

< 논문 >

스테인리스 강 박막 및 기판을 이용한 배열형 정전용량 압력센서의 전기 기계적 특성연구

이흥식* · 장성필** · 조종두†

(2006년 2월 23일 접수, 2006년 8월 16일 심사완료)

Study on Electro-Mechanical Characteristics of Array Type Capacitive Pressure Sensors with Stainless Steel Diaphragm and Substrate

Heung-Shik Lee, Sung-Pil Chang and Chongdu Cho

Key Words : Capacitive Pressure Sensor(정전용량 압력센서), Micromachining(미세가공), Stainless Steel(스테인리스 강), Residual Stress(잔류응력), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

In this work, mechanical characteristics of stainless steel diaphragm have been studied as a potential robust substrate and a diaphragm material for micromachined devices. Lamination process techniques combined with traditional micromachining processes have been adopted as suitable fabrication technologies. To illustrate these principles, capacitive pressure sensors based on a stainless steel diaphragm have been designed, fabricated and characterized. The fabrication process for stainless steel micromachined devices keeps the membrane and substrate being at the environment of 8.65MPa pressure and 175°C for a half hour and then subsequently cooled to 25°C. Each sensor uses a stainless steel substrate, a laminated stainless steel film as a suspended movable plate and a fixed, surface micromachined back electrode of electroplated nickel. The finite element method is adopted to investigate residual stresses formed in the process. Besides, out-of-plane deflections are calculated under pressures on the diaphragm. The sensitivity of the device fabricated using these technologies is 9.03 ppm kPa⁻¹ with a net capacitance change of 0.14 pF over a range 0~180 kPa.

1. 서 론

미세가공(Micromachining) 혹은 마이크로 전자기계시스템(MEMS)은 반도체 가공기술(IC Processing Technology)에서 시작되어 실리콘 기판상에서 미세 기계요소 즉 밸브, 모터, 펌프, 기어 등의 부품을 2 차원 평면으로 제작한 것이 그 시초였으며, 1970년대 이후 표면 미세가공(surface micro

machining) 기술과 벌크 미세가공(bulk micro machining) 기술의 등장으로 실리콘 기판을 기반으로 한 3 차원 구조물을 제작하게 되었다.⁽¹⁻⁵⁾

실리콘 기판의 마이크로 구조물 제작 시, 외부 환경에 의한 부식 및 노이즈(noise)로부터 구조물을 보호하기 위해 패키징(packaging)을 하게 되지만,^(6,7) 패키징에 따른 비용이 마이크로 구조물 제작에 드는 비용과 비슷한 수준이거나 더 많음으로 인해 가격상승의 원인이 된다. 만약 외부환경의 영향에 대하여 강한 재료를 직접 구조물이나 기판의 재료로 사용할 수 있게 된다면 패키징 공정을 간소화 시키거나 생략할 수 있게 되어 가격절감의 효과를 가져올 수 있을 뿐 아니라 우주나 바다와 같은 거친 환경에 응용될 수 있다.

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : cdcho@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7321 FAX : (032)868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 전자공학과

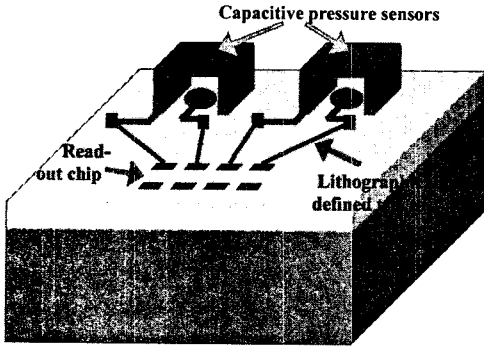


Fig. 1 A schematic view of integrated robust capacitive pressure sensors

미세가공기술을 이용해 MEMS 시장에 소개된 압력센서의 종류에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 정전용량 효과(Capacitive effect)를 이용하여 압력을 측정하는 것이고, 두 번째는 압저항 효과(Piezoresistive effect)를 이용한 것이다.

두 가지 종류 모두 많이 이용되었으나, 높은 측정 민감도와 낮은 전력손실, 높은 안정성으로 인해 정전용량 효과를 이용한 압력센서가 더 많이 소개되었다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 그러나 초소형 정전용량 압력센서를 상용화하기 위해서는 외부 잡음(noise)이나 기생정전용량(Parasitic capacitances)과 같은 기생효과(Parasitic effects)를 효과적으로 완화시켜야 하며, 이를 위해 Fig. 1 과 같이 센서부와 리드아웃 칩을 식각과정을 통해 연결하여 하나의 기판 안에 집적시켜 회로부와 센서부를 통합해야 한다. 이러한 집적화 과정을 통해 기생효과를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 버퍼링(buffering)을 높이고 정전용량을 주파수나 전압으로 변환시켜주는 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 박막 및 기판의 재료로 스테인리스 강을 사용하여 외부환경에 강한 마이크로 정전형 압력센서를 제작하였다. 제작 공정으로 미세 기계가공 기술과 마이크로 집적회로 제작공정이 사용되었으며, 공정 후의 박막과 기판 모두 별도의 패키징 없이 외부환경에 노출되었다. 제작된 배열형 압력센서의 압력에 따른 정전용량이 실험적 방법에 의해 측정되었으며, 제작 공정에서 발생하는 박막의 잔류응력을 해석하기 위해 유한요소 해석을 하였다. 또한, 잔류응력(Residual stress)이 고려된 박막의 외부 압력에 따른 처짐량을 이론적으로 제시하고, 수치적 해석과 실험을 통해 검증하였다.

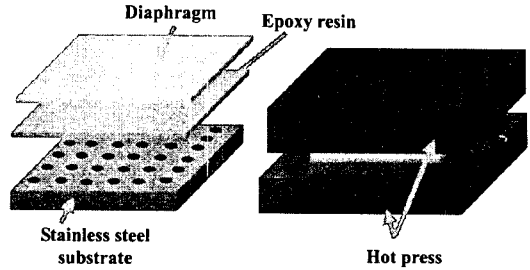


Fig. 2 Lamination process of a diaphragm and a substrate by using the hot press

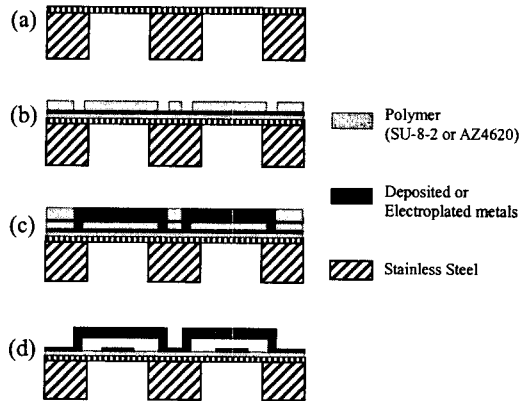


Fig. 3 Fabrication sequence of pressure sensor based on stainless steel diaphragm

2. 제작공정

스테인리스 강을 박막과 기판 재료로 사용하여 마이크로 압력센서를 제작하는 과정을 Fig. 2, Fig. 3 에 나타내었다. 기판(substrate)을 제작하기 위한 변의 길이가 6cm, 높이 0.8mm, 표면 거칠기가 약 6~8 μ m 인 정사각형 스테인리스 강 기판에 미세가공과정을 통해 6 \times 6 배열형태로 중심과 중심의 간격이 7mm 인 직경 2mm 의 구멍을 만든다. 냉간 압연(cold rolled)을 통해 제작된 상용 스테인리스 강 박막(Type 302, Precision Brand Product, INC)을 제작된 스테인리스 강 기판 위에 얹고 프레스(Hot press)를 이용하여 접합시킨다. 사용된 박막의 두께는 12.7 μ m 이며, 표면 거칠기는 약 1000 \AA 이다. 접합을 위해 에폭시 레진(EIS epoxy laminate prepreg no 106)이 사용되며, 175 $^{\circ}$ C 의 압력판이 8.65Mpa 의 압력으로 박막과 기판을 30 분 동안 압착시킨다. 그 후 이온반응식각(RIE: Reactive ion etching)을 통해 압착과정에서 외부로 새어 나온 에폭시 레진을 제거한다[Fig. 3(a)]. 박막과 기판이 일체형으로 완성되면 스테인리스 강 박막 위에 표면 미세가공

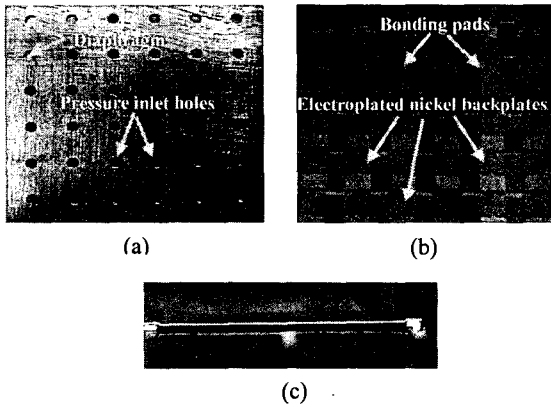


Fig. 4 Photograph of fabricated pressure sensors (a)Side exposed to environment (b)Rear showing surface micromachined backplate (c)A closed-up side view of gap

공정과 벌크 미세가공 공정을 통해 감지부(sensor part)로 사용될 구조물을 형성하게 된다. 박막 위에 접착층(adhesion layer)으로 사용될 티타늄(Ti)을 250Å 두께로 증착시키고, 그 위에 절연층(insulation layer)으로 사용될 7μm 두께의 에폭시 레진 SU-8-2(MicroChem Corp.)를 증착시킨다. 바닥 전극과 전기도금 씨드층(electroplating seed layer), 그리고 접합패드(bonding pad)를 만들기 위해 Ti/Cu/Ti 를 250/6000/250Å 두께로 에폭시 레진 위에 증착시키고 준비된 마스크(mask)를 이용해 패턴을 형성하여 AZ4620 감광제(photoresist: Clariant Corp.)층을 약 25~27μm 두께로 쌓는다[Fig. 3(b)]. 패턴된 감광제 층을 통해 전기도금 몰드(mold)가 만들어진다.

센서부로 사용될 구조물을 제작하기 위해 씨드층으로 Ti/Cu/Ti 을 증착시킨다. 그 위에 약 25 μm 두께로 감광제 층을 쌓고, 전기도금 몰드로 사용될 패턴을 형성시킨다. 이 몰드안에 전기 도금 방식으로 니켈을 채운다[Fig. 3(c)]. 마지막으로 구조물과 박막 사이의 감광제 희생층(sacrificial layer)과 구조물 외부에 있는 씨드층을 제거하여 완성한다. Fig. 4 는 배열형 정전용량 압력센서의 완성된 모습을 보여준다.

3. 이론적 모델

정전 압력센서는 외부에서 압력이 가해질 때 박막의 처짐이 발생하여 박막과 구조물 사이의 간격이 변하게 되고, 이에 따른 정전용량의 변화를 통해 가해진 압력을 측정하게 된다. 스테인리스 강

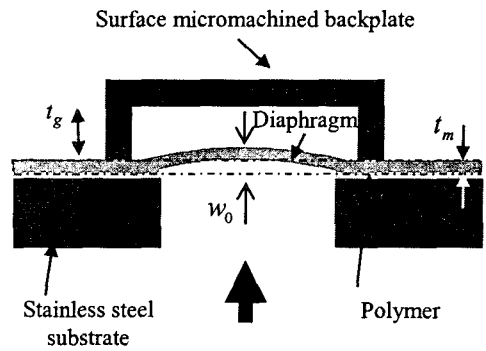


Fig. 5 A schematic cross-section of a stainless steel diaphragm and substrate

박막의 처짐 량과 정전용량을 해석하기 위한 개념도를 Fig. 5 에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 박막은 외부에서 가해지는 압력에 의해 거동하게 된다. 여기서 t_g 는 박막과 센서판(backplate) 사이의 초기 간격을 나타내고, t_m 은 박막의 두께, w_0 는 박막 중앙에서의 처짐 량을 나타낸다. 이론적 모델을 구성하기 위해 제안된 가정은 다음과 같다. (a)박막은 기계적으로 등방성 물성치를 가지고 있다. (b)박막 위에 증착된 전극(electrode)의 두께는 박막의 두께에 비해 매우 작으므로 해석 시 무시되었다. (c)박막과 센서판(backplate) 사이의 간격이 측면방향의 길이보다 작으므로 전기장이 옆으로 휘는 프링징 효과(fringing effect)는 무시되었다.

이러한 조건에서 원형박막의 처짐을 반지름 r 에 대한 함수 $w(r)$ 로 나타내면 다음과 같다.^(11, 12)

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

여기서 w_0 는 박막 중앙 부분의 처짐 량을 나타내며 다음 식에 의해 구해진다.

$$\frac{Pa^4}{Et_m^4} = \frac{16}{3(1-\mu^2)} \frac{w_0}{t_m} + \frac{7-\mu}{3(1-\mu)} \frac{w_0^3}{t_m^3} \quad (2)$$

E 는 박막의 Young's modulus 이고, μ 는 박막의 Poisson's ratio 이다. 단, 처짐 량이 박막의 두께에 비해 적을 경우 다음 식에 의해 구해진다.

$$w_0 = \frac{Pa^4}{64D} \quad (3)$$

식 (3)에서 P 는 외부에서 가해지는 압력이며, a 는 기판 구멍(hole)의 반지름, D 는 $Et_m^3/12(1-\mu^2)$ 으로 표시되는 박막의 flexural rigidity이다. 제작 공정에서 발생하는 잔류응력을 고려한 박막의 처짐 량을 구하는 식은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$w(r) = \frac{Pa^2}{4\sigma_i t_m} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right], \quad (\sigma_i \neq 0) \quad (4)$$

여기서 σ_i 는 제작공정 중 발생한 잔류응력, t_m 는 박막의 두께, r 은 박막 중앙부분으로부터 떨어진 거리를 나타낸다. 위의 식은 박막의 처짐 량이 박막의 두께에 비해서 작을 때 적용 가능한 식으로 Bromley가 제시한 식의 고차 항을 무시함으로 얻어진다.⁽¹³⁾

모델링 과정에서 전기장의 프린팅 효과가 무시된다고 가정되었으므로 전기장은 센서판의 면에 대하여 수직방향으로 흐른다. 이때 정전용량은 박막의 형상함수 $w(r)$ 에 대하여 표현할 수 있다.

$$C_s = \epsilon_0 \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^r dr \frac{r}{t_g - w(r)} \quad (5)$$

4. 정전용량 및 박막의 처짐 측정

배열형 정전용량 압력센서에서 센서 각각의 정전용량 및 처짐 특성을 기술하기 위해 Keithley 3322 LCZ 미터를 사용하여 측정하였다. 우선, 제작된 압력센서를 상용 압력센서(Fluke Corp. PV 350 Digital Pressure/Vacuum Module)와 디지털 멀티미터(Digital multimeter)가 연결된 고정구에 설치한 후 밀봉하고, 압력원(pressure source)으로 사용될 압축

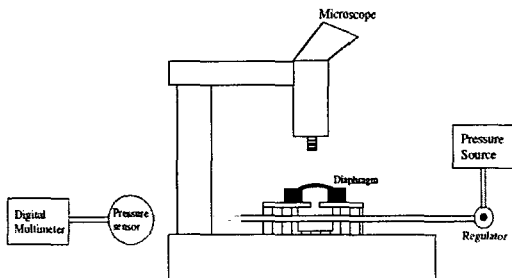


Fig. 6 Optical diaphragm deflection measurement setup

된 질소 가스 관을 조절기(regulator)와 함께 고정구에 연결시켜 압력의 변화를 조절한다. 그 후 LCZ 미터를 제작된 압력센서에 연결시켜 정전용량 압력센서의 특성 데이터를 얻는데 사용한다. 정전용량 값을 얻은 후, 박막 위에 전기도금 된 NiFe를 제거하여 외부에 노출된 박막을 현미경 스테이지(stage)에 놓는다. 고정구를 통해 압력을 가한 후, 현미경을 통해 박막의 처짐을 관찰하고, z-축 마이크로 미터(micro meter)를 이용해 박막의 처짐 량을 측정한다. 위의 과정에 사용된 실험 장비 구성을 Fig. 6에 나타내었다.

5. 유한요소 해석

스테인리스 강 박막과 기판을 접합하는 공정에서 압력 관에 의해 가해진 열과 압력에 의해 박막에 잔류 응력이 발생하게 된다. 발생하는 잔류응력을 풀림처리(annealing)하여 제거할 수 있으나 풀림 온도가 400℃이상의 고온이어서 접착 층의 손상 등 부작용이 발생하게 되므로 발생마이크로 구조물에 적용하기는 적합하지 않다. 그리하여

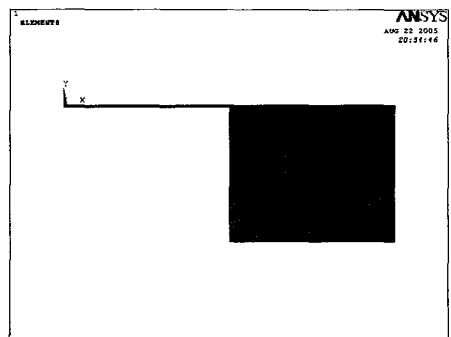


Fig. 7 A 2-D axisymmetric FE model of the device

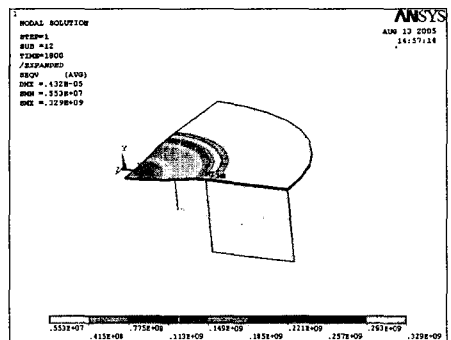


Fig. 8 Residual stress analysis at 30minutes

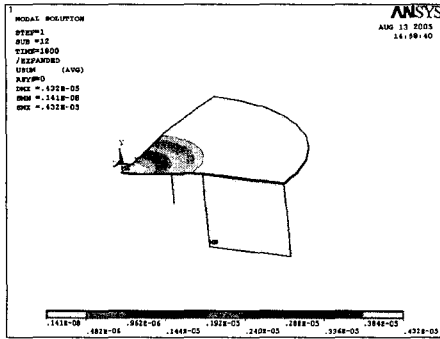


Fig. 9 Deflection of the stainless steel diaphragm under the residual stress effect

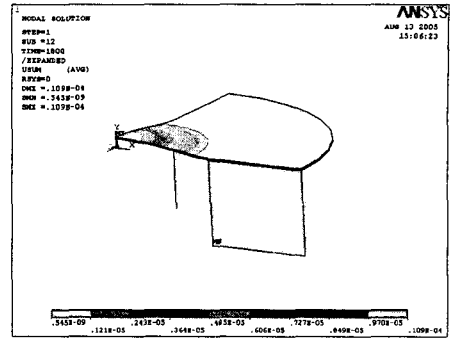


Fig. 11 Deflection of the stainless steel under 180kPa pressure with the residual stress

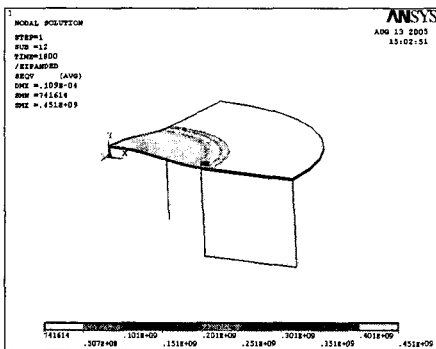


Fig. 10 Stress analysis under 180kPa pressure with the residual stress

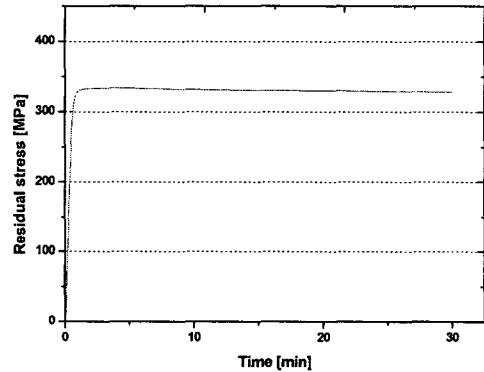


Fig. 12 Result of the residual stress analysis of the stainless steel diaphragm during 30 minutes

공정 중 발생하는 잔류응력에 의한 박막의 변형량을 해석하여 설계에 반영해야 한다.

접합 과정 중에 발생하는 잔류응력의 양과 박막의 처짐량을 유한요소모델을 통해 해석하였다. 제작 과정 중, 유한요소 모델 형성 및 해석을 위해 ANSYS 8.0을 사용하였으며 8850개의 요소와 8724개의 절점으로 모델링되었다. Fig. 7은 유한요소 해석 시 사용된 축대칭 모델(axisymmetric model)로, 박막과 기판 모두 스테인리스 강 재질을 적용하였으며 센서판(backplate)과 박막 위의 전극은 생략되었다. 박막과 기판의 두께는 각각 12.7 μ m, 0.8mm 이고 박막과 기판 사이의 접착층(bonding layer)은 에폭시 수지(epoxy resist)로 7 μ m 두께이다. 구속조건으로는 박판과 기판의 외곽을 r, Z 방향으로 모두 구속시켰다.

프레스를 이용해 박막과 기판을 접합하는 과정에서 발생하는 잔류응력을 해석하기 위해 적용된 외부 압력과 온도는 8.65MPa, 175 $^{\circ}$ C~25 $^{\circ}$ C (냉각)로 실제 제작에서의 동일한 조건을 가하였으며, 완성된 정전용량 압력센서 박막의 처짐을 해석하기 위해 기판의 2mm 구멍을 통해 스테인리스 박막에 가해지는 압력범위는 0~180kPa 이다.

모든 해석에 접합 층으로 사용된 에폭시 수지를 고려하였으며, 2 차원 축대칭 모델을 사용하여 1/4 확장 모드로 결과를 나타내었다. 공정 과정에서 압력과 온도가 가해지는 시간이 30 분이므로, 시간에 따른 잔류응력을 해석하기 위해 과도해석(transient analysis)을 수행하였다. Fig. 8~Fig. 9에 30분이 지난 시점의 잔류응력과 잔류응력으로 인해 박막 중앙부의 변형된 양을 나타내었으며, 완성된 센서의 기판을 통해 박막으로 0~180kPa의 압력을 가해주었을 때 박막의 응력과 처짐량을 Fig. 10 ~ Fig. 11에 나타내었다.

6. 결과

제작된 압력센서의 압력에 따른 정전용량과 처짐량 및 기계적 특성에 영향을 미치는 잔류응력에 대한 해석결과를 나타내었다. Fig. 12는 유한요소 해석에 의해 얻은, 초기 30분 동안 스테인리스 강 박막에 형성되는 잔류응력을 보여준다. 0~2분 이내에 잔류응력이 300MPa 이상으로 형성되고 30

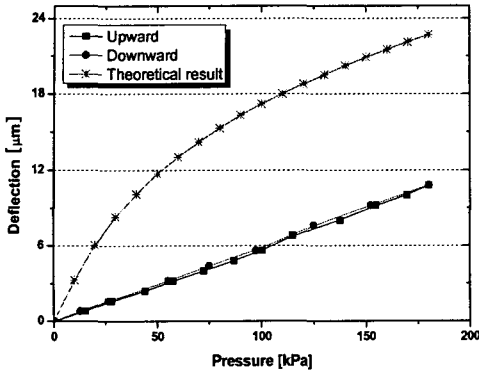


Fig. 13 Comparison of the deflection of stainless steel diaphragm with no residual stress effect theory

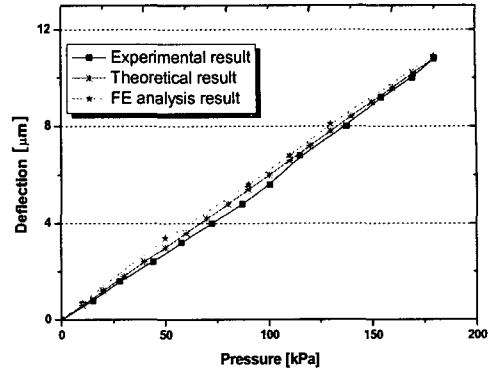


Fig. 15 Comparison of the deflection of stainless steel diaphragm with residual stress effect theory and FE analysis result

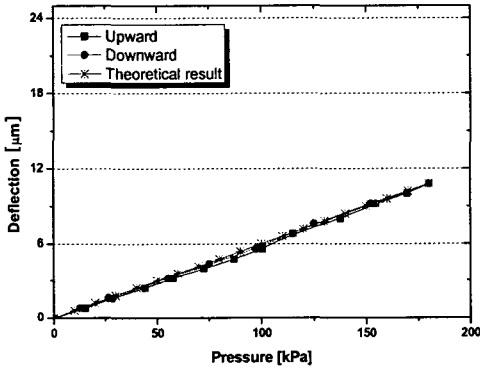


Fig. 14 Comparison of the deflection of stainless steel diaphragm with the residual stress effect theory

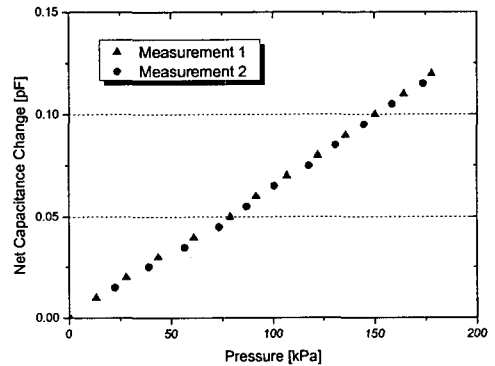


Fig. 16 Net capacitance change versus pressure for capacitive pressure sensor

분이 되기까지 조금씩 낮아지지만, 큰 변화량 없이 그 값이 유지됨을 알 수 있다. 해석 결과로, 30분이 되었을 때의 잔류응력 값은 329MPa이며 잔류응력으로 인해 박막 중앙 부분에 처짐량은 약 4.5 μm 이다. Fig. 13은 식 (2)를 통해 얻은 박막의 처짐에 대한 이론 값과 실험을 통해 얻은 값을 비교하여 나타낸 그래프이다. 이론 값과 실험 값 사이에 많은 차이가 발생하였음을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 12에서 유한요소 해석을 통해 구한 잔류응력 값을 식 (4)에 적용하여 얻은 박막의 처짐량을 실험을 통해 얻은 처짐량과 비교한 결과 거의 일치함을 알 수 있었다. Fig. 14에 잔류응력을 고려하여 얻은 이론 값과 실험에 의해 얻은 값을 비교하여 나타내었다. Fig. 15는 실험에서 얻은 처짐량과 식 (4)를 통해 잔류응력을 고려한 이론 값, 그리고 유한 요소 해석을 통해 얻은 값을 서로 비교하여 나타낸 그래프이다. 유한요소 해석 결과가 실험결과와 이론 결과에 유사함을 나타낸다.

제작된 압력센서의 압력에 따른 정전용량의 변화를 Fig. 16에 나타내었다. 두 차례의 실험에 의해 얻은 데이터를 보여주며 외부에서 가해지는 압력의 범위가 0~180kPa 일 때 정전용량의 변화는 0.14pF 이었고, 민감도는 약 9.03ppm kPa^{-1} 이었다. Fig. 17은 박막의 처짐량과 정전용량과의 관계를 나타내는 그래프이다.

7. 결론

이제까지 실리콘 기반이 주류를 이루었던 마이크로머시닝 공정을 스테인리스 강과 같은 외부 환경에 강한 재료로 대체 할 수 있게 될 때, 제작공정의 단순화와 패키징 공정의 간소화를 이루게 되어 제작비용의 절감에 기여할 수 있게 된다. 또한, 공정비용을 최소화 하기 위해서는 마이크로머시닝 공정을 통해 제작된 박막 구조물의 거동특성을 미리 예측해야 하며, 이것을 위해 이론 식을 통해

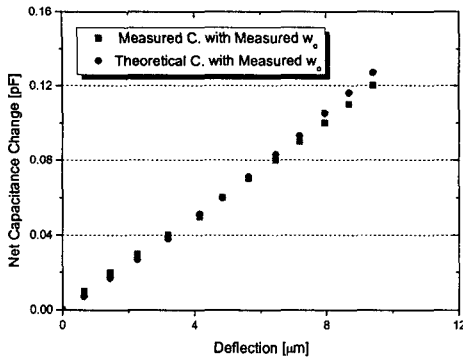


Fig. 17 Net capacitance change versus deflection of capacitive pressure sensor

예측한 결과와 유한요소 해석을 통해 예측한 결과가 실제 실험에 대하여 얼마만큼의 신뢰성을 갖는지는 중요한 설계요인이 된다.

본 연구에서는 스테인리스 강 박막과 기판을 이용하여 배열형 정전용량 압력센서를 제작하였다. 미세 기계가공 공정과 마이크로머시닝 공정을 통해 기판과 박막을 제작하였으며, 센서부와 회로부가 통합된 압력센서를 제작하였다. 제작 공정에서 발생하는 잔류응력은 약 329MPa 로, 유한요소법을 통해 해석되었다. 또한, 박막의 처짐을 수학적으로 예측하기 위해 잔류응력을 고려해야 함을 실험과 수치적 해석을 통해 밝혀냈다.

외부에서 180kPa 의 압력이 가해질 때 센서 박막의 처짐량은 약 11μ 이었다. 제작된 압력센서의 민감도는 동일한 압력범위에서 9.03ppm kPa⁻¹ 로 최대 0.14pF 의 정전용량 값을 보였다.

참고문헌

(1) Baltès H., 1997, "CMOS micro electro mechanical

systems," *Sensors Mater.*, Vol. 9, pp.331~346.
 (2) MacDonald N. C., 1996, "SCREAM microelectro mechanical systems," *Microelectron. Eng.*, Vol. 32, pp.49~73.
 (3) Dong-il Cho, kook-Jin Jeon, Sang-Woo Lee, 1997, "Surface Micromachining Techniques," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 37, No. 12, pp.73~77.
 (4) Howe R. T., 1994, "Applications of silicon micro machining to resonator fabrication," Proc. 1994 IEEE Int. Frequency Control Symp. (The 48th Annual Symp.) (Cat. No. 94CH3446-2), pp. 2~7.
 (5) Mastrangelo C. H., Zhang X. and Tang W. C., 1995, "Surface micromachined capacitive differential pressure sensor with lithographically-defined silicon diaphragm," Proc. Int. Solid-State Sensors and Actuators Conf. TRANSDUCERS '95 (25-29 June 1995), Vol. 1 pp.612~615.
 (6) Rao R. T., 2001, "Fundamentals of Microsystems Packaging," New York, McGraw-Hill.
 (7) Stein S. J., 1995, "Thick film heaters made from dielectric tape bonded stainless steel substrates," Proc. ISHM '95, pp.125~129.
 (8) Kovacs G. T. A., 1998, "Micromachined Transducers Sourcebook," New York, McGraw-Hill.
 (9) Eaton W. P. and Smith J. H., 1997, "Micromachined pressure sensors: review and recent developments," Proc. SPIE, Vol. 3046, pp.30~41.
 (10) Jae-Min Kim, Gwy-Sang Chung, "Fabrication of a Micromachined Ceramic Thin-film Type Pressure Sensor for High Over Pressure Tolerance and Its Characteristics," *Journal of KSS*, Vol. 12, No. 5, pp.199~205.
 (11) Timoshenko S., 1940, "Theory of Plates and Shells," New York, McGraw-Hill.
 (12) Ko, W. H., 1982, "A high-sensitivity integrated-circuit capacitive pressure transducer," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 29, pp.48~56.
 (13) Bromley, E.I., Randall, J. N., Flanders, D. C. and Mountain, R. W., 1983, "A Technique for the determination of stress in thin films," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 1, No. 4, pp. 1363~1366.