

플로우리소그래피를 이용한 지능형 마이크로입자의 대량생산 및 응용

Smart Microparticle Fabrication Using Flow Lithography

오종원 · 전인규 · 안성현 · 김다정 · 이지석 | Jongwon Oh · Inkyu Jeon · Sunghyun Ahn · Dajung Kim · Jiseok Lee

School of Energy and Chemical Engineering, UNIST,
50, UNIST-gil, Eonyang-eup, Ulju-gun, Ulsan 689-798, Korea

E-mail: jiseok@unist.ac.kr

1. 서론

본 총설은 미세유체를 이용한 미세입자의 조립과 합성 및 응용에 대한 리뷰이다. 다양한 물리 화학적 성질을 지니는 미세입자들의 제조 및 산업화가 중요해짐에 따라서 유동리소그래피를 이용한 미세입자들의 다양한 합성 방법에 대하여 기술하였다.^{1,2,3} 또한 바이오 및 위조방지 등 여러 기술 분야의 응용 가능성에 대한 포괄적인 설명을 제시하고 있다. 과거 미세입자들은 세포분석, DNA 및 단백질 분석, 광학⁴ 또는 조직공학⁵에서 다양하게 연구되어 왔다. 이러한 미세입자들은 연구 분야에 따라 입자의 크기 및 모양, 물리 화학적 성질, 공극율을 조절하여 제조되어 왔다. 미세입자를 제조하는 대표적인 방법들은 그림 1에서 보는 바와 같이 대표적으로 3가지로 구분할 수 있다.⁶ 투명마스크를 이용한 접촉리소그래피, 현미경과 리소그래피를 융합한 유동리소그래피, 또는 몰드 복제기법을 기반으로 한 레플리카몰드 방법들이 잘 알려져 왔다. 이러한 각각의 제조 방법들은 고유한 장점을 가지고 있으며 본 서에서는 미세유체를 이용한 유동리소그래피 방법에 대해서 소개하고자 한다.

Author



오종원

2015

울산과학기술원 화학공학 및
생물공학 (학사)
2015-현재
울산과학기술원 화학공학과
(석·박사 통합과정)



안성현

2010-현재

울산과학기술원 나노 화학 및
화학공학 (학사과정)



이지석

2003

2005

2011

2012-2014

2014-현재

한양대학교 화학공학과 (학사)
한양대학교 화학공학과 (석사)
University of Michigan, Macromolecular Scienc and Engineering (박사)
MIT 화학공학과 (Post-Doc.)
울산과학기술원 에너지 및 화학공학부 조교수



전인규

2014

2015-현재

전북대학교 고분자 나노공학 (학사)
울산과학기술원 화학공학과
(석·박사 통합과정)



김다정

2012-현재

울산과학기술원 나노 화학 및
화학공학 (학사과정)

기존의 polydimethylsiloxane(PDMS) 기반으로 한 미세유체역학장치를 이용한 미세입자 제조 방법은 T-junction⁷ 또는 flow-focusing⁸ 방법을 주로 이용하였다. 하지만 표면장력의 효과로 인하여 미세입자에 설계에 있어서 매우 제한적으로 적용된다. 다시 말해 구 형태² 또는 구에서 변형된 막대, 타원체, 디스크 또는 실린더 모양에 국한되어 왔다.³ 또한 기존의 방법은 프로세스에 한 개씩 미세입자를 제조하여 생산량이 떨어지는 단점을 지니고 있으며 표면장력을 이용한 미세입자 제조를 기반으로 하기 때문에 두 가지 유체가 서로 섞이지 않는 특성이 필수적이며 또한 두 유체가 미세유체역학장치의 표면과 상호 영향을 미치지 않아야 하기에 그 응용가능성이 제한적이라는 단점을 지니고 있다. Doyle group은 최근 입자 모양을 제어하기 위해 유동리소그래피와 같은 새로운 미세구조체 방법을 개발하였다. 이 방법을 이용하면 기존의 방법과 비교하여 미세입자의 모양을 투명마스크를 이용하여 원하는 대로 다양하게 설계할 수 있다는 장점이 있다. 이를 위해 미세유동장치 내부에서 유동유체의 흐름을 제어하고 마스크를 통한 빛의 모양 및 조사량을 조절하였다. 본론에서는 유동리소그래피를 이용하여 미세입자를 제조하는 방법 중 continuous flow lithography(CFL)와 stop flow lithography(SFL)의 방법에 대하여 소개하고 이 방법을 적용한 다양한 미세입자 제조 방법에 대하여 설명하고자 한다.

2. 본론

2.1 유동리소그래피(Flow Lithography)의 정의

유동리소그래피란 현미경 기반의 프로젝션 포토리소그래피(microscope projection photolithography)와 미세유동장치(lab on a chip)의 장점을 결합하여 연속적으로 원하는 모양과 크기 및 동일한 물리화학적 성질을 지니는 마이크로구조체를 빠른 시간에 대량생산하는 방법을 말한다.

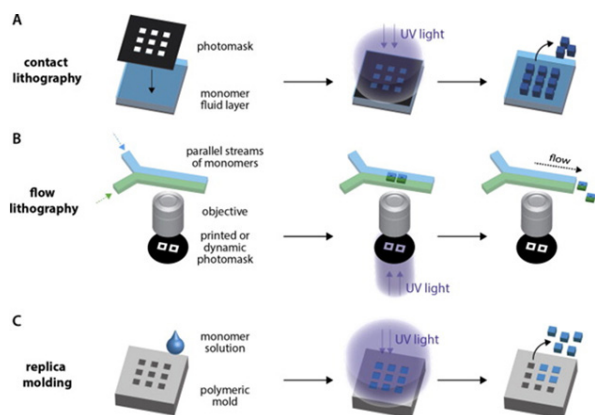


그림 1. 접촉리소그래피를 이용한 미세입자 제조과정; (b) 유동유체 리소그래피 방식을 이용한 미세입자 대량 생산 방법, (c) 레플리카 몰딩을 이용한 미세입자 제조 방법.

2.1.1 Continuous Flow Lithography (CFL)

CFL이란 광개시제를 함유한 광경화성 수지를 PDMS 미세유동 장치로 흘려준 뒤 투명마스크를 통과한 특정한 패턴을 가진 자외선(365 nm)을 미세유동장치 내부에 순간적으로 노출하여 특정한 모양의 미세입자를 연속적으로 합성하는 방법이다. 광경화가 가능한 유체를 미세유동채널 내부로 유입시키는 솔레노이드밸브와 유체를 경화시키는 자외선 노출 과정을 간단한 컴퓨터 프로그램을 이용하여 반복하게 되면 화학적 물리적 성질이 동일한 미세입자를 대량생산 할 수 있게 된다.

광중합된 미세입자들이 채널 내부에 흡착되지 않고 흘러가게 되는 이유는 PDMS의 우수한 산소 투과성 때문이다. 투과된 산소가 광개시제로부터 인해 생성된 라디칼(radical)을 소모하게 되어 고분자의 중합이 멈추는 반응이 발생하여 PDMS 벽면에 중합이 덜 된 올리고머(oligomer) 형태의 윤활층이 형성된다. 형성된 2-4 μm 두께의 윤활층은 미세입자들이 채널에 달라붙지 않고 흐를 수 있도록 한다. 합성된 미세입자들의 크기는 투명마스크의 패턴의 크기에 의해 결정되고 입자의 두께는 사용된 채널의 높이와 윤활층의 두께에 따라 결정이 된다. 또한 물리 화학적으로 상이한 올리고머를 이용하여 채널 내부에서 여러 개의 층류(multiple laminar flow)를 형성하여 미세입자를 제조하면 화학적으로 이방성인 다기능성 미세입자의 제조도 가능하다.

2.1.2 Stop Flow Lithography(SFL)

앞에서 설명한 CFL로 제조한 미세입자들은 화학적 이방성과 기능성을 지니며 물리화학적 동일한 미세입자를 대량 생산할 수 있다는 면에서 매우 큰 장점을 가지고 있다. 하지만 합성 수율을 높이기 위해 유체를 유입시키는 압력을 증가

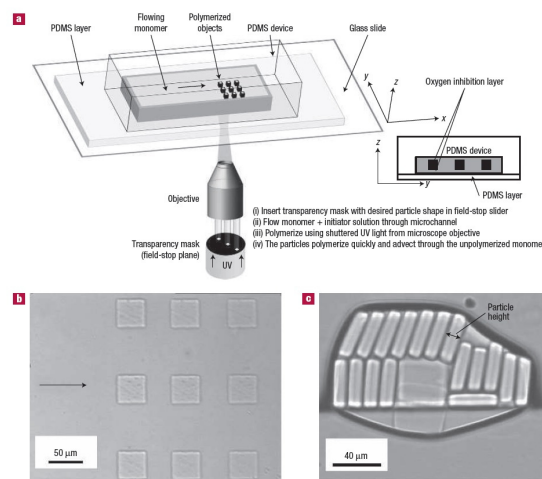


그림 2. CFL의 모식도: (a) 연속적 유동 리소그래피, (b) 채널 내부에서 광경화가 된 미세입자의 모습, (c) 미세입자의 단면의 모습.

시커 유체의 속도가 빨라지면 광중합이 발생하여, 유체가 경화 되는 중간에 이동을 하게 되어 미세입자의 정밀도가 낮아진다. 즉 최대 합성 수율에 상응하는 유체흐름속도 조절에 상당히 제한적이라는 단점이 있다. CFL의 단점을 보완하고 더 정밀한 미세입자를 대량생산하기 위해 그림 4와 같은 stop flow lithography(SFL)라는 방법이 개발 되었다.¹⁰ SFL은 미세입자의 광중합 반응이 유체의 흐름이 멈춘 뒤에 일어나게 되어 CFL의 연속적인 유체의 흐름상에서의 미세입자 제조와는 다른 방식을 이용하고 있다.

그림 4a는 SFL에 대한 모식도이다. 그림 4b와 같이 '멈춤-중합-흐름'으로 구성되어 있으며, 흐름이 멈춘 후 중합이 이루어지기 때문에 CFL처럼 최대 유체속도(flow rate)의 제한이 없이 매우 높은 정밀도를 보이는 미세입자들을 빠른 시간에 대량생산 할 수 있다. 그림 4c는 같은 모양을 가진 마스크를 이용하여 SFL 방식과 CFL 방식으로 제작한 미세입자의 광학 현미경 사진(좌측)과 SEM 사진(우측)으로써 두 방식의 해상도 차이를 보여준다. SFL로 제조된 미세입자는(SEM 상단) CFL로 제조된 미세입자(SEM 하단)보다 더욱 정밀한 모양을 지니는 것을 확인할 수 있다. 또한 미세입자의 크기를 20 μm 로 줄일 경우 경우 SFL은 이론적으로 초 당 10⁴개의 미세입

자를 만들 수 있어 기존의 CFL 방식에서 초 당 10개의 미세입자를 제조할 때보다 약 1,000배 높은 합성 수율을 얻을 수 있다.

2.2 유동리소그래피를 이용한 응용연구

CFL과 SFL과 같은 유동리소그래피 방법은 다양한 분야에 적용될 수 있다. 그림 5는 CFL을 이용한 바이오에세이(bioassay) 미세입자 제조에 대한 모식도이다.¹¹ 미세유동장치 내부에서 층류들이 섞이지 않는 특성을 이용하여 그림 5와 같이 2가지의 다른 성질의 층류를 흘려준다. 한 쪽의 층류는 미세입자의 구분을 위한 형광 물질이 함유된 광경화수지를, 다른 한쪽은 광경화수지와 함께 탐지하고자 하는 DNA에 대한 상보 DNA를 흘려 준다. 이후, 광경화를 통하여 미세입자를 제조하게되면 입자의 한 쪽은 탐지물질이 포함되어있는 정보를 포함하고, 다른 한 쪽은 대상 DNA의 탐지로 사용될 수 있다. 즉 서로 다른 물리 화학적 성질을 동시에 가지는, 기능성 미세입자가 제조 된다.

유동리소그래피는 자성을 가진 미세입자를 제조 할 때도 쓰일 수 있다.¹² 채널 내부에 층류를 형성하고 한 층류에 자성을 지닌 미세입자를 넣어주고 광경화를 시키면, 특정 부분에 자성을 띠는 미세입자를 제조 할 수 있다. 또한 다른 층류에는 형광물질을 포함한 층류를 흘려주고 미세입자를 그림 6과 같은 마스크를 이용하여 제조하면 특정한 정보를 가진 미세입자를 합성 할 수 있다.

SFL을 이용하여 제조한 미세입자들은 CFL과 마찬가지로 다양한 분야로 응용된다. 그림 7a는 polyethylene glycol (PEG)에 화학적으로 분해가 가능한 polylactic acid(PLA)를 공중합체로 만든 후 SFL 기법을 이용하여 미세입자를 제조한 후 시간에 따른 미세입자의 분해를 보여주는 그림이다.¹³

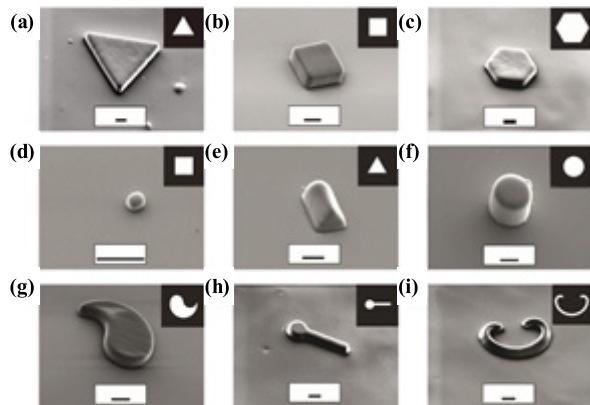


그림 3. (a-i) 다양한 투명마스크를 이용하여 제조한 미세입자의 SEM 사진.⁹

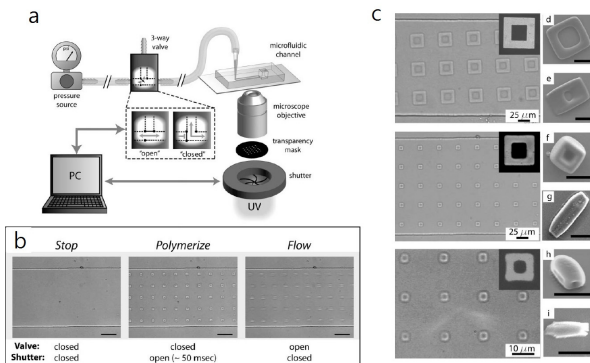


그림 4. (a) Stop flow lithography의 모식도, (b) 미세입자의 제조 과정, (c) CFL과 SFL로 제조된 미세입자들의 정밀도를 비교한 사진.¹⁰

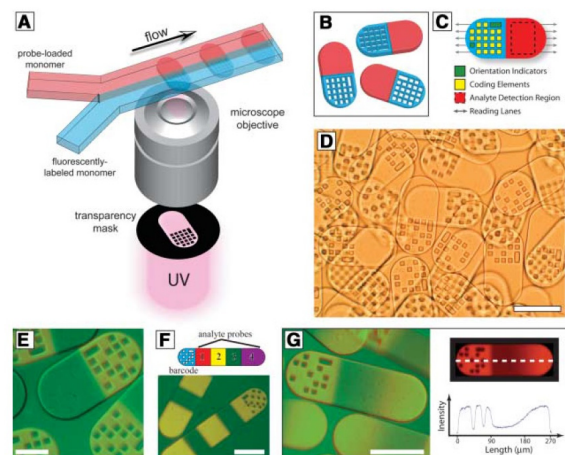


그림 5. (a) 바이오에세이를 위한 바코드 미세입자의 제조 방법, (b) 제조 후 미세입자의 가상 사진, (c) 미세입자의 구성요소/감지 부분과 바코드 영역으로 나뉘어 있다, (d) 제조된 미세입자의 광학 현미경 사진, (e~g) 제조된 미세입자의 형광사진.¹¹

각기 다른 농도의 광경화수지들로 미세입자들을 만들어 입자의 광중합도에 차이를 나타내게 하였으며, 2 μm 크기의 형광입자가 제조된 미세입자의 중간지점(광중합도에 차이가 있는 부분)에 들어가 있고 시간이 지나면서 형광입자들이 방출되는 모습을 보여준다. 이 방법은 제조된 미세입자들을 약물전달시스템에 응용할 수 있는 가능성을 제시한다. 그림 7b는 polyethylene glycol diacrylate(PEG-DA) 용액을 SFL을 이용하여 미세입자를 제조한 후 입자 내부에 세포를 포함한 그림으로서 미세입자를 이용하여 세포 에세이에 응용 가능하다는 것을 보여주고 있다.¹⁴ 또한 그림 7c처럼 PEG-DA와 acrylic acid(AA)의 공중합체 용액으로 제조한 미세입자 내부에 철 이온을 넣어 성장시킨 후 산화를 시켜 자성을 나타내도록 하여 미세입자 내부에 다양한 물질을 성장시킬 수 있다는 것을 보여주었다.¹⁵ 그림 7d는 실리카 나노입자를 미세입자 제조 광경화수지에 포함하여 SFL을 기반으로 기어의 모양을 나타내는 미세입자를 제조한 뒤 열을 가하여 강도가 매우 높은 미세기어를 대량 생산 하였다. 이는 유동리소그래피 방법이 MEMS 분야에도 응용될 가능성이 있음을 시사한다.¹⁶

또한 최근 SFL과 광학적 특이성을 보이는 나노입자를 미세입자 제조 과정에 융합하여 바이오 및 위조방지에 응용한 연구가 제시되었다.¹⁷ 정보를 부여할 수 있는 미세입자는 정

보 전달 물질로서 다양한 분야에 유용하게 이용되어 왔다. 하지만 기존의 입자들은 위조방지, 방대한 양의 생물학적 검정, 법의학적 테스트 등에 쓰기에는 안정성 및 포함할 수 있는 정보의 양적인 측면에서 많은 한계점을 지니고 있다. 게다가 많은 양의 암호를 작은 면적 안에 넣기 위해서는 해독 정확성을 포기해야 했고, 다양한 물리화학적 조건에서 입자의 안정성이 떨어졌기 때문에 산업적 공정에서도 기존의 방법으로 만든 입자는 쓰이기 어렵다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 암호의 체계가 입자의 화학구조에 영향을 받지 않고, 암호화할 수 있는 용량은 1백만 개가 넘으며, 해독 오차율은 1 ppb보다 작은 미세입자를 SFL 기법을 이용하여 제조하였다. 그림 8은 정보전달이 가능한 미세입자를 만드는 방법으로, 각각의 층류에 다른 색상을 지닌 마이크로입자를 대량생산할 수 있고 휴대폰을 이용하여 정보를 읽음으로서 편리성을 극대화 하였다. 근적외선을 흡수해서 다양한 가시광선 범위의 파장을 방출하는 희토류 upconversion nanocrystal(UCN)들을 아크릴레이트기를 함유한 폴리우레탄(polyurethane acrylate)(PUA)과 폴리에틸렌글리콜(polyethylene glycol diacrylate)(PEGDA) 용액에 섞어서 층류를 형성하고 자외선을 쬔어주면 바코드 모양의 입자가 만들어진다. 각각의 물성에 맞게 PUA에는 소수성의 UCN을 사용하고 PEGDA에는 친수성의 UCN을 사용하여 UCN들이 미세입자의 내부 구조에서 잘 빠져나가지 않도록 하였다. 암호화에 사용되는 UCN을 합성할 때 란타늄 원소 이온의 비율을 다르게 함으로써 UCN이 각각 다른 파장의 빛을 방출하게 하였으며, 이를 이용해 암호의 용량을 증가시킬 수 있다. 미세유동 채널 안에서의 층류의 개수를 증가시킴으로써 암호의 용량을 늘릴 수도 있는데, 지금 소개된 방법으로 만들어진 미세입자는 사실상 암호 용량에 제한이 없어서 지구상의 모든 물건들을 바코드화할 수 있다. 그림 9는 휴대폰을 이용하여 미세입자를 촬영

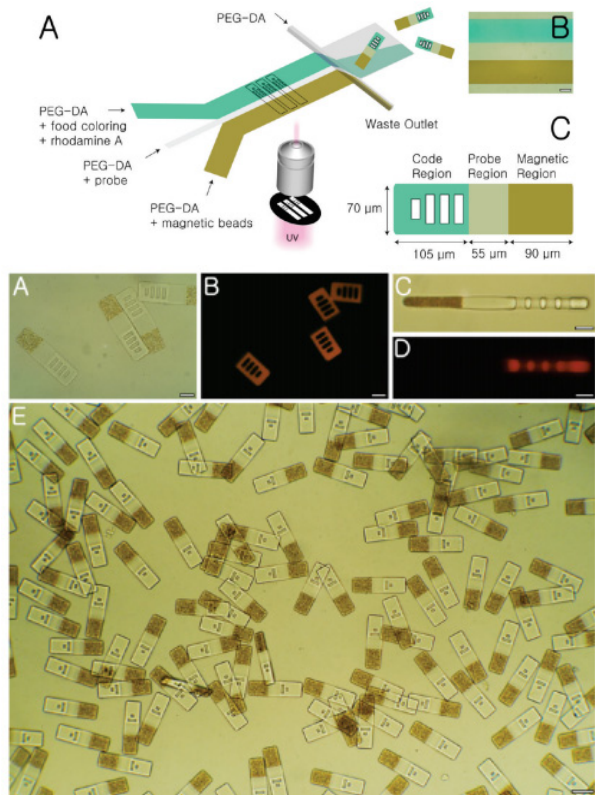


그림 6. 자성나노입자를 포함한 바코드 입자의 제조과정 및 제조된 자성미세입자.¹²

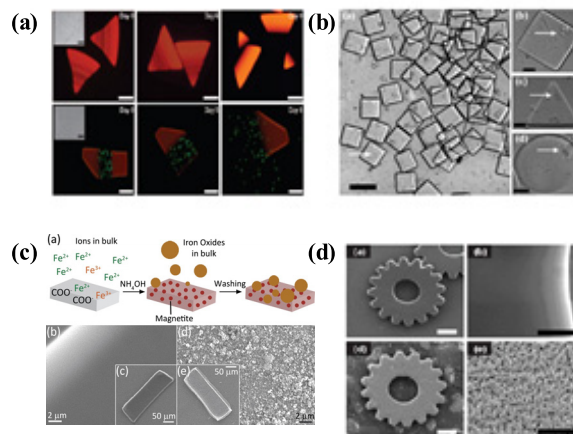


그림 7. 다양한 기능성을 지니는 미세입자의 사진: (a) 물질 전달 미세입자,¹³ (b) 세포를 포함한 미세입자,¹⁴ (c) 자성을 가지고 있는 미세입자,¹⁵ (d) 높은 강도를 지니는 기어모양의 미세입자.¹⁶

한 사진이다. UCN을 포함한 암호화된 입자는 약 포장지, 지폐, 신용카드, 굴곡진 물체 표면, 미술작품에 안정적으로 표시 부착가능하며, 높은 온도(250 °C)에서 만들어진 플라스틱 물체에 미세입자가 안정적으로 포함되어 있음을 알 수 있다. 고비용의 현미경을 사용하지 않고 미세입자를 제조할 수 있으며, 미세입자의 정보를 핸드폰을 이용하여 읽어 낼 수 있다는 점에서 산업화에 매우 근접한 연구라고 평가된다.

2.3 Digital Micromirror Device(DMD)를 이용한 유동리소 그래피

기존의 SFL 방식을 이용하여 미세입자를 제조하는 방식은 자외선(365 nm)을 투명마스크를 이용하여 패터닝(patterning)

한 후 광중합 수지를 경화시키는 방식이다. 하지만 다른 모양을 가지는 미세입자를 연속적으로 제조할 때 투명마스크를 수동으로 바꾸어 주어야 한다는 단점이 있다. 최근에는 투명마스크 대신에 디지털 마이크로미러 디바이스(digital micromirror device)를 이용하여 원하는 다른 모양의 미세입자를 동일한 합성 과정에서 연속적으로 제조할 수 있다.

DMD는 아주 작은 정사각형의 거울을 반도체 위에 올려 놓은 반사식 표시기를 일컫는 말이다. DMD 장치는 약 200만개의 거울이 MEMS를 통하여 장치 표면에 위치하고 있으며 거울의 빠른 기울임을 이용하여 각 픽셀의 빛 반사를 제어할 수 있다. 이를 통하여 콘트라스트 마스크(contrast mask)를 생성할 수 있다. DMD를 기반으로 한 유동리소그

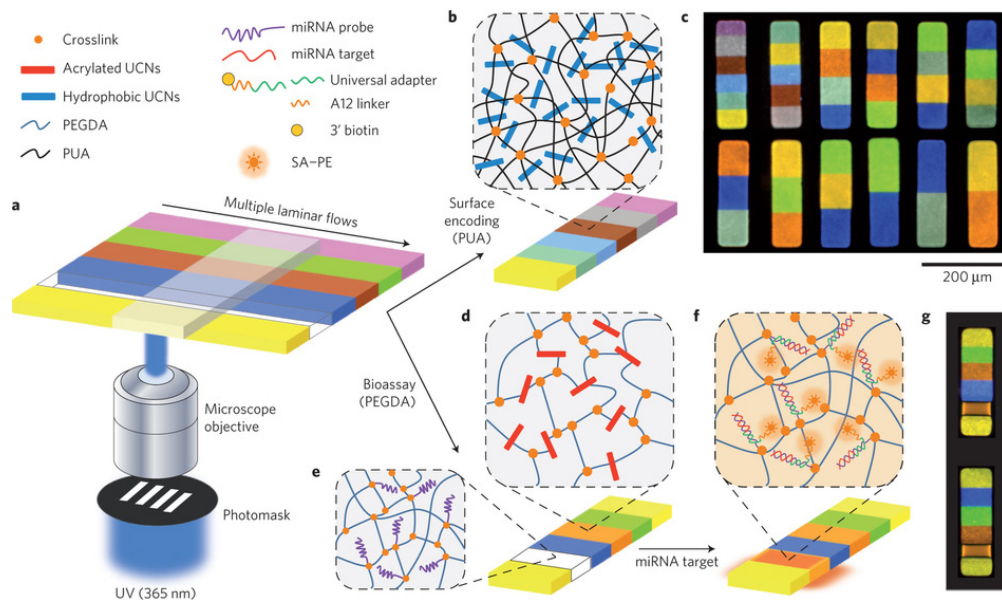


그림 8. SFL을 이용한 정보전달 미세입자 제조과정.¹⁷

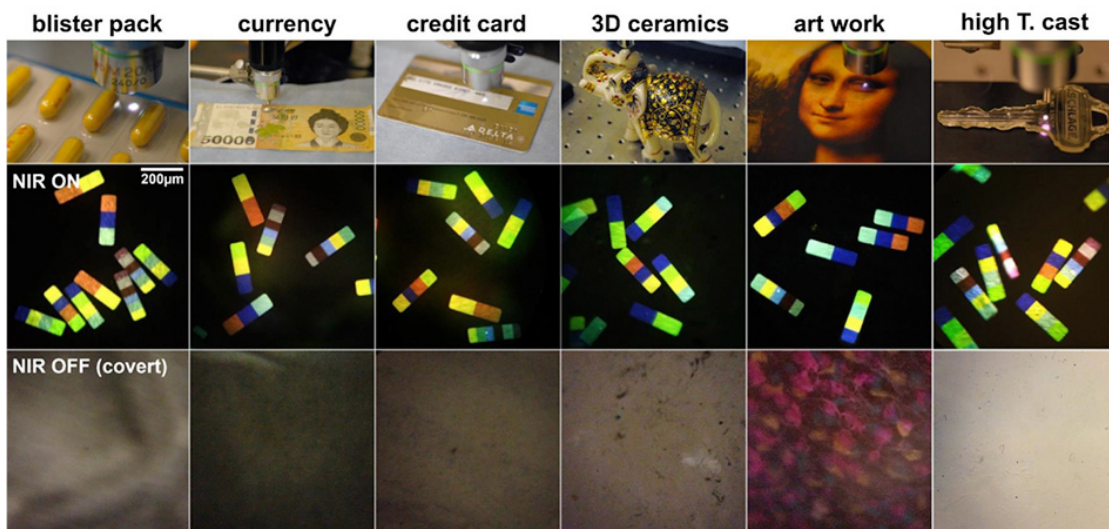


그림 9. 미세입자를 적용한 다양한 물체.¹⁷

래피 방식은 DMD가 만드는 콘트라스트 이미지를 이용하여 빛을 패터닝하기 때문에 다양한 모양을 실시간으로 변화시키면서 사용할 수 있다는 큰 장점이 있다. DMD 장치와 유동 리소그래피 장치를 결합하여 다양한 응용 연구가 가능하다.¹⁸

그림 11은 흡을 이용한 유동 유체리소그래피방법의 모식도이다. 이 기술의 핵심은 미세유동 채널과 미세입자의 효과적인 배열이다. 음각으로 흡이 존재하는 PDMS 채널을 제조한 뒤 DMD를 이용하여 다양한 모양의 미세입자를 제조하면 미세입자들이 흡을 따라서만 움직이게 된다. 즉 미세입자들을 쉽게 원하는 위치에 배열하는 것이 가능하다.

이러한 흡을 이용한 미세입자 배열 방법을 이용하면 화학적 성질이 서로 상이한 층류 사이를 미세입자로 하여금 통과하는 일이 가능하다. 그림 12는 PEGDA에서 물을 가로질러 미세입자들이 흡을 따라 이동한다는 것을 보여주는 모식도로 흡이 없는 일반적인 PDMS 채널에서는 입자의 흐름이 용액의 표면장력을 극복하지 못하여 가로지르는 현상을 볼 수 없지만, 흡이 있는 채널에서는 이를 극복한다는 것을 알 수 있다. 이러한 장치를 이용하여 미세입자를 각 부분별로 합성을 한 후 흡을 따라 배열하여 다양한 구조체들을 원하는 대로 제조할 수 있다. 그림 13은 이를 응용하여 에펠탑과 같은 복잡한 모양의 구조체를 손쉽게 배열한 예시이다.

또한 외부 자기장의 변화에 의해 색상이 조정되는 마그네틱 잉크(M-ink)를 포함한 미세 입자를 DMD를 기반으로 한 유동 리소그래피 방식을 이용하여 제조 하였다.¹⁹ 이를 통해

여 다양한 모양과 색상을 지닌 물질들을 마스크를 교환할 필요 없이 연속적으로 제조할 수 있다. 그림 14는 다양한 색상을 가지는 바코드(barcode) 미세입자를 생성하는 과정을 나타낸다. 자기장에 의해서 색상이 변하는 광경정 나노 입자를 포함한 광경화수지를 채널 내부로 유입시킨 뒤 외부 자기장을 바꾸어 주면 자성입자의 농도가 달라지고 이에 따라서 유체의 색상이 변한다. 이렇게 색상이 변한 유체를 광경화하여 다양한 정보를 지닌 미세입자를 제조하여 생물학적 물질 감지에 응용하였다. 또한 제조된 미세입자는 자성을 지니고 있어 생물학적 물질 탐지에 응용할 경우 자기장을 이용한 미세입자 회전을 기반으로 생물학적 물질과의 반응성에서 기존의 방식보다 높은 특성을 보여준다.

2.4 비극성 용매를 이용한 유동리소그래피

기존의 플로우리소그래피 방식은 대부분 수용성 광경화수지를 이용한 미세입자의 제조 방식이 대부분이었다. 즉 친수성이 필수적인 생물학적 응용 분야에는 다양한 응용 연구가 진행되어왔다. 하지만 헥산(hexane), 톨루엔(toluene) 등 비극성 용매를 이용한 미세입자 제조에는 PDMS를 사용할 수 없다는 점에서 응용 가능성이 제한되어 왔다. 미세입자가 다양한 기능성을 가지기 위해서 다양한 물질을 광경화수지에 포함시키는 과정이 필수적이다. 하지만 대부분의 연구는 PDMS의 특성상 수용성 광경화수지를 이용하기 때문에, 기능성 소수성 나노입자를 광경화수지에 안정화시키기 위해

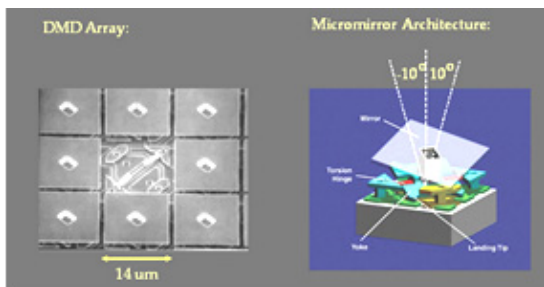


그림 10. DMD의 SEM 이미지 및 구동원리.

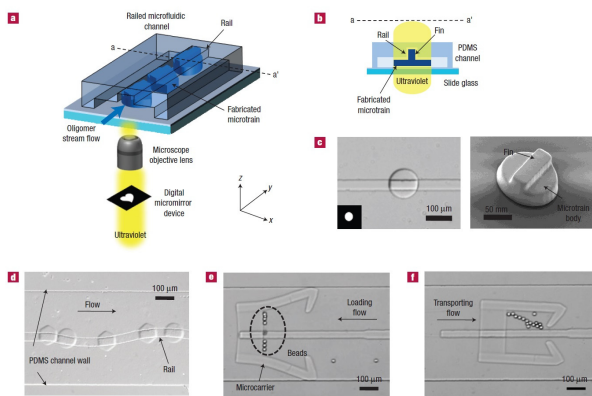


그림 11. 흡을 이용한 미세입자 제조 원리 및 제조된 미세입자의 이미지.¹⁸

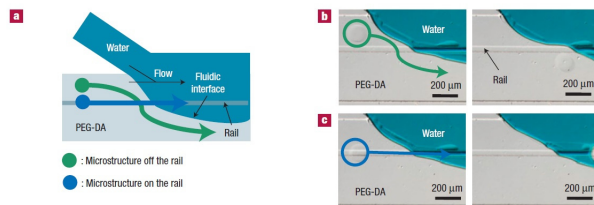


그림 12. 층류를 통과하는 미세입자의 모습.¹⁸

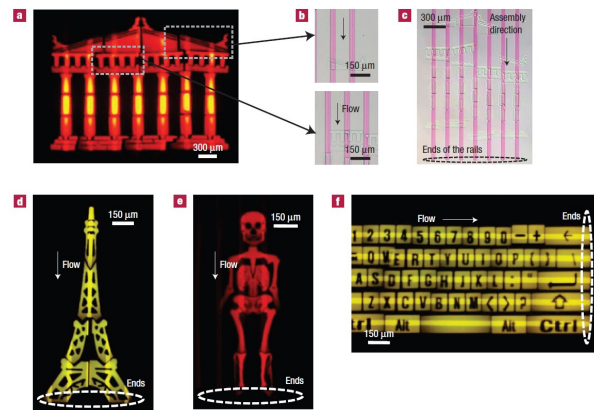
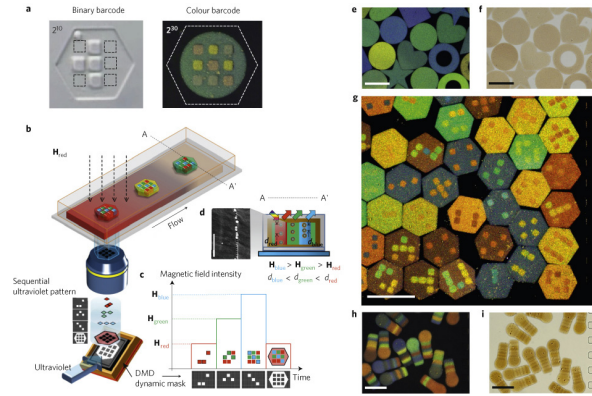


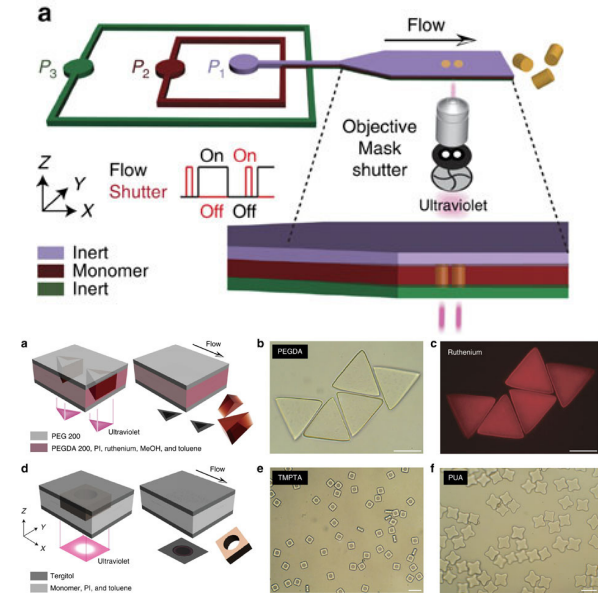
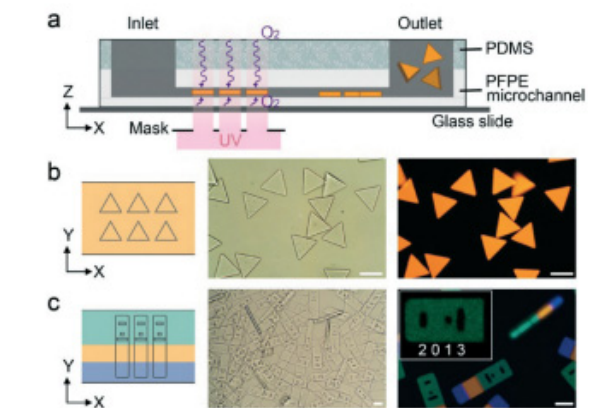
그림 13. 흡을 이용한 미세유체 리소그래피를 이용하여 제조한 다양한 모양의 구조체.¹⁸

그림 14. DMD를 이용한 바코드 미세입자의 제조.¹⁹

복잡한 화학적 반응을 한 번 더 거쳐야 하며 또한 계면 활성제와 같은 화학물질을 첨가하여 안정적으로 광경화 수지에 분산 시키는 과정이 필요하다. 최근 이를 보완하여 비극성 용매에서 미세입자를 제조하는 방법이 개발되었다.²⁰

그림 15는 새롭게 고안된 미세유동채널의 상부와 하부면에 또 다른 층류를 발생하여 유동리소그래피에서 필수적인 산소층 없이 미세입자를 제조하는 방법을 제시하였다. 이 연구에서는 기존의 PDMS를 사용하지 않고 NOA81이라는 물질을 사용하였다. 이 물질은 일반적으로 접착성이 매우 우수하여 미세유동채널의 제조시 접착제로써 다양하게 사용되었지만, 산소 투과율이 매우 낮은 물질이기 때문에 유동리소그래피 방식에는 적합하지 않은 물질이다. 화학증착(chemical vapor deposition) 방법을 이용하여 NOA 기반 미세유동채널을 제조하였으며 제조된 미세유동채널에 비활성 층류를 상하면으로 발생시키고 중간 층에는 광경화성 수지를 흘려주어 총 3층의 층류를 발생하였다. 즉, 기존의 산소에 의한 윤활층 역할을 비활성 층류가 대신하게 되고, 이 비활성 층류는 광경화 수지에 비극성용매의 사용을 가능하게 한다. 그림 15에서 볼 수 있듯이 톨루엔을 용매로 한 광경화성 폴리우레탄 수지에 분산된 소수성 퀀텀입자를 이용하여 미세입자를 안정적으로 제조하였음을 알 수 있다.

또한 비활성 층류의 사용없이 산소투과율이 매우 높으면서 비극성 용매에 안정적인 재료를 이용하여 미세유동채널을 제조하여 미세입자 제조에 응용한 연구가 제시되었다.²¹ 이 연구에서는 비활성 층류를 이용하지 않고 내용제성 물질의 일종인 perfluoropolyether(PFPE)를 이용하여 미세유동채널을 제조하였다. PFPE는 산소투과율이 매우 높아 유동리소그래피를 가능하게 하며 내용제성 특이성으로 인해 비극성 물질의 사용 또한 가능하게 한다. 그림 16은 PFPE로 제조된 미세유동채널과 제조된 미세입자의 형광사진이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비극성 물질인 헥산에 분산되어있는 소수성 UCN입자를 광경화성 수지에 안정적으로 분산시켰으며 제조된 미세입자 또한 매우 균일한 형광을 발현하였다. 이 연

그림 15. 상하층 층류를 이용한 비극성용매기반 미세입자 제조 방법.²⁰그림 16. PFPE를 이용한 미세입자의 제조 방법 및 UCN나노입자가 안정적으로 분산되어있는 미세입자의 형광 사진.²¹

구를 통해 수용성 물질에 제한 되어 있던 광경화 수지의 적용 범위를 넓히게 되었으며, 기능성 입자 및 물질을 안정화시키기 위한 복잡한 화학적 반응이 필요하지 않는 새로운 미세입자 제조 방법을 제시하였다.

3. 결론

본 총설에서는 광경화 수지를 기반으로 한 미세 유동유체와 광리소그래피를 융합하여 미세입자를 설계하고 제조하는 기술에 대하여 소개하였다. 유동 리소그래피를 이용하여 제조된 미세입자들은 지금까지 개발되어 온 제조 방법과 비교하여 매우 혁신적인 제조 기술이며 새로운 기본연구를 제시한다는 점에서 매우 뛰어난 결과물이라고 사료된다. 현재 몇 가지 도전적이면서도 필수적인 연구가 필요한 실정이다. 현재는 단순 제조 방법에 대한 연구를 넘어서며, 구체적 응용

분야에 대한 연구가 매우 빠른 속도로 진행되고 있다. 특히 조직공학과 약물전달 등 응용 생물학 분야에서 매우 빠른 진보를 보이고 있다. 하지만 개발되어온 미세입자들의 기본적인 특성에 대한 연구가 이루어지고 있지 않다. 미세입자들을 응용 생물학에 이용하려면 기본적으로 미세입자들의 물리화학적 특성에 대한 면밀한 분석이 필요하다. 이를 위해서 다양한 모델링을 통한 내부 구조의 이해가 필요하다고 생각된다. 또한 현재 개발되어 온 제조 방식을 개량하거나 새로운 미세입자 제조 방식을 개발하여 미세입자를 필요로 하는 각 분야에서 요구하는 생산량에 대응하여야 한다. 프린트방식의 기술은 분명 생산량을 높인다는 점에서 매우 유용한 방법이며 SFL 방법은 물리화학적으로 상이한 특성을 동일한 미세입자에서 구현한다는 점에서 매우 혁신적인 방법이다. 하지만 현재의 연구들은 광중합수지에 대한 연구가 활발하지 않다. 각 분야에 적합한 새로운 광중합 수지를 개발하고 이를 응용하는 연구가 필요하다. 때문에 유기재료를 디자인하고 합성하는 유기합성에 대한 연구가 필요하다. 결론적으로 미세입자를 제조하기 위한 미세유동유체의 활용기술은 응용 분야에서는 큰 발전이 있었지만 근본적인 이해와 각 분야에서 요구하는 재료의 특성을 제시하지 못했다는 점에서 아직 초기 단계에서 큰 발전을 이루지 못하였다고 생각된다. 이를 위해 유기합성을 근본으로 하여 새로운 재료를 개발하고 이를 통해 제조된 미세입자 및 구조체의 물리화학적 특성을 면밀하게 연구하는 일이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- (a) S. Sugiura, M. Nakajima, J. Tong, H. Nabetani, and M. Seki, *J. Colloid Interface Sci.*, **227**, 95 (2000). (b) T. Nisisako, and T. Torii, T. Higuchi, *Chem. Eng. J.*, **101**, 23 (2004). (c) S. Xu, Z. Nie, M. Seo, P. Lewis, E. Kumacheva, H. A. Stone, P. Garstecki, D. B. Weibel, I. Gitlin, and G. M. Whitesides, *Angew. Chem. Int. Eng.*, **44**, 724 (2005).
- D. Dendukuri, K. Tsoi, T. A. Hatton, and P. S. Doyle, *Langmuir*, **21**, 2113 (2005).
- W. Jeong, J. Kim, S. Kim, S. Lee, G. Mensing, and D. J. Beebe, *Lab Chip*, **4**, 576 (2004).
- Y. Lu, Y. Yin, Y. Xia, *Adv. Mater.*, **13**, 415 (2001).
- R. Langer and D. A. Tirrell, *Nature*, **428**, 487 (2001).
- G. C. Le Goff, R. L. Srinivas, W. A. Hill, and P. S. Doyle, *Eur. Polym. J.*, DOI:10.1016/j.eurpolymj.2015.02.022 (2015).
- (a) T. Nisisako, T. Torii, T. Higuchi, *Lab Chip*, **2**, 24 (2002). (b) T. Thorsen, R. W. Roberts, F. H. Arnold, and S. R. Quake, *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 4163 (2001).
- S. L. Anna, N. Bontoux, and H. A. Stone, *App. Phys. Lett.*, **82**, 364 (2003).
- D. Dendukuri, D. C. Pregibon, J. Collins, T. A. Hatton, and P. S. Doyle, *Nat. Mater.*, **5**, 365 (2006).
- D. Dendukuri, S. S. Gu, D. C. Pregibon, T. A. Hatton, and P. S. Doyle, *Lab Chip*, **7**, 818 (2007).
- D. C. Pregibon, M. Toner, and P. S. Doyle, *Science*, **315**, 1393 (2007).
- K. W. Bong, S. C. Chapin, and P. S. Doyle, *Langmuir*, **26**, 8008 (2010).
- D. K. Hwang, J. Oakey, M. Toner, J. A. Arthur, K. S. Anseth, S. Lee, A. Zeiger, K. J. Van Vliet, and P. S. Doyle, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 4499 (2009).
- P. Panda, S. Ali, E. Lo, B. G. Chung, T. A. Hatton, A. Khademhosseini, and P. S. Doyle, *Lab Chip*, **8**, 1056 (2008).
- S. K. Suh, K. Yuet, D. K. Hwang, K. W. Bong, P. S. Doyle, and T. A. Hatton, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 7337 (2012).
- R. F. Shepherd, P. Panda, Z. Bao, K. H. Sandhage, T. A. Hatton, J. A. Lewis, and P. S. Doyle, *Adv. Mater.*, **20**, 4734 (2008).
- J. Lee, P. W. Bisso, R. L. Srinivas, J. J. Kim, A. J. Swiston, and P. S. Doyle, *Nat. Mater.*, **13**, 524 (2014).
- S. E. Chung, W. Park, S. Shin, S. A. Lee, and S. Kwon, *Nat. Mater.*, **7**, 581 (2008).
- H. Lee, J. Kim, H. Kim, J. Kim, and S. Kwon, *Nat. Mater.*, **9**, 745 (2010).
- K. W. Bong, J. Xu, J.-H. Kim, S. C. Chapin, M. S. Strano, K. K. Gleason, and P. S. Doyle, *Nat. Commun.*, **3**, 805 (2012).
- K. W. Bong, J. Lee, and P. S. Doyle, *Lab Chip*, **14**, 4680 (2014).