

LC 공진을 이용한 원격측정용 실리콘 압력센서

김순영, 박진성, 양상식  
아주대학교 마이크로시스템실

Telemetry Silicon Pressure Sensor Using LC Resonance

Soon Young Kim, Jean Sung Pak, Sang Sik Yang  
Micro systems Lab., Ajou University

**Abstract** - This paper presents an implantable telemetry LC resonance-type pressure sensor for the measurement of the ventricle pressure. This sensor consists of a capacitor and an inductor. This resonant circuit is magnetically coupled with an external antenna coil. The resonance frequency of the circuit decreases as the sensor capacitance is increased by the applied pressure. The inductance and the capacitance are 428nH and 0.98μF, respectively. The resonance frequency is 245.7 MHz when the differential pressure is zero. The sensitivity of the sensor is 9.447 kHz/Pa.

1. 서론

인체에 사용하는 압력센서에는 혈압, 뇌압, 안압 센서 등이 있는데, 인체에 삽입하기 위해서는 센서의 크기가 작아야하고, 생체 적합한 물질로 만들어져야하며, 원격 측정이 가능해야한다. 본 논문에서는 뇌압을 측정하기 위한 목적으로 인체삽입용 압력센서를 설계하고 제작하였다. 압력신호를 처리하고 그 데이터를 전송하는 방식의 원격측정용 압력센서의 경우에는 센서와 송수신회로, 충전지 등이 집적화 되어야 한다[1]. 복잡한 회로를 집적하지 않고 공진을 이용하여 근거리에서 무선으로 측정하는 경우에는 삽입하는 센서부의 크기가 훨씬 작아진다[2]. LC 공진을 이용하여 고온, 고압에서 측정이 가능함을 보인 센서도 있다[3]. 본 논문에서는 압력에 따른 박막의 변위와 전기용량, 공진 주파수 등을 계산하고, 센서와 측정회로를 설계하고 제작하였다.

2. 공진을 이용한 원격 측정원리

원격측정 시스템은 물체 또는 인체 내부에 들어가는 센서와 유도결합을 위한 코일, 외부에서 데이터를 처리하는 회로 등으로 구성된다. 그림 1은 LC 공진 회로를 갖는 센서부와 유도결합 (inductive coupling) 안테나를 갖는 측정 시스템 구성도를 나타낸다. 센서측 회로에 있는 커패시터는 두 전극판 사이의 거리 변화나 면적 변화에 따라 커패시턴스가 달라지며, 센서부의 커패시터

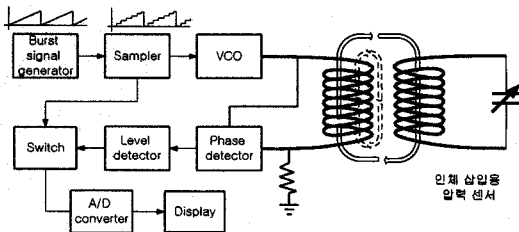


그림 1. 원격 측정 시스템의 구성도

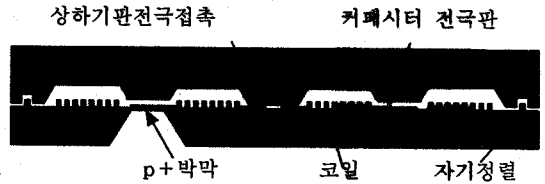


그림 2. 센서의 단면도

와 인덕터를 직렬(혹은 병렬)로 연결하면, 공진회로가 형성된다. 센서부의 인덕터는 외부코일과의 자기결합 방식으로 신호를 전달한다. 외부에서 등가회로의 공진 주파수를 측정하면 커패시터의 값을 알 수 있고, 이로써 측정하고자 하는 물리량을 얻을 수 있는 원리이다.

3. 압력센서의 설계

그림 2는 원격 측정용 LC 공진형 압력센서의 구조를 나타낸다. 센서는 코일과 커패시터의 직렬 연결하여 LC 공진을 일으키도록 설계하였다. 커패시터의 박막은 p+로 만들고 간격은 9 μm, 평판의 크기는 1 mm×1 mm 이고, 이때 정전용량은 0.98 μF이다. 코일은 사각평면 코일을 사용하였고, 한 변의 길이는 4610 μm, 선폭은 50 μm, 감은 횟수는 17회로 대략적으로 계산하면, 428 nH이다.  $f = 2\pi \times 1/\sqrt{LC}$  로 계산된 공진 주파수는 245.7 MHz이다. 박막이 없는 센서를 같이 제작하여 공정상의 오차로 인한 측정에서의 오차를 줄이기 위하여, 기준 주파수와의 차이로 값을 얻도록 하였다. 바깥 테두리에는 상하기판의 자기정렬이 가능하도록 하부기판의 바깥 테두리에는 코일이 올라오고, 상부기판에는 실리콘을 식각하여 홈을 만들어서, 상하기판이 자기정렬하도록 하였다. 외부 측정용 코일은 4.4 Ω의 저항을 갖는 솔레노이드를 사용한다.

4. 센서의 감도 계산

4.1 박막 변위 및 정전용량의 변화

압력에 따른 박막의 변위를 계산하는 것은 정전용량형 압력센서의 시뮬레이션에서 반드시 필요한 것이다. 평평한 박막의 중심 변위를 구하는 식은 다음과 같다[4].

$$\frac{Pa^4}{Eh^4} = \frac{3.41a^2}{Eh^2} \delta \left(\frac{y}{h}\right) + \frac{1.98(1-0.295\nu)}{1-\nu} \left(\frac{y}{h}\right)^3 \quad (1)$$

중심변위  $w_0 = y$ 라고 놓으면, 식 (2)를 이용하여 사각형 박막의 3차원 변위 해석이 가능해진다[5]. 식 (2)에  $w_1 = w_1 \times 0.401$ ,  $w_2 = w_0 \times 1.1611$ 을 대입하여 그림 3과 같은 형상을 얻을 수 있다.

$$w(x, y) = \left( w_0 + w_1 \cdot \frac{x^2 + y^2}{a^2} + w_2 \cdot \frac{x^2 y^2}{a^4} \right) \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2a} \quad (2)$$

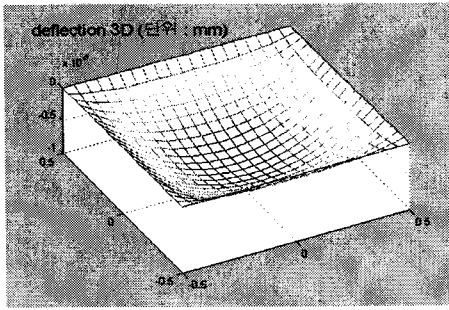


그림 3. 편평한 박막의 3차원형상 (외부압력: 70cmH<sub>2</sub>O)

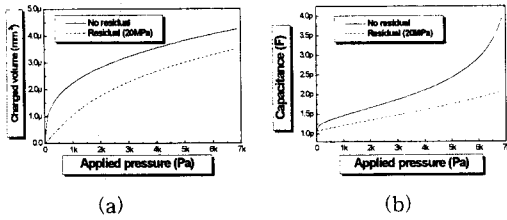


그림 4. 압력에 따른 박막의 부피변화와 정전용량변화

Matlab에서 1 mm×1 mm의 박막을 20×20의 조각으로 나누어 계산하였다. 여기에서 얻어진 z축으로의 변위로 면적을 곱하여 변형된 부피를 계산하였고, 각 조각들의 정전용량을 합하여 전체 박막의 정전용량을 구하였다. 편평한 박막의 잔류응력을 0과 20MPa의 두 개를 비교하여 시뮬레이션을 실행하였다. 그림 4의 (a)는 압력에 따른 박막의 변화를 보여준다. 압력에 따른 부피변화는 6864 Pa에서 4.245×10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>로 밀봉된 내부의 전체 부피인 0.2422 mm<sup>3</sup>에 비하여 매우 작은 변화이기 때문에 내부부피 감소에 따른 내부압력의 증가는 무시할 수 있다. 그림 4의 (b)에서 잔류응력이 20 MPa일 경우 압력 변화에 따른 정전용량의 변화는 거의 선형적인 특성을 가짐을 알 수 있다. 잔류응력이 없을 때와 20 MPa일 때 압력에 따른 센서의 이론적인 공진주파수의 감도가 각 11.769 kHz/Pa, 9.4476 kHz/Pa이다.

#### 4.2 원격측정회로의 등가회로

유도결합 회로해석에 필요한 조건은 다음과 같다.

- 1) 안테나 코일과 센서는 동축에 위치한다.
  - 2) 센서의 크기는 외부코일의 지름보다 작다.
- 또, 해석을 단순화하기 위해 다음의 가정이 필요하다.
- 1) 외부코일의 자기장은 z-축 방향으로만 작용한다.
  - 2) 코일의 자기장은 센서의 모든 곳에서 일정하다.
- Biot-savart의 법칙에 의하면 외부안테나에 흐르는 전류에 의한 z축 방향의 자기장의 자속밀도는

$$B(z) = \mu_0 H(z) = \frac{\mu_0 N_a I_a r_a^2}{2(r_a^2 + z^2)^{3/2}} \quad (3)$$

로 구해지고 안테나코일의 인덕턴스  $L_a$ 는

$$L_a = \frac{\mu_0 \pi N_a^2 r_a}{2} \quad (4)$$

이다[6]. 두 코일 사이에 존재하는 상호인덕턴스  $M$ 은

표 1. 원격측정방식 공진회로와 관련된 변수

안테나	센서부
$L_a$ 인덕턴스	C 커패시턴스
$r_a$ 코일의 지름	R 기생저항
$N_a$ 감은 횟수	L 코일의 인덕턴스
$R_a$ 기생저항	N 감은 횟수
$\mu_a$ 투자율	S 단면의 면적
$I_a$ 코일의 전류	$\mu$ 투자율
M 상호 인덕턴스	

$$M(z) = \frac{\mu N}{\mu_0 L_a} \int_s B \cdot dS = \frac{\mu \mu_a r_a^2 N_a N S}{2\mu_0 (r_a^2 + z^2)^{3/2}} \quad (5)$$

이다. 여기서,  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율로써  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m이다.

커패시터와 인덕터, 저항 등이 직렬로 연결된 상태의 센서부의 임피던스  $Z_s$ 는

$$Z_s(\omega) = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (6)$$

이고, 안테나부와 센서부를 결합한 등가회로의 임피던스  $Z_{eq}$ 는 상호 인덕턴스와 센서부의 임피던스를 포함한 식으로 구해진다.

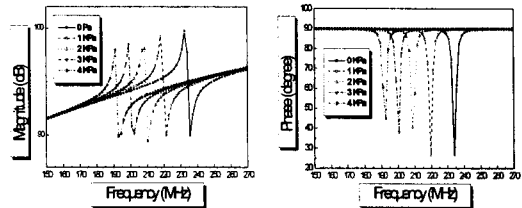
$$Z_{eq}(\omega) = R_a + j\omega L_a + \frac{\omega^2 M^2}{Z_s(\omega)} \quad (7)$$

#### 4.3 등가회로의 주파수응답

표 2와 같은 조건에서 등가회로의 임피던스를 전달함수로 나타낸 식 (6)으로부터 그림 5와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 이때, 코일간의 간격은 5 mm이다. 그림 5의 (a)는 압력차를 1 kPa씩 변화시켰을 때 주파수에 따른 신호의 크기를 보여주고 있고, 그림 5의 (b)는 위상의 변화를 나타낸다. 그림 3에서 공진 주파수일 때 위상의 변화가 뚜렷하게 보인다.

표2. 계산에 사용한 상수값

안테나	센서
$r_a = 0.01$ m	C = 0.98 pF
$N_a = 10$	L = 428 nH
$R_a = 4.4 \Omega$	N = 17
$\mu_a = 1.26 \times 10^{-6}$ wb/Am	R = 10.7 $\Omega$
$L_a = 39.48 \mu F$	M = 420.9 nH



(a) 크기 변화 (b) 위상변화

그림 5. 외부압력이 변화할 때 주파수에 따른 임피던스의 크기와 위상 변화

## 5. 제작공정

다음의 그림 6는 센서의 제작공정을 나타내는 공정도이다. 그림에서 왼쪽 열은 센서의 하부기판의 제작공정이고, 오른쪽 열은 상부기판의 제작공정이다. 상부기판은 2번에 걸친 얇은 식각을 수행한다. 처음 식각은 하부기판의 코일을 위한 공간을 만들어주기 위해서이고, 두 번째 식각은 커패시터의 간격  $9\mu\text{m}$ 를 만들어준다. 커패시터와 하부기판의 접촉전극은 Cr/Au를 사용한다. 하부기판의 박막은 p+박막을 사용하고, 코일은 구리 전기도금한다. 센서의 가장자리에는 상판과의 자기정렬을 위한 도금을 수행한다. 하부기판 뒷면 식각시에 구리 코일을 보호하기 위하여 파릴린으로 코팅을 한다. 상부기판과 하부기판의 접합은 자기정렬로 결합시킨 후 열연몰에폭시로 밀봉한다. 그림 7은 실제 제작된 사진이다. 사진 (a)는 하부기판의 코일과 커패시터 전극, 그리고 접촉전극이 완성된 모습을 보여준다. 사진 (b)에서 파릴린으로 코일을 보호하고 뒷면 식각으로 p+박막이 완성되어진 것을 확인 할 수 있다. 사진 (c)는 상부기판에 하부기판의 코일이 닿지 않도록 하기 위해  $16\mu\text{m}$ 의 동공과 커패시터전극을 보여준다. 사진 (d)는 조립 완성된 것으로 센서의 둘레에 에폭시로 밀봉한 모습이다.

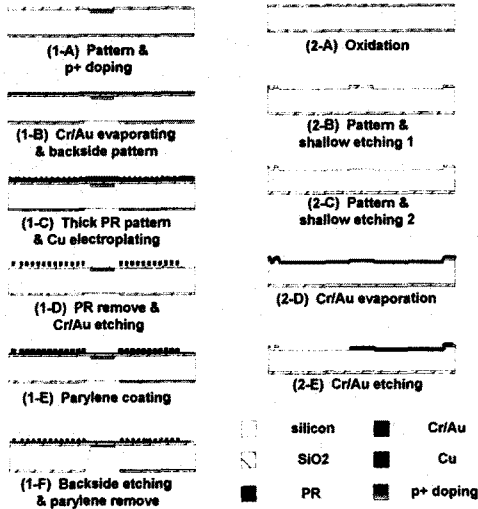


그림 6. 센서의 상하 기판의 공정도

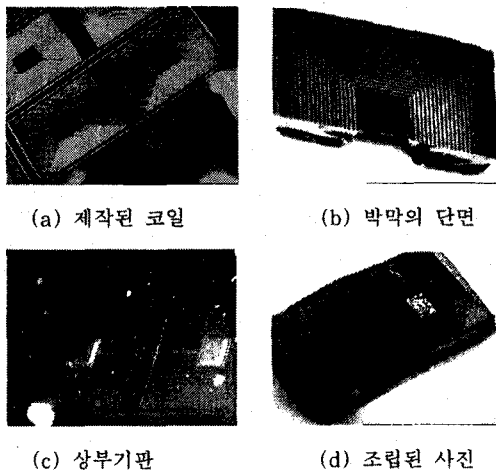


그림 7. 제작된 센서의 사진

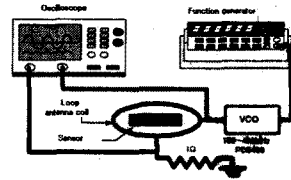


그림 8. 공진 주파수를 검출하기 위한 측정장치도

## 6. 측정 실험

다음의 그림 8은 제작된 센서의 공진 주파수를 측정하기 위해 주파수 변화에 따른 크기의 변화로 알 수 있도록 한 측정장치이다. 주파수 변화를 측정하기 위해 이론적으로 계산된 공진 주파수 근처의 영역에서 사용할 수 있는 VCO(Voltage Controlled Oscillator)로부터 발생된 주파수를 코일에 걸리는 전압과 전류의 변화로 공진 주파수를 알아낸다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 센서에 회로를 내장하지 않고, 원격으로 압력을 측정하는 이온과 센서를 실제 제작하였다. 제작된 센서는  $9\mu\text{m}$ 의 박막 간격을 갖고, 내부저항은  $10.7\Omega$ 이며, 코일의 두께는  $10\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 시물레이션을 통하여 유도결합과 공진 주파수를 이용하여 원격측정을 할 수 있음을 확인하였다. 커패시턴스의 변화 즉 압력의 변화에 따른 공진 주파수의 변화와 외부 코일에서의 측정을 계산을 통하여 제작된 센서의 특성을 보았다. 공진 주파수를 이용한 압력의 측정은 높은 감도를 가지고 있다. 제작 공정 상에서 코일의 선풍을 줄이고 커패시터 박막간의 간격을 줄이면 센서의 크기를 더욱 줄일 수 있다. 차후 연구계획은 위상변화를 이용한 측정회로를 꾸미고 실제 압력에 따른 주파수 변화를 측정하려고 한다.

본 연구는 보건복지부 보건의료기술연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임. (HMP-99-E-12-0005)

## (참 고 문 헌)

- [1] T. Eggers, C. Marschner, U. Marschner, B. Claßbrummel, R. Laur, and J. Binder, Advanced hybrid integrated low-power telemetric pressure monitoring system for biomedical applications, *Proc. IEEE MEMS2000*, pp. 329-334, 2000.
- [2] Eun-Chul Park, Jun-Bo Yoon, and Euisik Yoon, Hermetically sealed inductor-capacitor(LC) resonator for remote pressure monitoring, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 37, pp7124-7128, 1998.
- [3] Jennifer M. English, and Mark G. Allen, Wireless Micromachined Ceramic Pressure Sensors, *Proc. IEEE MEMS 99*, pp. 511-516, 1999.
- [4] E. H. Yang, S. S. Yang, E. J. Park and S. H. Yoo, Dynamic Characteristics of the Corrugated and the Flat p+ Diaphragms, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, DSC-Vol. 59, pp. 441-444, Nov. 1996.
- [5] Dieter Maier-Schneider, J. Maibach, and Ernst Obermeier, A New Analytical Solution for the Load-Deflection of Square Membranes, *Journal of MEMS*, vol4, No.4, pp. 238-241, 1995.
- [6] T. Harpster, S. Hauvespre, M. Dokmeci, B. Stark, A. Vosoughi, and K. Najafi, A passive humidity monitoring system for in-situ remote wireless testing of micropackages, *Proc. IEEE MEMS2000*, pp. 335-340, 2000.