

# 다기능성 탄소나노튜브 복합재의 스마트 응용

성대한, 정창윤, 황상하\*\*, 박영빈\*

(울산과학기술원 기계공학과)

## 1. 머리말

탄소나노튜브는 탄소 동소체로서 원통형의 외형을 가진 나노 구조체이다. 매우 높은 길이 지름비(aspect ratio)를 갖고 있으며, 기계적, 전기적, 열적 물성이 매우 좋고 이동성이 뛰어난 특성을 보인다. 이렇게 독특하고 월등한 특성 때문에 많은 연구가 진행되어 왔고, 자동차, 항공, 우주, 국방과 같은 대형 분야에서 전자, 전기 등의 국소 분야까지 적용 가능할 것으로 여겨진다.

탄소나노튜브 기반의 고분자 복합재는 가벼운 무게와 우수한 물성으로 보강재 역할 뿐만 아니라 정전기 방전 효과, 전자파 차폐 효과, 에너지 수확과 같은 추가적 기능에 대한 가능성 때문에 수많은 다기능성 응용 재료로 이용되어왔다. 스마트 응용 재료는 센싱과 구동 분야로 구분지어 질 수 있는데, 이 글에서는 주로 탄소나노튜브를 기반으로 한 고분자 복합재의 전기-기계적 센싱에 초점을 맞추었다.

## 2. 탄소나노튜브/고분자 복합재

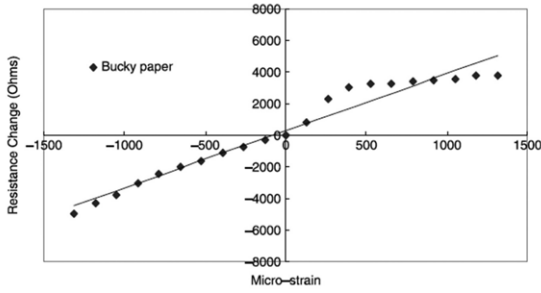
전기-기계적 감지 또는 구조건전성 모니터링은 전형적으로 고분자 안에 분산된 탄소나노튜브의 전기적 네트워크 형성에 따른 압전효과를 이용해왔다. 즉 외부 힘에 의한 발생하는 구조 변형이 전기적 저항 변화를 만들어내는 복합재 거동을

의미한다. 예를 들어 탄소나노튜브/고분자 복합재가 인장력을 받을 때 탄소나노튜브에 의해 만들어진 전기적 네트워크가 깨지면서 저항이 증가한다. 이러한 외력에 의한 저항의 변화는 탄소나노튜브들 간의 접촉 및 터널링(tunneling) 효과 때문이다. 탄소나노튜브의 전기적 네트워크 형성을 이용한 초기의 압전 연구는 free-standing 필름 형태인 "buckypaper"를 중심으로 행해졌다. Buckypaper는 일반적으로 여과과정으로 만들어 지는데, 먼저 탄소나노튜브가 용매에 분산된 다음 여과종이를 통과한 후 다양한 종류의 기질(matrix)을 함침시켜 고품량의 탄소나노튜브를 갖는 복합재를 제조한다. 이 기질에 인장 또는 굴곡하중이 가해질 때 탄소나노튜브 박판에 설치된 두 전극 사이의 저항이 실시간으로 측정된다. 대부분의 이런 연구는 등방성이며 무작위 방향의 탄소나노튜브의 전도성 네트워크를 변화를 활용하는데 일반적으로 인장에서는 저항이 증가하며 압축에서는 저항이 감소한다. 다양한 목적과 사용 용도에 맞게 탄소나노튜브를 여러 가지 매트릭스(열가소성·열경화성 고분자 수지, 탄성고분자, 콘크리트 등)와 조합하여 나노복합체의 압전효과를 극대화 하였다.

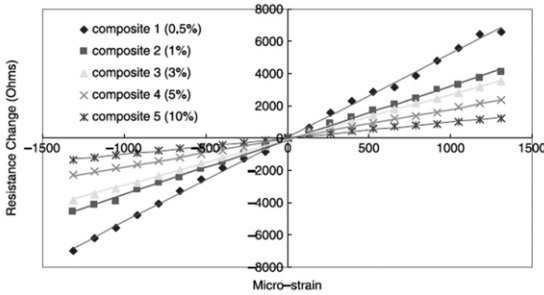
### 2.1 열가소성 기반 나노복합재

신시내티대학교의 연구그룹에서 buckypaper와 단일벽 탄소나노튜브/PMMA복합체를 이용한 변

\* E-mail : ypark@unist.ac.kr, \*\* Currently at Georgia Tech, U.S.A.



(a)



(b)

그림 1 변형에 따른 압전 반응: (a) buckypaper; (b) 단일벽 탄소나노튜브/PMMA 복합재

형감지를 위한 포괄적인 연구를 진행하였다.

그림 1(a)는 단일벽 탄소나노튜브 buckypaper 감지기가 급힘 변형에 대한 매우 높은 민감도를 보여준다. 하지만 500 마이크로 변형이상에서 민감도가 포화된다. 이것은 탄소나노튜브 계면에서 약한 van der Waals 작용으로 인해 탄소나노튜브 다발 내에서 탄소나노튜브간 미끄러짐이 일어나기 때문이다. 단일벽 탄소나노튜브 buckypaper가 압축될 때 각각의 탄소나노튜브는 인장처럼 많은 미끄러짐이 일어나지 않는다. 그러므로 민감도 포화가 인장 대비 적게 일어난다. 그림 1(b)는 탄소나노튜브 질량 비율에 따른 변형 민감도를 보여준다. 복합재 변형감지기는 buckypaper와 비교하여 낮은 민감도를 보여주지만, 인장과 압축 두 경우 모두 buckypaper와 다른 대칭적인 변형반응을 보인다. 이러한 결과는 탄소나노튜브와 고분자 사이의 강한 계면 결합이나 나노튜브-고분자간 상호작용을 활발하게 하여 (하중 전달 등) 감지기의 변형 범위를 늘려주는

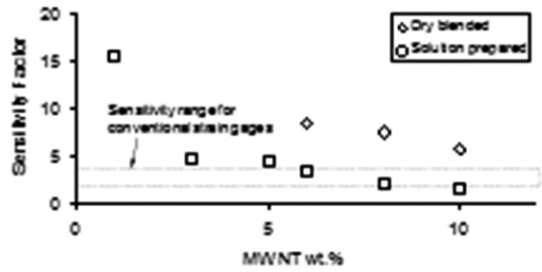


그림 2 다중벽 탄소나노튜브/PMMA 필름과 기존 변형 감지기의 민감도 비교

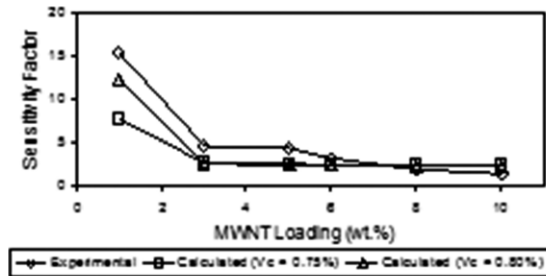


그림 3 다중벽탄소나노튜브/PMMA 민감도의 실험 및 계산 값 비교

효과가 있다.

Pham 등은 다중벽 탄소나노튜브를 이용한 고분자 복합재 필름을 이용한 맞춤형 민감도를 가진 변형감지기 개발 하였다. 다중벽 탄소나노튜브/고분자 복합재가 인장 하중을 받을 때 전기 저항을 측정하였고, 넓은 범위에 조정 가능한 민감도를 가진 변형감지기로의 잠재적 응용가능성이 조사되었다. 필름의 표면저항은 인장력이 증가함에 따라 함께 증가하는데 이는 전도성 네트워크의 감소와 변형에 따른 탄소나노튜브간 거리의 증가 때문이다. 이 연구에서 측정된 가장 높은 민감도는 기존 변형에 대한 전기 민감도의 10 배 이상 더 민감하다(그림 2). 복합재에 가해진 변형과 민감도 사이의 관계를 확인하기 위하여 퍼콜레이션 이론에 기반을 둔 반 경험적 모델을 개발하였다(그림 3).

Zhang 등은 폴리카보네이트 고분자와 다중벽 탄소나노튜브 복합재를 이용하여 다이내믹한 변형에 따른 저항변화와 전형적인 변형 감지기의 3.5배의 민감도를 가진 변형 감지기로서의 연구를 제시하였다. Billoti 등은 다중벽 탄소 나노

튜브가 코딩된 열가소성 수지 폴리 우레탄 섬유를 압출을 통해 제조하여 조절 가능한 전기 전도도에 관한 연구를 제시하였다. Abraham 등은 탄소나노튜브와 폴리머 기재로서 PMMA를 이용하여 착용가능하고 건강 진단에 응용 가능한 유연한 변형 감지기를 개발하였다. 이런 변형 감지기는 건강 진단에 필요한 생명신호인 호흡 리듬을 측정하는데 사용될 수 있다.

변형 감지를 포함하여 다양한 스마트 응용을 위해서 압전 고분자(PVDF)에 탄소나노튜브가 더해졌다. Deshmukh 등은 압전 고분자에 미량의 탄소나노튜브를 더함으로서 실험을 통해 전기 변형 반응의 증거를 제시하였다. 이는 탄소나노튜브와 같은 미량의 전도성 나노분자를 더함으로서 나노복합재의 압전 민감도를 극적으로 강화한다는 것을 시사한다. Kim 등의 연구에 따르면 압전 고분자(PVDF)의 특성을 강화하기 위해서 압전 고분자(PVDF)기지에 탄소나노튜브를 첨가 하였다. 응용 압축법과 용매 증발탈수법을 이용하여 탄소나노튜브/PVDF 복합재를 제조하였다. PVDF 기지에 탄소나노튜브의 첨가는 낮은 전압으로 복합재의 반영구적인 압전효과를 유도할 수 있는 압전 고분자의 유전 성질을 조절할 수 있게 하였다. 탄소나노튜브가 첨가된 압전 고분자 복합재와 순수한 압전 고분자 필름의 전압 생성을 비교하기 위한 외팔보 실험도 시행되었다.

## 2.2 열경화성 기반 나노복합재

나노복합재의 변형 감지를 위해 기지로 주로 사용되는 수지로는 에폭시, 비닐 에스터, 폴리이미드 등이 있는데 이 중에도 에폭시가 가장 일반적이다. Wichmann 등의 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브와 카본 블랙 기반의 전기 전도성 에폭시 나노고분자가 전기전도도 방법을 통한 변형 감지 응용 분야에의 가능성과 관련하여 연구되었다. 나노 복합재는 탄성 변형 구간 내에서 변형 거동 대비 뚜렷한 저항변화를 보였는데, 이는 절연체와 도체 복합재에서의 전하 운반자 수송 메

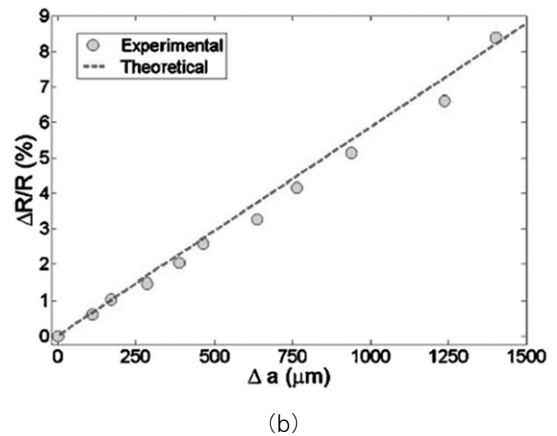
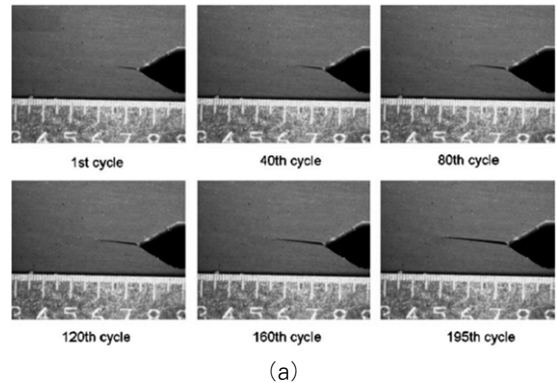


그림 4 실시간 피로 파괴 균열의 성장 감지: (a) 피로 파괴 균열 성장 사진; (b) 균열 계면에서의 전기 저항 변화

커니즘에 대한 잘 알려진 이론과 일치한다. 분석적인 모델을 적용하여, 나노복합재의 압전 효과가 전도도 네트워크 구조와 나노복합재 내에서 일어나는 전하 운반자의 수송 메커니즘에 대한 유용한 정보에 기여할 수도 있다는 것을 보였다. 또한 재료 내의 전기전도도 경사도를 발생시킴으로써 다중벽 탄소나노튜브와 에폭시 복합재의 단일 블록으로 구성되어있는 방향 감지 굽힘 변형 센서를 개발하였다.

Zhang 등은 에폭시에 함침된 다중벽 탄소나노튜브를 통해 간단하고 효과적인 실시간 진단 및 재생 기술을 발표하였다. 재료의 내부와 두께방향으로의 저항을 관찰함으로써 응력 집중 부근의 균열과 층간 분리 같은 피로 파괴로부터 유도된 손상의 규모 및 전파를 판단할 수 있다. 전도

성의 나노튜브 연결망은 균열 접촉부의 고속 가열이 가능케 함으로써 손상을 복구할 수 있는 역할을 부여하였고, 손상되지 않은 복합재 강도의 70%까지 복원 가능함을 보였다.

탄소나노튜브와 에폭시 복합재의 준정적 및 동적 변형 감지가 Anand와 Mahapatra에 의해 연구되었고 de la Vega 등은 다양한 정도의 표면 변형에 노출된 나노 복합재 시편의 라만 분광법과 전기적 측정을 동시에 수행하여 단일벽 탄소나노튜브와 에폭시 복합재의 국지 및 전체의 응력 반응을 특징지었다. 복합재의 라만 G밴드 공명 진동수와 전기적 저항은 변곡점이 1.5%의 변형률에 도달할 때까지 변형률에 따라 단조적인 변화를 보였다.

Thostenson 등은 비닐에스터 수지의 스티렌 단량체의 휘발성과 관련한 공정 문제를 해결하기 위해 에폭시 수지로부터 비닐에스터 단량체를 합성하였다. 비닐에스터 단량체 내에서 다중벽 탄소나노튜브 분산과 나노튜브, 비닐에스터 복합재의 연속적인 공정을 위해 캘린더링이 적용되었다. 탄소나노튜브의 높은 길이 지름비는 공정 중 유지되었고 비닐에스터 내 탄소나노튜브의 함량을 0.1 wt.% 이하에서 전기적 퍼콜레이션 한계점이 형성되는 것을 보여주었다. 퍼콜레이션 한계점의 전/후 구간에서 폴리이미드 나노 복합재의 향상된 압전 감지 효과에의 단일벽 탄소나노튜브의 영향에 관한 체계적인 연구가 Kang 등에 의해 수행되었다. 퍼콜레이션 한계점 농도(0.05% 무게비)를 넘은 지점에 형성된 최대 압전 응력계수는 금속 압전 재료 대비 100배(2 orders of magnitude) 이상의 높은 수치를 보였다.

### 2.3 탄성 중합체 기반 나노복합재

Hwang 등은 전도성 충전제로서 다중벽 탄소나노튜브와 폴리머 기지로서 polydimethylsiloxane(PDMS)를 이용하여 압전 복합재를 제작하였고, 이는 손가락 움직임 감지를 위해 필요한 정도의 극도로 작은 압력에서도 운용될 수 있다. PDMS내의 다중벽 탄소나노튜브의 균

일 분산을 위하여, 다중벽 탄소나노튜브를 poly(3-hexylthiophene) (P3HT)를 이용한 폴리머 래핑 방법으로 개선하였다. P3HT에 의해 복합재의 퍼콜레이션 한계점은 눈에 띄게 감소하였다. 복합재의 전기전도도와 압전 민감도는 P3HT의 농도와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 잘 분산된 P3HT-다중벽 탄소나노튜브, PDMS의 복합재는 0 MPa ~ 0.12 MPa의 압력 범위에서 좋은 압전 특성을 보였다.

Wang 등은 단축 압축 조건 하에서 다중벽 탄소나노튜브를 함유한 실리콘 고무 복합재의 압전 효과를 연구하였다. 그 실험 결과는 다중벽 탄소나노튜브의 카르복실 라디칼이 균일한 분산과 복합재 내에서 전도 경로의 배향을 효과적으로 향상시킬 수 있다는 것을 보여주었다. 결과적으로 복합재는 향상된 민감도와 압력 감지의 선형 변화에 관련해 긍정적 변화를 보였는데, 이 두 가지 변수는 센서 응용 분야에 있어 핵심 변수로 작용된다. 다중벽 탄소나노튜브를 포함한 ethylene-propylene-diene-monomer (EPDM) 기반의 탄성 중합 복합재는 순수 EPDM 기지에 비해 향상된 기계적 물성을 보였다. 10%의 변형률까지 전도도와 변형 사이의 선형 관계를 보였고, 이 재료는 변형률 또는 압력 센서로서 적용 가능하다. 이러한 선형적 관계가 가역 관계인지를 확인하기 위해 반복 실험을 실행하였는데, 이는 센서 재료로서 상당히 중요한 특성이다.

길이 지름비가 50, 500으로 다른 두 가지의 다중벽 탄소나노튜브를 고무 기지에 균일하게 분산시킴으로써 높은 민감도와 선형 압전 거동을 보이는 고탄성의 탄소나노튜브-methylvinyl silicone rubber(VMQ) 나노 복합재가 제작되었다. 길이 지름비가 50인 다중벽 탄소나노튜브 복합재의 퍼콜레이션 한계점은 길이 지름비가 500인 탄소나노튜브의 한계점 보다 아주 낮은 것을 보여주었다. 또한 길이 지름비가 50인 탄소나노튜브의 MWCNT/VMQ 복합재가 상대적으로 작은 하중에서 높은 민감도와 우수한 저압 반복 압축 특성을 보였다.

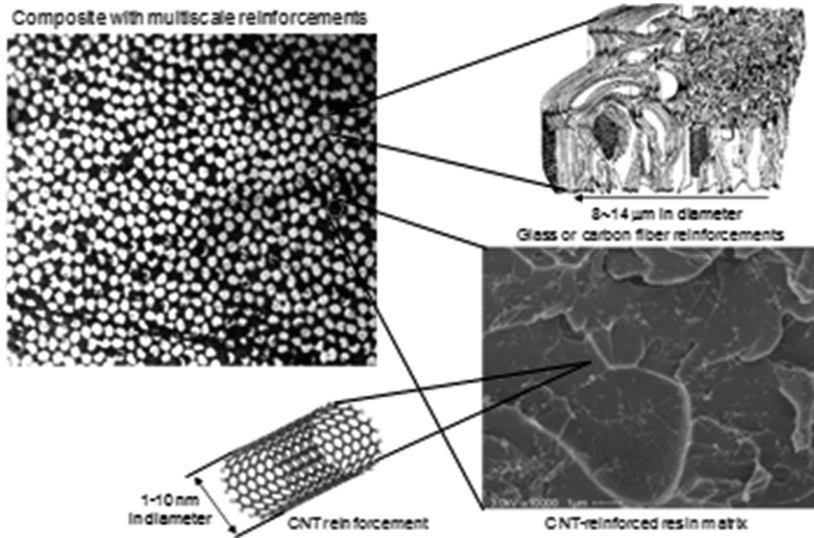


그림 5 멀티스케일 하이브리드 복합재 개념

### 3. 멀티스케일 하이브리드 복합재

멀티스케일 하이브리드 복합재(multiscale hybrid composite)는 두 가지 이상의 길이 단위를 가지고 최소 세 가지의 구성요로 이루어진 복합재로 정의된다. 가장 일반적인 경우는 수지(macro), 연속 섬유(micro), 나노 소재(nano)로 이루어진 형태이다. 보통의 섬유 강화 복합재는 평면 내 방향으로의 탄성률과 강도가 우수하지만 두께 방향으로의 물성은 그다지 좋지 못하다. 멀티스케일 하이브리드 복합재에서 고성능의 나노 재료를 첨가함으로써 두께 방향의 물성을 향상시키고 동시에 복합재에 여러 가지의 기능을 추가적으로 부여할 수 있다.

멀티스케일 하이브리드 복합재에는 다음에서와 같이 나노소재의 분산형태에 따라 4가지 유형으로 구분된다. 기지재의 물성을 개질하기 위해서는 기지재에 나노소재를 균일하게 분산시킨 형태가 유리하다. 전자파 차폐, 가스 차단 등 차단성이 요구되는 응용분야에서는 섬유를 나노소재로 코팅하거나 증착하는 게 유리하며, 섬유-기지재간 화학적 결합 또는 상호작용을 도모하기 위해서는, 화학적 방법을 통해 섬유 표면을 나노소재로 개질하는 게 추천된다.

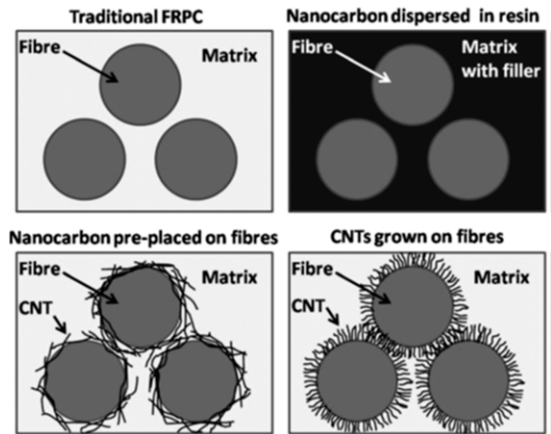
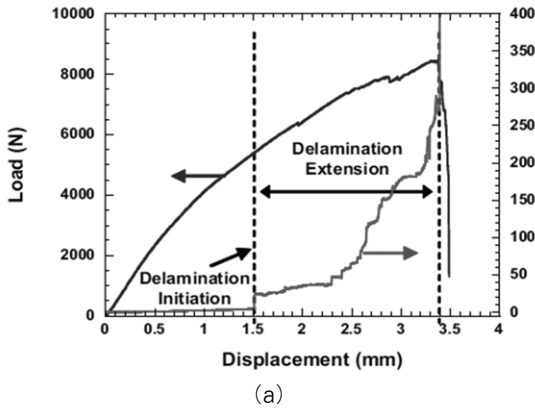
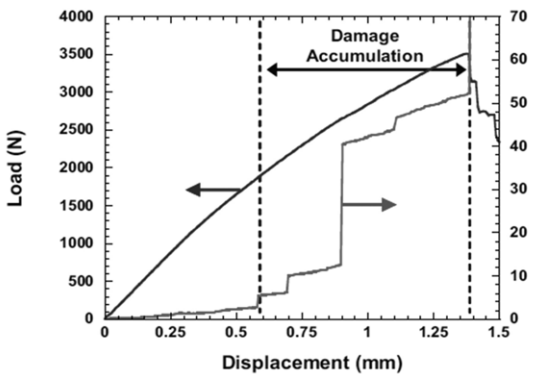


그림 6 멀티스케일 하이브리드 복합재의 유형

탄소나노튜브의 퍼콜레이션 연결에 의해 생성되는 압전 효과를 이용한 구조 건전성 진단에 관해 연구가 진행되어 왔다. 수지 내 탄소나노튜브의 분산과 관련한 전형적인 공정 과정으로는 3-롤 밀(three-roll mill)을 거쳐 vacuum-assisted resin transfer molding(VARTM)을 이용한 복합재 제조 공정이 있다. 멀티스케일 하이브리드 복합재는 층간 분리와 기지 손상, 섬유 파단, 피로 파괴에 의한 균열 전파와 같은 다양한 파괴 모드를 실시간으로 모니터링 및 탐지하기 위해 다양한 하중 조건에서 실험이 수행되었다. 이와 유사한 실험으로 브레이딩된 직물 복합재의 구조 건전성 진



(a)



(b)

그림 7 하중-변위 및 저항 반응 변화: (a) 의도적 층간 분리를 위한 다섯층 단방향 복합재; (b) 미세 균열에 의한 손상 축적을 보이는 직교 이방성 적층 복합재

단을 위해 3차원 브레이딩 직물을 보강제로 사용하고 센싱 요소로서 탄소나노튜브를 이용한 사례가 있다(Kim et al.).

탄소나노튜브를 섬유강화 플라스틱과 결합하여 사용하는 또 다른 방식으로 수지에 탄소나노튜브를 분산시키는 대신 섬유의 표면 처리를 하거나 탄소나노튜브로 섬유를 코팅하는 방법이 있다. 구체적인 방법에는 탄소나노튜브 용액에 섬유를 담그는 방법, 계면활성제를 사용하는 방법, 층층이 쌓는 방법, 전기 이동을 이용하여 섬유에 탄소나노튜브를 직접 성장 시키는 방법 등이 포함된다. 또 다른 독특한 방법으로는 대면적 변형 감지를 위해 연속 탄소나노튜브 섬유나 실을 섬유 강화 플라스틱에 삽입하는 방법이 있다.

#### 4. 맺음말

탄소나노튜브는 스마트 응용 분야인 변형 센싱에서 요구되는 뛰어난 기계적, 전기적 성질을 가지고 있다. 위와 같은 우수성 때문에, 탄소나노튜브와 다양한 종류의 기지재를 복합화하여 용도에 맞게 구조 건전성 모니터링, 촉각 센싱, 압축 및 인장 센싱 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 또한 탄소나노튜브 복합재의 전기-기계적 거동으로부터 얻어진 지식을 통해 자기센싱이 가능한 멀티스케일 하이브리드 복합재에 대한 연구도 활발히 행되고 있는 추세이다. 최근까지 탄소나노튜브/고분자 복합재의 공정-구조-특성 관계에 대한 근본적인 연구가 지속 되어왔지만, 향후에 넓은 범위의 변형을 측정할 수 있는 센서, 누적된 힘-변형 추적, 손상 감지, 건강예측 알고리즘과 데이터 축적 및 분석을 통해 우수한 성능의 탄소나노튜브 복합재의 스마트 센서가 개발될 수 있을 것으로 기대된다. **KSNVE**

#### 참고문헌

- (1) Abraham, J. K. et al., 2008, Carbon Nanotube Strain Sensors for Wearable Patient Monitoring Applications, Proc. of SPIE, Vol. 6931, ISSN 0277-786X.
- (2) Li, C. et al., 2008, Sensors and Actuators based on Carbon Nanotubes and Their Composites: A Review. Compos. Sci. Technol., Vol. 68, pp. 1227~1249.
- (3) Li, X., Levy, C. and Elaadil, L., 2008, Multiwalled Carbon Nanotube Film for Strain Sensing, Nanotechnology, Vol. 19, 45501.
- (4) Kang, I. et al., 2006. Introduction to Carbon Nanotube and Nanofiber Smart Materials, Compos. Pt. B, Vol. 37, pp. 382~394.
- (5) Pham, G. T. et al., 2008, Processing and Modeling of Conductive Thermoplastic/carbon Nanotube Films for Strain Sensing, Compos. Pt.

- B, Vol. 39, pp. 209~216.
- (6) Zhang, W. et al., 2006, Carbon Nanotube/polycarbonate Composites as Multifunctional Strain Sensors. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol. 6, pp. 960~964.
- (7) Bilotti, E. et al., 2010, Fabrication and Property Prediction of Conductive and Strain Sensing TPU/CNT Nanocomposite Fibres, *J. Mater. Chem.*, Vol. 20, pp. 9449~9455
- (8) Deshmukh, S. et al., 2009, Polymer Nanocomposites as Electrostrictive Materials, *Proc. of SPIE*, Vol. 7289.
- (9) Kim, J. et al., 2008, Piezoelectric Polymeric Thin Films Tuned by Carbon Nanotube Fillers, *Proc. of SPIE*, Vol. 6932.
- (10) Wichmann, M. H. G. et al., 2009, Piezoresistive Response of Epoxy Composites with Carbon Nanoparticles under Tensile Load, *Phys. Rev. B*, Vol. 80, 245437.
- (11) Wichmann, M. H. G. et al., 2008, Direction Sensitive Bending Sensors based on Multi-wall Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposites. *Nanotechnology*, Vol. 19, 475503.
- (12) Zhang, W. et al., 2007, In Situ Health Monitoring and Repair in Composites Using Carbon Nanotube Additives, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 91, 133102.
- (13) Anand, S. V. and Mahapatra, D. R., 2009, Quasi-static and Dynamic Strain Sensing Using Carbon Nanotube/epoxy Nanocomposite Thin Films, *Smart. Mater. Struct.*, Vol. 18, 45013.
- (14) de la Vega, A. et al., 2011, Simultaneous Global and Local Strain Sensing in SWCNT-Epoxy Composites by Raman and Impedance Spectroscopy, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 71, pp. 160~166.
- (15) Thostenson, E. T. et al., 2009, Processing and Electrical Properties of Carbon Nanotube/vinyl Ester Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 69, pp. 801~804.
- (16) Kang, J. H. et al., 2009, Piezoresistive Characteristics of Single Wall Carbon Nanotube/polyimide Nanocomposites. *J. Polym. Sci.: Part B: Polym. Phys.*, Vol. 47, pp. 994~1003.
- (17) Wang, P. et al., 2010, Effects of Carboxyl Radical on Electrical Resistance of Multi-walled Carbon Nanotube Filled Silicone Rubber Composite under Pressure, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 70, pp. 1571~1573.
- (18) Ciselli, P. et al., 2010, Piezoresistive Polymer Composites based on EPDM and MWNTs for Strain Sensing Applications, *e-Polymers*, Vol. 14.
- (19) Dang, Z.-M. et al., 2008, Supersensitive Linear Piezoresistive Property in Carbon Nanotubes/silicone Rubber Nanocomposites, *J. Appl. Phys.*, Vol. 104, 24114.
- (20) Thostenson, E. & Chou, T., 2002, Aligned Multi-walled Carbon Nanotube-reinforced Composites: Processing and Mechanical Characterization *J. Phys. D-Appl. Phys.*, Vol. 35, No. 16, pp. L77~L80.
- (21) Gao, L. et al., 2009, Sensing of Damage Mechanisms in Fiber-reinforced Composites under Cyclic Loading using Carbon Nanotubes, *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 19, pp. 123~130.
- (22) Boger, L. et al., 2008, Load and Health Monitoring in Glass Fibre Reinforced Composites with an Electrically Conductive Nanocomposite Epoxy Matrix, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 68, pp. 1886~1894.
- (23) Kim, K. J. et al., 2010, Damage Characterization of 3D Braided Composites using Carbon Nanotube-based in Situ Sensing, *Compos. Pt. A*, Vol. 41, pp. 1531~1537.
- (24) Gao, S.-L. et al., 2010, Glass Fibers with

- Carbon Nanotube Networks as Multifunctional Sensors, *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 20, pp. 1885~1893.
- (25) Sureeyatanapas, P. and Young, R. J., 2009, SWNT Composite Coatings as a Strain Sensor on Glass Fibres in Model Epoxy Composites, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 69, pp. 1547~1552.
- (26) Loh, K. J. et al., 2009, Carbon Nanotube Sensing Skins for Spatial Strain and Impact Damage Identification, *J. Nondestruct. Eval.*, Vol. 28, pp. 9~25.
- (27) Bekyarova, E. et al., 2007, Multiscale Carbon Nanotube-carbon Fiber Reinforcement for Advanced Epoxy Composites, *Langmuir*, Vol. 23, pp. 3970~3974.
- (28) Alexopoulos, N. D. et al., 2010, Structural Health Monitoring of Glass Fiber Reinforced Composites Using Embedded Carbon Nanotube (CNT) Fibers, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 70, pp. 260~271.
- (29) Abot, J. L. et al., 2010, Delamination Detection with Carbon Nanotube Thread in Self-sensing Composite Materials, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 70, pp. 1113~1119.
- (30) Thostenson, E. T. and Chou, T.-W., Carbon Nanotube Networks: Sensing of Distributed Strain and Damage for Life Prediction and Self Healing, *Adv. Mater.*, Vol. 18, pp. 2837~2841.