

★ 2020년 8월 26일(수) 조간(온라인 8. 25.(화) 낮 12:00)부터 보도해주시기 바랍니다.

## 보도자료

청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF




<홍보실> 박길수 실장, 이은지 부연구위원 ☎ 042-869-6116

<자료문의> 서울대학교 기계공학과 고승환 교수(02-880-7114)

서울대학교 기계공학과 신재호 박사후연구원(02-880-1681)

# 투명물질의 레이저 기반 초고속 가공법 개발 장기모사칩 연구를 위한 획기적 플랫폼 개발

- 한국연구재단(이사장 노정혜)은 고승환-전누리 교수(서울대학교) 공동 연구팀이 바이오칩 쾌속 제작에 적용될 수 있는 초고속 레이저 직접 가공법을 개발했다고 밝혔다.
- Polydimethylsiloxane(PDMS)는 생물학, 의학, 약학, 재료공학 및 기계공학 등 다양한 분야에 걸쳐 활용되는 투명한 고분자 물질로,
  - 우수한 생체적합 성(Bio-compatibility)으로 인해 최근에는 장기모사칩 연구 등에도 활용되고 있다.
- ※ 장기모사칩(Organ-on-a-chip): 인체 장기의 생리·의·약학적 특성을 모사할 수 있는 체외 디바이스(device)로서, 의약학 연구에서 인간 피실험체를 대신할 수 있는 테스트베드(test-bed)로 활용되고 있다.
- 기존에는 준비된 틀에 굳지 않은 PDMS 레진을 부어 만드는 몰딩 방식에 의존해 왔지만 시간과 비용이 많이 소요되는 아쉬움이 있어 이를 대체할 레이저 가공법에 대한 연구가 진행되어 왔다.
  - 하지만 넓은 파장 영역에 걸쳐 나타나는 높은 투명도로 인해 레이저가



PDMS를 곧바로 투과하기에 레이저 가공이 어려움이 있었다.

- 이에 연구팀은 ‘연쇄적 레이저 열분해’ 현상을 이용해 PDMS의 고품질 쾌속 직접 가공법을 적용하였으며, 더 나아가 정교한 장기 모사칩의 제작 가능성을 확인하였다.
- 연구팀은 레이저 열분해의 생성물이 불투명한 것에 집중하였다. 불투명한 열분해 산물은 투명한 PDMS보다 효과적으로 레이저를 흡수하기 때문에 새로운 열분해 반응이 유도될 수 있다. 연구팀은 이 현상을 이용하여 연속과 레이저를 이용한 고품질 PDMS 가공법 개발에 성공하였다.
- 최소 이틀 이상 소요되는 기존 소프트리소그래피 공정을 1시간 이내로 단축시킬 수 있어 PDMS를 활용하는 장기모사칩, 미세유체역학, softrobotics 등에 다양하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.
- 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원으로 수행된 이번 연구성과는 공학분야 국제학술지 ‘네이처 머티리얼스 (Nature Materials)’에 8월 17일 게재되었다.

# 주요내용 설명

<작성자 : 서울대 기계공학과 고승환 >

|     |   |
|-----|---|
| 논문명 | Monolithic Digital Patterning of Polydimethylsiloxane with Successive Laser Pyrolysis |
| 저자  | 고승환 교수(교신저자/서울대학교), 전누리 교수(교신저자/서울대학교), 신재호 박사(제1저자/서울대학교), 고지훈 박사과정(제1저자/서울대학교)      |

## 1. 연구의 필요성


- PDMS는 공학 및 의약학 분야에 걸쳐 널리 활용되는 투명한 고무 물질입니다. 1990년대 후반의 미세유체역학, 2000년대 후반의 장기모사칩 연구의 성장 배경에는 PDMS의 역할이 절대적이었다고 할 수 있으며, 오늘날에 이르러서는 많은 연구자들이 PDMS를 이용하여 각자의 연구를 위한 다양한 종류의 디바이스를 제작하고 있습니다.
- 현재까지, 이러한 PDMS 기반 디바이스의 제작은 주로 Replication Molding (REM)이라 불리는 몰딩 방식에 의존하고 있습니다. 즉, 미리 제작된 몰드에 굳기 전의 PDMS 레진을 부어 굳히는 방식입니다. 하지만 이 과정에 쓰이는 몰드의 제작 과정인 포토리소그래피공정은 1) 비싸고, 2) 적어도 이틀 이상의 준비 기간(마스크 제작 기간)을 필요로 합니다. 따라서, 다양한 device 형상에 대한 폭넓은 연구를 필요로 하는 연구개발(R&D) 단계에서는 몰드 제작을 위한 비용, 시간 상의 비효율이 상당했고, 이를 개선할 수 있는 몰드를 이용하지 않고 제작할 수 있는 신기술에 대한 요구 역시 상당했습니다.
- 레이저 직접 가공법(Laser Direct Patterning)은 레이저 빔을 조향하여 가공 대상 물질의 특정 부분에만 제한적으로 빛에너지를 전달, 가공하는 기술로서, 형상을 만들어 나감에 있어 몰드를 필요로 하지 않으며, 즉석에서 가공 형상을 변경할 수도 있는 차세대 가공법입니다. 이 덕분에 이미 금속, 유리, 플라스틱의 직접 가공에 널리 활용되고 있기도 합니다. 따라서 많은 연구자들은 앞서 설명된 PDMS 디바이스 제작상의 난점을 극복하고자 레이저 직접 가공법의 PDMS 가공에의 적용을 연구해 왔습니다. 하지만, 이러한 시도들은 PDMS의 가장 큰 장점 중의 하나인

투명성으로 인하여 뚜렷한 해법을 찾지 못한 채 번번이 실패해 왔습니다. 즉, 조사된 레이저가 투명한 PDMS를 투과해버려 가공이 불가능했던 것입니다.

- 이 문제점을 극복하기 위해, 1) PDMS에 이물질(impurity)을 첨가하여 불투명하게 하거나, 2) 높은 에너지의 레이저를 순간적으로 조사하여 부분적으로 터뜨리는 방식(Ablation)의 가공법이 보고된 바가 있으나, 이들 모두 PDMS의 장점을 제한하거나 심각한 표면손상을 동반하여 가공품질 상에 근본적인 한계점을 유발했습니다. 즉, 이제껏 PDMS 고유의 장점을 보존하면서도 기존 PDMS device 제작 기술의 비효율을 극복할 수 있는 신공정은 개발되지 못해왔습니다.

## 2. 연구내용

- 이번 연구는 크게 두 가지 아이디어에 기반해서 진행되었습니다. 첫 번째로 레이저를 이용한 PDMS의 열분해입니다. PDMS 표면에 사인펜 등을 이용하여 불투명한 부분을 만들고, 그곳에 레이저를 조사하면, 레이저 에너지가 흡수되어 곧바로 PDMS의 열분해(Pyrolysis)가 진행됩니다. 이 결과로서 생성된 열분해 산물은 원래 물질(PDMS)과 달리 불투명한데, 이것은 곧 레이저를 잘 흡수할 수 있는 상태가 된다는 것입니다.
- 두 번째로, 연쇄반응(Chain reaction)의 개념입니다. 연쇄반응이란, 한 반응의 결과가, 동일한 반응의 개시를 촉진할 때 발생합니다. 예를 들어 산화 과정은 첫 산화 반응의 결과물인 ‘열’이 후속 산화반응을 촉진함으로써 지속적으로 유지되는 연쇄반응의 일종입니다. 이 연쇄반응의 개념을 앞서 설명한 PDMS 레이저 열분해에 적용해 볼 경우, 이 역시 연쇄반응의 특성을 충족함을 알 수 있습니다. 즉, 레이저 열분해의 불투명한 산물이 다시 레이저 흡수를 용이하게 하므로, 이러한 레이저 열분해가 연쇄적으로 유도될 수 있을 것임을 기대할 수 있습니다.
- 이번 연구에서는 이러한 연쇄적 PDMS 레이저 열분해 개념이 실제로




작동하는 것을 실험적으로 증명했습니다. 즉, PDMS 표면의 특정 부위에만 제한적으로 불투명한 ‘시작점’을 생성한 뒤, 그 시작점에 레이저를 조사하여 제 1 레이저 열분해를 유도합니다. 그 뒤 레이저 빔을 서서히 움직이기 시작하면 레이저 빔을 쫓아 PDMS 열분해가 지속적으로 유도됩니다. 중요한 점은, 최초의 제 1 레이저 열분해만이 불투명한 ‘시작점’을 필요로 하며, 이후의 열분해는 어떠한 표면 처리도 필요로 하지 않는다는 것입니다.

- 마지막으로, 고체상태의 열분해 산물(탄화 실리콘, SiC)을 Tape 등을 이용하여 제거하고 난 뒤에는 원하는 형태로 가공된 PDMS 구조물을 얻을 수 있습니다. 따라서, 이 공정을 통해 PDMS의 광학적 특성 또는 표면 성질을 바꾸지 않고서도 레이저 가공이 가능해집니다.
- 여기에 더하여, 이렇게 가공된 PDMS의 표면은 매우 균질하여, 다양한 실험적 목적에 적합한 것이 확인되었습니다. 이것은 기존의 레이저 ablation 기법을 통해 제한적으로 시도되었던 PDMS 레이저 가공의 결과와 비교되는 것으로서, 실용적인 측면에서 유의미한 최초의 PDMS 레이저 가공법으로 볼 수 있습니다.
- 결과적으로, 고품질의 PDMS 레이저 직접 가공법이 연쇄적 레이저 열분해 개념에 기반하여 개발되었습니다. 레이저 직접 가공법의 가장 큰 이점으로, 본 결과는 새로운 PDMS device의 제작 기간을 약 1/100 수준으로 단축시킬 수 있습니다.

※ 열분해(Pyrolysis): 유기물이 강한 열에너지에 의해 분자구조가 해체되어 분해되는 현상. 일반적인 ‘산화’와 구별되는 개념이며, 주로 휘발성 물질의 기화와 기화되지 못한 물질인 고체 산물을 생성한다.

### 3. 연구성과/기대효과

- 본 연구결과는 PDMS device의 형상 변경이 빈번하게 요구되는 연구개발 환경에서 그 장점이 극대화될 수 있습니다. 따라서 대학 및 연구소 또는 산업체의 연구개발 현장에 적용되어 PDMS 기반 연구의 연구기간을



획기적으로 단축시킬 수 있을 것으로 예상됩니다. 이뿐만 아니라, 값비싼 Photolithography 공정을 대체함으로써, 디자인변경이 용이하고 연구개발 비용 또한 절감시킬 수 있습니다.

- 본 연구 결과의 또 하나의 기대효과는 자동화된 PDMS 가공입니다. 컴퓨터 기반의 레이저 빔 조향 시스템을 활용할 경우, 숙련자의 수가공에 상당부분 의지해오던 PDMS 가공 공정의 자동화를 이룩할 수 있으므로, 연구개발 단계를 넘어서 장기모사칩 등의 대량 생산에도 적용될 수 있을 것으로 기대됩니다.

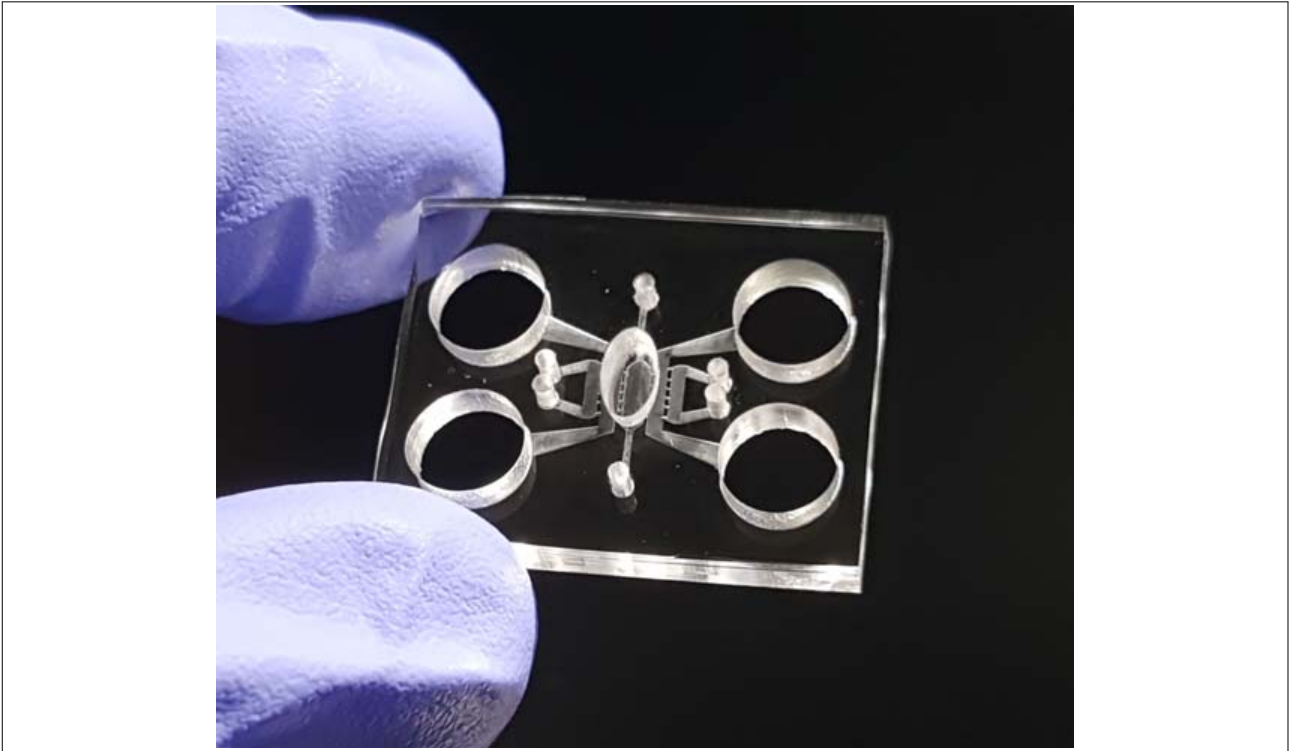
## 그림 설명



### (그림1) 레이저 연쇄 열분해를 통한 PDMS 가공

레이저 연쇄 열분해 공법을 통해 PDMS 내부에 수직 원기둥 형태의 미세유로를 제작하는 모습입니다. 사진이 전체적으로 노란색을 띠는 이유는 강한 레이저 빛을 막기 위해 필터를 덧대고 촬영되었기 때문입니다. 밝은 노란색의 부분이 레이저 조사에 의해 열분해가 일어나고 있는 위치이며, 높은 열로 인해 밝은 빛이 발생합니다.

출처 : 서울대학교 기계공학과, 신재호, 박사후연구원



**(그림2) 레이저 연쇄 열분해 공법으로 제작된 3차원 장기모사칩**

레이저 연쇄 열분해 공법으로 제작된 PDMS 장기모사칩의 모습입니다. 세포를 배양하기 위한 미세유체 구조와 영양분 공급 등을 위한 튜브 연결용 수직 관로들이 보입니다. 이미지에 보이는 PDMS 구조의 모든 형태는 레이저 연쇄 열분해 공법만으로 제작되었습니다.

출처 : 서울대학교 기계공학과, 신재호, 박사후연구원



# 연구 이야기

<작성자 : 서울대 기계과, 신재호, 박사후연구원>

## □ 연구를 시작한 계기나 배경은?

원래는 전혀 다른 레이저 실험을 계획하고 PDMS를 기판(Substrate) 삼아 실험을 진행했습니다. 계획했던 실험은 실패했지만 우연하게도 투명한 PDMS 기판이 레이저에 의해 검게 그을린 것을 확인했고, 여기서 아이디어를 얻어 지금의 연구가 시작되었습니다. 이처럼 예상하지 않았던 곳에서 아이디어를 얻었기 때문에 역설적으로 흥미로운 연구로 발전될 수 있었습니다. 사실, 우리들의 상상력은 상당히 제한적이어서, 머릿속에서 구상된 아이디어 그 자체보다는 연구 과정에서 주어지는 우연한 발견들이 종종 더 좋은 연구의 재료가 되곤 합니다. 이번 연구도 그런 배경에서 시작되었습니다.

## □ 연구 전개 과정에 대한 소개

2017년 연구실에서 PDMS 레이저 직접 가공기술이 개발된 뒤, 이 기술의 파급력이 최대화 될 수 있는 응용연구를 탐색하던 중, 국내 장기칩 연구 분야의 최고 전문가 중 한 분이신 전누리 교수님과의 공동연구를 통해 생체칩 제작으로의 연구가 전개되었습니다.

## □ 이번 성과, 무엇이 다른가?

PDMS라는 물질의 효용성은 의학, 약학, 생물학 및 유관 공학분야 연구자들에게 익히 잘 알려져 있습니다. 연구자들은 이 물질을 이용하여 다양한 실험 device를 제작하는데, 이 과정이 시간과 노동력이 많이 소요되는 까다로운 과정입니다. 따라서 레이저를 조사하여 즉석에서 대상 물질을 깎아내는 방식의 '레이저 직접 가공법'을 PDMS device 제작에 적용하고자 하는 시도들은 이전에도 계속 있어왔습니다. 하지만 투명한 PDMS의 성질 때문에 조사된 레이저가 정작 아무런 일도 일으키지 못하고 빠져나가고 마는 근본적인 한계점이 있었습니다. 이러한 문제점을 회피하고자 레이저 ablation 기반의 공법들이 개발되어 보고된 바 있습니다만, 강한 광에너지로 물질을 터뜨리는 ablation 공정의 특성상 그 가공품질은 실제적 사용이 불가할 수준으로 낮았습니다.

이번 연구는 '투명한 물질의 레이저 가공을 위해서는 ablation을 이용한다'는, 기존 연구자들이 공유해오던 인식으로부터 완전히 벗어난 상태에서 시작되었고, 결과적으로 고품질 레이저 가공이라는 결과를 얻어낼 수 있었습니다. 여기에 더하여, 레이저 가공법의 기본적 특성인 '쾌속 가공' 및 '쉬운 디자인 변경' 등이 더해져 '연구자의 요구에 맞춘 다양한 PDMS device의 고품질 쾌속 가공'을 가능케 하는 신기술이 개발되었습니다. 특히, 우수한 가공품질은 장기모사칩 제작을 위한 필수 요소로서, SLP 기술이 PDMS의 최대 수요처인 Biotechnology 영역에서 활약할 수 있는 중요한 기반이 되었습니다.

실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

PDMS는 다양한 연구분야에 걸쳐 활용되고 있지만, 가장 큰 수요처는 장기모사칩 연구분야에서 발생하고 있습니다. 단백질 또는 유전자 기반 치료제들의 출현에 발맞추어, 기존의 동물실험을 통한 연구(전임상 검사, Preclinical test) 방법의 유효성이 지속적으로 의심받고 있습니다. 복잡하고 섬세한 작용기작을 갖는 의약품에 이르러, 쥐나 햄스터를 이용한 실험결과가 더이상 사람에게 재현되지 않는 것입니다. 따라서, 실제 사람의 장기를 그대로 모사해줄 수 있는 새로운 체외 test bed가 필요해 졌습니다. 바로 이 test bed를 장기모사칩이라 부르며, 고부가가치 제약산업을 위한 중요한 연구 대상으로 여겨지고 있습니다.

이번에 획득된 기술은 바로 이 장기모사칩 연구에 활용될 수 있습니다. PDMS는 특유의 투명도(현미경과의 적합성)와 생체적합성(세포 무독성)으로 인해 장기모사칩 연구분야에서 최적의 물질로 각광받고 있습니다. 따라서, 레이저 연쇄 열분해를 통한 PDMS 고품질 쾌속 가공 기술은 장기모사칩 연구 분야에 적용되어 해당 분야 연구 효율을 획기적으로 끌어올릴 수 있을 것으로 기대됩니다. 특별히, 본 기술을 활용하면 대부분의 PDMS 기반 device를 최대 1시간 이내에 제작할 수 있습니다. 이는 기존 제작공법(Softlithography)의 이틀 이상의 제작 기간과 비교하면 획기적 수준의 시간 단축으로서, 단지 시간 단축을 넘어서 전체적인 공정 비용의 감축을 가능하게 할 것으로 기대됩니다.

더 나아가, 장기모사칩 제조를 위한 자동화 공정 개발에 적용될 경우, 연구개발 단계뿐만 아니라 장기모사칩 대량생산에도 직접 적용될 수 있을 것으로 예상됩니다.

꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

본 기술을 통해 인류의 삶이 조금이라도 개선될 수 있다면 공학자로서 매우 기쁠 것 같습니다. 이번에 개발된 기술을 시작 삼아 관련된 연구를 지속적으로 수행하고자 합니다.