

저가형 3D프린팅 2축 압력 센서 개발

Development of Low-cost 3D Printing Bi-axial Pressure Sensor

최헌수¹·여준성¹·성지훈¹·최현진[†]

Heonsoo Choi¹, Joonseong Yeo¹, Jihun Seong¹, Hyunjin Choi[†]

Abstract: As various mobile robots and manipulator robots have been commercialized, robots that can be used by individuals in their daily life have begun to appear. With the development of robots that support daily life, the interaction between robots and humans is becoming more important. Manipulator robots that support daily life must perform tasks such as pressing buttons or picking up objects safely. In many cases, this requires expensive multi-axis force/torque sensors to measure the interaction. In this study, we introduce a low-cost two-axis pressure sensor that can be applied to manipulators for education or research. The proposed system used three force sensitive resistor (FSR) sensors and the structure was fabricated by 3D printing. An experimental device using a load cell was constructed to measure the biaxial pressure. The manufactured prototype was able to distinguish the +-x-axis and the +-y-axis pressures.

Keywords: Pressure Sensor, 2-Axis Force Sensor, 3D Printer

1. 서 론

로봇은 산업용 뿐만 아니라 인간의 일상생활까지 사용 범위가 확장되었다. 음식점에서 조리를 하는 조리 로봇, 서빙을 하는 이동 로봇이 등장했고, 가정에서도 설거지, 청소, 빨래 등을 수행하는 가사 지원 로봇이 개발되고 있다. 이 로봇들은 주로 머니플레이터를 통해 주어진 임무를 수행한다. 하지만 인간과 같은 공간에서 작동하는 머니플레이터는 인간과 충돌하여 부상을 입힐 수 있으며, 유리, 플라스틱 등과 같은 재질의 물건을 떨어뜨려 파손시킬 수 있다. 따라서 엔드 이펙터의 상호작용력에 대한 측정과 강인한 힘 제어가 요구된다. 정밀한 상호작용력 측정을 위해 주로 고가의 상용 다축 힘/토크 센서가 사용되며, 이는 다양한 머니플레이터 관련 연구를 수행하

는 데에 어려움을 주기도 한다.

공장형 로봇과 같은 대형 머니플레이터의 경우 큰 힘의 측정이 필요한 경우가 많고, 스트레인게이지를 사용하여 다축 힘 센서를 제작한 연구들이 진행되었다¹⁻³⁾. 최근에는 3D 프린터를 사용하여 손쉽게 제작 가능한 다축 힘센서 연구들이 진행되었다. Hendrich 외 3인⁴⁾은 3D 프린팅을 통해 제작 가능한 6축 토크-모멘트 센서를 제시하였다. Spiral Spring과 Cantilever 구조를 결합하였으며 3D 프린팅 재료는 ABS와 PLA 필라멘트를 사용하였다. Photointerrupter를 통해 저항 변화를 이용하였고 최대 약 11 N까지의 힘을 측정할 수 있다. 총 6축의 힘과 모멘트를 측정하는 장점이 있지만 그 만큼 센서를 포함한 전체 크기가 크다는 단점이 있다. 스트레인게이지 타입 센서는 정밀하게 큰 힘을 측정할 수 있는 장점이 있지만 일반적으로 단단하고 무거운 구조물과 함께 사용된다. 또한 증폭기, 휘트스톤 브릿지 회로 등의 추가로 인해 부피가 커진다는 단점이 존재한다. Kim 외 5인⁵⁾은 3D 프린팅으로 제작가능한 3축 힘센서를 제시하였다. 표면에 CNT/TPU로 감지부가 인쇄된 빔들로 구성된 모놀리식 구조를 사용하고, 사용자의 요구사항에 맞춰 디자인과 소재 수정이 가능하다는 장점이 있다. 측정 가능 범위는 4N까지 가능하다. 3D 프린팅을 이용한 다축 센서들은 제

Received : Mar. 10. 2022; Revised : Apr. 12. 2022; Accepted : Apr. 13. 2022

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2021R1F1A1062499)

1. Undergraduate Researchers, Department of Human Intelligence Robot Engineering, Sangmyung University, Cheonan, Korea (chsang, wns986, hunee_e2@naver.com)

† Assistant Professor, Corresponding author: Department of Human Intelligence Robot Engineering, Sangmyung University, Cheonan, Korea (hyunjin@smu.ac.kr)

작과정이 간단하다는 장점이 있지만, 추가적인 고가의 센서를 사용해야 하거나¹⁸⁾, 힘 측정 범위가 작다는 단점이 존재한다.

최근에는 인간과 로봇의 편안하고 안전한 상호작용을 위해 부드러운 재질의 소프트 센서들도 개발되었다⁹⁻¹⁶⁾. 하지만 소프트 센서의 경우에는 단단한 재질의 센서보다 힘 측정 범위가 작거나, 제작 과정이 복잡하다는 단점이 있고, 제작과정에 고가의 기구들이 필요한 경우가 많다. 또한 재질의 특성 상 내구성이 낮으며 히스테리시스가 큰 경향이 있다.

다양한 머니플레이터에 이용할 수 있도록 안전하고 저렴한 다축 힘센서의 필요성이 커지고 있기 때문에 본 연구에서는 3D 프린팅과 저가의 센서로 간단하게 제작 가능한 2축 압력 센서를 제안한다. 2축 압력 센서의 설계 및 제작과정을 소개하고, 완성된 센서의 힘 측정 성능 실험을 진행했다. 또한 제안된 센서가 로봇 그리퍼 또는 웨어러블 디바이스에 응용될 수 있음을 간단한 실험을 통해 보여주었다.

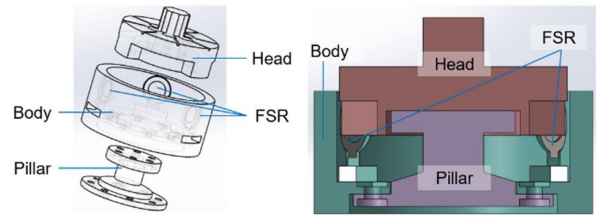
2. 2축 압력 센서 설계 및 제작

2.1 저가형 압력센서

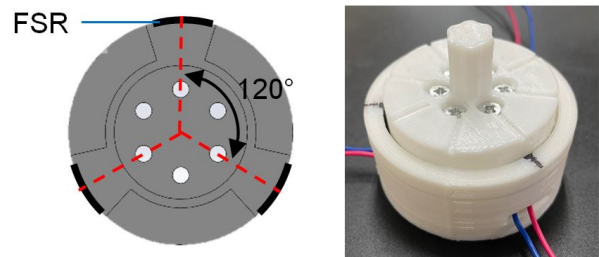
본 연구에서는 다축 힘 센서에 주로 사용되는 스트레인게이지를 사용하지 않고 ㈜마블텍스의 FSR-RA12P 모델을 사용한다. 1만원 이하의 비교적 저렴한 가격과 별도의 증폭기 및 휘트스톤브릿지 회로를 사용하지 않고도 압력에 의해 저항값이 변하기 때문에 사용이 쉬운 장점이 있다.

2.2 2축 압력 측정 원리 및 구조

FSR-RA12P는 길이 14.15 mm, 폭 12 mm, 두께 1.55 mm, 센싱 영역은 직경 4.8 mm 이며, 힘 측정 범위는 최대 4-5 kg이다. 본 연구에서 제안하는 2축 압력 센서는 FSR-RA12P 3개를 사용한다. [Fig. 1]의 왼쪽 그림은 2축 압력 센서의 분해도이고, [Fig. 1]의 오른쪽 그림은 2축 압력 센서의 단면도를 보여준다. 적색은 Head, 자색은 Pillar 그리고 청록색은 Body를 나타낸다. 이 3개의 파트로 2축 압력 센서를 제작하였다. 3개의 FSR 센서는 Body 안쪽 벽 부분에 내장된다. Body 안쪽 벽에 맞닿도록 Head부에 방사형으로 3개의 돌출부를 설계하였다. [Fig. 2]의 왼쪽 그림은 Head의 아래쪽에서 보는 모습이다. Head의 돌출부와 Body의 FSR이 접하게 되며, 각 축 방향의 힘에 따라 Head가 FSR에 압력을 가하도록 하는 구조이다. Body의 하단부에는 각 FSR 센서의 배선이 통과될 수 있는 구멍을 만들어 두었다. 제안하는 2축 압력 센서는 하단이 고정되고 Pillar의 변형으로 인해 Head가 FSR에 접촉되어 외력을 전달하는 cantilever beam의 특성을 이용한 센서이다. 이 원리를 활용하기 위해 하



[Fig. 1] Exploded view (left) and sectional view (right) of the proposed 2-axis pressure sensor



[Fig. 2] (left) Bottom view of the head, and (right) the completed 2-axis pressure sensor

단의 고정이 견고하게 이루어져야 한다. 견고한 고정을 위해 Pillar와 Body는 1차적으로 하단부의 걸리는 형태로 설계되었으며, 8개의 볼트와 너트를 사용하여 고정한다. Pillar와 Head 또한 동일한 방식으로 6개의 볼트와 너트를 사용하여 고정하였다.

스트레인게이지 방식과 같은 다축 힘 센서에서는 일반적으로 +x, -x, +y, -y 방향으로 4개의 센서가 필요하지만, 본 연구에서는 3개의 FSR을 120°씩 간격을 두어 배치하여¹⁷⁾ 적은 수의 센서로 2축의 힘을 측정할 수 있도록 했다.

2.3 3D 프린팅을 사용한 시제품 제작

센서의 Head부에 힘이 가해지면 Head부가 Pillar에 힘을 전달하고, Pillar는 외력에 의해 Cantilever beam과 같이 변형된다. 변형된 Pillar에 의해 Head가 FSR센서에 압력을 가하게 된다. Head와 Body 사이에 반력이 잘 전달되기 위해서는 Body에 충분한 강도가 필요하다. 이 조건을 만족시키기 위해 큰 힘에도 파괴 또는 균열이 일어나지 않고, 변형률이 적은 PLA (Polylactic acid) 필라멘트를 장착하여 3D 프린팅으로 Body를 제작했다.

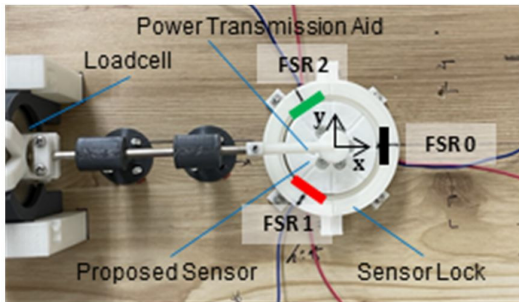
Head는 2축 압력 센서의 가장 상단에 위치하며, 돌출부로부터 외력을 받아 FSR에 전달하는 역할을 수행한다. 조립 후 별도의 외력을 가하지 않았을 때 FSR센서는 Head에 의한 일정 크기 만큼 눌리도록 Head부를 약간 크게 설계하였으며, 변형이 가능하고 복원력을 가진 TPU (Thermoplastic polyurethane) 재질로 3D 프린팅을 하였다. Head에 가해지는 외력의 방향에 의해 FSR은 초기상태보다 더 강한 압력을 받거나 적은 압력을 받게 되며, 3개의 센서 출력 값을 통해 외력의 크기와 방향을 알 수 있다.

[Fig. 2]의 오른쪽 그림은 3D프린팅된 부품과 FSR 센서를 조립하여 2축 압력 센서 제작을 완료한 모습이다. 완성된 2축 압력 센서의 크기는 지름 55 mm, 높이 40 mm의 원통형이다. Head 상단에 빗살무늬를 추가하여 FSR의 위치를 상단에서 확인할 수 있도록 했다.

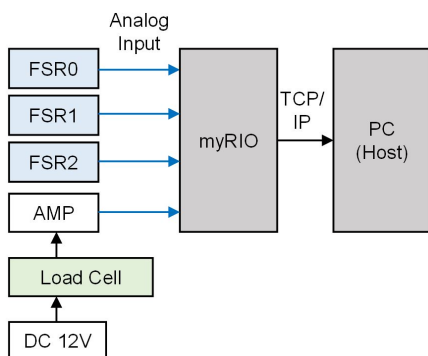
3. 2축 힘 측정 실험

3.1 실험 장치 및 환경

[Fig. 3]은 2축 압력 센서를 통해 각 축에 따른 방향과 힘의 크기를 측정하기 위한 측정 장치 구성이다. 정확한 힘을 측정하기 위해 CAS사의 MNC-50L 로드셀을 사용하여 측정 장치를 제작하였다. 로드셀의 센싱 영역은 2축 압력 센서 Head의 돌출부와 수평으로 위치하며, 손으로 원하는 만큼의 힘을 밀면 로드셀이 수평을 유지하며 레일을 따라 이동하여 힘을 전달한다. 로드셀을 밀어 가해지는 힘은 힘 전달 보조 기구를 통해 2축 압력 센서의 돌출부에 전달된다. 이 때, 정확한 측정을 위해 2축 압력 센서가 이동하지 않도록 실험판에 고정하였다. 2축 압력 센서의 +x, -x, +y, -y방향 힘에 대해 각각 측정할 때, [Fig. 3]에 설정된 축에 따라 센서를 회전시켜 조정한다. 3개의 FSR은 각각 FSR 0, FSR 1, FSR 2로 정의하며 각 FSR의 색은 실험 결과에서 나타나는 그래프에서 표현되는 색과 동일하다.



[Fig. 3] Experimental setup using the load cell and the proposed sensor, and the axis configuration



[Fig. 4] System configuration diagram for experiment

현재 상태는 +x 방향을 측정할 때의 모습을 나타낸다.

제작한 힘센서에 포함된 3개의 FSR 센서와 로드셀은 [Fig. 4]의 다이어그램과 같이 National Instruments 사의 myRIO의 Analog Input 으로 측정한다. 로드셀은 매우 미세한 전압값을 출력하기 때문에 증폭기를 사용하여 신호를 증폭시킨 후 측정한다. myRIO에서는 100Hz의 Sampling frequency로 센서값을 측정하였다. 측정된 데이터는 데이터 저장 및 시각화 그래프를 그리기 위해 TCP/IP 통신으로 HOST PC로 전달된다.

3.2 실험 결과

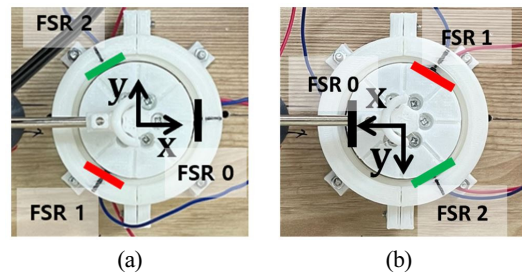
FSR 센서 측정 값을 s_0^r, s_1^r, s_2^r 이라 할 때, 힘 측정 계산에 사용되는 센서 값은 초기 값을 제외하고 아래와 같이 구한다.

$$FSR_i(k) = s_i^r(k) - b_i \tag{1}$$

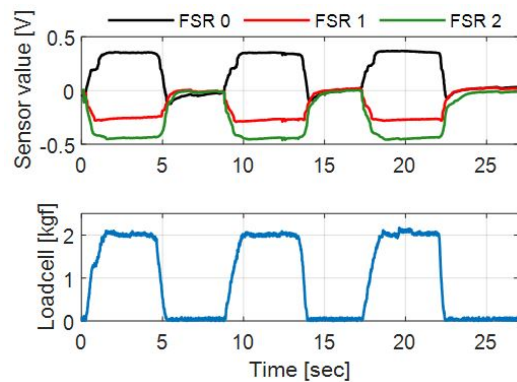
여기에서 $i = \{0, 1, 2\}$ 이고, b_i 는 2축 압력 센서 모듈에 아무런 힘이 가해지지 않을 초기 상태 4초 동안의 s_i^r 값의 평균으로 한다.

3.2.1 x축 압력 실험

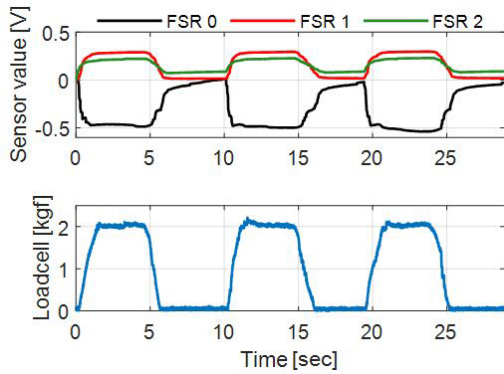
[Fig. 5]과 같이 +x 방향과 -x방향에 대해 0~2 kg 까지의 힘을 가하며 센서 값을 측정했다. Unloading 상태에서 시작하여 Peak Loading (2 kg)의 지점에서 약 5초를 대기한 후, Unloading



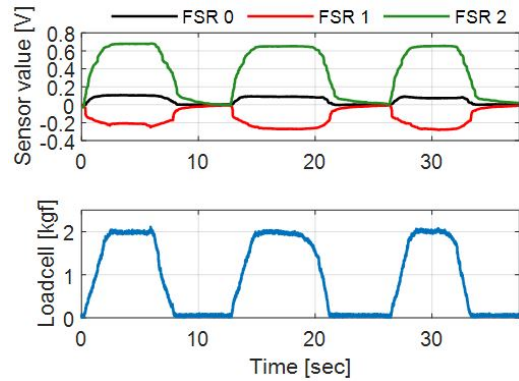
[Fig. 5] Axis configuration in (a)+x, and (b)-x direction



[Fig. 6] Experimental results of +x directional force



[Fig. 7] Experimental results of -x directional force



[Fig. 9] Experimental results of +y directional force

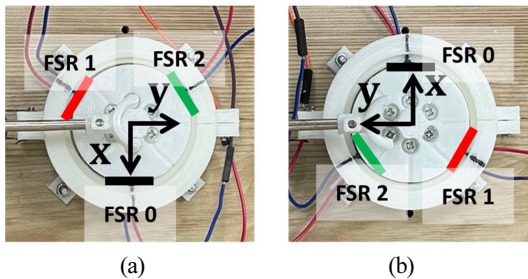
상태로 되돌아와 5초 동안 대기하는 과정을 총 3번 실시했다.

[Fig. 6]은 +x 방향의 힘에 대해 3개의 FSR 센서의 측정값과 그 때의 loadcell 측정값을 보여준다. 일정한 loadcell 측정값은 일정한 힘이 가해졌음을 의미하며, 실험장치는 지정된 축 방향의 힘 만을 가하도록 제작되었다. +x 방향의 힘에 대해 FSR0 은 압력이 가해지며 측정값이 증가할 것이고, FSR1과 FSR2는 초기상태보다 Head가 멀어지게 되어 측정값이 감소하게 된다. 실험 결과는 이러한 가정에 부합하도록 FSR0은 양의 값을, 다른 센서는 음의 값을 갖는다.

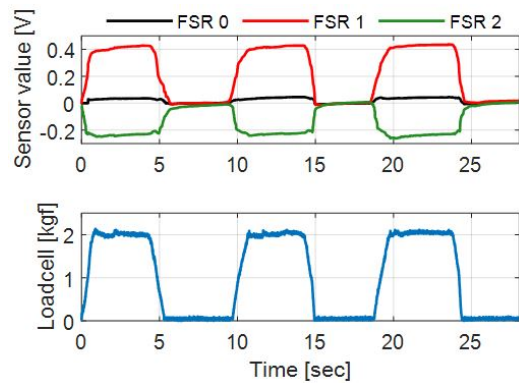
[Fig. 7]은 같은 방법으로 -x 방향의 힘에 대한 실험 결과를 나타낸다. FSR1과 FSR2는 x축과 동일한 각도만큼 떨어져 있기 때문에 측정값은 이상적으로 동일해야 한다. 실험 결과도 -x 방향에 대해 FSR0은 음의 값을 나타내고, FSR1과 FSR2는 유사한 크기로 양의 방향의 값이 측정되었다.

3.2.2 y축 압력 실험

x축 압력 실험과 동일한 방법으로 +y방향과 -y방향으로 0~2 kg의 힘을 가하여 실험을 수행했다. [Fig. 8]은 +y방향의 힘과 -y방향의 힘을 가하기 위한 실험 세팅을 보여준다. 그림에서와 같이 y축 힘에 대해서는 FSR0은 y축과 수직으로 배치되어 이상적으로는 값의 변화가 없어야 한다. 반면 FSR1와 FSR2의 경우 y축과 같은 각도만큼 떨어져 있으나 방향이 반대이기 때문에 크기가 같고 부호가 반대인 측정값을 나타내야



[Fig. 8] Axis configuration in (a)+y, and (b)-y direction

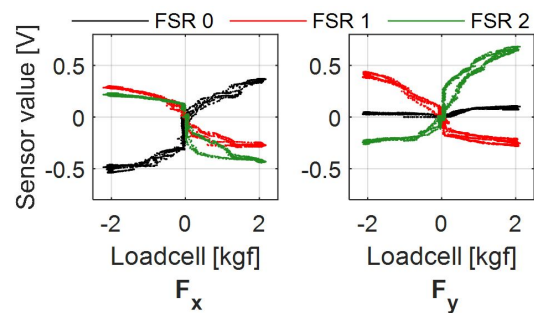


[Fig. 10] Experimental results of -y directional force

한다. [Fig. 9]과 [Fig. 10]는 실험의 결과를 보여준다.

3.3 2축 힘 관계식 도출

실험을 통해 측정된 각 축 방향의 힘과 세 개의 FSR 센서와의 관계는 [Fig. 11]와 같이 나타낼 수 있다. 120°씩 떨어진 FSR 센서 배치에 의해 x축 힘에 대해서는 FSR0 이 양의 상관관계를 가지고, FSR1과 FSR2는 비슷한 크기의 음의 상관관계를 갖는다. y축 힘에 대해서는 FSR0은 큰 영향을 받지 않으며, FSR1은 음의 상관관계를 FSR2는 양의 상관관계를 갖는다. 이



[Fig. 11] Relationship between x and y directional forces and FSR sensor measurements

러한 관계는 세 개의 센서값에 의해 구한 x축 힘 SF_x 와 y축 힘 SF_y 로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} SF_x \\ SF_y \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} FSR_0 \\ FSR_1 \\ FSR_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{x0} & k_{x1} & k_{x2} \\ 0 & k_{y1} & -k_{y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} FSR_0 \\ FSR_1 \\ FSR_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위와 같은 식을 만족하는 K 를 실험적으로 도출하기 위해 Least mean squares method를 사용하였다. 주어진 조건으로 도출된 값은 다음과 같다.

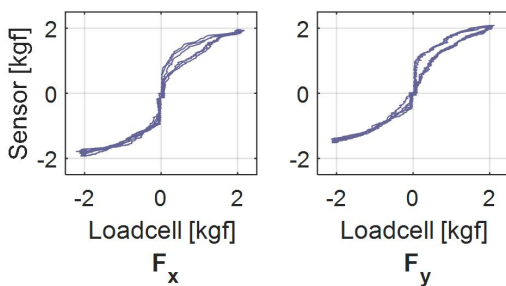
$$K = \begin{bmatrix} 1.8287 & -1.7894 & -1.7894 \\ 0 & -2.2324 & 2.2324 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[Fig. 12]는 도출된 K 값을 적용하여 계산한 힘 SF_x 와 SF_y 를 나타내고 있다. x축 힘과 y축 힘에 대해 양의 상관관계를 가지는 센서 힘이 도출되었다. 그러나 도출된 힘 측정값은 FSR 센서의 특성인 비선형성을 보이고 있다. 각 축방향 힘에 대한 센서힘 값의 비선형성을 줄이기 위해 로드셀 측정 힘 값과 함께 3차 다항식으로 근사하였다.

$$\begin{aligned} F_x &= a_1(SF_x)^3 + a_2(SF_x)^2 + a_3(SF_x) + a_4 \\ F_y &= b_1(SF_y)^3 + b_2(SF_y)^2 + b_3(SF_y) + b_4 \end{aligned} \quad (4)$$

MATLAB의 Curve fitting toolbox를 사용하여 a_i 와 b_i 를 구하였고, 그 결과는 [Table 1]에 정리하였다.

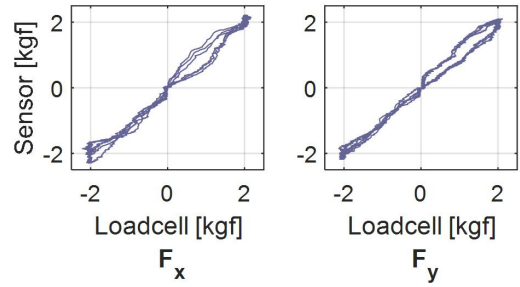
도출된 근사식을 적용하여 제안하는 센서로 측정된 x축 방향의 힘과 y축 방향의 힘은 [Fig. 13]에서 볼 수 있듯이 loadcell 측정값과 선형관계를 보이고 있다. [Fig. 14]는 x축 힘 실험과 y



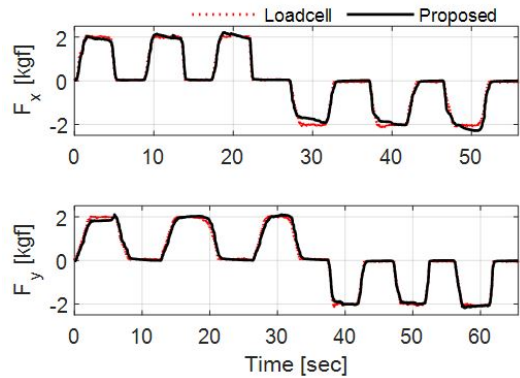
[Fig. 12] Relationship between x and y directional force and force calculated by sensor measurements

[Table 1] Coefficients of fitting function

i	1	2	3	4
a_i	0.2722	-0.0322	0.1369	0.0405
b_i	0.2790	-0.2748	0.3685	-0.0081



[Fig. 13] Calibrated force measurements



[Fig. 14] Force measurement results of proposed sensor in x and y direction

축 힘 실험 결과를 시간 그래프로 그렸다. 근사식의 R^2 값은 F_x 의 경우 0.9903, F_y 의 경우 0.9928 이었다.

각 축 방향 힘의 accuracy는 다음 식으로 도출하였다¹⁷⁾.

$$\%E_{i,acc} = \frac{\sum_{k=1}^N |F_i(k) - F_{i,loadcell}(k)|}{N \max |F_{i,loadcell}(k)|} \times 100 \quad (5)$$

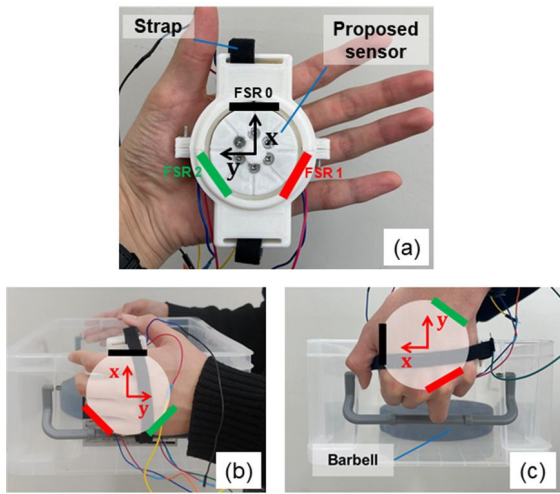
여기에서 $i = x, y$ 이고, N 은 전체 데이터 샘플 수이다. 계산된 accuracy는 x축에서는 4.24%, y축에서는 4.47%를 나타냈다. 각 축 방향 힘의 non-linearity는 아래 식 (6)으로 계산하였다.

$$\%E_{i,nlin} = \frac{\max |F_i(k) - F_{i,FSO}(k)|}{F_{i,FSO}} \quad (6)$$

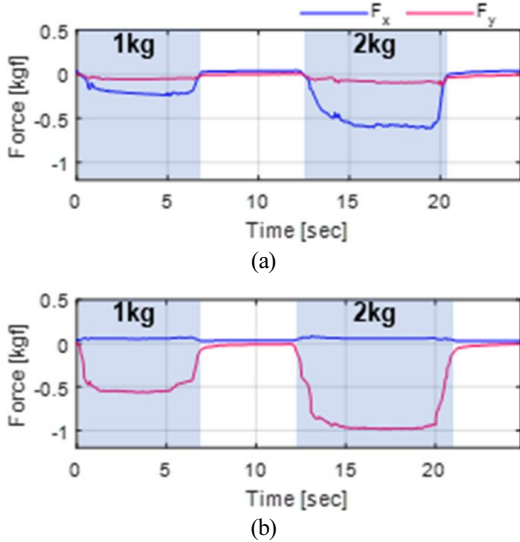
계산된 값은 x축에서 11.17%, y축에서 9.37% 였다.

3.4 착용형 2축 힘 측정 장치 실험

제안하는 2축 힘 측정 센서모듈은 다양한 어플리케이션에 적용할 수 있다. 로봇 그리퍼나 머니플레이터의 엔드이펙터 단에 부착해서 다축 힘을 측정할 수 있다. 다자유도 그리퍼를 직접 설계하기 이전에 그 활용 가능성을 확인하기 위해 [Fig.



[Fig. 15] (a) Wearable device with proposed sensor. (b) Lifting a box in the +x direction and (b) the +y direction



[Fig. 16] Box lifting results of (a) +x direction and (b) +y direction

15(a)]와 같이 간단한 착용형 장치를 제작하였다. 스트랩을 사용하여 2축 센서 모듈을 손바닥부에 착용하고, 무게추를 담은 플라스틱 박스를 들어올리는 실험을 수행하였다. [Fig. 15(b)], [Fig. 15(c)]와 같이 양 손으로 박스를 들어올리는 동작을 하였고, 센서를 착용한 손에는 손가락을 사용하지 않고 센서의 Head 돌출부가 박스를 들어 올리도록 하였다.

[Fig. 15(b)]와 [Fig. 16(a)]는 +x방향으로 박스를 들고 있는 모습과 그 측정 결과이다. 실험 초기 상태는 박스를 바닥에 둔 상태에서 진행된다. 바닥에서 박스를 들게 되면 5초동안 유지를 하고 다시 바닥에 내려놓고 5초동안 대기했다. 이 과정을 2회 반복하게 되며 각 회마다 1kg씩 증량되어 2kg까지 실험을 진행했다. 박스의 무게에 의해 센서에는 -x 방향의 힘이 작용하게 되고, 측정 결과는 F_y 는 거의 변하지 않고, F_x 가 무게 증

가에 따라 증가함을 보였다. [Fig. 15(c)]와 [Fig. 16(b)]는 +y 방향으로 박스를 들고있는 모습과 그 측정 결과이다. 센서에는 -y 방향의 박스 무게가 가해지며, 중량이 증가함에 따라 F_y 값이 증가함을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 머니플레이터의 엔드 이펙터에 설치될 수 있는 2축 압력 센서를 제작하였다. 제안하는 2축 압력 센서는 3개의 부품을 3D 프린팅으로 출력하고, 3개의 상용 FSR 센서를 사용해서 제작했다. 시중에서 쉽게 구할 수 있는 PLA, TPU 필라멘트를 사용했으며, 출력에 사용된 필라멘트와 FSR 센서 등을 종합하면 센서 모듈 하나에 약 2만원 정도의 비용이 필요했다. 조립형으로 디자인 되었기 때문에 특정 부품이 파손되거나, FSR 센서가 수명을 다할 경우 손쉽게 교체 및 재조립이 가능하다는 장점이 있다.

2축 힘센서는 3개의 FSR 센서가 120° 간격으로 배치되었는 점과, Head부품이 조립되면서 일정 크기의 초기압력을 가하도록 설계되었다는 점이 특징이다. 이러한 특징으로 인해 외력의 방향에 따라 FSR 센서에 가해지는 눌림힘은 상대적으로 양과 음의 값을 나타내게 된다. 제작이 완료된 2축 압력 센서는 로드셀을 이용하여 +x, -x, +y, -y축 방향으로 최대 2kg의 힘을 가하는 실험을 진행했다. 힘의 방향에 따라 나타나는 그래프의 형태를 통해 각 FSR 센서와 힘의 방향 사이의 상관관계를 도출할 수 있었으며, 센서 값에서 2축 힘 값을 도출하는 관계식을 정립하였다. 제안된 센서는 x축과 y축 힘에 대해서 4.24%와 4.47%의 accuracy를 보였다. FSR 센서의 비선형 특성과, 탄성을 가지는 TPU 재질의 특성으로 인해 히스테리시스 발생하였으며, 이로인한 힘 측정의 비선형성이 발생하였다. 또한 단축 힘만을 가할 수 있는 실험장치의 한계로 인하여 실제 가한 힘의 방향을 정밀하게 제어하기 어려웠다.

추후에는 FSR 센서와 탄성체의 비선형성을 고려한 힘 측정 방법을 도출하고, 단축 로드셀이 아닌 상용 다축센서를 사용하여 힘의 방향이 실시간으로 변하는 경우에 대한 힘측정 성능을 분석하고자 한다. z축 힘 까지 측정할 수 있는 3축 센서를 제작하게 되면, 다양한 머니플레이터 엔드 이펙터에 저렴한 비용으로 적용 가능할 것으로 보인다.

References

[1] V. Grosu, S. Grosu, B. Vanderborcht, D. Lefeber, and C. Rodriguez-Guerrero, "Multi-Axis Force Sensor for Human-Robot Interaction Sensing in a Rehabilitation Robotic Device," *Sensors*, vol. 17, no.1, pp. 1294, 2017, DOI: 10.3390/s17061294.

- [2] Y.-S. Jeong and C.-S. Lee, "External Force Estimation by Modifying RLS using Joint Torque Sensor for Peg-in-Hole Assembly Operation," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 13, no. 1, pp. 55-62, 2018, DOI: 10.7746/jkros.2018.13.1.055
- [3] H.-S. Kim and G.-S. Kim, "Development of Calf Link Force Sensors of Walking Assist Robot for Leg Patients," *Journal of Sensor Science and Technology*, vol. 26, no. 2, pp. 114-121, 2017, DOI: 10.5369/JSST.2017.26.2.114.
- [4] B. Wu, J. Luo, F. Shen, Y. Ren, and Z. Wu, "Optimum design method of multi-axis force sensor integrated in humanoid robot foot system," *Measurement*, vol. 44, no. 9, pp. 1651-1660, 2011, DOI: 10.1016/j.measurement.2011.06.013.
- [5] K.-J. Lee, H.-M. Kim, and G.-S. Kim, "Design of Smart Three-Axis Force Sensor," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 226-232, 2016, DOI: 10.5369/JSST.2016.25.2.110.
- [6] F. Wasserfall, N. Hendrich, F. Fiedler, and J. Zhang, "3D-Printed low-cost modular force sensors," *Human-Centric Robotics*, pp. 485-492, 2017, DOI: 10.1142/9789813231047_0059.
- [7] N. Hendrich, F. Wasserfall, and J. Zhang, "3D Printed Low-Cost Force Torque Sensors," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 140569-140585, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3007565.
- [8] K. Kim, J. Park, J.-H. Suh, M. Kim, Y. Jeong, and I. Park, "3D printing of multiaxial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 263, pp. 493-500, 2017, DOI: 10.1016/j.sna.2017.07.020.
- [9] U. Mayetin and S. Kucuk, "A low cost 3-DOF force sensing unit design for wrist rehabilitation robots," *Mechatronics*, vol. 78, pp. 102623, August, 2021, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2021.102623.
- [10] D. S. Chaturanga, Z. Wang, Y. Noh, T. Nanayakkara, and S. Hirai, "A Soft Three Axis Force Sensor Useful for Robot Grippers," *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, Korea, 2016, DOI: 10.1109/IROS.2016.7759817.
- [11] L. Viry, A. Levi, M. Totaro, A. Mondini, V. Mattoli, B. Mazzolai, and L. Beccai, "Flexible Three-Axial Force Sensor for Soft and Highly Sensitive Artificial Touch," *ADVANCED MATERIALS*, vol. 26, no. 17, pp. 2659-2664, 2014, DOI: 10.1002/adma.201305064.
- [12] S.-J. Kim, J.-Y. Choi, H.-P. Moon, H.-R. Choi, and Ja-Choon Koo, "Development of Polymer Slip Tactile Sensor Using Relative Displacement of Separation Layer," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 11, no. 2, pp. 100-107, Jun., 2016, DOI: 10.7746/jkros.2016.11.2.100.
- [13] K. Song, "HASEL Actuator Study for Tactile Feedback Device," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 16, no. 1, pp. 12-16, Mar., 2020, DOI: 10.7746/jkros.2021.16.1.012.
- [14] D. M. Vogt, Y.-L. Park, and R. J. Wood, "Design and Characterization of a Soft Multi-Axis Force Sensor Using Embedded Microfluidic Channels," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, Oct., 2013, DOI: 10.1109/JSEN.2013.2272320.
- [15] K. Kim, J. Ahn, Y. Jeong, J. Choi, O. Gul, and I. Park, "All-soft multiaxial force sensor based on liquid metal for electronic skin," *Micro and Nano Syst Lett*, vol. 9, no. 2, 2021, DOI: 10.1186/s40486-020-00126-9.
- [16] Y. Mengucx, Y.-L. Park, H. Pei, D. Vogt, P. M. Aubin, E. Winchell, L. Fluke, L. Stirling, R. J. Wood, and C. J. Walsh, "Wearable soft sensing suit for human gait measurement," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 14, 2014, DOI: 10.1177/0278364914543793.
- [17] H. Choi and K. Kong, "A soft three-axis force sensor based on radially symmetric pneumatic chambers," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 13, 2019, DOI: 10.1109/JSEN.2019.2904606.



최헌수

2017~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 (학사)

관심분야: 기구설계, 지능형로봇, 로봇제어



성지훈

2018~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 (학사)

관심분야: 로봇회로설계, 웨어러블 로봇



여준성

2017~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 (학사)

관심분야: 웨어러블 로봇, 소프트 로보틱스, 인공지능



최현진

2012 서강대학교 물리학과(이학사)
2019 서강대학교 기계공학과(공학박사)
2017~2020 (주)엔젤로보틱스 책임연구원
2020~현재 상명대학교 휴먼지능로봇공학과 조교수

관심분야: 재활로봇, 착용형로봇, HRI