

# 탄소나노튜브 스마트 복합소재의 전기적 임피던스 변화를 이용한 나노센서의 센싱 특성 연구

## A Study on Sensing Characteristics of Carbon Nanotube Smart Composite Nano Sensors Based on Electrical Impedance Measurement

강 인 필

I. P. Kang

(접수일 : 2009년 2월 5일, 수정일 : 2009년 2월 13일, 채택확정 : 2009년 2월 26일)

**Key Words** : Carbon Nanotube(탄소 나노 튜브), Nano Smart Material(나노 스마트 재료), Nano-composite Material (나노 복합 소재), Nano Sensor(나노 센서), Structural Health Monitoring(구조물 건전성 감시)

**Abstract** : To address the need for new intelligent sensing, this paper introduces nano sensors made of carbon nanotube (CNT) composites and presents their preliminary experiments. Having smart material properties such as piezoresistivity, chemical and bio selectivity, the nano composite can be used as smart electrodes of the nano sensors. The nano composite sensor can detect structural deterioration, chemical contamination and bio signal by means of its impedance measurement (resistance and capacitance). For a structural application, the change of impedance shows specific patterns depending on the structural deterioration and this characteristic is available for an in-situ multi-functional sensor, which can simultaneously detect multi symptoms of the structure. This study is anticipated to develop a new nano sensor detecting multiple symptoms in structural, chemical and bio applications with simple electric circuits.

### 1. 서 론

나노 재료들은 그들의 이름에서 나타나는 바와 같이 그 재료의 단위 크기 혹은 직경이 원자의 수십 배 크기 정도이다. 이러한 원자 단위 크기의 재료에서는 전자와 에너지의 이동 및 효율이 높으므로, 전기 전도성이 뛰어난 전자 소재의 개발을 가능하게 한다. 나노 소재들은 높은 기계적 강도를 지니고 있어, 초경량 고강도의 신소재 연구에 이용이 되고 있다. 이러한 예와 같이 우수한 성질을 지닌 나노 재료들의 등장은 기존 재료들의 단점을 보완하거나, 그 한계를 극복할 수 있는 새로운 재료의 개발을 가능하게 하고 있다. 그 중에서 나노 스마트 재료(nano smart material)는 앞에서 언급한 나노 소재들의 뛰어난 전기적 특성, 높은 에너지 밀도와 고

강도 및 초경량의 성질을 지니고 있으므로, 압전 세라믹과 같은 기존 스마트 재료의 높은 구동 전압, 작은 구동 변위(strain), 취성 등의 한계를 극복할 수 있으리라 기대가 된다. 대표적인 나노 스마트 재료인 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 Ijima<sup>1)</sup>에 의하여 1991년에 발견된 이후에 뛰어난 재료 특성으로 인하여 응용 연구들이 활발히 진행 되고 있다. CNT는 탄소들이 이음매가 없이 연속적으로 나노 크기의 직경으로 말려져 있는 원통형의 입체형 구조이나, 그 직경에 비하여 300~1000 이상의 매우 큰 세장비(aspect ratio)를 지니고 있어 이상적인 1차원 구조의 탄소 재료라고 할 수 있다. 이러한 구조적인 특이성과 더불어 기계적, 전기적 및 화학적으로 뛰어난 재료의 성질을 지니고 있으므로 CNT는 저밀도 고강도 재료, 디스플레이 재료 및 에너지 저장 재료 등의 응용 연구 대상이 되고 있다. 또한 CNT의 전기 전도성, 화학적 안정성, 전왜성

강인필(책임저자) : 부경대학교 기계공학부  
E-mail : ipkang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6167

(piezoresistivity) 및 뛰어난 화학적 흡착성은 새로운 센서 재료로서 많은 잠재성을 지니고 있다. 따라서 이러한 특성을 활용한 기계적 변형 센서, 화학적 가스 검출 센서 및 생물학적인 센서로서의 응용 연구 역시 다음과 같이 활발히 진행되고 있다.

CNT를 이용한 기계적 변형 측정 센서 관련 연구로서 Tomber<sup>2)</sup>는 AFM(atomic force microscope)의 팁을 이용하여 단일벽 탄소나노튜브(single-wall carbon nanotube, SWCNT)에 기계적인 변형을 가하여, 이로 인한 SWCNT의 전기 전도성 변화를 나노 스케일의 실험으로 관찰하였다. Wood<sup>3)</sup>는 폴리머와 결합되어 있는 CNT가 인장응력을 받고 있을 때에 그 전기적 특성이 변화하고 있음을 라만 분광법(Raman spectroscopy) 분석에 의해 실험적으로 입증하였다. CNT는 중공의 구조와 벌집형태의 다공성 나노 입자이므로 넓은 표면적을 지니고 있어 가스들이 흡착이 되었을 시에는 전기적인 성질이 변화하므로 가스 센서의 재료로 연구가 되고 있다. 이러한 대표적인 연구로서 Varghese<sup>4)</sup>는 실리콘 기판(substrate)위에 다중벽 탄소나노튜브(multi wall carbon nanotube, MWCNT)를 성장시켜 센서 전극을 형성시킨 후에 가스와 증기에 의하여 CNT 전극의 전기적 임피던스 특성이 변화함을 보고하였다. CNT는 생물 화학적 센서의 전극으로 활용되어 선택적으로 생물학적 검출 대상(biological species)을 흡착하여 검출할 수도 있다.

위와 같은 연구들은 대부분 CNT입자들을 마이크로 이하의 스케일에서 센서로 사용하기 위한 연구들이거나, 센서의 핵심 부품인 CNT전극의 제작이 용이하지 못하여, 경제적인 대량 생산 및 저렴한 제작 비용을 필요로 하는 공학 및 상업용 센서의 개발에는 제한적인 한계성을 내포하고 있다. 따라서 본 논문에서는 센서로서 우수한 특성을 지니고 있는 CNT를 공학적인 응용이 수월하도록 간단하며 경제적인 제작 방법을 연구하였다. 이를 위하여 본 논문에서는, 저자에 의하여 개발된 CNT 스마트 복합 재료와 이를 이용하여 제작된 센서 연구에 기초하여<sup>7, 8, 11)</sup>, 센서의 전기적 임피던스 변화 측정을 이용한 측정법을 연구하고 이를 구조물의 건전성 감시(structural health monitoring)에 적용하는 기초 연구를 하였다.

## 2. CNT 스마트 복합소재를 이용한 센서 제작

CNT의 응용 연구에 있어서 이들이 지니고 있는 나노 스케일에서의 우수한 성질을 매크로 스케일에서도 구현하기 위한 벌크 재료(bulk material)의 개발 연구도 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 나노 크기의 입자 형태로 존재하는 CNT를 공학적 응용이 용이한 복합 재료형태의 스마트 벌크 재료(smart bulk material)로 개발 한 후에 이를 센서 전극 재료로 활용하여 새로운 센서를 제작하였다.

대표적인 CNT 벌크 재료인 버키 페이퍼(bucky paper)는 분자간의 결합력인 반데르 발스(Van der Waals) 힘에만 의존하여 SWCNT간의 엉킴으로만 이루어진 박막 형태이므로 그의 강도가 미약하여 이용에 큰 한계가 있다. 이와는 달리 CNT를 기판 위에서 수직 방향으로 곧게 성장시켜 수 mm 길이 이상의 정렬된 MWCNT성장 방법은 CNT가 지닌 나노 재료의 특성을 매크로 스케일에서 충실히 구현하여 벌크 재료화 시킬 수 있다는 기대를 모으고 있다.<sup>5)</sup> 정렬된 MWCNT를 수직으로 성장시키는 방법 이외에도 최근에는 MWCNT 보다 재료적인 성질이 우수한 SWCNT를 순수하게 벌크 재료화 시키는 연구 역시 보고 되었다<sup>6)</sup>. 이 연구에서는 SWCNT를 강한 용매를 이용하여 분산 시킨 후 전통적인 방적법(spinning)에 의해 로프로 자아내어, 케블라(kevlar) 보다 수십 배 뛰어난 강도를 지닌 벌크 섬유를 개발하였다. 그러나 이들 방법은 100% CNT를 이용하거나 그 제조 방법이 고가 이므로 공학적인 응용에 현재까지는 어렵다고 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 경제적인 벌크 재료의 개발을 위하여 CNT 입자를 충전재(filler)로 활용하여 기저(matrix) 고분자 재료와 혼합된 복합 재료형태인 스마트 벌크 재료(smart bulk material)를 개발 하였다.<sup>7)</sup> 이 복합소재가 나노 재료의 특성을 잘 반영하기 위해서는 기저 재료 내에 CNT가 고르게 분포하여야 한다. 그러나 분말의 형태로 존재하는 일반적인 CNT는 반데르 발스 힘으로 서로 뭉쳐져서 존재하고 있으므로, 이를 충전재로 이용하기 위한 분산(dispersion)처리를 한다. 나노튜브와 기저재료간의 결합문제는 나노 복합재료의 기계적 및 전기적인 성질에 큰 영향을 미치고 있으나, 그 메커니즘에는 이종 재료간의 교합(interface) 문제 등과 같은 복잡한 결합 특성들이 존재하므로 이들에 대한 상세한

특성에 대해서는 나노 복합재료학 분야의 별도 연구가 요구된다.

복합재료에 의한 나노센서 전극의 제작방법은 나노소재의 분산, 혼합 및 curing과 같은 복잡한 공정이 요구 되지만, CNT의 화학적 기능성(functionalization), 도핑(doping) 및 혼합 재료의 특성화에 의하여 전극의 성질과 감도 특성을 조절하여 자유롭게 설계 제작 할 수 있다<sup>8)</sup>. 또한 제작 방법에 있어서 분무식, 필름형의 박막, 스크린 프린팅에 의한 인쇄, 잉크젯 분사 방식 등 다양한 제조 방법으로 전극을 제작할 수 있어 대량 생산 방법에 적합하다고 할 수 있다. 특히, 대형 구조물의 상태 감시와 같이 넓은 영역에서 발생하는 스트레인을 측정하기 위해서는 섬유 형태와 같이 길게 제작할 수 있으며 접합부나 용접부와 같은 복잡한 형상의 부위에도 분무를 통하여 센서를 부착할 수 있는 등 부착 단면과 용도에 적합한 형상으로 자유롭게 제작 가능하다. 그러나 이들 센서재료를 개발하기 위한 나노 복합재료 공정은 아직까지 나노 재료의 특성에 기인한 여러 문제점을 내포하고 있으므로, 재료의 안정화 문제는 극복 되어야 할 가장 큰 문제로 남아있다. 다음 Fig.1은 MWCNT를 고분자인 재료인 폴리메타크릴산메틸(polymethyl methacrylate, PMMA) 과 혼합하여 분무식 형태와 필름 형태로 제작한 CNT 복합소재 전극의 제조 공정과 제작 예를 도시하였다. 본 연구에서는 NanoLab 사의 SWCNT와 MWCNT를 디메틸 포르마미드(dimethyl formamide, DMF) 용액에 초음파 분쇄기를 이용하여 분산시킨 후에, PMMA와 혼합하여 나노 스마트 복합재료를 제작하였다.

### 3. 전기적 임피던스 변화에 의한 센싱 특성

#### 3.1 임피던스 센싱 모델과 특성

나노소재의 공학적 응용을 위해서는 이들의 합성이나, 앞서 기술한 복합 소재 개발과 같은 공정 기술의 개발뿐만 아니라 이를 활용한 2차 제품의 개발과 같은 응용 기술에 대한 연구 역시 중요하다. 따라서 본 장에서는 CNT 스마트 복합소재를 이용하여 제작한 새로운 구조물 건전성 감시용 나노센서의 센싱 특성을 연구하였다. CNT를 센서로 활용한 기존 연구 중에서 AFM 이나 라만 분광법과 같은 측정 방법은 경제적이며 간단한 측정의 원리가 요구되는 공학 현장에서 사용되기에는 제한적인 문

제점을 지니고 있다. CNT를 공학적으로 쉽게 응용할 수 있는 센서로 개발하기 위해서는 이들의 센싱 특성을 쉽게 이용할 수 있는 측정 방법이 연구가 되어야 한다. 그러므로 본 논문에서는 CNT 스마트 복합소재가 지니고 있는 전기적 임피던스 성분인 저항 (R)과 정전용량(capacitance, C) 의 변화에 의한 센싱 방법을 구조물의 건전성 감시에 적용하여 연구하였다. CNT 복합소재의 전기적 재료특성은 나노 재료의 특성분석에 널리 활용되는 전기 화학적 임피던스 분석(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)에 의하여 알 수 있다. 본 분석

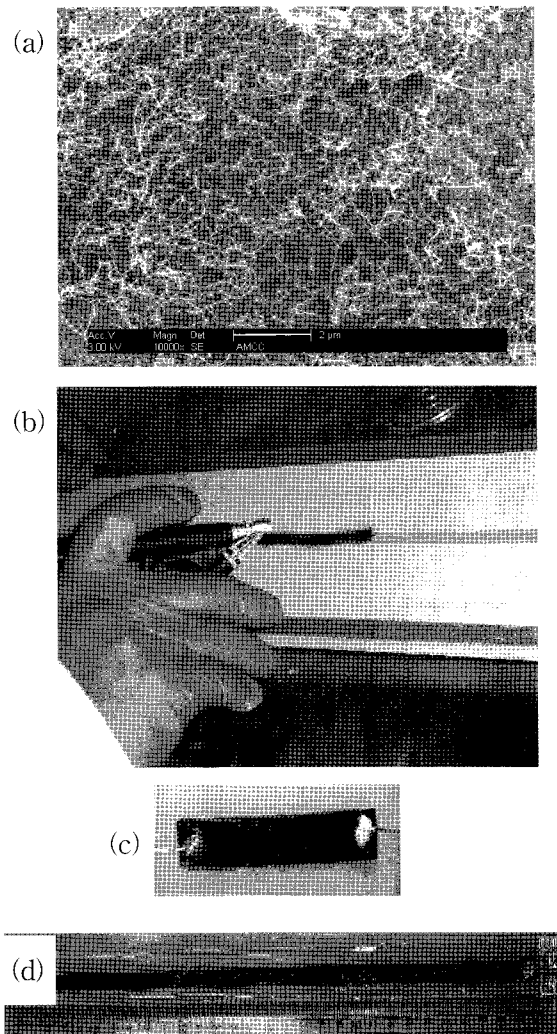


Fig. 1 Fabrication of CNT/PMMA composite electrodes (a) SEM images of multi-wall carbon nanotube (MWCNT)/PMMA (20 wt %) sample at 1000x; (b) spray fabrication on a patterned bar (c) SWCNT/PMMA electrode (5 wt %, 5 x 30 x 0.3mm, resistivity = 58 cm/S); and (d) fabricated MWCNT/PMMA structural sensor sprayed on a glass fiber beam (5 wt % MWCNT, 330 x 5 x 0.08 mm, R=117.03 k , C=14.7 pF)

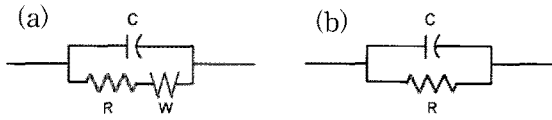


Fig. 2 Equivalent electrical model of CNT composite electrode based on EIS test; (a) equivalent electrical model of a 10% (wt.) CNT/PMMA composite; and (b) simplified electrical model of CNT composite sensor

### 3.2 스트레인 센싱 특성

CNT 스마트 복합소재는 전왜성(piezoresistivity)을 지니며, 이 성질을 이용하여 스트레인과 하중을 측정할 수 있다. Fig. 3에는 CNT 스마트 복합소재로 제작된 센서를 이용하여 정적 하중과 동적 변형을 센서의 임피던스 성분 중 저항의 변화만을 이용하여 각각 측정한 예를 도시하였다. Fig. 3(a)는 센서를 이용한 정적 하중 측정 실험으로서 외팔보에 정적인 하중을 가한 후에 이를 제거 하였을 때 센서의 응답을 전압 변화로 환산하여 측정한 예이다<sup>11)</sup>. Fig. 3(b)은 센서의 동적 스트레인 측정 실험으로서 외팔보에 초기 변형을 준 후 자유 진동하는 동적 변형을 CNT스트레인 센서의 저항 변화와 별개의 비접촉식 레이저 변위계(Keyence, LC-2400)를 이용하여 동시에 비교 측정한 결과이다<sup>8)</sup>. 이와 같이 구조물에 작용하는 하중이나 변형은 CNT 복합소재 센서 내부의 전왜성에 의하여 저항 변화로 나타나게 된다. 이 미세한 저항 변화는 기존의 스트레인 게이지를 이용한 계측방법과 동일한 방법으로 측정이 될 수 있다. 본 실험에서는 센서의 저항 변화를 휘스톤 브리지에서 출력되는 미세 전압 차이로 변화시킨 후, 이를 게인(gain) 20dB의 증폭기로 증폭

한 후에 그 증폭된 신호를 저주파 필터(low pass filter)를 통과 시켜 잡음(noise)을 제거 하여 측정하였다. 스트레인 측정 시에 센서 임피던스 성분 중 정전용량의 변화는 극히 미비하게 측정이 되었다. 따라서 구조물의 변형이나 하중은 CNT 복합소재의 전왜성을 이용하여 측정을 할 수 있으며, 이러한 물리량은 센서의 전기적 임피던스 성분 중에서 저항의 변화를 휘스톤 브리지를 구성하여 전압의 변화로 측정을 할 수 있다. 전기전도성을 지닌 충전제를 포함하는 전도성 복합소재나 고분자는 전왜성을 지닐 수 있으며 이러한 전왜성을 이용하여 변형을 측정하는 센서들이 연구 되어 왔다. 이들 연구에서는 카본 블랙<sup>12)</sup>, 카본 파이버<sup>13)</sup>, 도핑된 아세틸렌 폴리머(doped acetylene polymer)<sup>14)</sup> 등 나노 전도성 입자인 CNT 보다는 입자의 크기가 큰 전도성 분말을 충전제로 인용한 전도성 고분자를 이용을 하고 있어, 나노 입자의 전왜성에 비하여 선형성이 떨어짐이 관찰이 된다. 따라서 전도성 복합재료의 전왜성을 이용한 변형 측정 센서의 재료 개발에 있어서, 나노 입자를 이용한 전왜성 복합재료는 마이크로 크기를 지닌 충전제를 이용한 복합재료에 비하여 우수한 변위 측정의 선형성을 지니고 있다고 사료된다.

### 3.3 크랙 센싱 특성

구조물에서 발생하는 크랙의 발생 여부와 그 진행도를 CNT 복합 소재 센서의 전기적 임피던스 변화를 이용하여 측정을 할 수 있다. Fig. 4는 구조물에 크랙(crack)이 전파 될 때에 장착된 CNT 전극을

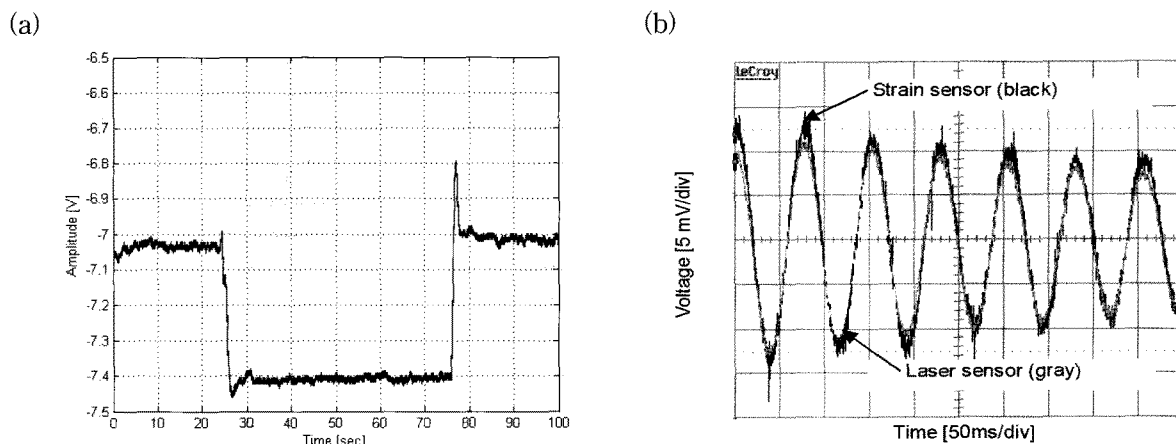


Fig. 3 Electrical impedance variations of CNT composite sensor in the case of structural health monitoring (a) static (DC) response of the sensor under 0.208Kg static load and (b) dynamic strain response of the SWCNT/PMMA 10% strain sensor in free vibration beam (cutoff frequency 30Hz, gain:20 dB)

지나가며 파손을 시킬 때의 임피던스 성분의 변화 비율을 측정된 결과이다<sup>11)</sup>. 본 실험에서는 크랙의 전파를 모사하기 위하여 보의 종 방향을 따라 설치 가 되어 있는 센서를 횡 방향으로 인위적으로 절개 하며 이때 발생하는 센서의 전기적 임피던스의 변화를 측정하였다. 여기서 normalized crack propagation은 센서 적극의 폭을 기준으로 하여 환산한 크랙의 길이 비를 의미하며, 100%는 크랙이 센서를 횡 방향으로 관통하여 전극이 끊어진 상황이다.

대상 구조물에 크랙이 발생할 경우에 이것이 성장하여 구조물을 통하여 전파된다. 이와 같은 경우에 본 센서를 대상 구조물에 높은 밀도로 배치할 시킨다면, 전파되는 크랙이 특정 센서에 도달하여 이를 손상 시킬 수 있을 것이다. 따라서 크랙이 계속하여 진전될 경우에 그 센서의 전극부는 크랙으로 인하여 점차 손상되어 저항과 정전 용량의 변화를 가져오게 된다. 그리고 크랙이 전극을 완전히 통과하고 난 후에는 그 전극이 끊어지게 되어 저항은 무한대로 증가된다. 반면에 전극의 정전용량 값은 전극의 폭과 단면 감소로 인하여 점차 줄어들다가 크랙이 완전히 센서를 관통한 후에는 전극의 파손으로 정전용량이 0이 된다. 센서의 임피던스 값들은 구조물이 크랙 발생 이전의 건전한 상태에 장착 되었을 경우 보다는 저항이 증가함과 동시에 정전 용량이 줄어들게 된다. 이러한 전기적 임피던스의 변화는 휘스톤 브리지로 구성된 측정 시스템의 전기적 응답 신호의 크기와 위상 변화차이로 이용하여 크랙 발생과 진전 상황을 측정할 수 있다.

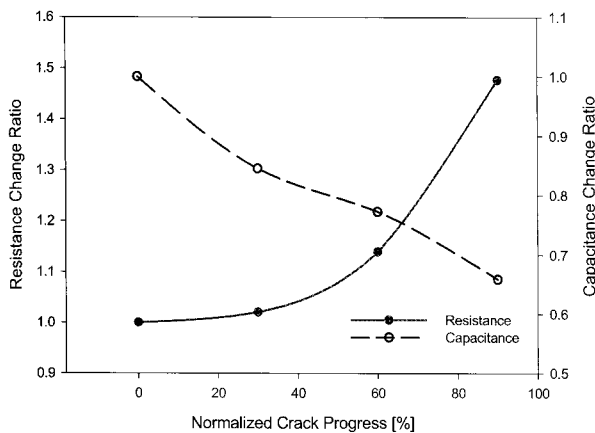


Fig. 4 Electrical impedance variations of CNT composite sensor under crack progression in the case of structural health monitoring

### 3.4 화학적 오염도 센싱 특성

CNT는 미세한 다공질의 넓은 표면적을 지닌 소재이므로, 뛰어난 이온과 가스의 흡착 물질로 연구가 되고 있다<sup>15)</sup>. 이와 같은 연구에 기인하여 CNT 복합 소재를 부식 등과 같은 재료의 화학적인 변화나 오염 등을 측정하는 센서로 활용하기 위한 기초 실험을 수행하였다. Fig. 5는 CNT 복합소재 센서 전극의 표면에 화학적 버퍼 용액 (chemical buffer solution, Fisher Scientific SB10840)을 떨어뜨린 후에 임피던스 성분을 측정된 결과이다<sup>11)</sup>. Ph 7.00의 0.005 몰랄(molar)의 인산염의 버퍼용액 (potassium phosphate monobasic-sodium hydroxide)을 센서의 표면에 0.8ul/mm<sup>2</sup>을 떨어 뜨려 완전히 흡수가 된 후에, 저항과 정전 용량의 변화를 고정된 주파수에서 멀티미터(multi-meter)를 이용하여 측정하였다. 여기서 오염율이란 센서의 면적 대 버퍼 용액을 떨어뜨린 면적의비율을 의미한다. 버퍼 용액을 떨어뜨린 후에, 센서의 정전 용량 값은 급격히 변화하다 포화되는 경향을 보였다. 이때에 전기 저항 역시 5% 정도의 변화를 보였다. 이는 버퍼 용액의 이온들이 다공질의 넓은 표면적을 지닌 CNT 복합소재의 표면에 흡착되어 확산 층 (diffusion layer)에 의한 효과로 그 임피던스의 변화를 일으켰다고 추정된다. 이와 같이 재료에 발생하는 부식이나 화학적인 변화를 CNT 복합소재의 화학적 흡착성과 이로 인한 전기적 임피던스의 측정에 의하여 측정할 수 있을 것으로 기대가 된다. CNT 복합소재 센서는 장착된 구조물에서 발생하는 물리적 및 화학적 변화량을 전극의 전기적 임피던스의 변화량을 효과적으로 측정하여 구조물의 건전성 감시용 센서로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

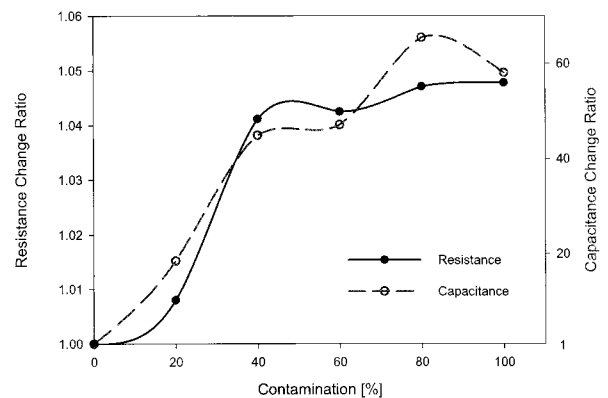


Fig. 5 Electrical impedance variations of CNT composite sensor under chemical contamination (5 wt % MWNT/PMMA, 60 x 5 x 0.08 mm, R=117.0 K, C=19.1 pF)

Table 1 Electrical Parameter Change Ratio of the CNT Composite Sensor

	Resistance (R)		Capacitance (C)		Output Voltage (V)		Development [%]
	trend	$\Delta R$	trend	$\Delta C$	trend	$\Delta V$	
Strain	↓	1.0015	↔	1	↓	7.8E-4	0.13
Crack	↑	1.48	↓	-0.66	↑	0.24	80
Corrosion	↑	1.053	↑	60	↑	0.025	100

표 1은 스트레인, 크랙과 화학적 오염도에 따라서 CNT 복합소재 센서의 임피던스 특성이 전기적 임피던스 변화 특성이 측정하고자 하는 물리적 및 화학적 영향에 의하여 다르게 변화하는 경향을 보이므로, 이러한 특성을 활용한다면 한 개의 센서가 간단한 전기적 회로를 이용하여 구조물에 발생하는 스트레인, 크랙 및 부식을 동시에 검출할 수 있는 다기능성 센서(multi-functional sensor)의 개발을 가능하게 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 나노 스마트 복합 소재(nano smart composite)로 제작된 센서의 전기적 임피던스(electrical impedance) 변화에 의한 측정 특성을 연구하여 구조물의 건전성 감시에 적용 가능성을 제시하였다. 센서는 폴리머를 기저재료(matrix)로 사용하여 나노 입자인 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNT)를 벌크(bulk) 재료화 시켜 제작을 하였다. 그리고 이 센서를 외팔보에 장착을 한 후 스트레인(strain), 크랙(crack) 및 화학적 오염도 측정 실험을 통하여 구조물에서 발생할 수 있는 물리적 및 화학적 검출 대상들을 계측이 쉽고 경제적으로 검출하기 위한 센서의 전기적 임피던스 특성 변화를 고찰하였다.

CNT 스마트 복합소재 센서는 저항(R)과 축전기(C)의 병렬 조합 형태인 전기적 상사 모델로 전기적 임피던스 특성이 모델링 될 수 있으며, 각각의 전기적 임피던스 성분들인 R-C가 구조물의 검출 대상에 따라 달리 변화하는 특성을 보였다. 구조물의 정적 하중 측정 시에는 센서의 전왜성에 의하여 저항 성분만이 변화를 보이고 있으므로 휘스톤 브리지를 통한 전압의 변화로 측정을 할 수 있다. 크랙의 거동은 CNT 전극의 손상을 이용하여 임피던스의 저항 값 증대와 정전용량 감소 경향으로 측정

을 할 수 있었다. 부식과 같은 화학적 변화는 전극에 도핑 효과를 유도하여 오염 정도에 따른 저항과 정전용량의 증가를 발생 시켰다. 이러한 전기적 임피던스 성분의 서로 다른 변화 특성을 활용한다면 한 개의 동일 센서가 동시에 여러 물리적 및 화학적 변화량을 간단한 전기적 회로를 이용하여 검출할 수 있는 다기능성 센서(multi-functional sensor)의 개발을 가능하게 할 수 있다.

CNT 스마트 복합소재 센서는 제작 방법에 있어서 분무식, 필름형의 박막, 스크린 프린팅에 의한 인쇄, 잉크 젯 분사 방식 등과 같은 다양한 방법으로 제작할 수 있어 대량 생산 방법에 적합 할 수 있다. 또한, 구조물의 건전성 감시에 있어서 접합부나 용접부와 같은 복잡한 형상의 부위에도 분무를 통하여 센서를 부착할 수 있는 등 부착 단면과 용도에 적합한 형상으로 자유롭게 제작 가능한 장점이 있다. 그러나 이들 센서재료를 개발하기 위한 나노 복합재료 공정은 아직까지 나노 재료의 특성에 기인한 여러 문제점을 내포하고 있으므로, 재료의 안정화 문제는 극복 되어야 할 가장 큰 문제로 남아있다.

향후에는 CNT를 화학적 기능화 처리를 통하여 특정 화학 검출 대상 물질들만 선택적으로 도핑 될 수 있는 특성 및 이러한 반응을 통하여 센서 전극의 전기적 임피던스가 변화하는 특성을 이용한 CNT 스마트 복합소재 전극의 개발 연구를 진행 할 계획이다.

#### 참고 문헌

1. S. Iijima, 1991, "Helical microtubules of graphitic carbon", Nature, Vol. 354, No. 56, pp. 56~58.
2. T. W. Tomblor et al., 2000, "Reversible electromechanical Characteristics of Carbon Nanotubes under Local-Probe Manipulation", Nature, Vol. 405, pp. 769~772.

3. J. R. Wood and H. D. Wagner, 2000, "Single-wall carbon Nanotube as molecular pressure sensors", Applied Physics Letters, Vol. 76, No. 20. pp. 2883~2885.
4. O. Varghese et al., 2001, "Gas sensing characteristics of multi-wall carbon nanotubes", Sensors and Actuators B, Vol. 81, pp. 32~41.
5. A. Melechko et al., 2005, "Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly", Journal of Applied Physics, Vol. 97, 041301-39.
6. L. Ericson et al., 2004, "Macroscopic, Neat, Single-Walled Carbon Nanotube Fibers", Science, Vol. 305, No. 3, pp. 1447~1450.
7. I. Kang et al., 2007, "DEVELOPING OF CARBON NANOTUBES COMPOSITE SMART MATERIALS", Solid State Phenomena, Vol. 119, pp. 207~210.
8. I. Kang et al., 2006, "A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring", Smart Materials and Structures, Vol. 15, No. 3, pp. 737~748.
9. N. Prokudina et al., 2000, "Carbon Nanotube RLC Circuits", Adv. Mater., Vol. 12, No. 19, pp. 1444~1447.
10. L. Valentini et al., 2004, "Dielectric behavior of epoxy matrix/single-walled carbon nanotube composites", Composites Science and Technology, Vol. 64, pp. 23~33.
11. I. Kang et al., 2007, "A Carbon Nanotube Smart Material for Structural Health Monitoring", Solid State Phenomena, Vol. 120, pp. 289~296.
12. J. S. Park, P. H. Kang and Y. C. Nho, 2003, "Characterization of Carbon Black Filled Polymer Composites for Strain Sensor", J. Ind. Eng. Chem., Vol. 9, No. 5, pp. 595~601.
13. X. Wang and D. D. L. Chung, 1995, "Short-carbon-fiber-reinforced epoxy as a piezoresistive strain sensor", Smart Materials and Structures, Vol. 4, pp. 363~367.
14. M. Rubner, 1987, "Measurement of Strain Employing A Piezoresistive Blend of a Doped Acetylene Polymer and an Elastomer", U.S. patent number 4708019.
15. P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami and A. Zettl, 2000, "Extreme. oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes", Science. Vol. 287, p. 1801.