

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.4.303

현상공정에서 표면장력에 의한 극미세 3 차원 구조물의 변형거동 분석 및 저감방안에 관한 연구

박 상 후[†] · 양 동 열^{*}

(2007년 5월 14일 접수, 2008년 2월 14일 심사완료)

Investigation into Deformation of Three-Dimensional Microstructures via Surface Tension of a Rinsing Material During a Developing Process

Sang-Hu Park and Dong-Yol Yang

Key Words : Two-Photon Polymerization(이광자 광중합), 3D Pattern Collapse(3 차원 패턴붕괴), Three-Dimensional Microstructure(3 차원 형상), Surface Tension(표면장력)

Abstract

Dense and fine polymer patterns often collapse, as they come into contact with each other at their protruding tips. Resist pattern collapse depends on the aspect ratio of patterns and the surface tension of rinsing materials. The pattern collapse is a very serious problem in microfabrication, because it is one of the factors which limit the device dimensions. The reasons for the pattern collapse are known as the surface tension of rinse liquid, centrifugal force and rinse liquid flow produced in the developing process. In this work, we tried to evaluate the pattern collapse of three-dimensional microstructures that were fabricated by two-photon induced photopolymerization, and showed the way how to reduce the deformation of microstructures.

1. 서 론

최근 새로운 개념의 고부가가치의 상품개발을 위하여 전자/반도체, 정보통신뿐만 아니라 환경, 에너지, 바이오 및 전통적 산업기술 영역까지 나노/마이크로 기술을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 새로운 패러다임으로 유비쿼터스 개념이 자리잡기 시작하여 대용량의 정보를 저장하거나 송수신하기 위한 정보저장장치 등의 극소형 기기에 대한 수요가 급증하고 있으며 이러한 제품의 기반이 되는 새로운 고집적 디바이스 개발에 대한 요구가 가속화되고 있다.

최근에는 다양한 초정밀 제작기술 중에서 기존의 반도체 리소그래피 공정 기술로는 제작이 불가능

하거나 어려운 완전한 3 차원 형상제작을 위하여 이광자 흡수 광중합(two-photon polymerization; TPP) 현상을 이용하여 100 nm 수준의 정밀도를 가지며 3 차원 형상을 직접적으로 제작할 수 있는 공정이 개발되었다.⁽¹⁻¹²⁾ 이광자 흡수 광중합 현상은 고출력 레이저에 의한 비선형 광학현상으로 800 nm 파장을 가지는 펄스 레이저의 높은 첨두 출력(peak power) 부근에서 두 개의 광자를 동시에(10^{-15} sec 이내) 흡수하여 자외선 파장($\lambda = 400$ nm)에서 광중합 되는 레진(resin)이 중합되어 고체상태로 변환되는 현상인데 빔의 회절한계 이하의 정밀도로 제작이 가능하다. 또한, 이 공정을 응용하여 다양한 세라믹 전구체(ceramic precursor)로 수 마이크로 크기의 3 차원 세라믹 형상이나 이온화된 금속 전구체로 금속 형상도 직접적으로 제작할 수 있다.^(13,14) 이러한 극미세 3 차원 형상의 응용분야는 3 차원 광결정체(3D photonic crystal) 제작, 고밀도 정보저장 장치, 3 차원 채널 등 다양하며, 앞으로도 더욱 증가할 것으로 사료된다.

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 정밀금형 및 금형가공연구소 (ERC)/ 부산대학교 기계공학부

E-mail : sanghu@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-1011 FAX : (051)514-0685

* 한국과학기술원 기계공학과

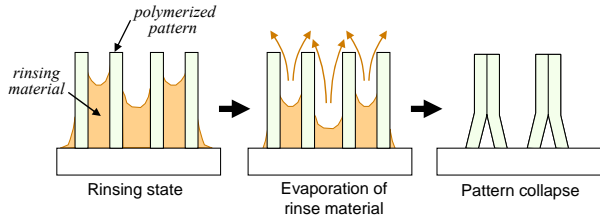


Fig. 1 Schematic illustration of the mechanism of pattern collapse during a developing process

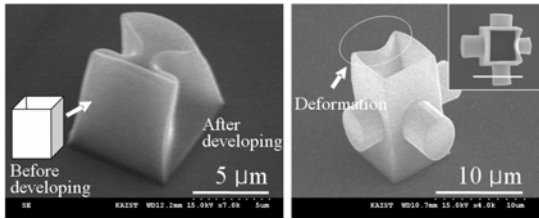


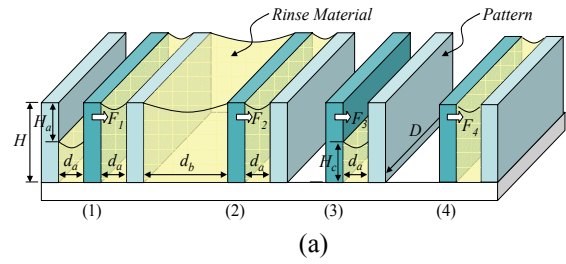
Fig. 2 SEM images of 3D pattern collapse after a developing process: rectangular shell structures

그런데 이러한 극미세 3 차원 제작기술이 실제 공정에서 활용되기 위해서는 해결해야 될 몇 가지의 문제점이 아직 남아있다. 그 중에서도 형상을 제작한 후 주변에 남아 있는 단량체(monomer)를 제거하는 과정에서 현상액(rinsing material)의 표면장력에 의하여 변형이 발생하는 문제는 정밀한 형상제작을 위해서 반드시 해결해야 될 과제이다. 본 연구에서는 정밀한 극미세 3 차원 형상을 제작하기 위해서 이러한 현상공정(development process)에서의 변형 문제에 대한 이론적 분석과 변형저감을 위한 방안을 알아보았다.

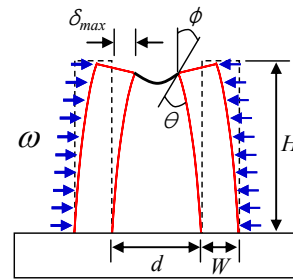
2. 표면장력에 의한 패턴변형

일반적으로 리소그래피(lithography) 공정에서 광중합 과정으로 패턴을 제작한 뒤 현상액을 이용하여 제작된 패턴 주변에 남아있는 물질을 제거하고 원하는 형상을 얻게 되는데 이때 현상액의 유동이나 증발시 표면장력에 의하여 제작된 패턴을 당기게 되어 변형되거나 파손이 발생하게 된다. Fig. 1 는 현상액 증발시 표면장력에 인한 패턴변형 메커니즘을 도식적으로 나타낸 것이다.

이러한 패턴변형 현상은 패턴의 세장비(aspect ratio)가 클수록 또한, 형상이 복잡하고 패턴 사이의 간격이 조밀할수록 쉽게 발생한다. 또한 극미세 3 차원 형상의 경우에는 대체적으로 단순한 2 차원 형상에 비하여 매우 복잡한 구조를 가지기 때문에 이러한 문제가 더욱 심각하게 발생하여 정밀한 형상을 만드는데 걸림돌이 된다. Fig. 2 는



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Four cases between pattern and rinsing material; which may lead to collapse by producing a net force as shown. (b) Schematic diagram of the pattern sway

현상액의 표면장력에 의해 변형이 발생한 3 차원 구조물의 사례를 나타낸 것인데 전체 또는 강성이 약한 특정부위에서 변형이 쉽게 발생함을 알 수 있다.

3. 공정변수 영향도 분석

3.1 빔 변형해석 모델

현상공정에서 발생하는 표면장력에 의한 패턴변형에 대한 공정변수를 알아보기 위하여 Tanaka 등이 제안한 빔 변형모델(beam sway model)을 이용하였다.⁽¹⁵⁾ 두 개의 2 차원 패턴과 현상액 사이의 물리적 관계에 의하여 생성되는 변형거동이기 때문에 먼저 다양한 조건에 대하여 패턴변형에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3(a)와 같이 패턴과 현상액 상태의 네 가지 조건에 대하여 패턴에 작용하는 힘을 구해 보았다: (1) 패턴의 한쪽은 현상액이 일부 존재하고 다른 쪽은 완전하게 존재하는 경우; (2) 패턴의 양쪽에 현상액이 완전하게 존재하고 있으며 양쪽의 패턴 간격이 차이가 있는 경우; (3) 두 패턴의 내부에만 현상액이 일부 존재하는 경우; (4) 두 패턴의 사이에 현상액이 완전하게 존재하는 경우. 각각의 조건에 대하여 표면장력에 의하여 발생하는 힘(F)을 구해보면 식 (1) ~ 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_1 = \Delta P \cdot Area = (2\sigma \cos \theta / d_a) \cdot H_a D \quad (1)$$

$$F_2 = \Delta P \cdot Area = 2\sigma \cos \theta (1/d_a - 1/d_b) \cdot HD \quad (2)$$

$$F_3 = \Delta P \cdot Area = (2\sigma \cos \theta / d_a) \cdot H_c D \quad (3)$$

$$F_4 = \Delta P \cdot Area = (2\sigma \cos \theta / d_a) \cdot HD \quad (4)$$

여기서 ΔP 는 영-라플라스 식 (Young-Laplace equation)에 의해서 두 패턴 사이에 발생하는 압력차를 의미하며, θ 는 패턴과 현상액 사이의 접촉각(contact angle), 그리고 d 는 패턴 사이의 간격을 나타낸 것이다. 그리고 σ 는 현상액의 표면장력을 의미한다.

접촉각이 일정할 때 패턴변형을 발생시키는 힘은 네 번째 경우가 가장 크게 발생한다. 이 조건은 실제 극미세 3 차원 형상제작시 가장 빈번하게 발생하는 조건과 유사한 것으로 좁은 패턴 사이에만 현상액이 증발되지 않고 남아있고 패턴 주변에는 현상액이 모두 증발되어 제거가 된 상태이다. 따라서 네 번째의 경우에 대하여 빔 변형모델을 적용하여 Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 최대 변형발생에 따른 공정변수 조건을 검토해 보고 극미세 3 차원 형상제작시 현상액에 의한 변형저감 방안을 알아보았다. Fig. 3(b)에서 패턴의 높이에 따른 분포하중(ω)은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다. 또한 빔이론(beam theory)을 이용하여 식 (6) ~ 식 (8)의 관계식을 구할 수 있으며 식 (6)에 관계식들을 대입하여 정리하면 최대 변형량(δ_{max})을 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$\omega = \frac{F}{H} = \Delta P \cdot D = \frac{2\sigma D \cos(\theta - \phi)}{d - 2\delta_{max}} \quad (5)$$

$$\delta_{max} = \frac{\omega H^4}{8EI} \quad (6)$$

$$\tan \phi = \frac{\omega H^3}{6EI} \quad (7)$$

$$I = \frac{DW^3}{12} \quad (8)$$

$$\delta_{max} = \left(\frac{d}{4} - \frac{\sigma H^3 \sin \theta}{EW^3} \right) - \sqrt{\left(\frac{d}{4} - \frac{\sigma H^3 \sin \theta}{EW^3} \right)^2 - \left(\frac{3\sigma H^4 \cos \theta}{2EW^3} \right)} \quad (9)$$

얻어진 식 (9)에서 해의 성립조건을 이용하여 식 (10)과 같이 나타내면 패턴 변형이 발생하는 패턴의 임계두께 (W_{cr})를 구해보면 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$\left(\frac{d}{4} - \frac{\sigma H^3 \sin \theta}{EW^3} \right)^2 \geq \left(\frac{3\sigma H^4 \cos \theta}{2EW^3} \right) \quad (10)$$

$$W_{cr} = \left(\frac{24\sigma H^4}{Ed^2} \right)^{1/3} \quad (11)$$

구해진 식 (11)과 빔 변형모델의 신뢰성을 검토해 보기 위하여 기존연구에서 수행한 실험결과와 비교해 보았다. 실험에서는 다양한 패턴 형상(높이: H 와 폭: L)과 패턴 사이의 간격(S)에 대하여 패턴제작 후 탈이온화된 물(DI water)로 상온에서 현상을 할 때 조건에 따라 생성되는 패턴붕괴에 대한 실험결과이다. 패턴제작에 사용된 광경화 물질은 novolak 레진을 사용하였고, 현상액의 표면장력(σ)은 72.28 dyn/cm 이다. Table 1 에는 패턴붕괴에 대한 실험결과와 식 (11)에서 구한 임계 패턴두께를 비교하였는데 임계두께보다 패턴두께 (L)가 작은 경우에 모두 변형이 발생하여 이론과 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다.⁽¹⁶⁾ 따라서 빔 변형모델과 이론적으로 구한 임계 패턴 두께 (W_{cr})가 신뢰성을 가진다고 판단된다.

3.2 공정조건에 따른 영향도

표면장력에 의한 패턴변형 방지를 위한 패턴 임계두께의 패턴형상과 패턴간격에 따른 변화를 식 (11)을 이용하여 알아보았다. Fig. 4 에 나타난 것처럼 패턴이 높이가 클수록 또한 패턴 사이의 간격이 좁을수록 임계두께가 커짐을 알 수 있다[현상액으로 탈이온화 된 수용액(DI water)을 사용]. 해석결과에서 패턴 사이의 간격보다는 패턴의 높이가 증가할수록 표면장력에 의한 변형이 발생할 가능성이 매우 높아짐을 알 수 있다. 따라서 2 차원 평면 데이터의 윤곽선을 경화시켜서 적층방식으로 극미세 3 차원 형상을 제작하는 경우 일반적으로 형상의 세장비가 크기 때문에 형상제작 정밀도에 영향을 주지 않은 조건에서 패턴변형 방지를 위한 패턴두께의 증가방법이 필수적으로 요구된다. 패턴두께(W)를 증가할 경우 식 (11)에 나타난 바와 같이 동일한 패턴간격에서 $W \propto H^{4/3}$ 의 관계가 있기 때문에 패턴의 높이(H)를 더욱 증대시킬 수 있다. 따라서 세장비가 큰 3 차원 구조물 제작시 패턴의 두께증가는 매우 효과적임을 이론적으로 알 수 있다.

또한 패턴의 형상과 패턴 간격이 일정할 때 변형저감을 위한 현상액의 표면장력에 의한 변형량 (δ_{max})을 알아보면 Fig. 5 와 같이 나타난다. 현상액의 표면장력이 증가할수록 급격하게 패턴의 변형량이 증가함을 알 수 있다. 그런데 일반적으로 표면장력이 작은 현상액의 경우 가격이 고가이기 때문에 패턴변형 저감을 위하여 표면장력이 낮은

Table 1 Relationship between resolution of experimental results and critical pattern thickness⁽¹⁶⁾

Experimental Results				Theoretical Results	Comparison
$H(\mu\text{m})$	$S(\mu\text{m})$	$L(\mu\text{m})$	Results	$W_{cr}(\mu\text{m})$	$L > W_{cr}$
2.0	0.4	0.4	OK	0.30	Yes
2.0	0.3	0.3	Collapse	0.37	No
2.0	0.6	0.3	OK	0.24	Yes
2.0	0.4	0.2	Collapse	0.24	No
1.5	0.3	0.3	OK	0.26	Yes
1.5	0.4	0.2	Collapse	0.21	No
1.5	0.6	0.2	OK	0.16	Yes
1.0	0.2	0.2	OK	0.19	Yes
1.0	0.15	0.15	Collapse	0.24	No
1.0	0.3	0.15	OK	0.15	Equal

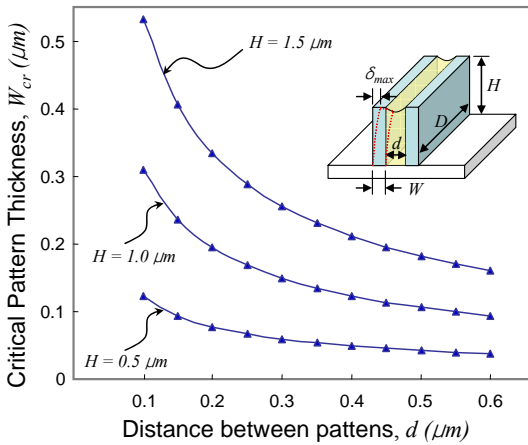


Fig. 4 Variation of critical pattern thickness (W_{cr}) according to pattern shape parameters: height and space between patterns

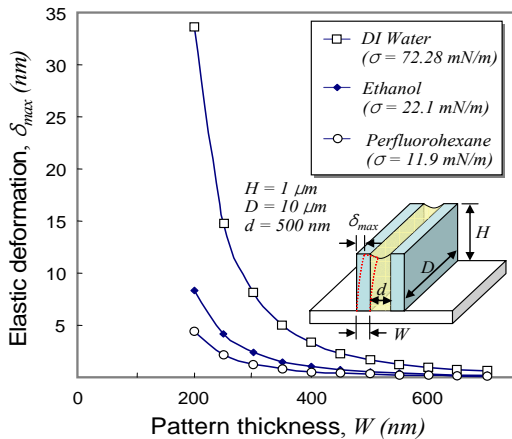


Fig. 5 Elastic deformation of patterns depending on various rinse-materials

현상액을 이용하는 것은 경제적인 방법은 되지 못한다. 따라서 세장비가 큰 3 차원 패턴을 제작할 경우 정밀한 형상제작이 가능하면서 패턴의 두께를 증가시키는 새로운 방법에 대한 연구가 필요하다.

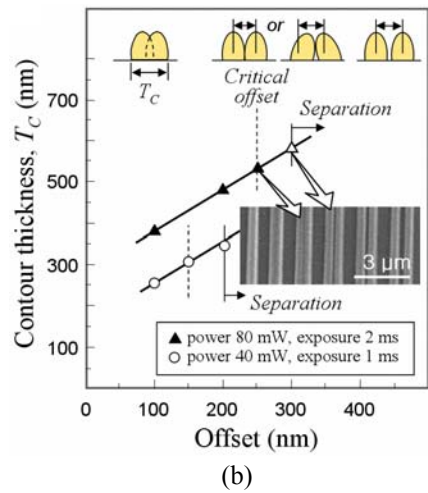
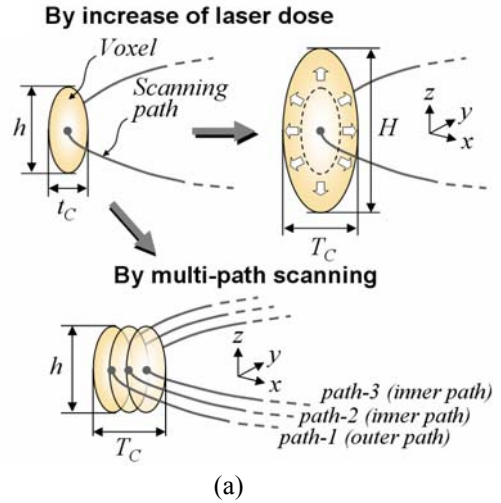


Fig. 6 (a) Schematic illustration of the difference between two approaches to increase contour thickness; by increase of laser dose and by multi-path scanning. (b) The variation of the contour thickness with respect to offset for two cases of laser power 80 mW and exposure time of 2 ms, and laser power of 40 mW and exposure time of 1 ms

4. 극미세 3 차원 패턴의 강성증대

4.1 다중 윤곽선 스캐닝법

이광자 광중합에 의하여 3 차원 형상을 제작할 경우 크게 두 가지의 레이저 스캐닝법으로 분류가 된다. 첫째는 2 차원 단면의 전면을 레이저로 조사하여 경화시킨 뒤 적층하여 형상을 제작하는 방식이다(전면 스캐닝법). 이러한 경우 형상의 강성은 높아지지만 전면 조사에 따른 제작시간이 길어 제작효율이 매우 낮다. 따라서 일반적으로 형상의 외곽선만 광중합으로 경화시켜서 형상을 완

성한 뒤 필요에 따라 자외선(ultraviolet)을 조사하여 형상의 내부에 남아있는 단량체를 광중합 시켜 제작하는 방법(윤곽선 스캐닝법)을 사용한다. 하지만 윤곽선 스캐닝법으로 형상을 제작할 경우 앞서 기술한 현상공정에서 현상액의 표면장력에 의하여 변형이 쉽게 발생할 수 있다. 따라서 다중 윤곽선 스캐닝법을 이용하여 형상의 정밀도에는 큰 영향을 주지 않으면서 윤곽선의 패턴 두께를 증가시켜서 현상액의 표면장력에 의한 변형을 최소화하는 방법을 제안하였다.

이광자 광중합 공정에서 제작되는 형상의 정밀도는 기본 단위인 타원회전체 모양의 복셀(voxel)의 크기에 따라 결정된다. 광중합이 되는 임계 에너지 부근에서 복셀의 단위 크기와 모양은 레이저의 조사시간과 출력에 따라 결정되며 레이저의 출력이 높을수록 복셀의 길이방향이 증가하고(P-scheme), 레이저의 조사시간이 길어질수록 광중합을 유도하는 라디칼(radical)의 확산에 의하여 복셀의 폭 방향의 증가가 일어난다(T-scheme). 적층 방식으로 정밀한 3차원 형상을 제작하기 위해서는 복셀의 크기를 최소화 하는 것이 중요하며 특히 복셀의 길이방향을 줄여야 적층시 유리하다. 따라서 3차원 형상제작에 유리한 정밀한 복셀을 얻기 위해서는 레이저 조사시간을 어느 정도 크게 둔 상태에서 광중합이 발생하는 상태까지 레이저의 출력을 최소화하고, 최소화된 레이저 출력 상태에서 다시 레이저의 조사시간을 줄여서 전체적인 레이저의 조사량(laser dose)을 줄이는 접근 방식이 필요하다.

현상공정에서 안정된 3차원 형상을 제작하기 위해서는 2차원 단면 윤곽선의 선 폭을 증가시켜야 한다. 가장 간단한 선 폭 증가방법으로는 Fig. 6(a)에 나타낸 것처럼 레이저의 출력과 조사시간을 증가시켜 단위 복셀의 폭을 늘이는 방법이 있다. 그러나 이러한 경우 복셀의 높이도 같이 증가하여 적층방식으로 정밀한 3차원 형상을 제작하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 다중 윤곽선 스캐닝법을 이용하여 원하는 폭만큼을 복셀의 높이 변화 없이 얻을 수 있는 방법을 제안하였다[Fig. 6(a) 참조]. 다중 윤곽선 스캐닝법을 이용하면 복셀의 높이 (h)가 증가하지 않고 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한 윤곽선의 폭(T_c)은 Fig. 6(b)처럼 읍셋 간격에 따라 조절이 가능하지만 일정 읍셋량(critical offset) 이상에서는 윤곽선이 서로 분리되어 강성중대 역할을 할 수 없기 때문에 윤곽선 폭을 더 증가시키기 위해서는 새로운 스캐닝 경로를 생성해야 한다. Fig. 6(b)의 실험결과는 레이저 출력 80 mW, 조사시간 2 ms과 레이저출력 40 mW,

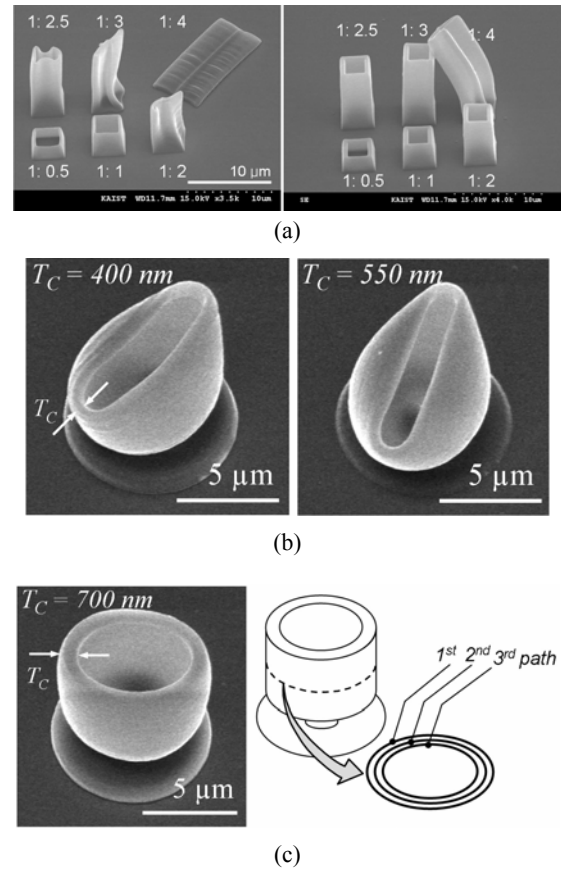


Fig. 7 (a) SEM images of fabricated hollow rectangular columns via single-path scanning method (left) and multi-path scanning method (right). (b) SEM images of micro-cups fabricated under the conditions of single-, double-, and triple-path scanning method (from left to right)

조사시간 1 ms 로 각각 고정하고 읍셋량을 달리하면서 선 폭 증가를 알아 본 것이다.

4.2 극미세 3차원 형상제작

극미세 3차원 형상을 제작하여 다중 윤곽선 스캐닝법의 효과를 검증하였다. Fig. 7(a)와 같이 세장비가 다른 6개의 사각기둥을 개발된 이광자 광중합 공정을 이용하여 제작하였다. 참고로 개발된 시스템과 공정에 관한 자세한 내용은 기존 연구발표에 기술하였다. 레이저 출력 80 mW, 조사시간 1 ms 조건에서 단면 형상이 $4 \times 4 \mu\text{m}$ 이고 높이가 $2 \mu\text{m}$ 에서 $16 \mu\text{m}$ 까지 다르게 제작된 6개의 사각기둥 중에서 단일 윤곽선 스캐닝법으로 제작할 경우(두께 360 nm) 현상공정에서 현상액의 표면장력에 의하여 변형이 쉽게 발생하여 높이가 $4 \mu\text{m}$ 까지만 성공적으로 제작되었다. 그러나 읍셋을 200 nm로 두어 다중 윤곽선 스

캐닝법으로 두께를 560 nm로 증가시켜서 동일한 형태의 사각 기둥들을 제작한 경우 현상공정에서 높이가 12 μm 인 경우까지 제작이 가능하였다. 따라서 두께를 66% 증가시켜서 3 배 정도의 강성이 증가됨을 개략적으로 알 수 있었다.

보다 복잡한 형상을 통하여 다중 윤곽선 스캐닝법의 효과를 알아보기 위하여 Figs. 7(b)와 7(c)에 나타난 것처럼 극미세 포도주 잔을 레이저 출력 90 mW, 조사시간 1 ms 조건에서 제작하였다. 단일 윤곽선 스캐닝법과 이중 윤곽선 스캐닝법 (옵셋량 150 nm)으로 두께를 각각 400 nm와 550 nm로 증가시킨 경우에 변형이 발생함을 알 수 있다 [Fig. 7(b) 참조]. 이러한 경우 Fig. 7(c)와 같이 형상의 내부에 스캐닝 경로를 추가하여 삼중 윤곽선 또는 다중 윤곽선으로 제작하면 해결할 수 있는데 이 경우 이중 윤곽선과 같은 옵셋량 (150 nm)을 주어서 형상의 두께를 700 nm까지 증가시켰으며 두께 증가로 인한 강성증대로 인하여 현상액의 표면장력을 견딜 수 있었다. 임의의 형상에 대한 임계두께를 이론적으로 정확하게 예측하는 것은 매우 어렵지만 극미세 3 차원 형상제작에서 다중 윤곽선 스캐닝법으로 형상의 정밀도에 상관없이 두께를 증가시켜서 강성을 보장하는 방법은 매우 효과적임을 실험적 방법으로 검증하였다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 마이크로 3 차원 형상의 예제를 제작하고 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 이광자 광중합 공정을 이용하여 임의의 3 차원 형상을 제작하는 경우 현상공정에서 현상액의 표면장력에 의하여 패턴이 변형되는 경우가 쉽게 발생하게 된다.

(2) 2 차원 해석 모델을 통하여 패턴 변형 현상을 분석한 결과 패턴의 세장비가 클수록 변형이 쉽게 발생함을 알 수 있다. 따라서 3 차원 형상에서도 세장비가 큰 경우에는 현상공정에서 변형을 저감시키는 것은 정밀한 제작을 위하여 반드시 해결해야 될 문제임을 알 수 있었다.

(3) 이광자 광중합 공정에서 다중 윤곽선 스캐닝 법으로 형상 정밀도의 변화 없이 패턴 두께 증가를 통하여 강성을 증대시킬 수 있음을 보였고 세장비가 다른 사각 기둥 실험에서 66% 두께를 증가시킨 경우 강성이 약 3 배 정도 향상됨을 알 수 있었다.

(4) 본 연구에서 분석한 극미세 패턴형상의 현상공정에서 현상액의 표면장력에 대한 영향과 정밀도의 변화 없이 두께를 증가시킬 수 있는 다중

윤곽선 스캐닝법을 이용하여 보다 정밀한 극미세 3 차원 형상제작이 가능할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Sun, H.B., Takada, K. and Kawata, S., 2003, "Scaling Laws of Voxels in Two-photon Photopolymerization Nanofabrication," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, No. 6, pp. 1104~1106.
- (2) Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Kong, H.J., 2004, "Directly Nano-precision Feature Patterning on Thin metal Layer using Top-down Building Approach in nRP Process," *J. of KSPE*, Vol. 21, No. 6, pp. 153~159.
- (3) Park, S.H., Jeong, J.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Kim, K.D., Lee, K.S., Kong, H.J., 2006, "Effective Fabrication of Three-dimensional Nano/ microstructures in a Single Step," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, Paper No. 203105.
- (4) Lim, T.W., Park, S.H., Yang, D.Y., Kong, H.J., Lee, K.S., 2006, "Direct Single-layered Fabrication of 3D Concavo-convex Patterns in Nano-stereolithography," *Appl. Phys. A*, Vol. 84, pp. 379~383.
- (5) Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Kong, H.J., Lee, K.S., 2006, "Direct Laser Patterning on Opaque Substrate in Two-photon Polymerization," *Macromol. Res.*, Vol. 14, No. 2, pp. 245~250.
- (6) Park, S.H., Lee, S.H., Yang, D.Y., Kong, H.J., Lee, K.S., 2005, "Subregional Slicing Method to Increase 3D Nanofabrication Efficiency in Two-photon Polymerization," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, Paper No. 154108.
- (7) Maruo, S., Ikuta, K., 2000, "Fabrication of Freely Movable Microstructures by using Two-photon Three-dimensional Microfabrication," *Proc. of SPIE*, Vol. 3937, pp. 106~112.
- (8) Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., Takada, K., 2001, "Finer Features for Functional Microdevices," *Nature*, Vol. 412, No. 16, pp. 697~698.
- (9) Serbin, J., Egbert, A., Ostendorf, A., Chichkov, B.N., 2003, "Femtosecond Laser-induced Two-photon Polymerization of Inorganic-Organic Hybrid Materials for Applications in Photonics," *Opt. Lett.*, Vol. 28, No. 5, pp. 301~303.
- (10) Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Yi, S.W., Kong, H.J., 2005, "Direct Fabrication of Micro-Patterns and

- Three-Dimensional Structures using Nano Replication Printing (nRP) Process,” *Sensor. Mater.*, Vol. 17, No. 2, pp. 65~75.
- (11) Kato, J., Takeyasu, N., Adachi, Y., Sun, H.B., Kawata, S., 2005, “Multiple-spot Parallel Processing for Laser Micronanofabrication,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, Paper No. 044102.
- (12) Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Kong, H.J., 2004, “Fabrication of a PDMS (poly-dimethylsiloxane) Stamp using Nano-Replication Printing Process,” *Trans. of KSME(A)*, Vol. 28, No. 7, pp. 999~1005.
- (13) Pham, A.T., Kim, D.P., Lim, T.W., Park, S.H., Yang, D.Y., Lee, K.S., 2006, “Three-dimensional SiCN Ceramic Structures via Nano-stereolithography of Inorganic Polymer Photoresist,” *Adv. Func. Mater.*, Vol. 16, pp. 1235~1241.
- (14) Tanaka, T., Ishikawa, A., Kawata, S., 2006, “Two-photon-induced Reduction of Metal Ions for Fabricating Three-dimensional Electrically Conductive Metallic Microstructure,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, Paper No. 081107.
- (15) Tanaka, T., Morigami, M., Atoda, N., 1993, “Mechanism of Resist Pattern Collapse during Development Process,” *Jpn. J. Phys.*, Vol. 32, pp. 6059~6064.
- (16) Deguchi, K., Miyoshi, K., Ishii, T., Matsuda, T., 1992, “Patterning Characteristics of a Chemically-Amplified Negative Resist in Synchrotron Radiation Lithography,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 2954~2958.