

< 논문 >

탄소나노튜브 스마트 복합소재를 이용한 인공뉴런 개발 연구

강인필[†] · 백운경* · 최경락** · 정주영**

Developing Artificial Neurons Using Carbon Nanotubes Smart Composites

Impil Kang, Woonkyung Baek, Gyeong Rak Choi and Joo Young Jung

Key Words : Carbon nanotube (탄소나노튜브), Nano smart material (나노 스마트 재료) Nano-composite (나노복합소재), Nano sensor (나노센서), Structural health monitoring (구조물 건전성 감시)

Abstract

This paper introduces an artificial neuron which is a nano composite continuous sensor. The continuous nano sensor is fabricated as a thin and narrow polymer film sensor that is made of carbon nanotubes composites with a PMMA or a silicone matrix. The sensor can be embedded onto a structure like a neuron in a human body and it can detect deteriorations of the structure. The electrochemical impedance and dynamic strain response of the neuron change due to deterioration of the structure where the sensor is located. A network of the long nano sensor can form a structural neural system to provide large area coverage and an assurance of the operational health of a structure without the need for actuators and complex wave propagation analyses that are used with other methods. The artificial neuron is expected to effectively detect damage in large complex structures including composite helicopter blades and composite aircraft and vehicles.

1. 서론

분자나 원자 차원의 구조를 조작하는 기술이 개발됨으로서 가능하게 된 나노 기술(nano technology)은 재료, 의학, 생명공학, 반도체 등 현재 학문적 연구뿐만 아니라 산업 분야에 혁신을 불러일으키고 있다. ‘난쟁이’를 뜻하는 그리스어에서 온 ‘나노’는 대상물의 스케일에 있어서 10^{-9} m 범주의 분자 크기인 아주 작은 세계를 대상으로 하므로, 전통적인 역학을 기본으로 하여 마이크로 크기 이상의 범주를 주 관심 영역으로 다루어 왔던 기계공학 분야와는 다소 상관 관계가 적을 듯한 인상을 주고 있다. 그러나 나노 기술에 의해 새롭게 등장하고 있는 스마트 나노 재료들은 (smart nano materials) 그들이 지닌 우수한 기계적, 전기적 및 전기화학적 성질로 인하여 구조용 재료

뿐만 아니라 전자 소자, 에너지 저장 및 센서 재료로 각광을 받고 있어 최근 기계공학분야에서도 활발한 연구가 진행 중이다. 이러한 연구의 일례로는 나노 재료들을 나노 스케일에서뿐만 아니라 매크로 스케일의 공학적 응용을 위하여 다른 재료들과 혼합되어 다기능성(multi-functional)을 지닌 복합 재료로 연구 개발을 들 수 있다.

다양한 나노 재료들 중에서 탄소나노튜브 (Carbon nanotube, CNT)는 Iijima⁽¹⁾에 의하여 개발된 이후 그 재료의 우수한 성질을 이용하기 위하여 널리 연구가 되고 있다. CNT의 전기적, 화학적 및 기계적 재료로서 우수한 성질은 여러 문헌들을 통하여 잘 알려져 있다^(2,4). CNT의 전기적 특성은 그의 원자적 구조와 탄소구조의 기계적 변형 및 화학적 도핑(doping)에 큰 영향을 받게 되어, 나노튜브의 전기적 전도도의 변화를 유도할 수 있다⁽⁵⁾. 따라서 CNT의 전기적 임피던스는 화학적 환경 노출^(6,7) 및 기계적 변형^(8,9)에 매우 민감하여 우수한 스마트 재료로서 활용될 수 가 있다.

이와 같은 특성의 변화는 사실상 나노튜브의

[†] 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : ipkang@pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1600 FAX : (051)620-1405

* 부경대학교 기계공학부

** 한국생산기술연구원

종류와 유형에 따라 다르게 나타날 수 있으며^(10, 11), 이러한 스마트 재료로서의 특징 연구들의 대부분 나노 스케일에 국한되어 연구가 이루어지고 있다. 그러나 대부분의 기계공학적 응용이 이루어지는 매크로 스케일에서의 CNT가 재료 내부에서 보여주는 거동과 특성은 미세 스케일에서의 경향과 큰 차이가 있다. 따라서 본 논문에서는 CNT를 대부분의 기계공학적 응용이 이루어지는 매크로 스케일에서 활용할 수 있는 벌크 재료로 개발하여 이들의 스마트 재료적 특성을 이용한 새로운 센서의 개발연구를 소개하도록 하겠다.

2. 탄소나노튜브 스마트 복합 소재를 이용한 인공 뉴런의 제작

본 연구에서 개발된 인공뉴런은 탄소나노튜브 복합소재를 이용한 스마트 재료 (CNT composite smart material)를 이용하여 개발되었다. CNT가 지니고 있는 나노 스케일에서의 우수한 성질을 매크로 스케일에서도 구현하기 위하여는 이들을 벌크 재료로 개발하여야 한다. 대표적인 CNT 벌크 재료로서는 분자간의 결합력인 반데르 발스 (Van der Waals) 힘에만 의존하여 단일벽 탄소나노튜브 (Single Walled-Carbon Nanotube, SWCNT)간의 엉킴으로만 이루어진 박막 형태인 버키 페이퍼 (bucky paper)가 있으나, 이는 그의 강도가 미약하여 이용에 큰 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 폴리메타크릴산 메틸 (polymethyl methacrylate, PMMA) 나 실리콘(silicone)과 같은 고분자 재료들을 기저 (matrix) 재료로 하고 나노입자인 CNT를 중량비 (wt%) 10% 내외의 충전재(filler)로 활용한 나노 벌크 재료의 형태로 개발하여 뉴런을 제작하였다.

CNT 스마트 복합 소재의 제작방법은 나노소재의 분산, 혼합 및 건조(curing) 등과 같은 복잡한 공정이 요구되지만, 그 재료의 특성은 CNT의 혼합비율과 고분자 기저재료의 선택 등을 통하여 자유롭게 설계 제작되어질 수 있다⁽¹²⁾. PMMA를 기저 재료로 하는 나노 복합재료 뉴런은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 분무시키거나 필름 형태로 제작하여 대상 구조물에 분사, 접착 혹은 구조물의 내부 층에 삽입하는 형태로 이용할 수 있다. 이와 같이 길이 방향으로 길고 유연한 박막 형태로 제작인 가능한 이 연속형 센서는 마치 인체 속에 섬유 형태로 분포되어 있는 감각기관인 신경과 유사하므로 이를 모방하여 뉴런 (neuron)이라 명명하였다. 이 센서의 제작 방법의 또 하나의 특징으로는, 분사형 방법을 적용할 수 있으므로 구조물의 굴곡 부위, 접합부나 용접부와 같은 복잡한 형상의 부위에도 분무를 통하여 센서를 부착할 수 있는 등 적용 단면과 용도에 적합한 형상으로 적용할



Fig. 1 Fabrication of CNT/PMMA composite electrodes (a) spray fabrication on a patterned bar; and (b) fabricated MWCNT/PMMA structural sensor sprayed on a glass fiber beam (5 wt % MWCNT, 330 x 5 x 0.08 mm, R=117.03 k, C=14.7 pF).

수 있는 잇점이 있다. 그러나 이들 센서재료를 개발하기 위한 나노 복합재료 공정은 아직까지 나노 재료의 특성에 기인한 여러 문제점을 내포하고 있으므로, 재료의 안정화 문제는 극복되어야 할 숙제로 남아있다.

3. 인공뉴런을 이용한 구조물의 상태 진단 측정 실험

CNT 복합 소재의 전기적 특성을 나노 재료의 분석법으로 널리 활용되고 있는 전기화학적 임피던스 분석(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)에 의하여 그 특성을 분석하고, 전기적인 상사 회로를 도출을 하면 Fig 2에 도시한 바와 같이 저항 (R)과 축전기(C)의 병렬 연결 구조로 모델링이 된다⁽¹²⁾. 따라서, CNT 스마트 복합소재로 이루어진 뉴런은 구조물에 발생하는 물리적 변화 혹은 화학적 변화 등을 그 자신의 전기적인 임피던스의 변화로 전화하여 측정을 할 수 있다. 다음은 이와 같은 뉴런의 전기적 임피던스의 변화를 이용하여 구조물에 발생하는 변위와 균열(crack)의 측정 예들을 소개하도록 하겠다.

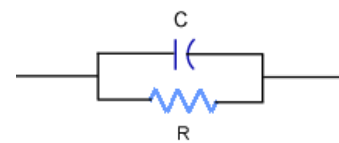


Fig. 2 Equivalent electrical model of CNT neuron based on Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) test.

3.1 인공 뉴런을 이용한 하중 및 변형 측정

인공뉴런은 그 재질인 CNT 스마트 복합 소재가 지니고 있는 전왜성(piezoresistivity)을 이용하여 구조물에 작용하는 하중이나 변형 등을 측정할 수 있다. 복합소재 내부의 CNT는 나노 충전재(filler)로서 여러 스마트 재료로서의 기능성 역할들을 할 수 있다. 그 중에서 전기적 전도성(electrical conductivity)으로부터 부수적으로 얻어지는 전왜성은 CNT가 복합소재의 기저(matrix) 재료내의 충전재로 작용하면서 얻을 수 있는 대표적인 스마트재료의 성질로 관찰되고 있다. 이 복합 소재에 외력이 작용하여 변형 즉 스트레인이 발생할 경우에는 내부에 분포되어 있는 CNT 입자들은 서로 간에 연결되어 있는 접촉 저항이 변화하게 된다. 이러한 마이크로 스케일에서의 접촉 저항 변화가 매크로 스케일에서 평균화되어 CNT 복합 소재의 전왜성으로 나타나게 된다. 카본 블랙이나 탄소 파이버 역시 복합재료에서 위와 같은 전왜성을 보이고 있으나, 이들은 그 입자의 크기가 크므로, 작용한 압축 하중과 인장 하중에 각기 다른 전왜성의 변화를 보이고 있어 그 변화의 특성이 양호하지가 않다. 반면에 CNT는 나노 입자로서 기저 재료내부에 고르게 분포할 경우에는 그의 우수한 전기적 전도성에 어느 정도 기인하여 압축과 인장 하중 하에서 균일하고 선형적인 전왜성의 변화를 보이고 있다. Fig. 3은 뉴런의 스트레인 측정 특성을 도시한 것으로서 뉴런의 저항 변화를 신호처리 시스템을 통하여 변위인 스트레인에 대한 전압 응답 특성으로 변환시켜 보여 주고 있다. 이 뉴런은 $1.56 \text{ mV}/\mu\epsilon$ 의 감도를 보였으며, 이는 현재 상용으로 이용되는 게이지 특성(gauge factor) 2~5 범위의 금속형 스트레인 게이지의 $2\sim 5 \text{ mV}/\mu\epsilon$ 보다는 다소 낮은 감도를 보이고 있다. 그러나 나노센서는 복합 소재에 혼합하는 CNT의 함량 조절을 통하여 상용화 게이지에 준하는 감도를 얻을 수 있다. Fig. 4는 뉴런의 정적 및 동적 하중을 적용하였을 경우의 스트레인 특성을 도시하였다. 동적 하중의

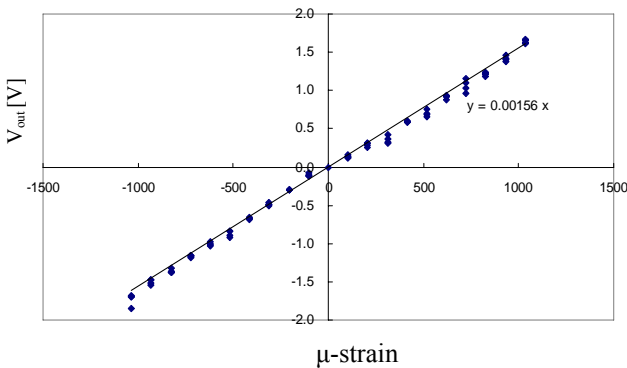


Fig. 3 Experimental strain output of the neuron on a cantilever beam.

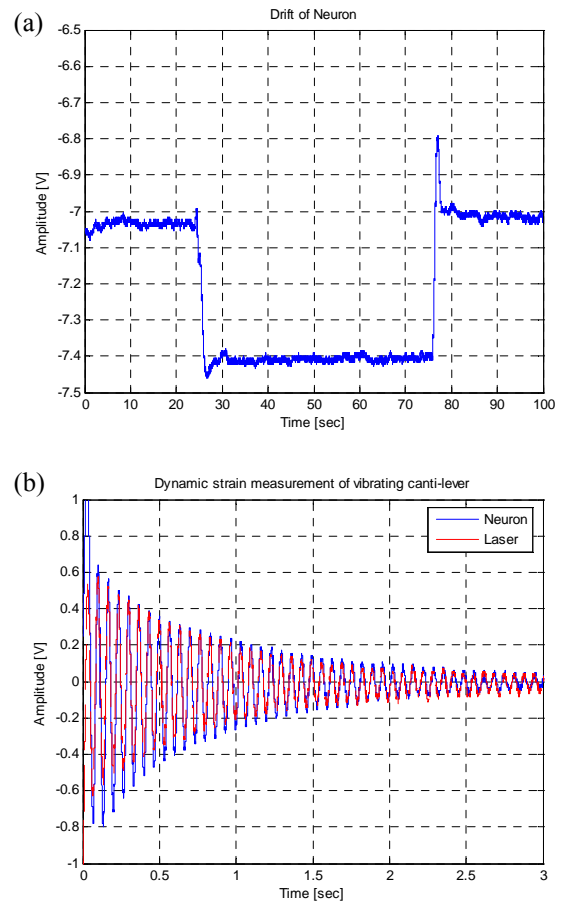


Fig. 4 Strain responses of the CNT neuron on a glass fiber cantilever beam: (a) response of the neuron under a static load; (b) dynamic response of the neuron during free vibration due to an initial displacement, response of a laser displacement sensor is also shown.

측정 시에 그 측정의 주파수 범위(bandwidth)는 약 20Hz 내외로 측정되었다.

위에 도시한 뉴런의 변위화 하중 측정을 위한 기초 실험을 통하여 이 뉴런은 구조물의 변형량에 대하여 선형적인 전왜성의 변화 특성을 보임과 동시에 유연한 박막 형태로 제작이 가능한 특징을 지녀 구조물의 건전성 평가 등에 이용될 수 있는 새로운 센서의 개발을 가능하게 할 수 있다.

3.2 인공 뉴런을 이용한 구조물의 균열 측정

구조물에 발생하는 균열을 센서로 검출하는 대표적인 사례는 스트레인 게이지를 이용하여 균열에 기인하여 발생하는 응력 집중에 의한 검출법⁽¹³⁾과 균열의 전파에 의한 센서 자체의 파손 저항의 측정 방법⁽¹⁴⁾ 등이 있다. 전자의 방법은 균열의 발생으로 인하여 그 끝단에 발생하는 응력 집

중을 스트레인 게이지로 검출하는 방법으로, 균열이 발생할 예상 지점 근처에 게이지를 부착시켜 응력 변화의 측정을 통하여 간접적으로 검출한다. 그러나 센서의 부착 위치가 균열의 발생 지점에서 멀리 떨어져 있으면 센서 감도의 한계로 인하여 측정이 불가능하다. 후자의 방법 역시 균열의 예상 발생 위치에 센서를 부착시킨 후에 만약 균열이 발생하면, 성장 크기에 따른 센서의 파손 정도를 저항의 변화 등을 측정함으로써 균열의 유무 또는 성장을 검출한다.

인공 뉴런을 이용한 균열의 검출법은 두 가지 방법의 특징을 동시에 지니고 더불어 연속 센서라는 센서의 부착 범위가 길다는 잇점으로 인하여, 한 개의 센서가 넓은 영역을 감시할 수 있다는 추가적인 특징을 지닌다. 그러나, 연속 센서라는 특성의 단점은 균열이나 특정 신호가 발생하였을 경우 그 발생의 위치를 하나의 단위 센서로서는 추정하기 어려운 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 하나의 단위 센서가 넓은 영역의 균열 발생과 전파를 감지하여 다수의 포인트 측정 센서를 사용하는 경우 보다는 신호 처리 시스템을 간단히 구성할 수 있으므로 대형 구조물과 같이 측정 범위가 넓은 대상의 균열 유무와 전파에 기존의 센서보다는 유리한 장점을 지닐 수 있다고 사려 된다.

Fig. 5 에서는 나노 연속센서인 CNT 뉴런에 의한 균열 측정 실험의 예를 도시하였다. Fig. 5 는 보의 종 방향을 따라 설치가 되어 있는 뉴런을 횡 방향으로 인위적으로 절개함으로써 균열의 전파를 모사하면서 그 변화를 살핀 실험의 결과이다. 여기서 *normalized crack propagation* 은 뉴런의 폭을 기준으로 하여 환산한 균열의 길이 비를 의미하며, 100%는 균열이 뉴런을 횡 방향으로 관통하여 뉴런이 끊어진 상황이다. 이때 균열이 진전됨에 따라 뉴런의 파손이 발생하며 이로 인하여 뉴런의

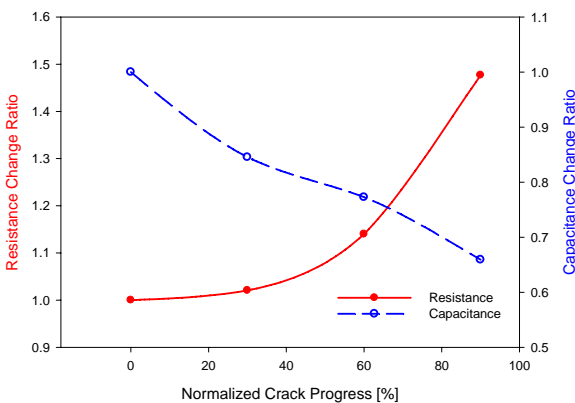


Fig. 5 The variation of electrical parameters of the neuron under crack progression.

전기적인 특성인 저항과 정전 용량의 변화를 야기시킨다. Fig. 6 는 자유 진동하는 외팔 보에 장착되어 있으며 균열에 의하여 파손이 된 뉴런의 동적 응답을 측정된 결과이다. 균열이 50% 진전됨에 따라 그 전기적 특성이 변화함으로써 원래의 건전한 상태보다는 저항이 증가함과 동시에 정전 용량이 감소함으로 인하여 휘스톤 브리지로 구성된 측정 시스템의 전기적 응답 신호의 크기와 위상 변화를 발생시킴으로 균열의 진전 여부를 측정할 수 있었다.

현재 개발된 뉴런의 스트레인 감도는 아직은 균열이 뉴런 몸체에 접근하기 전에 그 응력 집중에 의한 스트레인의 증가를 측정하기에는 다소 떨어지므로, 현재로서는 균열이 뉴런을 파손할 경우에만 측정이 가능한 한계를 지니고 있다. 그러나 뉴런의 스트레인 감도 향상 개발이 이루어지면 균열이 뉴런에서 다소 떨어져서 발생하거나 근처에 접근하여 뉴런의 파손이 일어나기 전에도 측정이 가능할 것으로 기대하고 있다.

4. 나노센서를 이용한 구조물의 건전성 감시

구조물의 건전성 감시 기법(Structural Health Monitoring, SHM)의 개발은 자연 재해 혹은 노후로 인한 구조물 및 기계의 손상을 감지하여 큰 재해를 미연에 방지하거나, 유지 보수에 소요되는 비용을 줄일 수 있을 것이다. 그러나 교량, 건물, 비행기, 대형 터빈의 블레이드, 선박 등 복잡한 구조물은 어느 부위에서나 손상이 발생할 수 있으며, 이들을 위한 SHM 에서는 장거리의 (long span) 센서 배치나 여러 종류의 구조물의 상태 변수들이

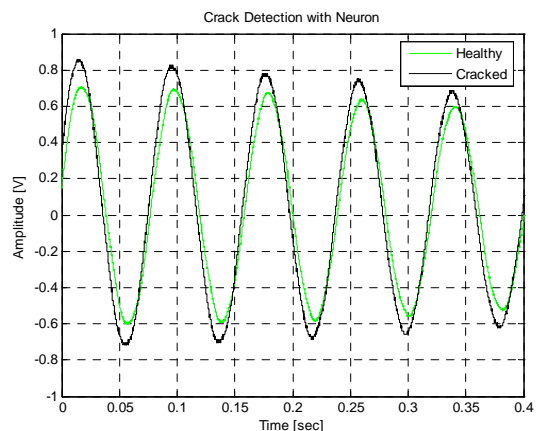


Fig. 6 MWNT/PMMA neuron's voltage and phase change due to 50% damage (crack propagated half-way through) of the neuron on a vibrating beam.

측정 되어져야 하므로 많은 어려움이 산재되어 있다. 대상 구조물에 여러 종류의 센서와 구동기를 부착하여 손상을 진단하는 SHM 시스템은 측정 대상 부분에 충분한 센서들을 배치하면 데이터 처리 시스템을 위한 복잡한 배선, 측정비용의 상승, 계측 시스템의 부착에 의한 구조물의 하중 증가 및 복잡화 등의 제반 문제들로 인하여 대형 구조물에는 적용이 어려울 수가 있다. 특히, 최근에 많이 개발되고 있는 복합재료 구조물의 건전성 감시에 있어서 주요 관심 사항인 피로의 분포도, 내면의 부식, 표면 및 접합 층에서의 균열, 박리, 화학적인 손상, 피로에 의한 균열의 전파 등은 전형적인 내재된 손상이므로 구조물의 표면에 부착하여 진동 신호나 wave 에 의한 표면 측정 신호로는 검출에 어려움이 있다. 나노 소재를 이용한 뉴런은 경량의 필름 형태나 혹은 섬유 형태로 제작이 가능하므로 복합소재를 이용한 구조물의 내부에 센서 층으로 포함이 된 sensor embedded structure 의 개발이 용이하다. 따라서 이들 뉴런은 감시 대상인 구조물에 조밀한 밀도로 넓은 영역에 네트워크 형태로 배치되어 구조물의 손상에 의한 재해 등을 예방 할 수 있으리라 기대한다. 이러한 SHM 기법은 경량의 복합소재 형태의 센서에 의존하므로 구조물에 무게증가, 응력 집중 혹은 고주파 성분의 waveform 의 저장을 위한 거대한 저장 장치 등 기존의 연구와는 달리 대상 구조물에 가하는 부담을 줄일 수가 있다.

Fig. 7(a)는 장신의 CNT 뉴런의 네트워크로 구성된 structural neural system (SNS)을 도시하였으며, Fig. 7(b)는 SNS 가 복합재료 구조물에 센서 층으로 삽입이 되는 예를 도시하였다. 나노센서를 이용한 SNS 는 복합소재 구조물에 넓은 영역에 적용이 되어 건전성 감시 시스템으로 활용이 될 수 있으리라 기대가 되며, 향후에는 압전 세라믹 (PZT) 센서이나 금속형 스트레인게이지를 이용한 SHM 시스템과의 실험적인 비교 연구를 진행할 계획이다.

CNT 를 포함한 액상형 복합소재의 센서는 그 설치 방법에 있어서도 다양한 응용이 있을 수 있다. 구조물에서 단면 형상이 변화가 심한 연결 부위나 용접 부분은 응력 집중 혹은 부식으로 인하여 균열이나 파손의 발생이 쉬운 반면에 센서 부착에는 어려움이 있는 부위이다. 그러나 CNT 센서는 브러쉬에 의한 도포나 스프레이 형태로 분무 후 전극만을 연결하여 신호처리를 하면 되므로, 이러한 부위에 상대적으로 적용이 용이할 것으로 사려 된다.

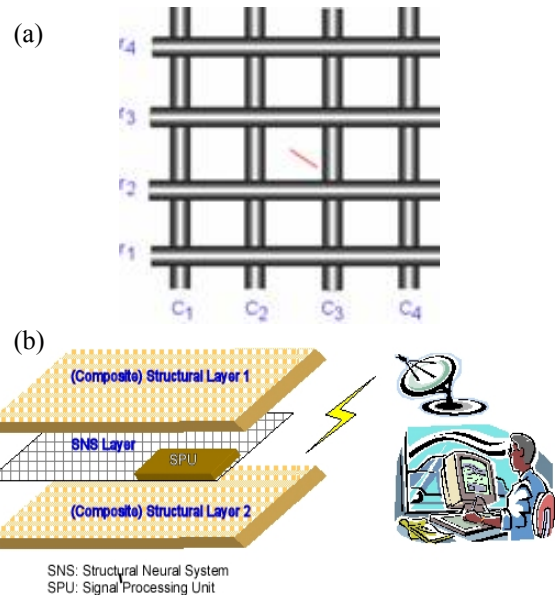


Fig. 7 Structural Neural System(SNS) and its applications for Structural Health Monitoring (SHM): (a) The SNS to detect a damage; and (b) structure embedded SNS including wireless signal processing unit.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 길이 방향으로 길고 유연한 박막 형태로 마치 인체 속에 감각기관인 신경과 유사한 연속형 센서인 인공 뉴런을 소개하였다.

이 센서는 나노 소재인 탄소나노튜브(Carbon nanotubes, CNTs)를 고분자 재료인 폴리메타크릴산 메틸 (polymethyl methacrylate, PMMA) 와 혼합하여 제작한 나노 스마트 재료를 이용하여 개발하였다. 이러한 뉴런은 구조물에 장착되어 센서로서 구조물에 발생하는 변형과 균열을 그의 전기적 임피던스 변화로 변환 시켜 측정 가능하게 하는 구조물의 건전성 감시 (Structural Health Monitoring, SHM) 센서로서의 가능성을 제시하였다. 뉴런은 전왜성 (piezoresistivity)의 특성이 있으므로 대상 구조물의 스트레인과 정적 및 동적 하중을 측정을 할 수 있었다. 또한 구조물에 균열이 발생하고 전파가 되어 뉴런에 도달하면, 균열은 뉴런의 물체를 손상시켜 임피던스(저항 및 정전용량)의 변화를 가져오고, 이 변화는 전기 출력 신호의 변화를 일으켰다. 진동하는 구조물에서 균열이 발생하면 이로 인한 센서의 응답 전압의 크기와 위상의 변화를 측정하여 균열의 발생을 측정 할 수 있었다.

나노 소재를 이용한 뉴런은 경량의 필름 형태나 혹은 섬유 형태로 제작이 가능하므로 복합 소

재를 이용한 구조물의 내부에 센서 층으로 포함이 된 sensor embedded structure 의 개발이 용이하다. 따라서 이들 뉴런은 감시 대상인 구조물에 조밀한 밀도로 넓은 영역에 네트워크 형태로 배치되어 구조물의 손상에 의한 재해 등을 이용 될 수 있다. 이러한 특징을 지닌 뉴런과 이들의 조합형 센서는 복합 소재로 이루어진 항공기나 블레이드 등에 적용이 되어 이들에게서 발생하는 결함을 측정할 수 있는 센서로 활용 될 수 있으리라 기대한다.

Gauge Capabilities in Crack Detection", The 4th international workshop on Structural Health Monitoring, 2003.
 (14) http://www.vishay.com/brands/measurements_group/strain_gages/mm.htm

참고 문헌

- (1) Iijima, S., 1991, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, Vol. 354, No. 56, pp.56-58.
- (2) Krishnan, A., Dujardin, E., Ebbesen, T. W, Yianilos, P. N., Treacy, M. M. J., 1998, "Young's modulus of single-walled nanotubes," *Physical Review B*, Vol. 58, No. 20, pp.14013-14019.
- (3) Yu, M-F, Files, B. S., Arepalli, S., Ruoff, R. S., 2000, "Tensile loading of ropes of single wall carbon naotubes and their mechanical properties," *Physcial Review Letters*, Vol.84, No. 24, pp.5552-5555.
- (4) Carbon Nanotechnologies, Inc., www.cnanotech.com.
- (5) Peng, S., Cho, K., 2000, "Chemical control of nanotube electronics," *Nanotechnology*, Vol. 11, pp.57-60.
- (6) An, K. H., Jeong, S. Y., Hwang, H. R., Lee, Y. H., 2004, "Enhanced Sensitivity of a Gas Sensor Incorporating Single-Walled Carbon Nanocomposites," *Advanced Materials*, Vol. 16, No. 12, pp.1005-1009.
- (7) Collins, P. G., Bradley, K., Ishigami, M., Zettl, A., 2000, "Extreme Oxygen Sensitivity of Electronic Properties of Carbon Nanotubes," *Science*, Vol. 287, pp.1801-1804.
- (8) Tomblor, T. W., Zhou, C., Alexseyev, L., Kong, J., Dal, H., Liu, L., Jayanthi, C. S., Tang, M., and Wu, S. Y., 2000, "Reversible electromechanical Characteristics of Carbon Nanotubes under Local-Probe Manipulation", *Nature*, Vol. 405, pp.769-772.
- (9) Wood, J. R., and Wagner, H. D., 2000, "Single-wall carbon Nanotube as molecular pressure sensors", *Applied Physics Letters*, Vol.76, No.20.
- (10) Nanolab, Inc., info@nano-lab.com.
- (11) Li, W. Z., Wen, J. G., Sennett, M. and Ren, Z. L., 2003, "Clean double-walled carbon nanotubes synthesized by CVD," *Chemical Physics Letters* , Vol. 368, pp.299-306.
- (12) Kang, I, Schulz, M. J., Lee, J. W., Choi, G. R. and Choi, Y. S., 2006, " Strain Sensors Using Carbon Nanotube Composites", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* , Vol. 16, No. 7, pp. pp.762-768.
- (13) Tikka, J., Hedman, R. and Silijander, A., "Strain