

마이크로광조형에서 고 세장비 구조물 집적화 가공을 위한 UV 경화성 수지의 물성 개선

이수도*, 최재원**, 박인백*, 하창식***, 이석희#

Improvement of Mechanical Properties of UV-curable Resin for High-aspect Ratio Microstructures Fabricated in Microstereolithography

Su Do Lee*, Jae Won Choi**, In Beak Park*, Chang Sik Ha*** and Seok Hee Lee#

ABSTRACT

Recently, microstructures fabricated using microstereolithography technology have been used in the biological, medical and mechanical fields. Microstereolithography can fabricate real 3D microstructures with fine features, although there is presently a limited number of materials available for use in the process. Deformation of the fine features on a fabricated microstructure remains a critical issue for successful part fabrication, and part deformation can occur during rinsing or during fabrication as a result of fluid flow forces that occur during movement of mechanical parts of the system. Deformation can result in failure to fabricate a particular feature by breaking the feature completely, spatial deflection of the feature, or attaching the feature to neighboring microstructures. To improve mechanical strength of fabricated microstructures, a clay nanocomposite can be used. In particular, a high-aspect ratio microstructure can be fabricated without distortion using photocurable liquid resin containing a clay nanocomposite. In this paper, a clay nanocomposite was blended with a photocurable liquid resin to solve the deformation problem that occurs during fabrication and rinsing. An optimal mixture ratio of a clay nanocomposite was found through tensile testing and the minimal allowable distance between microstructures was found through fabrication experimentation. Finally, using these results, high-aspect ratio microstructures were fabricated using a clay nanocomposite resin without distortion..

Key Words : microstereolithography (마이크로광조형), high aspect ratio structure (고 세장비 구조물), clay nanocomposite (클레이 나노 혼합 재료), mechanical strength (기계적 강성)

1. 서론

마이크로광조형 기술이 발달하면서 기계, 바이

오 등 각 부분에서의 연구가 활발히 진행되고 있다. Bertsch^{1,2}는 마이크로 유체 믹서와 스프링을 광조형을 이용하여 제작하였으며 Kang³은 마이크로

접수일: 2007년 8월 31일; 게재승인일: 2007년 10월 23일

* 부산대학교 대학원 지능기계공학과

** 부산대학교 기계기술연구소

*** 부산대학교 고분자공학과

교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail: sehlee@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2327

ABO 혈액 타입 검사 시스템을 제작하였다. 또한 Maruo⁴는 회전할 수 있는 자유도를 가진 마이크로 기어를 제작하였으며, Wu⁵는 High pass filter를 광조형을 이용해 제작하였다. 이와 같은 구조물의 특징은 복잡한 3D 형상을 가지고 있으며 마이크로광조형은 3차원 구조물 제작에 용이한 방법이다.

현재 마이크로 및 나노 구조물을 제작하기 위한 방법인 MEMS와 LIGA와 같은 방법은 3차원 구조물을 제작에 대해서 공정 상의 한계를 가진다. 그러나 마이크로광조형 기술은 기존의 패스 조형 방식과 기본적인 원리는 동일하며 3D CAD 모델을 슬라이싱하여 2D 단면 이미지를 생성하여 가공하기 때문에 다른 가공 방법보다 3D 구조물 가공에 있어서 이점을 가질 수 있다. 또한 MEMS와 같이 PR(photoresist) 두께에 따른 구조물의 높이가 결정되는 것이 아니라 한 층의 두께와 적층 수에 따라 결정되기 때문에 고 세장비 구조물 가공에 유용하다. 그러나 이 가공의 단점 중 하나는 재료의 한정성에 있다. 광경화를 사용하는 조건을 만족하기 위한 재료는 기본 재료인 모노머와 UV에 대해 반응하는 광개시제가 사용되어야 한다. 모노머는 광개시제가 반응하여 폴리머가 되기 위해 탄소 이중 결합구조를 가지고 있어야 한다. 그러나 일부 모노머들이 이러한 조건을 만족하므로 재료의 선정은 범위가 제한되고 모노머의 기계적 특성 및 가공 특성이 차이가 있으므로 구조물의 특성을 다양하게 가져가기 힘들다.

재료의 강성 문제는 구조물의 기능성뿐만 아니라 가공성에도 영향을 미친다. 고 세장비 구조물을 집적화하여 제작할 경우 수지에 잠긴 상태의 구조물은 변형이 크지 않다. 그러나 가공 이후 경화된 영역 주변의 수지를 제거하기 위한 세척 과정에서 수지 및 세척액의 유동으로 인한 문제점이 발생한다. 이러한 현상은 세척 과정에서 사용되는 알코올이나 아세톤이 수지를 용해시키면서 구조물 사이의 벽을 흘러내리면서 발생한 에너지가 구조물에 변형을 일으킨다. 이와 관련하여 Mastrangelo^{6, 7}는 surface micromachining을 이용한 구조물에서 발생하는 모세관 현상에 의해 구조물이 변형되는 것을 이론적 전개와 실험 결과를 발표하였다. Hwang⁸은 마이크로 캔틸레버 빔을 제작하는 공정에서 발생하는 stiction problem을 해결하기 위해 포토레지스트 회생층을 이용하였다. 또한 S. Lucas⁹는 polysilicon을 이용한 마이크로 캔틸레버 스위치 제

작에 있어 지지층과 외팔보 간격에서 stiction problem이 발생하였다. 이러한 현상을 Wu⁵는 세척 과정 조건에서 발생하는 에너지와 시편이 붙는 현상의 관계를 수학적 모델링을 통해 나타내었다. 이는 재료의 탄성계수가 높을수록 재료의 변형이 적게 생긴다는 결론을 가질 수 있다.

현재 폴리머에 관한 연구 중 수지의 물성을 향상 시키기 위해 clay, silica, glass fiber 등을 활용하는 연구가 진행되고 있다. Zeng¹⁰은 clay를 기본으로 한 고분자 nanocomposite에 대한 합성 방법, 강도, 열적 성질, 생체 적합성 그리고 응용 분야 등을 광범위하게 기술하였으며, Liu¹¹는 Polyamide66과 clay를 혼합하여 인장 강도와 탄성계수가 증가하는 결과를 발표하였고, Sheng¹²은 Polymer/Clay 복합 수지에서 clay가 물성을 향상시키는 효과를 수학적 모델링과 유한 요소 해석을 사용하여 가시적인 결과를 나타내었다. 이러한 고분자의 물성 향상 방법은 마이크로광조형에 사용되는 수지에 적용하여 세척 과정 중 구조물 변형을 줄일 수 있다. 따라서 고 세장비를 가지는 구조물의 간격을 좁힐 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 상용 SLA 광경화성 수지인 SOMOS11120TM(DSM, Inc.)과 점도를 낮추기 위한 저 점도 모노머 Isobornyl acrylate(IBXA)를 7:3 비율로 혼합한 수지로 가공 중 재료의 탄성계수와 세척 과정에서 발생하는 힘을 계산하기 위한 시편을 제작한다. 또한 상용 해석 프로그램 ANSYS를 사용하여 하중에 대한 변위를 만족하기 위한 재료의 탄성계수를 계산하여 예측하고, 예측된 탄성계수를 만족하기 위해 clay를 사용하여 0~1 wt%로 혼합한 수지의 기계적 물성을 인장 시험을 통해 획득한다. 또한 물성이 향상된 수지를 사용하여 고 세장비 구조물의 가공 시 구조물의 변형이 일어나지 않고 근접한 구조물을 가공한다.

2. 마이크로 광 조형

2.1 시스템 및 가공 방법

본 연구에서 사용된 시스템의 구성은 Fig. 1과 같으며 UV 램프는 EXPO사의 OmniCureTM S2000을 사용하였고 대물 렌즈는 Nikon사의 CFI Plan Fluor 10X를 사용하였다.

마이크로광조형 기술은 Fig. 2에 나타난 가공 순서를 가진다. 3D CAD 모델을 STL 파일로 변환

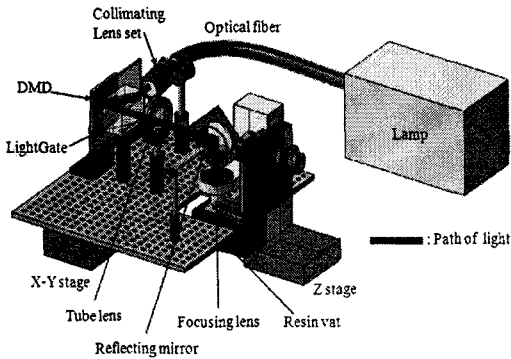


Fig. 1 Schematic of microstereolithography system¹³

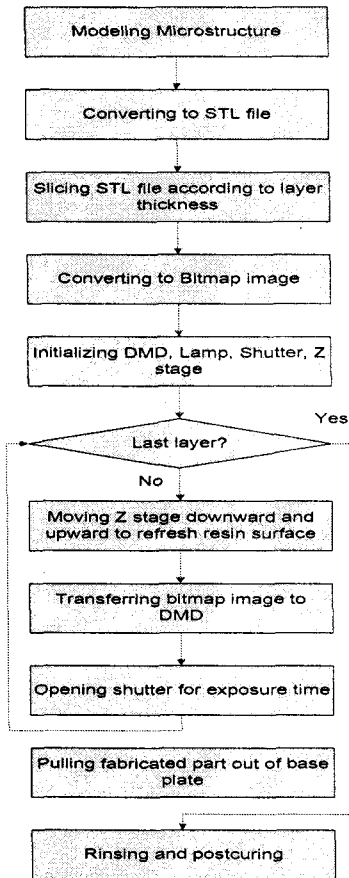


Fig. 2 Flow chart of microstereolithography fabrication¹⁴

하여 2D bitmap 이미지를 얻기 위해 슬라이싱을 한다. Bitmap 이미지는 DMD(Digital Micromirror Device)로 전송하여 패턴을 생성시키고 UV 램프를

사용한 광원이 DMD 에서 반사되어 광학계를 거치면서 수지 표면에 조사된다. 한 층을 경화한 후 Z 스테이지가 하강, 상승하면서 자유 표면을 위한 대기 시간을 가지고 위와 같은 작업을 반복하여 최종 3D 구조물을 제작한다.

2.2 세척 과정과 구조물 변형의 관계

마이크로광조형 가공은 가공 후 세척과정에서 구조물의 변형이 일어난다. 이는 세척액의 영향이며 특히 고 세장비 구조물의 가공은 가공 후 경화된 구조물 주위의 잔여 수지들을 제거하는 세척액의 증발 시 발생하는 모세관 현상에 의한 힘으로 인해 구조물이 변형을 일으켜 서로 붙는 현상이 나타난다. 약 2mm 높이를 갖는 마이크로 니들 구조물은 Fig. 3 과 같이 위와 같은 이유로 변형이 발생하였다. 이와 같은 현상들은 고 세장비 구조물을 가공에 장애 요소가 된다.

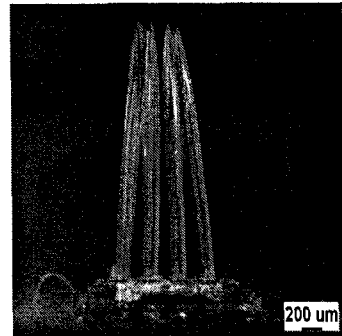


Fig. 3 Example of deformed microstructure fabricated in microstereolithography

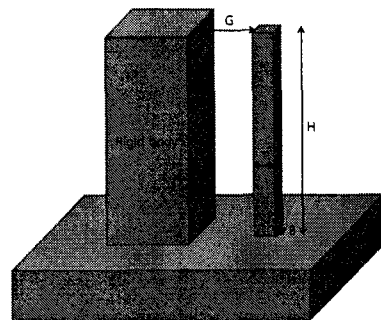


Fig. 4 Specimen for finding Young's modulus of resin

세척 시 구조물에 발생하는 하중과 탄성계수의

계산을 위해 Fig. 4 와 같은 구조물간 거리(G), 높이(H), 세로(B), 두께(T)인 시편을 제작하였다. 변위를 확인하기 위한 시편은 강체 구조물과의 거리를 고정시켜 가공하였다. 한 쌍의 고 세장비 구조물에서 형상과 하중은 대칭이며 세척 시 변위를 일으키는 모든 에너지 발생 범위를 구조물 사이이며 이를 외력으로 가정하면 Fig. 5 와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 현상을 외팔보의 처짐으로 간주하여 다음 Eq. (1)을 사용하였다. y 는 하중에 의한 변위이며 E 와 I 는 각각 재료의 탄성계수와 관성 모멘트이다.

$$y = \frac{-w_a}{24EI}(l-a)^3(3l-a) - \frac{w_l - w_a}{120EI}(l-a)^3(4l+a) \quad (1)$$

$$y_{\max} = \frac{-wl^4}{8EI} \quad (w = w_a = w_b) \quad (2)$$

하중은 w_a 와 w_l 이 같은 균일 분포하중이고 a 는 0 이므로 최대 처짐, y_{\max} 는 Eq. (2)와 같다. 여기서 탄성계수가 향상된 재료를 사용하면 세척 과정에서 발생하는 변위를 줄일 수 있다.

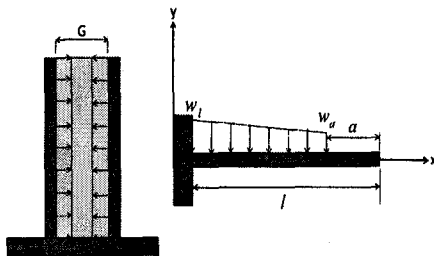


Fig. 5 Schematic of condition by structure gap and resin

본 연구에서는 가공 중 재료의 탄성계수를 실험적 방법으로 측정할 수 없으므로 동일한 구조물 사이 거리를 가진 두께가 다른 시편의 변위를 측정하고 Eq. (2)에 대입하여 탄성계수와 외력을 예측하였다. 가공 중 재료의 탄성계수는 완전 경화 조건이 아니므로 인장 시험 물성치를 적용시킬 수 없다. 그러므로 완전 경화 조건 물성에서 10% 단위로 줄이면서 계산되는 하중을 다른 시편에 적용시켜 가공 중 탄성 계수와 하중을 계산하였다. 계산에 사용된 시편은 Table 1 과 같으며 세척 시 발생한 변위가 탄성 영역 내에서 발생한 구조물이다.

계산된 하중과 탄성계수를 이용하여 변형을 발

생시키지 않는 물성치의 범위를 파악하기 위해 Fig. 6 과 같이 유한 요소 해석을 사용하여 계산된 하중을 적용하고 탄성계수를 초기값으로 하여 증가시키면서 구조물이 G/2 이상의 변형이 발생하지 않기 위해 재료가 가져야 하는 탄성계수의 최소치를 파악하였다. E_p 는 인장 실험 결과에 따른 완전 경화 조건의 탄성 계수이며, W_f 와 E_b , E_r 은 각각 가공 중 하중 및 탄성계수, 변형이 발생하지 않기 위해 요구되는 탄성계수를 나타낸다. 계산된 가공 중 탄성계수와 하중은 각각 678MPa, 561.38kPa 이다. 또한 높이, 폭, 두께가 각각 145 μ m, 145 μ m, 1mm 를 가지는 구조물이 150 μ m 간격으로 변형이 없이 제작되기 위해서는 탄성 계수가 3500MPa 이상이 되어야 한다. 그러나 완전 경화 조건 물성 범위인 1100MPa 을 넘는 수치이므로 현재 수지를 사용하여 만족하는 구조물 제작은 불가능하다. 사용된 재료인 SOMOS11120/IBXA 혼합 수지는 기준 B, 145 μ m 에 대해 T 가 300 μ m 인 시편이 G/2 에 대한 조건을 만족하였다.

Table 1 Specimen size and Displacement

No.	T (μ m)	B (μ m)	H (μ m)	G (μ m)	Displacement (μ m)
1	240	145	1000	155	88.3
2	305	145	1000	155	43.8

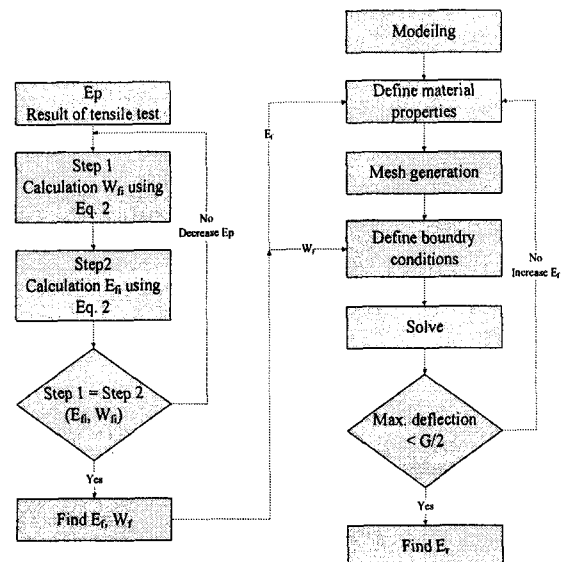


Fig. 6 Flowchart for finding required Young modulus

3. 재료 및 제작

3.1 Clay 복합 수치

기계적 물성이 부족한 고분자의 물성 향상을 위해 본 연구에서는 clay 를 사용하였다. 사용된 clay 는 Southern Clay Product 의 Cloisite® 20A 이다. clay 는 약 1nm 두께를 가지며 길이가 70~150nm 로 적층 구조이며 면적이 750m²/gram 로 구 형태의 입자를 가지는 silica 에 비해 크다. 그러므로 구조물 제작 후 하중이 가해지는 조건에서 견디는 효과를 나타낼 수 있다. Clay 의 물성은 기본 수치와 비교하여 매우 높은 기계적 강성을 가진다. 사용한 clay 인 Cloisite® 20A (MMT : montmorillonite)의 기계적 특성은 탄성계수가 170GPa 로 7:3 비율의 SOMOS11120(DSM,Inc)/IBXA 혼합물보다 높으며 SOMOS11120 보다 약 60 배 이상 높다. 효과적인 복합 수지를 만들기 위해서는 clay 의 분산이 매우 중요하다. Clay 의 분산 정도는 재료 물성에 영향을 준다. 즉, 고르지 못한 분산은 재료 물성을 저하시키고 입자의 크기가 작아질수록 재료 물성은 향상된다.

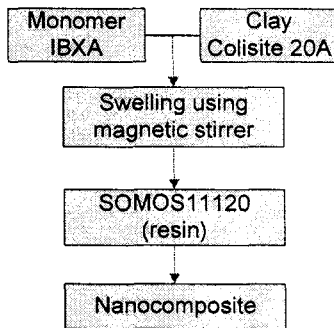


Fig. 7 Fabrication flow chart of nanocomposite using in-situ polymerization

판상 구조가 적층 되어있는 구조는 판과 판 사이 Vandervals 힘이 존재한다. 그러므로 분산을 위해서는 판 사이의 거리를 넓혀 모노머를 삽입하는 과정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 7 과 같은 in-situ polymerization 방법을 사용하였다. 저 점도 모노머인 IBXA 15g 과 clay 를 각각 0.2~1 wt%로 2 시간 동안 혼합한다. 이 과정에서 모노머들은 Vandervals 힘이 존재하는 공간으로 침투하여 판과 판 사이의 거리를 넓히는 역할을 한다. 그 후

고점도 상용수지인 SOMOS11120 을 혼합하여 2 시간 교반한다.

마이크로광조형 가공에 있어 수지의 점도는 매우 큰 영향을 준다. 적층하는 과정에서 한 층이 경화되고 다음 층을 만들기 위해 스테이지는 하강과 상승을 반복한다. 그 이유는 다음 층의 경화를 위해 자유 표면을 만들어야 하기 때문이다. 이때 점도가 높은 재료는 자유 표면을 만들기 어려우므로 구조물 가공에 어려움이 따르게 된다. 또한 점도가 높은 수지는 스테이지 상승 및 하강 과정에 있어 유동에 의한 구조물에 손상을 줄 수 있다. 그리고 세척 시에는 세척액과 함께 수지가 흘러내리면서 점도가 낮은 수치보다 구조물의 표면에서의 에너지가 더 크게 발생된다. 그러므로 본 연구에서는 clay 의 비율을 1wt%이내로 정하였으며 25℃ 상온에서 각 clay 비율에 따른 복합 수지의 점도 증가는 Fig. 8 과 같다.

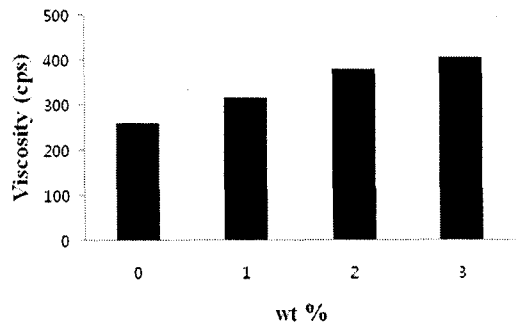


Fig. 8 Viscosity of the Clay composites at 25℃

3.2 기계적 강성

Clay 복합 수치와 마이크로 광 조형에서 사용되는 SOMOS11120 과 IBXA 의 7:3 의 기계적 강성을 비교하기 위해 테프론 몰드를 제작하여 UV 램프를 이용하여 시편을 만들고 인장 시험을 실시하였다. 시편의 규격으로 ASTM D638 을 따라 제작하였으며 인장 시험은 Daekyung Tech 사의 DTU-900MH 0.5T 만능시험기를 사용하였다.

Clay 혼합 비율에 따른 탄성 계수의 증가는 Fig. 9 와 같다. 인장 강도는 Clay 혼합 비율에 따라 증가하는 경향을 볼 수 없었으나 Fig. 10 과 같이 0.2wt%에서 0.8wt% 영역에서 약 20% 증가하였다. 그러나 탄성 계수는 clay 혼합 비율에 따라 0.2wt%에서 0.8wt% 영역에서 점차적으로 증가하는 경향

을 나타내었다. 가공에 사용된 SOMOS11120/BXA 혼합 수지는 인장 강도와 탄성 계수가 각각 30MPa, 1100MPa 로 나타났으며, Clay 복합 수지의 경우 0.8wt%의 수지가 인장 강도와 탄성계수가 각각 36.3MPa, 1690MPa 로 인장 강도는 19.3%, 탄성계수는 약 52% 향상 되었다.

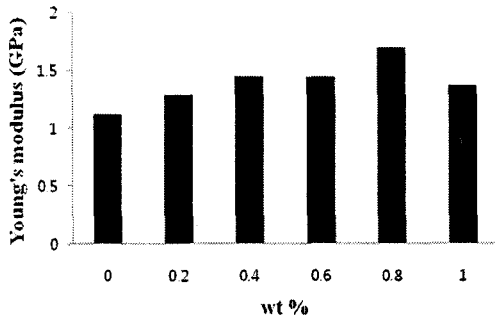


Fig. 9 Young's modulus of the Clay composites

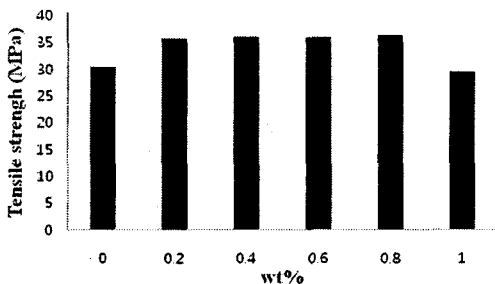


Fig. 10 Tensile strength of the Clay composites

4. 고 세장비 구조물 제작

마이크로광조형에서 하나의 고 세장비 구조물을 제작하는 것은 비교적 용이하다. 그러나 구조물의 거리가 근접하게 제작될수록 구조물의 변형이 발생한다. 본 연구에서는 Fig. 4 와 같은 테스트 구조물을 만들어 각 거리간 구조물의 변위를 파악하여 재료 물성 개선을 통한 집적화를 구현하였다.

가공 조건은 적층 두께 25 μ m, 한 층에 대한 광노출 시간 2.5s 이다. 또한 자유 표면을 이루기 위한 대기 시간은 30s 로 하였다. 세척 조건은 구조물 가공 후 잔여 수지를 제거하기 위해 구조물이 가공된 슬라이드 글라스를 Isopropyl alcohol 에 100s 간 넣고 세척을 하였다.

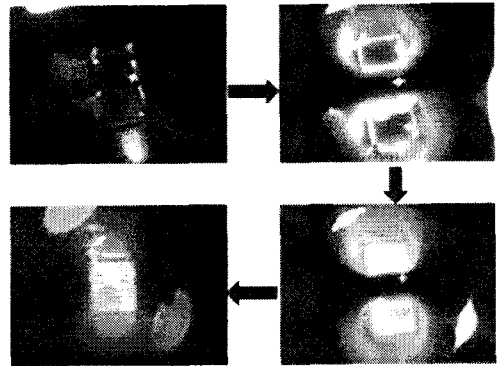


Fig. 11 Attachment steps during rinsing process

구조물이 완전히 세척되기 전 형태는 현미경 (LEICA DFC 280)으로 측정한 폭 및 두께가 각각 100 μ m, 70 μ m 인 구조물 가공 및 세척 결과와 다음과 같다. 가공 완료 후 구조물은 Fig. 11 과 같이 수지 유동의 영향을 받아 붙는 현상이 발생한다. 그러나 Isopropyl alcohol 이 수지를 씻어내면서 표면의 에너지를 완화시켜 구조물의 형상이 복원되고, 구조물 주위의 세척액이 빠지면서 다시 변위가 발생하였다. 최종 구조물은 탄성한도를 벗어나 끝단이 붙는 현상이 발생하였다. 탄성한도 내에서의 변위는 복원이 되지만 그 이상에서는 회복하지 못하고 영구 변형이 생기거나 표면에서의 에너지 영향으로 구조물들이 붙는 현상이 발생한다.

위와 같은 현상을 측정하기 위한 구조물을 구조물간 거리(G) 155 μ m, 높이(H) 1mm, 세로(B) 145 μ m 인 구조물을 가로 방향 치수(T)를 증가시켜 탄성 회복이 되는 구조물의 두께를 확인하였다. 그 결과 Fig. 12(a)와 같이 SOMOS11120/IBXA 혼합 수지는 T 의 치수가 145~225 μ m 인 구조물들은 초기에 근접한 벽과 붙는 현상이 발생하였으며 수지가 제거된 후에도 영구 변형이 발생하였다. T 가 240 μ m 이상인 구조물에서는 변위가 발생하였지만 탄성 영역 내의 변위로 세척 후 구조물의 변형이 없는 것으로 판단되었다. 그러나 240 μ m 인 구조물은 변위가 80 μ m(>G/2)이상이므로 동일한 구조물이 근접하여 존재할 때 Fig. 12(a)와 같은 현상을 나타낼 수 있으므로 고 세장비 구조물에 적합하지 못하며 이 조건을 만족하기 위해서는 Fig. 12(b)와 같이 T 가 300 μ m 이상이 되어야 한다.

Clay 를 0.8 wt% 혼합시킨 수지는 탄성 계수가 1690MPa 이며 같은 비율의 가공 중 탄성 계수를

가질 경우 이론적으로 T의 값을 220 μm 의 두께까지 가능한 결과를 얻었다. 이러한 결과를 사용하여 Fig. 13(b)와 같이 원기둥 형상을 제작해본 결과 지름 170 μm , 높이 1mm, 간격 150 μm 의 구조물이 하나의 지지층 위에 clay 혼합 수지를 사용한 가공은 3 by 3 배열 구조로 변형 없이 가공 및 세척되었다. 그러나 Fig. 13(a)의 기존 재료의 가공 결과는 세척 과정에서 변형이 과도하게 발생하였다. 또한 clay를 사용한 수지는 Fig. 14 과같이 간격 100 μm 까지 가공이 가능한 결과를 나타내었다.

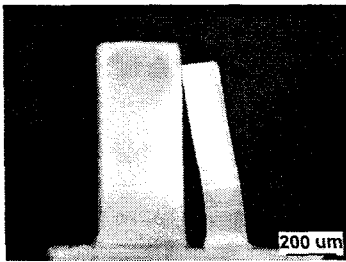


Fig. 12(a) Specimen attachment after rinsing process (T=190 μm)

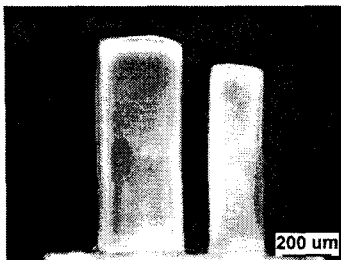


Fig. 12(b) Specimen deformation after rinsing process without attachment (T=305 μm)

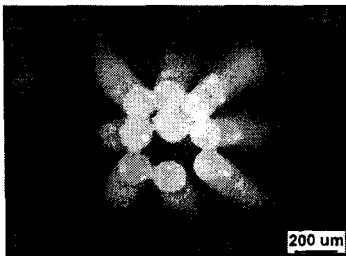


Fig. 13(a) Fabrication of pillar in microstereolithography using SOMOS / IBXA resin (Gap = 150 μm)

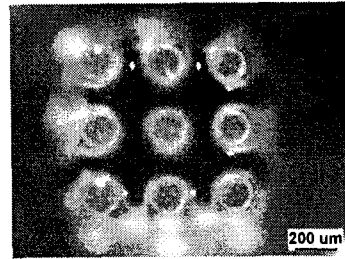


Fig. 13(b) Fabrication of pillar in microstereolithography using clay composite resin (Gap = 150 μm)

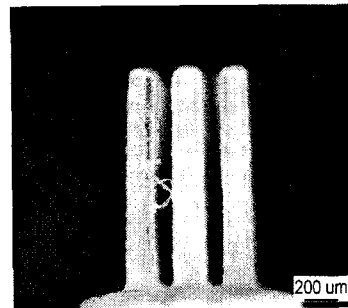


Fig. 14 Fabrication of pillar using clay nano composites (Gap = 100 μm)

5. 결론

본 연구에서는 마이크로광조형의 단점인 제한된 재료를 clay 비율에 따른 정해진 물성을 개선하였으며, 가공 시 재료 강성이 어떤 영향을 미치는가에 대한 결과를 나타내었다. 결과적으로 재료의 강성이 향상됨에 따라 다음과 이점을 가질 수 있다.

첫째, Clay의 사용으로 UV 경화 수지의 강성을 높일 수 있다. SOMOS11120 과 IBXA 의 7:3 혼합 수지의 인장 강도와 탄성계수를 clay 0.8 wt%를 혼합하여 각각 19.3%; 52%를 향상 시켰다.

둘째, 가공 중 탄성 계수는 측정하기에 제한이 있으므로 가공 후 변위를 측정하여 가공 중 탄성 계수와 하중을 예측할 수 있었다. 또한 고 세장비 구조물 가공 시 변위에 상당한 영향을 미치는 관성모멘트에 대한 고려를 통한 형상 및 치수 설계를 해야 한다.

셋째, 향상된 물성의 수지를 사용한 가공은 기존 수지의 집적화 가공을 향상시킬 수 있었다. 기존 수지를 사용한 가공은 지름과 간격이 각각 약

170 μ m, 150 μ m 가지는 구조물에 변형이 생기는 반면 향상된 수지는 간격 100 μ m 까지 변형이 없이 가공되었다.

본 연구 결과에 따라 마이크로광조형 가공은 세척 조건이 무시할 수 없는 영향을 가지고 있으며 고 세장비 구조물을 가공에 앞서 설계 단계에서 가능한 치수를 계산함에 따라 가공에 대한 오류들을 줄일 수 있을 것이다. 이는 재료 이외에 고 세장비 구조물 가공 시 변위에 상당한 영향을 미치는 관성 모멘트에 대한 고려를 통한 형상 및 치수 설계를 해야 한다.

앞으로 기계 및 바이오 분야에서 고 세장비 구조물 가공을 위해 Clay 및 Silica 등의 재료를 혼합한 수지가 마이크로광조형이 응용될 수 있을 것이다. 그러나 clay 복합 수지를 사용할 경우 시간이 지나면서 침전 현상과 가공 후 표면의 상태가 매끄럽지 못한 현상이 발생하여 장시간 가공 및 정밀도에 있어서 단점을 가진다. 그러므로 앞으로 TEOS 와 같은 precursor 를 사용하여 Silica 를 수지 내에서 나노 입자를 생성하여 문제점을 개선할 수 있을 것이라 사료된다. 또한 향후 기능성을 가지는 구조물을 위해서는 기계적 강성 이외에 전기적 성질 및 광학 특성 등의 기능이 추가되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10507-0)와 BK21 사업에 의한 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Bertsch, A., Bernhard, P. and Renaud, P., "Micro stereolithography: Concepts and applications," 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 289-298, 2001.
- Bertsch, A., Bernhard, P., Vogt, C. and Renaud, P., "Rapid prototyping of small size objects," Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 4, pp. 259-266, 2000.
- Kang, H. W., Lee, I. H. and Cho, D. W., "Development of an Assembly-free Process Based on Virtual Environment for Fabricating 3DMicrofluidic Systems Using Micro stereolithography Technology," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, Issue 4, pp. 766-771, 2004.
- Maruo, S. and Ikuta, K., "Submicron stereolithography for the production of freely movable mechanics by using single-photon polymerization," Sensors and Actuators A, Vol. 100, No. 1, pp. 70-76, 2002.
- Wu, D. M., "Micro Fabrication of 3D Structures and Characterization of Molecular Machine," Ph. D. Dissertation, UCLA, 2005.
- Carlos, H. M. and Charles, H. H., "Mechanical Stability and Adhesion of Microstructures Under Capillary Forces-Part I: Basic Theory," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 33-43, 1993.
- Carlos, H. M. and Charles, H. H., "Mechanical Stability and Adhesion of Microstructures Under Capillary Forces-Part I: Experiments," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 44-55, 1993.
- Hwang, S. H. and Song, J. T., "An effective method to prevent stiction problems using a photoresist sacrificial layer," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 17, No. 2, pp. 245-249, 2007.
- Lucas, S., Kis-Sion, K., Pinel, J. and Bonnaud, O., "Polysilicon cantilever beam using surface micromachining technology or application in micro switches," Journal of Micromechanical and Micro-engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 159-161, 1997.
- Zeng, Q. H., Yu, A. B., Lu, G. Q. and Paul, D. R., "Clay-Based Polymer Nanocomposites: Research and Commercial Development," Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 5, No. 10, pp. 1574-1592, 2005.
- Liu, X. and Wu, Q., "Polyamide 66/Clay Nano composites via Melt Intercalation," Macromolecular Materials and Engineering, Vol. 287, No. 3, pp.180-186, 2002.
- Sheng, N., Boyce, M. C., Parks, D. M., Rutledge, G. C., Abes, J. I. and Cohen, R. E., "Multiscale micromechanical modeling of polymer/clay nano composites and the effective clay particle," Journal of Polymer, Vol. 45, No. 2, pp. 487-506, 2004.

13. Choi, J. W., Ha, Y. M. and Lee, S. H., "Fabrication of Microstructure Array using the Projection Microstereolithography System," Journal of KSPE, Vol. 24, No. 8, pp. 138-143, 2007.
14. Choi, J. W., "Development of Projection-based Microstereolithography Apparatus Adapted to Large Surface and Microstructure Fabrication for Human Body Application," Ph. D. Dissertation, PNU, 2007.