



3차원 마이크로 세포칩 제작을 위한 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법

최재원^a, 이지선^a, 도한명^b, 김영철^b, 박지용^a, 손 용^a, 김경지^{c,d}, 이권재^e, 안정희^d, 하철우^{a*}

Three-dimensional Continuous Laser Scanning Method for Three-dimensional Microcell Chip Application

Jae-Won Choi^a, Jisun Lee^a, HanMyeong Do^b, Young Choel Kim^b, Jiyong Park^a, Yong Son^a, Gyeong-Ji Kim^{c,d}, Kwon-Jai Lee^e, Jeung Hee An^d, Cheol-Woo Ha^{a*}^a Intelligent Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology^b Institute of Advanced Convergence Technology, Kyungpook National University^c Department of Biomedical Engineering, Sogang University^d Department of Food and Nutrition, KC University^e Department of H-LAC, Daejeon University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 September 2020

Revised 13 October 2020

Accepted 14 October 2020

Keywords:

Nano-stereolithography

Three-dimensional continuous laser scanning

Two-photon polymerization

High resolution microstructure

ABSTRACT

Nanostereolithography induced by a femtosecond laser is widely used for fabrication of three-dimensional (3D) microstructures with submicron resolutions. In this study, we propose a 3D continuous laser scanning method for an effective direct writing of 3D microstructures. The advantages of the 3D continuous laser scanning method are analyzed by considering its high resolution, time economy, and fabrication effectiveness. As the 3D continuous laser scanning is an efficient manufacturing method, which can immediately respond to a complex 3D structure, it could be used for various applications including platforms for cell culture, metamaterials, and functional sensors. In this paper, the 3D open cell structure was fabricated and cells are cultured on the structure for microcell chip application.

1. 서론

나노 패턴 제작 기술은 전자, 에너지, 바이오 제품 개발을 위한 핵심기술 중 하나로, 최근 반도체, 디스플레이 등의 고부가가치 산업 성장에 원동력이 되어 왔다. 최근 2차원 평면 패턴 제작 기반의 광리소그래피(photolithography) 공정기술을 벗어나 고효율, 고집적화를 위한 3차원 패터닝 공정에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다.

특히, 100 nm 정밀도의 3차원 입체 형상을 제작할 수 있는 나노 스테레오리소그래피(nano-stereolithography) 공정이 활발히 연

구되고 있다^[1-3]. 나노 스테레오리소그래피 공정을 이용한 극미세 3차원 형상제작은 상대적으로 크고 다양한 응용을 위한 구조물을 제작하는 3D프린팅 기술^[4,5]을 바탕으로 개발된 것으로 임의의 모양을 가지는 3차원 CAD 모델을 물리적인 모형으로 제작하는 공정이^[6]. 또한 나노 스테레오리소그래피 공정은 기존의 리소그래피 방법으로는 제작하기 어렵거나 불가능한 수백 μm 에서 수 mm 크기의 복잡한 극미세 형상을 제작할 수 있다^[7]. 나노 스테레오리소그래피 공정은 이광자 흡수(two-photon absorption)에 의한 경화 현상을 활용하여 이광자 흡수에 의한 경화현상은 레이저의 침투 출력이 매우 높은 부분에서만 두 개의 광자 에너지를 동시에

* Corresponding author. Tel.: +82-32-8084-8827

E-mail address: cwaha@kitech.re.kr (Cheol-Woo Ha).

흡수하는 현상이다. 따라서 레이저 광의 초점부의 일부분에서만 경화가 발생하기 때문에 광의 회절 한계 이하인 약 100 nm 수준의 제작정밀도를 확보할 수 있다^[8-12]. 이광자 흡수 현상에 의한 경화 현상을 이용하여 광의 회절 한계 이하의 제작 정밀도로 3차원 형상을 제작할 수 있는 나노 스테레오리소그래피 공정기술은, 다양한 응용 구조 개발을 위해 논의가 진행되고 있다. 예를 들어, 세포 배양을 위한 구조^[13], 메타물질 구조^[14,15], 구동 소자^[16], 광학^[17,18], 전기소자^[19], 유체소자^[20,21]로의 응용 등 다양한 분야에 응용되고 있다.

일반적으로 나노 스테레오리소그래피 공정을 활용한 3차원 형상 제작에는 적층형 제작 방법이 활용된다. 적층형 방법은 x, y 평면상의 2차원 패턴을 한 층씩 z축 방향으로 쌓아 올려 임의의 모양을 가지는 3차원 형상을 제작하는 공정이다. 그러나 적층형 방법으로 제작 시 생기는 적층 면의 단차 및 공정의 비효율성 등이 개선되어야 할 문제로 제기되고 있다^[22].

본 논문에서는 x, y, z 방향을 동시에 제어하여 고해상도의 나노 스테레오리소그래피가 가능한 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법을 제안하였다. 또한, 이를 3차원 마이크로 세포칩 제작에 적용함으로써 기존에 문제점으로 제기되는 높은 표면 거칠기, 이로 인한 굴절률의 상승, 작은 스케일에서의 낮은 성형성, 스캔 경로의 중첩으로 인한 느린 제작 속도 등을 개선하고자 한다.

2. 본 론

2.1 나노스테레오리소그래피 공정 이론

나노 스테레오리소그래피 공정은 나노급 정밀도로 3차원의 마이크로 형상을 제작할 수 있는 공정으로, 대표적인 기본 구성은 Fig. 1과 같다. 광원은 보통 펄스 폭이 수 십 펨토초 수준의 펨토초 레이저로 구성되며, 파장은 근적외선 파장대(780 nm ~ 1560 nm)가 사용된다. 광원에서 나온 레이저 빔은 높은 개구수(numerical aperture, NA)의 대물렌즈를 거쳐 시편 상단으로 집광되며 이광자 흡수 원리를 이용하여 광경화성 폴리머 재료를 경화시킨다. 광경화성 폴리머를 커버 글라스 위에 피펫을 활용하여 떨어뜨려 시편을 준비할 수 있다. xy 모터 스테이지를 활용하여 제작하고자 하는 위치로 이동하며, xyz 피에조 스테이지를 활용하여 시편을 움직여서 레이저 초점부에 의한 경화를 통해 원하는 형상으로 적층 제작이 되도록 구성한다.

레이저 초점부에서 국부적으로 경화되는 영역을 복셀(volume of pixel, voxel)이라 한다. 이러한 복셀이 xyz 피에조 스테이지를 활용한 레이저 스캐닝에 의해 중첩되면서 3차원 형상을 제작한다. Fig. 1과 같이 레이저 에너지 분포가 길쭉한 형태를 나타냄에 따라 복셀의 모양 또한 제작되는 3차원 형상의 z축 방향으로 길쭉한 형

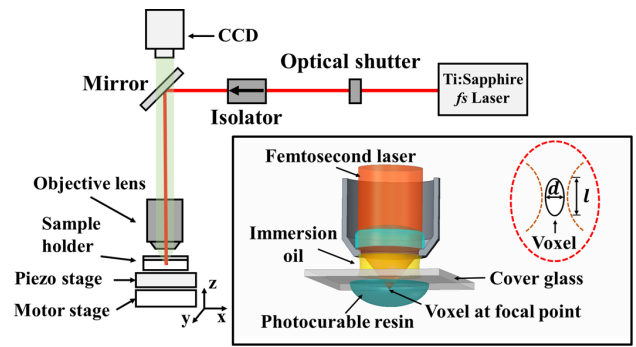


Fig. 1 Schematic diagrams of the nano-stereolithography system

태를 나타낸다. 복셀의 모양은 식 (2)와 같이 레이저의 출력(P), 레이저 스캐닝 속도(1/t)에 의해 결정된다. 식 (2)의 나머지 공정 변수는 레이저 특성, 재료 특성, 대물렌즈 사양에 관련된 값으로써 본 논문에서는 고정된 값을 갖는다. 따라서 레이저 출력과 레이저 조사시간을 공정 변수로 하여 고분자 수지가 경화되는 패턴을 평가하여 공정 조건을 결정할 수 있다^[7,8]. (P_i : 레이저의 출력, t : 레이저 조사 시간, NA : 대물렌즈 개구수, λ : 레이저 파장, n : 재료 굴절률, E_{th} : 이광자 광중합이 일어나는 임계 조건)

$$d(P_i, t, NA) = \frac{\lambda}{\pi \tan(\sin^{-1}(NA/n))} \times \left[\ln \left(\frac{4\pi^2 P_i^2 t [\tan(\sin^{-1}(NA/n))]^4}{E_{th} \lambda^4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$l(P_i, t, NA) = \frac{2\lambda}{\pi [\tan(\sin^{-1}(NA/n))]^2} \times \left[\left(\frac{4\pi^2 P_i^2 t [\tan(\sin^{-1}(NA/n))]^4}{E_{th} \lambda^4} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (2)$$

2.2 3차원 연속 레이저 스캐닝 기반 나노 스테레오리소그래피 공정

나노 스테레오리소그래피 공정은 일반적으로 적층형 방법으로 3차원 형상을 제작한다. 즉, 고정된 레이저에 대해서 xy 스테이지를 움직여서 2차원 패턴을 만든 후 z축 방향으로 한 층 높이만큼 움직여서 3차원 형상을 제작한다. 이러한 적층형 방법은 제작 형상의 설계에 따라서 적층면이 그대로 표현되거나 전체 공정 시간이 길어질 수 있다.

이에 본 연구에서 제안하는 3차원 연속 레이저 스캐닝은 한 붓 그리기가 가능한 방법으로써, 기존의 적층형 방법과 다르게 x, y, z 방향의 피에조 스테이지를 동시에 제어하여 3차원 형상을 제작하는 방법이다. 3차원 연속 레이저 스캐닝을 위해 나노 스테레오리소그래피 공정에 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법을 적용하였을 경우, 기존 적층형 방법에 비해 고해상도의 3D 마이크로 소자를 제

작할 수 있다. Fig. 2는 방법별 해상도 차이에 관한 그림으로서, 적층형 방법은 z축 방향의 곡선을 표현함에 있어 각 층 간의 단차로 인해 한계를 가지는 것을 보여준다. 특히, 경사가 완만한 영역에서는 적층 두께를 최소로 하더라도 완벽히 균일한 면을 구현하기 어렵다. 울퉁불퉁한 적층면이 그대로 표현되며, 이는 광학 소자와 같은 응용 소자의 성능 저하 원인이 될 수 있다. 반면, Fig. 2(b)의 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법은 바닥면 부터 최상위층까지 연속적인 한 붓 그리기가 가능하기 때문에 단차가 발생하지 않아 높은 해상도의 구조 제작이 가능하다. 따라서 광학 응용을 위한 구조 제작의 경우, 적층면의 단차로 인한 파면의 왜곡을 감소시켜 광학적 성능을 증가시킬 수 있다.

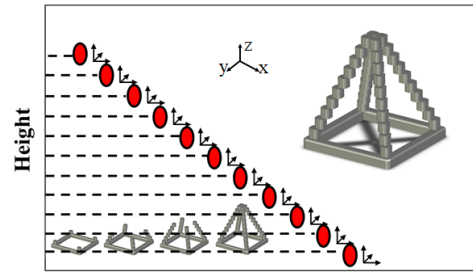
또한, 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법은 제작하고자 하는 형상에 따라 제작 시간 단축에도 효과적이다. Fig. 3과 같이 확장된 개방형 구조를 활용하여 적층형 방법과 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법의 제작 시간을 비교하였다. 총 제작 시간은 총 제작 길이에 비례하므로 $a \times a \times a \mu\text{m}^3$ 크기의 단위 셀이 가로, 세로로 n 개씩 늘어진 구조를 제작하는 경우, 적층형 방법은 식 (3)과 같이 표현되고, 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법의 경우에는 식 (4)와 같이 표현된다. (a : 셀의 가로, 세로, 높이 길이, r : 복셀의 크기, n : 셀 개수, v : 스캐닝 속도, T_{layer} : 적층형 방법 제작 시간, T_{cont} : 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법 제작 시간, L : 총 제작 길이). 예를 들어, Fig. 3의 (b), (c)와 같이 가로, 세로, 높이 길이가 $1 \mu\text{m}$ 인 단위 셀을 8×8 배열로 스캔 속도 $10 \mu\text{m/s}$, 복셀 크기 30 nm 으로 제작할 경우, 두 방법은 약 6배 정도의 제작 시간 차이가 발생함을 알 수 있다. 나아가 단순 구조가 아닌 대면적 파트 제작 시, 구조가 복잡해짐에 따라 총 제작 길이가 늘어나므로 동일한 구조를 제작하더라도 제작 시간 면에서 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법이 훨씬 유리해질 수 있다.

$$T_{layer} = L/v = [2a(n+1) \times a/r]/v \quad (3)$$

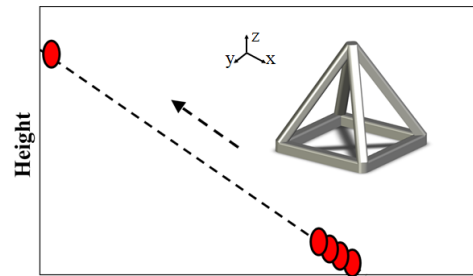
$$T_{cont} = L/v = [2a(n+1) + a(n+1)^2]/v \quad (4)$$

3. 실험

본 논문에서 활용한 나노 스테레오리소그래피 공정의 광원은 모드 잠금된 티타늄-사파이어 레이저(Ti: sapphire mode-locked laser)로서 최대 출력은 1 W, 작동 주파수는 80 MHz, 펄스폭은 80 fs이며 파장은 780 nm이다. 광원에서 나오는 펄스 레이저는 $\lambda/2$ 플레이트에 의해 출력이 조절된다. 회전할 수 있는 미러가 최소 회전각에 대하여 약 $200 \mu\text{m}$ 의 반응시간으로 작동하여 레이저 빔의 경로를 변경함으로써 빠르게 레이저 빔의 on/off를 제어할

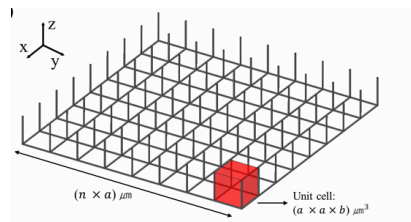


X-Y stage
(a) Layer-by-layer laser scanning method



X-Y stage
(b) 3D continuous laser scanning method

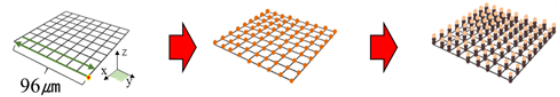
Fig. 2 Design of pentahedral structure



(a) Design of open cell structure

Total build time of the **Layer by layer** laser scanning method

$$600 \mu\text{m} / 10 \mu\text{m/s} = 60 \text{ sec} = 1 \text{ min}$$



(b) Layer-by-layer laser scanning method

Total build time of the **3D continuous** laser scanning method

$$99 \mu\text{m} / 10 \mu\text{m/s} = 9.9 \text{ sec} = 0.17 \text{ min}$$



(c) 3D continuous laser scanning method

Fig. 3 Comparing the total build time

수 있도록 옵티컬 셔터(optical shutter)를 이용하였다. 레이저 빔 위치 제어부는 xyz 피에조 스테이지, xy 모터 스테이지, 지그, 대

물렌즈로 구성된다. xyz 피에조 스테이지는 0.1 nm의 정밀도로 800 × 800 × 250 (μm) x, y, z의 영역을 약 50 ms의 응답속도로 움직인다. 빔의 집광을 위하여 높은 개구수를 가지는 대물렌즈(NA = 1.4)를 사용하였다. 복셀의 크기는 식 1과 식 2에 의해 레이저의 파워와 레이저 스캐닝 속도에 따라 복셀의 크기가 결정된다.

재료는 에폭시 계열의 광경화성 고분자 수지인 Ormocer (micro resist technology GmbH)를 사용하였다. Ormocer는 오가닉 기반의 세라믹 재료(organic modified ceramics)이며 생체적합성 소재로서 향후 세포 성장 목적의 바이오 응용 소자에 활용할 수 있는 재료이다^[23-25]. 적층형 방법과 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법을 동일 공정 조건으로 비교하기 위해, 레이저 파워는 50 mW로 조사하였으며 레이저 스캐닝 속도는 10 μm/s로 고정하였다. NA 1.4의 대물렌즈에 의한 복셀의 크기는 약 1.6 μm 수준이다.

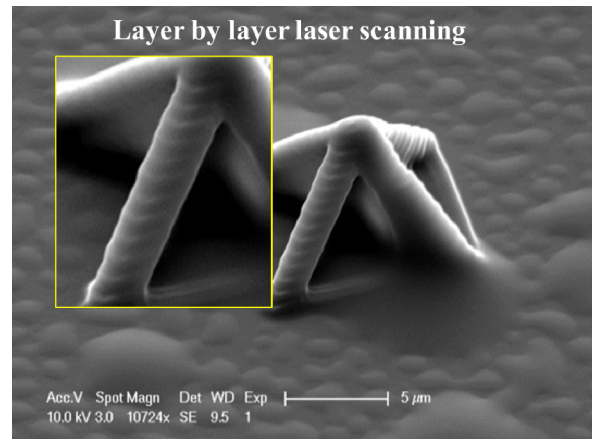
3.1 적층형 방법 및 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법 비교 실험

우선, 본 연구에서 제시한 기존 적층형 방법과 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법의 제작 해상도 및 공정 효율 등을 검증하기 위하여 개방형 구조를 제작하여 비교하였다.

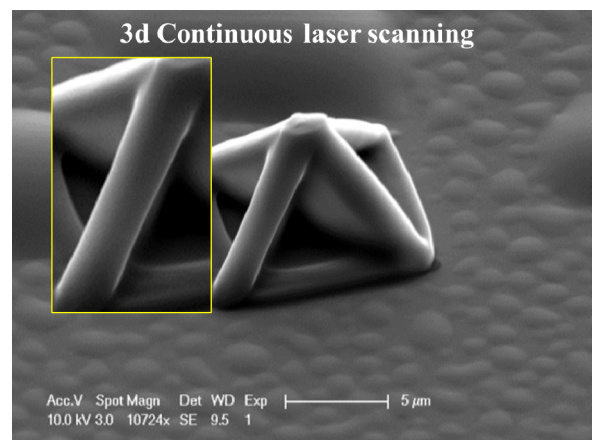
개방형 구조로는 Fig. 4와 같이 각각의 면이 10 μm 길이로 설계된 5면체를 제작하였다. Fig. 4(a)는 xy 평면의 2차원 패턴 제작 및 적층을 반복하여 3차원 형상을 제작하는 적층형 방법의 제작 결과를 보여준다. 적층형 방법에서는 적층에 의한 울퉁불퉁한 표면이 확인된다. 이는 복셀을 하나씩 적층하여 쌓아 올렸기 때문에 필연적으로 생길 수 밖에 없는 제작 결과이다. 이를 Fig. 4(b)와 같이 xyz 방향을 동시 제어하여 한붓그리기가 가능한 3차원 연속 레이저 스캐닝을 적용하면 표면이 균일 혹은 매끈한 표면의 3차원 마이크로 형상을 얻을 수 있다. 또한 스캐닝 경로의 단순화로 전체 제작시간이 적층형 방법에 비해 약 7.5배 단축되었다. 이는 상기 제시한 이론과 수치적으로 일치하는 결과로 검증됨을 알 수 있다.

3.2 개방형 구조 활용 3차원 세포 칩 제작

개방형 구조는 3차원 세포 칩 제조를 위한 세포 성장 플랫폼으로 활용할 수 있다. 최근 세포의 성장 및 특성을 파악하기 위해 세포 칩(cell chip)을 활용한 다양한 실험에 대한 관심이 커지고 있다. 3차원 세포 칩의 경우 기존의 공정 기반의 2차원 구조 대비 3차원 구조 내에서의 세포 성장은 보다 정확한 세포 특성을 파악할 수 있으므로 매우 중요하다^[26-29]. 특히, 암세포의 성장 및 특성 이해를 위해 3차원 세포 칩을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 2차원 구조에서는 세포들이 기관의 영향을 많이 받고 암세포들이 충분히 성장하지 못해 실제 암세포들의 성장 거동을 분석하는데 한계가 있지만, 3차원 세포칩에서는 기관의 영향에서 벗어나 세포와 세포간의 상호작용에 의한 특성 파악이 가능하기 때문



(a) Layer-by-layer laser scanning method



(b) 3D continuous laser scanning method

Fig. 4 SEM images of pentahedral structures fabricated by layer-by-layer laser scanning and 3D continuous laser scanning method

이다^[28,29].

3차원 세포 칩은 세포들이 들어갈 수 있는 여러 개의 빈 공간 (pore)이 필요하며 개방형 구조는 이러한 3차원 세포칩의 요구조건을 만족시킨다. 세포들은 개방형 구조의 빈 공간 속으로 들어가서 3차원 세포 구조체로 성장할 수 있다.

본 연구에서 활용한 세포는 종양 세포의 일종인 Hela 세포를 활용하였다. Hela 세포는 다른 세포에 비해 내성이 있고 증식력이 높아서 세포 성장 연구에서 활발히 활용되어온 세포이다. 이 세포의 크기는 평균 10 μm 정도로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 Hela 세포가 성장할 수 있는 세포 칩을 설계하였고 향후 세포 연구에 활용할 수 있는 기반 기술을 확보하고자 하였다.

Fig. 5에서 확인할 수 있듯, 3차원 세포 칩 구조는 3계층 구조로 제작되어 각각의 방에 세포가 들어가서 성장할 수 있도록 설계하였다. 116개의 개별 구획으로 나뉘어진다. 1층에는 가로 8개 및 세로 8개 방으로 총 64개, 2층에 가로 6개 및 세로 6개 방으로 총 36개, 3층에는 가로 4개 및 세로 4개의 방으로 16개의 방이

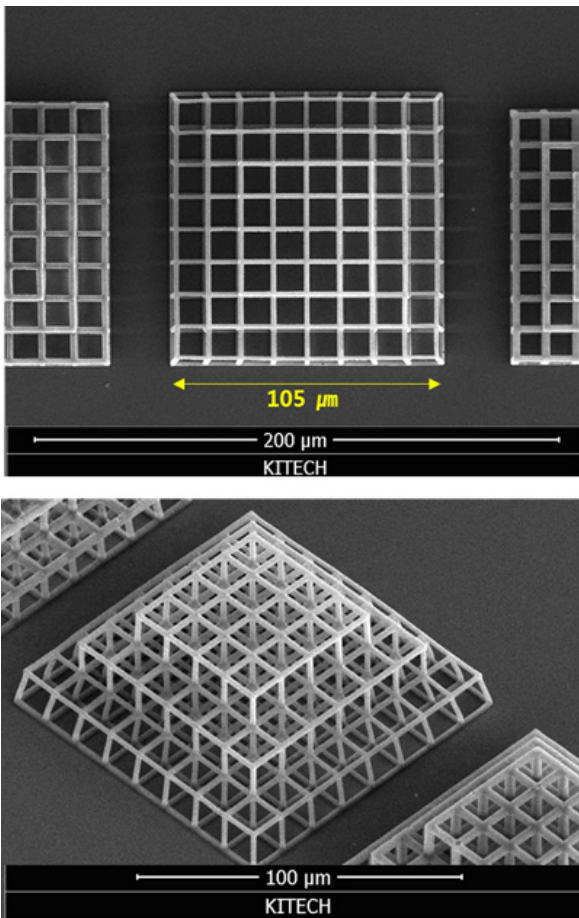


Fig. 5 SEM images of the micro 3D cell chips based on the three-dimensional continuous laser scanning method

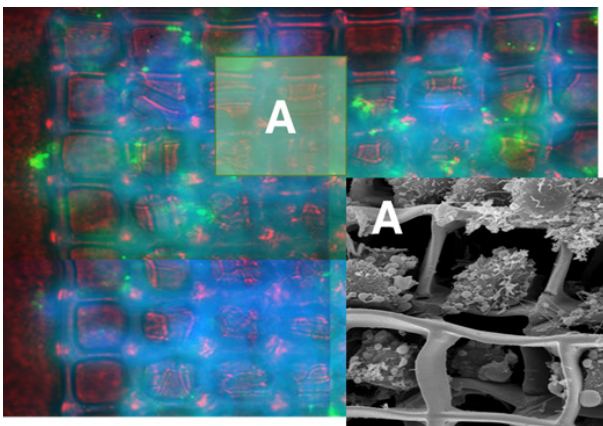


Fig. 6 Confocal microscopic and SEM image of Hela cell cultured 3D cell chip

구성되어 총 116개의 세포 방으로 구성되어 있다. 각각의 방은 Hela 세포가 잘 성장할 수 있도록 Hela 세포의 크기와 유사한 $12 \times 12 \times 12$ (μm) 크기로 구성하였다.

3차원 세포 칩의 구조는 $1 \mu\text{m}$ 두께의 얇은 선으로 연결되어 제작되었다. 3차원 세포 칩 구조의 각 구획은 비어있으며 그 구획

안에서 3차원으로 Hela 세포를 배양할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법을 활용하여 3차원 세포 칩 구조를 제작하였다. 기존의 적층 방법에서는 3차원 세포 칩의 전체 제작 시간이 1.1일 소요되었지만, 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법을 활용하여 40분으로 약 36배 빨리 제작 할 수 있었다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 제작된 3차원 세포칩 내에 세포가 잘 성장하였으며, 향후 다양한 3차원 세포칩 구조에 대해 세포 성장에 대한 추가연구가 가능할 것으로 기대된다. 이와 같이, 나노 스테레오리소그래피 공정 연구는 다양한 복잡한 3차원 형상을 자유롭게 제작 가능하므로 3차원 세포 칩과 같은 다양한 3차원 형상에 대한 제작이 요구되는 생체 조직 연구에서 강점을 가진다.

4. 결론

본 논문에서는 고해상도 나노 스테레오리소그래피를 위한 3차원 연속 레이저 스캐닝 방법을 제안하였다.

나노 스테레오리소그래피 공정을 활용한 마이크로 3D 프린팅 기술은 레이저를 광경화성 고분자 수지에 조사한 후, 레이저를 스캐닝하여 마이크로 형상을 제작한다.

3차원 연속 레이저 스캐닝 적용 시 복셀 중첩에 의한 울퉁불퉁한 표면이 개선되어 고해상도의 3차원 마이크로 형상 제작이 가능하며, 형상 구조에 따라 레이저 스캐닝 경로가 획기적으로 감소하여 제작시간을 단축시킬 수 있다. 또한 형상의 뒤틀림이나 형상이 레진에서 부유하는 현상 없이 제작할 수 있다.

3차원 연속 레이저 스캐닝 방법은 복잡한 형태의 3차원 구조에 즉시 대응 할 수 있는 효율적인 제작 방법이기 때문에 세포 배양을 위한 플랫폼, 메타물질, 기능성 센서 등, 다양한 응용 분야에 활용 가능할 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2020년도 한국생산기술연구원 내부과제(UI200020)의 지원과 산업통상자원부의 산업기술혁신사업(20012434) 및 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 지역산업거점기관지원사업(R0004072)으로 수행된 연구결과입니다.

References

- [1] 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 Mater. Sci. Process, 84:4 379-383, <https://doi.org/>

- 10.1007/s00339-006-3633-x.
- [2] Lim, T. W., Son, Y., Yang, D. Y., Kong, H. J., Lee, K. S., Park, S. H., 2008, Continuous Scanning Method for Improvement of Precision and Fabrication Efficiency of Two-photon Stereolithography, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, 32:5 396-401, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2008.32.5.396>.
- [3] Wang, X., Wei, Z., Baysah, C. Z., Zheng, M., Xing, J., 2019, Biomaterial-based Microstructures Fabricated by Two-photon Polymerization Microfabrication Technology, *RSC Adv.*, 9:59 34472-34480, <https://doi.org/10.1039/c9ra05645a>.
- [4] Hilton, P., 2000, *Rapid Tooling: Technologies and Industrial Applications*, Marcel Dekker, New York.
- [5] Ha, C. W., Prabhakaran, P., Lee, K. S., 2019, Versatile Applications of 3D Objects Fabricated by Two-Photon-Initiated Polymerization, *MRS Communications*, 9:1 53-66, <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.218>.
- [6] Varadan, V. K., Jiang, X., Varadan, V. V., 2001, *Microstereolithography and other Fabrication Techniques for 3D MEMS*, Wiley, New York.
- [7] Zhang, X., Jiang, X. N., Sun, C., 1999, Micro-stereolithography of Polymeric and Ceramic Microstructures, *Sensors Actuators, A Phys.* 77:2 149-156, [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00189-2](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00189-2).
- [8] Maruo, S., Kawata, S., 1998, Two-Photon-Absorbed Near-Infrared Photopolymerization for Three-Dimensional Microfabrication, *J. Microelectromechanical Syst.*, 7:4 411-415.
- [9] Kawata, S., Sun, H. B., Tanaka, T., Takada, K., 2001, Finer Features for Functional Microdevices, *Nature.*, 412:6848 697-698, <https://doi.org/10.1038/35089130>.
- [10] Zheng, L., Kurselis, K., El-Tamer, A., Hinze, U., Reinhardt, C., Overmeyer, L., Chichkov, B., 2019, Nanofabrication of High-Resolution Periodic Structures with a Gap Size Below 100 nm by Two-Photon Polymerization, *Nanoscale Res Lett*, <https://doi.org/10.1186/s11671-019-2955-5>.
- [11] Serbin, J., Egbert, A., Ostendorf, A., Chichkov, B. N., Houbertz, R., Domann, G., Schulz, J., Cronauer, C., Fröhlich, L., Popall, M., 2003, Femtosecond Laser-induced Two-Photon Polymerization of Inorganic-organic Hybrid Materials for Applications in Photonics, *Opt. Lett.*, 28:5 301, <https://doi.org/10.1364/ol.28.000301>.
- [12] Deubel, M., Von Freymann, G., Wegener, M., Pereira, S., Busch, K., Soukoulis, C. M., 2004, Direct Laser Writing of Three-dimensional Photonic-crystal Templates for Telecommunications, *Nat. Mater.*, 3:7 444-447, <https://doi.org/10.1038/nmat1155>.
- [13] Trautmann, A., Götzendorfer, B., Walther, T., Hellmann, R., 2018, Scaffolds in a Shell—a New Approach Combining One-Photon and Two-Photon Polymerization, *Opt. Express.*, 26:23 29659, <https://doi.org/10.1364/oe.26.029659>.
- [14] Frenzel, T., Kadic, M., Wegener, M., 2017, Three-dimensional Mechanical Metamaterials with a Twist, *Science*, 358:6366 1072-1074, <https://doi.org/10.1126/science.aao4640>.
- [15] Vangelatos, Z., Komvopoulos, K., Grigoropoulos, C. P., 2019, Vacancies for Controlling the Behavior of Microstructured Three-dimensional Mechanical Metamaterials, *Math. Mech. Solids.*, 24:2 511-524, <https://doi.org/10.1177/1081286518810739>.
- [16] Ha, C. W., Yang, D. Y., 2014, Rotational Elastic Micro Joint based on Helix-augmented Cross-spring Design for Large Angular Movement, *Opt. Express*, 22:17 20789, <https://doi.org/10.1364/oe.22.020789>.
- [17] Liberale, C., Cojoc, G., Candeloro, P., Das, G., Gentile, F., De Angelis, F., Di Fabrizio, E., 2010, Micro-optics Fabrication on Top of Optical Fibers Using Two-Photon Lithography, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 22:7 474-476, <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2040986>.
- [18] Gissibl, T., Thiele, S., Herkommer, A., Giessen, H., 2016, Two-Photon Direct Laser Writing of Ultracompact Multi-lens Objectives, *Nat. Photonics.*, 10:8 554-560, <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.121>.
- [19] He, Z., Tan, G., Chanda, D., Wu, S.T., 2019, Novel Liquid Crystal Photonic Devices Enabled by Two-Photon Polymerization [Invited], *Opt. Express*, 27:8 11472, <https://doi.org/10.1364/oe.27.011472>.
- [20] Kumi, G., Yanez, C. O., Belfield, K. D., Fourkas, J. T., 2010, High-speed Multiphoton Absorption Polymerization: Fabrication of Microfluidic Channels with Arbitrary Cross-sections and High Aspect Ratios, *Lab Chip.*, 10:8 1057-1060, <https://doi.org/10.1039/b923377f>.
- [21] Choi, H. W., Yoon, S. C., Ma, J. K., Bang, D. W., 2014, Fabrication of Micro-reactor by 3D Printing Machine, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 23:3 218-222, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.3.218>.
- [22] Park, C., Kim, M. H., Hong, S. M., Go, J. S., Shin, B. S., 2015, A Study on the Comparison Mechanical Properties of 3D

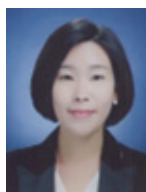
Printing Prototypes with Laminating Direction, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 24:3 334-341, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2015.24.3.334>.

- [23] Schizas, C., Karalekas, D., 2010, Mechanical Characteristics of an Ormocomp® biocompatible Hybrid Photopolymer, *J. Mech. Behav. Biomed.*, 4:1 99-106, <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2010.09.010>.
- [24] Ovsianikov, A., Schlie, S., Ngezhahayo, A., Haverich, A., 2007, Two-Photon Polymerization Technique for Microfabrication of CAD-designed 3D Scaffolds from Commercially Available Photosensitive Materials, *J. Tissue Eng., Regen. M.*, 1:6 443-449, <https://doi.org/10.1002/term.57>.
- [25] Schlie, S., Ngezhahayo, A., Ovsianikov, A., Fabian, T., Kolb, H., Haferkamp, H., Chichkov, B. N., 2017, Article Metrics Related Articles Cite Share Request Permissions Explore More Download PDF Three-Dimensional Cell Growth on Structures Fabricated from ORMOCER® by Two-Photon Polymerization Technique, *J. Biomater. Appl.*, 22:3 275-287, <https://doi.org/10.1177/0885328207077590>.
- [26] Richter, B., Hahn, V., Bertels, S., Claus, T. K., Wegener, M., Delaittre, G., Barner-Kowollik, C., Bastmeyer, M., 2017, Guiding Cell Attachment in 3D Microscaffolds Selectively Functionalized with Two Distinct Adhesion Proteins, *Adv. Mater.*, 29:5 1604342, <https://doi.org/10.1002/adma.201604342>.
- [27] Klein, F., Richter, B., Striebel, T., Franz, C. M., Freymann, G., Wegener, M., Bastmeyer, M., 2011, Two-Component Polymer Scaffolds for Controlled Three-Dimensional Cell Culture, *Adv. Mater. J.*, 23:11 1341-1345, <https://doi.org/10.1002/adma.201004060>.
- [28] Lee, K. J., An, J. H., Shin, J. S., Ha, C. W., Son, Y., Seok, J. S., Lee, K. S., 2017, Evaluation of Anticancer Drug in a Polymer 3D Cell Chip, *Opt. Mater. Express*, 7:8 291941, <https://doi.org/10.1364/OME.7.002752>.
- [29] Lee, K. J., An, J. H., Ha, C. W., Son, Y., Yang, D. Y., Chae, H. N., Lee, K. S., Choi, J. W., 2016, 3D Hierarchical, Pyramid-Based Cancer Cell Chip for the Detection of Anticancer Drug Effects, *J. Biomed. Nanotechnol.*, 12 1-14, <https://doi.org/10.1166/jbn.2016.2317>.



Jae-Won Choi

Associate Research in Department of Intelligent Manufacturing R&D Department, Korea Institute of iIndustrial Technology. His research interest is micro 3D Printing.
E-mail: jw0910@kitech.re.kr



Jisun Lee

Researcher in Department of Intelligent Manufacturing R&D Department, Korea Institute of iIndustrial Technology. Her research interest is Additive Manufacturing.
E-mail: jslee326@kitech.re.kr



HanMyeong Do

Associate Research in Institute of Advanced Convergence Technology, Kyungpook National University. His research interest is Additive Manufacturing.
E-mail: oneman@iact.or.kr



Young Cheol Kim

Research Professor in Institute of Advanced Convergence Technology, Kyungpook National University. His research interest is Additive Manufacturing.
E-mail: yckim@knu.ac.kr



Jiyong Park

Senior researcher in Department of Intelligent Manufacturing R&D Department, Korea Institute of iIndustrial Technology. His research interest is Additive Manufacturing.
E-mail: j.park@kitech.re.kr



Yong Son

Principle researcher in Department of Intelligent Manufacturing R&D Department, Korea Institute of iIndustrial Technology. His research interest is Additive Manufacturing.
E-mail: sonyong@kitech.re.kr



Gyeong-Ji Kim

Doctor's Course Student in Department of Biomedical Engineering, Sogang University. Her research interest is Cell Biology. E-mail: kgj8495@hanmail.net



Kwon-Jai Lee

Assistant Professor in Department of H-LAC, Daejeon University. His research interest is Nano Material Manufacturing. E-mail: kjlee@dju.kr



Jeung Hee An

Associated Professor in Department of Food and Nutrition, KC University. Her research interest is Cell Biology. E-mail: anjhee@hanmail.net



Cheol-Woo Ha

Senior researcher in Department of Intelligent Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is Two-photon sterolithography. E-mail: cwha@kitech.re.kr