

## 세라믹 다이어프램을 이용한 정전용량형 후막 스트레인 게이지

이성재, 박하룡, 김정기, 민남기  
대림대학, 삼척대학교, (주)그린센서, 고려대학교

### Development of piezocapacitive thick film strain gage based on ceramic diaphragm

Seong-Jae Lee, Ha-Young Park, Jung-Ki Kim, Nam-Ki Min  
Daelim College, Samchuk National Univ., Green Sensor Ltd., Korea Univ.

**Abstract** - Thick film mechanical sensors can be categorized into four main areas piezoresistive, piezoelectric, piezocapacitive and mechanic tube. In this areas, the thick film strain gage is the earliest example of a primary sensing element based on the substrates. The latest thick film sensor is used various pastes that have been specifically developed for pressure sensor application.

The screen printing technique has been used to fabricate the pressure sensors on alumina substrate( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Thick film capacitive of strain sensing characteristics are reported and dielectric paste based on ( $\text{Ti}+\text{Ba}$ ) materials. The electric property of dielectric paste has been studied and exhibit good property with good gage factor comparable to piezoresistive strain gage. New piezocapacitive strain sensor was designed and tested. The output of capacitive value was good characteristics.

### 1. 서 론

현재 압력센서는 각기 다른 측정원리를 갖는 많은 종류가 실용화되어 광범위하게 사용되고 있으며, 압력범위도 전압이나 분압의 측정이 가능하도록 하고 있다. 1994년 이후 고감도 후막 정전용량형 스트레인 게이지가 Arshak 등에 의해서 연구되고 있으며, 게이지의 특징은 다층구조를 이루고 있는 후막저항과 같은 기본 구조를 이루고 있는 것이다. 최근 들어서 많이 응용되고 있는 압전소자 또는 압저항, 그리고 본 논문에서 다루는 정전용량형 모두 "Piezo"라는 접두어를 가지고 있는 데 괜에 조의 뜻은 그리스 언어로 "변화(變化)"의 의미를 말하고 있다. 따라서 piezocapacitive 효과라고 하면 우리말로 압용량형이라고 말할 수 있다. 이는 1960년 초 경시변화와 고온 상태의 비접착식 스트레인 게이지 용도에 사용되기 시작했다. 즉, Capacitive 스트레인 센서는 우주항공 그리고 군사용으로 많이 사용되며 최근에는 자동차, 중공업 분야로 폭넓게 이용되고 있다. 또 0.5bar 이하의 미압 측정용으로도 많이 응용되고 있다. 게이지의 원리는 두 전극판 사이에 유전물질을 이용하는 것으로 초기에는 공기로 이용하였으나 전극 사이에 유전율이 큰 여러 가지 유전물질이 사용되며 압력 변화에 따른 다이어프램의 변형율은 유전체 형상을 변화시킨 값으로 나타나 커패시턴스 값으로 된다. 이 게이지 값은 결과적으로 고정 전극에 대해서 상대적으로 얇은 다이어프램의 변위에 의존하고 있다. 커패시턴스의 변화는 매우 작은 값으로 변화되기 때문에 출력을 나타내는 측정 기술이 필요하다. 제어부에서는 ASIC화된 전용 IC를 채용하고 있다.

후막 프린트 기술은 다층 구조를 실현함으로써 정전용량을 구현하게 될 수 있다. 높은 유전상수를 갖는 유전체 페이스트는 미소변위 메카니즘에서도 정전용량의 값을 크게 할 수 있으며 유전체 페이스트 조성 성분 대부

분이 글래스류를 함유하고 있으므로 소결시킨 후 크리프 현상이 없으므로 센싱 엘리먼트로 이용되는 데 적합하다고 할 수 있다. 여기서 각 전극에는 도전성 페이스트로 Pt를 사용하였으며 지지대 및 다이어프램은 알루미나( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )를 주 성분으로 15pound로 압축 후 연마하였다. 유전체 페이스트의 물질은  $\text{Ti}+\text{Ba}$ 를 사용하였으며 지지대와 다이어프램 사이에는 가드 링을 스페이서로 삽입하였다.

내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요. 내용을 입력하세요.

### 2. 본 론

#### 2.1 정전용량형 게이지의 이론적 배경

본 과제를 연구하기 위해서 다음과 같은 몇 가지 가정을 설정한다. 먼저 유전체를 프린팅하고 열처리한 후막 두께는 다이어프램의 두께에 비해서 무시할 수 있을 정도로 얕다. 다음, 스트레인 게이지는 동방성 물질을 가지는 3차원으로 가정한다. 왜냐하면 압력이 인가되었을 때 균등하게 분포하는 것으로 보는 것이다.

그림 1은 본 논문에서 제작된 형태의 정전용량형 후막 스트레인 게이지 기본구조를 간단하게 나타내고 있다. 여기서 원형 다이어프램의 둘레는 모두 고정되어 있다고 가정한다. 유전체 물질은 양 극판중 다이어프램 면에 고착된 형태의 구조로 하며 압력에 따라서 다이어프램이 변위를 일으키는 데 이 변위는 중앙부에 위치한 유전체 만을 직접 변위시킨다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 어떤 방향으로 압력이 인가되던지 압력에 의한 다이어프램의 변위는 바로 유전물질의 기하학적인 변형을 가져온다는 것이다. 즉, 유전물질의 변형은 유전체의 구조 변화를 가져오면서 결과적으로 정전용량의 변화를 가져오게 되는 것이다. 스트레인이 증가하면 비례하여 정전용량값도 증가한다. 이러한 현상을 압전전용량(piezocapacitive) 효과라고 부를 수 있다.

여기서 유전체 후막의 두께를  $h$ , 면적을  $A$ , 그리고 유전율을  $k$ 라고 하면 평행판 전극에서 정전용량은 다음과 같다.

$$C = \frac{kA}{h} \quad (1)$$

양변에 미분을 취하면

$$\frac{dC}{C} = \frac{dk}{k} + \frac{dA}{A} - \frac{dh}{h} \quad (2)$$

한편 그림 1에서 포아송비  $\nu = (-\Delta w/w)/\epsilon$ 를 이용하면

$$\frac{dA}{V} = (-1 - \nu)\epsilon \quad (3)$$

$$\frac{dh}{h} = -\nu\epsilon \quad (4)$$

를 얻을 수 있다. 따라서 식(2)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dC}{C} = \frac{dk}{k} + (-1 - \nu)\epsilon - (-\nu\epsilon) \quad (5)$$

따라서

$$\frac{dC}{C} = \frac{dk}{k} - \epsilon \quad (6)$$

또 게이지 factor는

$$GF = \frac{dC/C}{\epsilon} \quad \text{또는}$$

$$GF = \frac{dk/k}{\epsilon} - 1 \quad (7)$$

로 된다. 여기서  $\epsilon$ =축방향에 평행인 스트레인이다.

따라서 식(7)에서 알 수 있듯이 게이지 factor는 두 가지 요소에서 상승한다. 하나는 유전상수를 고려한 압전 정전용량 효과 즉,  $(dk/k)/\epsilon$ 와 어떻게 배치되어 있는가 하는 기하학적인 구조(여기서는 -1)이다. 기하학적인 구조에서 -부호를 보이는 것은 압력의 방향이 반대 방향으로 향하고 있음을 나타내고 있다. 결과적으로 압력에 따른 유전체의 기하학적인 구조변화는 게이지율의 변화량에 무시할 정도로 작으므로 그다지 큰 영향을 미치지 못한다는 것이다. 따라서 게이지율은 유전상수의 크기에 절대적으로 비례한다는 것을 알 수 있다. 압저항(piezoresistive) 효과를 설명하는 것도 이와 같은 메카니즘을 가지고 있다고 볼 수 있다. 이러한 capacitive 스트레인 게이지는 게이지율이 약 70이상을 가지고 있는 것으로 압력에 따른 유전체의 유전율 변화는 게이지율에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.



그림 1 후막 capacitive 스트레인 게이지의 기본구조

## 2.2 스트레인 게이지의 제작

정전용량형 스트레인 게이지는 세라믹( $Al_2O_3$ ) 다이어프램과 지지대에 전극(Pt)을 형성하고 사이에 유전체를 형성시킨 구조를 가지고 있다. 전극은 그림 2(a)와 같이 기준전극  $C_1$ 과 변위전극  $C_2$ 를 형성하기 위해서 편홀을 만들었으며 편홀의 직경은 0.5mm의 크기로 전극 컨택 용으로 강철을 사용하여 삽입하였다. 유전체는 Ba과 Ti를 50:50의 비로 형성하여 유전체 페이스트로 제작하였다. 한편, 전극은 Pt를 주성분으로 전도성 페이스트로 제작하였고 전극 형성은 지지대와 다이어프램 양극에 250mesh의 SUS 스크린을 이용하여 마스크를 만들었으며  $C_1$ 의 면적은 약 200 $\mu m^2$ 로 설계하였으며  $C_2$ 는  $C_1$ 보다 약 5% 큰 값을 가지고도록 설계하였다(그림 2(b)). 이는 제어부에서 입력을 받아아들일 때  $C_1$ 을 기준전극으로 사용하기 때문이다. 한편 그림 2(d)는 염마된 다이어프램이고 그림 2(e)는 다이어프램 위에 전극을 형성하고 유전체 페이스트를 프린팅하여 전조과정과 소결과정을 거친 형태를 나타내고 있다. 프린팅시에는 수동 프린팅 기기를 이용하는 데 스캐너를 사용하는 각도는 일정한 힘으로 45도를 유지하면서 한번에 실시하며 반복을 하면 소결 후 두께가 일정하지 않을 수 있으므로 주의해야 한다. 이렇게 제작된 다이어프램은 120°C에서 120분 정도 충분하게 건조시킨 후 상온에서 안정화시킨다. 같은 공정으로 유전체 페이스트를 스크린 프린팅한 후 전조과정을 거치는 데 여기서도 약 120분 정도 건조를 시킨다. 이는 유전체의 입자를 안정화시키는 데 목적이 있으며 그 후 그림 3과 같이 10°C/min 비율로 증가시키면서 850°C까지 증가시켜서 10분 유지한 후 서서히 상온으로 내린다. 이 때 무리하게 급하게 강화시키면 입자에 균열이 가해지므로 주의해야 한다. 이렇게 제작된 시료의 SEM 사진을 보면 그림 4(a)와 같다. 여기서 전극의 두께는 약 10 $\mu m$ 이고 유전체의 두께는 약 15 $\mu m$ 정도를 보이고 있다. 건조과정에서 충분한 건조를 하지 않으면 유전체의 입자가

조밀하게 형성되지 못하므로 주의해야 한다. 그리고 다이어프램의 표면을 세정하지 않으면 그림4(b)와 같이 들뜸 현상이 생기므로 프린팅하기 전에 크린싱을 잘 해야 한다. 이렇게 제작된 지지대와 다이어프램 사이에는 50 $\mu m$ 정도의 가드 링(그림 2(c))을 삽입하고 전도성 접착 페이스트(D-723S)를 이용하여 상온에서 접착하여 제작하였다. 지지대의 두께는 5mm, 다이어프램의 두께는 300 $\mu m$ 로 제작하였으며 정격압력은 0.5bar를 기준으로 시험하였다.

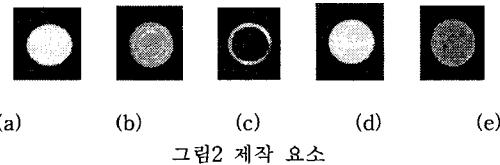


그림2 제작 요소

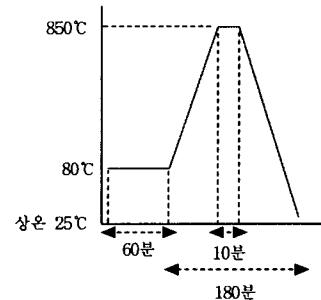


그림3 소결 과정의 온도 사이클

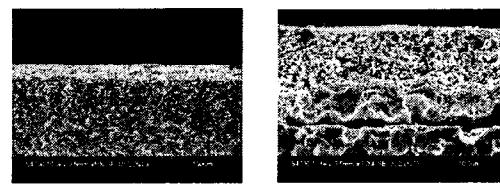


그림 4 SEM 사진

## 3. 시험결과 및 고찰

제작된 압력센서의 특성 측정은 압력 교정에 사용되고 있는 dead weight tester(분동식 압력 교정기 : DPG(주) 협성)를 사용하여 측정하였다. 본 논문에서 측정압력은 0.5kgf/cm<sup>2</sup>의 저압용을 정격압력으로 설정하였다. 고압용에서도 기본 원리는 저압용과 같으며 단지 다이어프램의 두께를 가변하여 정하고 있다. 압력에 대한 출력 특성을 고찰하는 데는 압력을 0kgf/cm<sup>2</sup>에서 0.05kgf/cm<sup>2</sup>씩 증가하면서 최대 정격 1.0kgf/cm<sup>2</sup> 까지 단계적으로 증가시키면서  $C_1$ 과  $C_2$ 값을 디지털 LCR 미터(ED1620 : ED Lab. (주))를 이용하여 측정하였고, 반대로 1.0kgf/cm<sup>2</sup>에서 0.05kgf/cm<sup>2</sup> 감소시키면서 출력이 변화되는 값을 측정하였다. 이렇게 측정된 정전용량의 데이터를 이용하면 Full scale 즉 최대 압력에 대한 출력을 정전용량의 변화로 나타낼 수 있으며  $C-V$  제어부를 이용하면 감도, 비직선성 그리고 히스테리시스 등을 나타낼 때 이용할 수 있다. 그림 5는 가드 링의 두께를 100 $\mu m$  70 $\mu m$  50 $\mu m$ 로 변화시키면서 정전용량의 변화를 측정한 것이다. 가드 링의 두께는 다이어프램이 과압에 대하여 견딜 수 있는 최대값으로 정한다. 그러므로 두께에 따른 출력값의 변화를 고찰해 둘 필요가 있다. 두꺼울수록 정전용량의 직선

성이 크고 얇을수록 작은 변화를 보이고 있다. 또 과압이 인가될 경우, 다이어프램이 파괴되므로 다이어프램이 지지대에 맞닿는 순간 지지대가 보호를 해 줄 수 있도록 가드 링의 두께를 정하여 정전용량 값의 최대값에서 직선성을 갖도록 하는 것이다. 여기서는  $70\mu\text{m}$ 로 설계값으로 정하고 이 값보다 큰 값의 변화를 관찰하였다. 그러나 상품화를 하기 위해서는 약  $30\mu\text{m}$ 까지 얇게 하는 것이 안정된 범위내에서 직선성을 가질 수 있다고 본다.(그림5)

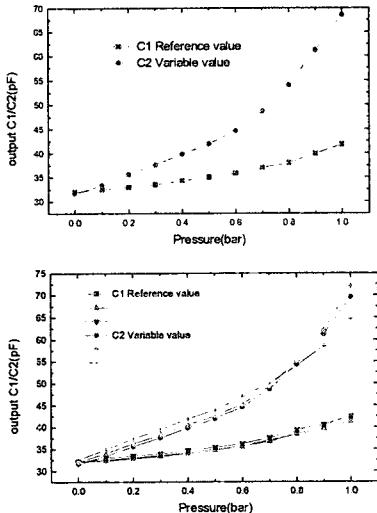


그림 5. 가드 링의 두께에 따른 정전용량의 변화

한편, 시뮬레이션(ANSYS 5.8)을 이용하여 변위에 대한 계산된 결과를 플로팅하면 그림 6과 같이 압력에 따라서 변위의 출력값과 대응할 수 있으므로 다이어프램 변형은 그림과 같이 직선적으로 변화함을 볼 수 있다. 또 압력에 대한 응력의 변화도 같은 특성을 가지고 있으므로 직선적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 압력센서의 감도는 스트레인 게이지에 발생하는 최대 응력과 스트레인 게이지 율로써 정해진다. 압력에 대한 감도를 높이기 위해서는 최대 응력과 게이지율을 크게 할 필요가 있다.

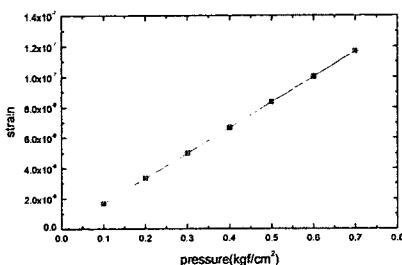


그림 6 압력에 대한 변위의 직선특성

압력센서의 비직선성은 압력을 전기신호로 변환하는 특성의 선형정도를 나타내는 것으로 압력을 인가하지 않았을 때 출력 전압과 정격 압력( $0.5\text{kgf/cm}^2$ ) 인가시의 출력 전압을 이은 직선을 기준으로 하고 이 직선으로부터의 최대 편차를 최대 눈금에 대한 %로 표시하는 데 여기서는 그림 7과 같이 압력에 대한 출력의 정전용량 값을 간접적으로 표현하였다.

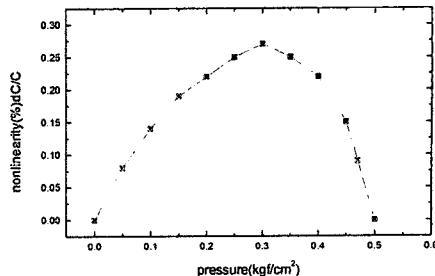


그림 7 압력에 대한 정전용량 출력의 비직선 오차율

### 3. 결 론

본 논문에서 양 전극 사이에 사용된 가드 링의 두께는  $70\mu\text{m}$ 을 사용하였으며  $C_1$ 의 초기값(기준값)은  $25\text{pF}$ 정도이다. 이 값은 압력 변화에 따른 변화량은 작지만,  $C_2$  와의 차에 의해서 정전용량의 변화값으로 되며 온도 변화에 따른 보상에도 기여하고 있다. 기준값( $C_1$ )은 가드 링의 두께( $100, 70, 50\mu\text{m}$ )에 따라서 변화를 보이고 있는 데 최소  $50\mu\text{m}$ 까지 가변시키면서 변화량 추이를 볼 수 있었고 이 때  $C_1$ 의 값은 약  $35\text{pF}$ 이다. 이 값은 제어부를 ASIC화 할 때  $C_1/C_2$ 의 입력 파라미터를 정하는 데 기준으로 사용될 수 있다. 한편, 출력 특성은 그림 5에서 보인 바와 같이 압력 변화에 대한 직선구간( $0.5\text{bar}$ ) 만을 사용하게 되며 미소압( $1\text{bar}$ 이하) 측정과 과압에서 파괴되지 않는 안정성을 가지는 것이 특징이다. 또, 직선 영역은 압력센서로 이용하는 데 반해서 비직선적으로 급변하는 구간을 이용하면 다른 센서에도 활용이 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 민남기 "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-II" 한국전기전자재료학회, Vol.10, No.10, p102 2~1028, 1997
- [2] 민남기 "Cu-Ni 박막 스트레인 게이지를 이용한 다이어프램식 압력센서-I" 한국전기전자재료학회, Vol.10, No.10, p938~944, 1997
- [3] 大倉 征, "壓力 變換機," 計測技術, vol.1, pp.54~59, p.44~47, 1987
- [4] K.Rajanna, S. Mohan, M.M Nayak and N.Guna "Thin-film pressure transducer with manganese film strain gage," Sensors and Actuators A, vol24, p 39, 1990.
- [5] K.Rajanna, S. Mohan, M.M Nayak and N.Guna and A.E. Muthunayagam, "Pressure transducer with thin film strain gages," IEEE Trans. Electron D vol.40,no.3,pp.521~524, 1993.
- [6] Y.Kanda, A.Yasukawa, "Optimum design consid for silicon piezoresistive pressure sensors" Sensors Actuator A 62, p539~542, 1997
- [7] B.Morton, L.Pirozzi, M. Prudenziati, "Strain sens film and cermet resistors:measured and physical qua J.Phys. D:Appl.Phys.12,51~54, 1979
- [8] N.M.White, "A study of the piezoresistive effect i film resistors and its application to load transductio Thesis, Univ. of Southampton, p99~107, 1988
- [9] Z.Xiao, O Engstrom, N.Vidovic, "Diaphragm deflection of silicon interferometer structures used as pressure sensors" Sensors and Actuators, A58, p99~107, 1997
- [10] Zenon Gniazdowski, Pawel Kowalski, "Practical approach to extraction of piezoresistance coefficient", Sensors and Actuators, A68, p229~332, 1997