 이루어졌다.

$$\text{Amount of wear (mm}^3\text{)} = (M_1 - M_2) \times \rho \quad (4)$$

여기서, M_1 은 연마 전의 시편의 질량이며, M_2 는 연마 후의 시편의 질량이며, ρ 는 평가 시편의 밀도를 나타낸다.

결과로서, 순수한 에폭시의 경우에는 43 mm^3 의 체적이 연마되어 제거되었고, 보강재를 함유한 복합재료의 36 mm^3 의 체적 감소를 나타내었다. 에폭시 수지에 함유된 동분말이 에폭시보다 경도가 높기 때문에 순수한 에폭시보다는 높은 내마모성을 가질 수 있었다

3.3 에폭시 복합재료의 열적 특성의 평가

본 연구에서 열전도도를 평가하기 위해서 열원반에 의한 열분석 장비(Hot-disk thermal constant analyzer, Hot Disk Inc., Sweden)가 적용되어졌다¹³. 열원반 센서는 이중나선을 갖는 니켈 포일(nickel foil, $10 \mu\text{m}$ thick; 3.2 mm radius; $\alpha = 4.7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; 293 K)로 만들어졌으며, 양면이 캡톤(Kapton, $25 \mu\text{m}$ thick)으로 쌓여져 있다. 순수한 동은 열전도는 400 W/m-K 인데 이는 순수한 에폭시의 열전도도 값인 0.2 W/m-K 에 비해서는 매우 높은 값이다¹⁴. 샘플에 열이 가해지면, 저항이 낮은 쪽으로 전하가 흐르는 것처럼 열 또한 저항값이 낮은 동분말을 통해서 흐르게 된다. 그러나 동분말은 에폭시 수지에 완전히 둘러 쌓여있기 때문에 복합재료의 열전도는 방해받을 수 있다. 본 연구에서 사용한 복합재료의 열전도는 1.5 W/m-K 로 측정되었는데, 이는 순수한 에폭시 수지의 열전도인 0.2 W/m-K 에 비해서는 매우 높은 값이다.

4. 결론

본 연구는 3 차원 미세구조물의 복제에 적용할 수 있는 새로운 공정을 개발하는 것을 그 목표로 하였다. 본 연구에서 개발된 공정을 대략적으로 설명하는 다음과 같다. 먼저 미세광조형(MSL) 기술을 이용하여 광경화성 수지로 마스터 패턴을 제작한 다음, 다우코닝에서 생산된 S-RTV, 실리콘 고무를 이용하여 탄성이 높고 표면에너지가 낮은 형을 제작한다. 마지막으로 동분말이 함유된 에폭시 복합재료를 이용하여 최종패턴을 제작함으로써 복제가 완성되게 된다. 본 연구에서 형의 재료로 실리콘 고무를 선택한 이유를 설명하기 위해 폴리우레탄 엘라스토머와의 비교 실험을 해 본 결과,

폴리우레탄에 비해서 표면에너지가 현저히 낮음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 복잡한 3 차원 구조물의 한 예로 헬리컬 기어를 선정하여 동분말이 함유된 에폭시 복합재료로 전사해 내었다. 또한 본 연구에서 개발된 공정에 대한 평가 또한 함께 이루어졌는데, 그 공정을 이용하여 0.3 nm 의 표면 거칠기 값을 갖는 경면의 표면을 6 nm 의 표면 거칠기 값을 갖는 경면으로 전사해낼 수 있음을 확인하였다. 또한 에폭시 복합재료와 순수한 에폭시의 기계적, 열적 특성을 비교함으로써, 에폭시 복합재료가 순수한 에폭시에 비해 그 특성이 우수함을 보였다. 본 연구에서 개발된 공정을 이용하며, 고분자 복합재료 뿐만이 아니라, 실리콘 고무를 이용해 전사해 낼 수 있는 다양한 재료, 예를 들면, 기능성 고분자, 저융점 금속, 세라믹 또는 메탈 페이스트(paste)와 같은 재료로 복잡한 형상의 3 차원 구조물을 복제해 낼 수 있을 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. Bustillo, J. M., Howe, R. T. and Muller, R. S., "Surface micromachining for MEMS," Proceedings of the IEEE Vol. 86, No. 8, pp.1552-1574, 1998.
2. Zhang, J., Tan, K. L. and Gong, H. Q., "Characterization of the polymerization of SU-8 photoresist and its applications in MEMS," Polymer test Vol. 20, pp. 693-701, 2001.
3. Friedrich, C.R., Coane, P.J. and Vasile, M.J., "Micromilling development and applications for microfabrication," Microelectronic Engineering Vol. 35, No. 1-4, pp.367-372, 1997.
4. Lee, D. G., Lee, H. G., Kim, P. J. and Bang, K. G., "Micro-drilling of alumina green bodies with diamond grit abrasive micro-drills," International Journal of Machine Tools and Manufacture Vol. 43, No. 6, pp.551-558, 2003.
5. Kim, Y. T., Park, S. J., Lee, S.J., "Machining of

- micro-scale shape using micro-EDM process,” J. of KSPE Vol. 20, No. 9, pp.109-117, 2003.
6. Farsari, M., Claret-Tournier, F., Huang, S., Chatwin, C. R., Budgett, D. M., Birch, P. M., Young, R. C. D., Richardson, J.D., “A novel high-accuracy microstereolithography method employing an adaptive electro-optic mask,” Journal of Materials Processing Technology Vol. 107 No. 1-3, pp. 167-172, 2000.
 7. Ikuta, K., Hirowatari K., “Real three-dimensional micro fabrication using stereolithography and metal forming,” Proc. of IEEE international workshop on MEMS’ 93 pp.42-47, 1993.
 8. Chung, S. I., Im, Y. G., Kim, H. J., Jeong, H. D., Dornfeld, D. A., “Evaluation of micro replication technology using silicone rubber molds and its applications,” International Journal of Machine tools and Manufacture Vol. 43, No. 13, pp.1337-1345, 2003.
 9. Gindl, M., Sinn, G., Gindl, W., Reiterer, A., Tschegg, S., “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, 2001.
 10. Chung, S. I., Im, Y. G., Jeong, H. D., Nakagawa, T., “A study on characteristics improvement of epoxy resin mold using metal fillers and its application,” J. KSPE, Vol. 20, No. 4, pp.165-173, 2003.
 11. Suwanprateeb, J., “Calcium carbonate filled polyethylene: correlation of hardness and yield stress,” Composites: Part A Vol. 31, pp. 353-359, 2003.
 12. Low, I. M., Shi, C., Paglia, G., “Comparison of indentation responses in pure and zirconium phosphate-filled epoxies,” Materials Letters Vol. 38, pp. 77-81, 1999.
 13. Gustafsson, S. E., “Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials,” Rev Sci Instrum Vol. 62, No. 3, pp. 797-804, 1991.
 14. William, D., Callister, Jr., “Materials science and engineering - third edition,” John Wiley & Sons, Inc., Toronto pp. 767-771, 1994.