

마이크로 가공기술의 현황과 미래의 마이크로 시스템

최 준 림

Progress in Micromachining and Future Micro System

Jun-Rim Choi



- 최준림 (금성중앙연구소)
- 1964년생.
- 반도체 가공기술과 마이크로센서의 집적화를 전공하였으며, 마이크로가공기술을 이용한 센서와 액츄에이터에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

과거 10년 동안 마이크로 전자 공학의 극소형화는 실리콘 기판상에서 평면구조를 제작하는 기술의 발전을 가져왔으며 정보처리 분야에 일대 혁명을 가져왔다. 그런데 지금은 이 기술의 발전으로 기계공학에서도 이에 상응하는 연구개발이 진행되고 있으니 이를 총칭하여 마이크로 가공기술(micromachining)이라 부른다. 기계, 광학, 전자 부품의 마이크로 집적화는 하나의 마이크로 시스템으로 구현되어 기술혁신의 새로운 영역을 개척할 것으로 예상되고 있다. 이 새로운 기술은 마이크로 단위의 3차원 초정밀 가공을 가능케 함으로써 미래 메카트로닉스(mechatronics)의 새로운 영역으로 자리잡게 될 것으로 전망한다. 이 글에서는 마이크로 가공기술의 현황과 미래의 마이크로 시스템에 대해서 기술하고자 한다.

2. 마이크로 가공기술의 역사

마이크로 가공기술은 실리콘 가공기술에서 시작되었으므로 최초의 연구는 실리콘 기판상에서 미세 기계요소 즉, 밸브, 모터, 펌프, 기어 등의 부품을 2차원 평면으로 제작한 것이 그 시초였다. 이의 발전은 마이크로 센서의 수요 확대에 힘입어 실리콘 기판 위에 마이크로 센서(압력 센서, 가속도 센서) 등과 신호처리용 집적회로, 그리고 센서에 의해서 제어가 가능한 마이크로 액츄에이터(microactuator)를 직접화하는 연구의 개발로 발전되었다. 마이크로 센서의 발전과 보조를 맞추어 실리콘 기판 위에서 제작된 펌프, 모터, 기어 등의 기계부품을 집적화하여 인텔리전트 마이크로 시스템(intelligent microsystem)을 구현하려는 시도가 있었다. 반면에 실리콘 기판상에서 2차원 구조의 제작에 대한 한계를 극복하기 위해서 제작된

구조의 두께를 수 마이크론에서 수십 또는 수백 마이크론으로 높이는 공정이 X-선 리소그래피 (X-ray lithography)를 이용한 LIGA(독일어로 lithographie galvanofornung abformung) 공정으로 개발되었다. 이 기술의 개발로 기존의 정밀 가공과 마이크론 단위의 미세부품을 대량 생산할 수 있는 포문이 열렸으나 LIGA 공정 자체가 2-3 GeV의 싱크로트론 X-선(synchrotron X-ray radiation)이 있어야 가능하므로 현재 독일과 미국의 몇몇 연구소에서 연구 개발이 진행되고 있다. 이 한계를 극복하기 위해 폴리머와 자외선 리소그래피를 이용하여 수십 마이크론 두께의 구조를 제작하고 또한 3차원 곡면 구조를 제작하려는 연구가 초기 개발 단계에 있다.

3. 마이크로 가공기술의 현황

위에서 기술한 마이크로 가공기술에 대한 역사의 모든 단면을 제시하기 보다는 기술의 발전 단계 중 현 시점에서 가장 발전되었다고 평가하는 몇 가지 실례에 대하여 설명하고자 한다. 먼저 실리콘 웨이퍼 상에 2차원 마이크로 가공공정을 이용하여 마이크로 센서, 마이크로 액추에이터를 집적화하여 마이크로 유체 제어시스템을 구현한 예를 2차원 실리콘 가공 기술의 완성으로 생각하기에 여가서 설명한다.⁽¹⁾

그림 1에 나타난 바와 같이 유체 자동제어 시스템은 종래의 기기로는 정밀한 조절이 힘들었던 미세한 양의 유체를 정확히 조절할 수 있는 시스템을 말한다. 유체의 주입부, 펌프, 밸브, 믹서, 유량 센서로 구성되어 있으며 이를 외부의 시스템으로 제어하였다. 이 마이크로 시스템의 핵심을 이루고 있는 마이크로 액추에이터로 사용된 펌프와 밸브의 구조가 그림 2에 나타나 있다. 이는 수 마이크론 두께의 실리콘 멤브레인(membrane)에 마이크로 히터를 장착하여 밀폐된

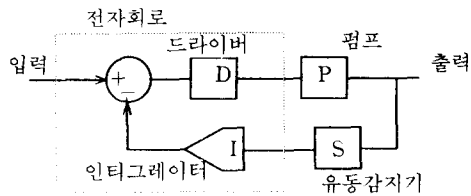
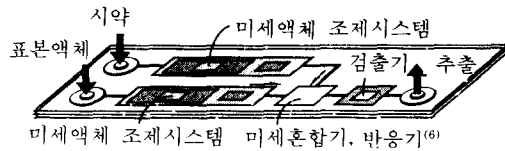


그림 1 마이크로 유체 제어시스템

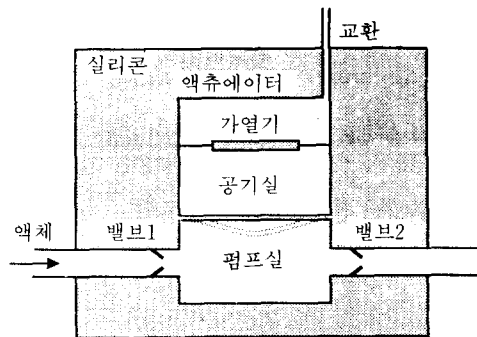


그림 2 열팽창 방식의 마이크로 펌프와 밸브

공기의 부피 변화를 이용한 열 팽창 방식 (thermo-pneumatic) 펌프와 실리콘 밸브를 사용하여 유체의 흐름을 조절하였다. 유체의 흐름을 측정하기 위해서 동일 기판상에 유량 센서를 제조하여 집적화시켰다. 제작공정을 살펴보면 그림 3에 나타난 바와 같이 실리콘 기판에 기판 본딩을 위한 홈을 내고 마이크로 히터와 유량센서를 받치기 위한 SiN를 증착한 후 실리콘을 식각하여 펌프를 위한 홈과 상단부 밸브, 그리고 유체의 통로를 만든다. 실리콘의 반대면에 같은 방법으로 하단부의 밸브, 유체 통로를 제작한 다음 마이크로 히터를 제작하고 파이프 웨이퍼를 사

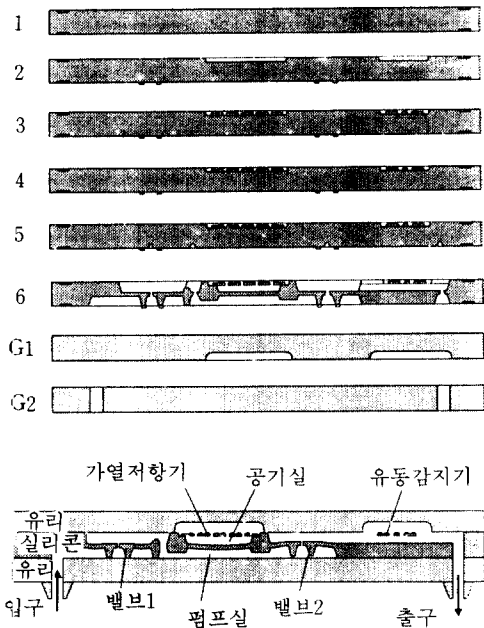


그림 3 마이크로 유체 제어 시스템의 공정도

용하여 양변을 본딩한다. 이때 본딩할 패키지는 유체의 통로를 그 위에 제작한 것이며 그 통로와 실리콘 기판의 위치를 맞추어 본딩한다. 이렇게 하여 된 마이크로 유체 제어시스템은 $0\sim 50\mu\text{/min}$ 의 미세한 유체의 흐름을 조절할 수 있었다.

마이크로 가공기술의 역사에서 기술한 바와 같이 그 뿌리가 실리콘 가공기술이었으므로 2차원 구조의 한계를 벗어나지 못하였기 때문에 실제로 사용되기에는 여러 제약이 있었다. 그 이유는 첫째로 수 마이크론 두께를 갖는 구조 자체가 취약하였고, 둘째로 실제 응용을 위한 액츄에이터는 3차원 구조를 요구하고 있으며 셋째로 제작된 부품을 조립할 기술이 없다는 것이었다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법이 X-선 리소그래피를 이용한 LIGA 공정이다. LIGA공정은 수평 $1\mu\text{m}$, 수직 $100\sim 1000\mu\text{m}$ 의 해상도를 갖는 마이크로 부품을 대량 생산할 수 있는 장점이 있다. 공정과정은 그림 4에 잘 나타나 있다.⁽²⁾

먼저 평행이며 큰 에너지를 갖는 X-선을 마스크를 통해 수백 마이크론 두께의 감광막에 노출시켜 현상한다. 현상될 감광막은 후에 희생층으로 사용하며 X-선이 투과하여 현상된 공간에 전기 도금으로 금속을 채운다. 감광막을 제거함으로써 채워진 금속은 그 자체로 최종 제품으로 사용되거나 또는 주조를 위한 주입으로 사용하여 동일 구조를 재생산하게 된다. 이렇게 하여 제작된 주조를 사용하여 그 안에 플라스틱을 주입하고 주조를 빼어냄으로써 이 새로운 구조는 플라스틱 완제품 또는 새로운 플라스틱 주조로 사용하게 된다. 빼어낸 금속 주조는 동일 생산을 반복하기 위해서 사용되므로 대량 생산이 가능하다. 새로 만들어진 플라스틱 주조는 금속 또는 세라믹을 주입시켜 동일 구조를 만들게 되고 재생 공정을 반복하게 된다. LIGA 공정을 이용하여 제작한 마이크로 기어가 바늘 구멍 안에 있는 사진이 그림 5에 나타나 있다.

다음으로 LIGA 공정을 이용하여 제작한 마이크로 모터에 대해 기술하고자 한다. 위에서 기술한 LIGA 공정을 실리콘 기판에서 축을 만들고 독립적으로 제작한 로터와 스테이터를 실리콘 기판 위에 조립하고 와이어 본딩(wire bonding)을 이용하여 마그네틱 마이크로 모터를 제작하였다.⁽³⁾ 그림 6의 공정도를 살펴보면 먼저 모터의 회전수를 측정하기 위하여 실리콘 기판 상에 p-n 포토다이오드(photodiode)를 제작하고 LIGA공정을 이용하여 Ni을 만든 후 따로 제작한 스테이터와(stator) 로터(rator)를 조립한 후 전자장을 유도시키기 위해 와이어 본딩으로 Ni 자성체를 돌려 감아 전류로 모터를 유도시켰다. 그림 7에 완성된 마이크로 모터의 사진이 나와있으며 로터의 크기는 높이 $300\mu\text{m}$, 직경 $285\mu\text{m}$, $423\mu\text{m}$ 이다. 모터의 구조는 6개의 스테이터 축과 4개의 로터 축으로 구성되어 있다. 최고 회전 속도 $30,000\text{rpm}$ 이고 5×10^7 번의 회전을 견딜 수 있는 측정 결과

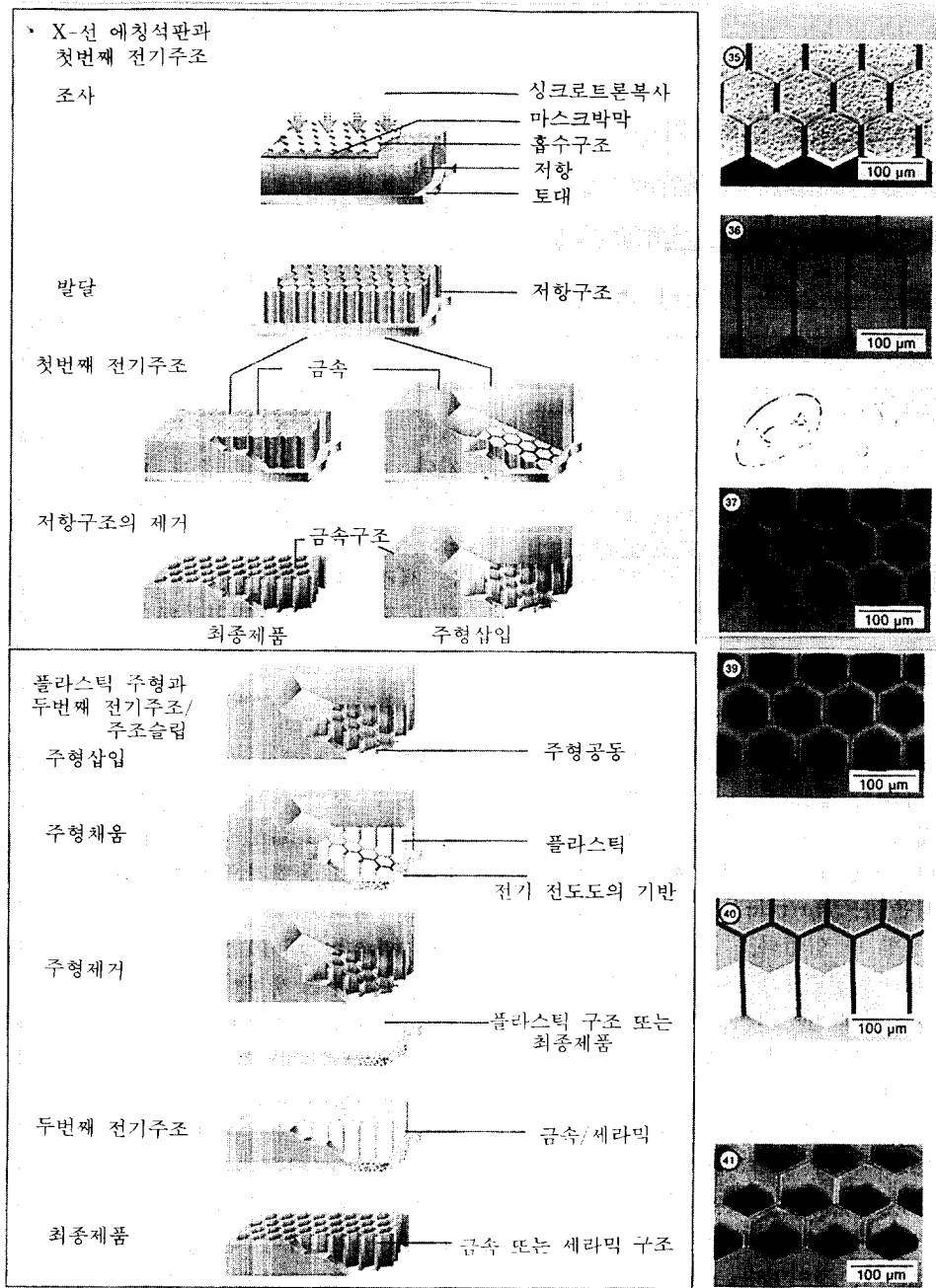


그림 4 LIGA 공정도

가 보도되었다.

지금까지 기술한 바와 같이 실리콘 가공 기술에서 시작한 마이크로 가공기술은 실리

콘 기관상에 모터, 기어, 펌프, 밸브 등의 기계적 요소를 제작하였으며 이의 응용을 위한 마이크로 시스템을 구현하였다. 2차원 실

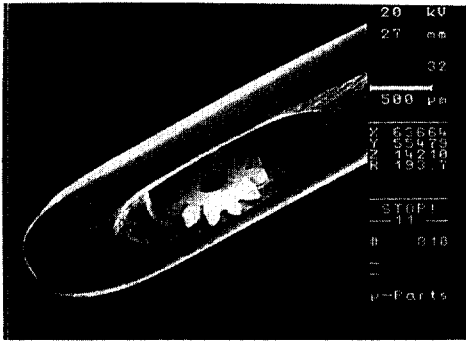


그림 5 바늘 구멍 안에 있는 LIGA 공정으로 제작된 마이크로 기어

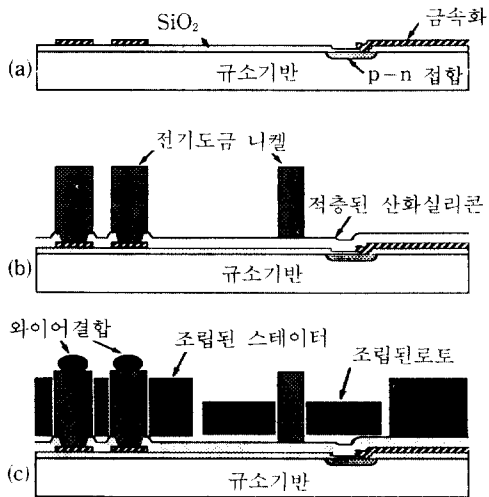


그림 6 LIGA 공정으로 제작된 마이크로 마그네틱 모터의 공정도

리콘 가공기술의 한계를 극복하기 위하여 구조의 높이를 구현하였다. 2차원 실리콘 가공기술의 한계를 극복하기 위하여 구조의 높이를 조절할 수 있는 LIGA 기술이 개발되어 응용되고 있으며 3차원 곡면 가공을 위한 다양한 시도들이 행해지고 있다. 기술의 발전 단계상 그 초기 단계에 있으므로 기본 부품의 제작 또는 새로운 공정 방법의 개발 등이 수행되었고 향후 몇 년 동안 지금까지 개발된 부품을 이용한 시스템의 응용과 3차원 가



그림 7 LIGA 공정으로 조립된 마이크로 마그네틱 모터

공 기술 개발을 위해 새로운 시도가 있으리라 예상된다.

4. 마이크로 로봇에 대한 전망

마이크로 부품의 개발에 따른 미래의 비전으로 많은 사람들이 마이크로 로봇의 등장을 예견하고 있다. 예를 들면 현재의 로봇 제작을 위한 부품들을 수 마이크로 단위의 크기로 만들 수 있다면 현재 로봇의 크기를 수 밀리미터 또는 수백 마이크로 크기로 만들 수 있으리라는 기대이다. 물론 현재의 부품 제작 기술, 조립 기술로는 어려운 이야기지만 가공기술과 마이크로 조립 기술의 개발에 따라 실현 가능한 이야기이다. 그러면 마이크로 로봇은 어디에 사용될 수 있을 것인가? 이에 대한 많은 사람들의 의견이 있지만 필자의 생각으로는 각종 정밀산업과 정교한 수술이 필요한 의료기에 사용될 것이고 점차로 소형화되는 정보처리 분야의 액츄에

이터로 이용되리라 생각한다. 또 한가지 가능한 예는 정보전 분야인데 이는 통신기능이 부가된 마이크로 로봇이 사람의 모든 행동을 감시함으로써 정보의 철저한 수집을 할 수 있으리라는 것이다.

5. 맺음말

이상에서 본 바와 같이 마이크로 가공기술의 발달로 전자공학에서 트랜지스터를 극소화시켰듯이 기계공학에서 부품을 극소화시켜 마이크로 메카트로닉 시스템의 실현을 눈앞에 두고 있다. 이의 실현으로 말미암아 멀지 않은 장래에 마이크로 로봇의 등장으로 미래 정보통신 사회에 또 하나의 주역으로 등장할 날도 멀지 않으리라 본다. 현재의 기술로 이의 실현은 먼 별나라 얘기 같이 들릴지 모르나 2차원 평면 가공기술은 현재 완성 단계에 있으므로 3차원 가공기술, 조립기술, 시스템 기술이 뒷받침될 때 마이크로 로봇이 현실로 다가오는 것은 시간 문제일 것이다. 또 하나의 가능성은 일본의 등장이다. 현재 산업용 로봇 분야에서 두각을 나타내고 있는 일본이 1992년부터 마이크로 로봇을 국책과제로 선정하여 추진하고 있으며 그 결과로 이 분야에서 벌써부터 두각을 나타내고 있다. 그들의 시스템 적용기술과 현재 개발 중인 3차원

조립 기술이 합쳐질 때 마이크로 로봇은 90년대 후반에 등장하리라 예상된다. 우리의 상황도 현재 반도체 공정 기술은 세계적인 수준에 올라있기 때문에 반도체 유휴 장비의 활용과 기계, 전기전자, 물리 분야의 협력을 통해 태동한 지 몇 년 되지 않은 이 분야에서 큰 시설 투자 없이 기존의 고급 인력으로 프로젝트를 추진하면 수 년 내에 세계적인 수준으로 도약할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Theo, S. J. Lammerink, Miko Elwenspoek, and Jan H. J., Fluitman, 1993, "Integrated Micro Liquid Dosing System," Micro Electro Mechanical Systems '93, pp. 254~259.
- (2) "Three Dimensional Microstructures Made from Metals, Plastics and Ceramics," 1992, The LIGA Technique, Microparts.
- (3) Guckel, H., Christenson, T. R., Skrobis, K. J., Jung, T. S., Klein, K., Hartojo, K. V. and Widjaja, I., 1993, "A First Functional Current Excited Planar Rotational Micromotor," Micro Electro Mechanical Systems '93, pp. 7~11. 