

Thema

I 기계적 거친 환경에 응용 가능한 Micromachined 정전 용량 압력 센서

장 성필 교수
(인하대 전자공학과)

현재 상용화된 미세가공 압력센서의 가격은 많은 부분이 센서 그 자체를 보호하기 위한 패키징에서 비롯된다. 만약 어떤 견고한 물질이 패키징 뿐만 아니라 센서의 기판으로 동시에 사용된다면, 다시 말해 센서가 패키지 그 자체위에 만들어진다면, 전체 시스템에 있어서 비용의 절감이라는 이익을 가질 수 있을 것이다. 본 연구에서는, 스테인리스 스틸이 미세가공 부품의 잠재 패키징 기판 물질로서 뿐만 아니라 멤브레인 물질로서 그리고 정전 용량 압력센서를 구현하기 위한 기술로서 기존의 미세가공기술과 함께 Lamination 기술이 소개되고 연구되었다. 이 미세가공 정전 용량 압력 센서들은 스테인리스 스틸 기판 위에 디자인, 제조, 및 특성화 되었다. 각 센서들은 스테인리스 스틸 기판과 Lamination된 스테인리스 스틸 멤브레인, 그리고 전기 도금으로 형성된 니켈 전극으로 구성되었다. 이들 가공기술로 구현된 센서의 감도는 압력이 0 KPa에서 178 KPa 가해질 때 9.03 ppm/KPa를 보였고 용량의 변화량은 0.14 pF이었다.

그리고 기생효과를 줄이기 위하여 이 센서에 Read-Out Circuitry가 소개되었고 Die 형태의 ASIC 칩이 직접 이 정전 용량 압력 센서와 함께 집적화 되어 센서 시스템을 구현하였다. 이 집적화 된 센서의 감도는 0 KPa에서 75 KPa의 압력 변화에 0.92 mV/KPa를 보였으며 이때의 센서의 전극간의 간격은 21 μm 이었다.

1. 서론

미세가공 기술은 집적회로 기술로부터 발전해 왔기 때문에 대부분의 미세 가공 부품은 실리콘을 기판으로 구현되어 왔다[1-4]. 많은 응용분야에서, 이 실리콘을 기반으로 한 부품들은 거친 환경에서 기계적인 충격으로부터 견디기 위하여 견고한 패키징 물질을 사용함으로써 보호되어 왔다[5-6]. 하지만, 이와 같은 방법은 패키징의 비용이 미세가공 부품의 자체의 제조비용과 같거나 초과하는 시스템으로 만들었다. 만약 이 견고한 패키징 물질이 직접 패키징 뿐만 아니라 부품의 기판으로 동시에 사용된다면,

다면, 패키징의 공정 단계를 줄일 수 있으면 이는 아마도 비용의 절감도 이끌어 낼 수 있을 것이다. 또 다른 잠재 이점은 기관의 견고함 때문에 이와 같은 Co-Package된 부품들은 항공이나 해양과 같은 기계적으로 거친 환경 등에 사용될 수 있을 것이다.

오늘날 MEMS 압력센서의 시장에서는 크게 두 가지 형태의 압력센서가 주를 이루고 있다. 그 중 하나는 압력을 센싱하는데 정전 용량 효과를 이용하는 것이고 다른 하나는 압저항 효과를 이용하는 것이다 [7]. 많은 연구가 두 분야에서 이루어지고 있지만, 현재 정전 용량 압력 센서의 연구에 더 많은 집중이 되고 있다. 그 이유는 정전 용량 압력 센서가 압저항 압력 센서에 비해 다음과 같은 몇 가지 장점을 가지고 있기 때문이다[8]. 첫째로 압저항 센서보다 더 높은 센싱 감도를 보인다. 둘째로 열에 대하여 압저항 센서에 비해 덜 민감하며 셋째로 적은 전력소모와 또한 보다 더 좋은 안정성을 가지는 특성을 가지고 있다. 이와 같은 장점은 상업적인 응용에 상당히 매력적이 되지만, 매우 작게 미세 가공된 정전 용량 센서의 상업적으로 성공적인 개발은 환경 Noise나 기생 용량등과 같은 기생효과에 의해서 자주 많은 어려움을 겪고 있다. 그러므로 정전 용량 압력 센서를 개발함에 있어서 기생효과를 줄이기 위하여 센서와 Read-Out Circuit이 가능한 한 직접 집적화되는 것이 매우 중요하다.

한 예로서, 그림 1과 같이 정전 용량 압력센서와 Read-Out Chip이 동일 기관 위에 Lithographically Defined Traces 따라 연결됨으로써 직접 집적화 된다. 이와 같은 집적화는 Buffering 효과와 기생효과와 감소, 그리고 Multiplexing 및 정전 용량의 주파수 및 전압으로의 전환을 가능하게 한다.

본 연구에서는, 스테인리스 스틸이 견고한 기관 물질 뿐만 아니라 멤브레인 물질로서 Bulk 및 Surface 미세 가공 구조물의 구현을 위하여 연구되었다. 또한 가공기술로서, 전형적인 미세 가공 기술 및 패키징 기술이 IC 기본의 공정기술과 함께 이 스테인리스 스틸 기관 위에 미세 부품을 구현하기 위해 사용되었다.

이 연구의 중요한 기여는 단지 스테인리스 스틸 기관과 스테인리스 스틸 멤브레인만이 외부 환경에

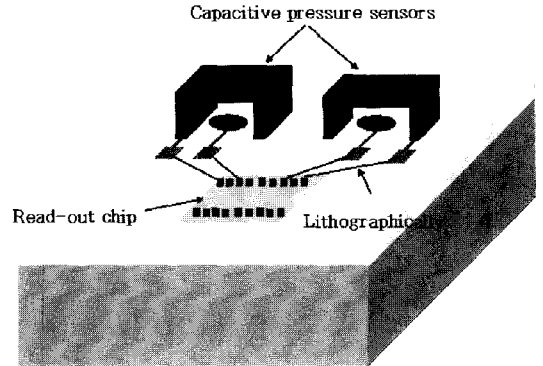


그림 1. 스테인리스 스틸 기관 위에 집적화된 정전 용량 압력 센서의 예.

노출되었다는 점이다. 다시말해, 이 센서는 자체 패키지가 되었다는 점이다. 그리고 본 연구는 이 미세 가공 센서와 Read-Out Circuitry 가 직접 집적화를 위한 방법을 또한 연구하였다.

2. 제조 공정

스테인리스 스틸을 멤브레인으로서 정전 용량 압력센서의 제조 순서는 그림 2와 같다. 제조 공정은 표면 조도가 대략 6-8 μm 이며 두께가 0.8 mm이고, 한 번의 길이가 6.0 cm인 정사각형의 스테인리스 스틸 기관에서 출발한다. 이 기관에 중심 간의 간격이 7 mm이고 직경이 2 mm인 압력 주입구가 6x6의 Array 형태로 가공된다. 타입 302의 스테인리스 스틸 필름(A Full Hard, Cold Rolled Stainless Steel Sheet Type 302: Precision Brand Product, INC)이 압력 주입구가 가공된 스테인리스 스틸 기관위에 에폭시 레진을 접착제로 사용하여 고온 프레스로 Lamination 된다. 이때의 가공조건은 압력은 8.65 MPa, 온도는 175 $^{\circ}\text{C}$ 로 약 30분 동안 유지한다. 스테인리스 스틸 타입 302는 압력에 민감한 멤브레인으로서 사용되며 두께가 12.7 μm , 표면조도가 대략 100 \AA 이다. 압력 주입구를 통하여 노출되어 있는 스테인리스 스틸 멤브레인 필의 에폭시 레진은 Reactive Ion Etching(RIE)을 이용하여 제거된다(그림 2(a)).

두께 250 \AA 의 타이타늄 박막이 접착력 증대를 위해 그리고 7 μm 의 두께를 갖는 SU-8-2(Micro Chem

Corp.)가 절연 막 형성을 위해 코팅된다. 하부 전극, 전기 도금을 위한 Seed 박막, 그리고 본딩 패드를 형성하기 위하여, Ti/Cu/Ti의 박막 층이 각각 250/6000/250 Å 두께로 도포된 후 패턴 된다. 포토 리지스트 AZ4620(Clariant Corp.)이 코팅되어 최종 두께가 약 25~27 m의 전기도금을 위한 Mold를 형성한다(그림 2(b)). 이 Mold를 통하여 니켈이 전기 도금되어 정전 용량 압력 센서의 기둥을 형성한다.

고정 전극을 형성하기 위하여, Ti/Cu/Ti의 박막 층이 DC Sputter를 통하여 도포된 후 포토리지스트(AZ 4620)가 코팅 및 약 20 μm 두께의 Mold가 패턴 된다. 그 Mold를 통하여 약 니켈이 전기 도금되어 고정전극을 형성한다(그림 2(c)). 마지막으로 Mold 희생층의 포토리지스트, Seed 박막 층들이 제거되어서 고정전극과 움직이는 압력 감지 전극인 스테인리스 스틸 멤브레인 사이에 Gap을 형성 한다(그림 2(d)). 그림 3에서는 최종적으로 형성된 스테인리스 스틸을 기반으로 한 정전 용량 압력 센서 Array의 그림을 보여 준다.

3. 이론적 모델

동작원리는 기본적인 정전 용량을 측정하는 원리와 동일하다. 압력이 멤브레인에 가해지면 멤브레인이 변위를 일으켜서 두 전극간 간격의 변화로 정전 용량의 변화를 측정함으로써 압력을 유도한다. 그림 4는 센서의 단면을 보여준다. 여기서 t_b 는 압력이 가해지기 전의 두전극간의 간격을 나타내며, w_0 는 멤브레인의 중심에서 변위를 말하며, t_m 은 멤브레인의 두께, 그리고 P 는 멤브레인에 가해지는 압력을 말한다.

기계적 모델링을 위해서, 몇 가지 가정이 만들어졌다. 첫째로, 멤브레인은 등방성의 기계적 특성을 가진다. 둘째로, 멤브레인 위의 전극의 금속 두께는 멤브레인의 두께에 비하여 매우 얇기 때문에 무시한다. 셋째로, 두 전극간의 간격이 전극의 측면적인 길이에 비하여 매우 작기 때문에 전체의 Fringing 효과를 무시한다. 넷째로, 멤브레인내에 잔류 응력은 무시할 정도로 작다.

이와 같은 가정아래, 모서리가 완전히 구속되어

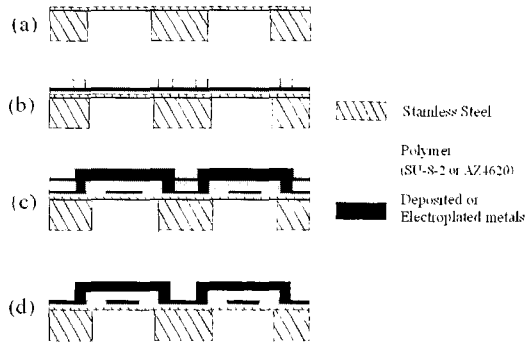


그림 2. 스테인리스 스틸 멤브레인을 갖는 정전 용량 압력 센서의 제조 공정 순서.

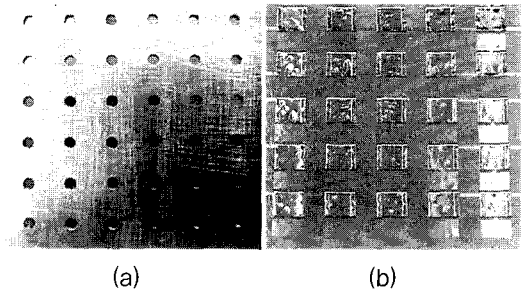


그림 3. 스테인리스 스틸 기반의 정전 용량 압력 센서 (a) 압력 주입구 부분. (b) 고정전극과 본딩 패드 부분.

있는 원형 멤브레인의 수직 방향의 변위 $w(r)$ 는 반경의 함수로서 다음과 같이 주어진다[9-10].

$$w(r) = w_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, a 는 멤브레인의 반경을 나타내며, 그리고 w_0 는 멤브레인의 중앙 점에서의 변위를 나타낸다.

전계의 Fringing 효과는 가정(C)에서 무시했기 때문에 전계의 Flux는 수직방향만 존재한다. 그리고 정전용량은 멤브레인의 변위를 나타내는 $w(r)$ 의 함수로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C = \epsilon_0 \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{r}{t_c - w(r)} dr d\theta \quad (2)$$

여기서, 식 (1)의 $w(r)$ 를 식 (2)에 대입하고 새로운 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma = \frac{w_0}{t_g} \quad (3)$$

그런 다음, 또 다른 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$x = \sqrt{\gamma} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad (4)$$

이 결과 식 (2)은 다음과 같이 정리된다.

$$C = \epsilon_0 \frac{\pi a^2}{t_g} \gamma^{-0.5} \int_0^{\sqrt{\gamma}} \frac{dx}{1-x^2} \quad (5)$$

마지막으로, C_0 을 압력이 가해지기 전의 정전용량이라 정의하고 이 적분함수를 풀면 다음과 같은 최종 결과치를 얻을 수 있다.

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{\pi a^2}{t_g} \quad (6)$$

$$C = C_0 \gamma^{-0.5} \tanh^{-1}(\gamma^{0.5}) \approx C_0 \left(1 + \frac{\gamma}{3} + \frac{\gamma^2}{5} \right) \quad (7)$$

여기서, 식 (7)의 두번째 그룹은 $\text{Tanh}^{-1}(y)$ 의 테일러 전개 시리즈로부터 얻어졌다.

4. 정전 용량 측정 결과

각각의 압력센서의 특성을 파악하기 위하여, Keithley 3322 LCZ 미터를 사용하여 측정이 이루어

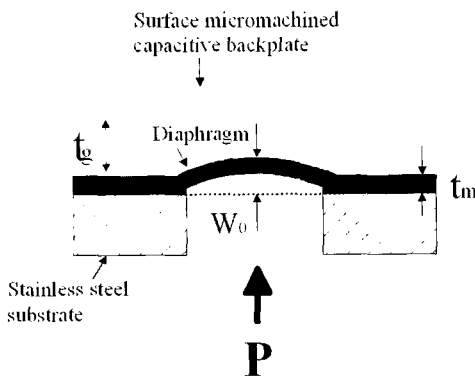


그림 4. 정전 용량 센서의 개략적인 단면도.

졌다. 측정될 센서는 시험대 위에 밀폐된 채 고정되어 측정되었다. 측정 시스템의 구조는 그림 5에서 보여준다.

스테인리스 스틸 멤브레인을 기본으로 한 정전 용량 압력 센서의 압력의 변화에 대한 정전 용량의 값이 그림 6에서 보여준다. 0 KPa에서 178 KPa의 압력 변화에 정전 용량의 변화는 0.14 pF으로 이 센서의 감도는 약 9.03 ppm/KPa이었다.

그림 6에서 알 수 있듯이 이론적 값들과 센서의 측정값들이 많이 차이가 남을 알 수 있다. 그 이유를 발견하기 위하여, 센서의 전기적 또는 기계적 행동의 분석하였다. 먼저 광학 현미경을 사용하여 그림 5와 같이하여 멤브레인의 변화를 압력을 변화시키므로 직접 측정하였다. 이 측정은 정전용량의 데이터를 수집한 후, 멤브레인의 변위를 직접 측정하기 위하여 센서의 니켈 고정전극을 제거한 후 멤브레인을 노출시켜 광학 현미경을 사용하여 압력을 가하면서 멤브레인의 변위를 직접 측정하였다. 압력을 변화시킴과 동시에 마이크로 스코우프의 초점을 변화를 읽으면서 멤브레인의 중앙점에서의 변위를 측정할 수 있었다. 이 마이크로 스코우프의 0.4 m이었다.

그림 7은 스테인레스 스틸 멤브레인의 변화를 보여 주는데 여기서 $Up1$ 은 압력을 계속 증가시키므로 측정된 값이며, $Down1$ 은 압력을 계속 감소시키면서 측정된 값이다. 그리고 $Up2$ 와 $Down2$ 는 다른 스테인레스 스틸 멤브레인의 변위를 측정된 값이다.

그림 7에서 보는 바와 같이 멤브레인 변위의 이론적인 모델이 측정값에 비하여 매우 많은 변위를 가질 것이라고 예측했음을 알 수 있다. 이 차이는 크게

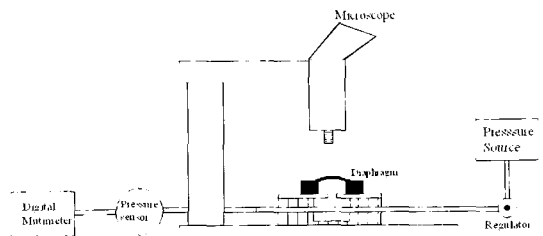


그림 5. 정전 용량 및 멤브레인의 변위 측정 시스템.

두 가지의 이유에서 기인한 것으로 가정할 수 있을 것이다. 첫째로 압력의 증가와 감소를 반복함으로써 멤브레인에 단순한 기계적 Yield가 발생했다. 또 다른 가정으로서, 이 스테인레스 스틸 필름이 처음 예상 했던 것과는 다르게 무시할 수 없는 항복응력과 등방성의 물질 특성을 보이지 않을 수 있다는 것이다. ANSYS를 사용한 유한 요소 해석도 175 °C 의 Lamination 온도에서 빠른 시간에 상온으로 냉각시켰을 때 이 멤브레인에 상당한 양의 잔류응력이 존재한다는 것을 보여 주었다. 또한 압력이 0 KPa에서 180 KPa까지 가함에 약 328 MPa의 잔류응력을 포함하여 최대 446 MPa의 응력이 멤브레인에 발생한다는 것을 보여 주었다. 하지만 이 Lamination된 스테인레스 스틸 멤브레인은 항복응력이 965 MPa 그리고 극한응력이 1.28 GPa로서 아직 견딜 수 있음을 알

수 있다. 또한 이 멤브레인이 Lamination 공정과정에서 변형과 또한 제조 공정 중에서 Rolling과 Drawing을 통한 이방성 특성을 가졌을 수도 가정해 볼 수가 있을 것이다. 이 디바이스의 모델링 중에서 전기적 부분의 잘못된 예측을 점검하기 위하여 그림 7에서 보여준 변위값들을 식 (3)과 식 (7)에 직접 대입하여 정전용량의 값의 변화를 보았다.

그림 8은 스테인레스 스틸 멤브레인의 변위와 정전용량의 변화를 보여준다. 그림 8에서 알 수 있듯이 이론적인 값과 실제 측정값이 일치함을 보아 전기적 모델링에는 문제가 없음을 알 수 있다.

5. MS3110 IC 칩을 이용한 정전용량 측정

개개의 센서로부터 정전 용량 값은 쉽게 측정할 수 있다. 하지만 보다 더 높은 감도를 얻기 위하여서는 기생효과를 제거하는 것이 필수적이라고 말할 수 있다. 기생 정전 용량의 주 원인은 기판과 본딩 패드 및 기판과 전기적 연결선 사이에서 발생한다고 할 수 있다. 이와 같은 원인에서 발생한 기생 정전 용량은 센서와 Read-Out Circuitry를 집적화시킴으로써 제거할 수 있다. 이때 모든 구조적 조건은 같지만 멤브레인이 움직이지 않는 기준 정전 용량 센서를 둬으로써 측정 센서로부터 쉽게 기생 정전 용량을 제거할 수 있다.

이 집적화는 현재 상용화 MS3110 Universal Capacitive Readout IC를 이용하여 이루어 졌다[11]. MS3110 칩은 두 센서의 정전 용량을 측정하여 그 차이 값에 비례하게 전압으로 출력을 하는 원리로 구동된다. 이 칩의 출력 전압 식은 식(8)과 같이 정전 용량 CS1T and CS2T의 함수로서 표현된다.

$$V_o = Gain * V_{2P25} * 1.14 * \frac{(CS_{2T} - CS_{1T})}{CF} + V_{ref} \quad (8)$$

여기서 CS_{2T} 측정할 센서의 값을 나타내며 CS_{1T}는 기준 센서의 값을 나타낸다.

그림 9은 0에서 75 KPa까지의 압력 변화에 정전 용량 센서의 변화를 MS3110 통하여서 나온 전압의 변화를 보여준다. 이 측정값은 센서의 두 전극간 간

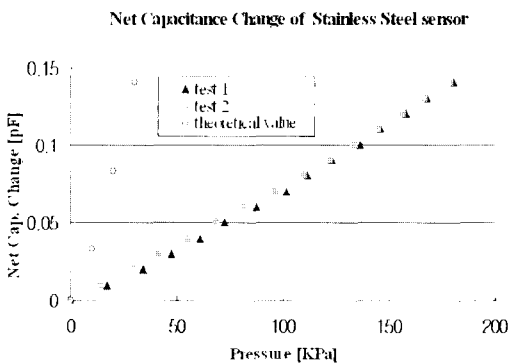


그림 6. 스테인리스 스틸 멤브레인 정전 용량 압력 센서의 압력변화에 따른 정전 용량 변화.

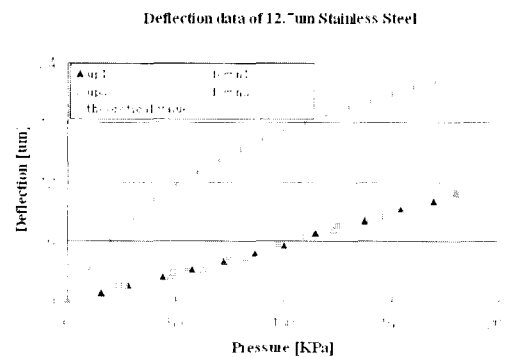


그림 7. 스테인리스 스틸 멤브레인의 압력에 따른 변위.

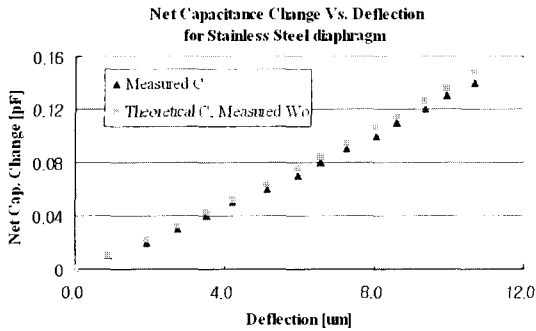


그림 8. 정전 용량 센서의 멤브레인 변위에 따른 정전 용량의 변화.

격이 21 μm 일 때 압력이 0 KPa에서 75 KPa 까지의 변화에 2.85 %의 전압 변화와 0.92 mV/KPa의 감도를 가짐을 알 수 있다. 그림 10은 MS3110 IC 칩이 집적화 된 센서의 측정 세트를 보여준다.

6. 결론

기계적으로 거친 환경에 응용하기 위한 센서의 구현을 위하여 견고한 기판 및 멤브레인 물질로서 스테인레스 스틸이 성공적으로 연구되었다. 또한 이 기판과 멤브레인을 기반으로 압력 센서를 구현하기 위하여 전형적인 미세가공 공정과 함께 Lamination 공정이 소개되고 연구되었다.

정전 용량 압력 센서는 기여는 스테인리스 스틸 기판과 스테인리스 스틸 멤브레인만이 외부 환경에 노출되었다는 점이다. 다시 말해, 이 센서는 자체 패키지가 되었다고 말할 수 있다. 이 센서는 0 KPa에서 178 KPa까지의 압력 변화에 0.14 pF의 정전 용량 변화와 9.03 ppm/KPa의 감도를 보였다.

그리고 기생 정전 용량을 줄이기 위하여, Read-Out Circuitry가 직접 미세 가공된 센서와 집적화 시도되었다. 이 집적화는 상업적으로 이용 가능한 MS3110 IC 칩을 패키지 되지 않은 Die 형태로 센서에 와이어 본딩을 통하여서 집적화 되었다. 이 집적화 된 센서의 감도는 0 KPa에서 75 KPa의 압력 변화에 0.92 mV/KPa이었고 2.85 %의 출력 전압의 변화를 보였다. 그리고 이 센서의 전극간의 간격은 21 μm 이었다.

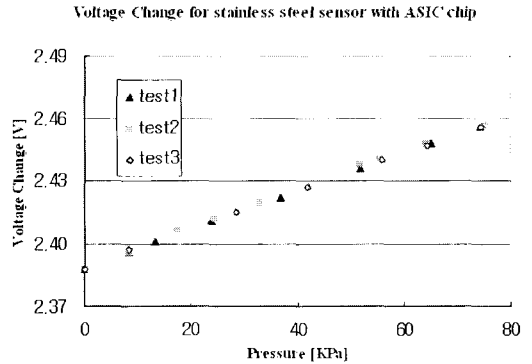


그림 9. MS3110 IC칩과 집적화 된 센서의 출력 전압.

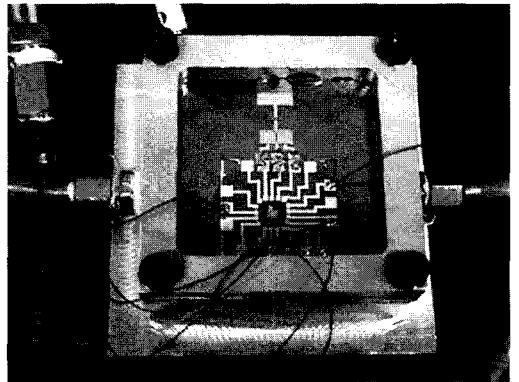


그림 10. MS3110 IC칩과 집적화 된 센서의 측정 세트.

참고 문헌

- [1] H. Baltès, "CMOS Micro Electro Mechanical Systems," Sensors and Materials, Vol. 9, No. 6, p.331, 1997.
- [2] N. C. MacDonald, "SCREAM Microelectromechanical Systems," Microelectronics Engineering, Vol.32, No.1-4, p. 49, 1996.
- [3] R. T. Howe, "Applications of Silicon Micromachining to Resonator Fabrication," in Proceedings of the 1994 IEEE International Frequency Control Symposium(The 48th Annual Symposium)(Cat. No. 94CH3446-2), p. 2, 1994.

[4] C.H. Mastrangelo, X.Zhang, and W.C. Tang, "Surface micromachined capacitive differential pressure sensor with lithographically-defined silicon diaphragm," in Proceedings of the international Solid-State Sensors and Actuators Conference-TRANSDUCERS '95. Vol. 1, 25-29, p. 61, June 1995.

[5] Rao R. Tummala, "Fundamentals of Microsystems Packaging," McGraw-Hill Book Company, New York, 2001.

[6] Stein et al., "Thick Film Heaters made from Dielectric Tape Bonded Stainless Steel Substrates," ISHM '95 Proceedings, Boston MA, p. 125, 1995.

[7] Gregory T.A. Kovacs, "Micromachined Transducers Sourcebook", McGraw-Hill Book Company, New York, 1998.

[8] William P. Eaton and James H. Smith, "Micromachined Pressure Sensors: Review and Recent Developments," Proceedings of the SPIE The international Society for Optical Engineering, Vol. 3046, p. 30, 1997.

[9] S. Timoshenko, "Theory of Plates and Shells," McGraw-Hill Book Company, New York, 1940.

[10] Wen H. Ko et al, "A High-Sensitivity Integrated-Circuit Capacitive Pressure Transducer," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-29, No.1, p. 48, Jan. 1982.

[11] Ying Hsu, David DeRoo, John Murray "Low cost sensor for Automotive Applications The Fabless strategy ", Microsensors Inc

저자약력



성명 : 장성필

◆ 학력

- 1991년 성균관대 전자공학과 공학사
- 1998년 Georgia Institute of Tech. 전기전자컴퓨터공학과 공학석사
- 2002년 Georgia Institute of Tech. 전기전자컴퓨터공학과 공학박사

◆ 경력

- 1997년 ~ 2002년 Georgia Institute of Tech., GRA
- 2002년 ~ 2005년 삼성전기 중앙연구소 책임연구원
- 2005년 ~ 현재 인하대 전자공학과 교수

