

## 연속적 스캐닝 방법을 이용한 이광자 광중합 공정의 제작 속도 및 정밀도 개선에 관한 연구

임태우\* · 손 용\* · 양동열† · 공홍진\*\* · 이광섭\*\*\* · 박상후\*\*\*\*  
(2007년 8월 1일 접수, 2008년 3월 27일 심사완료)

### Continuous Scanning Method for Improvement of Precision and Fabrication Efficiency of Two-Photon Stereolithography

Tae Woo Lim, Yong Son, Dong-Yol Yang, Hong Jin Kong, Kwang-Sup Lee,  
and Sang Hu Park

**Key Words :** Continuous Scanning Method(연속적 스캐닝 방법), Two-Photon Stereolithography(이광자 스테레오리소그래피), Three-Dimensional Microstructure(3 차원 마이크로 구조)

#### Abstract

Minimization of processing time in two-photon stereolithography (TPS) has been one of important issues. Generally, a voxel scanning method (VSM) has been used in TPS because the method is very profitable for the stable fabrication irrespective of jittering and response time of scanning equipments such as a stage and a galvano-scanner. However, supplementary processing time due to the on/off control of a shutter for the generation of each voxel is required inevitably in VSM; by this reason, much processing time takes to fabricate largescale micropatterns and three-dimensional patterns. In this work, a continuous scanning method (CSM), generating patterns by movement of beam focus with a constant speed, is proposed for the improvements of scanning speed and precision in TPS. Some line patterns are fabricated by each scanning method to demonstrate the usefulness of CSM with viewpoints of scanning speed and precision.

#### 1. 서 론

이광자 흡수 광중합 현상(two-photon induced photopolymerization)을 이용한 나노 스테레오 리소그래피 공정은 극소형의 완전한 3 차원 형상을 제작할 수 있는 가장 유리한 방법 중 하나로 인식되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 최근 연구에서 이 공정을 이용하여 3 차원 광결정(3D photonic crystals), 마이크로 바늘(micro-needle array) 등 실제적인 고기능성 응용소자 제작에 응용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>(4-9)</sup>

한편, 나노 스테레오리소그래피 공정으로 3 차원 형상을 제작하기 위해서는 일반적으로 3 차원 CAD 데이터에서 추출한 2 차원 데이터를 이용하여 한 층을 제작하고 제작된 각 층을 형상의 높이방향으로 적층하는 방식을 이용하기 때문에 많은 제작시간이 소요되며, 제작시간을 개선하기 위한 효율적 스캐닝 방법에 대한 연구가 필수적으로 요구된다.<sup>(10-13)</sup> 2 차원 윤곽선을 제작하기 위한 기준에 사용된 단속적 스캐닝 방법(voxel scanning method)에서는 레이저의 초점 위치를 한 점에 고정시킨 상태에서 조사하여 단위 복셀(voxel)<sup>(14)</sup>을 형성한 후 레이저를 끈 상태에서 초점위치를 다음 복셀 생성 위치로 이동한 후 다시 조사하여 각 복셀을 이어나가는 방법으로 제작하게 된다.<sup>(15)</sup> 이 경우 스캐너가 이동하는 동안 레이저는 조사되지 않게 되므로 초점의 이동시간을 충분히 줄 경우 이동하는 동안 스캐너에서 발생하는 오차에 영향을 받지 않는 장점이 있으나, 전체 조사시간 이외에도 각 위치에서 안정된 셔터의 개폐시간이 추가적으로 소요되어

† 책임저자, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : dyyang.kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3214 FAX : (042)869-5214

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 물리학과

\*\*\* 한남대학교 고분자공학과

\*\*\*\* 부산대학교 기계공학과

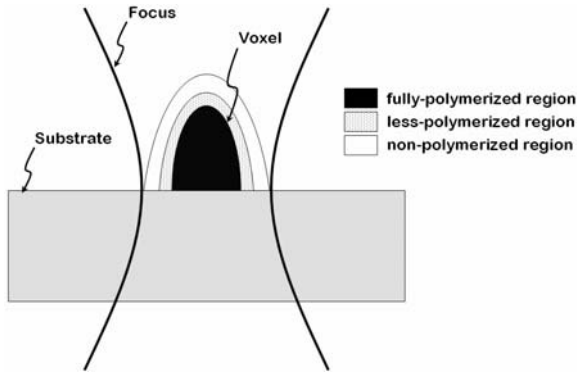


Fig. 1 The generation of a voxel and the characteristic regions

제작속도가 많이 들게 되는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 제작속도를 개선하기 위하여 각 단위 복셀에 소요되는 셔터의 개폐시간이 필요하지 않는 스캐닝 방법인 레이저가 켜진 상태에서 스캐닝을 하는 연속적 스캐닝 방법(continuous scanning method)을 제안하였다. 또한, 각 스캐닝 방법에 따른 공정변수를 분석하여, 정밀도 및 제작속도에 대하여 효율성을 검증하였다.

## 2. 연속적 스캐닝 방법의 이론적 연구

### 2.1 단위 형상에 대한 이론적 연구

단속적 스캐닝 및 연속적 스캐닝의 비교를 위하여 단위 선 형상을 비교하였다. 선 형상은 복셀이 1 차원 방향으로 중첩되어 생성되게 되므로 각각의 경우에 대하여 선 크기에 대한 함수를 복셀의 식으로부터 유도할 수 있다.

Fig. 1 과 같이 레진에 레이저가 조사 될 경우 초점의 중앙에서부터 완전히 경화된 영역(fully-polymerized region; FPR), 약한 광중합으로 일부가 경화되어 액상과 공존하는 영역(less-polymerized region; LPR), 그리고 경화되지 않은 영역(non-polymerized region; NPR)으로 나누어진다.<sup>(16)</sup>

FPR 에서는 레이저 강도가 매우 높은 구간으로서 경화에 필요한 임계확률  $\psi_{th}$  이상의 확률을 가지며 완전히 고상으로 경화된 영역이다. 그리고 LPR 에서는 라디칼 생성 밀도가 매우 낮아 대부분 레진 속에 내재한 산소(O<sub>2</sub>) 등과 결합하여 라디칼 켄칭(quenching) 작용이 일어나서 일부만이 경화되고

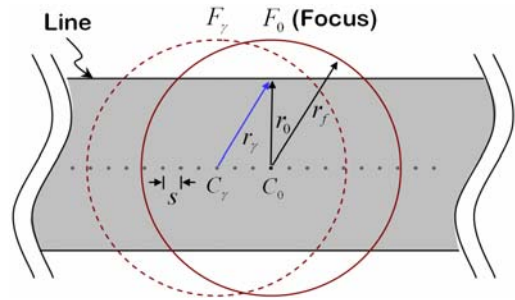


Fig. 2 The relative position of a line pattern and corresponding focus

액상과 고상이 공존하는 영역이 된다. 이 영역은 에탄올(ethanol)과 같은 현상액을 이용하여 광중합이 되지 않은 영역을 제거할 때 거의 제거가 된다. NPR 의 영역은 가해지는 레이저 강도가 매우 낮아 라디칼이 전혀 생성되지 않는 영역이다. 복셀이 중첩되어 선형상을 형성할 경우 중첩된 에너지에 의해 LPR 영역이 더욱 강하게 경화되어 FPR 의 영역이 커지게 된다. 이러한 중첩 특성을 고려하여 단속적 스캐닝 방법과 연속적 스캐닝 방법 각각에 대하여 빔 스캐닝 시스템에서의 공정변수에 대한 비교 분석을 수행하였다.

Fig. 2 는 직선을 갈바노 스캐너(galvano scanner)로 스캐닝 하였을 때 초점과 선폭에 대한 상대적 위치를 나타낸다. 갈바노 스캐너를 이용한 빔 스캐닝 방식에서는 100  $\mu$ s 이하의 순간적인 이동을 하므로 이동시간을 무시하도록 한다. 조사간격  $s$  로 스캐닝 할 경우 임의의 한 초점 ( $F_0$ )의 중심 ( $C_0$ )에서 스캐닝 방향에 수직인 방향으로 선폭과 만나는 지점에서는  $F_0$  의 중심  $C_0$  에서  $r_0$  떨어진 지점의 에너지 뿐 아니라 초점  $F_y$  의  $r_y$  거리에 조사되는 에너지 또한 중첩되므로 식 (1)과 같이 표현된다. 이렇게 각 에너지를 중첩한 값은 경화가 일어나기 위한 최소 확률값 ( $\psi_{th}$ ; threshold probability)이라 할 수 있다. 단위 복셀의 레이저 출력 및 조사시간에 대한 경화 확률  $\psi_n$  은 레이저의 강도의 제곱에 비례하고, 조사시간에 비례하므로 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.<sup>(17)</sup> 가상의 제작된 선 형상에 대하여 선의 가장자리의 한 점에 영향을 주는 초점들에 대하여 확률값을 식 (2)와 같이 모두 더하게 되면 단속적 방법과 연속적 방법 각각의 경우에 대하여 식 (3), (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\psi_r = (H(0) \exp(r/r_f))^2 t_{vs} \quad (1)$$

$$\psi_{total} = \sum_{n=-\gamma}^{\gamma} \psi_n, \quad \gamma = \left[ \sqrt{r_f^2 - (d_c/2)^2} / s \right] \quad (2)$$

$$\psi_{th}^i = \sum_{n=-\gamma}^{\gamma} \left[ H(0) \exp\left(-2\left((d_{vs}/2)^2 + (ns)^2\right) / r_f^2\right) \right]^2 \cdot f_{vs}(t_{vs}, t_i) \quad (3)$$

$$\psi_{th}^n = \sum_{n=-\gamma}^{\gamma} \left[ H(0) \exp\left(-2\left((d_{cs}/2)^2 + (ns)^2\right) / r_f^2\right) \right]^2 \cdot f_{cs}(t_{cs}) \quad (4)$$

여기서,  $d$  는 선폭,  $H(0)$  는 중심에서의 레이저 강도,  $\gamma$  는 가상선 가장자리 임의의 위치에 영향을 주는 가장 먼 거리의 초점을 뜻한다. 단속적 스캐닝의 경우는 스캐너의 이동 후 안정화 시간 및 셔터의 on/off 시간 등을 고려한 각 조사시간 사이의 시간간격( $t_i$ )이 수 ms 이상의 값으로서 하나의 변수로 존재하게 된다. 즉,  $t_i$  동안 LPR 에서 일부 경화된 입자의 분산, 그리고 LPR 에서 생성된 라디칼을 비활성화 시키며 소요된  $O_2$  의 분산 및 충전 효과가 일어나게 되므로, 단속적 방법에서의 시간 함수는 식 (2)와 같이 각 위치에서의 조사시간( $t_{vs}$ )과  $t_i$  의 함수로 표현된다. 반면, 연속적 스캐닝의 경우 빔 스캐닝 시스템에서의 초점위치의 이동 시간은 0.1 ms 이하의 무시할 수 있는 시간이므로 식(3)과 같이 각 위치에서의 조사시간( $t_{cs}$ )만의 함수로 표현된다. 따라서, 두 스캐닝 방법에 대한 차이는 단속적 방법에서의  $t_i$  값에 의한 차이라 할 수 있다. 이때,  $f_{vs}(t_{vs}, t_i)$  는 레진의 광 민감도, 점성 및 내부 분자들의 확산계수 등에 따라 달라질 수 있으며, 본 연구에서는 SCR 레진 (Japan Synthetic Rubber) 에 대하여 주요 공정변수인 레이저 출력 및 조사시간에 대하여 두 스캐닝 방법의 정밀도 및 제작특성을 비교해 보았다.

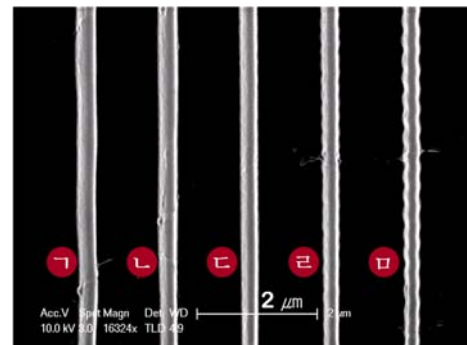
### 3. 실험 및 결과 토의

#### 3.1 스캐닝 방법에 따른 단위 형상 제작

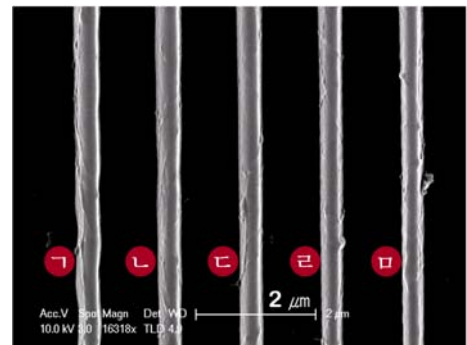
연속적 스캐닝 방법에서는 스캐너가 움직이는 동안 셔터가 켜진 상태로 스캐너가 움직이므로 셔터의 지터링(jittering)이 발생하지 않는 안정적인 스캐닝 조건이 중요하다. 본 연구에서는 초점 위치제어를 위하여 갈바노 스캐너를 이용하였으며, 각 단위거리를 이동할 때의 이동시간은 0.1 ms 이하의 매우 작은 값으로서 무시할 수 있을 정도로

작으며 각 단위 거리 위치마다 초점이 머무르는 시간으로 제어하며 최소값은 약 1 ms 이다. 최대 속도에 대하여 스캐너가 안정적으로 구동하는지 여부를 확인하기 위하여 단위 조사간격을 다양하게 해가며 제작한 선 형상의 거칠기로부터 평가를 해보았다.

Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 55 mW 의 레이저 출력과 1 ms, 2 ms의 조사시간에 대하여 단위 조사간격을 각각 5, 10, 20, 30, 40 nm로 하여 제작한 선 패턴의 형상을 나타낸 것이다. 단위 조사간격이 늘어남에 따라 단위 길이당 조사량이 줄어들어 보다 정밀한 형상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 1 ms의 조사시간의 경우 단위 조사간격 30 nm부터는 스캐너의 지터링에 의한 오차가 발생하였다. 따라서 연속적 스캐닝 방법의 경우 20 nm의 복셀 간격이 적합하며, 이후 연속적 스캐닝의 단위 조사간격을 20 nm로 두었다.

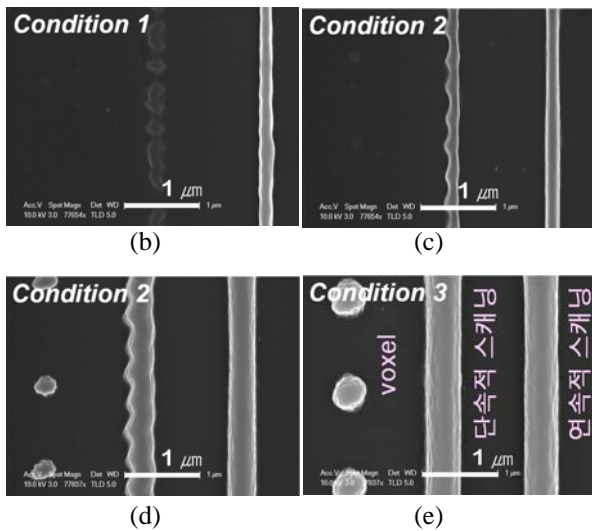
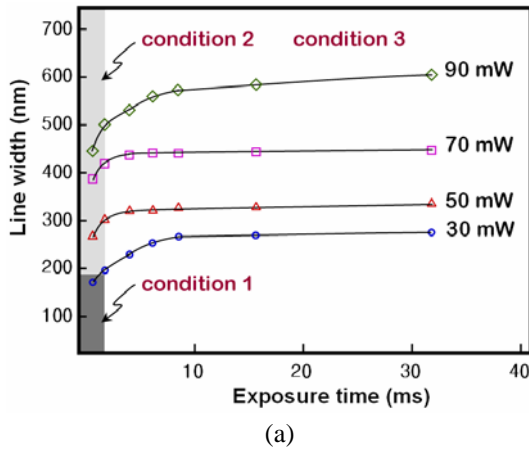


(a)



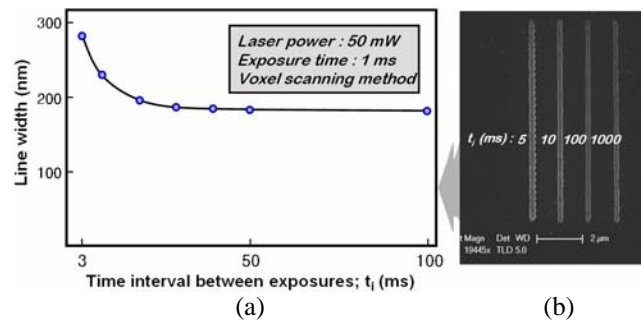
(b)

**Fig. 3** Line patterns fabricated under the conditions of laser power of 55 mW and exposure time of (a) 1 ms and (b) 2 ms at each position. The voxel distances were each ① 5, ② 10, ③ 20, ④ 30, and ⑤ 40 nm. And jittering of a galvanoscanner occurred from 30 nm of voxel distance in case of 1 ms exposure time



**Fig. 4** (a) Parameter study of continuous scanning method in cases of laser power of 30, 50, 70, 90 mW. SEM images of voxel (left), line patterns by voxel scanning method (middle) and continuous scanning method (right). Laser power and exposure time were (b) 30 mW and 1 ms, (c) 30 mW and 2 ms, (d) 70 mW and 2 ms, and (e) 70 mW and 32 ms, respectively

Fig. 4(a)는 연속적 스캐닝 방법을 이용하여 레이저 출력 30, 50, 70, 90 mW 조건에서 제작한 선 폭 변화를 나타낸다. 레이저 출력 및 조사시간이 감소함에 따라 선 폭이 급격히 감소하였으며, 30 mW, 1 ms 에서 최소 정밀도 170 nm 의 균일한 선폭을 얻을 수 있었다. 반면 복셀 및 단속적 스캐닝 방법( $t_i=3ms$ )의 경우에는 Fig. 4(a)의 condition-1, condition-2, condition-3 의 영역에서 각기 다른 경향을 나타내었다. Fig. 4(b)의 결과와 같이 낮은 레이저 출력과 조사시간이 짧은 condition-1 의 경우 복셀이 전혀 생성되지 않았으며 단속적 방법의 선형상의 경우 매우 불규칙하게 생성되었다. 높은 레이저



**Fig. 5** (a) Variation of line width depending on various time intervals under the conditions of laser power of 50 mW and exposure time of 1 ms. (b) SEM image of line width versus time interval  $t_i$  under the conditions of laser power of 50 mW and exposure time of 1 ms

출력과 조사시간이 짧은 condition-2 에 대해서는 불규칙한 형상의 복셀이 생성되었으며 단속적 스캐닝 방법의 선 폭 역시 매우 불규칙하였다. 레이저 출력과 조사시간이 모두 큰 condition-3 의 경우에 대해서는 복셀 및 모든 선 형상에 대하여 균일한 형상이 제작되었다. 즉, 연속적 방법의 경우 모든 공정조건에 대하여 균일한 선 폭을 얻을 수 있지만 단속적 방법의 경우 짧은 조사시간에 대해서는 매우 불규칙한 형상이 얻어지게 된다.

이러한 결과는 단속적 방법의 경우 조사시간이 짧게 되면 상대적으로  $t_i$  에 의한 영향이 커지게 되어 나타나는 영향으로 분석된다.

단속적 스캐닝 방법에서  $t_i$  에 따른 영향을 알아보기 위하여 condition-2 의 공정조건 중 하나인 레이저 출력 50 mW 및 조사시간 1 ms 에서 실험을 수행하였다. Fig. 5(b)의 결과와 같이  $t_i$  가 증가함에 따라 거칠기가 점차 개선되고 약 10 ms 이상의 값에서 균일한 선 폭을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 또한, Fig. 5(a)와 같이 최대 선 폭은  $t_i$  가 증가함에 따라 점차 감소하여 약 10 ms 이상에서는 연속적 스캐닝 방법의 경우보다 조금 더 정밀한 값을 가졌으며, 50 ms 이상의 값에서는 복셀의 폭 크기로 수렴하였다. 이는  $t_i$  가 증가함에 따라 LPR 에서 일부 경화된 입자의 분산 현상과, 라디칼 켄칭(quenching) 역할을 하는  $O_2$  의 확산으로 인한 충전 현상이 약 10 ms 의  $t_i$  동안 안정화됨으로써 발생하는 현상으로 분석된다.

최대 제작 속도를 비교해 보면, 단속적 스캐닝 방법의 최대 제작속도는 2.86 nm/ms (; 단위 조사거리 20 nm 에 대하여 3 ms  $t_i$ , 4 ms  $t_{vs}$  소요)이 되고, 연속적 스캐닝 방법의 경우 최대 제작속도는 20

nm/ms (; 단위 조사거리 20 nm 에 대하여 1 ms  $t_{cs}$  소요)으로서, 연속적 스캐닝 방법이 단속적 스캐닝 방법에 비해 7 배 빠른 속도로 제작할 수 있다. 또한, 단속적 스캐닝 방법의 최대속도 조건에 비해 정밀도도 개선되게 된다. 한편, 단속적 스캐닝 방법의 경우 10 ms 이상의  $t_i$  에서 연속적 방법보다 정밀한 선폭 얻을 수 있으나, 이때 제작속도는 1.82 nm/ms (; 20 nm/11 ms)로서 연속적 스캐닝 방법에 비해 11 배의 제작시간이 소요되게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 이광자 흡수 광중합을 이용한 3 차원 형상 제작공정에 있어 제작속도를 개선하기 위하여 연속적 스캐닝 방법을 제안하였다. 기존 연구에서 주로 사용된 스캐닝 방법인 단속적 스캐닝 방법과의 비교를 위하여 선 폭에 대한 각 공정의 공정변수에 대한 분석을 수행하였다. 각 공정변수에 따른 단위 선 패턴의 형상과 정밀도를 비교함으로써 제작속도와 정밀도의 상관관계를 알 수 있었다. 실험결과에서 나타난 바와 같이 연속적 스캐닝 방법을 이용하여 제작속도를 7 배 개선하였으며, 단속적 스캐닝 방법의 최대 제작속도에서의 선 폭보다 더욱 정밀한 선 폭을 얻을 수 있었다. 이와 같은 현상은  $O_2$  의 확산 현상에 의한 영향으로 분석된다. 한편, 각 스캐닝 방법의 최소 정밀도 면에서는 단위 이동시간 10 ms 조사시간 1 ms 의 단속적 방법이 가장 정밀한 선폭을 얻을 수 있으나 매우 긴 제작시간이 소요된다. 따라서, 본 연구에서 제안한 연속적 스캐닝 방법의 경우 향후 3 차원 마이크로 소자 제작에 있어 제작속도를 개선 할 수 있는 유용한 스캐닝 방법으로 이용될 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 나노원천기술개발사업 (과제번호 M10503000217-05M0300-21700)의 과제 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다. 또한 S.H. Park 은 국가핵심연구센터사업 (R15-2006-022-01001-0)의 일부 지원에 대하여 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kawata, S., Sun, H.B., Tanaka, T., and Takada, K., 2001, "Finer Features for Functional Microdevices," *Nature*, Vol. 412, No. 16, pp. 697~698.
- (2) Serbin, J., Egbert, A., Ostendorf, A., and 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.
- (3) Yang, D.Y., Park, S.H., Lim, T.W., Kong, H.J., Yi, S.W., Yang, H.K., Lee, K.S., 2007, "Ultraprecise Micro-Reproduction of a Three-Dimensional Artistic Sculpture by Multipath Scanning Method in Two-photon Photopolymerization," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, No. 1, pp. 013113.
- (4) Sun, H.B., Takada, K., and Kawata, S., 2001, "Elastic Force Analysis of Functional Polymer Submicron Oscillators," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 19, pp. 3173~3175.
- (5) Kaneko, K., Sun, H.B., Duan, X.M., and Kawata, S., 2003, "Submicron Diamond-Lattice Photonic Crystals Produced by Two-Photon Laser Nanofabrication," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, No. 11, pp. 2091~2093.
- (6) Seet, K.K., Mizeikis, V., Matsuo, S., Juodkazis, S., and Misawa, H., 2005, "Three-Dimensional Spiral-Architecture Photonic Crystals Obtained By Direct Laser Writing," *Adv. Mater.*, Vol. 17, No. 5, pp. 541~545.
- (7) Coenjarts, C.A., and Ober, C.K., 2004, "Two-Photon Three-Dimensional Microfabrication of Poly (Dimethylsiloxane) Elastomers," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 126, No. 26, pp. 5556~5558.
- (8) Doraiswamy, A., Jin, C., Narayan, R.J., Mageswaran, P., Mente, P., Modi, R., Auyeung, R., Chrisey, D.B., Ovsianikov, A., and Chichkov, B., 2006, "Two Photon Induced Polymerization of Organic-Inorganic Hybrid Biomaterials for Microstructured Medical Devices," *Acta Biomaterialia*, Vol. 2, No. 3, pp. 267 ~275.
- (9) Pham, A.T., Kim, D.P., Lim, T.W., Park, S.H., Yang, D.Y., and Lee, K.S., 2006, "Three-Dimensional SiCN Ceramic Microstructures via Nano-Stereolithography of Inorganic Polymer Photoresists," *Adv. Func. Mater.* Vol. 16, No. 9, pp. 1235~1241.
- (10) Sun, H.B., Maeda, M., Takada, K., Chon, J.W.M., Gu, M., and Kawata, S., 2003, "Experimental Investigation of Single Voxels for Laser Nanofabrication via Two-Photon Photopolymerization," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 83, No. 5, pp. 819-821.
- (11) Park, S.H., Lee, S.H., Yang, D.Y., Kong, H.J., and Lee, K.S., 2005, "Subregional Slicing Method to Increase Three-Dimensional Nanofabrication Efficiency in Two-Photon Polymerization," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 87, pp. 154108.
- (12) Lim, T.W., Park, S.H., Yang, D.Y., and Lee, K.S., 2005, "Fabrication of Three-Dimensional Curved Microstructures by Two-Photon Polymerization

- Employing Multi-Exposure Voxel Matrix Scanning Method,” *Polymer(Korea)*, Vol. 29, No. 4, pp. 418~421.
- (13) Kato, J.I., Takeyasu, N., Adachi, Y., Sun, H.B., and Kawata, S., 2005, “Multiple-Spot Parallel Processing for Laser Micronanofabrication,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, pp. 044102.
- (14) Takada, K., Sun, H.B., Kawata, S., 2005, “Improved Spatial Resolution and Surface Roughness in Photopolymerization-Based Laser Nanowriting,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, pp. 071122.
- (15) Lim, T.W., Park, S.H., and Yang, D.Y., 2005, “Contour Offset Algorithm for Precise Patterning in Two-Photon Polymerization,” *Microelectron. Eng.*, Vol. 77, No. 3, pp. 382~388.
- (16) Park, S.H., Lim, T.W., Yang, D.Y., Cho, N.C., and Lee, K.S., 2006, “Fabrication of a Bunch of Sub-30-nm Nanofibers Inside Microchannels Using Photopolymerization via a Long Exposure Technique,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 89, pp. 173133.
- (17) 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,” *Sensors and Materials*, Vol. 17, No. 2, pp. 65~75.