

## MEMS 기술을 이용한 수은방울경사각센서 개발

오종현\*, 오동영\*\*, 이승섭\*\*

## Micromachined Mercury Drop Tilt Sensor

Jong Hyun Oh\*, Dong Young Oh\*\*, and Seung S. Lee\*\*

## ABSTRACT

This paper proposes a tilt sensor made by MEMS technology. The sensor consists of an electrode glass, a small mercury drop, a circular channel, and a cover glass. The mercury drop is used as a medium of a current flow and in contact with two circular chromel electrodes used as an angular-motion resistance. When this sensor inclines, the mercury drop inside the circular channel moves into the bottom under the influence of gravity. A tilt angle can be measured by changed resistance as tilting this sensor. This sensor has a linear section between  $+50^\circ$  and  $-50^\circ$  with the accuracy of  $2^\circ$ . We are also studying about the enlargement of the linear section and the effect of the size of the mercury drop.

**Key Words** : MEMS, LIGA (Lithography, Galvanoformung, Abformtechnik), Tilt angle (경사각), Mercury drop (수은방울), Potentiometer (전위차계), PMMA(Poly-methyl methacrylate)

## 1. 서론

일반적으로 회전각(Steering angle)과 경사각(tilt angle)을 기계적으로 측정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 회전각을 측정하는 방법은 Fig. 1에서 나타내고 있는 로타리식 전위차계(Potentiometer)의 원리를 이용한다. 작동원리는 슬라이더나 브러쉬의 회전정도를 가변저항으로 감지하여 회전각도를 측정하는 방법을 사용하고 있다. 가변저항의 종류에 따라 Fig. 1에서 (a)의 Wire 형과 (b)의 Film 형으로 분류된다. 응답속도가 빠르나 센서의 크기가 크므로 작은 곳이나 작은 각의 측정에는 용이하지 않다<sup>(1)</sup>. 또한, 경사각을 측정하는 방법은 Fig. 2에서 보는 것처럼 경사에 따라 기울어진 추(Pendulum)의 위치를 포토센서로 감지하여 이를 각도로 환산하여 측정한다. 응답속도가 빠르고 가격이 저렴한 장점을 가지고 있는 반면에 상대적으로 큰 각의

측정이 어려운 단점을 가지고 있다<sup>(2)</sup>.

그러므로 기계적으로 작동되고 작은 각과 큰 각을 범용으로 측정가능하며 MEMS 기술을 이용하여 크기를 작게 한 동시에 가격면에서도 경쟁력을 가지는 경사각센서의 필요성을 가지게 되었다. 본 논문에서는 위 조건들을 충족하면서 지금까지 발표되지 않은 경사각센서의 제작방법과 실험에 대해서 소개하고자 한다.

1980년대 후반들어 각광을 받기 시작한 MEMS (Micro Electro Mechanical System)연구는 반도체 공정기술을 기계공학에 접목한 것으로 요약될 수 있으며, 표면미세가공과 기판미세가공을 중심으로 발전되어왔다. 그러나, 반도체 공정 특성상 다층의 박막 적층구조로 미세 기계구조물을 제작하게 되어, 실제적인 3D 미세구조물이나, 수백·수천  $\mu\text{m}$  두께의 미세구조물 제작에는 한계를 나타내게 되었다. 이에 이러한 한계를 극복 하고자하는 여러 가지 연

\* 포항공대 철강대학원

\*\* 포항공대 기계공학과

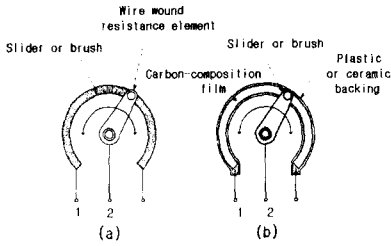


Fig. 1 Potentiometer (adapted from [1])

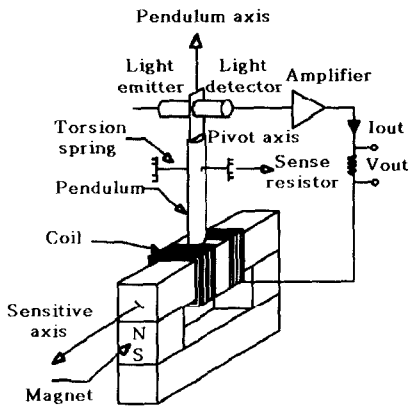


Fig. 2 Inclinometer (adapted from [2])

구가 시도되었으며, 그 대표적 연구방향으로는 방사광가속기의 X-선을 노광공정에 이용해 수천  $\mu\text{m}$  두께의 미세구조물 제작이 가능한 LIGA 공정, SU-8 과 같은 새로운 감광재의 개발로 기존의 UV 노광을 이용해 LIGA 공정과 비슷한 역할을 하는 LIGA-like 공정, 수천·수만층의 적층구조를 이용해 복잡한 3D 구조를 구현하는 rapid prototyping 기술을 MEMS 기술에 접목한  $\mu\text{-SL}$  (Micro Stereo-Lithography) 공정 등이 있다 [3].

이러한 연구분야를 기존의 MEMS 연구와 구별하여 HAR-MEMS (High Aspect Ratio MEMS) 혹은 HARMST (High Aspect Ratio Micro Structure Technology)라 통칭하며, 향후  $\mu\text{m}$  단위의 MEMS 기술과 기존의 macro 세계를 연결하는 Milimeter-Structure 기술로도 주목받고 있다.

LIGA란 독일어의 Lithographie, Galvanoformung, Abformung를 줄인 약자로 사진인쇄술, 전기도금, 주형법을 조합하여 미세 구조물을 제작하는 기술을 의미한다. LIGA 공정은 박막미세가공법의 장점

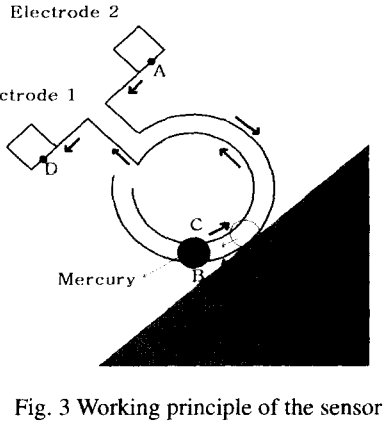
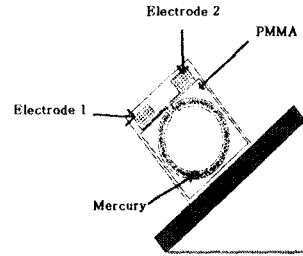


Fig. 3 Working principle of the sensor

을 그대로 살리면서 박막미세가공법으로는 불가능한 수천  $\mu\text{m}$  까지의 고 단면비(aspect ratio)를 갖는 구조물을 실현하게 한다. 하지만 기전공학시스템 측면에서 볼 때 집적회로 제조기술과의 공정호환성 결여로 별도의 조립공정이 필요하다는 단점이 있다 [4].

## 2. 이론 및 작동원리

수은(Mercury)은 상온에서 액체로 존재하는 은백색의 무거운 금속으로 열이나 전기를 잘 통하며 공기 중에서 녹슬지 않는다. 그리고 진한 질산이나 묽은 질산에 녹으며, 가열한 진한 황산에도 녹는다. 또 여러 금속(백금, 철, 니켈, 코발트, 크롬, 웰 제외)과 합금(아말금)을 만들기도 한다.

Fig. 3은 수은의 전도성을 이용하고 가변저항의 원리로 작동되는 경사각센서에 대한 디자인이다. 작동원리를 살펴보면 Fig. 3에서 기술어진 곳에서는 중력의 영향으로 수은이 채널을 따라 맨 아래 부분으로 굴러간다. (Electrode 1로부터 흘러간 전류는 수은방울을 통해 Electrode 2로 흘러간

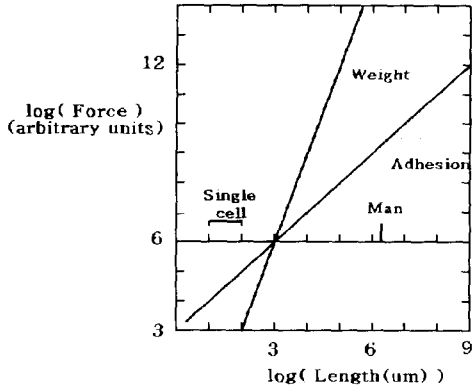


Fig. 4 Scaling of weight and molecular weight

다. 즉, 전류의 흐름은 A→B→수은→C→D로 흘러 간다.) 센서는 전위차계와 같이 가변저항의 역할을 하여 기울기에 따라 수은방울에 의해 저항의 길이가 변하게 된다. 그러므로 변화된 저항을 측정하여 각도로 변환시켜주는 것이 경사각센서의 원리이다 [5].

Fig. 3에서 센서 내부의 수은이 경사면의 채널을 따라 아래로 굴러 내려간다는 것은 수은이 표면장력에 비해 중력의 영향을 더 크게 받는다는 것을 의미한다. 이는 Fig. 4의 그래프에서 수은의 직경이 1mm보다 커야 한다는 것을 의미한다. 그러므로 중력의 영향과 수은의 크기를 최적화할 필요가 있다. 왜냐하면 센서의 디자인에서 수은의 크기가 작으면 작을수록 센서를 작게 만들 수 있는 장점을 가지나 중력이 표면장력보다 큰 범위 내에서만 수은이 움직이므로 수은의 크기를 무작정 줄일 수는 없기 때문이다. 그러므로 수은의 크기가 중요한 인자로 작용한다. 그래프를 살펴보면 지름이 1mm 정도에서 중력과 표면장력이 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 그러므로 지름이 1mm보다 커지면 수은이 중력으로 인해 표면장력을 이기고 아래로 이동이 가능하다.

그러나 본 실험에서 지름이 5mm 정도보다 더 커지면 표면장력의 영향으로 오히려 느려지는 것을 볼 수 있으므로 지름 3mm 정도인 수은 방울 (저항 10Ω)로 최적화하였다 [6,8]. 그리고 원형채널의 폭과 두께를 1mm와 2mm로 디자인하고 수은 방울이 잘 굴러다닐 수 있도록 원형채널을 금속이나 플라스틱보다 표면의 조도가 좋게 가공되는 PMMA(가로 20mm, 세로 20mm)를 사용하였다. 여

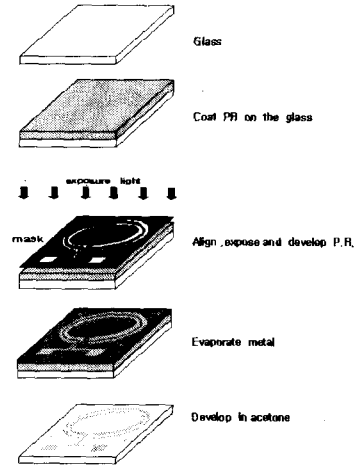


Fig. 5 lift-off process for the lower plate

기서 사용된 PMMA의 표면조도는 20~50Å 정도이다 [9].

### 3. 제작 공정

제작 공정은 Lift-off 공정, LIGA 공정과 조립을 통해서 이루어진다.

#### 3.1 아래 기판의 Lift-off 공정

아래기판의 Lift-off 공정은 Fig. 5에서 보여주고 있다. Glass(가로 20mm, 세로 25mm, 두께 1mm)를 세척(TCE:10분, 아세톤:10분, 메탄올:10분씩 끊인다.)하고 질소건조로 건조한 후 코팅작업을 한다. HMDS를 5000rpm에서 30초, Photo resist(P.R.: AZ 4562)을 5000RPM에서 60초간 스핀 코팅하면 두께가 5μm 정도가 된다. 공기 중에 5분간 건조 후 약 90°C에서 10분간 Soft bake 한다. 그 후 90초 동안 노광하고 나서 25초 동안 현상한다. 뒤이어 Glass 위에 크롬웰(chromel)을 1500Å 정도 증착시켜 올린 후 아세톤으로 Lift-off 한 후, 마지막으로 메탄올로 세척한다 [10].

#### 3.2 LIGA 공정

Fig. 6은 위판에 대한 LIGA 공정을 보여주고 있다. 세척된 3인치 웨이퍼 위에 Cr과 Au를 각각 300Å씩 증착시킨다. 이는 후에 도금을 하기 위한 Seed layer로 사용되어진다. 두꺼운 Photo resist(AZ4562)를 250 pm에서 20초 동안 스핀 코

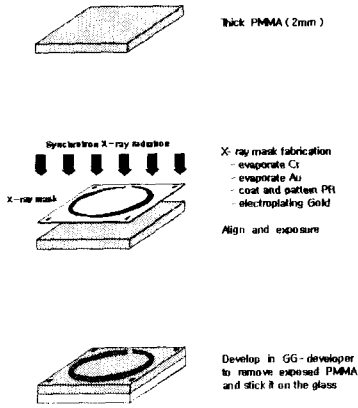


Fig. 6 LIGA process for the upper plate

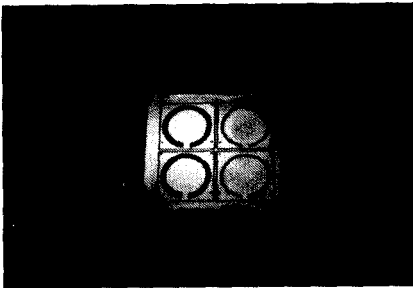


Fig. 7 X-ray mask

팅한다. 공기 중에서 안정화시킨 후 오븐에서 90℃, 1 시간 동안 Soft bake 한다. 200 초 동안 노광 후 10 분 동안 현상한다. 그러면 Photo resist 가 30μm 정도의 두께가 된다. 그리고 Au 를 80mA 에서 1 시간 30 분 동안 도금하면 두께 25μm 이 되는 Fig. 7 의 X 선 마스크가 완성된다.

두께 2mm 되는 PMMA 를 X 선 마스크 크기에 맞게 자른다. 그리고 X 선 마스크를 PMMA 위에 맞추어 정렬하고 Synchrotron X-ray radiation 을 수직방향으로 Scanning 하면서 12 시간(시작 : 149.10 mA, 종료 : 89.9 mA)동안 노광한다.

노광된 PMMA 를 GG-developer(성분: <60 vol% 2-ethanol>, <20 vol% tetra-hydro-1, 4-oxazine>, <5 vol% 2-amino-ethanol-1>, <15 vol% DI water>)로 35℃에서 8 시간정도 현상하고 린스(성분: <80 vol% 2-ethanol>, <20 %vol DI water>)한 후 DI water 로 세척하면 Fig. 9 의 왼쪽에 보이는 폭이 1mm 인 원형채널의 샘플이 완성된다<sup>11)</sup>.

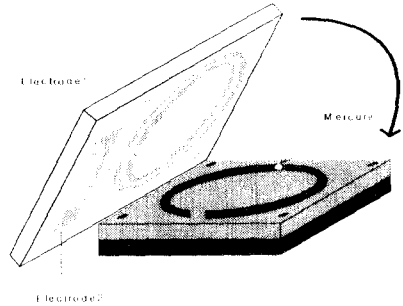


Fig. 8 Assembly process

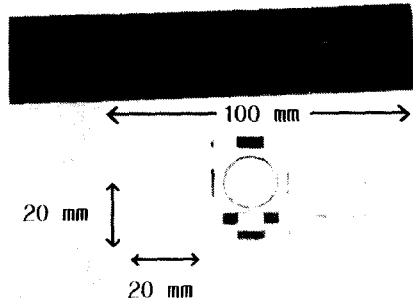


Fig. 9 Picture of the fabricated sensor

### 3.3 조립

위의 두 공정으로 제작된 device 들을 가지고 조립을 한다. 1/2 cc 인 1 회용 주사기를 사용하여 직경 3mm 정도인 수은방울을 만든다. 그리고 LIGA 를 이용하여 PMMA 로 만든 원형채널을 Cover glass 와 접촉한 후 그 속에 수은방울을 넣은 후 Lift-off 한 진극 Glass 를 정렬하여 순간 접착제로 접합한다. Fig. 8 과 9 는 각각 기판의 조립공정과 완성된 센서의 모습을 보여주고있다.

## 4. 실험방법 및 결과

### 4.1 실험방법

Fig. 10 에서 보는 바와 같이 알루미늄으로 제작한 수평대에 Compact rotation stage(Model M-RSP-1, OMA COMPANY)를 고정시키고 여기에 각도센서를 부착한 소켓을 회로판에 고정한 후 회로판을 나사로 고정시킨다. 센서에 있는 두 전극 1 과 2 부분에 납땀으로 전선을 연결시킨 후 저항측정기에 이를 연결하면 실험장치는 완성된다.

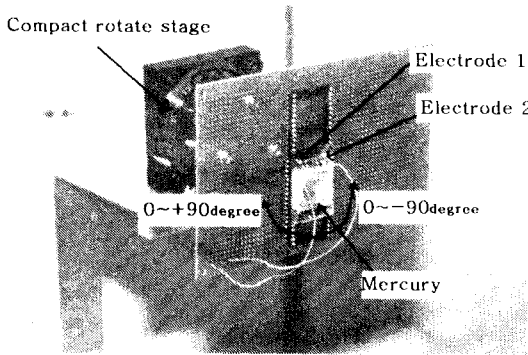


Fig. 10 Test setup for the sensor

이 실험장치를 이용하여 두 가지의 실험을 하고자 한다. 먼저 센서의 중심 아래 부분을  $0^\circ$  로 정하고 중심 아래 부분에서 좌우로  $90^\circ$  까지 회전시켜 가며 센서 전체의 저항을 측정한다.(Fig. 9 참고) 그리고 정밀도를 알아보기 위해 선형성 구간인  $0^\circ$  와  $+10^\circ$  사이에서  $2^\circ$  간격으로 회전시켜 가며 저항을 측정한다.

#### 4.2 실험결과

Fig. 11의 그래프에서 실선은 각도변화에 따른 이론적인 저항이며 원형의 데이터는 실험을 통해  $\pm 90^\circ$  사이에서  $10^\circ$  간격으로 측정한 저항이다. Fig. 10의 그래프에서  $\pm 50^\circ$  사이에서 선형성 구간을 가지는 것을 볼 수 있으며 나머지는 비선형 구간임을 알 수 있다.

Fig. 12은 Fig. 11의 선형성 구간 중에서도 선형성을 조금 벗어나는 구간인  $0^\circ$  와  $10^\circ$  사이에서 볼 수 있는 센서의 정밀도를 나타내는 그래프이다. 이 그래프에서 살펴보면,  $6^\circ$  에서부터 선형성을 약간 벗어나지만 전체로 선형이라고 간주될 수 있다. 센서는  $2^\circ$ 의 정밀도를 가지는 것을 실험결과를 통해 알 수 있었다.

비선형 구간이 생기는 이유를 추정해 본다면 디자인이나 금속상의 문제도 내포하고 있을 것이다. 그러므로 이를 개선하기 위해선 우선 선형적인 구간을 늘리는 최적화 방안을 강구해야 한다. 여기에는 디자인의 설계 보정과 공정 방법의 최적화 등이 포함될 것이다.

실험 시 생기는 또 한가지 문제점은 수은이 충격에 의해 두 개로 갈라졌다 다시 하나가 되는 스프릿 현상을 볼 수 있다. 이는 액체금속인 수은이 가지는 물리적인 특징이며 이를 개선하기 위해선

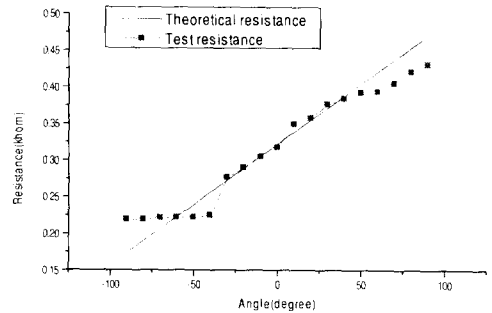


Fig. 11 Simulation result of resistance and degree of the sensor

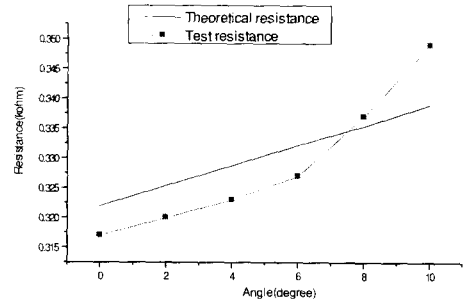


Fig. 12 Test result of the sensor in  $-10^\circ \sim +10^\circ$

스프릿 현상이 생기지 않도록 수은을 코팅시키는 방법이나 대체 액체금속의 사용 등이 고려될 수 있다.

또한, Fig. 12에서 실험 결과로  $2^\circ$ 의 정밀도를 가지며 더 작은 구간에서는 불안정한 값을 볼 수 있었다. 그러므로 센서의 정밀도를 높일 수 있는 방법으로 채널과 수은의 크기를 재설계하거나 수은 대신 대체 액체 금속을 사용하는 방법이 고려된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 Potentiometer의 원리를 이용하여 기계적으로 작동하는 작은 각도측정센서를 개발하였다. 이 센서의 특징은 MEMS 기술을 이용하여 소형화를 가능하게 하였으며, 센서 중 일부를 가공면의 표면조도가 좋은 점을 가진 PMMA를 그대로 사용한 것이다. 이는 수은이 가지는 표면장력의 영향을 줄여 잘 구르도록 하기 위한 것이다. 그리고

수은의 전도성을 이용하여 전극과 전극 사이를 연결시켜 전류를 흐르게 하는 매개체로 수은을 사용한 것이 또 하나의 특징이다.

본 논문에서 제작한 센서를 테스트해 본 결과 2°의 정밀도를 가지면서  $\pm 50^\circ$  사이에서 선형성 구간이 되는 것을 볼 수 있다.  $\pm 50^\circ$  사이의 선형성 구간을 이용하여 상품화가 가능하고 기울기의 측정을 필요로 하는 곳에서 폭 넓게 사용할 수 있다. 또한 소량의 수은을 사용하여 마모가 되지 않으므로 반영구적이고 저렴하다.

앞으로의 연구는 나머지 구간에서의 선형성을 개선하기 위해 필요한 설계의 최적화와 수은의 스프릿 현상을 방지하는 방법 등을 고려해야 한다. 또한 센서의 크기를 더 작게 줄일 수 있는 연구도 병행해야 하겠다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (1999-2-304-008-4) 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Bechwith, Marangoni, and Niehard, Mechanical Measurement, 5th ed., Addison Wesley, pp. 219, 1995.
2. <http://www.wuntronic.de/inclinometer/servoinc.htm>.
3. K. E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material," Proc. IEEE, Vol. 70, No.5, pp. 420-457, 1982.
4. D. W. L. Tolfree, "Microfabrication using Synchrotron Radiation," Rep. Prog. Phys. 61, pp. 313-351, 1998.
5. <http://www.cline.co.uk/tiltpr.html>. Vic Elliott Ceng MIEE, "Electrolytic tilt sensors," revised July 1998.
6. J. H. Lee and C. J Kim, "A liquid Micromotor Driven by Continuous Electrowetting," Proc. IEEE MEMS'98, pp. 538-543, 1998.
7. D. R. Adkins, C. C. Wong, "Development of an Electromagneticall Actuated Mercury Microvalve," Proc. IEEE MEMS'98, Vol.66, pp.133-137, 1998.
8. J. Simon, S. Staffer, and C. J. Kim, "A Liquid- Filled Microrelay with a Moving Mercury Microdrop,"

Proc. IEEE MEMS'97, pp. 208-216, 1997.

9. K. Dunkel, H. Bauer, W. Ehrfeld, J. Hosfeld, L. Weber, G. Horcher and G. Muller, "Injection-Moulded Fiber Ribbon Connectors for Parallel Optical links fabricated by the LIGA technique," J. of Micromech. Microeng., pp. 301-306, 1998.
10. M. Madou, Fundamentals of Microfabrication, CRC Press, pp. 14, 1997.
11. S.I.Hong, S.W.Jung, H.I.Hwang, S.M.Shin, S.K.Kim, G.H.Yang, B.G.Chol, "Research on the accuracy of microstructures manufactured by LIGA process," 대한전기학회 MEMS 연구회, pp. 221-230, 1998.