

HAR-MEMS 공정과 그를 이용한 미세 열유체 응용 연구

이 승 섭
KAIST 기계공학부
sslee97@kaist.ac.kr

1. 서 론

1987년 미국 버클리 대학의 연구진은 반도체 미세공정 기술을 이용해 머릿카락 굽기의 초소형 모터를 발표하였다 (Fig. 1).¹⁾ 이는 MEMS(Micro Electro Mechanical System, 혹은 MST ; Micro System Technology)라는 새로운 학문 분야의 실질적 효시로, 명실공히 마이크론 단위의 기계-전자 시스템의 구현이라는 새로운 장을 열게 되었다.^{2,3)} 반도체 미세고정기술을 기계 공학에 접목시킨 것으로 이해될 수 있는 이 새로운 분야는, 초창기 기존의 기술로는 불가능하게 간주되었던 다양한 형태의 수(수백 마이크론 크기)의 초소형 센서 및 액츄에이터의 미세 제작공법을 제공 하였으며, 점차 기계-전자-재료-물리-화학의 학제간 복합분야를 위한 새로운 공정도구로 초소형 집적시스템의 구현과 그를 통한 새로운 해석-실험-상용화 연구로 그 연구 영역을 급속히 넓혀나가게 되었다.

1980년대 말 일부 전공자를 중심으로 발전되어온 MEMS 분야는, 1990년대 들어서 매우 빠르게 보편화되기 시작하였으며, 지난 10여년 간 전세계적으로 수행되어진 심도있는 연구 투자를 통해, 상용화 적용 및 새로운 산업분야로 확실한 자리 매김을 하게 되었다. 현재, MEMS 시장은 매년 20%의 시장 성장율을 기록하며 성장하고 있으며, 2000년 기준으로 이미 약 \$ 150억(650억 (조사 기관, 시장 영역에 따라 다소 차이가 있음)의 시장을 형성하게 되었다. 흔히 90년대의 MEMS를 70년대의 반도체와 비교하는 것으로 그 잠재적 성장 가능성을 간접적으로 대변하고 있다. 21C 들어 BT, NT, IT에 관심은 MEMS분야와 어우러져, Lab-on-a-chip, (-TAS



Fig. 1. 머릿카락 굽기의 초소형 모터.

(Total Analysis System)등과 같은 Bio-MEMS, 이동통신 및 광통신에 필요한 RF 및 optical-MEMS, NT 기술의 기반공정기술로의 NEMS (Nano Electro Mechanical System)등으로 특화되어 또 한 차례의 커다란 도약을 하고 있다.

본문에서는 지난 수년 간, 본 연구실에서 수행되어 왔던, HAR-MEMS 공정기술과 그를 이용한 microfluidics 및 Bio-MEMS 응용 연구에 대해서 간단히 기술하는 것으로, MEMS 공정기술을 이용한 다양한 응용 연구에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 본 론

2.1. HAR-MEMS

HAR는 High-Aspect-Ratio의 약어로 HAR-MEMS는 초소형 구조물의 폭에 비해 높이가 높은, 고풍비의, 초

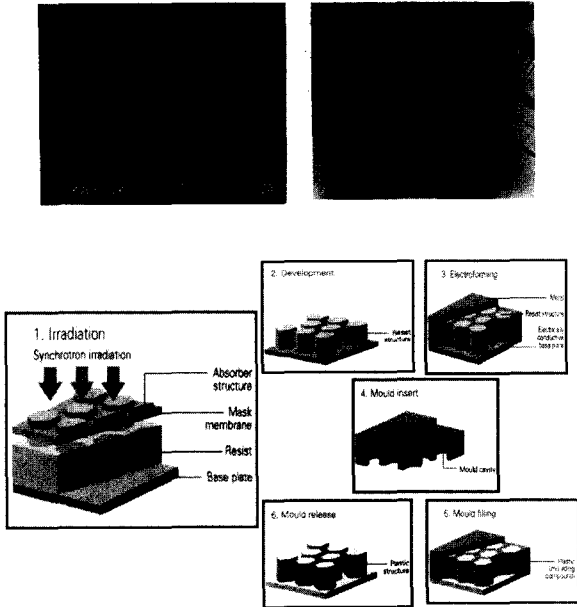


Fig. 2. HAR-MEMS 구조물.

소형 구조물을 통칭한다 (Fig. 2). 이러한 고품비의 초소형 구조물의 제작은, 기존의 반도체 노광공정 (photolithography)에서 이용되는 자외선 (UV) 광원 대신 방사광 가속기에서 나오는 높은 에너지의 X-선을 사용하는 Deep X-ray Lithography (DXL) 공정과 SU-8과 같은 새로운 UV 감광재를 이용한 공정이 있다.

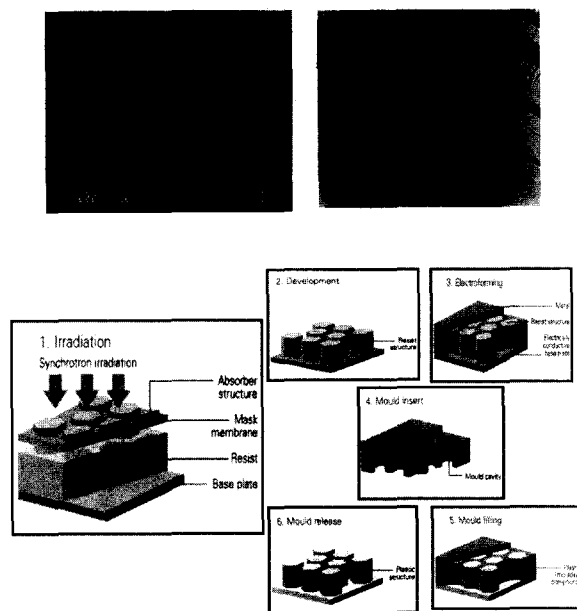


Fig. 3. DXL-현상-도금-금형-성형-생산으로 이어지는 LIAG 공정.

DXL 공정은 LIGA 공정으로 더욱 잘 알려져 있는데, LIGA는DXL 공정 후에 이루어지는 전기도금과 사출성형 공정을 합친 것으로 각 공정의 독일어 약어로 이루어진 것이다 (Fig. 3).

기존의 UV광원으로, 기존의 포토마스크와 감광재를 이용할 때, 초소형 구조물의 두께는 10 μm 정도가 그 한계이며, SU-8 감광재를 사용하는 경우, 그 높이는 100 μm 혹은 그 이상도 가능하게 된다. 그러나, DXL인 경우, 그 두께는 수백~수천 μm 두께로 급속히 증가하게 된다. 그러나, 이 경우 X-선의 특성으로 인해 포토마스크 대신 DXL마스크와 일반 감광재 대신PMMA와 같은 감광물질을 이용해야만 하는 단점도 안게 된다.

2.1.1. DXL Mask with Integrated Actuator (DXL-MIA)

본 연구는 DXL 마스크를 초소형 액츄에이터 위에 제작하고, DXL 공정 시 X-선 노광 중에 초소형 액츄에이터를 진동시키는 방법으로 PMMA 감광재에 쏘여지는 X-선 노광량을 조절하여, 초소형 구조물의 벽면의 형상

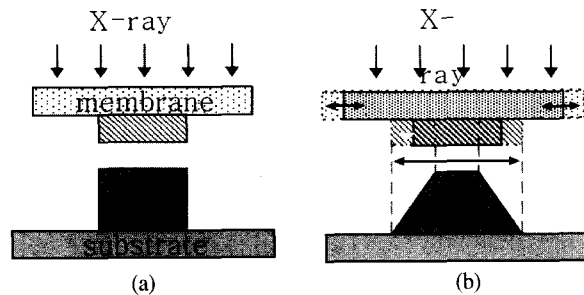


Fig. 4. (a) 기존의 DXL 공정과 (b) MIA를 이용한 DXL 공정.

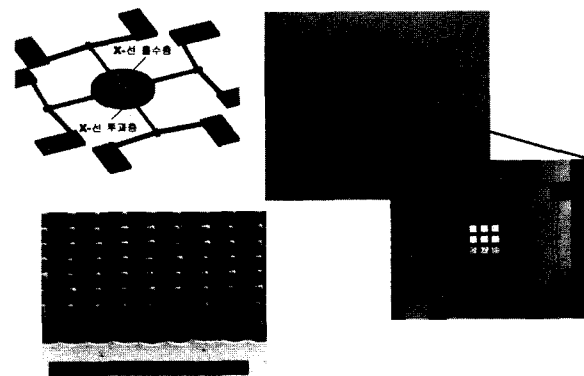


Fig. 5. 2축 MIA-DXL 마스크와 그를 이용해 제작된 초소형 구조물.



을 조절하는 공정기법이다.⁴⁻⁷⁾ Fig. 4는 기존의 DXL 공정과 MIA를 이용한 DXL 공정을 비교하고 있다. Fig. 5는 열전력 (electro-thermal)으로 진동하는 2축 액튜에이터 위에 Au로 DXL 마스크를 제작한 개념도와 실제로 제작된 초소형 액튜에이터, 그리고 그를 이용해 제작된 초소형 구조물의 사진을 보여주고 있다.

2.1.2. Modified DXL Process for Micro Lense

직경 수십 μm 정도의 마이크로 렌즈 및 렌즈 어레이는 최근들어 광통신, 디스플레이 등에 이용되는 핵심 부품으로, 다양한 방법의 공정기법들이 개발되어 왔다. 기계식 절삭으로 제작하거나, 레이저를 이용하는 방법, 부식으로 녹여내거나, 감광재의 흐름을 이용하는 방법등. 다양한 방법들이 연구되었으나, 렌즈 형상의 정확도 및 표면조도, 양산 공정등을 고려할 때, 각각의 공정에 장단점이 존재하였다.

본 연구에서는 DXL 공정 후에 현상을 하지않고, 열처리하는 방법으로 X-선에 노출된 부분의 PMMA에 잉여체적을 발생시키고 그를 이용해 새롭게 마이크로 렌즈

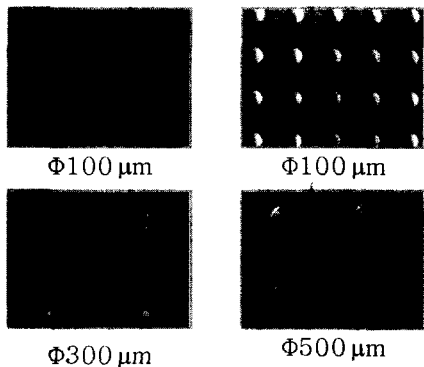
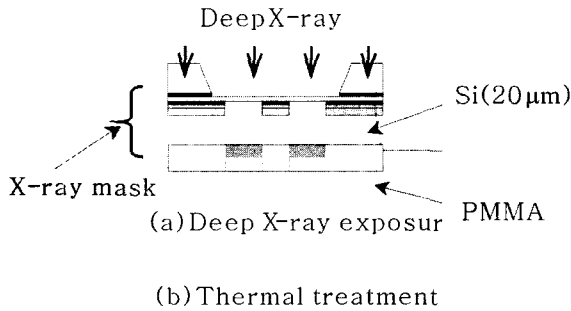


Fig. 6. 마이크로 렌즈를 위한 Modified DXL 공정과 생성된 마이크로 렌즈

및 렌즈 어레이를 제작하는 공정을 개발하였다.⁷⁻¹⁰⁾ X-선에 노출된 PMMA는 폴리머 연결고리가 끈어지게 되고, 이로 인해 분자량의 감소와 유리전이온도 (glass transition temperature) 의 저하, 그리고 그로인한 열처리 후의 잉여체적을 통한 마이크로 렌즈가 생성되게 된다. Fig. 6은 공정의 개략도와 이를 통해 제작된 마이크로 렌즈 및 렌즈 어레이의 전자현미경 사진을 보여주고 있다. 이렇게 생성된 렌즈 위에 전기도금을 하고 이를 바탕으로 핫 엔보싱 공정을 거쳐 마이크로 렌즈의 대량생산 가능성도 아울러 수행하였다.

2.1.3. Micro Needle Array

“안 아픈 주사기”는 오랜 기간 어린이들이 꿈꾸어 왔

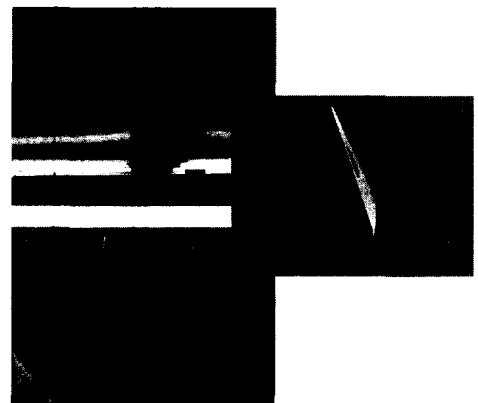
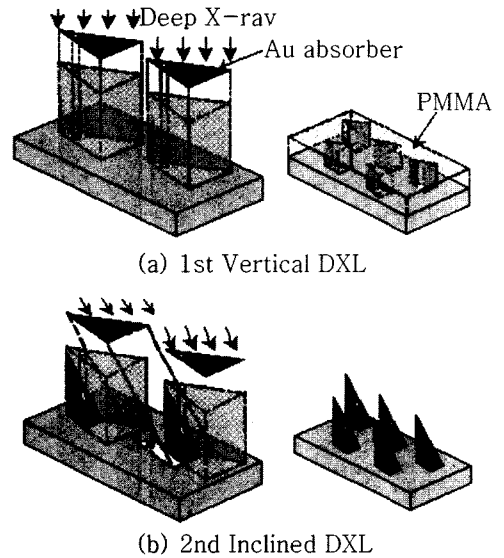


Fig. 7. 경사 DXL 공정과 그를 이용해 제작된 마이크로 니들 어레이.

던 소망이었다. 일반적으로 주사기는 약물주입과 채혈의 두 가지 목적으로 이용되는데, 피부에 존재하는 통점(통증을 느끼는 부분으로 직경 50 μm 이며 진피층에 산재되어 있음)과 주사기의 깊이에 따라 통증을 느끼게 된다. 따라서 아주 가는 주사기로 필요한 깊이까지만 주사기를 넣게되는 경우, 무통증 혹은 아주 미미한 통증만이 느끼게 된다. 본 연구는 DXL 공정을 이용해 외경 150~200 μm , 내경 50~100 μm , 깊이 약 1 mm 정도의 마이크로 니들을 제작하였다.^{11,12)} Fig. 7은 삼각형의 Au absorber를 이용해 한번의 수직 DXL와 한번의 경사 DXL 공정으로 이루어 지는 공정과 그를 통해 제작된 마이크로 니들의 전자현미경 사진을 보여주고 있다.

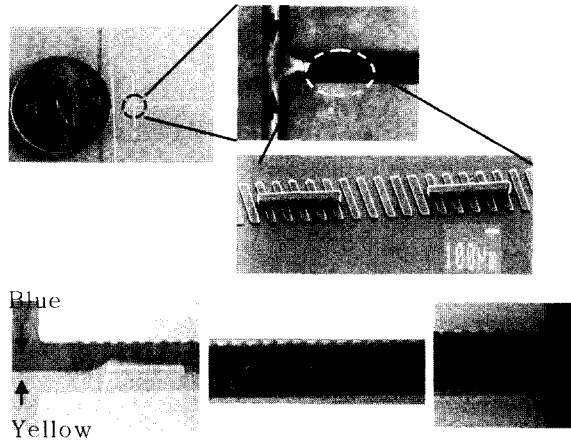


Fig. 8. Chaotic micro mixer와 그를 이용한 실험결과.

2.2. Bio-MEMS 및 미세 열유체 응용

Micro ThermoFluidics 분야는 MEMS와 열유체분야가 만난 학제간 연구분야로, 100 μm 혹은 그 이하의 유로(micro channel)에서의 유동현상의 이해/해석과 그를 이용한 새로운 초소형 소자의 개발등에 연구의 초점이 맞추어있다. 마이크로 펌프, 밸브, 믹서등의 단위 소자의 개발 및 그를 이용한 초소형 시스템의 개발이 중심이며, 열공압 및 압전원리를 이용해 수천 개의 초미세 액적을 분사하는 잉크젯 프린터 헤드는 대표적인 예로 알려져 있다. 특히, 최근 BT분야의 발전과 더불어 극소량의 다양한 생화학 액상 물질을 이동시키고, 서로 섞고, 분리하며, 열처리를 하는 과정을 필요하게 되는 데, micro ThermoFluidics 분야는 Bio-MEMS 분야의 핵심 기반기술로 인식되고 있다.

ic현상을 이용해 mixing을 수행하였다.¹³⁾ Fig. 7은 제작된 micro mixer와 그를 이용한 실험결과를 보여주고 있다.

2.2.2. Micro Riblet

상어 표피에는 수십~수백 μm 크기의 V-groove가 있는데, 이러한 형상은 상어가 물 속을 헤엄쳐 나아갈 때 유체 저항을 감소시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 소자를 riblet이라하며, 이를 이용해 비행기나 잠수함과 같은 유동체의 유동저항을 줄이고자 하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 MEMS 공정기술을 이용해 micro V-groove 기판을 제작하는 공정을 개발하였고, 풍동실험을 거쳐 3%의 항력감소 실험결과를 얻어내기도 하였다.^{14,15)} Fig. 9는 DXL 공정을 이용해 제작된 micro riblet mold과 micro riblet film을 보여주고 있다.

2.2.1. Barrier Embedded Chaotic Mixer

100 μm 정도의 미세 유로에서는 Reynold 계수가 낮아, 난류가 발생되지 않고 층류만이 존재하게 된다. 미세 유로에서 서로 다른 액상 물질을 섞는 경우에 층류의 경계면에서의 확산을 통해서만 혼합이 이루어지게 된다.

이로인해 미세 유로에서 난류를 만드는 micro mixer에 대한 연구가 중요한 테마로 인식되고 있다. Micro mixer의 연구에는 크게 구동부분의 여부에 따라 active와 passive 형이 있으며, 본 연구에서는 미세 유로 바닥면에 미세형상을 만들고, 이를 통해 발생하는 chaot-

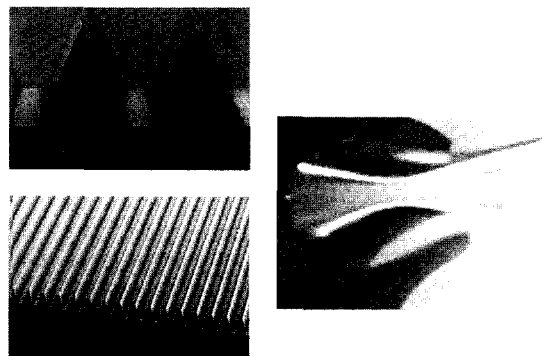


Fig. 9. DXL로 제작된 micro riblet film.

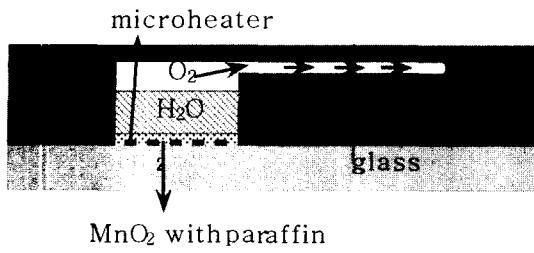
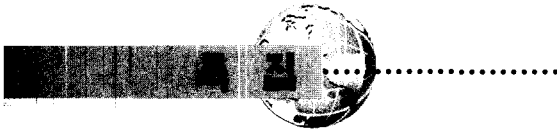


Fig. 10. Oxygen micro pump 개략도

2.2.3. Oxygen Pump & Genertor

마이크로 펌프는 유동의 근원을 제공하는 소자로 많은 연구가 수행되어온 micro fluidics의 핵심소자이다. 마이크로 펌프는 구동부가 있는 기계식과 구동부가 없는 비기계식으로 구분되며, 마이크로 펌프의 경우에는 일반적으로 비기계식이 공정과 작동면에서 유리한 조건을 가지고 있다.

본 연구에서는 화학반응을 이용한 새로운 형태의 마이크로 펌프를 수행하였다. 즉, H_2O_2 가 촉매 MnO_2 를 만나는 경우, O_2 를 발생시키는 되는 데, 이때의 O_2 압력을 마이크로 펌프의 동력원으로 이용하는 것이다. Fig. 10은 마이크로 펌프의 개략도를 보여주고 있는데, 기관 위에 미세 공정된 마이크로 히터가 작동하게 되면, 미세 챔버

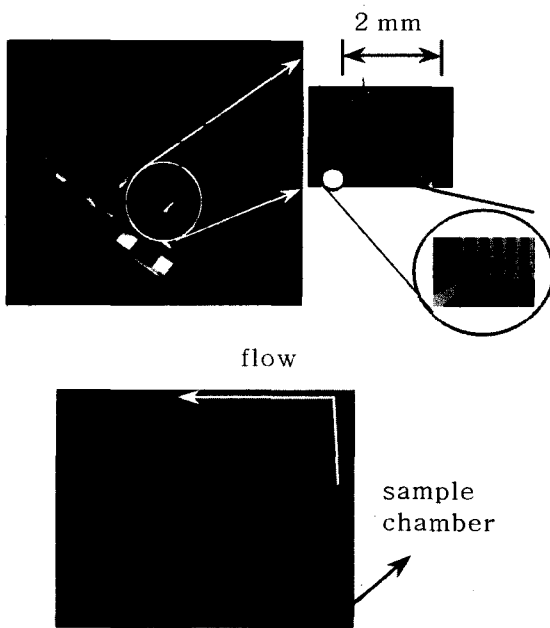


Fig. 11. 제작된 Oxygen micro pump 와 화학반응으로 생성된 oxygen에 의해 미세 유동이 발생하는 실험 결과.

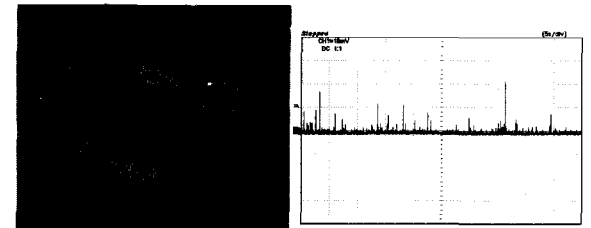
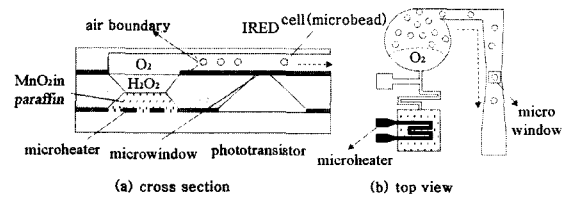


Fig. 12. 초소형 세포계수기와 계수 결과.

안의 파라핀이 녹아 안에 있는 MnO_2 가 H_2O_2 에 노출/반응하여 O_2 를 발생시키는 구조로 되어있다. Fig. 11은 PDMS로 제작된 마이크로 펌프와 미세 채널을 보여주고 있으며, 미세 유로 내에서 염색액이 화학반응으로 생긴 O_2 에 의해 밀려가는 모습을 보여주고 있다. 마이크로 펌프의 자동 압력과 시간은 H_2O_2 의 양과 농도에 의해 결정되어진다.^{16,17)}

2.2.4. Cell Counter

초소형 세포계수기 (cell counter)는 세포를 포함한 액체를 미세유로에서 이송 시키면서 세포가 생물학적으로 살아있는지를 판별하고 세포의 숫자를 계수 할 수 있는 기능을 수행한다. 본 연구에서는 미세 채널에서 유동하는 세포가 boron 도핑된 영역을 지나게 되는 경우, 빛을 투과시키는 양이 달라진다는 원리를 바탕으로 통과되는 세포의 개수를 전기적 신호로 전환하는 마이크로 소자를 연구개발하였다.

초소형 세포계수기는 저장기(Reservoir), 미세유로와 보론 도핑영역으로 구성되어있으며, 세포를 포함한 액체는 미세유로의 양끝에 위치한 저장기에 전기장을 걸어주는 경우, 전기영동 (Electrophoresis)의 일종인 전기삼투 (Electroosmosis)에 의해 전기장의 양 전극 방향으로 이송되고, 멤브레인 부분을 통과할 때, boron 도핑 전극의 저항치가 세포에 의한 광량의 변화로 인해 변화되게 된다. Fig. 12는 세포계수기의 개념도, 실제 제작된 소자, 및 세포계수 결과를 보여주고 있다.^{18,19)}



3. 결론

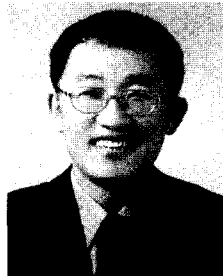
본 논문에서는 방사광가속기의 X-선을 이용한 DXL 공정과 SU-8을 이용한 LIGA-like 공정을 통한 HAR-MEMS 공정에 대해서 간략히 기술하였고, HAR-MEMS 공정의 예로 DXL-MIA, micro needle, 및 micro lense 등의 새로운 공정기법과 응용에 대해서 기술하였다.

또한 이러한 HAR-MEMS 공정을 이용한 micro ThermoFluidics와 Bio-MEMS분야에 대한 응용연구결과도 함께 기술하였는데, micro mixer, micro riblet, micro oxygen pump, micro cell counter 등이 대표적 예로 기술되었다.

참고문헌

1. L. Fan et al, "IC-Proceed Electrostatic Micro Motor", IEEE Int. Electronic Devices Meet., pp. 666-669 (1988).
2. W. Trimmer, et. al, "Small Machines, Large Opportunities: A Report on the Emerging Field of Microdynamics", NSF Workshop on MEMS, pp. 1-31 (1987).
3. K. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material," Proc. Of IEEE, **70** [5] 420-57 (1982).
4. K. C. Lee and S. S. Lee, "Deep X-ray mask with integrated electro-thermal micro xy-stage for 3D fabrication," Sensors and Actuators, A111, pp. 37-43, 2004.
5. K. C. Lee and S. S. Lee, "Deep X-ray Mask with Integrated Actuator for 3D Microfabrication," Sensors and Actuators, A108, 121-27 (2003).
6. 이광철, 이승섭, "3차원 LIGA 미세 구조물 제작을 위한 마이크로 액추에이터 내장형 X-선 마스크," 대한기계학회지, **26** [10] 2187-93 (2002).
7. S. S. Lee, K. C. Lee, S. J. Moon, "X-ray Mask with Micro Actuator," US Patent 6,501,824.
8. S. K. Lee, K. C. Lee, and S. S. Lee, "A Simple Method for Microlenses Fabrication by the Modified LIGA Process," J. Micromech. Microeng., **12** 334-40 (2002).
9. 이성근, 이광철, 이승섭, "변형된 LIGA 공정을 이용한 마이크로 렌즈 제작방법," 대한기계학회지, **26** [11] 2450-56 (2002).
10. S. S. Lee, S. K. Lee, K. C. Lee, "Method for Manufacturing a Microstructure by using a High Energy Light Source," US Patent 6,593,067.
11. S. J. Moon and S. S. Lee, "Fabrication of Microneedle Array Using Inclined LIGA and Hot Embossing

- Process," 5th HARMST' 03, Monterey, CA, USA, June 171-72 (2003).
12. S. J. Moon and S. S. Lee, "Fabrication of microneedle array using inclined LIGA process", 12th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (TR' 03), Boston, USA, June 1546-49 (2003).
13. D. S. Kim, S. W. Lee, T. H. Kwon, and S. S. Lee, "A Barrier Embedded Chaotic Micromixer," J. Micromech. Microeng., **14** 798-805 (2004).
14. 한만희, 허정기, 이승섭, 이상준, "MEMS 기술을 이용한 미소 리블렛 필립 제작 및 항력 감소에의 응용," 대한기계 학회지, **26** [7] 991-96 (2002).
15. M. H. Han, H. C. Lim, Y. G. Jang, S. S. Lee, and S. J. Lee, "Fabrication of a Micro Riblet Film and Drag Reduction Effects on Curved Objects, 12th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (TR' 03), Boston, USA, June 396-99 (2003).
16. Y. H. Choi, S. U. Son, and S. S. Lee, "A Micropump Operating with Chemically Produced Oxygen Gas," Sensors and Actuators, A111 8-13 (2004).
17. Y. H. Choi and S. S. Lee, "Novel micro Gas Generator of Carbon Dioxide for Actuation and Gas Source," 7th Int. Sym. on micro-TAS, Squaw Valley, CA, USA, 611-14, Oct. (2003).
18. S. U. Son, Y. H. Choi, and S. S. Lee, "Micro cell counter using photo-conductance of boron diffused resistor (BDR)," Sensors and Actuators, A111, 100-06 (2004).
19. S. U. Son and S. S. Lee, "Narrowing Microfluidics Width in Microchannel using Air Boundaries," 7th Int. Sym. on micro-TAS, Squaw Valley, CA, USA, 147-50, Oct. (2003).



이승섭

- 1984년 서울공대 기계설계학과 학사
- 1995년 UC, Berkeley 박사
- 1996년 삼성종합기술원 수석연구원
- 1997년
- 1997년 포항공과대학교 기계공학과
- 2003년 조교수, 부교수
- 2003년 KAIST 기계공학과 부교수
- 현재