

폴리머 재료를 이용한 유연 수직/수평 힘 센서 어레이 개발 및 응용

Development and Application of Polymer-based Flexible Force Sensor Array

황은수¹, 윤영로², 윤형로², 신태민², 김용준¹✉

Eun-Soo Hwang¹, Young-Ro Yoon², Hyoung-Ro Yoon², Tae-Min Shin² and Yong-Jun Kim¹✉

¹ 연세대학교 공과대학 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)

² 연세대학교 보건과학대학 의공학부 (Department of Biomedical Engineering, Yonsei Univ.)

✉ Corresponding author: yjk@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-2844

Manuscript received: 2007.11.15 / Revised: 2009.1.4 / Accepted: 2009.1.16

This paper proposes and demonstrates novel flexible contact force sensing devices for 3-dimensional force measurement. To realize the sensor, polyimide and polydimethylsiloxane are used as a substrate, which makes it flexible. Thin-film metal strain gauges, which are incorporated into the polymer, are used for measuring the three-dimensional contact forces. The force sensor characteristics are evaluated against normal and shear load. The fabricated force sensor can measure normal loads up to 4N. The sensor output signals are saturated against load over 4N. Shear loads can be detected by different voltage drops in strain gauges. The device has no fragile structures; therefore, it can be used as a ground reaction force sensor for balance control in humanoid robots. Four force sensors are assembled and placed in the four corners of the robot's sole. By increasing bump dimensions, the force sensor can measure load up to 20 N. When loads are exerted on the sole, the ground reaction force can be measured by these four sensors. The measured forces can be used in the balance control of biped locomotion system.

Key Words: Contact Force (접촉력), Ground Reaction Force (지면반발력), Strain Gauge (스트레인게이지), Force Sensor (힘센서), Tactile (촉각)

1. 서론

소형화된 마이크로 힘 센서는 로봇 시스템, 수술용 도구, 음식물가공 분야 등에 사용될 것으로 기대가 되고 있다.¹⁻⁷ 초소형 기계전자 시스템 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 기술의 출현은 이 분야의 관련연구를 촉진시켜, 실리콘(Si), 폴리머, 압전 물질 등을 이용한 여러 종류의 MEMS 기반 소형 힘 센서 어레이가 개발되어져 오고 있다.⁸⁻¹³

로봇 시스템에 있어서, 물건을 잡을 때 물건이

미끄러지지 않도록 로봇 손의 힘을 제어하기 위해서는, 3 축(평면에 수직방향과 평면상에서 서로 수직인 두 개의 방향) 힘의 감지가 중요하다. 3 축의 힘을 측정할 수 있는 센서가 없이는 종이컵, 불특정한 형태의 물체를 잡기가 어렵기 때문이다.^{9,10} 이러한 3 축의 힘을 측정하기 위해서 실리콘 박막 구조가 연구되어져 왔다. 그러나 이러한 실리콘 재료를 사용한 센서는 기계적으로 유연하게 가공되어지기가 어렵다. 실리콘 박막 힘 센서를 유연하게 제작하기 위해서, 실리콘 공정이 끝난 이후에 폴리머를 이용하는 하이브리드 패키징(hybrid

packaging) 방법이 사용되곤 하였다. 이러한 방법에는 폴리이미드 층을 실리콘 센서를 연결하도록 하는 방법과 유연 기판(flexible Printed Circuit Board) 위에 실리콘센서를 에폭시를 이용하여 실장(mounting) 하는 방법이 있다.^{10,11} 그러나, 이러한 패키징 방법은 공정 자체가 복잡하여 수율을 낮추는 결과를 가져온다. 또한 실리콘 박막 구조의 3축 힘 센서는 피에조레지스터(piezoresistor)를 센싱 재료로 사용하는데, 이는 비싼 장비와 복잡한 공정을 수반한다. 이온주입기(ion-implanter), 저온화학기상증착장치(Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 등이 그것이다. 요컨대, 실리콘 재료를 이용한 3축 힘 센서의 구현은 공정이 대단히 복잡하고, 공정 비용 또한 비싸다.

3축 힘 센서의 공정 비용을 감소시키기 위해서, 폴리머를 이용한 힘 센서들이 개발되어지기 시작했다.¹²⁻¹⁵ 두 가지의 힘 측정 방법이 사용되어지고 있는데, 하나는 전기적 저항 변화를 감지하는 방법이고 다른 하나는 정전용량의(capacitance) 변화를 감지 하는 방법이다. 이 정전용량 변화 감지 방법은 수직력을 측정하기에 효과적이다. 그러나 수평방향으로 작용하는 힘을 측정하기가 어렵다. 게다가 폴리머의 연성으로 인해서 정전용량 변화 감지 법은 측정 압력 범위가 좁은 단점이 있다. 압전 필름을 사용하는 연구 그룹도 있으나, 이 방법 또한 수평힘을 측정하는 데에 한계를 가지고 있다.¹⁷

광섬유(optical fiber) 를 이용한 3축 힘센서도 개발되어지고 있다.^{15,16} 그러나 이 방법은 CCD (Charge-Coupled Device), 발광원이나 웨이브 공급처 등 추가적인 광학 장치가 필요하다. 이러한 이유로, 저가의 3축 힘 센서의 개발은 아직까지 여러 연구자들의 관심이 되고 있다.

본 논문에서는 저가의 유연 3축 힘 센서 어레이를 개발하고, 로봇의 균형을 잡기 위한 지면 반발력 센서로서 적용하였다. 폴리이미드(polyimide)와 PDMS(polydimethylsiloxane)가 기판 물질로 사용되었으며, 금속 스트레인게이지가 3축힘을 측정하도록 고안되었다. 제안된 센서의 주요한 특징으로는 실리콘 박막 구조같은 변형구조물이 없다는 것이다. 이럼으로써, 감도는 줄어들고 강도와 안정성은 높아지게 되었다.

2. 센서 구조 및 측정 원리

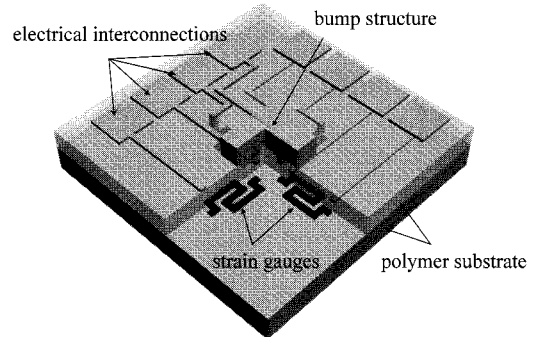


Fig. 1 Schematic view of the proposed 3-axis force sensor: Strain gauges are embedded in a ductile polymer substrate. A bump structure that is used for load distribution is placed on the top of the sensor surface

2.1 센서 구조

하나의 기판에(substrate) 외력이 가해지게 되면, 그 기판은 힘의 평형을 유지하기 위해서 응력을 받게 된다. 이러한 응력은 Hooke's law 에 의해서 변형률로 나타나게 된다. 많은 경우에 얇은 박막 구조가 이러한 변형률을 확대하기 위한 방법으로 사용되게 된다. 본 연구에서는 이러한 실리콘 박막 구조를 폴리머 기판으로 대체 하였다. Fig. 1 은 제안된 센서 구조를 모식적으로 나타낸다. 변형률을 측정할 수 있는 스트레인 게이지가 연성의 폴리머 기판 내에 삽입되어 있다. 얇은 금속 막이 스트레인 게이지로 사용된다. 범프 구조가 기판 표면에 있어, 외력을 기판에 전달하는 역할을 하도록 되어 있다. 외력이 가해졌을 때, 폴리머 기판이 변형하게 되고 이 변형은 금속 스트레인게이지의 기하학적 변형을 일으키어 전기적인 저항 값이 변화하게 된다. 이러한 전기저항의 변화를 감지함으로써, 외력을 측정할 수 있다.

실리콘 박막 구조의 경우 변형률의 크기는 박막 중앙의 변위와 박막의 두께에 의해서 영향을 받는다. 반면에 제안된 센서 구조는 범프 구조의 크기와 폴리머의 연성에 의해서 영향을 받게 된다. 유한 요소 방법을 이용하여 같은 힘에 대한 실리콘 박막 구조와 제안된 센서 구조에서의 변형률의 크기를 비교하였다. 실리콘 박막 구조 모델의 치수가 Fig. 2(a)에 나타나 있으며, 제안된 센서구조 모델의 치수는 Fig. 2(b)에 나타나 있다. 해석을 위해 사용된 물성치로는 실리콘의 탄성계수로는 165

GPa, poison ratio 로는 0.22 가 사용되었으며, 폴리머 구조에는 각각 2.6GPa 과 0.35 가 사용되었다. 유한 요소법에 의한 해석 결과가 Fig. 2(c)와 (d)에 각각 나타나 있다. 실리콘 박막 구조의 최대 변형률은 제안된 구조에서보다 10 배나 크게 나타난다. 그러나 제안된 센서에서의 변형률 또한 금속 스트레인 게이지에 의해 측정될 수 있을 정도의 크기임을 주목할 필요가 있다. 그러므로 유한요소법에 의한 해석 결과는 제안된 구조가 박막구조를 가지고 있지 않더라도 외력을 스트레인게이지를 통해서 측정할 수 있다는 것을 확인 시켜준다.

대부분의 실리콘 박막 구조의 3 축 힘 센서는 도핑된(doping) 실리콘 피에조레지스터가 게이지 팩터가(GF, gauge factor) 다른 재료에 비해서 높기 때문에 이를 스트레인게이지 재료로 사용한다. 본 연구에서는 실리콘 피에조레지스터가 폴리머 공정과 함께 사용되기 어렵기 때문에 금속 스트레인 게이지를 이용하였다. 제안된 힘 센서의 감도는, 상대적으로 적은 변형률과 낮은 GF 로 인해 실리콘 박막 구조 센서 보다 작을 것이다. 그러나, 제안된 센서는 깨지기 쉬운 구조가 없으므로 과도압력에 대해서 안정된 반응을 보일 것으로 기대된다. 또한 로봇에로의 응용에서 힘 센서는 촉각 정보를 파악하는 것 뿐만 아니라, 화학적 기계적 외부 작용에 대해 안정된 경계막으로써 기능을 하여야 하므로, 제안된 구조의 강건함은 로봇에의 응용에 있어서 안정성을 보일 것이다.¹⁴

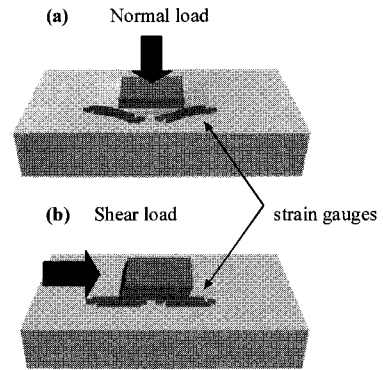


Fig. 3 Normal and shear load sensing principles: (a) In the case of a normal load, both strain gauges are subjected to tensile stress, (b) in the case of tangential load, one strain gauge is subjected to tensile stress, and the other is subjected to compressive stress

2.2 측정 원리

수직력과 수평력에 대한 측정원리를 Fig. 3 에 나타내었다. 스트레인게이지가 폴리머의 중앙에 삽입되어 있다. 외력이 작용하였을 경우 폴리머 기관이 변형을 겪게 된다. 수직력이 작용하였을 때 Fig. 3(a)에 보이듯이 두 개의 스트레인게이지가 같은 변형을 겪게 된다. 반면에 Fig. 3(b)에서 보여 지듯, 수평력이 작용하였을 때는 한쪽의 스트레인 게이지에는 인장응력이 작용하게 되며, 다른 쪽의

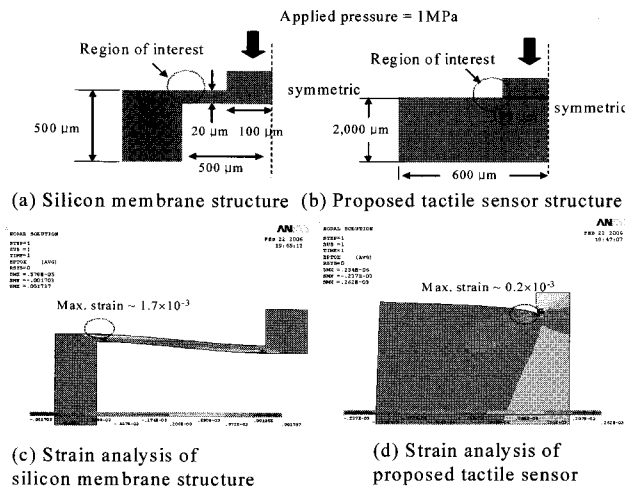


Fig. 2 FEM analysis model and results: (a) dimensions of a silicon-diaphragm model, (b) dimensions of proposed tactile sensor model, (c) FEM strain analysis result for the silicon diaphragm model, and (d) FEM strain analysis result for the proposed sensor model

스트레인게이지에는 압축응력이 작용하게 된다. 이러한 응력차이는 각각의 스트레인 게이지에서 다른 전압강하가 발생하게 되어 양단의 전위차가 발생하게 된다. 이러한 차이를 통해서 수평력을 측정할 수 있게 된다. 임의의 힘이 가해졌을 때, 이 수직력과 수평력의 중첩으로 해석될 수 있다.¹⁸ 이러한 측정원리를 통해 본 연구에서는 하나의 힘 센서가 x-방향 y-방향의 수평힘을 측정할 수 있도록, 네 개의 스트레인게이지로 구성되어지도록 설계하였다.

3. 센서 제작 및 측정

3.1 제작 공정

Fig. 4 에 간략화 된 유연 3축 힘 센서 제작 공정이 나타나 있다. 4 인치 웨이퍼에 산화막 1 μ m 를 형성한 후, 폴리이미드 전구체(PI2611, HDMicrosystems)를 1000rpm 으로 스핀코팅 한 후 300 $^{\circ}$ C 오븐에서 1 시간을 경화(curing)시켰다. 이 PI 층이 첫 번째 PI 층이다. 이후 Cu-Ni 금속층을 thermal evaporator 를 통해서 2000 Å 증착하였다. 이후 습식 식각 을 통해서 스트레인게이지 패턴을 형성 하였다. Fig. 4(a)에 폴리이미드 층위에 형성된 스트레인게이지가 보인다. 두 번째 폴리이미드를 다시 웨이퍼에 코팅하였다. 첫 번째 PI 층과 동일한 조건이 사용되었다. 패턴 된 스트레인게이지들은 이제 첫 번째 와 두 번째 폴리이미드 층에 묻혀있게 된다. 실험적으로

폴리이미드와 금속의 접합력(adhesion)은 10⁸사이클 이후에 낮아진다고 보고되고 있다.¹⁹ 본 연구에서는 폴리머 내부에 스트레인게이지가 묻혀있는 구조이므로 기계적으로 매우 안정하다. 두 번째 PI 층을 형성한 이후, Reactive Ion Etching(RIE)를 통해서 비아홀을 가공하였다. 알루미늄(Al)이 RIE 공정의 마스크 층으로 사용되었다. 비아홀 가공이후 전해도금을 통하여 전기적 연결선을 형성하였다 Fig. 4(c) 도금된 연결선의 두께는 2 μ m 이다. 이는 스트레인게이지의 두께보다 10 배나 두껍게 함으로서 대부분의 저항이 스트레인게이지에 집중되게 하기 위해서 이다. 그 후에 웨이퍼는 세 번째 폴리이미드 층으로 코팅된다. 이전과 동일한 RIE 와 전해도금을 통해서 다른 쪽의 연결선을 구현하였다 Fig. 4(d)와 (e) 마지막으로 폴리이미드를 코팅한 후 RIE 공정을 통해서 연결패드를 형성하고 최종적으로 범프 구조를 SU-8(SU-2050, MicroChem) 으로 형성하였다. Fig. 4(f) 범프의 높이는 50 μ m 이다. 제작된 센서는 웨이퍼로부터 희생 층을 제거함으로써 분리되어 유연 센서로 구현되었다.

3.2 센서 평가

Fig. 5(a)는 제작된 유연 힘센서 어레이(35 \times 35 mm², 70 μ m thick)를 보여준다. 센서어레이는 8 \times 8 개의 힘 센서로 구성되어 있으며 각각의 힘 센서는 x-축방향 y-축방향의 수평력을 측정하기 위해 네 개의 스트레인게이지로 구성되어 있다. Fig. 5(b)는

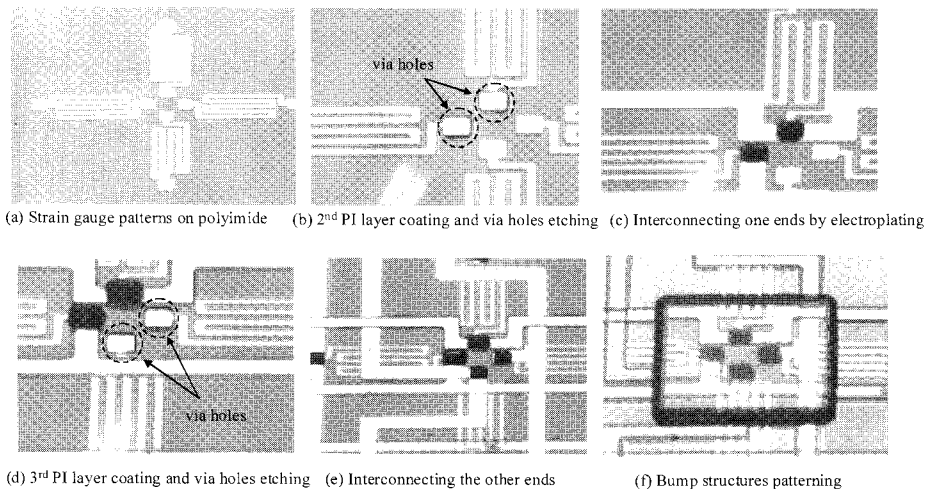


Fig. 4 Fabrication steps for the realization of the proposed device: (a) strain gague patterns on PI, (b) second PI layer coating and via hole etching, (c) interconnecting one end by electroplating, (d) third PI layer coating and via hole etching, (e) interconnecting the other end, and (f) bump structure patterning

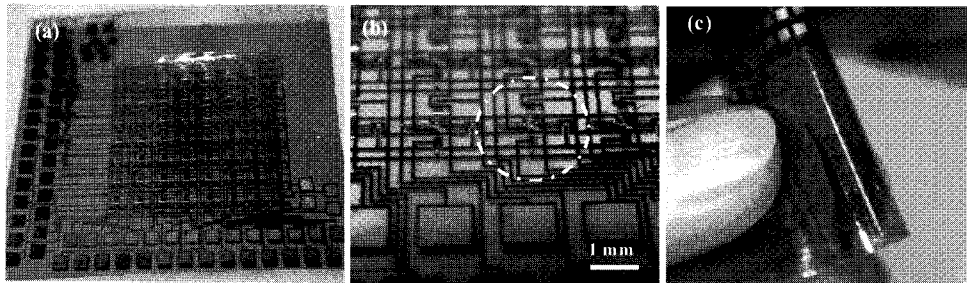


Fig. 5 Optical photographs of the fabricated flexible tactile sensor: (a) 8x8 force sensor array, (b) One unit force sensor consists of four strain gauges for normal and tangential load detection, (c) Sensor indicating its flexibility

단위 힘 센서의 모습을 확대해서 보여준다. Fig. 5(c)는 센서의 유연성을 나타내고 있다.

제작된 힘 센서 어레이는 PDMS(Sylgard 184, DOWCorning) 기판에 양면 접착 폴리이미드를 이용하여 접착되었다. 이 PDMS 기판은 가해진 힘에 의해서 변형하는 대단히 중요한 역할을 한다. 힘

은 로드 셀을 이용하여 센서에 가해지며, 가해진 힘은 로드 셀 인디케이터를 통해서 모니터링되었다. 각각 스트레인게이지에 발생하는 전압 강하량은 아날로그-투-디지털 컨버터(Analog to Digital Converter)와 휘트스톤 브릿지(Wheatstone bridge), 전압증폭기를 이용하여 측정되었다.

수직력에 대한 단위 힘센서의 응답결과는 Fig. 6(a)에 나타나 있다. 외력이 가해짐에 따라 스트레인게이지의 전압강하량도 증가하였으며, 4N의 힘 부근에서는 센서의 응답이 포화됨을 보였다. 특히, 스트레인 게이지의 전압강하량은 수직력이 범프의 정중앙부에 작용하였을 때와 범프의 한쪽 변으로 치우쳐서 작용했을 때가 다르게 나타나게 된다. 이는 기울어져서 작용하는 수직력에 대해서 한쪽 스트레인게이지에 응력이 더 집중되게 되기 때문이며, 이 효과로 인해서 한쪽 스트레인 게이지가 다른 한쪽 스트레인 게이지에 비해서 25% 정도의 저항변화를 더 경험하게 되는 오차 요인이 된다. 오차의 정도는 범프의 크기, 수직력을 가하는 탐침의(probe) 형상에 따라 각각 다르게 나타나게 된다. 본 실험에서의 범프의 크기는 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 이며, 수직력을 가한 탐침은 같은 크기로 가공된 플라스틱 재질이 사용되었다. 일반적인 외력이 가해지는 범위는 범프의 크기보다 넓으므로 본 논문에서는 수직력이 범프 정중앙에 작용한다고 가정하고, 실험을 구성하였다.

제한된 힘 센서는 깨지기 쉬운 구조물이 없으므로, 과도압력에 대해서 안정된 응답을 보였다. 이렇게 4N 이상의 수직력에 대해서 포화됨을 보이는 이유는 폴리머 체인 락킹(polymer chain locking) 때문이다.²⁰ 고무탄성학에 따르면, 외력이 가해졌을 때 이 외력은 폴리머 재료에 대해서 일을 하게 되며, 이 일은 폴리머 체인을 꼬여진 상태에서 풀리게 한다. 따라서 폴리머 체인이 그 최종 길이만큼

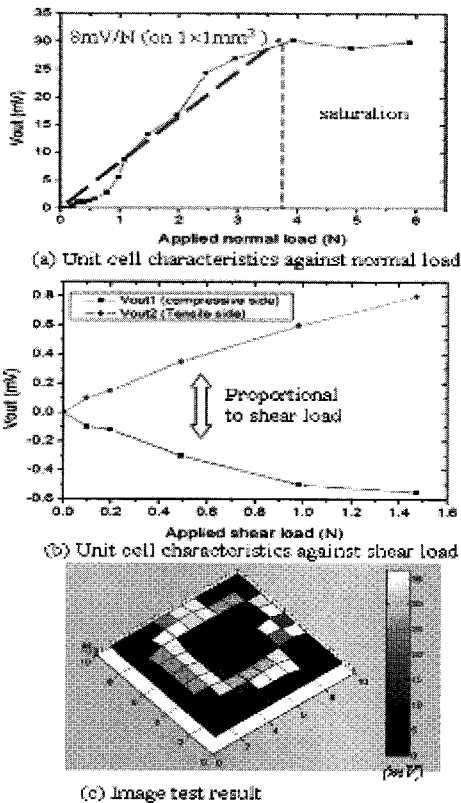


Fig. 6 Measurement results: (a) output voltages versus normal load, (b) output voltage versus tangential load, (c) 2D image test result when pressed by a ring-shape object(1 Newton)

스트레칭(stretching) 되었을 때를 폴리머 체인 락킹 이라고 한다. 이 상태에서는 더 이상 변형하게 힘들게 된다. 힘 센서가 수직력에 의해서 압축력을 받게 되면 압축력에 수직인 평면 두 방향으로 폴리머 체인이 스트레칭되게 되어, 어느 정도의 변형 후에 더 이상 변형하기 힘든 상태가 되게 된다.^{20,21} 4N의 힘은 3.7MPa의 압력이며 이러한 실험결과는 PDMS에 대한 이론적인 응력-변형을 예측과도 일치하는 결과이다.²²

Fig. 6(b)는 수평력에 대한 센서의 응답을 보여준다. 한 스트레인지게이지에 대해서는 그 전압강하가 증가하였으며 다른 스트레인 게이지에 대해서는 전압강하량이 감소하였다. 그러나, 이러한 전압력에 의한 전압변화량은 수직력에 대한 전압강하량에 비해 대단히 작았다. 이러한 점은 수직력과 수평력이 동시에 작용할때, 수평력에 의한 신호를 찾아내기 대단히 힘들게 한다. Fig 6(c)는 링모양의 물체로 8x8 센서 어레이를 눌렀을 때의 센서 응답을 나타낸다.

4. 지면반발력 센서로의 응용

제안된 힘 센서는 몇 가지 장점이 있다. 첫째 제안된 센서는 측정 가능한 압력 범위가 넓으며, 둘째 제안된 센서는 깨지기 쉬운 구조물이 없으므로 과도압력에 파손되지 않고 안정적이다. 셋째로 제안된 센서는 매우 얇다. 이러한 점은 제안된 센서를 로봇의 발바닥에서 지면반발력을 측정할 수 있도록 하였다.

지면반발력 센서는 Fig. 7(a)에 보여지듯이, 휴머노이드 로봇 발바닥의 네 모서리에 힘 센서를 위치시킴으로 구현될 수 있다. Fig. 7(b)와 7(c)는 힘 센서가 로봇 발바닥에 조립된 모습을 보여준다.

사용될 휴머노이드 로봇의 질량은 7kg 이므로, 로봇의 보행 중에 한 발이 지탱해야 할 질량은 7 kg 이 된다. 한 로봇의 발바닥에 네 개의 힘 센서가 존재하므로, 하나의 힘 센서당 대략 20 N의 힘을 지탱할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 본 응용에서는 범프크기를 증가시킴으로써, 측정 범위를 증가시켰다. Fig. 7(d)에 이 네 개의 힘 센서의 외력에 대한 응답이 나타나 있다. 각각의 센서는 20N 까지 수직력을 측정할 수 있으며 각각의 경우에 대해서 25%이내의 오차를 가지고 있었다. 이러한 오차는 범프구조가 커짐으로써 스트레인지게이지가 위치한 곳에 응력집중이 발생하

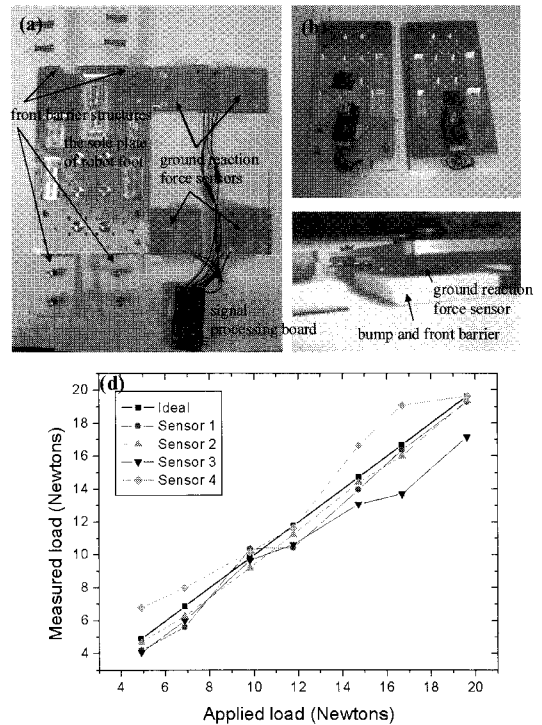


Fig. 7 (a) Parts of the GRF sensor module, (b) and (c) are the assembled GRF sensor module, (d) A graph of the four sensors' output signals versus the applied normal load after assembling them to the sole with front-barrier structure

거나 혹은 응력이 다른 곳에 집중되게 되어 나타나는 현상이다. 응력집중을 해소하기 위해서 범프 주변 스트레인지게이지 수를 늘려 그 평균값을 통해서 지면반발력을 측정한다면 이 오차를 줄일 수 있을 것으로 사려된다.

로봇의 발바닥에 힘을 가하면서 네 개의 센서 응답을 통해서 무게 중심을 측정하여 보았다. 로봇 발바닥에 Fig. 8 과 같이 힘을 가해주었다. 측정 결과를 Table 1 에 정리하였다. Fig. 8(a)-(c)와 같이 2kg, 3kg, 그리고 4kg 을 가했을 때의 결과가 Table 1 의 (a)행 (b)행 (c)행에 각각 기록하였다. Fig. 8(e), (f)와 같이 로봇 발바닥의 앞부분과 뒷부분에 힘을 가하였을 때, 센서의 응답이 Table 1 의 (e)행 (f)행에 나타나 있다. 이러한 측정된 힘으로 로봇 발바닥에서의 압력 중심(CoP, Center of Pressure)을 찾을 수 있다.

5. 결론

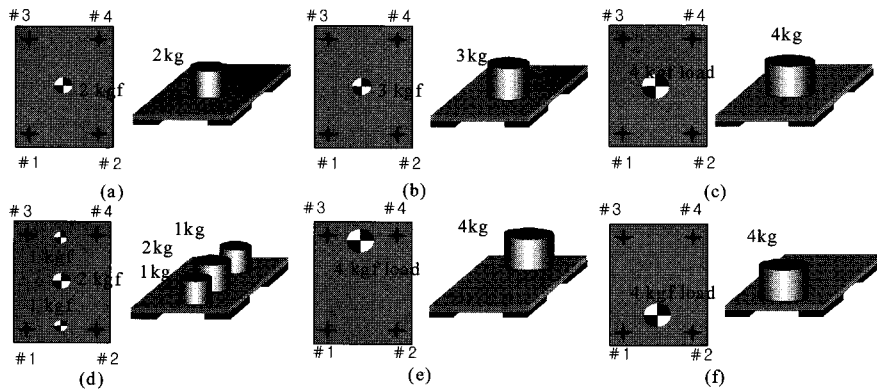


Fig. 8 Measurement of the Ground Reaction Force (GRF) with GRF sensor

Table 1 The result of ground reaction force measurement

unit: N

	#1	#2	#3	#4	SUM
(a) Applying concentrated load (20 N) at the geometrical center of plate	5.51	7.57	8.10	6.08	27.26
(b) Applying concentrated load (30 N) at the geometrical center of plate	7.69	9.57	8.57	8.52	34.35
(c) Applying concentrated load (40 N) at the geometrical center of plate	9.22	10.16	12.60	9.69	41.67
(d) Applying distributed Load (10-20-10 N) along the center line of plate	10.59	8.95	13.73	9.52	42.79
(e) Applying concentrated load (40 N) at the fore part of the plate	5.54	6.68	16.97	13.17	42.36
(f) Applying concentrated load (40 N) at the rear part of the plate	13.81	13.93	7.90	8.00	43.64

본 논문을 통해서 새로운 구조의 수직/수평력 측정이 가능한 유연 힘 센서가 제안되었다. 폴리이미드와 PDMS 가 기판 물질로 사용되었다. 폴리머 기판에 발생하는 변형률은 폴리머 삽입된 스트레인이게이지를 통해서 측정될 수 있었다. 측정결과는 제안된 구조를 통해서 수직력 과 수평력이 각각 측정될 수 있었으며, 수평력에 의한 신호는 수직력에 비해 작아서 동시에 측정되긴 어려웠다.

제안된 센서는 깨지기 쉬운 구조물이 없으므로 넓은 압력 측정범위를 가지었으며, 과도압력에 대해 안정적이었다. 또한 매우 얇고, 유연성이 있었다. 이러한 점을 이용하여 로봇의 발바닥에서 지면 반발력을 측정하는 센서로 활용되었으며, 로봇 발바닥에 작용하는 힘을 통해서 CoP 를 찾을 수 있었다.

후 기

This study was supported by a grant of the Korea Health 21 R&D Project, Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea(Grant A020602).

참고문헌

1. Lumelsky, V. J., Shur, M. S. and Wagner, S., "Sensitive skin," IEEE Sensors Journal, Vol. 1, pp. 41-51, 2001.
2. Lee, M. H., "Tactile sensing: new directions, new challenges," International Journal of Robotics Researches, Vol. 19, No. 7, pp. 636-643, 2000.
3. Yamada, D., Maeno, T. and Yamada, Y., "Artificial

- Finger Skin having Ridges and Distributed Tactile Sensors used for Grasp Force Control,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 14, No. 2, pp. 140-146, 2002.
4. Lee, M. H. and Nicholls, H. R. “Tactile sensing for mechatronics-a state of the art survey,” *Mechatronics*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-31, 1999.
 5. Rebello, K. J., “Applications of MEMS in surgery,” *Proceedings of IEEE*, Vol. 92, No. 1, pp. 43-55, 2004.
 6. Preising, B., Hsia, T. C. and Mittelstadt, B., “A Literature Review: Robots in Medicine,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Vol. 10, No. 2, pp. 13-22, 1991.
 7. Brett, P. N. and Stone, R. S., “A tactile sensing technique for automatic gripping of compact shaped non-rigid materials,” *Proc. of IEE Colloquium on Intelligent Automation for Processing Non-Rigid Products*, pp. 5/1-5/5, 1994.
 8. Wang, L. and Beebe, D. J., “A silicon-based shear force sensor: development and characterization,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 84, No. 1, pp. 33-44, 2000.
 9. Beebe, D. J., Denton, D. D., Radwin, R. G. and Webster, J. G., “A Silicon-based tactile sensor for finger-mounted applications,” *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, Vol. 45, No. 2, pp. 151-159, 1998.
 10. Shan, J. H., Mei, T., Sun, L., Kong, D. Y., Zhang hu, Z. Y., Ni, L., Meng, M. and Chu, J. R., “The design and fabrication of a flexible three-dimensional force sensor skin,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. conf. Intelligent Robots and Systems*, pp. 1818-1823, 2005.
 11. Jiang, F., Lee, G. -B., Tai, Y. -C. and Ho, C. -M., “A flexible micromachined-based shear-stress sensor array and its applications to separation-point detection,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 79, No. 3, pp. 194-203, 2000.
 12. Lee, H. -K., Chang, S. -I., Kim, S. -J., Yun, K. -S., Yoon, E. and Kim, K. -H., “A modular expandable tactile sensor using flexible polymer,” *18th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 642-645, 2005.
 13. Santos, R. F., Rocha, P. F., Lanceros-Mendez, S., Santos, C. and Rocha, J. G., “3 Axis capacitive tactile sensor,” *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 4, pp. 1539-1544, 2005.
 14. Engel, J., Chen, J. and Liu, C., “Development of polyimide flexible tactile sensor skin,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 359-366, 2003.
 15. Heo, J. -S., Chung, J. -H. and Lee, J. -J., “Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 126, No. 2, pp. 312-327, 2006.
 16. Ohka, M., Kobayashi, H. and Mitsuya, Y., “Sensing characteristics of an optical three-axis tactile sensor mounted on a multi-fingered robotic hand,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 493-498, 2005.
 17. Kolesar, E. S. and Dyson, C. S., “Object imaging with a piezoelectric robotic tactile sensor,” *Journal of Micro Electro Mechanical Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 87-96, 1995.
 18. Johnson, K. L., “Contact Mechanics, 4th ed.,” Cambridge University Press, pp. 45-83, 1994.
 19. Kim, Y. -J. and Allen, M. G., “In-Situ Measurement of Mechanical Properties of Polyimide Film Using Micromachined Resonant String Structure,” *IEEE Trans. Component and Packaging Tech.*, Vol. 22, No. 2, p. 282, 1999.
 20. Young, R. J. and Lovell, P. A., “Introduction to Polymers, 2nd ed.,” Chapman & Hall, pp. 344-356, 2000.
 21. Mark, J. E. and Erman, B., “Rubberlike elasticity, 2nd ed.,” Cambridge University Press, pp. 55-69, 2007.
 22. Arruda, E. M. and Boyce, M. C., “A Three-Dimensional Constitutive Model for The Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 41, No. 2, p. 389, 1993.