

전해 방전법을 이용한 유리 미세 구멍가공

이왕훈 · 이영태*[†]

Micro-hole Fabrication of Glass Using Electro-chemical Discharge Method

Wang-hoon Lee and Young Tae Lee*[†]

Abstract

In this paper, we fabricated an apparatus of the electro-chemical discharge drilling for boring narrow through-hole into a glass. In the electrolyte, electro-chemical discharge creates high temperature condition by the electro-discharge energy. Therefore, glass are removed by the accelerated chemical reaction with glasses and chemicals in the high temperature condition. For optimization of the electro-chemical discharge drilling, the process condition was studied experimentally as a function of the electrolyte concentration, supply voltage and process time. The optimum condition was from DC25V to DC30V of applied voltage, 35 wt% NaOH solution.

Key Words : electro-chemical discharge, glass, MEMS

1. 서 론

최근에 반도체 공정 기술을 중심으로 한 MEMS 기술이 비약적인 발전을 하고 있지만, MEMS의 구조가 복잡해지면서 보다 다양한 정밀가공 기술의 개발이 요구되고 있다. MEMS 기술을 이용하여 제작하는 센서, 액츄에터 및 유체소자 등의 소자에는, 미세 가공한 실리콘 또는 플라스틱 기판과 접합해서 보다 복잡한 구조물을 실현하기 위해 유리 기판이 사용되고 있다^[1,2]. 유리를 이용하여 접합 밀봉한 내부로부터 전기배선을 외부로 도출시키기 위한 전극도출(feedthrough)부를 형성하기 하기 위해서는 유리 기판에 좁고, 긴 구멍의 가공이 필요하다^[3,4]. 유리에 구멍을 형성하기 위한 가공 방법으로는 초음파 가공법^[5], CO₂ 레이저를 이용하는 방법^[6,7] 등이 있다. 초음파 가공은 면이 거칠어지기 쉽고, 가공된 구멍의 직경이 크고, 구멍의 끝 부분이 깨어지는 등의 결점이 있다. 또한 CO₂ 레이저 가공은 열변형이 발생하기 쉽다. 이상과 같은 유리 구멍 가공법

의 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 전해 방전 가공법을 이용하여 유리의 미세 구멍을 가공한다.

전해 방전 가공법을 이용한 유리의 미세 구멍 가공에 관한 연구는 일본의 동북대학 연구팀에 의해서 보고된바 있다^[8]. 본 논문에서는 수산화나트륨(NaOH) 수용액에 보조전극(Pt)과 가공전극(stainless steel needle)을 사용하고, 두 전극 사이에 직류전압을 인가하여, 가공전극에서 발생하는 방전에 의한 고열로 유리에 미세 구멍을 가공할 수 있는 전해 방전가공기를 제작하고, 그 특성을 분석한다.

2. 전해 방전 가공

1928년에 발명이 된 방전가공은 1943년 구소련의 라자렌코 부부에 의해 경질금속에 구멍을 뚫는데 성공한 것이 오늘날의 방전가공의 기원이 되었으며 공구의 회전이 불필요하여 임의의 복잡한 모양의 가공(구멍뚫기, 다이가공)이 가능하며 동일한 목적의 초음파 가공에 비해 가공 속도가 빠른 장점을 가지고 있다.

전해 방전 가공은 기계공작의 정밀 가공에 쓰여지는 방법으로 가공액 속의 보조전극과 가공전극 사이에 방전을 일으킴으로서 이때 발생하는 방전열을 이용하여 피가공물을 가공하는 방법이다.

안동대학교 대학원 전자공학과(Dept. of Electronics Eng, Andong National Univ.)

*안동대학교 정보전자공학교육과(Dept. of IT & Electronics Education Andong National Univ.)

[†]Corresponding author: ytleee@andong.ac.kr

(Received : August 12, 2003, Accepted : December 29, 2003)

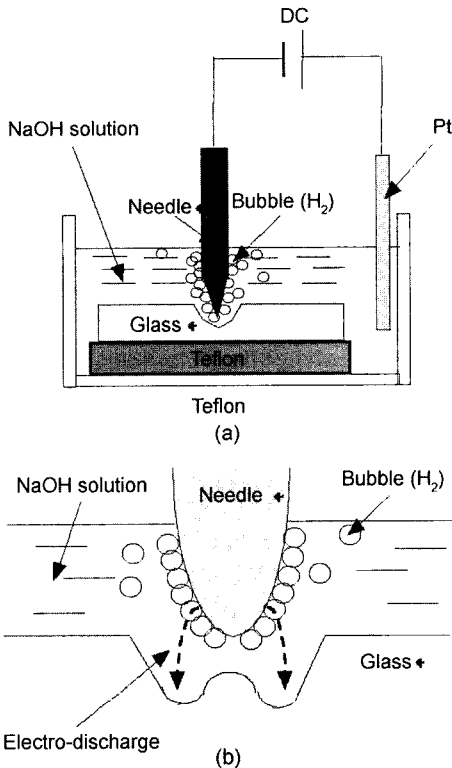


그림 1. 전해 방전 가공 원리
Fig. 1. Principle of the electro-chemical discharge drilling.

2.1. 전해 방전 가공 원리

전해 방전 가공의 원리를 그림 1에 나타냈다^[4]. 수산화나트륨 수용액 중의 가공전극과 보조전극 사이에 직류전압을 인가하면, 음극인 가공전극에는 환원 반응에 의하여 수소가스가 발생한다. 수소가스에 의한 기포가 그림 1(b)와 같이 가공전극(needle)을 둘러싸서 절연층을 형성한다. 인가 전압이 충분히 클 경우(본 논문에서는 25 V 이상)에 절연층을 통하여 방전 되면서 스파크가 발생하고, 그 열에 의해 화학반응이 가속 되면서 유리가 에칭 된다.

2.2. 전해 방전 가공장치 제작

본 연구에서는 그림 1(a)에 나타낸 전해 방전 원리를 이용하여 전해 방전 가공기를 제작 했다. 제작된 전해 방전 가공기의 사진을 그림 2에 나타냈다.

방전을 가급적 가공전극 끝에 집중시키기위해서 전극 끝부분을 제외한 나머지 부분은 테프론(teflon)으로 보호하여 절연시키고, 스테인리스스틸(stainless steel)로 제작된 지지대에 고정시켰다. 전극의 산화에 의한 저항 변화를 최소화하기 위해 보조전극(reference elec-

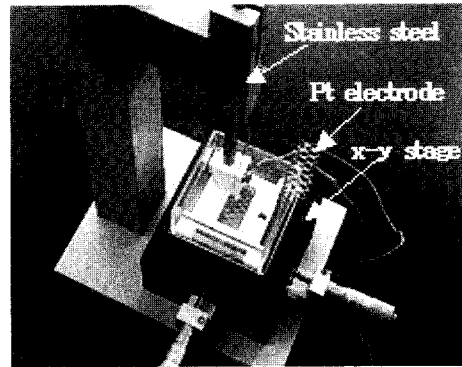


그림 2. 전해 방전 가공장치 사진
Fig. 2. Photograph of the electro-chemical discharge machine.

trode)으로 백금을 사용했다. 전원은 전원공급기(power supply)를 직접 사용하여 DC 전압을 인가해 주고, x-y 스테이지(x-y stage)를 이용하여 유리에 미세 구멍 가공을 위한 위치조정(alignment)을 했다.

2.3. 실험 방법

본 연구에서는 전해 방전 가공법에 의한 유리 구멍 가공 실험에 두께가 0.16 mm인 일반 유리를 사용했다. 그림 1(a)와 같이 유리기판을 수산화나트륨(NaOH) 수용액에 담그고, 가공전극을 가공 위치에 배치한다. 보조전극에는 (+) 가공전극에는 (-)의 DC전압을 인가하고 유리의 미세 구멍 생성 상태를 관찰했다. 수산화나트륨 수용액의 농도를 변화시키면서, 인가전압 및 가공 시간에 따른 유리 미세 구멍의 생성과 백금 전극과 바늘간의 전압의 변화를 디지털 오실로스코프를 이용하여 파형의 변화를 관찰했다.

3. 결과 및 고찰

수산화나트륨 수용액의 농도를 5 wt%에서 50 wt% 까지, 인가전압은 DC 10 V에서 40 V까지, 가공시간은 5초에서 50초까지 각각 변화시키면서 유리의 구멍 가공 상태를 분석했다.

그림 3에 가공전극과 보조전극 사이에 인가한 전압과 전류의 관계를 나타냈다.

그림 3에서, 인가전압을 높이면, 수산화나트륨 수용액의 전해작용에 의해 전류가 증가하고, 양극에는 산소, 음극에는 다량의 수소가스 기포가 발생한다(㉠구간). 구간 ㉡는, 전해작용에 의해 발생한 기포가 가공전극을 에워싸면서 전류가 급격하게 저하되는 현상을 나타내며, 계속 인가전압을 높이면, 가공전극을 에워싸고 있

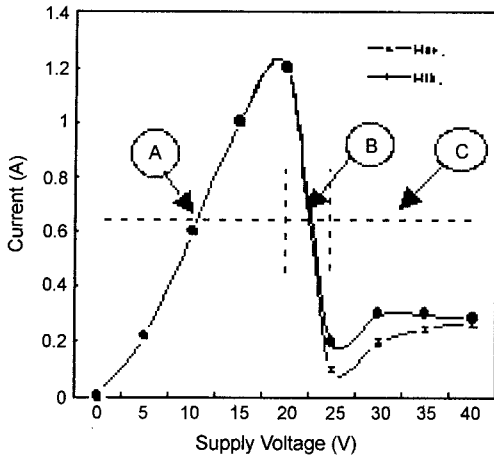


그림 3. 전압-전류 관계 곡선
Fig. 3. Characteristics curve of voltage v.s. current.

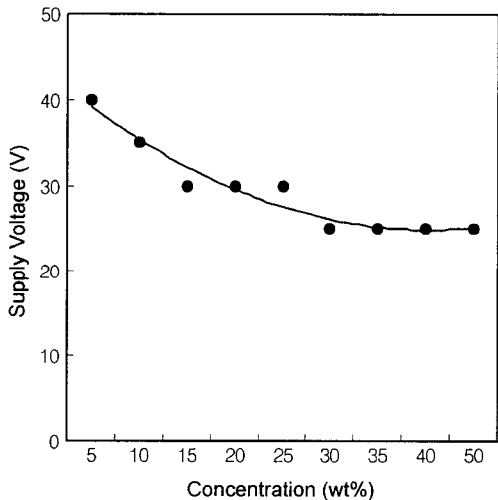


그림 4. 농도에 대한 미세 구멍 생성 전압
Fig. 4. Hole creating voltage as a function of NaOH concentration.

는 기포를 통하여 방전하게 된다(구간 ©). 방전이 시작되면, 그림 3의 구간 ©에 나타난 것과 같이 전류가 발진하는 현상이 나타난다. 전류가 발진하는 이유는 가공전극에, 전해작용에 의한 기포의 발생과 방전이 반복되면서 나타나는 현상으로 예측할 수 있다.

그림 4는 수산화나트륨 수용액의 농도 변화에 따라, 구멍이 최초로 생성되는 시점의 공급전압을 나타낸 것으로 수산화나트륨 수용액의 농도가 높아질수록 미세 구멍의 생성이 시작되는 전압이 낮아지나, 30 wt% 이상에서는 더 이상 전압이 낮아지지 않고 포화상태를 나타냈다. 특정 농도에서, 인가전압 또는 가공시간을

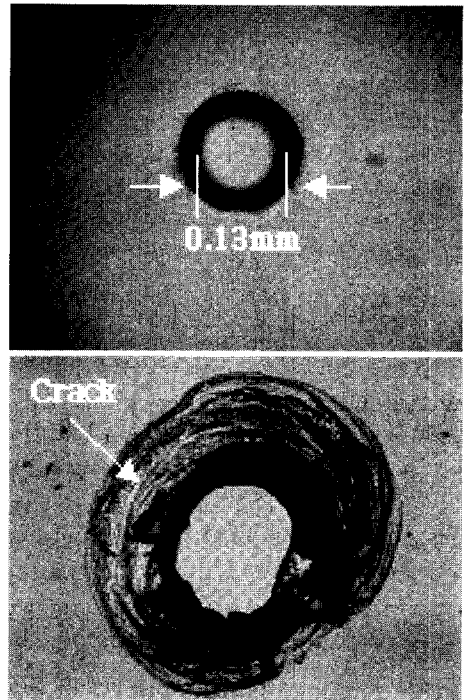


그림 5. 유리의 미세 구멍 사진.
Fig. 5. Photograph of microscopic glass hole.

증가시킬수록 생성되는 구멍이 커지며, 일정 전압 또는 시간이 경과되면 구멍의 가공면이 거칠어지고, 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 5에 정상적으로 가공된 지름 0.16 mm ϕ 의 구멍과 과도한 인가전압에 의해 균열이 발생한 구멍의 사진을 나타냈다. 균열을 방지하기 위해서는 가급적 낮은 직류전압을 인가하고, 시간을 조절하여 가공하는 것이 중요하다. 따라서 인가전압을 유리 구멍가공을 위한 파라미터로 사용하기 힘들기 때문에, 최적 전압에 고정하고, 가공시간을 조절하여 구멍의 크기를 조절하는 것이 효과적이었다. 본 연구에서는 인가전압 및 가공시간을 조절하여 지름이 0.1 mm에서 0.55 mm까지의 구멍을 가공할 수 있었다. 그림 6에 수산화나트륨 수용액의 농도가 30 wt%, 인가전압이 DC30V일 때, 가공시간에 대한 생성되는 구멍의 크기를 나타냈다.

미세 구멍 가공 시에 0.22[A]에서 1.2[A]까지의 전류 변화를 나타낸다. 그 이유는 그림 1에 나타난 것과 같이, 전극에 전압을 인가하면, 음극인 가공전극에서 발생하는 기포가 전극을 점차 둘러싸 전류가 흐르기 힘들어지다가, 순간적으로 방전하면서 전류 값이 갑자기 증가하는 동작을 반복하기 때문이다. 그림 7에 유리의 전해 방전가공에 소요되는 전력량을 수산화나트륨

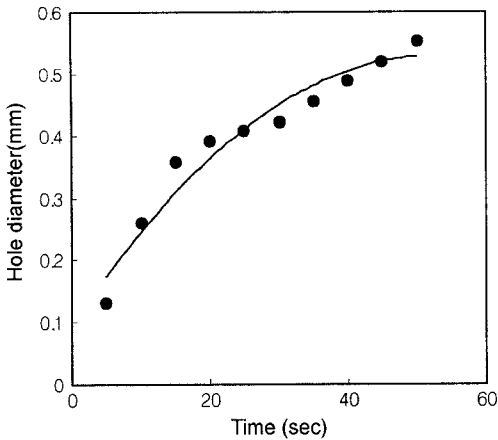


그림 6. 가공시간에 대한 구멍 크기
Fig. 6. Hole diameter as a function of fabrication time.

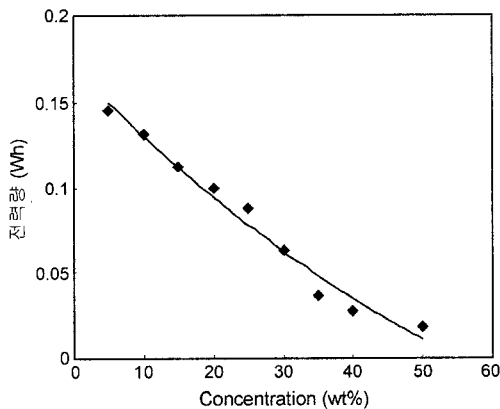


그림 7. 농도에 대한 전력량
Fig. 7. Electric power as a function of NaOH concentration.

수용액의 농도의 함수로 나타냈다. 그림 7의 결과는, 최대 전류인 1.2[A]를 사용하여 구해진 유리 구멍 가공시의 농도별 소모 전력량을 나타내고 있다. 그림 7과 같이, 전력량은 수용액의 농도가 높아질수록 비교적 직선적으로 감소함을 알 수 있다.

이상의 결과에서, 수산화나트륨 수용액의 농도, 인가 전압 및 전력량 등을 고려할 때, 미세 구멍 제작시에, 인가전압은 25 V에서 30 V 사이에서, 수산화나트륨 수용액의 농도는 35 wt%를 넘지 않는 한도 내에서 제작할 때 보다 효율적인 가공이 가능할 것으로 생각되며, 유리 구멍의 사이즈는 가공전극의 굵기와 가공시간을 조절하여 제어할 수 있다.

그림 3에 나타낸 것과 같이, 전해 방전에 의한 유리의 미세 구멍 가공시, 보조전극과 가공전극 양단의 전

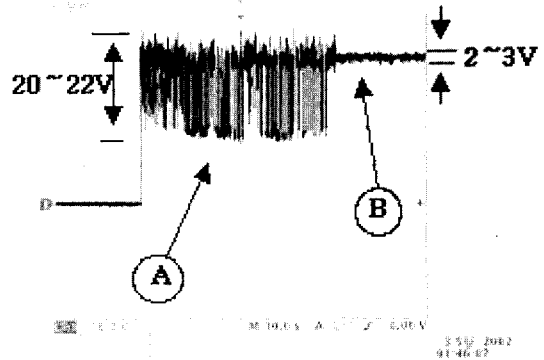


그림 8. 전해 방전에 의한 전압의 변화
Fig. 8. The change of voltage as electro-chemical discharge.

압 파형이 발진하는 것을 알 수 있다. 이 고주파 형태의 전압 파형은, 구멍이 생성되기 전과 후에 변화가 발생하는 것을 관측할 수 있었다. 그림 8은 두께 1 mm의 유리 기판을 35 wt%의 수산화나트륨 수용액과 DC 40 V의 전압을 인가하여 구멍을 가공하는 동안에 가공전극과 보조전극 양단의 전압 파형을 오실로스코프를 이용하여 관찰한 결과이다.

그림 8의 결과로 유리 미세 구멍 가공 중에는 백금 전극과 비늘 양단의 전압 변화 폭이 대략 20~22 V 정도였고(A구간), 가공이 완료되면 2~3 V의 변화 폭을 나타냈다(B구간). A구간에서는 가공전극이 유리기판과 접촉하고 있는 상태이며, B구간에서는 가공전극이 유리기판을 관통한 상태이다. 이 특성을 이용하면, 유리기판의 구멍가공 완료시점을 판단할 수 있기 때문에 전원자동정지(power auto-stop)기능을 가진 전해 방전 가공장치를 제작할 수 있다.

현재 응용되고 있는 유리의 구멍 가공을 위한 기술에는, 초음파, sandblast, 레이저 및 RIE(Reactive Ion Etching) 공정 등이 있다. 이들 공정은 구멍의 단면 모양이 거의 수직에 가깝게 제작되며, 공정 단가가 높다는 특징이 있다. 하지만 전해 방전을 이용하여 제작된 유리 미세 구멍의 단면 모양은 일정한 경사를 가진 형태로 제작되는 것이 특징이다. 그림 9에 제작된 유리 구멍의 단면 사진을 나타냈다. 전극도출(feedthrough) 공정은 일반적으로 유리 구멍 표면에 금속을 증착하고, 도전성 에폭시 등을 이용하여 금속 와이어를 연결하는 방법으로 이루어진다. 따라서 유리 구멍 표면에 금속 등을 효과적으로 증착하기 위해서는 적당한 경사가 필요하기 때문에 전해 방전 가공법은 전극도출과 같은 공정에서 매우 적절할 것으로 생각된다.

또한, 전해 방전 가공법은 레이저, sandblast, RIE 공

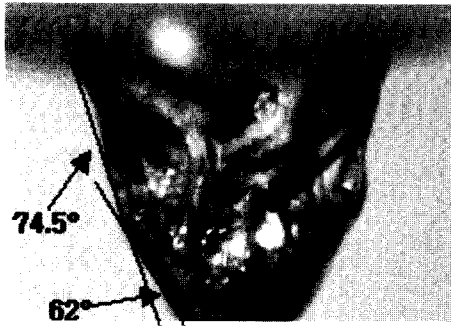


그림 9. 미세 구멍의 단면
Fig. 9. A sectional photograph of microscopic glass hole.

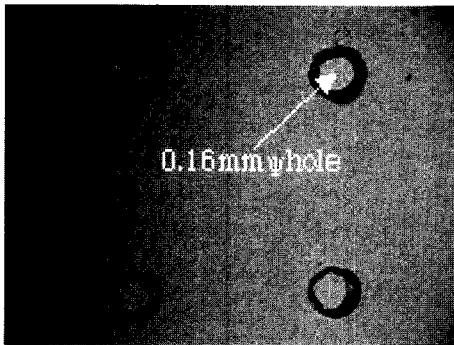


그림 10. 미세 구멍 사진
Fig. 10. Photograph of microscopic holes.

정 등 타 공정에 비해서 공정 및 공정 장비가 간단하며, 공정 단가가 낮다는 장점을 가지고 있다.

전해 방전법에 의한 유리 미세 구멍 가공 기술은, 전극도출(feedthrough) 뿐 아니라 유리판에 다수의 구멍 배열 제작 및 유체소자의 미소 채널 가공 등 다양한 MEMS 구조물 제작에의 응용이 기대된다. 또한, 다수의 구멍을 동시에 가공할 수 있는 방전가공 장치의 개발이 이루어진다면, 다수의 구멍이 가공된 유리 기판을 간단한 공정으로 제작이 가능하기 때문에 생체공학 등 다양한 분야로 응용 범위가 확대될 수 있을 것으로 기대된다. 그림 10에 유리 기판에 다수의 구멍을 가공한 예를 나타냈다.

4. 결 론

본 논문에서는 전해 방전가공법을 이용하여 유리의 미세 구멍 가공을 하기 위한 장치를 제작하고, 그 가공 조건에 대해서 검토했다. 수산화나트륨 수용액의 농도,

인가전압 및 전력량 등을 고려할 때, 미세 구멍 제작시에, 인가전압은 25 V에서 30 V 사이에서, 수산화나트륨 수용액의 농도는 35 wt%를 넘지 않는 한도 내에서 제작할 때 보다 효율적인 가공이 가능할 것으로 생각되며, 유리 구멍의 사이즈는 가공전극의 굵기와 가공시간을 조절하여 제어할 수 있었다.

전해 방전 가공을 이용한 유리의 미세 구멍 가공법은 유리 기판을 통한 전극도출(feedthrough) 뿐만 아니라 유체소자 등 MEMS 구조물 제작에의 응용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-30400-003-1) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 이영태, 서희돈, "Stereolithography 기술을 이용한 마이크로 펌프 제작," *센서학회지*, 제10권, 제4호, pp. 232-238, 2001.
- [2] 이영태, "Micro-stereolithography 기술을 이용한 용액분석 소자 제작," *한국전기전자재료학회지*, 제14권, 제12호, pp. 994-1000, 2001.
- [3] Y. Wang and M. Esashi, "A novel electrostatic servo capacitive vacuum sensor," *Transducers '97*, Chicago, pp. 1457-1460, 1997.
- [4] S. Shoji and M. Esashi, "Photoetching and electrochemical discharge drilling of pyrex glass," *Technical Digest of the 9th Sensor Symposium*, pp. 27-30, 1990.
- [5] K. Ishikawa, H. Suwabe, T. Nishide, and M. Uneda, "A study on combined vibration drilling by ultrasonic and low-frequency vibrations for hard and brittle materials," *Precision Engineering*, vol. 22, pp. 196-205, 1998.
- [6] T. Hirogaki, E. Aoyama, H. Inoue, K. Ogawa, S. Maeda, and T. Katayama, "Laser drilling of blind via holes in aramid and glass/epoxy composites for multi-layer printed wiring boards," *Composites, Part A* 32, pp. 963-968, 2001.
- [7] D.C. Hamilton and R. Pashby, "Hole drilling studies with a variable pulse length CO₂ laser," *Optics & Laser Technology*, vol. 11, Issue 4, pp. 183-188, 1979.

이 왕 훈

- 1974년 9월 23일생
- 2001년 8월 안동대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 2003년 8월 안동대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 현재 (주)포디컬처 연구원
- 주관심분야: Bio-MEMS 및 반도체 센서

이 영 태

- 1961년 12월 29일생
- 1989년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1991년 2월 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1995년 3월 일본 토요하시기술과학대학 졸업(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 안동대학교 정보전자공학교육과 부교수
- 주관심 분야: 반도체 센서 및 Bio-MEMS