

## 레이저 포토리소그래피 기반 3차원 구조물 제작 및 의공학적인 응용

이 승 민 대구경북과학기술원 로봇공학전공 박사과정 | e-mail : smlee@dgist.ac.kr  
 김 상 원 대구경북과학기술원 로봇공학전공 박사과정 | e-mail : swkim@dgist.ac.kr  
 최 흥 수 대구경북과학기술원 로봇공학전공 교수 | e-mail : mems@dgist.ac.kr

이 글에서는 레이저 기반 포토리소그래피 공정에 대해서 소개하고, 최근 각광받고 있는 3차원 레이저 포토리소그래피 시스템 및 이를 이용한 마이크로 스케일의 3차원 구조물 제작 방법과 응용에 대해 소개하고자 한다.

현재 우리의 일상생활에는 다양한 미세전자기계시스템(MEMS) 기반 제품들이 사용되고 있다. MEMS 소자 및 시스템은 휴대폰, 컴퓨터, 모바일 기기 등의 전자제품뿐만 아니라 자동차, 비행기 등의 대형 기계 시스템에도 다양하게 적용 되고 있다. MEMS 소자의 효율성과 공정 수율을 향상시키기 위해서는 MEMS 공정에서 가공 정밀도를 높여야 하며, 이를 위해서는 포토리소그래피 공정 시의 선폭을 최소화하여야 한다. 반도체 공정 기술의 일부인 포토리소그래피(Photolithography) 공정은 반도체 제조 공정에서 가장 중요한 단위공정으로, 다양한 반도체 공정의 근간이 되는 기본적인 공정이다. 이렇게 패터닝된 감광제(Photoresist)를 이용하여 후속 식각(Etching) 및 증착 공정을 진행하게 된다. 포토리소그래피 공정이란 마스크의 마이크로 패턴을 실리콘 기판 위의 감광제에 전사 시키는 과정을 의미하며, 도포된 감광제의 화학적 변화에 따라 노광 부분 또는 비노광 부분의 용해도 차이에 의해서 웨이퍼 상에 패턴이 형성된다. 최근 포토리소그래피 기술의 발전에 따라 사용자의 요구에 맞춰 해상도의 미세화가 요구되고 있으며, 마이크

로 스케일과 나노스케일을 가지는 다양한 구조물 제작에 관심이 모아지고 있다.

포토리소그래피의 미세화 정도를 결정하는 요소는 노광 광원과 감광제로 구분이 될 수 있다. 노광장비의 발전에 따라 다양한 노광 파장을 형성하는 노광기가 개발되었으며, 선폭을 최소화하기 위해 노광기에 설치되는 광원은 g-line(436nm), I-line(365nm), KrF(248nm), ArF(193nm) 등으로 발전해왔다. 또한, 최근에는 노광, 식각 등 복잡한 반도체 공정 과정을 최소화하기 위해 이광자 중합법(TPP: Two Photon Polymerization)에 의한 레이저 리소그래피 방식이 개발되어져 관심이 집중되고 있다. 이 기술은 근적외선 펨토초 레이저(near infrared femtosecond laser)와 같은 짧은 펄스를 내는 레이저를 감광제에 집속하여 비선형 현상에 의해 집속한 초점에서만 노광이 되는 것을 일컫는다. 이러한 기술은 마스크 없이 3차원 구조를 가지는 정교한 구조물을 만들 수 있으며, 희생층을 필요로 하는 전통적인 반도체 공정기술과는 차별성이 있어 다양하게 응용될 수가 있다. 이 글에서는 본 연구팀에서 의공학적인

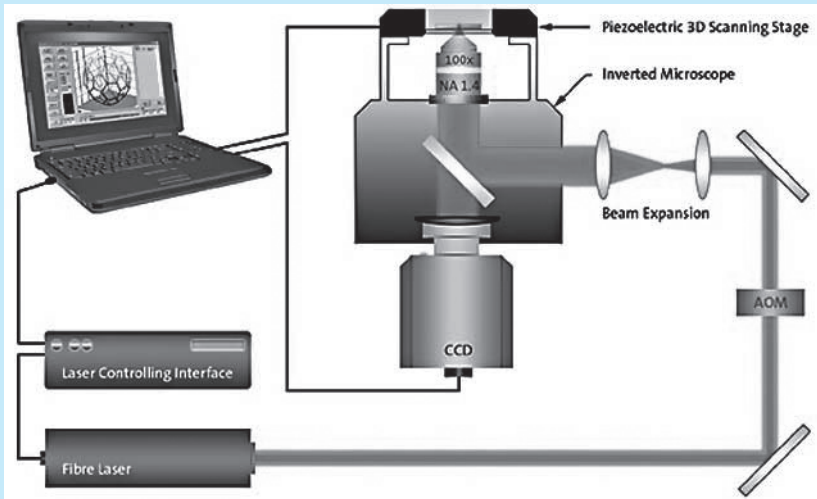


그림 1 3차원 공정시스템의 원리(<http://www.nanoscribe.de>)

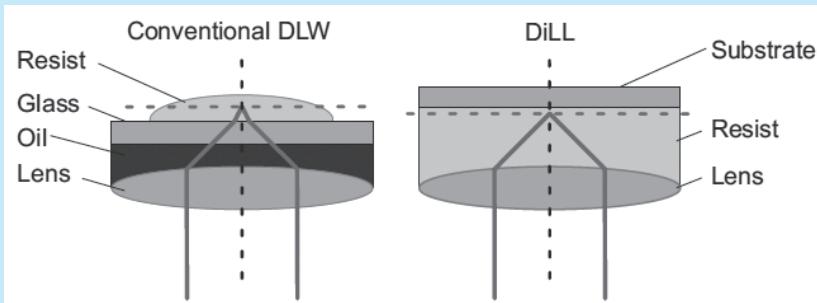


그림 2 감광제에 따라 노광방식 비교(Conventional DLW(좌) / DiLL 방식(우))  
(Nanoscribe GmbH, Nanoscribe Manual, 2015)

활용을 위해 개발 중인 3차원 구조체에 주목하여 다양한 감광제(IP-DIP, SU-8)를 이용한 공정방법 및 응용 분야를 소개하고자 한다.

최근 다양한 3차원 공정시스템이 개발되고 있으며, 이러한 시스템을 이용하여 폴리머 기반(IP-DIP PR, IP-L, SU-8, AZ Series)의 3차원 마이크로 구조물이 제작되고 있다. 이러한 3차원 공정시스템은 레이저를 이용하여 수백 nm(나노미터)에서 수 mm까지의 정밀도를 가지는 3차원 구조물을 정밀하게 제작할 수 있다. 연구 결과에 따르면 특정 3차원 공정시스템(Photonic Professional GT, Nanoscribe GmbH, Germany)을 사용하면 최소 100nm 수준까지 노광

이 가능하며, 이 방식은 감광제에 레이저를 직접 조사하는 방식을 이용한다. 그림 1은 3차원 레이저 리소그래피 시스템의 원리이다.

3차원 레이저 공정 시스템은 100fs의 짧은 펄스폭을 가지는 티타늄-사파이어 레이저에 의해 작동주파수 100MHz, 파장은 780nm로 구동된다. 이러한 시스템에서 발생하는 레이저를 감광제에 강하게 집속하여 노광하는 동안 미세하게 움직일 수 있는 Piezoelectric stage 또는 Glavo mirror에 의해 x-y 평면 이동을 할 수 있다. 이 시스템은 Conventional Direct Laser Writing(DLW) 방식과 Dip in laser lithography(DiLL) 방식으로 나눌 수 있으며, 굴절률 차이에 의해 interface를 찾아 그 지점부터 구조물을 제작한다. Conventional DLW 방식은 그림 2(좌)와 같이 하단에 위치한 레이저가 glass substrate와 굴절률(refractive

index)을 맞추기 위해 사용된 immersion oil을 통과하며 감광제 안에 집속이 되는 방식이다. 하지만, DiLL 방식[그림 2(우)]은 레이저가 Glass substrate 하단에 코팅 된 감광제에 직접적으로 dipping이 되는 방식으로  $\Delta n = n_{\text{substrate}} - n_{\text{photoresist}} \geq 0.05$  굴절률 차이에 의해 interface를 찾게 되며, 구조물 높이의 한계가 없이 최대 2mm 정도까지 제작이 가능하다.

노광방식이 결정이 되면, 3차원 CAD Software로 구조물을 설계한 뒤 STeroLithography(STL) File 형식으로 저장된 모델링 정보를 활용하여 Hatching, Slicing distance를 설정할 수 있다. Hatching distance는 특정 layer의 수직인 방향으로 slice 하였

을 때, 인접한 라인과 라인 사이의 거리를 결정하는 수치이며, slicing distance는 layer와 layer 사이에 거리 값을 말한다. 실제 DiLL 노광방식으로 Nanoscribe GmbH사에서 개발된 감광제인 IP-dip을 이용하여 Parameter test를 진행하였다. 선폭과 구조물 공정 조건을 결정하기 위해 다양한 공정 조건(Laser power, Scan speed, etc.)에 따라 최소 노광 가능한 선폭(Line width)을 그림 3과 같이 조사하였다. Polymerization range는 polymerization threshold와 explosion(burning) threshold 사이의 영역을 일컫는데, laser power와 scan speed를 적절하게 조절하면서 그 조건을 찾을 수 있다. 제시된 결과는 Laser power를 1.5mW, 1.8mW, 2 mW와 Scan speed는 20um/sec, 25um/sec, 30um/sec, perfectshape 기능으로 구분하여 노광한 결과이다. 빨간색 네모로 표시된 부분은 전자주사현미경(SEM)으로 확인한 결과 설계 값과 유사하게 노광이 되었으며, 그 외 구조물은 다소 burning 현상이 발생됨을 확인하였다. 그림 4는 laser power 1.8mW, Scan speed 25um/sec의 속도로 노광된 구조물을 보여준다.

본 연구팀에서는 의공학적인 활용을 위해 인체에 무해한 자기장으로 구동이 되고, 세포 또는 약물을 전달할 수 있는 생체 지지체형 마이크로 구조체를 개발하였다. 그림 5는 생체 적합(bio-compatible)한 재료인 SU-8 감광제로 3차원 구조물을 만들기 위한 공

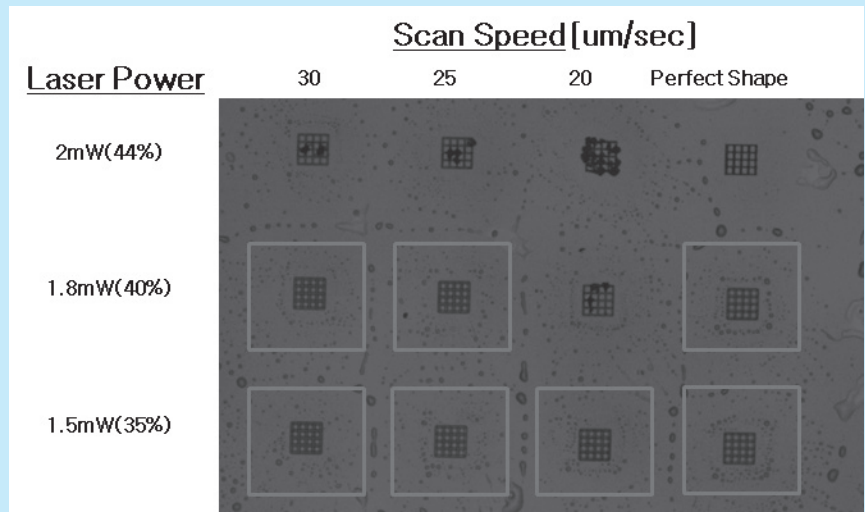


그림 3 최적 노광 조건(Laser power, scan speed)을 찾기 위한 Parameter test 결과

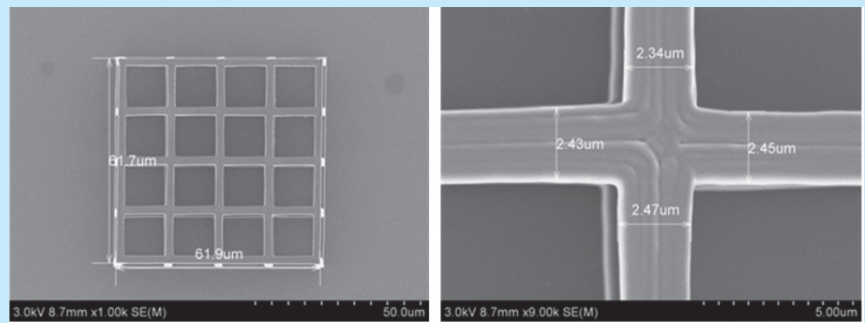


그림 4 Laser power: 1.8mW, Scan speed 25 um/s로 제작된 구조물

정도이다. 특수하게 제작된 Glass substrate를 cleaning한 후에 감광제(IP-Dip photoresist)를 얇게 도포한다. 그 후, 780nm 파장을 갖는 레이저를 감광제에 강하게 집속하여 3차원 구조물을 노광하며, IPA 또는 SU-8 Developer를 이용하여 현상을 한다. 그리고 스퍼터(Sputter) 시스템을 이용하여 니켈(Ni)과 티타늄(Ti)을 증착하였다. 제작된 구조체를 자기장으로 구동(manipulation)하기 위해 자성재료(Ni)와 구조체에 세포 또는 약물 등을 결합하고 생체 적합성을 향상시키기 위해 생체 적합한 재료(Ti)로 증착하였다. 그림 6은 3차원 구조물 노광 후 관찰한 전자주사현미경 및 공초점(Confocal) 현미경 사진이다. HEK 293 세포를 3차원 구조물에 배양하여 세포의

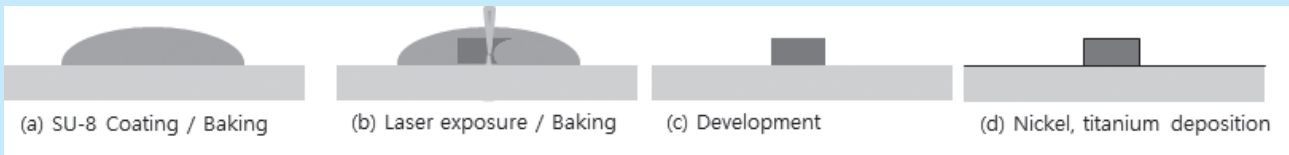


그림 5 SU-8 Photoresist를 이용한 3차원 구조물 제작 공정도

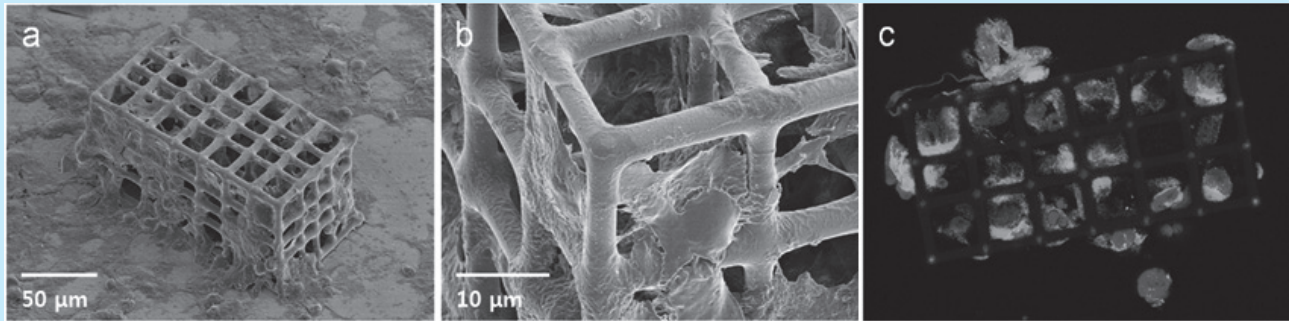


그림 6 HEK 293 세포가 배양된 생체지지형 마이크로 구조물(a), 전자주사현미경(SEM)으로 확대하여 관찰한 마이크로 구조물 사진(b), 공초점(Confocal) 현미경으로 구조물에 배양된 HEK293 세포 사진(c) (S. Kim et al., Advanced Materials, 25, 5863-5868, 2013)

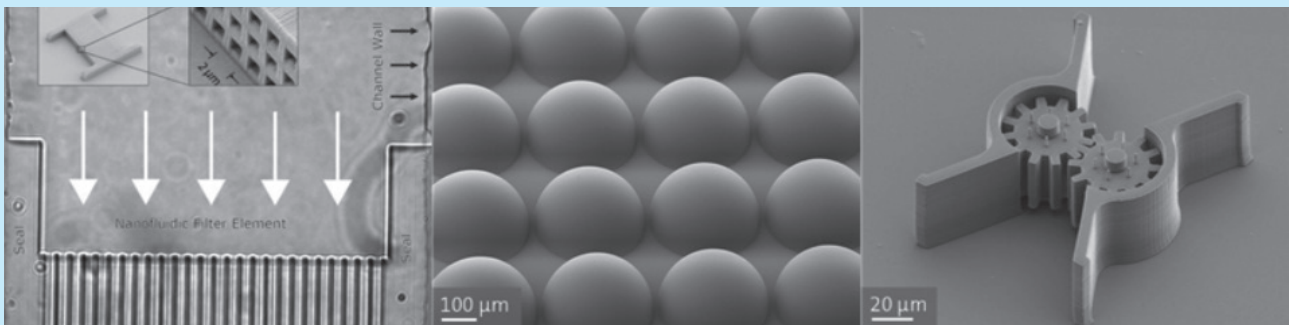


그림 7 3차원 공정 시스템을 이용하여 제작한 다양한 구조물; Nano-/Micro fluidic channel(좌), Micro-lens(중), Mechanical element(우) (<http://www.nanoscribe.de>)

증식을 평가하였으며, 세포가 구조물의 내외부에 결합하여 사상위족(filopodia)이 구조물에 뻗어감을 관찰할 수 있다.

최근 많은 그룹에서 진행된 연구 결과에 따르면 레이저 리소그래피 기반의 3차원 공정시스템을 이용하면 현재의 3D 프린터, 광학식 2D 노광기, 기계적 제조방식에서는 제작할 수 없었던 정교하고 다양한 구조물 개발이 가능하고, 의공학용 및 nano-/micro fluidic channel, micro-lens, mechanical element 등의 고해상도, 고정밀 Device를 제작(그림 7)할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 생체 적합성 재

료, 생분해성 재료, 높은 자화세기를 가지는 재료, 높은 전도도 및 열팽창계수를 가지는 재료 등 리소그래피 기반 3차원 공정장비의 감광제 개발을 통하여 향후 의공학 및 정밀가공공정의 기술혁신 및 응용연구의 깊이 있는 발전이 예상된다. 아울러 기존의 3D 프린터 및 노광기의 장점을 모두 가지는 3차원 미세패턴 제작이 가능하므로 3차원의 여러 구성요소의 해체 없이 결합된 형태의 구조물 제작, 3차원 패턴 간의 자유로운 정렬을 통해 기존의 평면공정의 반도체 및 MEMS 공정기술에 혁신을 불러올 것으로 예상된다.