

REVIEW

## 사람피부를 모사한 다기능 유연촉각센서 연구동향

이보연\*

한국기계연구원 AI로봇연구소 바이오기계연구실

### Recent Progress in Human Skin-Inspired Multifunctional Flexible Tactile Sensors

Bo-Yeon Lee\*

Department of Bionic Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM), Daejeon, Korea

**ABSTRACT**

Tactile sensation plays a crucial role in human interaction with the environment, facilitating the perception of various physical stimuli such as pressure, texture and temperature through the skin. Mimicking human tactile perception, the development of flexible tactile sensors has seen significant growth, significantly expanding their applicability in robotics, medical devices and wearable technology. This paper reviews recent advances in flexible tactile sensor technology, with a focus on the development of multifunctional sensors capable of detecting multiple types of tactile stimuli simultaneously. Unlike traditional rigid sensors, flexible tactile sensors integrate the sensitivity and elasticity of human skin, enabling them to adapt to different surfaces and detect a wider range of stimuli.

Key Words: Flexible tactile sensors, Electronic skin, Skin-inspired sensors, Multifunctional sensors

\*Correspondence: bylee@kimm.re.kr



## 1. 서론

촉각은 피부에 영향을 미치는 물리적 자극을 감지하는 것으로 인간이 환경과 상호작용하는 데 있어 가장 기본적이고 중요한 감각 중 하나이다[1]. 우리는 피부를 통해 압력, 질감, 온도와 같은 다양한 물리적 자극을 감지하며 중추신경계로 필요한 정보를 전달한다. 이 정보는 우리가 주변 세계를 인식하고 이해하는 데 필수적인 역할을 한다[2]. 시각이나 청각과 달리 촉각 신호 관련 파라미터는 명확하게 분류하고 정의 내리기 어렵지만, 이러한 특성을 잘 파악하여 유사한 기능을 하는 센서를 개발하는 것이 중요하다[3]. 사람 피부의 유연성과 신축성을 모방하여 다양한 형태와 크기의 표면에 부착할 수 있는 유연촉각센서(flexible tactile sensor) 연구는 2000년대부터 지금까지 활발히 이루어지고 있다. 이러한 센서는 로봇, 의료기기, 스마트 웨어러블 기기 분야 등에서 유용성이 높다. 로봇손에 부착되어 물체를 조작할 때 섬세한 제어가 가능하게 하거나, 사용자의 건강 상태를 모니터링하는 데에 기여할 수 있다.

본 논문에서는 사람의 피부를 모사한 다기능 유연촉각센서 연구에 대해 소개하고자 한다. 이를 위해 2장에서는 사람이 피부를 통해 촉각을 감지하는 원리에 대해 살펴보고, 3장에서는 피부모사 유연촉각센서의 개념 및 동작 원리에 대해 소개한다. 4장에서는 다양한 촉각 자극을 감지할 수 있는 다기능 유연촉각센서 연구에 대해 정리하였다.

## 2. 사람의 촉각정보 인지과정

인간의 촉각 인지 시스템(human tactile perception system)은 외부 세계와의 물리적 접촉을 통해 중요한 정보를 수집한다. 이 과정에서 피부는 단순한 외부 장벽이 아니라, 복잡한 감각 인식과 정보 전달의 활발한 장소로 기능한다. 다양한 촉각 수용체를 통해 우리는

물체의 압력, 질감, 온도 등을 느낄 수 있으며, 이 정보는 신체의 다양한 반응과 행동에 영향을 미친다.

### 2.1. 사람 피부의 촉각 수용체 종류 및 기능

피부는 크게 표피(epidermis), 진피(dermis), 피하조직(hypodermis) 세 가지 층으로 구성되어 있고, 이 각 층에는 특정 유형의 촉각 자극에 반응하는 다양한 기계적 수용체(mechanoreceptors)가 포함되어 있다[1-4]. 이 수용체로는 메르켈 소체(Merkel corpuscle), 루피니 소체(Ruffini corpuscle), 마이스너 소체(Meissner corpuscle), 그리고 파치니 소체(Pacinian corpuscle) 등이 있다(Fig. 1).

메르켈 소체는 표피의 가장 하단부에 위치하며, 지속적인 압력을 감지하고 두 점의 구별 또는 압력의 정확한 위치를 식별할 수 있다. 이러한 특성은 점자 읽기에 이상적이라고 볼 수 있다. 루피니 소체는 진피의 깊은 층에 위치하며, 피부가 늘어나는 것과 같은 지속적인 변형 상태, 압력, 그리고 온도 변화를 감지하는 데 능숙하다. 이는 물체를 조작하거나 손의 모양 변화를 인식하는 데 중요한 역할을 한다. 마이스너 소체는 표피 바로 아래, 진피 유두에 자리하여 자극 변화에 매우 민감하게 반응하는 작고 덮개가 있는 구조를 가지고 있다. 이들은 주로 20~50 Hz 범위의 저주파에서 중주파 진동에 반응하며, 가벼운 접촉이나 질감의 변화를

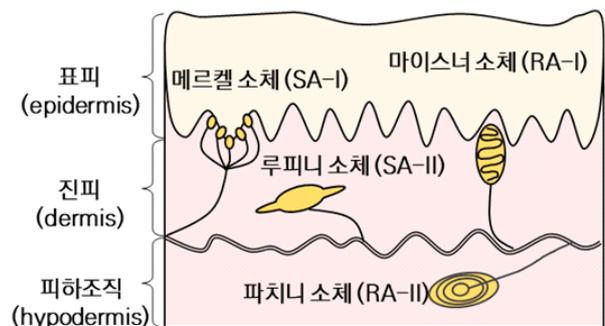


Fig. 1. Schematic cross-section of skin showing cutaneous receptors within.



감지하고 물체를 잡거나 움직임 인식하는 데 핵심적인 역할을 한다. 마지막으로, 파치니 소체는 진피의 가장 깊은 곳과 피하조직에 존재하며, 진동과 깊은 압력을 감지한다. 이들은 특히 100~400 Hz 범위의 고주파 진동에 반응하여 질감을 감지하는 데 중요하게 작용한다.

이 기계적 수용체 네 가지는 촉각 자극에 대한 적응 속도에 따라 크게 느린 적응 수용기(slowly adapting receptor, SA)와 빠른 적응 수용기(rapidly adapting receptor, RA), 이렇게 두 가지로도 구분할 수 있다 [1-4]. 빠른 적응 수용기는 자극이 가해지거나 사라질 때 활동 전위(action potential)가 발생하는 특징을 가지는 반면, 느린 적응 수용기는 자극이 지속되는 동안 계속해서 활동 전위를 생성한다. 이에 따라 메르켈 소체와 루피니 소체는 각각 제1형 느린 적응 수용기(SA-I)와 제2형 느린 적응 수용기(SA-II)로 명명되며, 마이스너 소체와 파치니 소체는 제1형 빠른 적응 수용기(RA-I)와 제2형 빠른 적응 수용기(RA-II)로 분류된다. 다시 말해서, 메르켈 소체와 루피니 소체는 우리가 글을 쓰거나 물체를 오랫동안 잡고 있을 때와 같이 지속적인 압력이나 피부의 변형을 감지하는 데 중요하다. 반면, 마이스너 소체와 파치니 소체는 물체의 질감을 구별하거나 짧은 접촉을 감지하는 등의 빠르게 변화하는 자극에 더 민감하게 반응한다(Table 1).

## 2.2. 촉각 정보 인지 과정

촉각 정보는 앞서 설명한 다양한 수용체를 통해 감지된 후, 해당 신호는 신경계를 통해 척수로 전달되고

시상(thalamus)을 통해 대뇌 피질의 일부인 일차 체감각 피질(primary somatic sensory cortex)로 전달된다 [5,6](Fig. 2). 이 영역은 우리가 감지한 촉각 정보의 위치와 강도를 분석하며, 복잡한 촉각 정보의 첫 단계 처리를 담당한다. 일차 체감각 피질에서 처리된 정보는 이후, 뇌의 다른 영역으로 전달되어 더 복잡한 분석과 해석이 이루어지는데, 이 과정에서 촉각 정보는 인지, 감정, 기억과 결합하여 우리의 경험과 반응을 형성한다.

또한, 뇌의 이러한 영역들은 서로 상호작용하며 촉각 정보를 통합하여 우리가 물체의 질감, 압력, 온도 등을 인식하고 이에 기반한 의사 결정을 내릴 수 있게 한다.

촉각 감각은 신체 자각의 형성과 유지에 매우 중요

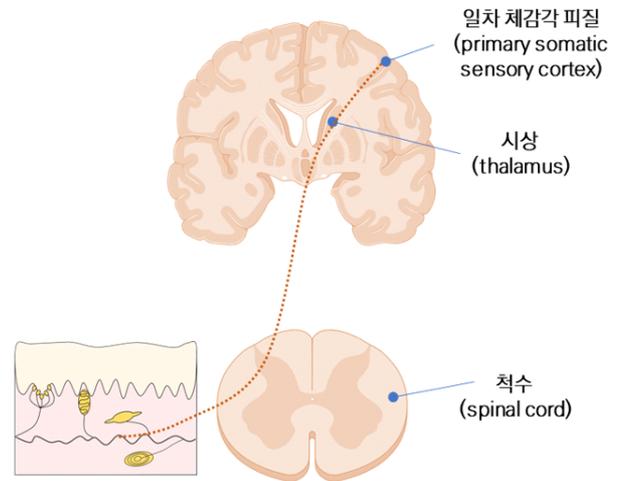


Fig. 2. Schematic diagram of human somatosensory pathway.

Table 1. Skin's mechanoreceptors and their characteristics

촉각수용체	적응속도	위치	촉각 감지 종류	센서 종류
메르켈소체	SA-I	표피하단부	지속적인 압력, 위치	압력센서, 위치센서
루피니소체	SA-II	진피깊은층	피부 늘어남, 온도 변화	전단력센서, 인장센서, 온도센서
마이스너소체	RA-I	진피유두	가벼운 접촉, 질감 변화, 물체 움직임, 20~50 Hz 진동	진동센서
파치니소체	RA-II	진피, 피하조직	깊은 압력, 100~400 Hz 진동, 질감 감지	진동센서



한 역할을 한다. 신체 자각이란 우리가 자신의 몸을 인식하고, 우리 몸이 공간에서 어디에 위치해 있는지를 아는 능력을 말하며, 이는 일상생활에서의 기능적인 상호작용과 자기 보호에 필수적이다. 촉각 정보는 물체를 잡거나 조작하는 등의 물리적 상호작용을 통해 이러한 신체 인식을 가능하게 하며, 또한 통증이나 온도 변화 등을 통해 우리 몸을 위험으로부터 보호한다.

### 3. 피부모사 유연촉각센서 연구

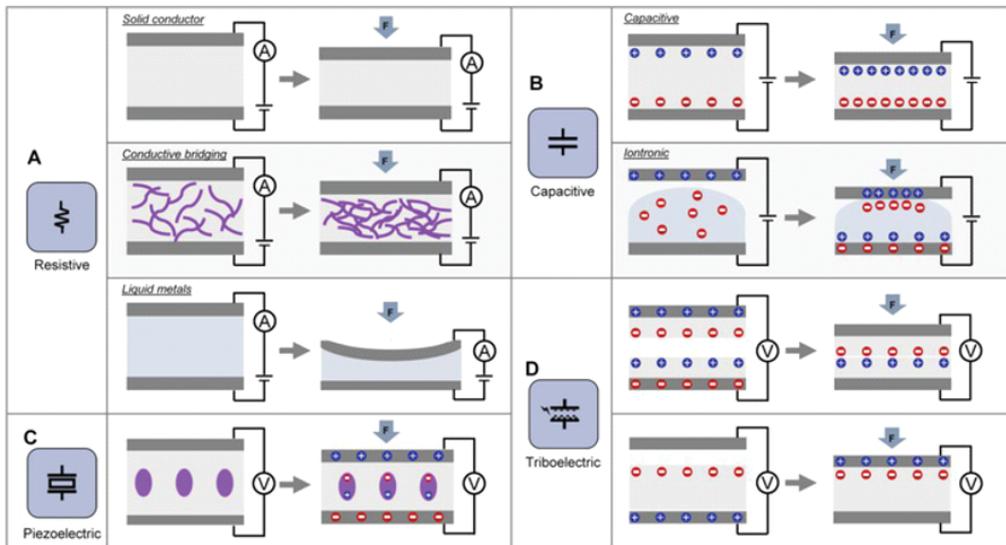
#### 3.1. 피부모사 유연촉각센서 종류

수용체의 다양한 반응 특성은 촉각 센서 개발에 있어서도 중요한 영감을 제공한다. 연구자들은 이러한 생물학적 메커니즘을 모방하여 사람의 피부처럼 더욱 섬세하고 다양한 촉각 정보를 인지할 수 있는 기술을 개발하고 있다. 이 기술은 인간-기계 인터페이스 (human-machine interface), 헬스케어, 의료, 로봇 공학 등 다양한 분야에서 혁신적인 발전을 이끌고 있다[7].

초기 피부모사 유연촉각센서 연구는 촉각수용체의

기능을 직접 모사하기 보다는 부드러움과 탄력성과 같은 피부의 물성을 재현하거나, 압력과 같은 특정 감각의 민감도를 개선하는 데 초점을 맞추었다. 특히, 2010년, 미국 스탠포드 대학의 Zhenan Bao 연구팀이 마이크로 피라미드 구조를 기반으로 한 탄성 필름을 감지층으로 사용하는 센서를 개발하였는데[8], 이 센서는 3Pa의 매우 미세한 압력까지 감지할 수 있는 능력을 입증하였고, 다양한 고민감도 유연 촉각 센서 연구의 기초가 되었다.

최근 유연촉각센서 연구는 단순히 감각의 민감도를 향상시키는 것을 넘어서, 사람과 유사하게 다양한 촉각 정보를 획득하려는 방향으로 발전하고 있다. 유연촉각센서의 촉각정보 감지방식은 지속적인 압력과 같은 정적인(static) 자극을 감지하는 압저항(piezoresistive), 정전용량(capacitive) 방식과 빠르게 변화하는 동적인(dynamic) 자극을 감지하는 압전(piezoelectric), 마찰전기 (triboelectric) 방식을 사용한다[9](Fig. 3). 다음 장부터는 각 센서의 특징에 대해 보다 상세히 이해하고자 한다.



**Fig. 3.** Classification of sensing mechanisms in flexible tactile sensors. Adapted with permission from [9]. Copyright 2023, Wiley-VCH GmbH.

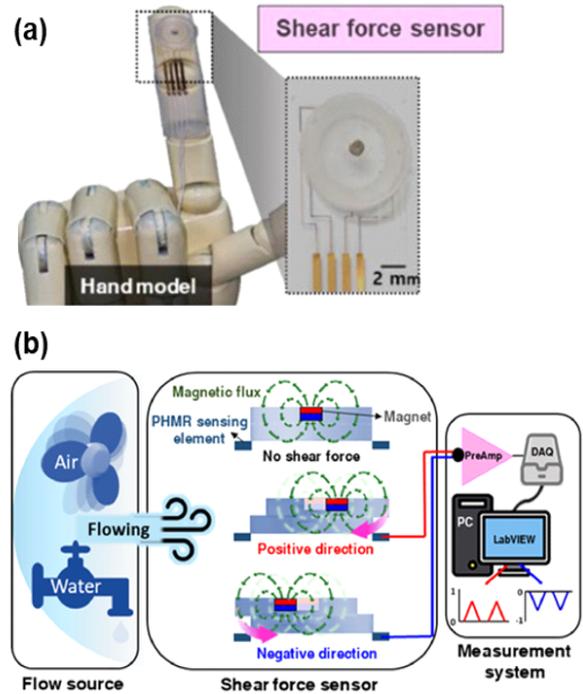
### 3.2. 정적자극감지 촉각센서

정적인 촉각 자극으로는 압력, 위치, 전단력, 인장 등이 있다. 이들은 주로 압저항, 정전용량 방식을 이용해 측정되는데, 이 방식을 통해서 지속적인 압력이나 저주파수 진동을 측정하는 메르켈 소체의 기능과 인장이나 전단력을 감지하는 루피니 소체의 기능을 모사할 수 있다.

압저항(piezoresistive) 방식은 압력이 가해지면 소재의 저항값이 변화하는 원리를 기반으로 한다. 이러한 센서들은 대체로 유연하거나 신축 가능한 소재에 전도성 입자를 고농도로 혼합하여 제조되는데, 압력이 적용되면 입자 간 전도성 경로가 변형되어 저항값에 변화를 일으키는 방식으로 작동한다.

정전용량(capacitance) 방식은 압력이 가해질 때 두 전극 사이의 감지층 길이, 유전율, 그리고 전극 단면적의 변화를 통해 정전용량 값이 변화하는 원리로 작동한다. 이러한 센서의 민감도는 주로 감지층의 영률에 대폭 낮추거나, 다양한 미세 구조를 적용함으로써 향상된다.

이러한 센서들은 변형 방향을 조절함으로써 압력 센서나 인장 센서로 기능할 수 있다. 인장 센서의 경우, 소자 전체가 신축성을 가져야 하며 주로 물체의 변형률을 측정하는 데에 사용된다. 특히 인체에 부착하거나 착용하는 형태의 소자는 인간 피부의 변형 범위와 유사한 최대 55% 이상의 변형률 감지 범위를 충족하는 것이 필수적이다. 반면, 전단력 센서는 물체의 서로 다른 두 면이나 층 사이에 작용하는 힘을 감지하며, 이는 표면을 따라 움직이는 힘의 변화를 감지하는 것을 의미한다. 유연 전단력 센서는 압력이나 인장 센서에 비해 상대적으로 연구가 덜 되었지만, 촉각 정보를 포착하는 데 있어 중요한 요소로 인식되고 있다. 전단력을 감지하는 가장 일반적인 방법은 압력 센서를 다중 배열로 구성하여 힘의 세기와 분포를 분석하는 것이다. 그러나 압력에 대해 둔감한 채로 전단력을 측정하



**Fig. 4.** (a) Photographs of the flexible shear force sensor attached to a robotic hand. (b) Schematic illustration demonstrating the bi-directional capability of the flexible shear force sensor under air and water flows. Adapted with permission from [10]. Copyright 2024, Elsevier Ltd.

는 것은 기술적으로 도전이다. 최근에는 자석이 내장된 얇은 신축성 필름과 자기 저항성 물질을 기반으로 한, 압력으로부터 독립적인 유연하고 얇은 전단력 센서가 제안되었다[10](Fig. 4). 이 센서는 단일 장치에서 양방향 전단력을 측정할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 로봇의 손가락 끝에 부착하여 사용할 수 있다. 또한, 이 센서는 점자 감지나 공기 및 물의 흐름을 측정할 수 있을 만큼 높은 감도를 제공한다.

### 3.3. 동적자극감지 촉각센서

동적인 촉각 자극으로는 진동, 질감, 슬립 등이 있다. 사람 피부의 빠른 적응 수용기처럼 자극이 가해지거나 사라지는 순간에 신호 변화가 발생하는 동적 촉



각센서로는 압전 방식과 마찰전기 방식이 대표적이다. 이들은 동시에 무전원으로 구동가능한 자가발전형 촉각센서이기도 하다.

압전 센서는 기계적 변형 시 내부의 전기 분극이 변화하는 압전 물질을 사용한다. 이러한 변화로 인해 압력이 가해질 때 전압이 생성되는 방식으로 작동한다. 이 과정에서 압전 센서는 미세한 변형과 고주파수의 진동도 높은 정밀도로 감지할 수 있다.

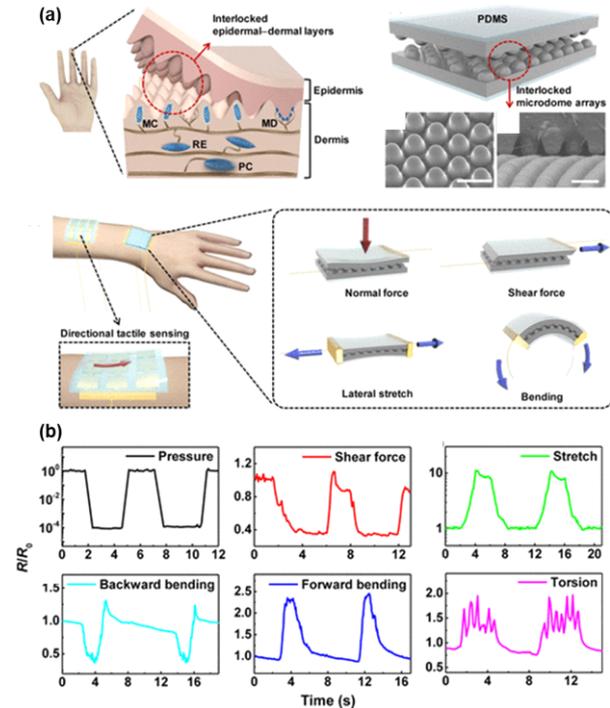
마찰전기 센서는 서로 다른 두 표면이 마찰될 때 발생하는 전기적 현상을 기반으로 한다. 마찰 시 각 표면에는 서로 반대되는 극성의 전하가 대전되며, 이 대전된 전하들을 중립 상태로 되돌리기 위해 유도되는 전하를 통해 전력이 생성된다. 이 원리는 2012년, 미국 조지아 공과대학교의 Zhong Lin Wang 연구팀에 의해 처음 제안된 이후로 많은 주목을 받아왔다[11]. 마찰전기 센서는 압전 센서와 유사하게 외부 전원 없이도 감지가 가능한 자가발전형 센서의 특징을 지니면서, 압전 센서와 달리 감지층의 재료에 대한 제한이 없어 연구의 범위가 훨씬 넓다.

이러한 동적 촉각센서는 주로 질감이나 슬립과 같이 발생하는 진동에 의해 추정할 수 있는 촉각 정보를 인지한다. 질감을 인식하는 방식으로는 접촉한 표면의 높낮이 차이를 인식하는 정적인 방식이 있고, 능동적으로 표면을 문지르면서 발생하는 동적인 신호의 크기와 주파수를 통해 인지할 수 있는데, 동적센서는 후자의 방법으로 질감을 감지한다.

## 4. 다가능 유연촉각센서 연구

### 4.1. 단일센서 기반 다가능 촉각감지 기술

2010년 초반부터는 단일 감각에 국한되지 않고 다중 감각을 감지할 수 있는 다가능 유연촉각센서(multifunctional flexible tactile sensor) 연구가 활발히 진행되었다. Fig. 5(a)와 같이 압력뿐만 아니라, 전단력, 인장, 굽힘 등 다양한 촉각 자극을 하나의 센서



**Fig. 5.** (a) Schematic illustration of a multifunctional tactile sensor based on a single sensor, designed to mimic the structure of dermal papillae. (b) Electrical signals of the tactile sensor under various tactile stimuli. Adapted with permission from [12]. Copyright 2014, American Chemical Society.

(single sensor) 내에서 감지할 수 있는 기술이 제안되었다[12,13]. 이 센서들은 한 쌍의 전극에서 다양한 촉각 자극에 의해 신호를 취득하며, 자극의 종류에 따라 변하는 신호 파형의 모양을 활용하여 각각을 구분할 수 있다(Fig. 5(b)). 그러나 신호 파형의 모양 및 특징을 정량화 하는 것은 어렵고, 대부분은 사람의 주관적 판단에 의존한다는 점에서 실용성에 제한이 있다. 또한, 측정된 신호가 동일한 터미널에서 얻어지는 형태이므로, 여러 자극이 동시에 발생할 경우, 신호가 중첩되어 어떤 자극인지 구분하기 어려운 문제가 있다.

최근에는 이러한 중첩 현상 문제를 개선하여 단일소자에서도 다중 신호를 독립적으로 디커플링하여 획득

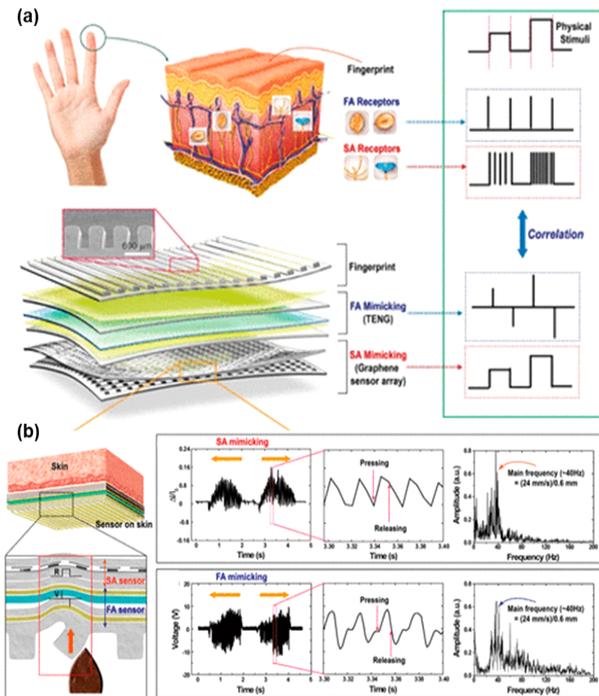


하기 위한 많은 노력들이 이루어지고 있다. 예를 들어 온도와 압력 자극도 하나의 소자에서 감지할 수 있도록 설계한 센서가 개발되었다. 이 센서의 감지 소재 층은 다공성 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS)과 환원된 산화 그래핀(reduced graphene oxide, rGO) 기반 필름으로 제작되었다[14]. 이 소자는 압력을 감지하는 방식은 다공성 PDMS의 압축성에 의존하는 정전용량 변화를 활용하였고, 온도변화는 rGO의 온도에 따른 저항 변화 특성을 활용하였다. 하지만 각 자극 간의 소재 차원에서의 간섭은 최소화하였지만, 온도, 압력 측정을 위한 신호 형태가 달라서 하나의 시스템에서 연속적으로 측정하기 어려웠다[15].

최근에는 이러한 문제점을 해결하여 단일 소자에서 온도와 압력을 서로 독립적으로 디커플링하여 측정할 수 있는 새로운 기술이 제시되기도 했다[16]. 전해질을 함유한 이온 전도체 소재가 측정 주파수에 따라 측정할 수 있는 성질이 달라진다는 점을 이용하여 두 신호 간의 간섭 없이 온도와 압력을 동시에 감지할 수 있었다. 해당 센서는 멀티레이어로 만들어 밀림, 꼬집기, 벌림, 비틀림 등 여러 움직임에 대해 힘을 가한 방향도 정확하게 측정할 수 있다.

#### 4.2. 다중센서 기반 다기능 촉각감지 기술

단일센서 기반 다기능 촉각감지 기술에서 발생하는 신호중첩 현상을 좀 더 직접적으로 해결하기 위해서 각 자극에 대한 감지 센서를 다르게 설계하여 2개 이상의 센서를 활용하는 방법이 제안되었다[17-21]. 많은 연구에서는 피부 내 기계적 수용체를 느린 적응 수용기(SA)와 빠른 적응 수용기(RA)로 분류하는 것과 마찬가지로, 정적인 자극과 동적인 자극을 동시에 감지할 수 있도록 압력 센서와 진동 센서를 병렬적으로 쌓거나 배열한 센서들을 개발하였다[17-20](Fig. 6). 이 두 종류의 센서에서 얻은 신호의 결합은 단일 센서만을 사용할 때보다 재질을 구분하는 정확도를 향상시키



**Fig. 6.** (a) Schematic illustration of a pressure- and vibration-sensitive sensor. (b) Electrical and frequency response signals of the sensor. Adapted with permission from [17]. Copyright 2019, American Chemical Society.

는 데 기여하였다. 압력과 온도 또한 독립적으로 측정하기 위해서 해당 자극을 감지할 수 있는 각각의 소재 기반 다중 센서가 제안되었다[21]. 더 나아가 더욱 다양한 자극을 감지하기 위해 3가지 이상의 다기능 촉각 센서들도 제안되었다. 예를 들어 습도(humidity), 자외선(ultraviolet light), 자계(magnetic field)와 같이 사람 피부 속 촉각 수용체의 감지 범위가 아닌 자극도 측정할 수 있는 다기능 센서가 개발되었다[22]. 그러나 이러한 다중센서 기반 다기능 촉각센서의 경우, 각 센서 특성에 맞는 측정 장비가 개별적으로 필요했기 때문에, 하나의 시스템에서 다양한 자극을 실시간으로 감지하는 것은 어려운 일이었다. 이 문제점은 실용성 측면에서 한계를 가지고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 사람 피부



속 촉각 수용체뿐만 아니라, 뇌에서 인지할 수 있는 형태로 신호를 전달하는 개념을 모방하여 실시간으로 다중 자극을 측정할 수 있는 하나의 촉각 센서 시스템이 제안되었다[23]. 이 시스템은 압력, 진동, 전단력, 온도와 같은 네 가지 유형의 각기 다른 센서가 수직으로 쌓여 있고, 각기 다른 센서의 출력신호에 따라 맞춤형 아날로그 회로가 설계되어 하나의 디지털 신호로 통합되어 있다. 따라서 동시에 네 가지 유형의 분리된 촉각 정보를 실시간으로 획득할 수 있으며, 다양한 촉각 자극, 질감 특성 및 연속적인 복잡한 동작을 구별할 수 있다.

## 5. 결론 및 전망

본 논문에서 논의한 다기능 유연촉각센서 기술은 인간의 촉각 수용체의 복잡한 기능을 효과적으로 모방함으로써, 다양한 산업 분야에서 혁신적인 변화를 가져오고 있다. 특히, 정적 및 동적 자극을 동시에 감지할 수 있는 센서의 개발은 로봇의 물리적 인터랙션 능력을 극대화하고, 의료 분야에서는 보다 정밀한 수술이 가능하게 하는 등의 잠재력을 지니고 있다. 앞으로 이 분야는 정확성, 신뢰성, 재현성, 내구성 등이 높은 촉각 센서의 개발을 통해 실용성을 높이는 방향으로 이어질 것이며, 이는 곧 사용자의 경험을 더욱 풍부하게 만들고 인간과 기계 간의 상호작용을 보다 자연스럽게 할 것이다. 하지만, 신호 처리의 정확성을 높이고, 센서의 신뢰성을 보장하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 트랜지스터나 시냅스 소자와 융합을 통해 회로 구성을 혁신적으로 개선하면서 사람과 같은 메모리 효과를 부여하는 연구도 함께 발전해야 한다. 더불어, 인공지능 기술과 융합하여 다중 촉각 정보의 종합적인 분석이 가능한 다양한 시각화 인터페이스 모듈 등도 함께 개발되어야 한다. 본 논문이 제시한 연구 결과와 방향성이 향후 유연 촉각센서 기술의 발전과 응용 분야 확장에 기여할 수 있기를 기대한다.

## 기호설명

SA: Slowly adapting receptor  
RA: Rapidly adapting receptor  
PDMS: Polydimethylsiloxane  
rGO: Reduced graphene oxide

## ACKNOWLEDGEMENTS

### Author Contributions

BYL drafted the manuscript. The author read and approved the final manuscript.

### Funding

This work was supported by the Basic Research Program of Korea Institute of Machinery & Materials (No. NK250D), Republic of Korea.

### Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests

## AUTHOR



이보연

2007~2012년: 부산대학교 전자전기통신공학과 학사

2012~2018년: 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사

2018년: 서울대학교 반도체공동연구소 연수연구원

2018~2019년: 한국과학기술원 응용과학연구소 연수연구원  
2019년~현재: 한국기계연구원 AI로봇연구소 바이오기계연구실 선임연구원

[관심분야] 생체모사 전자피부, 3D 프린팅 유연전자소자, 비평면 전자소자 제조 기술



## REFERENCES

- [1] Zimmerman, A.; Bai, L.; Ginty, D. The Gentle Touch Receptors of Mammalian Skin. *Sci.* 2014, 346 (6212), 950-954.
- [2] Roudaut, Y.; Lonigro, A.; Coste, B.; Hao, J.; Delmas, P.; Crest, M. Touch Sense: Functional Organization and Molecular Determinants of Mechanosensitive Receptors. *Channels* 2012, 6 (4), 234-245.
- [3] Dargahi, J.; Najarian, S. Human Tactile Perception as a Standard for Artificial Tactile Sensing: A Review. *Int. J. Med. Robot.* 2004, 1 (1), 23-24.
- [4] Rice, F. L.; Albrecht, P. J. Cutaneous Mechanisms of Tactile Perception: Morphological and Chemical Organization of the Innervation to the Skin. In *The Senses: A Comprehensive Reference*; Gardner, E., Kaas, J., Eds.; Academic Press: New York, NY, 2008; vol. 6, pp 1-31.
- [5] Brecht, M. The Body Model Theory of Somatosensory Cortex. *Neuron* 2017, 94 (5), 985-992.
- [6] Haan, E. H. F.; Dijkerman, H. C. Somatosensation in the Brain: A Theoretical Re-Evaluation and a New Model. *Trend. Cogn. Sci.* 2020, 24 (7), 529-541.
- [7] Zang, Y.; Zhang, F.; Di, C. A.; Zhu, D. Advances of Flexible Pressure Sensors toward Artificial Intelligence and Health Care Applications. *Mater. Horiz.* 2015, 2 (2), 140-156.
- [8] Mannsfeld, S. C. B.; Tee, B. C. K.; Stoltenberg, R. M.; Chen, C. V. H. H.; Barman, S.; Muir, B. V. O. et al. Highly Sensitive Flexible Pressure Sensors with Microstructured Rubber Dielectric Layers. *Nat. Mater.* 2010, 9, 859-864.
- [9] Nie, Z.; Kwak, J. W.; Han, M.; Rogers, J. A. Mechanically Active Materials and Devices for Bio-Interfaced Pressure Sensors: A Review. *Adv. Mater.* 2020, 2205609, 1-22.
- [10] Kim, M.; Kim, K.; Jeon, C.; Kim, S.; Lee, B. Y.; Lee, M. W. et al. Pressure-Insensitive Magnetic Shear Force Sensor with Pillar Structure for Versatile Application. *Appl. Mater.* 2024, 36 (102076), 1-10.
- [11] Fan, F. R.; Tian, Z. Q.; Wang, Z. L. Flexible Triboelectric Generator. *Nano Energy*, 2012, 1 (2), 328-334.
- [12] Park, J.; Lee, Y.; Hong, J.; Lee, Y.; Ha, M.; Jung, Y. et al. Tactile-Direction-Sensitive and Stretchable Electronic Skins Based on Human-Skin-Inspired Interlocked Microstructures. *ACS Nano*. 2014, 8 (12), 12020-12029.
- [13] Pang, C.; Lee, G. Y.; Kim, T.; Kim, S. M.; Kim, H. N.; Ahn, S. H. et al. A Flexible and Highly Sensitive Strain-Gauge Sensor Using Reversible Interlocking of Nanofibres. *Nat. Mater.* 2012, 11, 795-801.
- [14] Yuan, T.; Yin, R.; Li, C.; Wang, C.; Fan, Z.; Pan, L. Fully Inkjet-Printed Dual-Mode Sensor for Simultaneous Pressure and Temperature Sensing with High Decoupling. *J. Chem. Eng.* 2023, 473 (145475), 1-13.
- [15] Zhang, F.; Zang, Y.; Huang, D.; Di, C.; Zhu, D. Flexible and Self-Powered Temperature-Pressure Dual-Parameter Sensors Using Microstructure-Frame-Supported Organic Thermoelectric Materials. *Nat. Comm.* 2015, 6 (8356), 1-10.
- [16] You, I.; Mackanic, D. G.; Matsuhisa, N.; Kang, J.; Kwon, J.; Beker, L. et al. Artificial Multimodal Receptors Based on Ion Relaxation Dynamics. *Sci.* 2020, 370, 961-965.



- [17] Chun, S.; Son, W.; Kim, H.; Lim, S. K.; Pang, C.; Choi, C. Self-Powered Pressure- and Vibration-Sensitive Tactile Sensors for Learning Technique-Based Neural Finger Skin. *Nano Lett.* 2019, 19, 3305-3312.
- [18] Ma, Z.; Meng, B.; Wang, Z.; Yuan, C.; Liu, Z.; Zhang, W. et al. A Triboelectric-Piezoresistive Hybrid Sensor for Precisely Distinguishing Transient Processes in Mechanical Stimuli. *Nano Energy*, 2020, 78 (105216), 1-9.
- [19] Li, S.; Liu, G.; Wen, H.; Liu, G.; Wang, H.; Ye, M. et al. A Skin-Like Pressure- and Vibration-Sensitive Tactile Sensor Based on Polyacrylamide/Silk Fibroin Elastomer. *Adv. Funct. Mater.* 2022, 32 (2111747), 1-8.
- [20] Wei, X.; Li, H.; Yue, W.; Gao, S.; Chen, Z.; Li, Y. et al. A High-Accuracy, Real-Time, Intelligent Material Perception System with a Machine-Learning-Motivated Pressure-Sensitive Electronic Skin. *Matter*, 2022, 5, 1481-1501.
- [21] Zhou, Z.; Guo, K.; Yin, F.; Yue, W.; Li, Y.; Yin, J. The Dual-Mode Sensing of Pressure and Temperature Based on Multilayer Structured Flexible Sensors for Intelligent Monitoring of Human Physiological Information. *Compos. Sci. Technol.* 2023, 238 (110012), 1-10.
- [22] Hua, Q.; Sun, J.; Liu, H.; Bao, R.; Yu, R.; Zhai, J. et al. Skin-Inspired Highly Stretchable and Conformable Matrix Networks for Multifunctional Sensing. *Nat. Comm.* 2018, 9 (244), 1-11.
- [23] Lee, B. Y.; Kim, S.; Oh, S.; Lee, Y.; Park, J.; Ko, H. et al. Human-Inspired Tactile Perception System for Real-Time and Multimodal Detection of Tactile Stimuli. *Soft Robot.* 2024, 11 (2), 270-281.