

SUS630 다이어프램을 이용한 반도체식 로드셀

문영순¹ · 이선길¹ · 류상혁² · 최시영^{2,+}

The Silicon Type Load Cell with SUS630 Diaphragm

Young-Soon Moon¹, Seon-Gil Lee¹, Sang-Hyuk Ryu², and Sie-Young Choi^{2,+}

Abstract

The load cell is a force sensor and a transducer that is used to convert a physical force into an electrical signal for weighing equipment. Most conventional load cells are widely used a metal foil strain gauge for sensing element when force being applied spring element in order to convert the deformation to electrical signals. The sensitivity of a load cell is limited by its low gauge factor, hysteresis and creep. But silicon-based sensors perform with higher reliability. This paper presents the basic design and development of the silicon type load cell with an SUS630 diaphragm. The load cell consists of two parts the silicon strain gauge and the SUS630 structure with diaphragm. Structure analysis of load cell was researched by theory to optimize the load cell diaphragm design and to determine the position of piezo-resistors on a silicon strain gauge. The piezo-resistors are integrated in the four points of silicon strain gauge processed by ion implantation. The thickness of the silicon strain gauge was polished by CMP under 100 μm . The 10 mm diameter SUS630 diaphragm was designed for loads up to 10 kg with 300 μm of diaphragm thickness. The load cell was successfully tested, the variation of $\Delta R(\%)$ of four points on the silicon strain gauge is good linearity properties and sensitivity.

Keywords : Load cell, Silicon strain gauge, Diaphragm

1. 서 론

로드셀(load cell)은 외부에서 가해지는 물리적인 하중의 변화를 감지하여 이를 전기적인 신호로 변환하는 장치로 하중 측정이 요구되는 상업용 전자저울에서부터 자동차, 선박, 항공, 공업계측, 제동제어 등 그 용도가 다양하고 폭넓게 사용되고 있는 센서 중의 하나이다. 현재 가장 많이 상용화 되어있는 스트레인 게이지 방식의 로드셀은 외부에서 가해지는 하중의 변화에 비례적으로 변하는 탄성부와 이를 전기적인 신호로 바꿔주는 감지부인 스트레인 게이지로 구성된다[1]. 기존의 스트레인 게이지를 이용한 로드셀의 경우 구조 및 제작이 간단하고 고온 및 고압 등 극한 환경에서도 사용이 가능하지만 감지부로 주로 사용되는 금속 박 스트레인 게이지(metal foil strain gauge)는 저항으로 비저항이 100 Ω 미만의 금속을 사용하며 게이지율(gauge factor)이 낮고 감도와 분해능이 떨어지며 스트레인 게이지와 탄성부의 접착 문제에서 발생하는 크리프(creep) 현상, 탄성부의 재료가 갖는 히스테리시

스(hysteresis) 등으로 인하여 신뢰성 및 안정성이 떨어져, 소형화, 집적화, 다기능화 및 대량생산에 어려움이 있었다[2].

본 연구에서는 제작이 간단하고 우수한 전기적·기계적 특성을 가지는 로드셀을 제작하기 위하여 감지부인 스트레인 게이지를 히스테리시스 현상이 없고 선형성이 우수하며 소형·경량으로 대량생산이 가능한 단결정 실리콘을 사용 하였다[3-5]. 단결정 실리콘 웨이퍼 기판 위에 이온 주입법으로 브리지형 압저항(piezo-resistor)[6]을 형성한 후 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정으로 두께 100 μm 의 실리콘 스트레인 게이지를 제작하고 표면에 다량의 크롬과 니켈을 함유하고 있어 내부식성과 인장강도, 탄성계수가 매우 높은 스테인레스 재질의 SUS630(STS630, stainless steel grade 630) 다이어프램(diaphragm)에 접착하여 정격 하중 10 kgf/cm², 분해능 1/1000급의 실리콘 스트레인 게이지 로드셀을 제작하기 위해 그 특성을 실험하였다.

2. 실험 방법

2.1 다이어프램의 설계 및 가공

로드셀에서 감도에 큰 영향을 미치는 변형률은 하중이 인가되었을 때 변형을 일으키는 탄성부의 크기와 모양, 두께, 균일성 및

¹경북대학교 센서 및 디스플레이공학과(Department of Sensor and Display Engineering Kyungpook National University)

²경북대학교 IT대학 전자공학부(School of Electronics Engineering Kyungpook National University)

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

(Received : Apr. 29, 2011, Revised : May. 17, 2011, Accepted : May. 23, 2011)

재료의 물리적인 성질에 따라 결정된다. 대표적인 탄성요소로 다이아프램이 있는데 구조적으로 간단할 뿐 아니라 높은 진동환경에서도 감지력이 뛰어난 장점이 있다. 다이아프램의 재질을 선택하는데 있어서 고려해야 할 중요한 요소는 기계적, 열적 그리고 화학적 안정성과 가공성 등이 있다. 다이아프램 재료의 탄성계수가 높으면 큰 변형의 영역까지 사용할 수 있어 높은 출력을 얻는다.

Table 1. Material properties of SUS630

Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)	Tensile strength (MPa)
196	0.272	7750	1105

Table 1은 로드셀의 탄성부로 사용되는 SUS630 재료에 대한 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 SUS630으로 다이아프램을 설계하기 위하여 응력/변형 분포를 이론적으로 조사하였다.

균일한 단면적을 가지는 원기둥 모양의 시편 양단에 외력을 인가하면 축방향에 수직인 단면에는 외력에 균등한 크기의 저항력이 발생한다. 이 저항력은 단면에 균일하게 분포하며 그 총합은 하중 P와 같다. 이 경우 단위면적당 저항력을 응력(stress)이라 하고 σ 로 표시한다. 물체에 외력이 가해졌을 때 길이, 단면적, 휨, 비틀림 등과 같은 변화가 발생하는데 이를 변형(strain)이라 하고 ϵ 로 표시한다. 탄성한계 범위 내에서는 재료에 대해 응력과 스트레인 사이에 일정한 비례관계가 존재한다.

$$\sigma = E\epsilon \tag{1}$$

식 (1)의 비례정수 E를 종탄성계수(modulus of longitudinal elasticity), 또는 영계수(Young's modulus)라고 한다. 고정단에 고정된 원형의 다이아프램에 균일한 분포의 하중 P가 작용하면 다음 식 (2), (3)로 주어지는 반경방향 응력 σ_r 과 접선방향 응력 σ_t 가 발생한다[7-8].

$$\sigma_r = \frac{3PR^2}{8h^2} \left[(1+\nu) - (3+\nu)\frac{r^2}{a^2} \right] \tag{2}$$

$$\sigma_t = \frac{3PR^2}{8h^2} \left[(1+\nu) - (1+3\nu)\frac{r^2}{a^2} \right] \tag{3}$$

고정단에 고정된 원형의 다이아프램에 균일한 분포의 하중 P가 작용하면 다음 식(4), (5)로 주어지는 반경방향 변형 ϵ_r 와 접선방향 변형 ϵ_t 이 발생한다[7-8].

$$\epsilon_r = \frac{3P}{8Eh^2} (1-\nu^2)(R^2 - 3r^2) \tag{4}$$

$$\epsilon_t = \frac{3P}{8Eh^2} (1-\nu^2)(R^2 - r^2) \tag{5}$$

응력 설계는 가능한 클수록 좋지만 최대 하중에 대해서 다이아프램이 소성 변형을 일으키지 않는 범위에 있어야 한다. 재료가 가지는 강도와 인가된 최대 하중으로 발생된 응력과의 비를 안전계수(safety factor)라고 하고 안전계수가 1 이하면 소성변형을 일으키므로 다이아프램의 재료와 가공정밀도, 로드셀의 측정환경 등에 따라 다르게 설계한다. 다이아프램에서 고정단과 만나는 가장자리에서 응력에 의한 소성변형이 시작되므로 안전계수를 고려하여 다이아프램 가장자리에서 발생하는 최대 응력을 설계하고 다이아프램의 두께를 결정한다.

$$t = \sqrt{\frac{3PR^2(1-\nu^2)}{4|\sigma|}} \tag{6}$$

Fig. 1은 응력/변형 공식을 적용하여 지름 10 mm, 두께 300 μ m, 하중 10 kgf/cm²에 대한 SUS630 다이아프램 표면에서 발생하는 응력/변형 분포를 나타내었다.

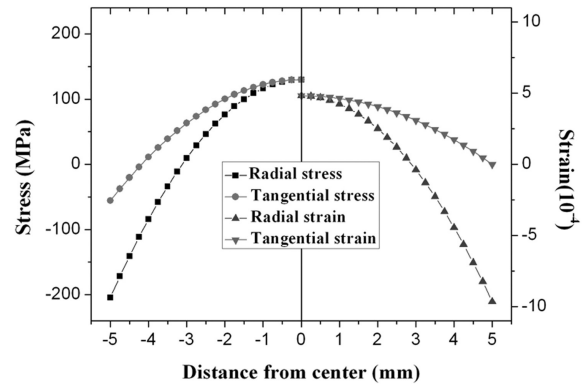


Fig. 1. Stress and strain distribution on 300 μ m SUS630 diaphragm.

로드셀에서 탄성부를 포함한 구조물은 SUS630 압출 바를 가공 정밀도 3/100 (mm)으로 기계가공하여 제작하였으며 구조물 전체 크기는 Fig. 2와 같이 직경이 40 mm이고 높이는 8 mm 이다. 탄성부인 다이아프램의 직경은 10 mm이고 두께는 식(6)을 이용하여 안전계수 2 이상일 때 다이아프램의 최소 두께는 175.05 μ m 이므로 200 μ m, 300 μ m, 400 μ m 두께별로 제작하여 특성을 실험하였다. 마이크로미터로 두께를 측정할 결과 목표 두께에서 최대 30 μ m까지 차이를 보이고 있어 실험에서는 실제 측정치를 사용하였다.

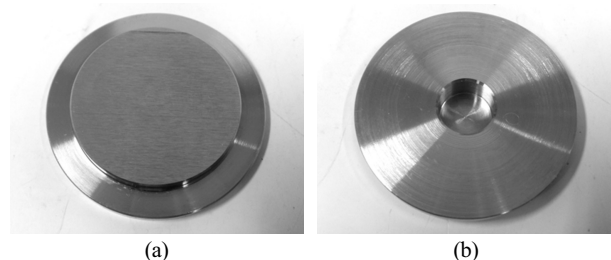


Fig. 2. SUS630 diaphragm; (a) Top view, (b) Down view.

2.2 실리콘 스트레인 게이지 제작

스트레인 게이지는 금속이나 반도체에 응력을 가할 때 발생하는 변형으로 인해 저항의 값이 변하는 성질을 이용한다. 스트레인 게이지는 사용목적, 재질, 형태, 크기 등에 따라서 다양하며 일반적으로 저항선 게이지(wire strain gauge)와 금속 박 스트레인 게이지, 후막 저항 게이지(thick film gauge) 등으로 분류할 수 있으며 대표적으로 가장 많이 사용되는 것은 금속 박 스트레인 게이지이다. 금속 박 스트레인 게이지는 약 30 μm~70 μm 두께의 베이스 위에 금속박막을 3 μm~10 μm 코팅한 후 사진식각공정을 이용해 원하는 저항 패턴을 만든 것으로 금속 저항으로 Ni-Cu합금 및 Ni-Cr 합금을 사용하고 베이스로는 에폭시, 폴리이미드 등을 사용한다[9]. 일반적으로 스트레인 게이지를 측정할 재료에 접촉한 후 하중을 인가 했을때 변형에 따른 스트레인 게이지의 저항 변화율을 게이지율(gauge factor), GF로 나타내며 스트레인 게이지의 감도를 나타내는 계수이다. 게이지율은 저항의 재료와 저항소자의 크기 등에 따라 다르며 일반적으로 저항을 Cu-Ni 합금을 사용한 스트레인 게이지의 경우 2~3정도의 값을 나타내고 일반적으로 2.0의 게이지율을 가지는 원형의 금속 박 스트레인 게이지의 출력 전압은 식 (7)로 근사 할 수 있다[10].

$$e_0 = 0.75 \frac{PR^2(1-\nu^2)}{t^2 E} \times 10^3 \left[\frac{mV}{V} \right] \quad (7)$$

반면 반도체중 p-type 압저항을 사용하는 경우는 100~170의 높은 게이지율 나타내며 압저항의 표면 불순물 농도에 따라 압저항계수와 온도에 따른 감도가 결정된다[11].

본 연구에서는 기존의 금속 박 스트레인 게이지의 감도의 한계를 극복하기 위해 고감도의 단결정 실리콘 스트레인 게이지를 사용하여 제작비를 절감하고, 스트레인 게이지 접착 시 정렬문제를 해결하기 위해 Fig. 3과 같이 다이아프램을 가로지르는 선형의 스트레인 게이지에 4개의 종방향 압저항을 압축응력과 인장응력이 발생하는 곳에 위치시켜 휘트스톤 브리지 회로로 구성할 수 있도록 설계하였다.

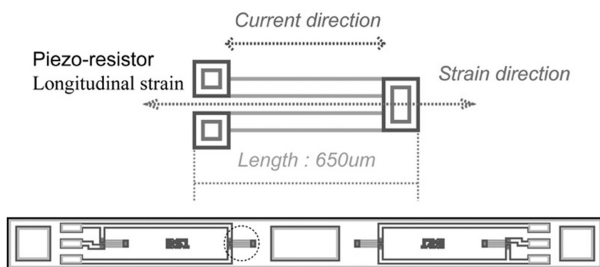


Fig. 3. Piezo-resistor on silicon strain gauge.

Fig. 1에서 원형 다이아프램에서의 변형 분포를 분석하면 다이아프램 중앙에서 반경방향 변형과 접선방향 변형이 발생해 인장

응력이 최대가 되고 가장자리에서는 반경방향의 변형만이 나타나며 압축응력이 최대가 되는 지점이다. 다이아프램의 중심과 고정단과 만나는 가장자리 부분은 기계가공으로 정확한 두께를 조절하기 힘든 부분으로 실제 변형의 분포는 이론과 차이가 있다.

실리콘 스트레인 게이지에서 압저항의 길이(650 μm)와 다이아프램 가장자리에서 직각으로 가공되지 못하는 오차를 고려하여 압축응력을 받는 저항 R₂와 R₄의 중심은 다이아프램 중앙에서 ±4.5 mm 지점에 위치시켜 결과적으로 저항은 가장자리에서 175 μm 거리에 있도록 하였다. 인장응력을 받는 저항 R₁과 R₃의 중심은 다이아프램 중앙에서 ±1.5 mm 지점에 위치하도록 하여 4개의 저항이 동일한 간격을 갖도록 설계하였다. 실리콘 스트레인 게이지의 크기는 14 mm × 1.2 mm, SUS630 다이아프램의 가장자리에서 충분한 응력의 변화를 검출하기 위해 다이아프램의 직경(10 mm)보다 실리콘 스트레인 게이지의 길이(14 mm)를 크게 설계하였다. 실리콘 스트레인 게이지를 제조하기 위하여 사용된 웨이퍼는 결정면이 (100)이고 비저항이 10 Ω-cm인 4 인치(inch) n형 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. Fig. 4는 제작된 실리콘 스트레인 게이지를 단면으로 나타내었으며 공정 순서는 다음과 같다.

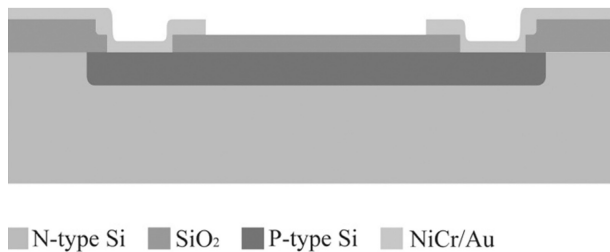


Fig. 4. Structure of silicon strain gauge.

초기 세척 후 웨이퍼를 전기로(furnace)로 습식산화(wet oxidation) 방식으로 1100 °C에서 53분간 5000 Å의 열산화막(SiO₂)을 성장시키고 마스크 #1을 이용하여 압저항을 사진 식각법(photo lithography)으로 형성하고 BOE(Buffered Oxide Etcher)로 실리콘 산화막을 식각하였다. 압저항이 형성될 부분을 이온주입기를 이용하여 불순물을 주입하는데, 이는 균일한 저항을 형성시키고 정확한 불순물량을 주입하기 위한 것으로 붕소 원자를 8×10¹⁵/cm², 70 keV의 가속 에너지로 이온주입 하였다. BOE로 기존의 실리콘 산화막을 제거하고 전기로에서 습식 분위기로 1000 °C에서 1시간 동안 불순물을 확산시켜 주입된 이온들을 활성화 시키고 산화막을 형성하였다. 마스크 #2를 이용하여 사진 식각법으로 전극 접촉부를 형성하기 위해 실리콘 산화막을 BOE로 식각하였다. 전극으로 사용될 NiCr/Au를 진공증착하고 마스크 #3를 이용하여 사진 식각법으로 전극을 형성하고 Au 에천트/NiCr 에천트를 사용하여 전극을 식각하였다. 스트레인 게이지의 감도를 높이고 크리프 현상을 최소화 하기 위해 뒷면을 CMP 공정으로 가공하여 두께 100 μm의 실리콘 스트레인 게이지를 제작하였다.

2.3 로드셀 조립

제작된 SUS630 다이어프램 구조물과 스트레인 게이지를 접착 후 조립하였다. 사용된 접착제는 기존의 스트레인 게이지를 접착할 때 가장 우수한 접착력과 응력 전달 특성이 우수한 고온에서 사용이 가능한 열경화성 타입의 이형제 에폭시인 M-bond 600/610을 사용하였고, Fig. 5는 로드셀의 단면을 나타내고 있으며 대표적인 공정 순서는 다음과 같다.

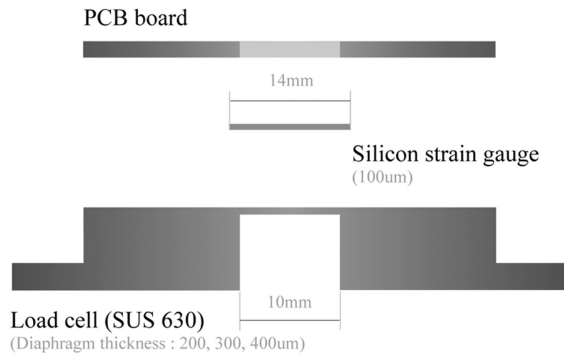


Fig. 5. Schematic of silicon strain gauge type load cell.

가공된 SUS630 구조물과 실리콘 스트레인 게이지를 아세톤(5 min) - 메탄올(5 min) - DI water(5 min) 순서로 세척하고 실리콘 스트레인 게이지가 접착 될 부분을 지그를 이용하여 마킹한 후 내열 테이프를 이용하여 정위치에 M-bond 600/610으로 접착 후 오븐에서 80 °C에서 30분간 경화하고 오븐 속에서 자연 냉각하였다. PCB기판을 록타이트 401로 접착하고 PCB와 실리콘 스트레인 게이지의 전극 패드를 와이어본딩 하였다. 실리콘 스트레인 게이지가 위치한 부분은 광경화성 타입의 에폭시 접착제인 NOA 61로 도포하고 365 nm 파장의 자외선에서 15분간 경화하여 스트레인 게이지와 본딩된 와이어를 보호하도록 하였다. Fig. 6은 조립과정을 거쳐 제작된 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀의 사진이다.

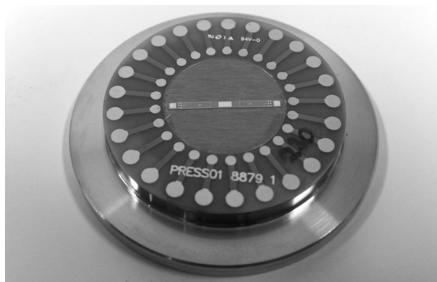


Fig. 6. The silicon strain gauge type load cell.

하중이 다이어프램에 인가되면 단위 면적당 압력으로 전달되고 다이어프램에 부착된 스트레인 게이지와 변형을 일으킨다. 주어진 하중에 따라 저항은 비례적으로 변화하고 전압변화로 출력된다. 본 연구에서는 다이어프램의 단위면적당 균일한 하중을 인가하기 위한 이상적인 가압 방법으로 압축된 질소가스를 이용한 공압 측정방식으로 하중을 인가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀의 출력 특성

3.1.1 저항변화

Fig. 7은 직경 10 mm, 두께 320 μm(±10 μm)의 SUS630 다이어프램에 두께 95 μm(±5 μm)의 실리콘 스트레인 게이지를 부착한 로드셀에 0 kgf/cm² ~ 10 kgf/cm²의 범위에서 1 kg 단위로 하중을 증가시키면서 저항변화율을 각각 측정하였다. 다이어프램의 중앙에서 인장응력을 받는 저항체 R₁, R₃의 저항 변화율은 평균 0.234 %/kg, 가장자리에서 압축응력을 받는 R₂, R₄의 저항은 평균 -0.335 %/kg변화 하였다.

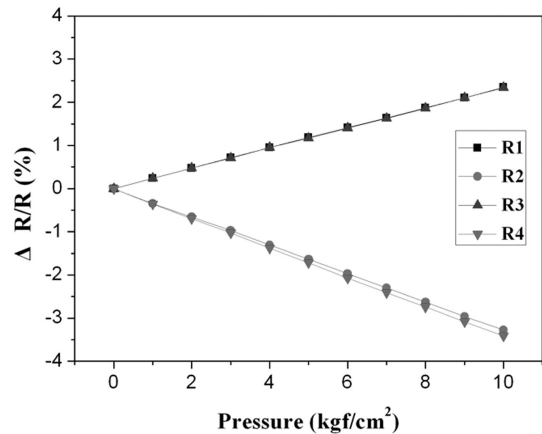


Fig. 7. Output resistance of 320 μm diaphragm load cell.

Table 2는 로드셀의 다이어프램 두께별로 실리콘 스트레인 게이지를 부착하고 0 kgf/cm² ~ 10 kgf/cm²의 하중을 인가하였을 때 압저항의 위치에 따른 평균 저항 변화율을 측정된 결과이다.

Table 2. Output resistance of load cell as diaphragm thickness

Diaphragm Thickness (μm)	Distance from center of diaphragm, ΔR/R(%)	
	±1.5 mm	±4.5 mm
220	4.1373	-7.6135
320	2.3439	-3.345
420	1.8112	-1.4945

3.1.2 출력전압

Fig. 8은 실리콘 스트레인 게이지를 부착한 로드셀에 5 V의 입력 전원을 공급하고 10 kgf/cm²의 하중을 인가하였을 때 다이어프램 두께에 따른 출력전압의 변화량을 측정된 결과이다. 다이어프램의 두께에 따른 두 개의 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀의 두께별 평균 측정 감도는 220 μm일 때 28.84 mV/kg이고 320 μm일 때 14.48 mV/kg, 420 μm일 때 8 mV/kg으로 측정 되었다.

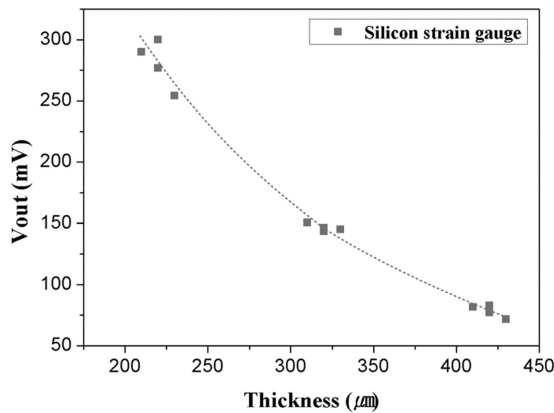


Fig. 8. Output voltage of various diaphragm thickness.

지름 10 mm, 두께 320 μm의 SUS630 다이어프램에서 식 (7)을 통해 계산한 기준의 금속 박 스트레인 게이지식 로드셀의 출력전압은 입력 전압 5 V 일 때 0.424 mV/kg로 저항의 위치가 달라 직접적인 비교는 힘들지만 제작된 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀은 34.15 배의 감도를 보이고 있다.

3.2 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀의 오차

3.2.1 비선형성

로드셀의 출력곡선이 이상적인 직선과 가까운 정도를 선형성 (linearity)이라고 정의하고 선형성에서 벗어난 정도를 비선형성 (nonlinearity)의 백분율로 나타낸다[12]. SUS630 다이어프램을 이용한 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀에 하중을 인가하지 않았을 때의 출력전압과 정격 하중 10 kgf/cm²의 출력전압을 이은 직선을 기준선으로 하고, 이 직선으로부터의 최대 편차를 full scale에 대한 %로 나타내었다

Fig. 9에 제작된 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀의 최대 비직선성은 하중 5 kgf/cm² 일 때 가장 크게 나타나며 다이어프램 두께 별로 220 μm는 1.3 %FS이고 320 μm는 0.31 %FS, 420 μm는 0.18 %FS로 측정 되었으며 다이어프램의 두께가 얇을 수록 감도는 우수 하지만 이와 더불어 선형성 오차도 크게 증가함을 알 수 있다.

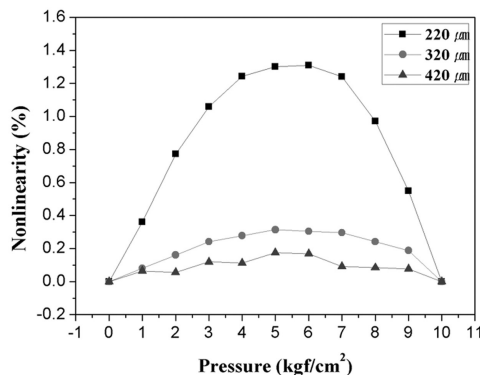


Fig. 9. Nonlinearity characteristics.

3.2.2 크리프

주위 환경이 일정하게 유지되는 상황에서 동일한 하중에 대하여 시간이 지남에 따라 출력값이 변하는 현상을 크리프(creep) 현상이라고 한다. 스트레인 게이지 방식의 로드셀은 접착제를 사용하여 감지부인 스트레인 게이지를 탄성부에 접착하므로 하중을 인가하였을 때 접착 이상으로 측정 시간이 지나면서 출력전압이 변화하는 크리프 현상이 다른 센서에 비해 비교적 크게 발생한다.

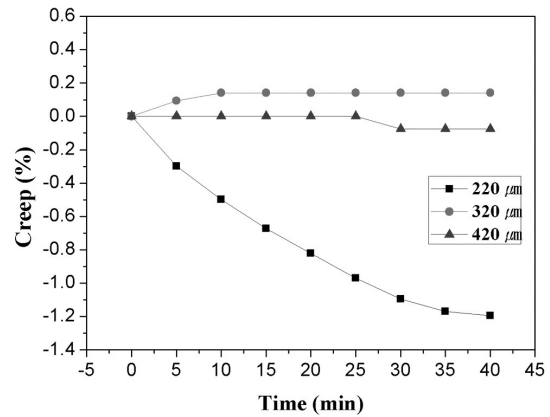


Fig. 10. Creep characteristics.

Fig. 10은 SUS630 다이어프램을 이용한 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀의 크리프 특성을 측정하기 위해 정격 하중 10 kgf/cm²에서 시간에 따른 출력전압의 변화율을 %로 나타내었으며 크리프 오차는 다이어프램 두께 별로 220 μm일 때는 40분부터 안정화되며 오차는 -1.19 %, 320 μm일 때는 10분부터 안정화되며 오차는 0.14 %, 420 μm일 때는 30분부터 안정화 되며 오차는 -0.075 %이다.

4. 결 론

기존 금속 박 스트레인 게이지를 사용한 로드셀의 낮은 게이지율로 인한 감도의 한계를 극복하기 위해 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀을 제작하고 그 특성을 실험 하였다. SUS630 다이어프램을 이용한 실리콘 스트레인 게이지식 로드셀을 제작하고 인가되는 하중에 대한 출력을 측정된 결과, 직경 10 mm, 실제 측정 두께 320 μm(±10 μm)의 SUS630 다이어프램에 10 kgf/cm²의 하중을 인가하고 입력전압 5 V에 대한 로드셀의 평균 출력전압은 144.8 mV를 얻을 수 있었으며 저항의 위치가 달라 직접적인 비교는 힘들지만 식 (7)을 통해 계산한 금속 박 스트레인 게이지식 로드셀의 출력전압 대비 34.15배의 높은 감도를 보이고 있다. 다이어프램 두께 별 평균 측정 감도는 220 μm일 때 28.84 mV/kg, 320 μm일 때 14.48 mV/kg, 420 μm일 때 8 mV/kg 으로 측정되었다.

로드셀의 오차를 측정하는 항목 중에 비선형성은 다이어프램 두께 별로 220 μm는 1.3 %FS, 320 μm는 0.31 %FS, 420 μm는 0.18

%FS이다. 크리프 오차는 220 μm 일 때는 40분부터 안정화되며 오차는 -1.19 %, 320 μm 일 때는 10분부터 안정화되며 오차는 0.14 %, 420 μm 일 때는 30분부터 안정화되며 오차는 -0.075 %이다. 폴리이미드를 베이스로 사용하는 금속 박 스트레인 게이지와 비교 했을때 상대적으로 두꺼운 실리콘 스트레인 게이지의 두께(95 μm)로 인하여 두께가 얇으면서 변형률이 큰 220 μm 의 다이아프램에서는 크리프 현상이 크게 나타났다. 다이아프램의 두께가 얇을 수록 로드셀의 감도는 크지만 반면 오차도 크게 나타나고 있으며 감도는 다소 떨어지지만 420 μm 일 때 가장 좋은 특성을 보였다.

실리콘 스트레인 게이지식 로드셀의 감도에 비해 큰 오차 특성은 다이아프램의 가공오차를 줄이는 등의 보완과 실리콘 스트레인 게이지를 더 얇게 가공하거나, 실리콘 스트레인 게이지와 SUS 다이아프램과의 이상적인 접착을 가능하게 한다면 더욱 더 우수한 로드셀 제작이 가능 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 BK21(Brain Korea 21) 사업 지원으로 수행되었으며, 감사를 드립니다.

REFERENCES

[1] R. Wiegerink, R. Zwijze, G. Krijnen, T. Lammerink and M. Elwenspoek, "Quasi-monolithic silicon load cell for loads up to 1000 kg with insensitivity to non-homogeneous load distributions", *Sensors and Actuators A*, vol. 80, no. 2, pp. 189-196, 2000.

[2] N. M. White and J.E. Brignell, "A planar thick-film load cell", *Sensors and Actuators A*, vol. 26, no. 1-3, pp. 313-

319, 1991.

[3] W. J. Kim, Y. S. Cho, H. J. Kang, and S. Y. Choi, "Development of miniature weight sensor using piezoresistive pressure sensor", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 14, no. 4, pp. 237-243, 2005.

[4] W. J. Kim, Y. S. Cho, J. H. Hwang, and S. Y. Choi, "Construction and characterization of the stainless steel isolated type semiconductor pressure sensor", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 11, no. 3, pp. 138-144, 2002.

[5] S. H. Son, W. J. Kim and S. Y. Choi, "Fabrication and temperature compensation of silicon piezoresistive absolute pressure sensor for gas leakage alarm system", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 7, no. 3, pp. 171-178, 1998.

[6] S. C. Kim & K. D. Wise, "Temperature sensitivity in silicon piezoresistivity pressure transducers", *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. 30, no. 7, pp. 802-810, 1983.

[7] W. K. Schomburg, Z. Rummeler, P. Shao, K. Wulff, and L. Xie, "The design of metal strain gauges on diaphragms", *Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 7, pp. 1101-1108, 2004.

[8] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, "Theory of plates and shells", McGraw-Hill, pp. 4-78, 1959.

[9] 한응교, "스트레인 게이지 : 이론과 응용", 보성문화사, pp. 18-32, 1976.

[10] Vishay Micro-Measurements, "Design consideration for diaphragm pressure transducers", Vishay, Tech note TN-510-1, pp. 1-5, 2005.

[11] S. M. Sze, "Semiconductor sensors", A Wiley-Interscience Publication, pp. 153-185, 1990.

[12] D. Tandeske, "Pressure sensors : Selection and application", Marcel Dekker, pp. 77-137, 1990.



문 영 순(Young-Soon Moon)

- 2000년 경상대학교 전자재료공학과(공학사)
- 2011년 경북대학교 센서 및 디스플레이 공학과(공학석사)



이 선 길(Seon-Gil Lee)

- 1997년 한국해양대학교 재료공학과(공학사)
- 2001년 한국해양대학교 재료공학과(공학석사)
- 현재 경북대학교 센서및디스플레이공학과 박사과정



류 상 혁(Sang-Hyuk Ryu)

- 2010년 영남대학교 전자공학과(공학사)
- 현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 석사과정



최 시 영(Sie-Young Choi)

- 1972년 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1974년 경북대학교 전자공학과(공학석사)
- 1986년 日本 東北大學(공학박사)
- 현재 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수