

압저항형 압력센서를 이용한 초소형 하중센서의 개발

김우정* · 조용수 · 강현재* · 최시영†

Development of miniature weight sensor using piezoresistive pressure sensor

Woo-Jeong Kim*, Yong-Soo Cho, Hyun-Jae Kang*, and Sie-Young Choi†

Abstract

Strain gauge type load cell is used widely as weight sensor. However, it has problems such as noise, power consumption, high cost and big size. Semiconductor type piezoresistive pressure sensor is practically used in recent for low hysteresis, good linearity, small size, light weight and strong on vibration. In this paper, we have fabricated the piezoresistive pressure sensor and packaged the miniature weight sensor. We packaged the miniature weight sensor by flip-chip bonding between die and PCB for durability, because the weight sensor is directly contacted on a physical solid distinct from air and oil pressure. We measured the characteristics of the weight sensor, which had the output of 10~80 mV on the weight range of 0~2 kg. In the result, we could fabricate the weight sensor with an accuracy of 3%FSO linearity.

Key Words : weight sensor, load cell, piezoresistive pressure sensor, flip-chip bonding

1. 서 론

반도체와 같은 물체에 응력을 추가하면 전기 저항이 변화하는 피에조저항 효과(piezoresistive effect)를 이용한 반도체식 압력센서는 최근에 실용화가 가속되고 있는 센서로서 히스테리시스(hysteresis) 현상이 없고 직선성이 우수하며, 소형 · 경량으로 진동에도 매우 강한 것이 특징이다^[1-4]. 또한 기계식보다 고감도, 고신뢰성이며 양산성이 좋다. 역학적 응력을 전기신호로 변환하는 반도체식 압력센서는 마이크로 머시닝기술과 반도체 기술의 발전으로 고감도, 고정도를 실현하고 있으며 최근에는 생체내 국부적 압력변동이나 생체 각부의 역학적 기능을 계측할 수 있는 크기의 센서가 대학이나 연구소등에서 많이 연구되고 있다^[5-9].

공압이나 유압 센서와 달리 물체의 직접적인 접촉으로 인한 압력을 측정하는 센서는 wire bonding으로 die를 연결시키고 탄성매질로서 압력을 전달할 경우 wire

가 쉽게 끊어져 내구성 측면에서 문제가 발생한다. 이를 보완하기 위해 박판용접을 하고 oil을 채우는 방법의 봉입형 센서가 있으나 가격이 상승하는 문제가 있다. 본 논문에서는 wire 없이 flip-chip bonding으로 die를 연결하고 공정이 간단한 실리콘 gel과 같은 탄성매질을 주입해서 압력을 전달하여 내구성과 가격 측면 모두 만족할 만한 결과를 가져 올수 있는 하중 센서를 개발하였다. 하중을 측정하기 위해 소형 고감도인 압저항형 반도체 압력센서를 이용하였다. 반도체 공정과 MEMS 공정을 통해 압저항형 압력센서를 제작하고 내구성을 향상시키기 위해 flip-chip bonding해서 신뢰성과 안정성을 향상 시켰다.

2. 센서 제작

압력센서는 외부에서 가해지는 압력의 변화를 감지하여 이를 전기적인 신호로 변환시키는 장치로 압저항형 반도체 압력센서는 다이아프램의 가장자리에 4개의 압저항체를 브릿지 구조로 형성한다. 외부 압력이 셀에 응력으로 작용하여 당기거나 밀면 변형이 일어나는데 이때 줄거나 늘어나는 양을 스트레인이라 하며, 이 미세한 변형량이 휘스톤 브릿지로 구성된 센서에 저항

경북대학교 전자공학과 (Department of Electronics, Kyungpook National University)

*주식회사 멘텍 (MENTech. Co., Ltd.)

†Corresponding author: sychoi@ee.knu.ac.kr

(Received : March 28, 2005, Accepted : May 2, 2005)

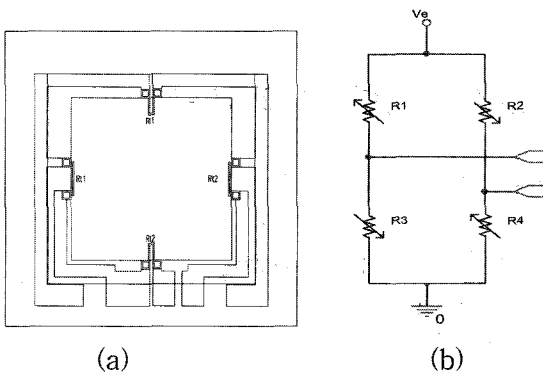


그림 1. 실리콘 압저항형 압력센서 설계; (a) 레이아웃, (b) 등가 휘스톤 브릿지회로

Fig. 1. Design of silicon piezoresistive pressure sensor; (a) Layout and (b) Equivalent wheatstone bridge circuit.

변화를 일으킨다. 실리콘 표면에 인가되는 응력으로 인하여 실리콘의 저항이 변하는 현상을 압저항효과라고 한다. 이 현상은, 결정의 격자 변형이 에너지밴드구조에 변형을 일으키게 되고, 그로 인하여 캐리어들이 한 계곡(valley)에서 다른 계곡으로 천이(intervalley scattering)하게 된다. 격자변형의 효과는 캐리어가 높은 유효질량(effective mass)의 상태로 산란되면 저항율은 증가되고, 낮은 유효질량 상태로 되면 저항율은 감소한다. 따라서 응력에 의해 캐리어의 이동도와 분포가 변하게 되어 저항률이 변하게 된다. 그림 1은 제조한 초소형 하중센서의 하중을 감지하기 위해 설계한 압저항형 반도체 압력센서의 레이아웃과 등가 휘스톤 브릿지 회로를 나타내었다. 본 연구에서는 실리콘 압저항형 압력센서는 다이아프램의 가장자리에 4개의 압저항체를 휘스톤 브릿지 구조로 형성하였다. 센서의 크기는 2×2 mm, 두께는 15 μm이다. 다이아프램의 식각창이 크기는 식각 결과 형성되는 다이아프램의 변이 압력 검출용 압저항체의 edge 부분과 일치 하도록 하여 최대의 응력이 압저항체에 가해져 센서의 감도가 최대가 될 수 있게 설계 하였다. 각 압저항체의 폭은 10 μm이고, 압저항체의 길이는 250 μm로 설계하였다.

반도체 압력센서의 재료로는 게이지 팩터가 크고, 히스테리시스가 적으며 집적회로 제조 공정을 적용할 수 있는 단결정 실리콘이 널리 활용되고 있다. 본 연구에서 압저항형 반도체 압력센서를 제조하기 위하여 사용된 웨이퍼는 결정방향이 (100)이고 비저항이 10 Ω·cm인 n형 실리콘 웨이퍼와 실리콘 식각 공정시 마스크링 역할로 사용되는 1 μm 두께의 실리콘 산화막을 성장시킨 SDB(silicon direct bonding) 웨이퍼를 사용하였

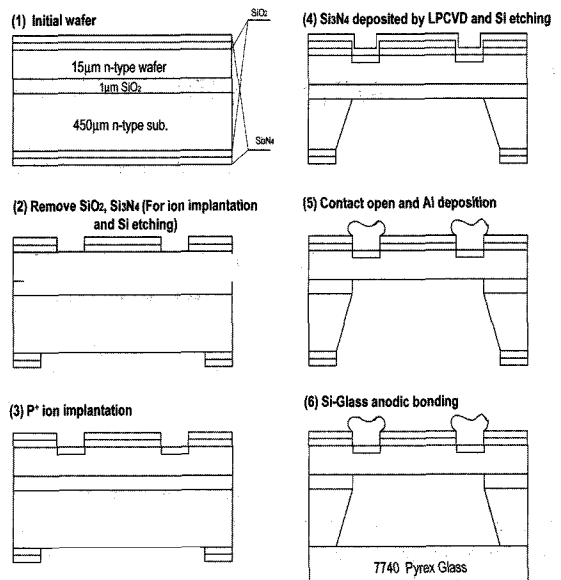


그림 2. 압력센서 제작 공정도

Fig. 2. Fabrication process sequence.

다. SDB 웨이퍼는 앞, 뒤 각각 15 μm, 450 μm n형 실리콘 사이에 1 μm 두께의 산화막이 있는 구조이다. 앞 뒷면으로 3500 Å의 열산화막(SiO₂)이 형성하였으며, 다이아프램 형성을 위한 뒷면 식각 마스크용으로 양면에 1500 Å의 실리콘 질화막(Si₃N₄)이 저압 화학 기상 증착법(LPCVD)으로 형성하였다. 그림 2는 제조공정 순서를 압력센서의 단면으로 나타낸 제작공정도이다. 준비된 기판위에 양면 마스크 정렬기(aligner)를 이용하여 앞면의 저항체 및 뒷면의 다이아프램 패턴을 사진 식각법(photolithography)으로 에칭할 부분을 패터닝 하였다. 양면의 질화막은 건식 식각(plasma etching)법을 이용하여 식각한 후 BHF(buffered HF)를 이용하여 양면의 실리콘막을 식각한다. 앞면에 저항이 형성될 부분을 이온주입기를 이용하여 저항을 형성하는데, 이는 균일한 저항을 형성시키고 정확한 불순물량을 주입하기 위한 것으로 붕소 원자를 3 × 10¹⁵/cm², 70 keV의 가속 에너지로 이온 주입 하였다. 그후 1000 °C에서 1 시간 동안 wet O₂ 분위기에서 어닐링하여 주입된 이온들을 활성화 시켰다. 저항형성이 끝난 후, 다이아프램을 형성하기 위한 뒷면 450 μm 실리콘 에칭시 앞면을 보호하기 위하여 1500 Å 두께의 Si₃N₄를 앞면에 저압 화학 기상증착(LPCVD)법으로 증착시켰다. 4000 m의 증류수에 KOH 1000 g을 용해시킨 수용액으로 83°C에서 이방성 식각을 4시간 50분 하였다. 웨이퍼 중앙의 1 μm 산화막이 식각 중지층(etch-stop)으로 사용되어

다이아프램 두께의 정확한 조절이 가능하였다. SOI구조의 절연체가 다이아프램의 두께조절을 위한 식각 중지층, 정밀한 표면 평탄도를 요구하는 다이아프램, 그리고 고온동작을 위한 저항체의 전기적 절연층(dielectric isolation)층으로 이용된다. 뒷면의 실리콘 식각으로 다이아프램이 형성된 후에는 다이아프램 아래의 산화막과 웨이퍼 뒷면의 질화막, 산화막을 모두 제거한다. 그 후 사진식각법을 이용하여 전극 집속부의 실리콘 산화막을 제거하여 아루미늄 박막을 진공증착하여 전극을 형성하였다. 마지막으로 다이아프램 내의 공극을 진공으로 하기 위해서 유리(pyrex7740)와 진공중(10^{-3} torr)에서 양극접합(silicon-glass anodic bonding)을 행하였다. 본 연구에서는 $300\ \mu\text{m}$ 두께의 pyrex7740 유리와 실리콘을 $400\ ^\circ\text{C}$ 에서 실리콘에는 (+)전압을 유리에는 (-)전압으로 $1000\ \text{V}$ 를 인가하였다.

MEMS(micro electro-mechanical system) 기술을 이용해 제작된 반도체식 압력센서 칩은 PCB(printed circuit board) 기판위에 놓여져서 연결되어진다. 종래에는 와이어 본딩으로 연결하였으나 물체의 압력이 탄성매질을 통해 직접 전달되는 하중센서로의 적용에는 내구성 측면에서 문제점이 있다. 따라서 압력센서 칩과 PCB를 연결하는 방법으로서 플립칩본딩(flip-chip bonding) 방법을 이용하였다. 플립칩본딩이란 칩과 PCB를 서로 마주보는 상태로 하여 칩의 패드와 PCB의 패드를 부착하여 전기적으로 연결시키는 방법이다. 먼저 압력센서 칩의 패드에 볼본더(ball bonder)를 이용해 금범퍼(gold bump)를 형성한다. 그다음 PCB의 패드부분에 ACP(anisotropically conductive adhesive paste)를 도포한 후 칩을 뒤집어서 부착한다. ACP의 경화조건은 $100\ \text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압력을 인가하면서 $180\ ^\circ\text{C}$ 에서 5초간 열을 가한다. 그림 3과 그림 4는 플립칩본딩의 개략도와 사진을 나타내었다.

무게는 중량이라고도 하며, 정확하게는 질량에 중력의 가속도를 곱한 일종의 힘이다. 압력은 단위 면적당 가해지는 힘이나 무게를 말하기 때문에 무게를 받는 면적으로 나누어주면 압력이 된다.

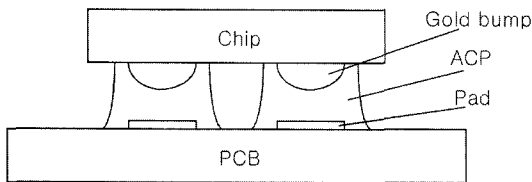


그림 3. 플립칩본딩 개략도
Fig. 3. Schematic of flip-chip bonding.

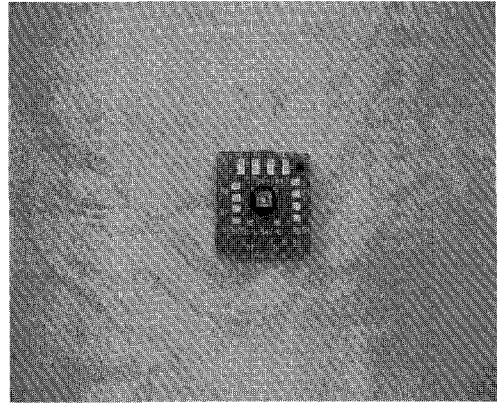


그림 4. Filp-chip bonding 사진
Fig. 4. Photograph of filp-chip bonding.

$$F = m \times g \quad (m : \text{질량}, g : \text{중력가속도})$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (F : \text{힘}, A : \text{면적})$$

반도체형 압력센서를 사용하여 무게를 감지하기 위해서는 기존의 공기압이나 오일압의 감지 구조와 다른 형태로 설계가 되어야 한다. 물체가 놓이는 부분과 무게를 압력으로 변환하여 전달할 수 있는 부분으로 나누어져 있어야 된다. 그림 5는 무게를 측정하기 위해 설계한 하중감지센서의 개략적인 구조를 나타내었다.

물체가 그림 5의 딱딱한 매질에 없으면 무게는 부드러운 매질을 통해서 단위 면적당 압력으로 압력센서에 바로 전달된다. 주어진 무게양에 따라 저항은 비례적으로 변화하고, 전압변화로 출력된다. 본 하중 감지 센서의 하중 전달 매질로서 사용된 재료는 부드러운 매질에는 다우코닝사의 실리콘 gel 7-9600을 사용하였고, 딱딱한 매질에는 남도화성 주식회사의 에폭시수지 NSE-100을 사용하였다. 실리콘의 특성은 낮은 표면장력, 비이온성, 소수성, 고온 및 저온 안정성, 화학적 생

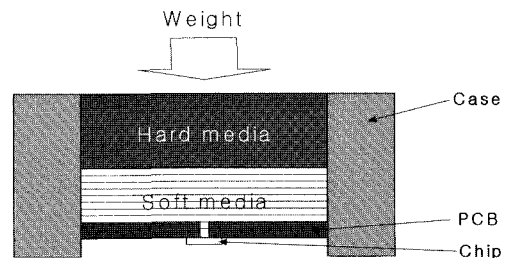


그림 5. 하중 감지 센서의 패키지 구조
Fig. 5. Schematic of weight sensor package.

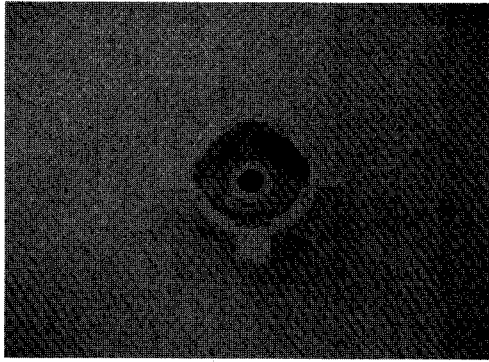


그림 6. 패키지 된 하중 감지 센서 사진
Fig. 6. Photograph of packaged weight sensor.

리학적 불활성, 무독성 전기절연성이 우수한 특성이 있다. 에폭시 수지는 Epichlorhydrin과 Bisphenol-A의 중량체로 분자내에 Epoxy기 -CH₂-CH₂-를 2개 이상 함유한 화합물의 총칭이다. 경화제의 첨가로 인해 상온 또는 가열에 의해 접착강도와 경도가 특출한 다목적 수지로 변화한다. 에폭시수지의 특징은 전기적 및 기계적 특성이 우수하며, 경화물의 수축이 아주 적어 형태 변화가 없고, 내약품성(내산, 내알칼리, 내유, 내수, 내용제)이 우수하고, 접착력이 강한 특성이 있다.

실리콘 겔과 에폭시 수지 모두 비 압축성이며 탄성 물질이다. 본 실험에 사용된 에폭시 수지 NSE-100은 탄성물질이면서 높은 하중에서도 물리적 손상이 전혀 없어 하드 매질로서 아주 적합하다. 그림 6은 제작된 하중감지센서의 사진을 나타내었다.

그림 7은 무게를 측정하기 위해서 설계한 하중 테스트 장치의 개략도이다. 물체를 놓기 때문에 놓는 위치에 따라 어느 한쪽으로 무게가 쏠리지 않고 전부 전달 할 수 있도록 구조를 설계 하는게 무엇보다 중요하다. 그리고 전달된 무게가 단위 면적으로 나누어 압력으로 변환 되게 되는데 손실 없이 압력센서에 전달 할 수 있는 구조와 매질로 이루어져 있어야 한다. 하중을 전달하는 부분과 센서를 지탱해주는 부분 사이는 표면이 아주 미끄러워 힘의 손실이 거의 없이 무게를 센서로 전달할 수 있도록 설계를 하였다. 압저항형 반도체 압력센서의 사이즈가 2×2 mm이고 PCB 기판에 플립칩 본딩으로 사이즈는 크게 늘어나지 않는다. 하지만 주변회로와 하중을 전달하기 위한 매질을 넣기 위해 가공물의 구조를 압력센서 칩보다는 크게 설계하였다. 또한 장기 안정성을 높이기 위해 슬라이드와 센서간의 간격 크기가 고려되었다. 본 연구를 위해 테스트하기 위해서 제작한 하중 센서의 크기는 지름 ϕ32 mm, 높이 18 mm이다.

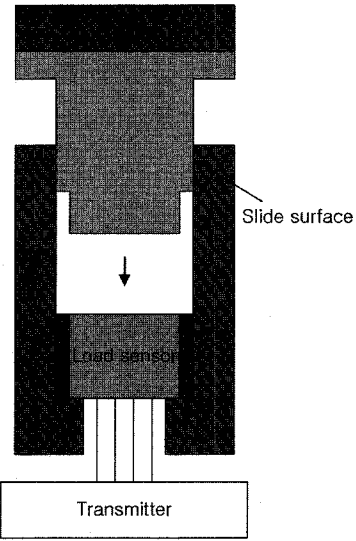


그림 7. 하중 실험 장치의 개략도
Fig. 7. Schematic of load test system.

3. 특성측정 및 고찰

제작된 전자레인지용 하중감지센서에 5V의 전원을 공급하고 0~2 kg의 범위에서 500 g 단위로 하중을 변화시키면서 측정을 하였다. 그림 8은 센서의 출력전압을 측정한 그래프이다. 절대압 센서를 사용했으므로 대기압에 의한 오프셋값이 상승하기 때문에 초기의 출력 전압은 10 mV이다. 최대출력값(full scale output) 전압은 140 mV이며 무게에 따라 부분적으로 선형성이 떨어지기는 하나 전반적으로 선형적인 특성을 보이고 있

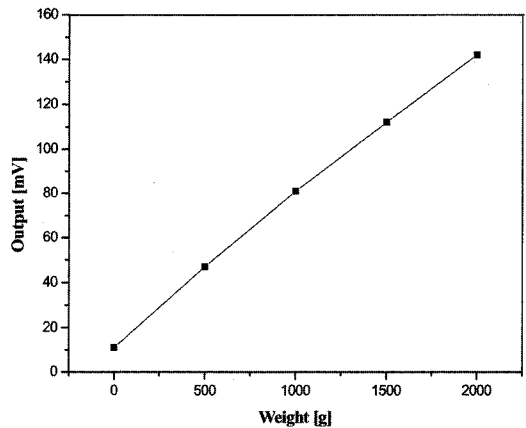


그림 8. 무게에 대한 하중 감지 센서의 출력 특성
Fig. 8. Output of weight sensor as a function of weight.

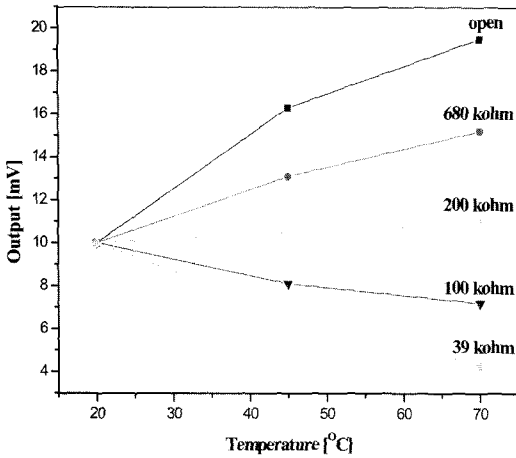


그림 9. 하중 감지 센서의 저항별 TCO 특성
Fig. 9. TCO characteristic as a function of resistance.

다. 최대 오차는 3.5 mV이고 이는 full scale output 과 비교하면 3%의 오차를 보이고 있다. 이는 하중센서는 공압이나 유압센서와는 달리 패키지 구조의 압력전달 매질에서 나타나는 오차인 것으로 보인다.

센서 패키지 내부의 온도가 상승하면 압력전달 매질이 열팽창을 하게 되는데 열팽창으로 인한 압력이 센서로 전달되어 TCO(temperature coefficient of offset) 특성은 증가한다. 이를 보완하기 위하여 Vcc단자와 (-) output 단자 사이에 병렬로 저항을 연결함으로써 TCO 보정을 할 수 있다. 그림 9는 저항별 TCO 특성을 나타내었다. 그림 9에서 보듯이 TCO 보정 저항값은 200 kΩ 임을 알 수 있다.

압력센서의 압저항계수는 부의 온도계수를 가지고 확산저항의 저항값 자체는 양의 온도계수를 가지기 때문에 출력전압과 감도는 온도가 증가함에 따라 감소하게 된다. 온도가 증가함에 따라서 감소된 감도를 보상하기 위해, 온도 증가에 따라 선형적으로 브릿지 입력 전압을 증가시킨다면 감도의 온도 드래프트를 보상할 수 있다. 다이오드의 전압강하는 온도에 따라 감소함으로 브릿지 입력단에 연결하면 다이오드 턴 온 전압이 감소한 만큼 선형적으로 입력전압을 증가시킬 수 있다. 그림 10은 브릿지 입력단에 연결된 다이오드의 개수에 따른 압력센서의 감도의 특성을 나타내었다. 다이오드가 많이 연결될수록 브릿지에 인가되는 전압강하가 커져 감도가 떨어진다. 그러나, 온도에 따라 달라지는 압력에 대한 출력감도는 거의 일정해지는 것을 알 수 있다. 압력이나 하중을 인가하지 않은 상태에서 온도를 20~70°C 변화시키며 오프셋의 온도 변화분을 조사하

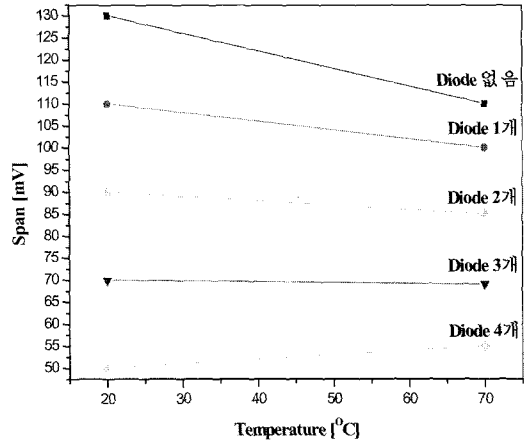


그림 10. 하중 감지 센서의 다이오드 개수별 TCS 특성
Fig. 10. TCS characteristic as a function of the number of diode.

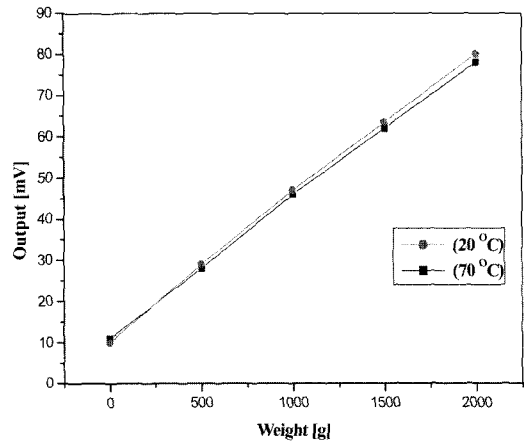


그림 11. 온도보상후 압력센서의 출력 특성
Fig. 11. Output of weight sensor after temperature compensation.

였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 다이오드를 3개 연결하면 TCS(temperature coefficient of sensitivity)가 이상적으로 보정된다.

그림 11은 오프셋 조정, span 조정, 온도보상을 한 하중감지센서의 특성을 나타내었다. 압력센서의 온도를 보상하는 방법에는 센서 자체에서 보상을 하는 수동적인 방법, 신호처리로 보상을 하는 능동적인 방법, 시스템에 마이크로프로세서가 사용될 때의 소프트웨어적인 보상법등이 있다. 개발된 하중 센서는 소형으로 제작하기 위해 다이오드를 사용한 온도보상을 시도하였다. 다이오드 수에 따라서 온도 보상이 달라지는데,

그림 10의 데이터를 기준으로 해서 다이오드 3개를 사용하여 보상하였다. 오프셋 전압은 저항을 연결하여 10 ± 1 mV로 조정하고, 브릿지 입력단에 저항을 연결하여 70 ± 1 mV로 span 보정을 하였다. 20 OC에서 500 g 단위로 하중을 변화시키면서 측정을 하였다. 그리고 70 OC에서 500 g 단위로 하중을 변화시키면서 측정을 하였다. 20~70 OC 범위에서 온도 편차는 3%의 오차를 보이고 있다.

4. 결 론

하중을 가하면 그 크기에 비례하여 전기적 출력이 발생되는 힘 변환기의 총칭으로 스트레인 게이지식 로드셀 방식을 일반적으로 많이 사용하고 있다. 스트레인 게이지를 금속 탄성체에 점착하고 그 탄성체에 하중을 가했을 때 탄성의 스트레인을 스트레인 게이지의 저항값의 변화로서 가해진 하중의 크기에 비례한 전기적 출력신호를 얻을 수 있다. 하지만 이런 방식은 정밀도, 사용조건, 신호처리에서 많은 장점을 갖고 있지만 노이즈, 소모전력, 높은 가격, 제품의 크기의 제한 등의 문제점을 갖고 있어 보다 저렴하고 다양한 구조, 소형의 하중 센서를 필요로 하고 있다. 본 연구에서는 반도체 압력센서를 사용하여 탄성물질을 통해서 압력을 전달하는 방식의 초소형 저가의 하중 감지 센서를 개발하였다. 센서 구동 전압을 5V 공급하고 다이오드와 저항을 이용해 온도보상을 하여 0~2 kg의 하중범위에서 10~80 mV의 안정된 출력값을 얻을 수 있었다. 일정한 무게가 가해 졌을 때 1%FSO내의 안정된 특성을 얻을 수 있었고, 또한 무게에 대한 출력의 선형성은 최대 3%FSO의 특성을 보이고 있는데 이는 하중 감지 센서에 대한 특성보다도 패키지의 구조적인 문제로 인한 어려가 포함된 특성 때문인 것으로 생각된다. 본 연구를 통해 소형, 저가, 다기능화된 하중 감지 센서 제품의 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업의 지원에 의해 수행되었음

참고 문헌

- [1] 이창준, 강신원, 최시영, "SDB 웨이퍼를 이용한 압저항형 압력센서의 제조", *센서학회지*, 제4권, 제1호, pp. 29-34, 1995.
- [2] 손승현, 김우정, 최시영, "가스누출감지용, 실리콘 압저항형 절대압 압력센서의 제조 및 온도보상", *센서학회지*, 제7권, 제3호, pp. 171-178, 1998.
- [3] 배혜진, 손승현, 최시영, "생체 in-vivo 측정용 실리콘 압저항형 압력센서의 제조 및 특성", *센서학회지*, 제10권, 제3호, pp. 148-155, 2001.
- [4] 김우정, 조용수, 황정훈, 최시영, "스테인레스 봉입형 반도체 압력센서의 제작 및 특성", *센서학회지*, 제11권, 제3호, pp. 138-144, 2002.
- [5] R. Jhonson and R. E. Higashi, "A highly sensitivity silicon cjmp microtransducer for air flow and differential pressure sensing application", *Sensors and Actuators*, vol. 11, pp. 63-72, 1987.
- [6] K. M. Mahmoud, R. P. Van Kampen, M. J. Rutka, and R. F. Wolffen buttel, "A silicon integrated smart pressure sensor", *Transducer'93*, pp. 217-220, 1993.
- [7] S. C. Kim and K. D. Wise, "Temperature sensitivity in silicon piezoresistivity pressure transducers", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-30, no. 7, pp. 802-810, 1983.
- [8] S. J. Lu, Z. Zheng, and Q. Y. Tong, "A new silicon micromachining method using SOI/SDB technology", *Sensors and Actuators*, vol. 23, A21-A23, p. 961, 1990.
- [9] E. Stemme and G. Stemme, "A balanced dual-diaphragm resonant pressure sensor in silicon", *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 37, p. 648, 1990.

김 우 정

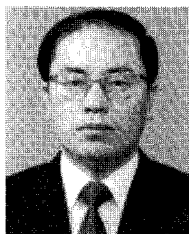
- 1966년 7월 30일생
- 1989년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1991년 동대학 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2003년 동대학 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 2000년 ~ 현재 (주)맨텍 대표이사

조 용 수

- 1973년 10월 8일생
- 1998년 인제대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 2000년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2000년 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

강 현 재

- 1975년 3월 7일생
- 2000년 계명대학교 물리학과 졸업(이학사)
- 2002년 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2002년 ~ 현재 (주)켄텍 연구원



최 시 영

- 1972년 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1974년 경북대학교 전자공학과(공학석사)
- 1986년 日本 東北大學(공학박사)
- 현 경북대학교 전자전기공학부 교수