특집

생체모방 음향 진동 기술

거미의 감각기관을 모사한 고감도 진동압력센서

김 태 일
(성균관대학교 화학공학부)

1. 머리말

자연의 모든 동물 및 곤충들은 세대를 걸치면서 적응과 진화를 거치면서 살아가며 주어진 자연환경에서 각자의 삶을 영위하기 위해 특정 기관이나 기능이 자연에 최적화 되어있다. 이러한 최적화된 특별한 기능은 최근 생체모사를 통하여 인공적으로 구현되어 실생활에 응용되어 왔다. 특히 산우엉의 씨에 있는 고리모양의 구조물을 본딴 벨크로, 천장을 기어다니는 게코도마뱀의 발바닥구조를 이용한 건식접착제가 대표적인 예이다. 특히 거미는 다양한 외력에 의해 야기되는 거미줄의 진동을 인식하여 생활을 영위해 왔다. 예를 들면, 거미줄의 움직임에 따른 진동수를 인식하여 포식자의 포획위치를 구별해 왔으며 암거미의 진동을 인식하여 배란기를 구별하는 특징을 지녔다. 최근 이 연구진은 진동에 매우 민감한 거미의 진동감각기관(lyriform slit sensory organ)을 모사하여 외부로부터 오는 기계적인 힘을 센싱할 수 있는 초고감도 나노균열 센서를 서울대학교 기계공학부 최만수 교수 연구진과 함께 개발하였다[1]. 이에, 이 글은 생체모사기술을 이용하여 상기의 거미 감각기관을 모사한 나노균열 센서를 소개하고 그 원리 및 특징과 다양한 응용처를 소개하고자 한다.

2. 나노균열센서의 소개 및 특성

거미는 8개 다리관절의 족골(tarsus)와 중족골(metatarsus) 사이에 위치해있는 금형기관(lyriform slit organ) (그림 1(a))을 이용하여 외부로부터 오는 진동을 읽어낸다[2]. 이는 금형기관에 위치해있는 작은 틈(slit)이 떨리면서 감지하여 연결된 신경에서 신호를 읽어 내는 원리로 점탄성 물질로 이루어진 패드와 그 위에 금형기관이 위치해있는 기계적으로 딱딱한 외골격이 자리해있다(그림 1(b)~(c)). 이번에 제작한 고감도 거미모사 균열센서는 거미의 이러한 금형기관의 구조에서 착안하여 만들어졌다. 점탄성 성질을 가지고 있는 PUA(polyurethane acrylate) 고분자 물질 위에 딱딱한 성질을 가진 20 nm 두께의 백금 금속을 증착한 후에 센서를 굽혀, 인위적 균열을 생성하여 제작한다(그림 1(d)). 그림 1(e)에서 보여지듯이 약 10 μm 간격의 균열이 제작된 것을 확인할 수 있다. 센서에 외부의 자극이 가해졌을 때, 그 중 외력(strain)이 ~2 %까지 가해졌을 때 나노단위로 균열이 더욱 벌어지게 되고(그림 1(g)). 이에 따라 아주 미세한 전기전도도의 변화를 읽음으로써 압력 및 진동을 읽어낼 수 있다. 이러한 균열의 변화는 지퍼(zipper)와 같이 반복적으로 접촉/비접촉이 일어난다. 그림 1(f)는 유한요소

* E-mail : taeilkim@skku.edu

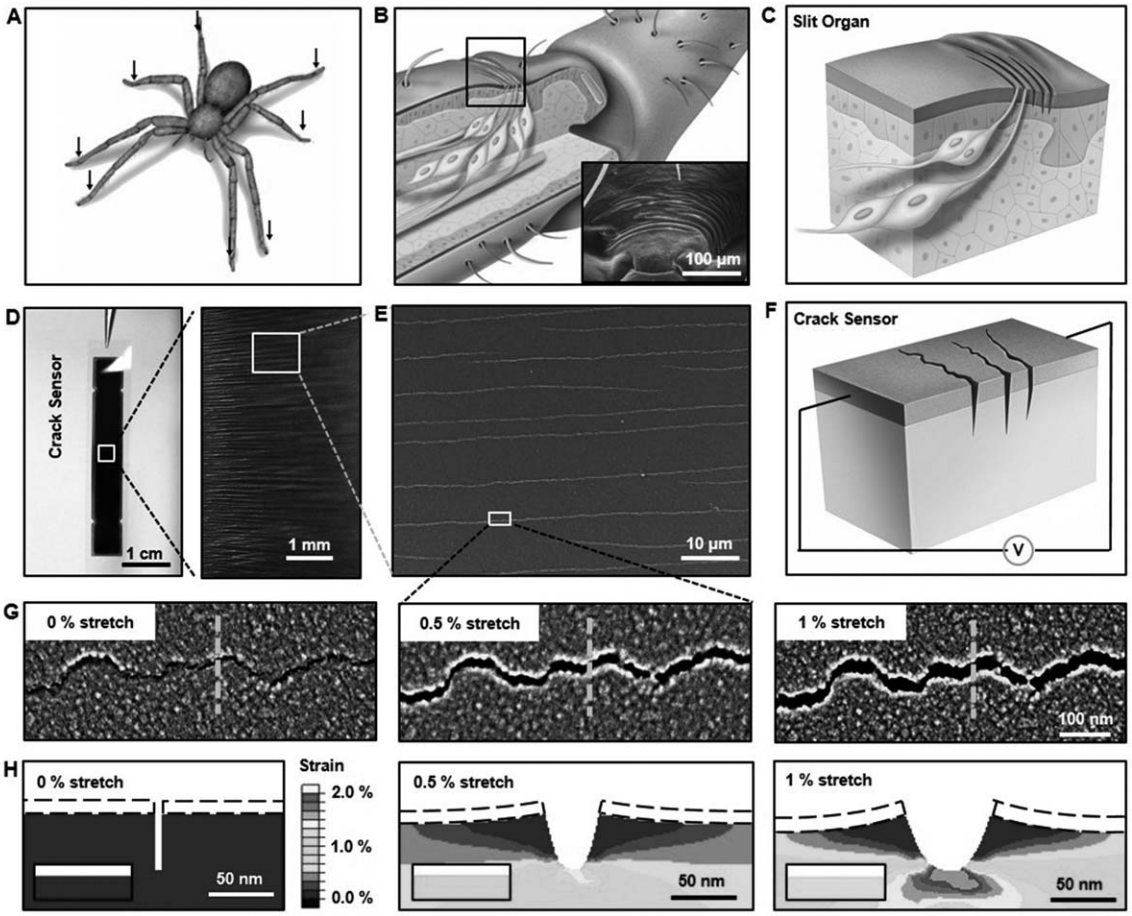

그림 1 거미의 감각기관(A~C) 및 이를 모사한 나노균열센서의 이미지(D~E). (F) 센서의 측정 개괄도, (G) 0 % ~ 2 %의 strain에 따른 균열의 구조적 변화의 SEM이미지 (F) 균열변화의 FEM 시뮬레이션 결과 (inset: 균열이 없는 평판의 시뮬레이션 결과)[1]

모델(FEM) 기법으로 외력이 가해졌을 때의 메커니즘을 시뮬레이션한 모델이다. 균열 사이에 외력이 집중되면서 균열이 없는 기판(inset)에 비하여 외력에 매우 민감하게 움직이며, 그에 따라 전기전도도의 변화량을 읽어낼 수 있다.

압각센서의 특성을 나타내는 단위로 게이지 계수(gauge factor)로 평가되는데, 이는 외력에 따른 저항변화 값으로 표현되며 같은 외력에서 저항변화의 크기를 나타낸 것으로 게이지계수가 높을수록 미세한 외력에서도 저항변화를 감지할 수 있어 센서의 특성이 좋다고 할 수 있다. 이 균열센서는 ~2 %의 외력에서 게이지 계수가 16,000을 상회[3]하며, 이는 여타 연구되고 있는 기존의 압각센서의 게이지 계수를 훨씬 웃도는 고감도의 압각 및 진동센서라고 할 수 있다.

균열센서의 확장성 능력 및 기계적 압력 및 진동을 감지할 수 있는지를 알아보기 위하여 유연기판위에서 8×8 픽셀 배열형태의 멀티플렉스 소자를 제작하였다(그림 2a). 먼저 압력을 감지할 수 있는지를 확인하기 위하여 한쪽에다 5 Pa의 압력을 가할 수 있는 고분자 조각(polydimethylsilane)을 센서 어레에 위에 올려놓아 압력을 감지할 수 있는지 확인하였다. 또한 다른 쪽에는 무당벌레를 올려놓아, 무당벌레의 무게에 해당하는 압력(5 Pa)과 무당벌레 고유의 진동(200 Hz)을 한꺼번에 측정할 수 있는지 확인하였다. 그림 2(f)는 압력 그림 2(g)는 진동에 해당하는 값 변화를 나타낸 것이며, 고분자 조각의 압력과 무당벌레의 압력 및

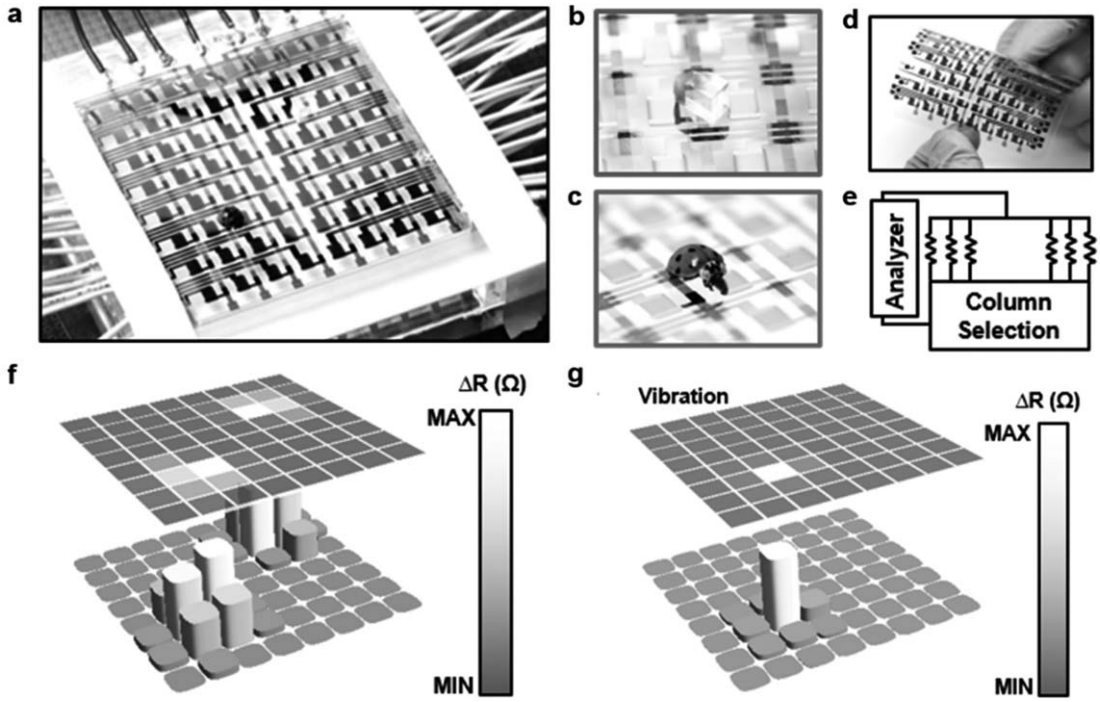

그림 2 진동센서의 8 X 8 정렬을 통한 대변적 응용[1]

진동 모두 감지할 수 있음을 확인할 수 있다. 그 진동의 고유 주파수는 고속푸리에변환(fast Fourier transform)을 이용하여 분석할 경우 올려놓은 순간 압력과 진동의 진동수를 한꺼번에 감지할 수 있다.

3. 나노균열센서의 응용

균열센서가 진동을 잘 감지하고 인식한다는 점에서 다양한 곳에서 응용이 가능하다. 먼저, 악기에서 나오는 소리의 진동을 읽어 주파수 센싱이 가능하다. 그림 3(a)와 같이 바이올린의 f-hole 위에 고정시켜 바이올린 내에서 공기의 공명을 일으켜 개별 감지가 가능하다. 이러한 성질을 이용하여 G-, D-, A-, E- 등 다양한 소리의 현을 켰을 때, 그 소리에 해당하는 주파수를 감지할 수 있다(그림 3(b)). 또한 주파수의 변화를 실시간으로 측정하여 시간에 따라 어떤 주파수가 감지되는지도 파악이 가능하며 조화진동에 따른 피크가 잘 나타나고 있다(그림 3(c)). 또한, 균열센서가 플렉서블 하므로 사람의 목에 붙여 직접 음성패턴인식도 가능하다(그림 3(f)). 흔히 "칵테일 파티 현상(cocktail party phenomenon)"이라고 불리는 현상은 외부에 소음이 많이 있는 환경에서 직접 대화를 주고 받을 때, 사람의 뇌는 듣고 싶어 하는 특정 목소리를 필터링하여 상대와의 커뮤니케이션이 어느 정도 원활하게 진행되는데 반해, 소음이 많은 환경에서 마이크와 같은 시스템을 통하여 커뮤니케이션을 하고자 하는 경우에는 소음 자체를 필터링하지 못하거니와, 필터링하고자 하여도 그 목소리를 구분하기 힘들다는 단점이 있다. 이에 플렉서블한 균열센서를 목에 붙이면 목으로 전달되는 목소리의 진동을 직접 읽고, 외부의 다른 소음들에 대해서는 감지하지 않는다. 그림 3(d)는 외부 소음이 없을 때 균열센서와 마이크의 음성패턴인식을 나타낸 데이터이다. 이 균열센서를 전자기기와의 커뮤니케이션을 위하여 4개의 게임 명령어(go, jump, shoot, stop)를 사용하여 시간에 따른 스펙트럼 분석을 통해 인식하였다. 보기에는 균열센서와 마이크 모두

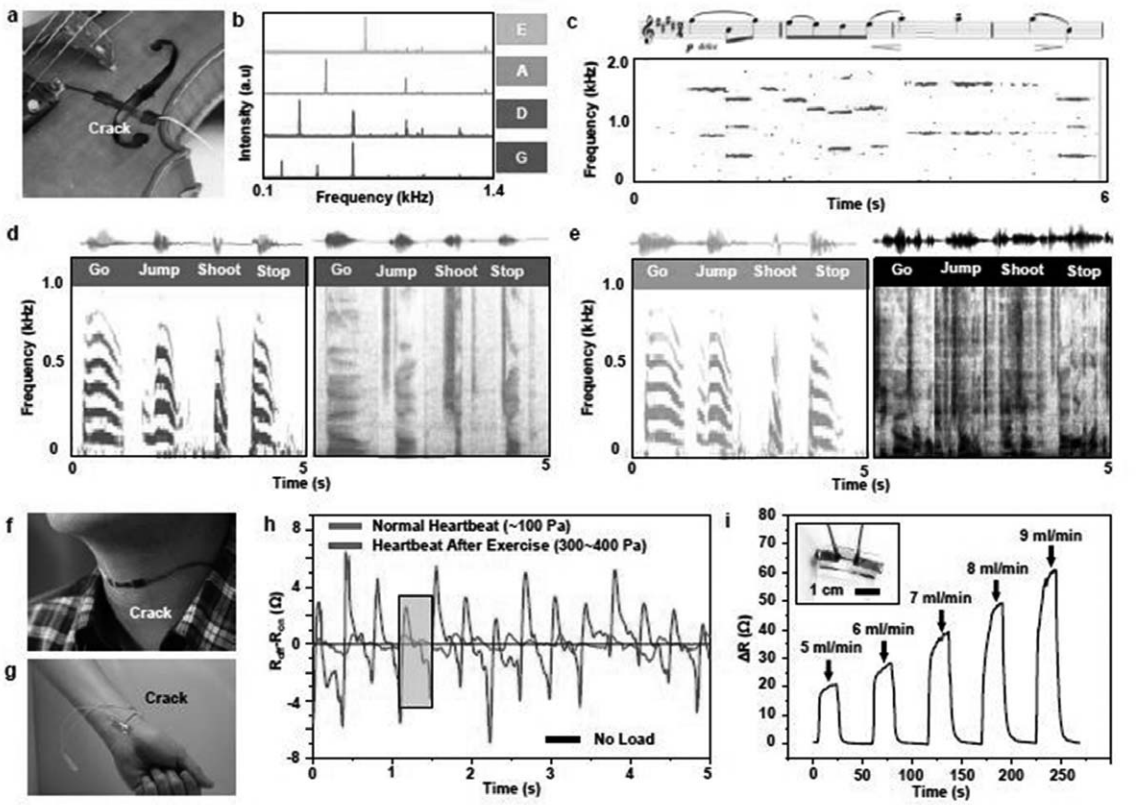

그림 3 금속균열센서의 응용을 설명해 주는 이미지. 소리 및 음성 패턴 인식 소자 및 웨어러블 인체신호 측정소자와 유체량 측정소자로 응용 가능하다[1].

소음이 없을 때 단어에 해당하는 주파수가 선명하게 나오지만, 92 dB에 달하는 소음이 있을 때 균열센서의 음성인식은 선명한 반면, 마이크의 음성 인식은 형체를 알아볼 수 없을 정도로 구분하기 힘들다(그림 3(e)). 이는 균열센서의 진동 인식이 원하는 정보만을 전달할 수 있는 능력을 가지고 있음을 의미한다. 그 외에도 심박수를 측정하는 등 생체 신호를 파악할 수 있고(그림 3(h)), 마이크로 채널에서 흐르는 유체의 유량을 측정하는 등(그림 3(j)) 압력과 진동을 읽음으로 가용할 수 있는 범위가 무궁무진하다.

4. 나노균열의 제어를 통한 초고성능 센서 구현

앞서 설명된 나노균열센서는 균열의 깊이를 조절하여 그 민감도의 향상을 기대할 수 있다. 최근 발표된 결과에 의하면 균열의 깊이가 깊어짐에 따라서 같은 크기의 힘에도 균열의 변화(crack gap displacement)가 커짐을 알 수 있었고 이에 따른 민감도도 증가함을 실험적, 이론적 분석으로 알 수 있었다(그림 4 참조). 이 연구를 위해서 일반적인 굽힘(bending)에 의한 외력(strain)을 가하여 균열을 생성시키고 추가적 인장응력(tensile strain)을 가하여 균열의 깊이를 확대(propagation) 시킨다. 이때 평균적인 초기의 균열이 가지는 40 nm의 깊이를, 추가적 인장응력에 의해 100 nm 혹은 그이상의 깊이를 가진 균열을 유도할 수 있다. 이때 다른 균열의 구조적 형상 변화, 예를 들면 균열의 수(number of crack), 균열의 asperity(구불구불함 정도)는 변화 하지 않는다는 것도 확인하였다.

이러한 방법을 통하여 이 연구진은 10 N의 인장

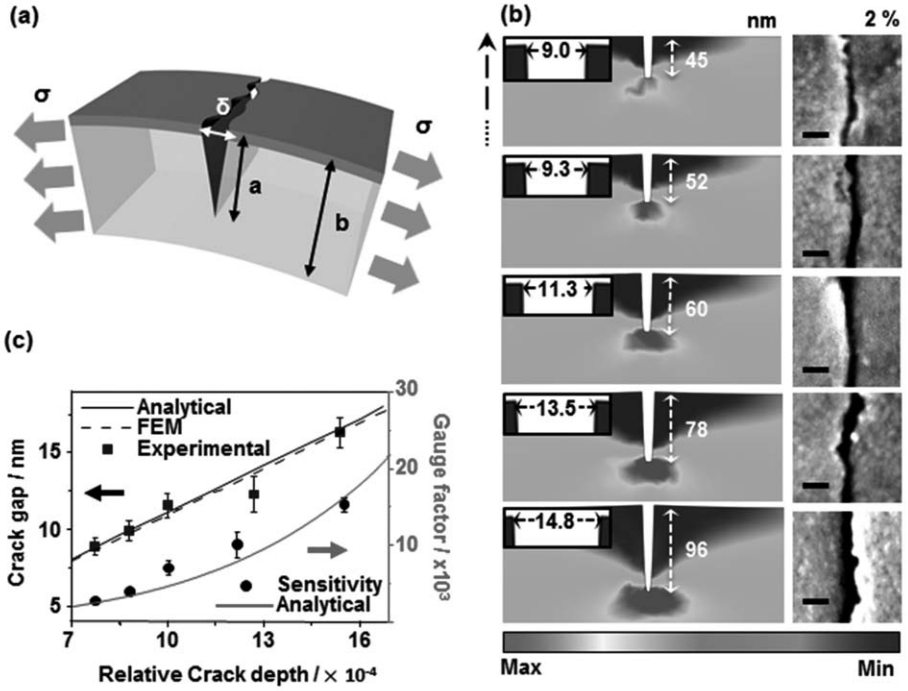

그림 4 금속균열의 깊이와 센서의 민감도를 설명해 주는 이미지. 깊게 형성된 센서는 보다 민감하게 외력을 받아드리는 것은 이론적 분석 및 실험으로 증명함[3]

응력을 제시하여 세계최고감도인 2 %의 외력에서 16,000의 민감도를 가진 센서를 개발하였다. 이러한 방법으로 만들어진 초고민감도 센서는 여타 센서보다 보다 높은 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR)을 가짐으로 보다 더 정확하게 원하는 진동을 인식할 수 있는 소자로 사용될 수 있다.

5. 맺음말

균열은 지금까지 다양한 문제점을 야기시키는 결점으로 여겨져 왔으나 거미의 진동인식감각기관을 모사한 균열센서를 이용하여 매우 간단한 방법으로 초고민감도를 가진 진동 및 압력센서를 제시할 수 있었다. 특히, 다양한 균열의 구조를 변형할 수 있어 원하는 민감도 및 신호대잡음비의 최적화되 센서를 쉽게 제조할 수 있으며, 이러한 센서는 플랙서블 센서 및 웨어러블 소자로서 많은 응용적 가치를 지닌다고 할 수 있다. 하지만, 반복자극에 의한 민감도 변화 등의 문제점이 발생할 수 있는 만큼 차후 연구를 통하여 수정보완 될 수 있겠다. 마지막으로, 이번 진동 및 음성인식이 가능한 센서의 기고문을 통하여 한국소음진동공학회 회원들에게 새로운 연구를 제시할 수 있게 되기를 기대한다. KSNVE

참고문헌

(1) Kang, D. et al., 2014, Ultrasensitive Mechanical Crack-based Sensor Inspired by the Spider Sensory System, Nature, Vol. 516, pp. 222~226.
(2) Fratzl, P. and Barth, F. G., 2009, Biomaterial Systems for Mechanosensing and Actuation, Nature, Vol. 462, pp. 442~448.
(3) Park, B. et al., 2016, Dramatically Enhanced Mechanosensitivity and Signal-to-Noise-Ratio on Nanoscale Crack based Sensors: Effect of Depth, Adv. Mater, DOI: 10.1002/adma.201602425.