

플라스틱 랩온어칩의 성형 기술

· 장준근 | 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 교수
(주)디지털바이오테크놀로지, 대표이사
e-mail : jkchang@amed.snu.ac.kr

이 글에서는 최근 활발하게 개발이 진행되고 있는 플라스틱 랩온어칩의 제작을 위한 극미세 성형 기술의 현황에 대하여 설명하고자 한다

21C는 마이크로/나노의 시대라 해도 과언이 아닐 정도로 많은 기계부품들이 초소형화 되고 있는데, 이러한 시대 흐름은 여러 다른 응용 기술과 결합하여 새로운 형태의 고부가 산업으로 나타나고 있다. 이러한 흐름 중, 바이오산업과의 융합은 건강과 삶의 질에 대한 관심이 높아지고 있는 최근의 흐름에 맞추어 가장 각광 받고 있는 분야로 대두되고 있는데, 이 중 랩온어칩(Lab-on-a-chip) 기술은 바이오 기술과 멤스(MEMS : Micro Electro Mechanical System) 기술이 결합되어 나타난 21C 핵심 기술이다.

랩온어칩이란, 말 그대로 병원이나 연구소에서 실험을 진행하는 실험실을 통째로 하나의 칩 위에 얹어 그 위에서 모든 기능을 수행하는 것을 말한다. 예전 하나를 차지하던 거대한 크기의 컴퓨터가 하나의 칩 상에 집적되어 작은 퍼스널 컴퓨터의 형태로 나타난 것을 생각하면, 거대한 방

하나를 차지하는 바이오산업에서의 실험 과정이 하나의 칩 형태로 집적되는 것이 기술발전에 따라 얼마든지 가능한 일이라는 사실을 실감할 수 있을 것이며, 얼마나 놀라운 부가가치를 갖게 되는지 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 이로 인하여 많은 나라에서 집중적인 투자가 이루어지고 있으며, 활발한 연구와 산업화가 진행 중인 것이다.

이러한 미세 시스템은 작은 크기로 인하여 높은 이동성을 가지고 있기 때문에, 실험 현장이나 의료 현장, 기타 시료를 채취할 필요가 있는 모든 현장에서의 데이터 획득이 가능하여 작업의 효율이 향상되는 이점이 있으며, 이전과는 다른 새로운 응용분야와 수요가 발생하는 장점이 있다. 또한 설비비와 생산비용이 감소하며, 시료가 절약되고, 이로 인해 대상물(혹은 환자)로부터의 시료 채취에 따르는 고통이나 비용을 절감할 수 있다.

또한 이전의 의료 생물학 분야

에서의 분석 시스템들은 시료의 채취 및 보관, 처리, 분석 등의 과정에서 많은 장비들이 개입되기 때문에 전체적인 동력 소비 및 장비 유지비용이 높을 수밖에 없었다. 이에 반해 통합된 랩온어칩의 낮은 동력 소비 및 유지비용은 매우 중요한 이점이 된다. 또한 검출 부피와 유속이 감소하기 때문에 분석에서의 감도가 향상되는 점 역시 중요한 장점이라 할 수 있을 것이다.

이를 만족시키기 위해서는 플라스틱 극미세 형상을 낮은 가격에 대량으로 구현할 수 있는 기술이 뒷받침되어야 한다. 많은 연구 그룹에서 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있는데, 이러한 기술의 현황에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

플라스틱 랩온어칩의 성형 기술

주요 재료로는 실리콘 계열의 수지로 피디엠에스(polydimethy

siloxane)와 피 엠 엠 에이 (polymethylmethacrylate) 수지가 가장 많이 활용되고 있으며, 폴리카보네이트(PC), 폴리우레탄(PU), 폴리에틸렌(PE), 폴리스티렌(PS) 등의 수지도 활발하게 연구가 진행되고 있다. 이러한 플라스틱 수지들은 대부분 미세 몰드 혹은 다이를 이용한 미세 주조법이나 미세 단조법을 이용하여 가공되는데, 이 때 활용되는 미세 몰드나 다이들은 대부분 멤스 기술을 이용하여, 수 마이크로미터 정도의 형상으로 제작되게 된다. 따라서 복잡한 형상을 갖고 있으면서도 여러 번의 가공에 견딜 수 있는 미세 몰드 혹은 다이의 제작은 플라스틱 미세 성형 기술에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있을 것이다.

플라스틱 미세 성형을 위한 몰드 및 다이 제작 기술

몰드 및 다이를 제작하는 데에는 반도체 공정에 기반한 좁은 의

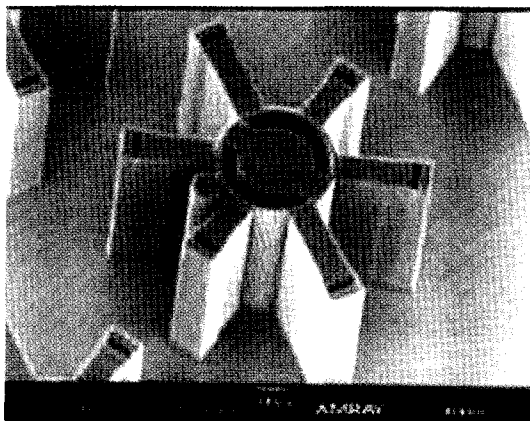


그림 1 LIGA 공정을 이용한 미세 구조물의 성형 예

미의 멤스 기술과 기계가공을 이용한 넓은 의미의 멤스 기술이 모두 활용된다. 주로 활용되는 방법으로 LIGA (Lithographie Galvano-formung Abformung) 공정, 표면/몸체 미세 가공기술을 이용한 실리콘 웨이퍼 미세 가공 공정, 고풍상의 구조물을 제작하는 데에 주로 활용되는 도금 공정과 포토 레지스트 자체를 이용하는 공법 등을 들 수 있다.

LIGA 공정을 이용한 제작기술

LIGA 공정이란 일반적인 MEMS 공정으로 만들어진 미세 구조물과 비교하여 높이가 높은 패턴을 만들고, 이 형상에 도금하여 제작한 높은 높이의 금속 구조물을 다음 플라스틱 주조 공정의 몰드로 사용하는 전체 공정을 지칭하며, 고 형상비의 구조물을 제작할 수 있는 엑스선 리소그래피(x-ray lithography)공정, 도금(galvanoformung)공정, 주형(abformtechnik)공정으로 구성된다. 엑스선 리소그래피 공정은

높은 에너지의 X-ray 방사광을 사용하여 감광재를 노광하고 현상하는 공정이며, 현상된 빈공간을 금속으로 채우고 남아 있는 레지스트를 제거하여 독립된 금속 구조물을 제작하는 도금공정 과정을 거치게 된다. LIGA 공정을 이용하여 제작된 구

조물을 높은 크기와 높은 형상비를 갖게 되는 장점이 있으나, 그 특성 상 장비의 구축 비용이 많이 적용되지는 않고 있고, 일반 고풍상비의 감광제를 활용하는 유사 LIGA(LIGA-like) 공정이 많이 활용되고 있다.(그림 1 참조)

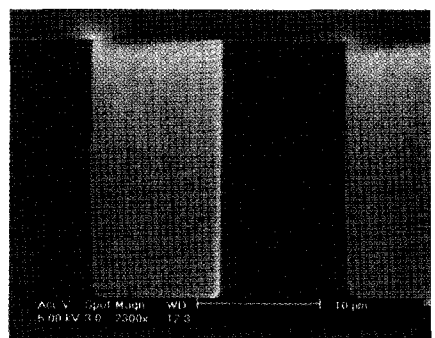


그림 2 비등방성 식각법으로 가공된 실리콘의 수직 홈

실리콘 웨이퍼의 표면/몸체 가공 공정을 이용한 제작 기술

실리콘 웨이퍼는 고순도의 다결정 실리콘을 용융시켜 특정방향으로 성장시킨 단결정 실리콘으로서 이 성장 방향은 기계적 성질, 확산, 식각 등에 있어서 영향을 준다. 실리콘 웨이퍼의 식각 방법으로는 방향성을 이용하여 특정 패턴을 형성하는 등방성식각과 방향성에 관계없이 패턴을 형성하는 비등방성식각 두 종류가 있다.

등방성식각으로는 TMAH와 KOH 등의 알칼리 용액을 이용하는 습식식각이 대표적이며, 비등방성식각으로는 반응성 기체 플라즈마를 이용한 식각공정

(RIE : reactive ion etching)이 많이 활용된다. 그 중 보쉬 사에서 만든 공정은 폴리머의 증착 및 식각, 실리콘 식각을 반복함으로써 고형상비의 수직 프로파일을 가장 정확히 낼 수 있는 것으로서 현재 가장 많이 사용되고 있는 깊은 형상비의 식각 공정 중 하나다.

이 방식으로 몰드 혹은 다이가 제작될 경우 경도가 크고 단단하므로 오래 사용할 수 있는 장점은 있으나, 채널이 아닌 부분의 표면이 좋지 않아 플라스틱 소재끼리의 접합에 문제가 있는 단점이 있다. (그림 2 참조)

후막 감광재를 이용한 제작기술

감광재(photoresist)는 자외선 혹은 엑스선에 반응하여 선택적으로 패터닝되는 물질로서 반도체 공정이나 멤스공정에 가장 기초적으로 활용되는 물질이다. 이 중 IB57M에서 개발한 SU-8은 고형상비를 가진 높은 높이의 구조물을 제작하기 위해 개발된 폴리이미드 계열의 감광재로 공정

후 남은 구조물의 강성이 매우 높으며, 특성이 좋기 때문에 그 자체를 몰드나 다이로 많이 사용하고 있다.

이 경우 추가 공정이 전혀 없기 때문에 쉽고 간단하게 소자를 제작할 수 있는 장점이 있으며, 제작된 채널 및 결합면의 정도가 매우 높아 제작된 소자의 특성이 좋다. 하지만 웨이퍼와 결합력이 떨어져 플라스틱 공정이 여러 번 반복될 경우 문제가 있고, 공정 후 형상을 제거하여 웨이퍼를 재사용하는 것이 매우 힘들다.

최근에는 이러한 단점을 해결하기 위하여, SU-8과 웨이퍼 사이에 다른 종류의 감광재층을 끼워 넣음으로써 SU-8의 제거를 가능하게 하고, 결합력을 더 좋게 하는 기술이 개발되고 있으며, 다양한 이형재의 도입으로 반복되는 공정에서의 문제점 역시 해결되고 있는 추세이다.(그림 3 참조)

금속 도금을 이용한 제작기술

도금은 수직방향으로 두꺼운 금속 박막을 제작하는 데에 가장 많이 사용하는 방법으로서 수십 마이크로 높이의 채널을 가공하기 위한 몰드 및 다이를 제작할 경우 유리하다. 도금을 이용하여 제작된 몰드의 경우, 웨이퍼 식각을

이용하여 제작된 몰드보다 표면 형상이 좋으며, 특히 결합면의 표면이 우수한 장점이 있고, 감광재를 이용한 몰드보다 반복되는 공정에 더 잘 견디는 장점이 있다.

많은 경우 니켈이 사용되며, SU-8 혹은 다른 종류의 후막 감광재를 이용하여 도금용 몰드를 제작한 후, 도금 공정을 수행하여 제작된다.

미세 기계가공을 이용한 제작기술

레이저, 초음파 가공이나 전해 가공, 전기화학 가공기술 등의 미세 가공기술이 최근, 활발하게 도입되고 있다. 이는 기존의 미세 가공기술들이 삼차원이 아닌, 고형상비를 갖는 이차원 구조물의 제작만 가능하다는 한계가 있기 때문이다. 미세 기계가공기술은 이러한 한계를 넘어서서 기존의 멤스 구조물에 비하여 더 크고 복잡한 형상을 제작하는 데에 활용되고는 있으나, 수율이 낮고, 공정의 정확도나 정밀도가 아직은 낮으며, 반복적인 형상의 경우에는 활용되기 어려운 한계가 있다.

플라스틱 미세 성형 기술

플라스틱이 랩온어칩을 비롯한 바이오 응용 소자에 사용하기 위하여 가장 중요한 성질은 생체적합성과 표면의 반응성이다. 특히 기존 바이오분야의 연구자들이 유리나 생물학 실험용 부품류의 대부분을 차지하는 폴리에틸렌 수지에서 개발해 온 프로토폴들이 그대로 활용될 수 있어야, 기존의 실험과정을 대체하는 효과

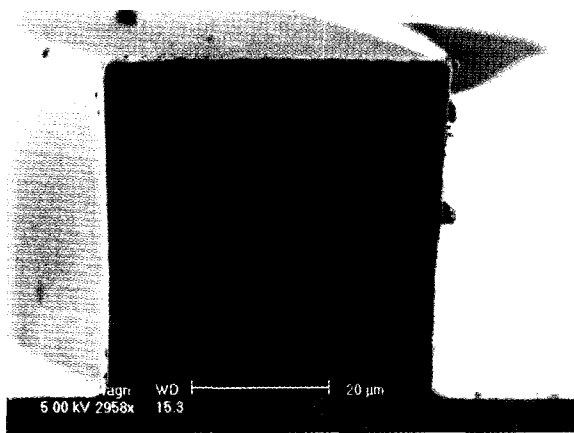


그림 3 후막 감광재 중 하나인 SU8의 수직 형상

를 얻을 수 있을 것이다.

앞에서 언급하였던 몰드 혹은 다이를 이용하여 플라스틱 미세 구조물을 성형하는 방법 중 대표적인 것으로는 미세 주조 방식과 미세 단조 방식을 들 수 있다. 이 공정은 한 번의 공정으로 수십 개의 랩온어칩을 제작할 수 있으면서도, 수 마이크로 미터 선폭을 갖는 극미세 패턴까지 구현할 수 있어 기존의 기계가공이 갖는 한계를 극복할 수 있고, 짧은 시간에 저렴한 비용으로 대량의 플라스틱 칩을 생산할 수 있는 장점이 있다.

미세 주조법

마이크로 몰딩은 열경화성 특성을 가진 실리콘 계열의 수지를 제작하는 데에 많이 사용된다. 이 중, 앞에서 언급하였던 피디엠에스(PDMS) 수지는 광투과성이 우수하고, 부드러우며, 생체적합성이 높고, 제작이 쉬워 많이 사용된다. 특히 이 수지는 실리콘 계열의 표면과 이종접합이 잘 일어나는데, 유리나 실리콘 웨이퍼 등과의 접합특성이 상당히 좋아 표면을 개질한 후 결합하여 닫힌 형상의 채널을 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다.

그러나 표면에 오염이 잘 일어나고, 표면 특성이 고르지 않아 표면의 미세한 극성이나 산도에 영향을 받는 전기영동 계통의 실험에는 문제가 있다는 것이 알려지고 있으며, 소수성이어서 미세 시료를 이송하는 데에 제한점이 많은 단점이 있다. (그림 4 참조)

미세 단조법

미세 단조법은 몰드와 폴리머를 각각 폴리머의 용융점(glass transition temperature)까지 가열하고 압력을 가하여 몰드의 형상을 전사시키는 원리를 이용한 것으로서 피엠엠에이(PMMA)와 같은 열가소성 수지에 많이 적용된다. 앞의 마이크로 몰딩 방법과는 다르게 몰드의 패턴을 폴리머 시트에 압력을 가하여 찍어내는 원리를 이용하기 때문에 몰드를 만들기 위해서는 일정한 압축 응력에 견딜 수 있는 재질이 사용되어야 하고, 그에 따른 공정이 진행되어야 한다.(그림 5 참조)

플라스틱 미세 가공 기술의 응용

이러한 플라스틱 미세 가공 기술은 랩온어칩 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 세포의 특성을 분리하여 개수를 측정하거나 그 특성을 분석하는 플로 사이토메트리(flow cytometry)나 세포 분리, 염색체의 정량화, 반응 및 시퀀스 분석, 단백질의 정제 및 특성 분석, 전기화학적 센싱, 염색체의 발현 및

증폭, 전기 영동 소자 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 특히

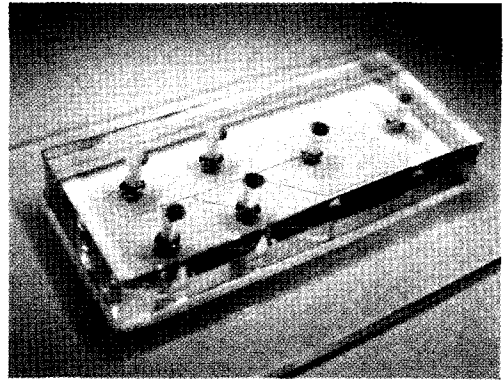


그림 4 마이크로 몰딩 방법으로 제작되고, 플라즈마를 이용하여 유리와 결합된 피디엠에스 마이크로 칩의 예



그림 5 서울대학교 마이크로시스템 기술센터에서 보유하고 있는 미세 단조장비의 외형

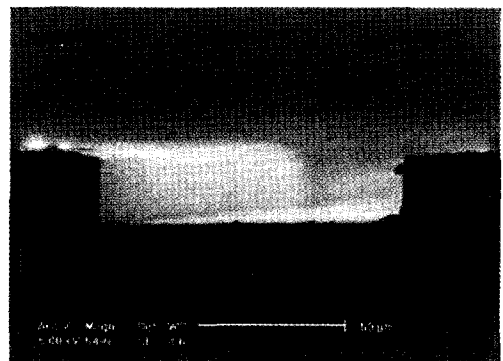


그림 6 미세 단조로 제작된 피엠엠에이 미세 구조물

저렴한 일회용 소자의 형태로 개발이 가능하므로, 간단한 형태의

일회용 질병 진단 칩, 혈액 분석 칩, 혈액 응고 시간 측정 소자 등이 활발하게 개발되고 있다. 제약 회사, 생물학 실험실, 병원, 화학 공장, 화장품 등 그 응용분야는 매우 넓으며, 다양하다.

그러나 랩온어칩 소자를 개발하기 위해서는 플라스틱 미세 가공 기술뿐만 아니라, 미세 유체의 특성 분석 및 설계 기술, 생체 시료의 처리 및 분석 기술, 소재의 표면 처리 기술 등 다양한 분야의 지식이 유기적으로 통합되어야만 좋은 결과를 거둘 수 있다. 소자의 설계 및 공정의 설계, 개발 단계에서 그 응용분야에 대한 지식이 결합되어야 하며, 응용 소자의 설계나 활용 기술에서도 미세 가공 기술이나 미세 유체에 대한 이

해가 필수적이므로, 학제간의 연구와 다양한 분야의 연구자 간의 교류가 필수적인 것이다.

감사의 글

본 연구에서 플라스틱 미세 제조 공정 부분은 과학기술부에서 지원하는 21세기 프런티어연구 개발 사업의 지능형 마이크로 시스템 사업단의 지원으로 수행 중이며, 플라스틱 미세 단조 공정 부분은 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술개발사업의 세부과제로서 수행 중으로, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고 자료

- Kovacs, G. T. A., 1998, "Micromachined Transducers Sourcebook," WCB/McGraw-Hill.
- Harvey C. Hoch, Lynn W. Jelizski, Harold G. Carighead, 1996, "Nanofabrication and biosystems", Cambridge university Press.
- 이종덕, 2000, "실리콘 집적회로 공정 기술", 대영사.

기체응어 해석

▣ STEP(Standard for the Exchange of Product model data, ISO 10303)

STEP은 ISO10303으로 문서화된 제품 데이터 교환의 새로운 표준에 관한 ISO(international standard organizations)의 개발 활동으로서 모든 산업분야에서 제품의 생명주기 동안의 제반 정보를 통합적으로 관리할 수 있는 표준을 제시하는 것을 목표로 한다. STEP은 이러한 광범위한 응용 분야에 필요한 정보 모델을 체계적으로 표현하기 위하여 내부적으로 파트(part)들이 여러 그룹으로 구성되어 있으며, 파트 번호가 작은 것일수록 다른 파트들에서 공통적으로 사용되는 내용을 담고 있다. STEP에서 규정한 그룹의 범주로는 응용 프로토콜(application protocol), 통합 자원(integrated resource), 서술방법(description

method), 구현방법(implementation method), 적합성 시험 방법 및 골격(conformance testing methodology and framework), 가상시험세트(abstract test suites) 등이 있다. 이 중에서 응용 프로토콜은 다른 모든 파트를 이용하도록 되어 있으며, 각 산업응용 분야의 정보 요구(information requirement)를 체계적으로 명시하여 신뢰성있는 정보 교환을 위한 메커니즘을 정의하도록 되어 있다.

▣ 사이클 시뮬레이션(Cycle Simulation)

엔진의 한 사이클 동안에 발생하는 유동 및 연소 현상에 대해 열역학적 해석을 통하여 열역학적 변수에 대한 정보를 얻는 방법으로서 엔진의 성능 및 배기 특성 예측에 이용된다.