

# Piezoresistive 고분자 나노복합재를 이용한 구조건전성 진단

## Structural Health Monitoring Using Piezoresistive Polymer Nanocomposites

박영빈† · Giang T. Pham\* · Ben Wang\*\*

Young-Bin Park, Giang T. Pham and Ben Wang

### 1. 서 론

항공기나 건축구조물의 구조건전성 진단은 최근 들어 급속도로 발전해온 분야이다. 구조건전성 진단은 구조물의 작동조건과 파손과 관련된 정보를 실시간으로 획득함으로써 조건에 따른 유지보수(condition-based maintenance)를 가능케 한다. 구조건전성 진단 시스템의 가장 중요한 요소는 센서 어레이 기술, 경량화, 소형화, 기존 onboard preprocessing unit과의 호환성, 작동 조건과 환경에 대한 견실성, 전자파 차폐성, 저전력, 정확성, 신뢰성 등이다.

탄소나노튜브 고분자 복합체는, 외력에 의한 변형에 따라 전기적 저항이 변화하는 piezoresistive 거동을 나타낸다. Piezoresistivity는 고분자 모재 내에서 탄소나노튜브가 형성하는 전기전도망(conductive network)의 변화에 의해서 발현된다. Piezoresistivity는 낮은 탄소나노튜브 함유량에서 더 현저하게 나타난다. 탄소섬유, 카본블랙 등 타 탄소 기반 소재에 비해 전기전도도와 길이 대 직경비(aspect ratio)가 월등히 우수하기 때문에, 낮은 탄소나노튜브의 함유량에서도 스트레인 센싱 시스템을 구현할 수 있다.

본 연구에서는, 구조물에 부착 또는 embed 시켜서 구조물의 건전성을 실시간을 진단할 수 있는 탄소나노튜브 고분자 복합체 기반 센싱 시스템을 개발하였다. 센서는 열가소성 수지와 다중벽 탄소나노튜브를 사용하여 필름 형태로 제조되었으며, 센싱 성능은 나노복합체를 구조물에 부착한 후 인장, 굽힘, 압축 등의 다양한 형태의 하중을 가하면서 평가하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 재료 및 시편 제작

본 연구에 사용된 다중벽 탄소나노튜브는 순도 95%이고, 내경 5-10 nm, 외경 60-100 nm, 그리고 길이가 각각 0-2  $\mu\text{m}$ , 0-500  $\mu\text{m}$ 인 두 종류였다. 고분자는 polymethylmethacrylate(PMMA)과 polycarbonate(PC)를 사용하였다.

탄소나노튜브 고분자 복합체는 용매 캐스팅과 압출을 통하여 제조되었다. 용매 캐스팅 방법은, 먼저 탄소나노튜브를 chloroform에 소니케이터(S-4000, Misonix)를 이용하여 분산시킨 후 필름의 형태로 캐스팅을 한 뒤 용매를 증발시킴으로써 생성하였다. 압출 방법은, 소형압출기(LE-075, Custom Scientific Instruments)에 고분자 분말-탄소나노튜브 혼합물을 투입한 후 로터가 가하는 전단력에 의하여 탄소나노튜브를 분산시켰다. 용매 캐스팅과 압출을 통해서 생성된 물질을 각각 열압 프레스(4386, Carver)를 이용하여 두께 127  $\mu\text{m}$ 의 나노복합체 필름을 제조하였다.

#### 2.2 나노복합체 물성 평가

나노복합체 필름의 스트레인 센싱 성능을 평가하기 위하여, 그림 1에서 보는 바와 같이, 필름을 만능재료시험기(Shimadzu AGS-J)에 장착한 후, 인장을 가하면서 in situ로 표면저항의 변화를 측정하였다. 전저항은 멀티미터(Keithley 2002, 6517A)와 two-probe method를 이용하여 측정하였다.

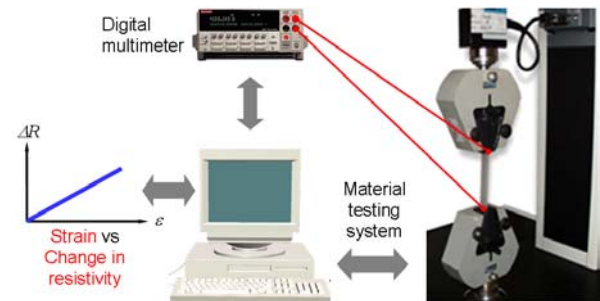


그림 1 Piezoresistive 나노복합체의 스트레인 센싱 실험 장치

실제 구조물에 부착되었을 때의 구조건전성 진단 성능을 평가하기 위하여, PMMA 또는 PC 판재에 thermal

† 교신저자; 울산과학기술대학교 기계신소재공학부  
E-mail : ypark@unist.ac.kr  
Tel : (052) 217-2314, Fax : (052) 217-2309

\* U.S. Naval Research Laboratory  
\*\* Florida State University 산업공학과

bonding을 이용하여 나노복합체 필름을 부착하였다. 나노복합체 필름이 부착된 PMMA 또는 PC 판재에 각각 인장과 굽힘을 가하여 나노복합체의 piezoresistivity를 측정하였다. 아울러, 두 개의 구리 박막 사이에 나노복합체 필름을 삽입한 후, 샌드위치 센서에 압력을 가하여 나노복합체의 압력센싱 가능성을 검증하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 변수에 따른 나노복합체의 Piezoresistivity

그림 2는 나노튜브의 길이와 제조공정에 따른 PMMA 및 PC 나노복합재료의 전기전도도 경향을 보여준다. 나노튜브의 길이는 2  $\mu\text{m}$ 와 500  $\mu\text{m}$  등 두 종류가 사용되었고, 제조공정은 용매를 사용하는 방법과 소형 압출기를 사용했다. 나노튜브의 길이가 길면, 전기전도도를 형성하기 용이한 반면, 분산이 어렵다는 단점이 있다. 아울러, melt polymer processing에 기반을 둔 압출 성형에 비해 용매를 사용하는 제조방법이 더 나음을 알 수 있다. 그림 7은 동적 반복하중을 가했을 때, 나노복합체 센서의 거동이 repeatable 함을 알 수 있다. 또 하나 중요한 발견은, 나노튜브 함량을 0.5 에서 10 wt% 까지 조절함으로써 무려 1,000배 이상 차이 나는 감도계수를 얻을 수 있다는 것이다. 이는, 나노튜브의 길이, 함량, 고분자의 종류, 제조공정 등을 조절함으로써 나노복합재료의 전기전도도를 tailor할 수 있음을 알 수 있다. 특히, 전기전도도가 급격히 상승하는 percolation threshold 부근에서 센서의 감도가 극대화 되는데, 이를 조절함으로써 센서의 특성을 변화시킬 수 있다.

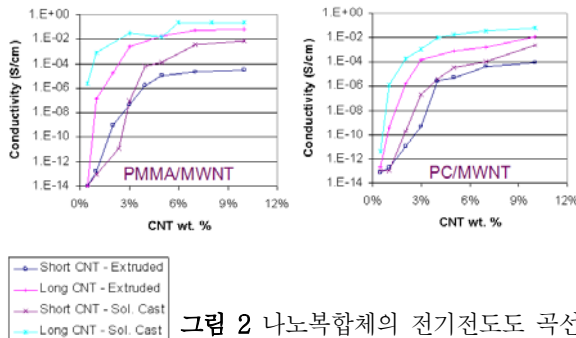


그림 2 나노복합체의 전기전도도 곡선

#### 3.2 나노복합체의 스트레인 센싱 성능 평가

10 wt.% 탄소나노튜브-PMMA 복합체 필름을 그림 3(a)와 같이 PMMA 판재에 부착한 후 판재에 인장을 가하며 전극 A, B, C 간의 저항의 변화를 측정하였다. (이 밖에도 다른 전극배치와 하중 조건에 대한 실험을 수행하였으나, 본 논문에는 포함시키지 않음.)

각 전극 간 저항이 동일한 하중에 대해서 상이하다는

것은 (그림 3(b)), 하중방향과 저항 측정방향의 상관관계에 따라 piezoresistivity가 다르게 거동함을 알 수 있다. 이는 동일한 대면적 필름을 사용하여 전극의 배치에 따라 사용자가 희망하는 방향의 스트레인을 측정할 수 있는 장점을 보여준다.

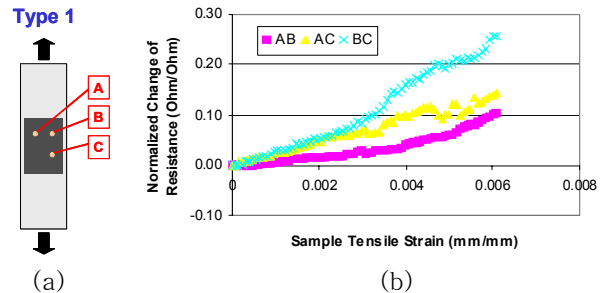


그림 3 PMMA/탄소나노튜브 복합체 필름의 구조 건전성진단 평가

나노복합체 필름의 압력 센싱 성능은, 반복 압축 하중을 가함으로써 측정하였다 (센서 직경: 7 mm, 하중: 0.5  $\leftrightarrow$  4.5 kN). 저항의 변화는 하중 곡선과 일치하였으며, PMMA-탄소나노튜브 및 PC-탄소나노튜브의 경우 감도계수가 각각 4.2, 5.5로 계산되었다.

### 4. 결 론

본 연구를 통하여, 탄소나노튜브 고분자 복합체의 piezoresistivity 성질을 이용하여 센싱 성능을 넓은 범위 내에서 조절 가능한 대면적 구조건전성진단 소재로 사용될 수 있음을 보였다. 감도계수는 1부터 1,000 단위까지 조절할 수 있어, 기존의 광섬유나 스트레인 게이지 보다 versatile한 센싱 소재로 적합하다고 판단된다. 향후 구조건전성 정보를 정확하고 효율적으로 획득하기 위하여 전극의 수량과 배치를 최적화하는 기술이 요구된다.

### 후 기

본 연구는 Florida State University High-Performance Materials Institute의 연구지원비에 의하여 연구 되었습니다.