

일회용 미세유체 Lab on a Chip 제작을 위한 고분자 미세성형 기술

최근 미세유체기술(microfluidics)을 기반으로 한 lab on a chip 기술이 기계, 의료, 바이오, 제약, 화학, 환경 분야 등의 다양한 분야에서 각광 받고 있다. 이 글에서는 일회용 고분자 lab on a chip 대량생산의 기반 기술에 해당하는 고분자 미세성형 기술에 대해 소개한다.

김동성 중앙대학교 기계공학부, 교수

e-mail : smkds@cau.ac.kr

Lab on a chip(이하 LOC)이란 그림 1이 보여 주듯이 연구실에서 일어나는 여러 단계의 작업들이 하나의 칩 위에 구현된 장치를 의미한다. 최근 LOC가 의료, 바이오, 제약, 화학, 환경 분야를 비롯한 다양한 분야로의 적용이 이루어지면서, 생산 및 설계 기술에 기반을 둔 lab on a chip의 미세성형 기술 개발도 많은 관심을 받고 있다. LOC는 피 혹은 반응물과 같은 검체를 마이크로 채널 내부에 흘리면서 반응/검출을 수행하기 때문에 미세유체역학 기술에 기반을 두고 디자인이 되는 경우가 대부분이며, 지속적인 사용이나 재사용이 힘든 경우가 대부분이므로, 기존의 실리콘 기반 MEMS 장치보다는 고분자 기반의 일회용 미세 장치의 적용이 일반적이다. 고분자 미세유체 LOC의 개발 과정은 크게 ① 고분자 성형 기법을 고려한 미세유체 LOC의 설계 및 수치모사 단계, ② 고분자 기판 성형용 금형 인서트 제작 단계, ③ 금형 인서트를 이용한 고분자 기판 성형(복제) 단계, ④ 성형된 고분자 기판의 접합 단계로 이루어진다. 이 글에서는 LOC 제작 과정의 전단계인 설계 과정은 제외하고, 고분자 미세성형 기술 자체(단계 ②~④)에 초점을 맞추도록 한다.(그림 2)

고분자

고분자는 가격이 저렴하고, 다수의 대량생산 기반 기술이 현존하고 있으며, 생체 적합성 및 표면 특성을 선택적으로 개질할 수 있다는 장점을 가지고 있어 lab on a chip 기판 재료로 다양하게 적용되고 있다.

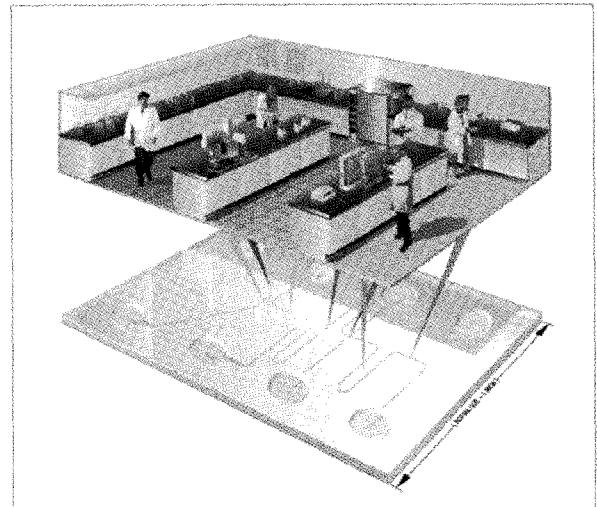


그림 1 Lab on a chip의 도식도⁽¹⁾

현재 PDMS(polydimethylsiloxane)와 같은 탄성체(elastomer)와 함께 PMMA(polymethylmethacrylate), COC(cyclic olefin copolymer) 등과 같은 열가소성 수지가 대표적으로 사용되고 있다.

PDMS의 경우 가격이 상대적으로 저렴하고, 사용이 간편하기 때문에 다양한 연구자들에 의해 사용되고 있다. 특히, PDMS 기판의 경우 접합이 간편하다는 큰 장점을 가지고 있다. 하지만, 제작 소요시간이 매우 길며 유기 용매와 접촉할 경우 팽창하는 문제점을 가지고 있다. 고분자 LOC의 대량생산을 고려할 경우, 열가소성 수지의 사용은 필수 불가결한 선택에 해당한다. 열가소성 수지의 경우 원재료 가격이 매우 저렴하며, 성형에 있어서도 다양한 대량생산 방식이 현존하고 있다는 장점이 있다. 하지만, 열가소성 수지 기판의 접합 문제

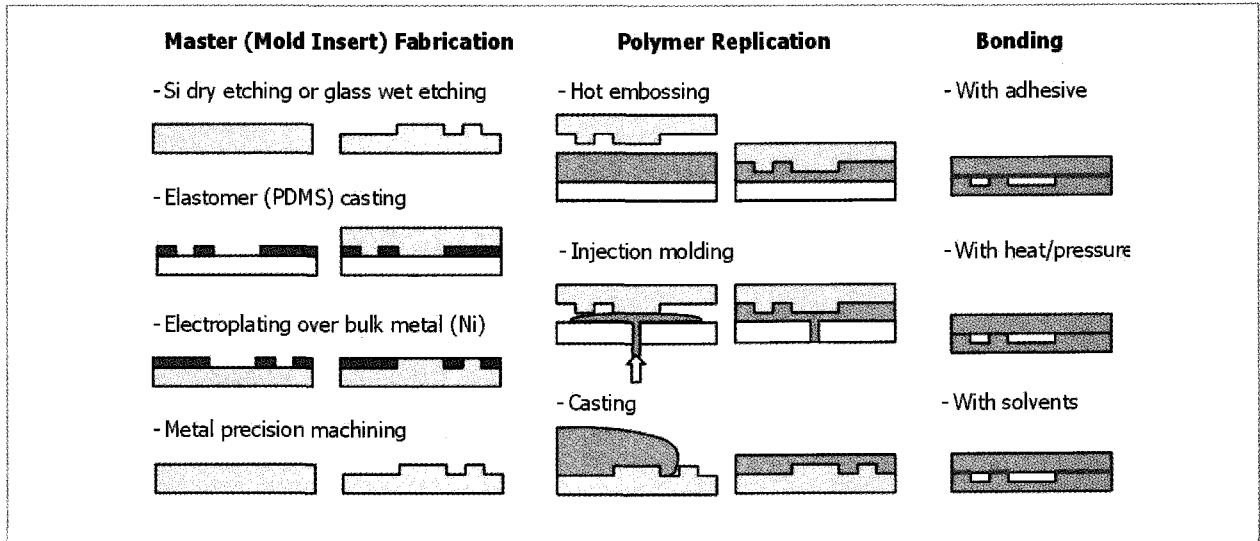


그림 2 고분자 lab on a chip의 미세성형기술 개요⁽²⁾

표 1 대표적 열가소성 수지⁽³⁾

열가소성수지	상표명	유리 전이 온도 (°C)	열변형 온도(°C)	물 흡수율 (%)	유기용매 안정성
PMMA Polymethylmethacrylate	Perspex, Plexiglas	110	90	2	대부분 용매에 취약 (아세톤, 벤젠 등)
COC Cyclic olefin copolymer	Topas, Zeonor	138	140	0.01	
PC Polycarbonate	Makrolon, Trirex, Calibre, Lexan	148	125	0.30	대부분 용매에 취약 (아세톤, 메틸렌, 클로라이드 등)
PE (LD/HD) Polyethylene	Rexlon, Dowlex, Bapolene	110/140	80/100	<0.015	헥산, Trichloroben- zole 등에 취약
PS Polystyrene	Styron, Noryl	100	70	<0.4	대부분 용매에 취약 (아세톤, 벤젠 등)

는 아직 해결해야 하는 문제로 남아 있다. 표 1에는 현재 고분자 LOC에 적용되고 있는 대표적인 열가소성 수지와 함께 이들의 특성을 간략하게 정리하였다. 특히 COC는 우수한 광투과성 및 성형성과 함께 낮은 물 흡수율과 유기 용매에 대한 안정성이 뛰어나 최근 많은 관심을 받고 있다.

금형 인서트 제작 공정

고분자 기판 성형용 금형 인서트 제작 기술에는, 기계적 미세가공 기술, 실리콘 미세가공 기술, 사진

식각 공정(photolithography) 기술, 전기도금 기술 등이 있다.

기계 가공 기술의 소형화 추세에 따라 마이크로 밀링 기술을 포함한 기계적 미세가공 기술의 경우, 다양한 재료 및 형상 가공이 가능하다는 장점을 가진다. 하지만, 기계적 burr의 형성으로 인해 전반적으로 가공 표면이 거칠게 되며, 가공 구조물의 크기가 작아질 경우(대체적으로 100 μ m 이하) 제작 자체에 한계를 갖게 된다. 이에 미세 방전가공 기술을 통해 보다 작은 크기의 미세 구조물을 가공하는 연구가 활발하게 수행되고 있다. 하지만, 제작되는 미세 구조물 형상이 가공 전극의 형상에 한

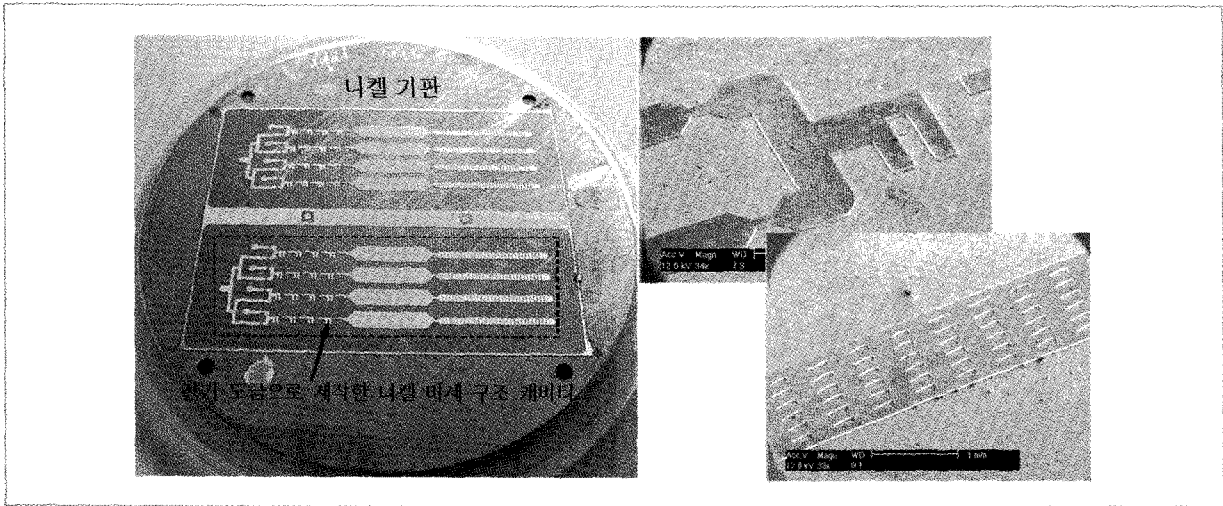


그림 3 미세사출성형용 금형 인서트⁽⁴⁾

표 2 대표적 금형 인서트 가공 기법의 비교⁽⁹⁾

미세가공기법	형상	가공	구조물	가공	구조물	금형 수명	비용	장비 접근 용이성
	다양성	정밀도	높이	표면적	종횡비			
정밀 기계가공	+	0	+	+	0	++	-	-
미세 발전가공	-	0	+	-	+	++	-	-
실리콘 습식 식각	-	+	0	++	-	+	+	++
실리콘 건식 식각	+	++	+	++	+	-	0	+
LIGA(x-ray)	+	++	++	-	++	+	-	-
UV-LIGA	+	++	+	++	0	+	0	0

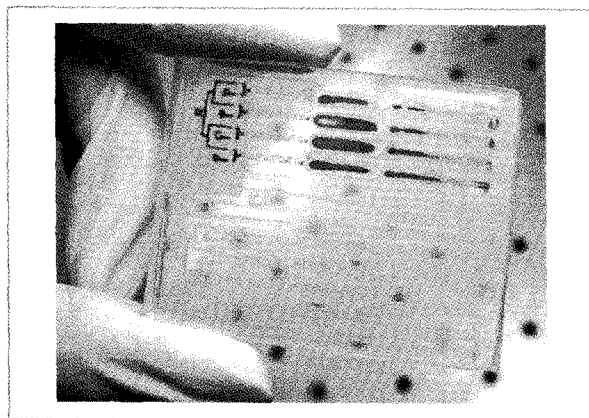


그림 4 혈액형 진단용 고분자 미세유체 lab on a chip⁽⁴⁾

정된다는 단점을 갖게 된다.

실리콘의 경우 기계 강도와 열전도도가 높고, 반도체 및 MEMS 기술의 발전에 따라 습식/건식 식각의 다양한 표면 미세가공 기술들이 개발되어 왔다. 실리콘 습식 식각을 통해서서는 고종횡비 및 우수한 표면 거칠기를 가지는 마이크로 채널 제작이 가능하지만, 실리콘

의 결정 구조 특징으로 인해 채널의 형상이 사다리꼴 혹은 반원 형태로 한정된다. 이에 반해, reactive ion etching(RIE) 등의 실리콘 건식 식각 공정은 습식 식각 공정에 비해 식각 표면이 거칠어지지만, 상대적으로 높은 종횡비를 가지며 수직 벽을 갖는 채널 형상의 제작을 가능케 하는 장점을 가진다.

사진식각 공정은 x-ray 혹은 UV에 감응하는 PMMA 혹은 SU-8 등의 감광재에 마스크를 통해 선택적으로 빛을 노광하여 미세 구조물을 제작한다. PDMS 복제의 경우 사진식각 공정을 통해 제작된 미세 구조물을 직접 금형 인서트로 사용하게 된다. 열가소성 수지 복제의 경우 금형 인서트가 고온, 고압의 공정을 거쳐야 하기 때문에, 사진식각 공정에서 제작된 감광재 미세 구조물에 전기도금 혹은 전주 공정을 통해 금속(일반적으로 니켈) 금형 인서트를 제작하게 된다. 그림 3은 UV 사진식각 및 전기도금 공정을 통해 제작된 니켈 금형 인서트를 보여준다.(UV-LIGA공정)

소개된 기계적 미세가공, 실리콘 미세가공 및 (UV-)LIGA 공정의 금형 인서트 제작 기술에 대한 장단점을 표 2에 비교 정리하였다.

고분자 기판 성형 공정

다양한 고분자 LOC기판 성형 기법들이 개발되고 있으며, 이들 중에서는 PDMS 주조, 핫 엠보싱 (hot embossing), 미세사출성형 공정이 가장 대표적인 기술들에 해당한다.

PDMS 주조 공정은 제작 공정이 용이하고 수백 nm 수준의 복제가 가능할 뿐 아니라 PDMS 기판의 접합을 쉽게 얻을 수 있어 고분자 LOC제작 공정 중 가장 널리 이용되고 있다. PDMS 주조는 가압하지 않은 상태로 상온에서 이루어지므로 사진식각 공정을 통해 제작된 감광재 미세 구조물을 직접 금형 인서트로 사용 가능하다. Dow Corning사에서 시판되는 Sylgard 184 prepolymer가 가장 많이 이용되고 있으며, PDMS prepolymer와 경화제를 10:1 비율로 혼합하여, 금형 인서트에 주조한다. 진공 챔버에서 기포를 제거하고 65℃ hot plate에서 약 3시간 가량 경화시킨 후 금형 인서트에서 PDMS를 떼어낸다. 경화된 PDMS 기판과 유리 혹은 PDMS 기판을 산소 플라즈마 처리하면 표면이 친수성으로 개질되어, 처리된 기판을 접촉시키면 영구적인 접합을 얻을 수 있다. PDMS 주조 공정은 복제 공정에 많은 시간이 소요되므로, 연구실 수준의 생산에 적합하다.

핫 엠보싱 공정은 압축 성형의 일종으로 분류할 수 있으며, 고분자가 가지는 유리 전이 온도의 특정한 성질을 이용한다. 핫 엠보싱 공정에서는 열가소성 고분자가 큰 온도 변화를 겪지 않기 때문에 열에 의한 잔류 응력 생성을 감소시킬 수 있으며, 공정 조건을 최적화할 경우 100nm 수준의 미세 구조물 성형도 가능하다. 핫 엠보싱 공정은 다음과 같은 공정으로 이루어진다. ① PMMA 혹은 COC 등의 고분자 기판을 금형 인서트와 함께 핫 엠보싱 장치에 장착한다. ② 고분자 기판과 금형 인서트를 고분자의 유리 전이 온도보다 높은 온도까지 가열한 후, 금형 인서트를 가압하여 금형 인서트의 미세 구조를 고분자 기판에 복제한다. ③ 온도를 유리 전이 온도보다 낮춘 후 금형 인서트와 복제된 고분자 기판을 분리한다. 일반적인

핫 엠보싱 공정 시간은 5~20분 정도가 소요되어 중간 수준의 대량생산에 적합한 공정에 해당한다.

사출성형 공정은 빠른 복제 공정 시간, 복제 형상의 다양성 및 자동화의 큰 장점을 가지고 있어, 현존하는 고분자 제품의 대량생산에 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 사출성형의 경우 고분자를 용융한 후 금형 인서트를 충전해야 하지만, 미세 구조물을 포함한 금형 인서트의 경우 빠른 냉각이 이루어져 일반적으로 10μm 이하의 미세 구조물을 성형하기가 어렵다. 이를 해결하기 위해 금형 인서트의 국부적 가열이나 쾌속 사출 등의 연구들이 활발히 진행되고 있다. 그림 4는 미세사출성형 공정을 통해 제작된 미세유체 LOC의 예를 보여준다. 다양한 고분자 성형 공정 중에서 미세사출성형 공정은 고분자 LOC의 상업적 성공에 가장 큰 견인차 역할을 하게 될 것으로 기대된다.

소개된 PDMS 주조, 핫 엠보싱 및 미세사출성형 공정들에 대한 장단점을 표 3에 비교 정리하였다.

고분자 기판 접합 공정

PDMS 기판 접합 공정의 경우 앞서 설명한 산소 플라즈마 처리를 통해 쉽게 영구적인 접합을 얻는 것이 가능하다. 하지만 열가소성 수지의 경우 아직까지 경쟁력을 갖춘 접합 공정이 개발되지 못했으며, 이는 고분자 LOC의 시장 진출을 가로막는 큰 장애물로 여겨지고 있다. 현재 적용되고 있는 접합 방법으로는, 접착제 접합, 열 압력 접합, 용제 접합, 초음파 접합 등이 있다.

접착제 접합은 가장 간단한 공정에 해당하지만, 접착제에 의한 마이크로 채널 폐색없이 접합을 얻기 위해서 공정이 까다로워지는 단점을 가진다. 다양한 접착제가 개발되어 있으며, 접착제의 점성을 고려하면 좋은 접합 조건을 얻는 것이 가능해진다. 열 압력 접합은 고분자의 유리 전이 온도 이하에서 고분자 기판을 가압하여 접합면의 국부적 온도 상승을 통해 접합을 얻는 방식으로 접착제와 같은 이물질의 도입 없이 접합을 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 열 접합의 경우도 공정 조건 확립이 까다로우며, 고분자 기판에 가하는 압력으로 인해 채널의 형상이 변형될 수 있다는 단점을 가진다. 용제 접합은 고분자 기판에 용제를 얇게 도포하여 표면을 용

표 3 대표적 고분자 기판 성형 기법의 비교⁽³⁾

기법	PDMS 주조	핫 엠보싱	미세사출성형
장비 구축 및 공정	간단함(hours)	중간(hours~days)	어려움(days)
인프라 요구조건	매우 적음	적음	많음
치공구 요구조건	매우 낮음	낮음	높음
생산성	오래 걸림(min~hours)	중간(min)	짧음(sec~min)
형상 다양성	높음	중간(2D)	높음 (3D)
적용 압력	없음(진공)	높음(kN)	높음
적용 온도	상온	유리전이온도 이상 (100~200°C)	용융 온도 이상 (200~350°C)
최소 치수	~nm	~nm	10µm 수준
자동화 수준	존재하지 않음	중간	높음

해하여 접합을 유도하는 방법이다. 용제 접합 역시 용제 도포 조건 확립이 까다로우며, 용제가 미세 구조물을 손상시킬 수 있는 단점을 가진다. 초음파 접합은 경계면의 진동에 의한 국부적 마찰열 유도를 통해 접합하는 공정이다. 현재 개발이 가장 활발한 접합 공정에 해당하지만, 국부적 마찰열 유도를 위해 경계면에 접합용 구조물을 새로 도입해야 하는 점은 해결해 나아가야 할 과제로 여겨진다.

맺음말

이 글에서는 일회용 미세유체 LOC의 대량생산 기판 고분자 미세성형 기술들이 전반적으로 소개되었으며, 각각의 장단점들이 비교되었다. 기계공학의 고도화된 생산 및 설계 분야의 고분자 미세성형 기술을 기반으로 다양한 미세유체 LOC들이 시장에서 선보여지기를 기대한다.

참고문헌

- (1) A. W. Chow, Lab-on-a-chip: opportunities for chemical engineering, *AIChE J.* 48, 1590–1595, 2002.
- (2) D. S. Kim, K. W. Oh, Cyclic olefin copolymer (COC) polymer moulding for LOC, Chapter 10 in *Lab on a Chip Technology, Volume 1: Fabrication and Microfluidics* by K.E. Herold and A. Rasooly (Ed.), Caister Academic Press, UK, 2009, pp. 139–160.
- (3) H. Becker and C. G. rtner, Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems, *Anal. Bioanal. Chem.* 390, 89–111, 2008.
- (4) D. S. Kim, S. H. Lee, C. H. Ahn, J. Y. Lee, and T. H. Kwon, Disposable integrated microfluidic biochip for blood typing by plastic microinjection moulding, *Lab Chip* 6, 794–802, 2006.

기계용어해설

스캐브(Scab)

강괴의 표피가 거칠거나 압연 때 표면에 블로 흠이 생기는 것이 원인이 되어, 강판 가장자리에 나타난 흠집 일부가 이지러진 채 딱지가 붙어있는 것.