3. 특집 : MEMS기술

초미세 전자기학 기술의 소개와 Micro-Channel의 제조와 응용

Introduction to Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS) and Fabrication and Applications of Micro-Channel

서 덕 봉

Duck-Bong Seo

• 미주리 주립대 기계공학부

• E-mail : dse99@mizzou.edu

1. 개 요

1987년 Joe Dante감독의 인너스페이스(INNER SPACE)라는 영화에서는 인간이 탑승할 수 있는 잠수정의 크기를 아주작게 줄여 실수로 인체속에 투여하게 되고 인체를 여행하게 되는 내용을 다루고 있다. 만약 이 영화에서처럼 커다란 기계를 만들고 그 기계를 우리가 원하는 크기로 줄일 수 있는 기술이 가능하다면, 인류의 과학은 그 기술 개발 이후에 무한히 발전하였을 것이다. 하지만, 아쉽게도 그런 기술은 수백년, 아니 수천년이 지나도 우리가 살고 있는 지구상에서는 이루어 지지 않을것이다. 왜냐하면, 그런기술은 우리가 알고있는 물리적 지식과 이론을 뛰어넘고 파괴해야만 가능한 실현 불가능한 이야기이기 때문이다. 하지만, 영화에서처럼 커다란 크기를 아주작게 줄이는 기술은 불가능하지만, 처음부터 아주 작은 기계를 만든다는건 인류가 가진 기술발전에 비추어 실현 가능한 현실이 될 수 있다. 즉 인체에 투여할 수 있을 정도의 크기로 잠수정을 만들어 원격조정을 할 수 있다면, 위의 영화의 이야기가 영화속에서만 존재하는 허구가 되지는 않을 것이다.

위와같이 작은 기계를 만들거나, 기존의 장치들의 크기를 줄여 효율을 높이고, 편리하게 쓸 수 있게 하는 것이 초미세 전자기학 (MEMS)의 일반적인 개념이라고 설명할 수 있다. 1950년대 집채만하던 컴퓨터의 크기가 현재에 와서는 손바닥 위에 올려놓기에도 작은 크기로 줄어들었지만, 성능은 50년대 컴퓨터의 몇배에 달하게 된 것이나, 최초의 휴대용 오디오 기기보다 더 작은 MP3 Player에 지금은 용량에 따라 수백, 수천곡의 음악을 저장해 휴대할 수 있는 기술들이 인류가 그동안 발전시켜온 작고, 정고한, 휴대가 간편한 기기들을 만들려는 노력의 결과물들이라 할수 있을 것이다.

이러한 노력들중의 하나의 학문으로 초미세 전자기학(MEMS)이 80~90년대를 지나면서 발전하게 되었다. MEMS란 소형화된 시스템을 연구하고 개발하는 분야로서 일반적으로 크기가 100μm 보다 작은 센서, Actuator, 그리고 초소형 전기장치들을 개발하고 연구하는 분야를 모두 포함하는 학문분야로 기계적인 특성과 전기적인 특성을 동시에 집적한 장치들을 개발하는데 그 초점을 맞추어 1990년대 초반부터 본격적으로 많은 연구가 진행되어지며 발전되어 왔다. MEMS장치는 전기적인 특성과 기계적인 특성을 동시에 갖고 있다는 점과 초 소형이라는 장점 때문에, 특히 21세기의 시작과 더불어 기존 장치들의 응용분야 이외에 생명공학분야의 응용에 초점을 맞추어 개발과 연구가 진행되어지고 있으며 특히, 피 한 방울로 병명을 진단할 수 있는 자가진단 센서의 개발과 약품 투여 센서의 개발 그리고 의료 보조 장치 개발에 초점을 두고 많은 연구가 진행되어지고 있다.

2. 배 경

초미세 전자기학의 기원은 1959년 The American Physical Society Meeting 에서 Richard P. Feynmam의 발표인 Theres Plenty of Room at The Bottom 에서 시작되었다고 할 수 있다. 그는 이러한 결론을 광대한, 경계가 없는 범위에서의 저온 또는 고압유지의 과학적 필요성에 의한 실험으로부터 유추해 낼 수가 있었다[1,2]. 그는 또한 초미세 전기모터를 구상함으로써 그 적용의 실례를 보여주기도 하였다 [1].

초미세 전자기학 제조기술의 발전은 초미세 집적회로 (Integrated Circuit) 제조 기술의 발전과 더불어 발전되었다. 집적회로의 제조기술을 기계적기능과 전기적 기능이 함께 있는 장치 개발에 응용함으로서 미세한 기계장치를 완성할수 있게 되었고, 그 장치를 이용하여 기계적인 특성의 측정을 가능하게 하고 새로운 시대가 필요로하는 센서들과 실험 장치들의 개발을 가시화 시킬 수가 있었다.

3. 응용사례

현재 다양한 MEMS기술 응용장치들이 우리의 현실속에서 쓰이고 있지만, 우리가 접할 수 있는 MEMS기술의 응용사례의 대표적인 예는 Micro-fluidic분야에서의 잉크젯 프린터의 헤드와 Optical분야에서의 프로젝션 Display (DLP 프로젝션 TV) 등에 내장된 Micro-mirror라고 할 수 있다. 그리고 Micro-fluidic 장치에서의 Micro-pump (그림 1)[3] 나 밸브, Micro-pressure-sensor (그림 2) 등도 현재 개발이 완료된 MEMS 장치들이고, Micro-switch, 세포 분류 장치 (Cell sorting micro device), Micro-actuator등과 장거리 미사일의 비행 제어를 효과적으로 해줄 수 있고 캠코더 손떨림 방지 등에 이용할 수 있는 Micro-gyroscope등도 MEMS기술을 이용한 장치들이다.

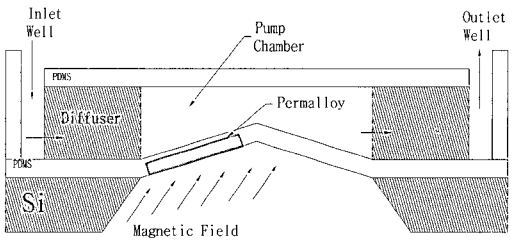

그림 1. 일리노이 주립대 Dr. Chang 연구팀이 개발한 'Magenetic Membrane Micro-Fluidic Pump'의 단면도

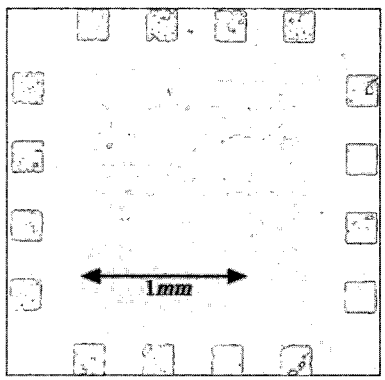

그림 2. Poly-Muliti-User-MEMS-Processes (Poly MUMPs)를 이용한 Micro-Pressure-Sensor의 투시도

MEMS의 응용은 표 1에서와 같이 상업적인 응용사례와 군사적인 응용사례로 나눌 수 있으며, 자동차 산업, 의료산업, 그리고 정보화 산업등으로 세분화 되며, 2000년대 초반에는 전 세계적으로 $500,000,000 시장을 형성할 것으로 추정되고 있으며[4] 앞으로도 잠재적으로 큰 시장을 이룰것으로 여겨지고 있다

표 1 잠재적인 MMS 기술 적용분야의 예

상업적 적용분야	군사적 적용분야
* 의료 센서 * 의료 계측장비 * 심혈관 관리 장치 * 약물 투약 운반 장치 * 내연기관 제어 장치 * 대용량 정보 저장 장치 * 차량 안전 및 완충 장치 * 전자통신 광 센서 장치	* 개인 네비게이션 * 무기 안전, 조준 인공지능 장치 * 야간 투시 장치 * 저출력 고밀도 정보 저장 장치 * 자가 의료 진단 장치 * 무선 통신 장치 * 정밀 미사일 유도 및 제어 시스템

4. 제조 기술 및 가공 방법

초기의 MEMS 기술의 개발과 연구는 미세 구조의 가공과 건설에 초점을 두고 이루어져왔다. 특히, 대형구조물이나 기계들과는 달리 크기와 상층부로의 접합 제작의 제약으로 인해 기둥구조물의 제작에 어려움이 있기 때문에 주로 표면에서 이루어질수 있는 2차적인 구조물 제작기술 개발에 초점이 맞추어져 있었고, 그렇게 제작된 2차 구조물들을 쌓아 올리면서 3차적인 구조물을 완성할 수 있다.

MEMS장치의 제조기술은 일반기계의 제조기술과는 달리 많은 화학제품들이 이용되고 있다. 화학제품들의 상호작용을 이용하여 필요한 구조물을 만들게 되며 크게 두가지로 분류하게 되는데, 그 첫번째가 표면 미세가공기술 (Surface Micro-Machining)로 실리콘웨이퍼(Silicon wafer) 위에 얇은 구조와 보조 필름을 입히고 (deposition) 깍는 (etching) 작업을 통한 미세구조 제조 기술로 단순한 빔 구조나 막(membrane)제작에 적합한 기술이다. 이 기술의 최대 특징은 미세한 기계적, 전기적 장치를 작은 미세구조에 집적할 수 있다는 것이다.

두번째는 용적 미세가공 (Bulk Micro-Machining)으로, 2차적인 표면 가공보다는 3차적인 구조 가공에 초점을 맞춘 가공기술로, 기본 표면을 이루는 실리콘웨이퍼(Silicon substrate)에 깊게 etching을 가해 구조물을 완성하거나 서로 달리 제조된 구조물들을 영원히 접합(bonding)하여 구조물을 완성하는 기술이다.

또한 MEMS장치의 제조는 하나의 장치를 제조하기에는 고 비용이 들어가는 관계로 여러가지 장치를 하나의 실리콘웨이퍼 위에 제조하는 Multi-User-MEMS-Processes (MUMPS) 가공이 상업적으로 가능해 저 비용으로도 제조가 가능해지고 있다. 가장 대표적인 MUMPS가 Poly-MUMPS인데 정해진 지역에 (대략 2mm×2mm) 7개층으로 된 막들을 정해진 규칙에 입각해서 입히고 깍아(etching) 내어 MEMS 장치를 만드는 제조방법이다 (그림 3)[5].

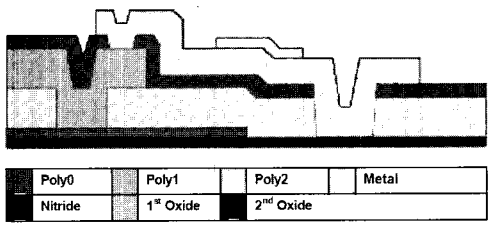

그림 3. MEMSCAP에서 제공하는 Poly-MUMPS 층 단면도 및 재료

Poly-MUMPS 이외에도 SOIMUMPS와 Metal-MUMPS등도 이용되어지고 있으며, 위의 모든 MUMPS는 MEMSCAP (www.memscap.com) 에서 제공되어 지고 있다.

5. MEMS해석을 위한 컴퓨터 프로그램

초미세 유체역학(Micro-Fludic)분야를 제외하고 대부분의 MEMS장치들은 열역학, 열전달, 전자기학, 구조역학, 진동해석 그리고 재료역학등 다

방면에 걸쳐서 밀접한 관계를 갖고 있다. 이러한 밀접한 연관성은 MEMS장치들의 설계와 제작에도 영향을 미쳐, 컴퓨터를 이용한 수치해석 방법을 필요로 하게 되었다. 그로인해 MATLAB, C++ 또는 FORTRAN같은 언어 프로그램의 이용뿐만 아니라 상업적으로 MEMS만을 위한 프로그램 (COVENTORWARE, COVENTOR Inc. Cary, NC)도 개발되게 되었을뿐아니라, 구조물 해석에 탁월한 성능을 보이는 ALGOR같은 상업프로그램도 MEMS장치 해석에 이용되어지고 있다.

ALGOR와 COVENTORWARE는 두 가지 모두 3차원적인 구조 변형 해석에 탁월한 성능을 가지고 있으나, 약간의 차이점을 가진다. 그 첫번째 큰 차이점은 COVENTORWARE의 경우, 프로그램내에서 장치의 설계 및 MASK Design을 동시에 할 수 있어서 장치의 제조과정에 따른 MASK Design에서 3차원 모형을 만들고 해석할 수 있다는 장점이 있고, ALGOR의 경우는 3차원 모형을 직접 만들거나, 다른 응용 프로그램인 AUTOCAD나 Pro-E에서 3차원 모형을 직접 만들어서 ALGOR상에서 해석할 수 있다는 장점이 있다. 두 가지 상용프로그램 모두 열에 의한 장치 변형 해석, 전기적 특성에 따른 전압, 전류, 전하 등의 변화와 그에 따른 장치의 변형해석, 모드해석 등에 적합하며, COVENTORWARE의 경우 Micro-Fluidic해석도 가능하도록 프로그램이 개발되어져 있다. 특히, 3차원 그래픽에 의한 모델 해석이 가능하다는 게 큰 장점이다 (그림 4.)

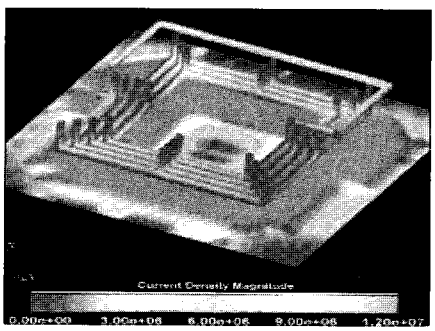

그림 4. COVENTORWARE 를 이용한 MEMS장치 해석의 예 (www.coventor.com/media/memhenry.pdf)

6. MICRO-CHANNEL 제조 과정

MEMS장치의 제조과정을 보다 상세히 알아보기 위해서는, 간단히 제조할 수 있는 Micro-channel의 제조 과정을 알아보면 쉽게 이해할 수가 있다. 특히, Micro-channel은 Micro-fluidic 장치나 Bio-MEMS 분야에 적용이 가능한 MEMS장치로 쉽게 제작이 가능하면서도 다방면에 유용하게 쓰일 수 있는 장치이다. 많은 과학자들에 의해 다양한 Micro-channel 제작 방법이 소개되긴 하였지만, 하버드 대학의 David C. Duffy 연구팀에 의해 소개된 Micro-channel 제조 방법은 (1998년)[6] 생체에 이용할 수 있는 재료(Polydimethylsiloxane; PDMS)를 사용하고, 빠른 시간안에 비교적 용이하게 제조할 수 있다는 장점으로 현재 미주리 주립대 미세장치 제조 연구실에서 세포 분류기 및 정자 꼬리 절단 장치를 개발하기 위한 연구에 이용되어지고 있다.

Micro-channel의 제조과정은 그림 5. 에서 보이는 것처럼 크게 coating, exposing, etching, molding 그리고 bonding 5가지 과정으로 이루어져있다. 사용되는 화학제품으로는 coating을 위한 SU-8 photoresist, etching을 하기위한 SU-8 developer, molding을 위한 PDMS 그리고 유리와 PDMS micro-channel을 접합시키기 위한 약간의 묽은 염산이 필요하다. 특히, David C. Duffy에 의해 소개된 제조 방법은 channel의 금형을 뜨기위한 투명필름 (transparency)을 일반적인 고 해상도 (2540dpi 이상) 잉크젯 프린터를 이용함으로서 저비용으로 channel을 가능하게 해주고 있다.

David C. Duffy외에 현재까지 소개된 Micro-channel 의 제조방법은 최종공정을 방진실 (clean room)을 이용하여 완성해 왔으나, 현재 저자가 속해있는 연구실에서는 방진시설이 갖추어져있지 않은 상태에서도 50μm 너비의 Micro-channel (그림 6)을 완성할 수가 있었다. 특히, Micro-channel은 그 크기가 작아 유체를 처음 흘려보내기에는 유체의 표면장력이 너무 커 표면 처리를 친수성으로 변화시키지 않으면 유체

를 흘려보낼 수가 없기 때문에, 묽은 염산을 이용하여 유리판과 PDMS channel을 접합시켜 channel내의 표면을 친수성으로 변화시켜 유체를 흘려보내게 된다.

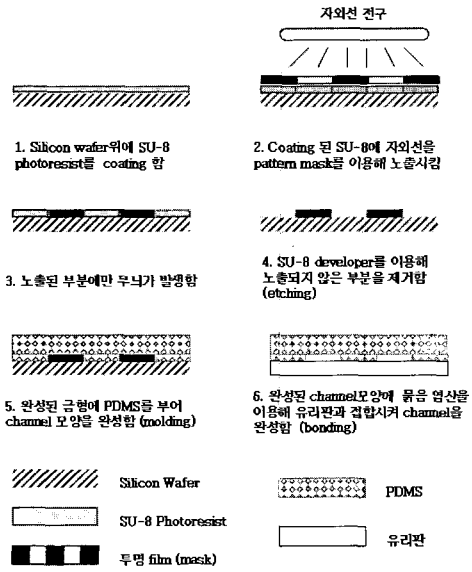

그림 5. Micro-Channel 제조 과정

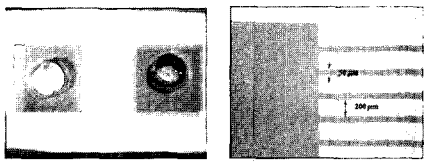

그림 6. 완성된 50㎛ 너비의Micro-Channel의 예

7. Micro-channel을 이용한 연구

Micro-fluidic장치의 경우, 유체와 밀접한 관계를 갖기때문에, 생명과학 분야에서 많이 이용되고 발전되어지고 있다. 이러한 시도는 MEMS의 기술을 생명과학분야에 연결시켜 빠르고 편리한 센서의 개발과 발전을 꾀하고 있으며, 나아가서는 피 한방울로 병명을 진단을 할수 있는 종합 자가진단 센서의 개발과, 그 동안 병원 실험실에서 이루어져왔던 혈액검사, 소변검사 등의 건강 검사항목들을 손쉽고 빠르게 할 수 있도록 지향하고 있다. 특히, 이런 센서의 개발은 검사비용을 대폭 줄임으로서 누구에게나 자신의 건강을 쉽게 검사할 수 있게 해 줄것이다.

이러한 연구의 시작으로 Micro-channel을 이용한 사례를 살펴보면 그 응용사례중 대표적인 예가 세포 분류장치와 혈액세포 분류 장치로, 미시간 주립대의 B. Cho연구팀의 활동성이 있는 정자와 없는 정자를 분류해내는 장치[7]는 세포 분류장치의 좋은 예라고 할 수 있다 (그림 7). 이 장치는 비교적 간단한 구조와 원리를 갖고 있지만, 정자를 분류해 내는데 탁월한 성능을 보이고 있어서, 인공수정을 위한 정자 분류에 매우 효과적이다.

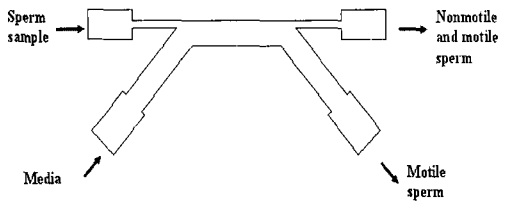

그림 7. Micro-channel을 이용한 정자 분류 장치

이외에도 Micro-channel을 이용한 장치들은 생명과학을 발전시킬 수 있는 보조 장치로의 이용도 가능하며, 미주리 주립대 Micro Fabrication 연구실에서의 동 대학내 수의학과와 공동으로 개발한 정자 꼬리 절단 장치는 이러한 보조장치의 대표적인 개발 사례라 할 수 있다. 이 장치는 Micro- channel내에서의 살아있는 세포의 움직임을 해석해 정자의 방향성과 위치를 잡고 레이져를 이용해 정자의 꼬리를 절단하는 연구로, 인공수정 시 불필요한 정자의 꼬리를 손쉽게 제거함으로써 그 동안 인공수정 작업전 수작업으로 했던 작업을 자동화, 대량화 하는데 역점을 두고 있다. 현재까지 Micro-channel 내에서 소의 정자의 이동방향이 유체의 흐름 방향과는 반대로 이동하려는 경향이 있다는 사실이 실험을 통해 발견되었다.

8. 향후 MEMS기술의 발전 동향

초기의 MEMS의 연구는 초소형 구조물의 효과적인 제작방법에 초점을 두고 발전해 온 경향이 두드러지게 보여지고 있다. 하지만, 점차 제조 기

술이 발전해 나가면서 현재에 이르러서는 효과적이고 저비용으로 제조 가능한 MEMS장치들의 개발과 응용에 초점을 맞추어 많은 연구가 진행되어지고 있으며, 특히 초 소형으로 제작할 수 있어 일회용으로 이용이 가능하다는 장점때문에 생명과학 분야에 응용하려는 움직임이 두드러지고 있는 추세이다. 예를 들면, 심장수술 환자의 수술의 이상유무를 계속적으로 살펴 보려면 현재는 여러가지 검사와 장비가 필요하지만, 수술과 동시에 초소형 압력 센서를 수술부위에 심어 무선으로 수술부위의 압력을 살펴 보면서 수술결과를 확인할 수 있게 하는 것이 MEMS 기술을 이용하면 가능해 진다는 것이다.

생명과학쪽 응용과 더불어 계속적으로 MEMS 연구가 진행되어지고 있는 방향은 저비용, 대량생산이 가능한 종합적인 초소형 전자기기를 개발하려는 쪽이다. 즉, 예전에는 통화 기능만 가능하던 휴대폰에 지금은 MP3 Player, 인터넷 통신기기, 방송 수신기 등을 장착하여 다기능화 하게 된 것도 휴대폰 내에 들어가야 할 이러한 기기들의 초소형화가 가능함으로서 완성된 것이라는 점이다. 이러한 추세는 향후 MEMS기술이 추구하는 방향의 한 축을 담당하고 있으며, 머지 않은 미래에 자그마한 휴대폰 기기 하나에 위의 기능들외에 통신 번역 장치, 개인용 휴대용 PC, 대용량 저장 장치, 통합 미디어 재생장치 등이 집적되어 새로운 세기를 열어 나갈 것이다.

참고문헌

[1] Feynman, R. P., "There is Plenty of Room at the Bottom", The American Physical Society Meeting in Pasadena, CA, 1959.

[2] Hector J. DeLos Santos, "Introduction to Micro-electro-mechanical (MEM) Microwave Systems", Artech House, Boston.London 1999.

[3] Mwlvin Khoo and Chang Liu, "A Novel Micromachined Magnetic Membrane Micro-fluid Pump", Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings, Vol. 3, pp. 2394-2397 2000.

[4] Nadim maluf, "An Introduction to Microelectromechanical System Engineering", Artech House, Boston. London, 1999.

[5] MEMSCAP, www.memscap.com/memsrus /docs / polymumps.dr.v10.pdf

[6] David C. Duffy, J. Cooper Mcdonald, Olivier J. A. Scheueller and George M. Whitesides, "Rapid prototyping of Micro-fluidic System in Poly (dimethylsiloxane)", Analytical Chemistry, Vol. 70, pp. 4974-4984, 1998.

[7] B. Cho, T. Schuster, X. Zhu, D. Chang, G. D. Smith, S. Takayama, "A Microfluidic Device for Separating Motile Sperm from Nonmotile Sperm via Inter-streamline Crossings", 2nd Annual International IEEE-EMBS Special Topic, Conference on Microtechnologies in Medicine & Biology, pp. 156-159 2002.