

# 대면적 나노스테레오리소그래피 공정을 위한 연속적 스캐닝 방법에 대한 연구

\*임태우<sup>1</sup>, 박상후<sup>1</sup>, 손용<sup>1</sup>, 양동열<sup>1</sup>, 공흥진<sup>2</sup>, 이광섭<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술원 기계공학과, <sup>2</sup> 한국과학기술원 물리학과, <sup>3</sup> 한남대학교 신소재공학과,

## Improvement of the scanning speed employing continuous scanning method

\*T.W. Lim<sup>1</sup>, S.H. Park<sup>1</sup>, Y. Son<sup>1</sup>, D.Y. Yang<sup>1</sup>, H.J. Kong<sup>2</sup>, K.S. Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Mech. Eng., KAIST, <sup>2</sup> Dept. of Physics, KAIST, <sup>3</sup> Dept. of Polymer Sci. & Eng., Hannam Univ.

Key words : Two-photon absorption, nano-stereolithography, continuous scanning,

### 1. 서론

이광자 흡수 광경화 현상을 이용한 나노스테레오리소그래피 공정은 약 100 nm의 정밀도의 임의의 3차원 입체 형상을 제작할 수 있는 유일한 공정으로 평가되고 있다. 나노스테레오리소그래피 공정은 레이저 초점의 이차원 위치 제어 시스템 종류에 따라 갈바노 스캐닝 시스템과 스테이지 스캐닝 시스템으로 나뉜다. 갈바노 스캐닝 시스템의 경우 반응속도가 수십 ms 인 스테이지 스캐닝 시스템에 비해 반응속도가 약 1ms 이하로서 고속제작에 매우 유리하여 공정변수 분석 등 개발단계에서 많은 연구가 진행되어왔다[1]. 최근에는 마이크로 오실레이터, 3차원 광결정, 3차원 채널 제작을 통하여 고집적 고 효율성 디바이스로서의 응용 가능성이 제시된 바 있다[2]. 하지만, 제작된 형상은 약 100 μm 이내이며 실용화를 위해서는 수백 μm 이상의 제작영역 확보가 요구됨에 따라, 제작영역에 있어 유리한 스테이지 스캐닝 시스템에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 스테이지 스캐닝 시스템의 경우 제작속도가 매우 느려 그 스캐닝 방법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 연속적 스캐닝 방법을 제안하여 제작속도를 개선하였다.

### 2. 스캐닝 방법의 이론적 고찰

스캐닝 방법에는 단속적 스캐닝 방법과 연속적 스캐닝 방법이 있다. 단속적 스캐닝 방법이란 하나의 복셀을 하나 하나씩 생성하며 이어나가는 방식으로서 셔터가 닫힌 상태에서 스캐너가 다음 복셀이 제작될 위치로 이동하고 정지한 상태에서 셔터가 열렸다 닫히면서 다시 복셀하나를 생성하는 방식으로 중첩된 복셀로 이뤄진 형상을 제작하는 방식이다. 연속적 스캐닝 방법이란 셔터가 열린 상태에서 스캐너가 형상이 제작될 경로를 따라 스캐닝함으로써 형상을 제작하는 방법을 뜻한다. 단속적 방법의 경우 스캐너를 위치시키는 동안의 요동 등에 대해 안정적으로 정밀한 형상을 제작할 수 있는 장점이 있으나, 시간이 느린 단점이 있다. 응답속도가 빠른 갈바노 스테이지 시스템을 이용하여 각각에 대한 이론적, 실험적 비교를 수행하였다.

액상의 레진에 레이저가 조사 될 경우 초점의 중앙에서부터 완전히 경화된 영역 (fully-polymerized region; FPR), 일부가 경화되어 액상과 공존하는 영역 (loss-polymerized region; LPR), 그리고 경화되지 않은 영역 (non-polymerized region; NPR)로 나뉜다. FPR 에서는 레이저 강도가 매우 높은 구간으로서 경화에 필요한 임계확률 ( $\psi_{th}$ ) 이상의 확률을 가지며 완전히 고상으로 경화된 영역이다. LPR 은 일부 라디칼이 생겨 반응을 하나 라디칼생성 밀도가 매우 낮아 대부분 산소와 결합함으로써 반응이 일어나지 않게되며, 아주 일부만이 경화되어 액상과 고상이 공존하는 영역이 된다. 이 영역의 경우 애칭액을 이용하여 경화되지 않은 영역을 제거할 때 함께 제거가 된다. NPR 의 영역은 가해지는 레이저 강도가 매우 낮아 라디칼이 생성되지 않는 영역이다. 갈바노미러를 이용한 나노 스테레오리소그래피 공정

의 경우 주어진 경로를 단위 거리로 나누어 각 위치에서 머무르는 시간을 통하여 제어할 하게 된다. 즉, 각 위치에서의 단위 복셀들이 중첩되어 하나의 선을 이루게 된다. 이때 조사간격은 복셀의 약 0.1 배 거리로서 이웃하는 복셀의 형성시 기준에 형성된 복셀 형상주위에도 에너지가 가해지게 되므로 LPR 영역이 보다 많은 에너지를 받아 경화가 진행됨에 따라 FPR 영역이 커지게 된다.

Fig.1 은 초점과 제작된 초점형상에서의 주요 변수를 나타낸다. 초점에서 경화되는 복셀의 이론적 연구로부터 단속적 및 연속적 스캐닝시 제작된 선폭을 각각 식(1, 2)와 같이 유도할 수 있다. 단속적 방법에서의 시간 함수는 식(1)과 같이 각 위치에서의 조사시간 ( $t_{vs}$ )과 각 조사시간 사이의 시간간격 ( $t_i$ )의 함수로 표현할 수 있다. 연속적 스캐닝의 경우 이동시간은 약 0.2 ms 이하의 매우 짧은 시간에 순간적인 이동을 하기 때문에 무시할 수 있으므로 식 (2)와 같이 각 위치에서의 조사시간 ( $t_{cs}$ )의 곱으로 표현된다. 즉 두 스캐닝 방법에 대한 차이는 단속적 방법에서 조사시간의 시간간격 ( $t_i$ )에 의한 차이라 할 수 있다.

$$\psi_{th}' = \sum_{n=-\gamma}^{\gamma} [H(0) \exp(-2((d_{vs}/2)^2 + (ns)^2)/r_f^2)]^p \cdot f_{vs}(t_{vs}, t_i) \quad (1)$$

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

### 3. 실험결과 및 분석

복셀간격 20 nm 로 단속적 방법과 연속적 방법으로 조사한 선 형상에 대하여 공정변수에 따른 선 폭 변화를 관찰 하였다. Figure 2 는 연속적 스캐닝 방법을 이용하여 제작한 레이저 출력 30, 50, 70, 90 mW 에 대한 선폭 변화를 나타낸다. 레이저 출력 및 조사시간이 감소함에 따라 선폭이 급격히 감소하였으며, 30 mW, 1 ms 에서 최소 정밀도 170 nm 의 균일한 선폭을 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 일부 조건을 제외하고는 복셀과 5 ms 의 조사시간 간의 간격( $t_i$ )을 둔 단속적 스캐닝 결과와 거의 일치하였다. 즉, 영역 1 에서는 Fig. 3(a)와 같이 연속적 스캐닝 방법에 의해서만 제작되었으며 복셀 및 단속적 스캐닝 방법에

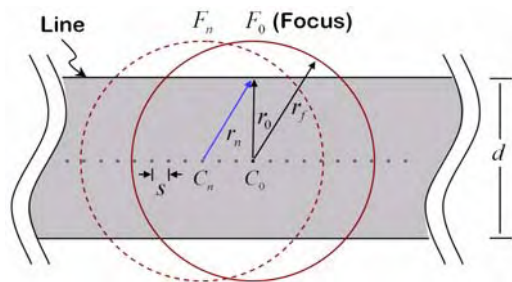


Fig. 1 Schematic diagram of the focus and the fabricated line.

의한 형상은 제작되지 않았으며 영역 2에서는 Fig. 3(b, c)와 같이 선 폭에 비해 복셀의 직경이 훨씬 작고 단속적 스캐닝의 경우 불균일한 선폭을 가졌다. 조사시간 4 ms 이상의 경우에 대해서는 Fig. 3(d)와 같이 복셀의 크기와 단속적, 연속적 스캐닝 시 선폭이 거의 일치하였다. 따라서 연속적 방법의 경우 단속적 스캐닝 방법에 비해 보다 정밀한 형상을 균일하게 제작할 수 있음을 알 수 있다.

영역 2에서의  $t_i$ 에 따른 영향을 알아보기 위하여 공정 조건 50 mW, 1 ms에서 선폭 변화를 실험한 결과, Fig. 4와 같이 짧은  $t_i$ 에 대해서는 불규칙한 선폭의 최대 폭은 연속적 스캐닝 방법의 경우와 비슷하였으며  $t_i$ 가 증가함에 따라 급격히 감소하여 약 50 ms 이후에서 거의 복셀의 폭 값으로 수렴하였다. 이는  $t_i$ 가 증가함에 따라 LPR에서 일부 경화된 입자의 분산 효과와, 쿨링 (quenching) 역할을 하는 O<sub>2</sub>의 확산으로 인한 충진 효과로 인한 것으로 판단된다. 5 ms에서의 단속적 스캐닝 또는 연속적 스캐닝의 경우 선폭은 같은 레이저 출력 및 조사시간에서의 복셀 크기보다 약 1.5 배의 크기를 가짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 5와 같이 약 10 ms 이상의  $t_i$ 에 대해서는 보다 균일한 선폭을 가지게 되지만  $t_i$ 가 증가할수록 제작시간이 늘어나게 되는 단점이 있다.

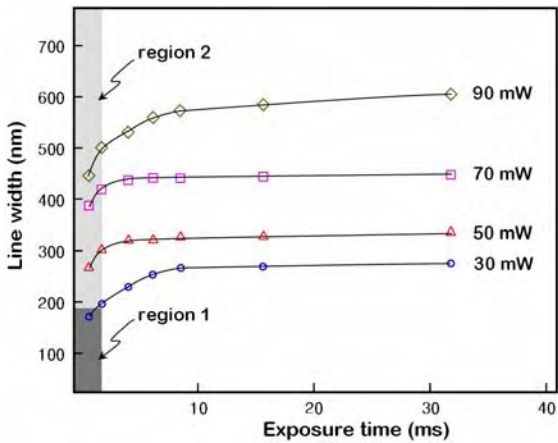


Fig. 2 Parameter study of continuous scanning method in cases of 30, 50, 70, 90 mW laser powers.

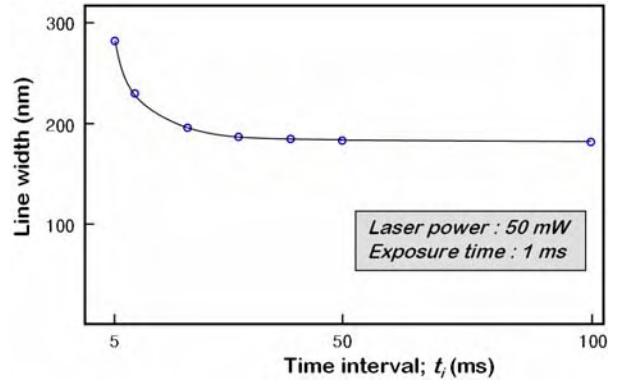


Fig. 4 The line width vs. time interval  $t_i$  in the conditions of 50 mW, 1 ms.

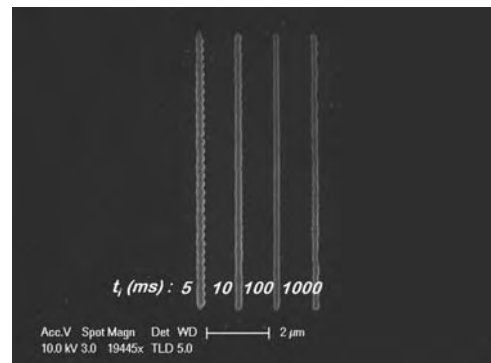


Fig. 5 Line patterns at various time intervals in the conditions of 50 mW, 1 ms.

따라서, 단속적 방법의 경우  $t_i$ 에 따른 선폭 변화 특성을 분석한 결과 균일한 선폭을 가진 스캐닝을 위해서는 조사시간 4 ms 이상이 필요하며, 보다 정밀한 형상 제작을 위해서는 1 ms 조사시간과 10 ms 이상의 긴  $t_i$ 가 필요하므로 제작시간이 매우 많이 걸리게 되는 단점이 있다. 반면 연속적인 방법의 경우 최소 조사시간 1 ms에 대해서 20 nm의 조사간격에서 안정적인 스캐닝이 가능하였으며 단속적 방법에 비해 보다 정밀한 형상 제작이 가능하다.

#### 4. 결론

대면적 스캐닝시 속도개선을 위하여 연속적 스캐닝 방법을 제안하였으며 공정변수에 따른 스캐닝 특성 분석결과 단속적 방법에 비하여 정밀도 및 제작속도 면에서 모두 개선되었다.

#### 후기

The authors give thanks to Korean Ministry of Science & Technology (project of research for development of fundamental nanotechnology)

#### 참고문헌

1. S. H. Park, S.H. Lee, D.-Y. Yang, H.J. Kong, K.-S. Lee, "Subregional slicing method to increase three-dimensional nanofabrication efficiency in two-photon polymerization," Appl. Phys. Lett., 87, 154108, 2005.
2. Seet, K.K., Mizeikis, V., Matsuo, S., Juodkazis, S., Misawa, H., "Three-dimensional spiral-architecture photonic crystals obtained by direct laser writing," Adv. Mater., 17, 541-545, 2005.

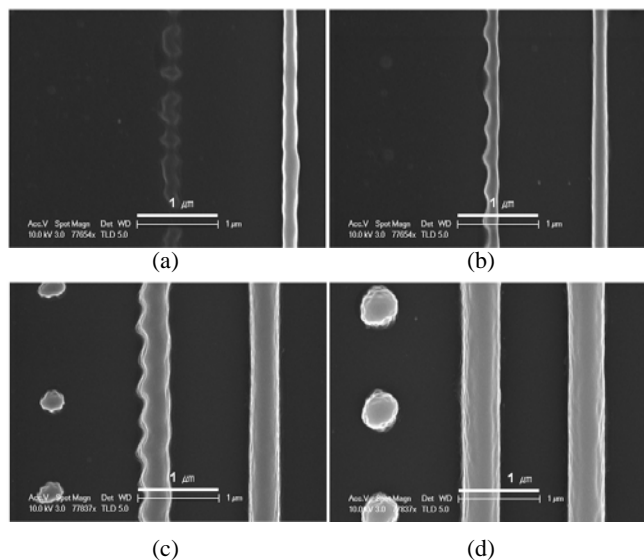


Fig. 3 SEM images of voxel (left), line patterns by voxel scanning method (middle) and continuous scanning method (right). The laser powers and exposure times are (a) 30 mW, 1 ms, (b) 30 mW, 2 ms, (c) 70 mW, 2 ms, and (d) 70 mW, 32 ms.