

## 이광자 흡수를 이용한 삼차원 미세 구조물 제작과 복셀 분석

### Fabrication of 3D Micro-Structure and Analysis of Voxel Generation by Two-Photon Absorption

조미정\*, 이신욱, 이성구, 공홍진  
한국과학기술원 물리학과  
양동열, 박상후, 임태우  
한국과학기술원 기계공학과  
김란희, 이광섭  
한남대학교 고분자공학과  
\*mani81@kaist.ac.kr

펨토초 레이저가 개발됨에 따라 비선형 현상인 이광자 흡수를 이용한 미세구조 제작이 가능하게 되었다. 이는 층을 쌓아서 만드는 rapid prototype이나 식각의 단점을 보완한 혁신적인 방법으로서, 단위체인 복셀(volume pixel)을 쌓아서 미세구조물을 만들기 때문에 어떠한 형태의 미세 구조물도 쉽게 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 펨토초 레이저가 resin에 렌즈를 통해 조사되었을 때, 높은 광자 밀도를 가진 초점 부근에서만 이광자 흡수가 일어나므로 레이저의 세기를 조절함으로써 매우 좁은 영역에서 resin의 광중합이 일어난다. 이 경우 짧은 조사 시간에 의해 형성되는 기본 구조 중합체가 복셀이다. 이러한 복셀의 형태나 크기는 미세구조물 제작의 중요한 요소가 된다<sup>(1)</sup>.

여기에서는 resin에 조사해준 레이저의 노출시간과 출력에너지에 따른 복셀의 형태와 크기의 변화 양상을 분석하였다.

실험에서 사용한 레이저는 780nm 파장, 80MHz 반복율, 100fs의 펄스폭을 가진 티타늄 도핑된 사파이어 펨토초 모드잠금 레이저이고, resin에 레이저를 모아주는 역할을 위해, NA가 1.4이고, 배율이 100인 현미경 대물렌즈를 사용한다. 또한 원하는 구조물을 만들기 위해 resin에서 레이저빔의 초점이 맺히는 위치를 변화시켜 줘야 하는데, 이는 컴퓨터와 연결된 분해능 2.4nm의 Galvano scanner와 분해능 10nm의 PZT stage를 통해 이루어진다. 컴퓨터를 통해 원하는 구조물의 형태에 따라 x-y축은 Galvano scanner, z축은 PZT stage로 제어한다. 노출시간은 500 $\mu$ s에서 수백ms까지 Galvano shutter로 조절 가능하다. Resin은 urethane acrylate monomers와 photo-initiators의 혼합물로 photo-initiator는 411nm 파장의 빛을 흡수해서, 452nm 파장의 빛을 방출한다. Radical은 452nm 빛이 쏘여졌을 때 생성되어, resin의 광중합을 일으킨다.

미세구조물의 분해능은 복셀의 크기에 의해 결정이 되므로, 복셀의 모양과 크기는 중요한 요소가 된다. 복셀은 완전히 구형이 아니라 높이를 가진 타원형의 입방체이다. 이러한 복셀은 이광자 흡수(TPA)가 일어나는 영역에서의 광중합에 의해 만들어지므로, 초점 부근의 intensity profile과 이광자 흡수율에 대한 논의가 필요하다.

실험은 resin에 쏘여주는 레이저의 노출시간 t 또는 레이저 파워를 변화시키면서 복셀의 지름과 높이가 어떻게 변화하는지에 대해 이루어졌다. 실험 결과는 아래 전자현미경 사진과 같이 복셀이 노출시간에 따라 크기를 달리하여 형성되었다. 시간에 대해서 복셀의 직경은 다음 그래프에서처럼 나타내어진다.

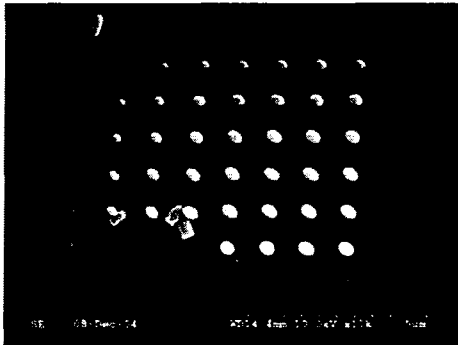
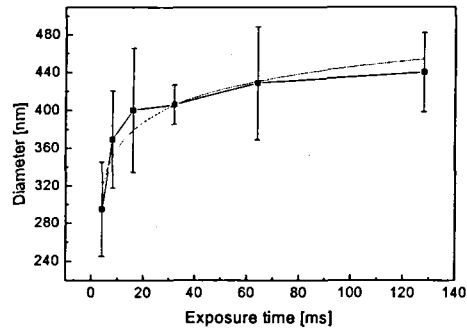


그림1. 복셀의 전자현미경 사진



그래프1. 노출 시간에 따른 복셀 직경 변화

이 실험에서 노출시간 2ms에서 최소지름 120nm의 복셀을 얻을 수 있었다. 또한, 복셀의 노출시간이나 레이저의 평균 파워가 증가함에 따라 복셀의 지름이나 높이가 위와 같이 형태로 증가하다가 일정값에 수렴하는 양상을 띠는 것을 확인할 수 있었다. 이차원이나 삼차원 미세구조물을 제작할 때에는 이 복셀을 겹쳐 쌓아서 만들 수 있는데, 각 구조물에 특징이나 두께, 모양에 따라 복셀의 노출시간이나 평균 파워를 조절하여 해당 구조물에 맞도록 해야 한다.

참고문헌)

1. ShinWook Yi, et al., "Three-Dimensional Micro-Fabrication using Two-Photon Absorption by Femtosecond Laser", Proc. of SPIE, 5432, 137 (2004)
2. J.Serbin, A.Egbert, et al., "Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics", Opt. Lett. 28, 301-303 (2003).

