



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

탄소 나노 지능형 복합소재를 이용한
전왜성 기반 센서 설계 연구



2019년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

김 성 용

공 학 박 사 학 위 논 문

탄소 나노 지능형 복합소재를 이용한
전왜성 기반 센서 설계 연구

지도교수 강 인 필

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2019년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

김 성 용

김성용의 공학박사 학위논문을 인준함

2019년 2월 22일

위원장	공학박사	정영석 (인)
위원	공학박사	강인필 (인)
위원	공학박사	김찬중 (인)
위원	공학박사	허훈 (인)
위원	공학박사	서준호 (인)

목 차

Abstract	iii
I. 서 론	1
I-1. 연구 배경 및 목적	1
II. 관련 이론	5
II-1. 탄소 나노 재료	5
II-1-가. 탄소 나노 튜브	5
II-1-나. 그래핀	9
II-2. 응력, 변형률, 푸아송 비	11
II-2-가. 응력과 변형률	11
II-2-나. 푸아송 비	13
II-3. 보의 처짐과 스트레인	14
II-4. 전왜성과 센서 감도	17
II-5. Percolation threshold	19
III. 탄소 나노 기반 복합재료 제작	21
III-1. 탄소 나노 재료 분산	21
III-2. 탄소 나노 복합재료 제작 기법	23
IV. 탄소 나노 기반 복합재료 센서	26
IV-1. 브러시 기법 활용 토크 센서	26
IV-1-가. 허브-스포크 타입 토크 센서 모델링 및 구조해석 ...	26
IV-1-나. 탄소 나노 기반 스트레인 센서 특성 실험	28
IV-1-나-(1). 실험 장치 구성 및 방법	28
IV-1-나-(2). 전왜 특성 실험 결과	30
IV-1-다. 탄소 나노 기반 토크 센서 센싱 특성 실험	31
IV-1-다-(1). 센서 적용 방법 및 실험 장치 구성	31
IV-1-다-(2). 탄소 나노 기반 토크 센서 센싱 실험 결과 ..	33
IV-2. 몰드 기법 활용 압력 센서	36
IV-2-가. 단순 몰드법 활용 탄소 나노 기반 압력 센서	36
IV-2-가-(1). 압력 센서 제작	36
IV-2-가-(2). 압력 센서 실험 장치 구성 및 방법	38
IV-2-가-(3). 압력 센서 센싱 실험 결과	39
IV-2-나. 3D 프린팅 구조물 몰드 탄소 나노 기반 압력 센서 ..	42
IV-2-나-(1). 3D 프린팅 구조물 기반 압력 센서 제작	42
IV-2-나-(2). 3D 프린팅 기반 압력 센서 센싱 실험 결과 ..	45

IV-3. 분무 기법 활용 충격 센서	48
IV-3-가. 분무 방식 활용한 하이브리드 필러 복합재 센서 제작 ..	48
IV-3-나. 충격 센서 기초 특성 실험	50
IV-3-나-(1). 실험 장치 구성 및 방법	50
IV-3-나-(2). 필러에 따른 센서 감도 실험 결과	51
IV-3-다. 충격 에너지 센싱 실험	52
IV-3-다-(1). 실험 장치 구성 및 방법	52
IV-3-다-(2). 실험 결과	55
IV-3-다-(2)-(가). 최소 감지 충격 에너지 센싱 결과 ..	55
IV-3-다-(2)-(나). 충격 에너지에 따른 센서 신호	56
IV-3-다-(2)-(다). 충격 위치에 따른 센서 신호	58
IV-3-라. 다차원 탄소 나노 동소체 복합재 전왜성 메커니즘 ...	60
V. 탄소 나노 복합재 센서 형상에 따른 전왜 특성	66
V-1. 탄소 나노 튜브 기반 복합재료 센서 제작	66
V-2. 실험 장치 구성 및 실험 방법	68
V-3. 실험 결과	69
V-3-가. 탄소 나노 기반 복합재 센서의 percolation threshold ..	69
V-3-나. 센서 형상에 따른 센서 감도 특성	72
V-3-나-(1). 센서 길이에 따른 센서 감도 특성	72
V-3-나-(2). 센서 두께에 따른 센서 감도 특성	79
V-3-나-(3). 센서 폭에 따른 센서 감도 특성	86
V-4. 센서 형상에 따른 센서 스트레인 및 감도의 상관관계	92
VI. 결론	105
VII. 참고문헌	107

Study on the Design of Piezoresistive Sensors Based on Carbon Nano Smart Composites

Sung Yong Kim

Department of Mechanical & Design Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

A strain sensor based on nano carbon composite can be designed its piezoresistive characteristic by various factors such as type of the nano carbon isotope, content weight percent (wt%) of the nano carbon filler, the geometric sensor pattern, and so on. However, the piezoresistivity design for the sensor still mainly depends on trial and error approaches due to not only lack of fabrication information but also uncertainties of the nano composites mainly comes from fabrication process as well. Thus, from engineering view point, the piezoresistivity design strategy is urgently required for sensors applications.

In this study, a piezoresistive characteristics for sensor fabrication was studied based on piezoresistivity models in physics. Sensitivity characteristics of strain sensor were studied through the fabrication variables as described above. The sensors made of MWCNT (multi-walled carbon nanotube) / epoxy composites were prepared by varying wt% and nano filler types. After that, their piezoresistive sensing characteristics were experimentally studied. From this investigation, piezoresistive sensitivity was proportional to length and thickness of the sensors, and the sensitivity was inversely proportional to width of the sensors. As the sensor thickness increases, it could improve the piezoresistivity but it might deteriorate the actual deformation of the installed target material.

For applications of the piezoresistive sensors, following nano carbon composite sensors were developed and their piezoresistive characteristics were studied as well. Strain and torque sensors based on MWCNT/epoxy were fabricated and their sensing performances such as sensitivity, signal stability and linearity were proved as equivalent compared with conventional foil strain gauges. Pressure sensors based on MWCNT/epoxy were fabricated by using a bulk type and a 3D printed cantilever type. The cantilever type pressure sensor could measure up to 16,500kPa, which was about 200% higher pressure range than the bulk type. Novel impact paint sensors were developed MWCNT, exfoliated graphite nano-platelets (xGnP), and a hybrid type of the two nano-carbon fillers and they were sprayed onto a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) panel for lab testing. In ball drop impact test, the MWCNT-xGnP-based hybrid sensor showed the best characteristics in impact energy sensing within the range 0.07-1.0J. The piezoresistive mechanism due to structural dimension variations of nano carbon isotopes for sensor design was also investigated by means of the piezoresistive model. From this study, the piezoresistivity of nano-carbon sensor was significantly dominated the electrical contact variation of the electrical fillers in a matrix.

Key Words: Piezoresistivity mechanism, Sensor design, Carbon nanotube, Graphene, Fabrication technique

I. 서론

I-1. 연구 배경 및 목적

센서(sensor) 및 이를 이용한 계측기술은 과학 분야에서는 정확한 정보를 측정하며, 공학 분야에서는 시스템(system)을 효과적으로 운용하고 제어하기 위한 핵심 기술이다. 이러한 센서 및 계측 기술은 우리 생활에 널리 이용되는 정보화 기술과 결합되어 최근에는 일상생활의 안전과 편의를 증진 시킬 수 있는 핵심기술로 발전되고 있으며 그 중요도가 점점 높아지고 있는 추세이다. 또한 센서 기술은 이를 활용한 다양한 응용범위가 확대됨에 따라, 신뢰성과 정밀성을 갖춘 경제적인 센서에 대한 수요가 증가되고 있다. 이러한 요구는 주로 반도체 공정 기반 기술인 MEMS(Micro Electro Mechanical System)에 의해 충족되어왔다. MEMS기반 센서들은 다수의 센서들을 일괄적으로 제조함으로써 신뢰성, 집적화등 다양한 장점을 지닐 수 있다. 하지만 실리콘을 주재료로 하는 이 공정은 고온 및 화학적 제조 조건을 요구하기 때문에 상대적으로 고가이며, 이로 인해 일회용일 수 있는 저비용의 센서 제작에는 다소 제한적이다. 따라서 이의 한계를 극복하기 위한 새로운 센서 제작 공정 및 센서 재료들이 연구되고 있다.

새로운 센서 재료의 개발은 새로운 센서 제작 공정 및 센서 개발을 가능하게 한다. 이러한 센서 재료의 대표적인 소재로는 탄소 나노(nano) 재료가 있다. 탄소 나노 재료는 그 발견 이래로 그 자체의 특성뿐만 아니라 이를 활용한 복합재 및 구조체의 기계적, 전기적 특성에 대해 활발하게 연구되고 있다. 탄소 나노 재료는 자연계에 흔히 존재하는 그라파이트(graphite)를 비롯하여 0차원 구조의 풀러렌(fullerene), 1차원 구조인 탄소 나노 튜브(carbon nanotube, CNT), 2차원 면상 구조인 그래핀(graphene)이 있다.[1] 이들 중 탄소 나노튜브

와 그래핀은 다른 탄소 나노 동소체에 비해 높은 기계적 강도와 우수한 전기 전도성을 지니고 있다. 많은 연구 그룹(group)들이 이러한 나노 사이즈(size)의 재료들의 성질을 매크로(macro), 마이크로(micro) 형태로 이어 받아 이들이 가진 장점을 활용하는 것이 핵심이라 생각하였으며 이들을 활용한 다양한 센서, 복합재료가 연구되고 있다. 일반적으로 복합재료를 제작할 때 이의 내부에 충전재(filler)를 함유해 기계적 강도를 향상시키는 경우가 많다. 초기에는 탄소 나노 재료의 전기적 성질이 좋지 않아 탄소 나노 재료를 기계적 강도 향상을 위한 충전재로 활용한 복합재료에 대한 연구가 주로 진행되었다. 이러한 활용에 대한 연구는 아직까지 지속적으로 이루어지고 있으며, 이에는 탄소 섬유/에폭시(carbon fiber/epoxy)[2], 탄소 나노 튜브/탄소 섬유/폴리카보네이트(CNT/carbon fiber/polycarbonate)[3] 등과 같이 다양한 폴리머(polymer), 탄소 나노 재료를 활용한 복합재료 기계적 물성[4~6]에 대한 연구가 있다.

이와 더불어 많은 연구자들은 탄소 나노 튜브와 그래핀이 지닌 전기적 특성의 활용에도 많은 관심을 보였다. 탄소 나노 재료와 각종 기지재료(matrix)로 제작된 복합재료는 전왜성효과(piezoresistive effect)[7]를 가지게 되며 이의 특성 및 활용 방안에 대해 많은 연구 그룹들에 의해 연구되었다. 1차원의 탄소 나노 튜브기반 스트레인 센서[8~29], 압력 센서[30~35]와 2차원의 그래핀 기반 센서[36~43]는 다양한 형태, 특성으로 인해 많은 연구 그룹들에 의해 개발, 활용, 연구되고 있다. 또한 서로 다른 차원의 재료를 동시에 사용하여 센서의 특성을 개선하는 연구들도 진행되고 있다.[44~50] 탄소 나노 재료를 활용한 이러한 센서들은 여러 가지 요인을 통해 사용자가 원하는 대로 특성을 제어할 수 있는 큰 장점이 있다. 이러한 요인들에는 필러(filler)의 함량[12, 51~56], 탄소 나노 튜브의 중형비[57, 58], 제작 공정[58, 59] 등이 있다.

탄소 나노 재료를 기반으로 제작한 센서는 이의 다양한 장점에도 불구하고, 제작 공정에서 탄소 나노 필러 배열(array)의 랜덤(random)성 때문에, 이를 기반으로 한 복합재료가 제작되기 전에는 실제 성능을 예측하기 어렵다. 탄소

나노 필러들의 방향을 일정하게 배열하여 사용하는 방법도 연구[60~65]되고 있지만 실제 현장에서 적용하기는 쉽지 않다. 따라서 이러한 요인들에 의해 발현되는 특성 현상에 대해서 세부적으로 알아보고자 하는 연구들이 많은 그룹들에 의해 진행되었는데, 이들은 탄소 나노 기반 재료 센서의 움직임에 따른 내부 필러들의 거동 및 효과에 대해 알아보고자 하였다. 두 전극 사이의 전기적 터널(tunnel) 효과에 대한 식[66]을 필두로 이와 폴리머 기지재료 내에 있는 전도성 필러간의 현상을 접목하여 이에 대한 수식적 모델(model)은 많은 그룹들에 의해 연구되어 왔다.[37, 67~83] 이와 더불어 컴퓨터(computer)를 이용한 분자 동역학 및 다양한 시뮬레이션(simulation) 모델 등이 이러한 현상을 예측하기 위하여 연구되고 있다.[70, 73, 83~89] 하지만, 탄소 나노 재료는 이의 생산 공정 및 재료 특성상 필러 전체가 균일하지 않고, 공정상에서 많은 오차가 발생할 수 있기 때문에 이를 활용하여 제작한 복합재료 내부의 필러 움직임을 정확하게 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 세부적인 복합재료 내부 필러의 움직임을 예측하기 보다는 실제 사용자가 사용할 때의 편의성을 증진시키기 위하여 매크로, 마이크로 스케일에서 센서 형상에 따른 센서 특성을 확인하는 실험도 진행되었다.[90~95]

일반적인 센서의 경우 생산과정에서 이의 스펙(spec)들이 일관성 있게 제작되며, 이로 인해 사용자가 원하는 목적에 맞추어 편하게 사용할 수 있다. 반대로, 탄소 나노 재료를 기반으로 하는 센서는 일반적인 센서와는 다르게 사용자가 원하는 형태, 원하는 특성을 위해 직접 관여해서 사용해야 한다. 실제로 일반 사용자가 나노 스케일에서의 현상을 이해하고, 이에 맞게끔 탄소 나노 기반 센서를 적용하는 것은 쉽지 않다. 이러한 특성 때문에 제작될 탄소 나노 기반 센서의 특성을 예측하며, 목적에 맞게끔 설계하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 탄소 나노 재료를 기반으로 한 스트레인(strain) 센서, 압력(pressure) 센서, 토크(torque) 센서, 충격(impact) 센서 등을 제작하여 사용자의

목적에 맞는 탄소 나노 기반 센서 적용 방법 및 활용 방안에 대해 연구하였다. 또한, 센서 적용 시 센서의 감도 특성 예측 및 이를 더 잘 활용하기 위한 센서 설계 요인에 대해 연구하였다.



Ⅱ. 관련 이론

Ⅱ-1. 탄소 나노 재료

Ⅱ-1-가. 탄소 나노 튜브

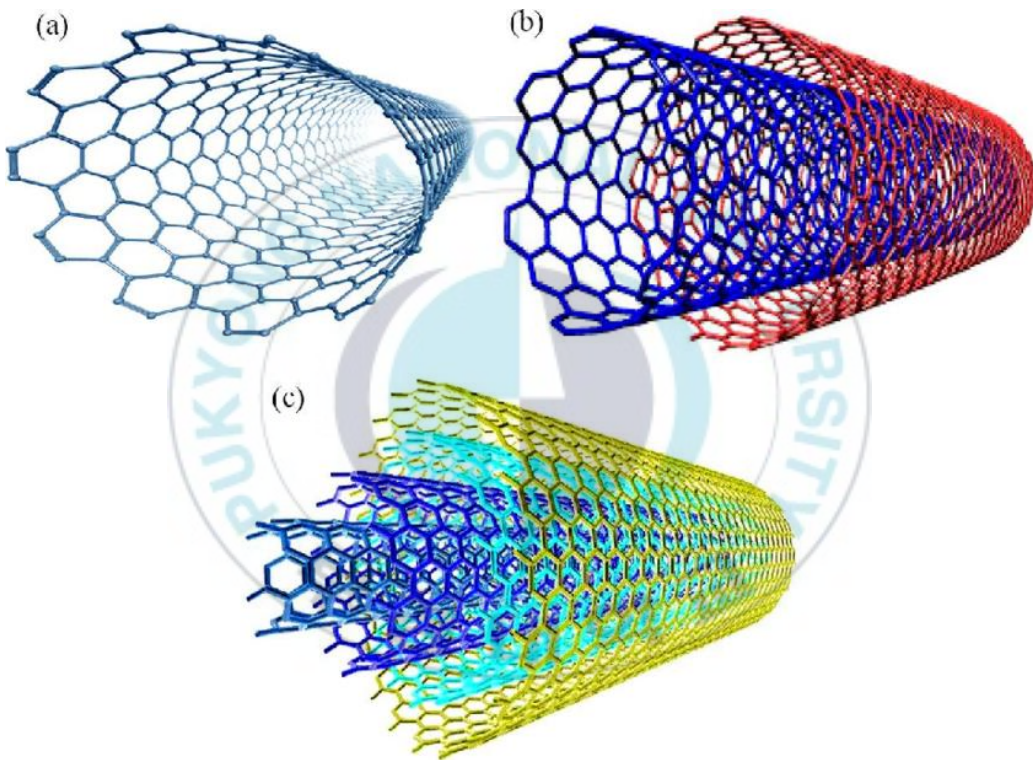


Fig. Ⅱ-1 Structures of (a) SWCNT(Single-walled Carbon Nanotube), (b) DWCNT(Double-walled Carbon Nanotube), and (c) MWCNT(Multi-walled Carbon Nanotube). [97]

1985년 축구공 모양을 가진 탄소 분자 C_{60} 인 플러렌(fullerene)이 처음 발견된 이래로 많은 연구진들은 새로운 구조의 탄소를 합성하기 위한 연구를 진행하였다. 이 과정에서 탄소 나노 튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 iijima가 1991년에

고분해능 투과전자 현미경을 이용하여 두 개의 탄소 전극간의 아크(arc)에 의해 발생된 탄소 부산물들을 관찰하는 과정에서 다중벽 형태의 CNT를 발견하였으며, 이의 뛰어난 재료적 특성이 관측됨으로써 관심을 받기 시작했다.[96] CNT는 면상의 흑연 입자가 나노 크기의 직경을 가지면서 둥글게 말린 형태로, 흑연 면이 말리는 각도와 구조의 형태에 따라서 도체 또는 반도체 특성을 보여준다. CNT는 구성되어 있는 벽의 수에 따라 단일벽 탄소 나노 튜브(Single-walled Carbon Nanotube, SWCNT)와 두개의 동심원 형태의 벽으로 구성되어 있는 이중벽 탄소 나노 튜브(Double-walled Carbon Nanotube, DWCNT), 다중벽으로 구성되어 있는 다중벽 탄소 나노 튜브(Multi-walled Carbon Nanotube, MWCNT)로 구분되어지며 이의 구성을 Fig. II-1에 나타내었다. 실제로는 동심원 형태의 벽이 여러 개가 될 경우 통틀어서 MWCNT라 지칭하며, 벽의 수가 작아질수록 생산하기가 까다로워지며 생산비용이 증가한다.

탄소 원자는 그 결합 형태에 따라 다양한 동소체를 가지고 있다. 우선 sp^3 결합을 이루고 있는 큐빅(cubic)구조의 다이아몬드(diamond)와 sp^2 결합을 이루고 있는 6각(hexagonal)구조의 흑연이 대표적인 예이다. 이러한 결합의 차이로 인해 다이아몬드는 wide band gap 반도체이지만 흑연은 금속과 같이 전기 전도도가 우수한 특성을 가진다. 하지만 CNT는 그 결합 형태가 흑연의 판상 구조를 말아놓은 형태인 sp^2 구조를 이루고 있으나, 흑연과는 달리 튜브의 직경이 나노 크기이기 때문에 양자 현상을 관찰할 수 있다. 따라서 일련의 CNT의 특성 연구 및 물성을 밝히는 부분에서 SWCNT는 가장 이상적인 형태로 인식되고 있다. SWCNT의 직경은 약 0.7nm ~ 10.0nm의 크기를 가지고 있으며, 1993년에 Iijima와 Bethune 연구 그룹에 의해 철, 코발트(cobalt), 니켈(nickel)등의 전이금속류를 함유한 전극을 이용한 아크방전 실험을 통해 생성될 수 있음이 밝혀졌다[96, 98]. 이후 1996년에 Smalley 그룹 등이 촉매를 이용한 다량의 SWCNT를 제조하여 본격적인 연구가 시작되었다.[99]

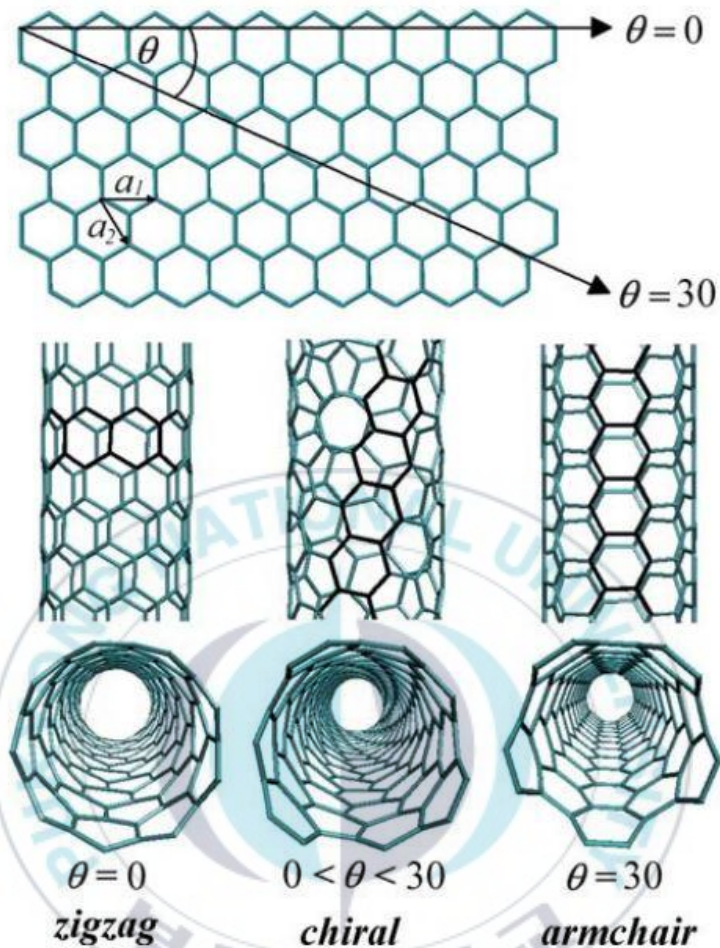


Fig. II-2 Three types forms of Carbon Nanotube. [100]

CNT는 6개의 탄소 링(ring)이 길이 방향으로 진행되어 있는 형태로 흑연 판이 말려진 형태에 따라 Fig. II-2와 같이 Zigzag, Chiral, Armchair 등의 세 가지 형태의 구조를 가진다. 이는 튜브의 벌집무늬가 말리는 각도와 직경에 따라 각각 도체와 반도체 특성을 나타낸다.[99]

MWCNT는 SWCNT에 비해 직경이 크고, 아크 방전법, 화학 기상 증착법 (Chemical Vapor Deposition, CVD)이 주로 사용된다. 실제적인 CNT의 응용에 있어서 MWCNT의 이점은 기계적 강도를 요하는 부분과 안정성 및 내구성에

서 SWCNT를 보완하는 것으로 밝혀졌다.[101] MWCNT 합성에 대한 연구는 초기 아크 방전법을 이용한 것으로 촉매 금속이 없는 경우에 음극의 흑연 봉으로부터 MWCNT가 합성되었다. 이후 화학 기상 증착법을 통하여 고밀도의 수직 정렬된 CNT의 합성이 가능하게 되었다.[102] 또한 합성에 있어 화학 기상 증착법을 이용하여 기판 상에 CNT의 성장이 가능해짐에 따라 MWCNT의 길이, 직경, 밀도 등의 제어가 용이하게 이루어졌다.[103] 이외의 합성 방법으로 기상합성법 및 플라즈마 화학 기상 증착법을 이용한 MWCNT의 합성 방법도 있다.[104, 105] MWCNT는 보통 5~100nm의 직경을 가지면서 길이 방향으로 수 μm 에서 수백 μm 의 길이를 가지며, 두 개 이상의 흑연판이 말려있는 모양을 가지고 있다. 흑연판 간의 거리는 보통 0.34nm로 흑연의 층상 구조에서 격벽간의 거리와 동일한 값을 갖는다.[106] 기본적인 구조는 탄소 섬유와 비슷한 모양을 가지나 탄소 섬유에 비해 높은 결정성을 가지므로 성장 방향으로 직진성 차이를 보인다.

CNT의 독특한 전기적 특성은 1차원적 구조와 흑연 고유의 전기적 구조에 따라 유발되며, 그 자체적으로는 매우 높은 전도성을 가진다. 이들이 가진 전기적 저항 값은 구리의 1/100에 불과하며 전류이송능력은 구리의 약 1,000배에 이른다. 기계적 물성 측면에서 CNT는 구조적으로 탄소-탄소 간의 sp^2 결합을 이루고 있어 강철보다 100배 이상 더 강한 매우 높은 강성과 강도를 가지고 있다. 또한 CNT의 영률은 약 5.5Tpa에 이르며 인장강도는 약 100Gpa에 이르는 것으로 보고되었다. 이는 고강도 합금의 인장강도가 약 2Gpa, 영률이 약 200Gpa인 것과 비교하여 우수한 특성을 나타내는 것이다.[107]

II-1-나. 그래핀

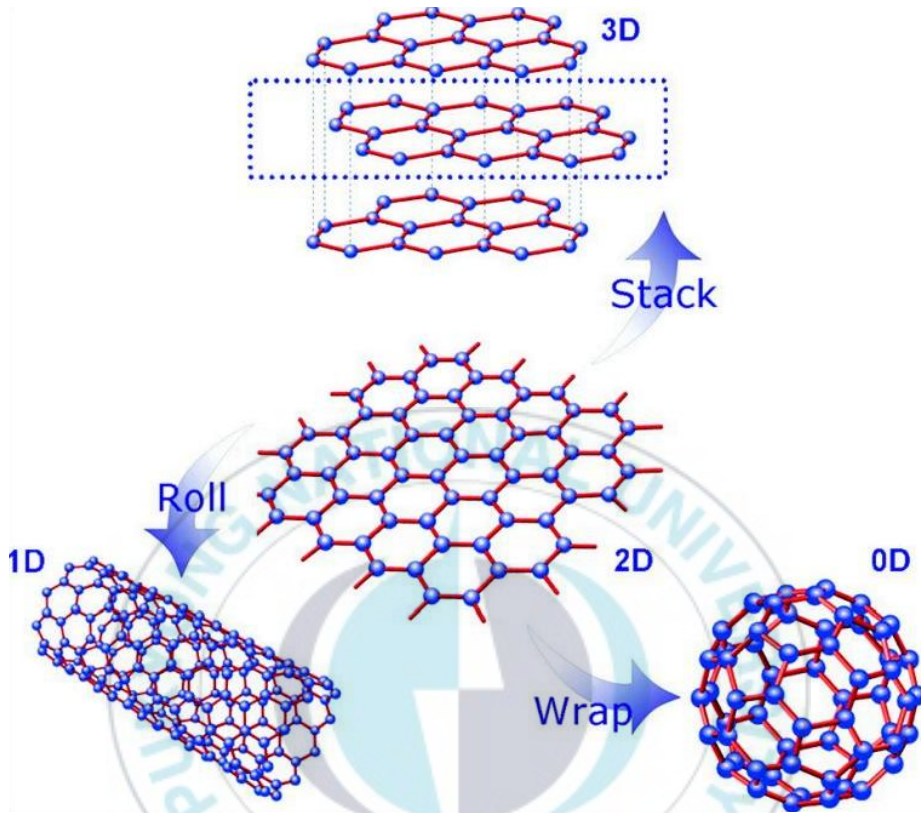


Fig. II-3 Graphene : the basic building block for other carbon allotropes graphite (3D), fullerene (0D), and CNT (1D). [108]

그래핀(graphene)은 탄소 원자들이 2차원 상에서 벌집 모양의 배열이 이어져있으면서 원자 한 층의 두께를 가지는 전도성 물질이다. 이는 3차원으로 쌓이면 흑연, 1차원으로 말리면 CNT, 공 모양이 되면 0차원 구조인 플러렌을 구조적으로는 이룰 수 있는 물질로 다양한 저차원 나노 현상을 연구하는데 중요한 모델이 되어 왔으며 관련된 연구 분야에 양자홀(quantum hall) 및 2차원 물질 시대를 연 기념비적인 물질이다. 실제로 사용되는 그래핀은 많은 그래핀들이 차곡차곡 쌓인 형태로 존재하게 된다. 그래핀의 탄소 원자간 간격은 약 0.142nm, 그래핀 간의 간격은 약 0.335nm가 된다. 공유결합으로 구성된 이의

특성상 그래핀의 인장강도는 약130Gpa, 탄성계수는 약1Tpa 이다.[109]

이러한 그래핀은 2004년, 영국 맨체스터 대학의 안드레 가임(Andre Geim) 연구팀과 러시아 콘스탄틴 노보셀로프의 체르노골로브카(Chernogolovka) 마이크로일렉트로닉스 연구팀이 스카치테이프의 접착력을 이용해 흑연에서 그래핀을 분리해냈으며, 예측되어 왔던 이의 특성이 실험적으로 확인되었다.[109] 그래핀을 얻어내는 방법은 이후로 켄칭기 방법, 구리호일 촉매 대면적 그래핀 합성 방법[110], CVD 등 매우 다양한 방법들이 연구되어 왔다. 하지만 이들은 공정상에 화학적, 고온처리 등이 포함되기 때문에 스카치테이프 법처럼 흑연에서 직접 박리 시키는 방법에 비해 질적으로 뛰어넘는 것은 매우 힘들다. 따라서 이들 방법 이후로 고품질의 그래핀을 얻기 위한 연구가 지속되었으며 2011년, 2014년에 한국에서 고품질 그래핀 대량생산 기술 및 신공정등이 개발되었다.

그래핀은 구조적, 화학적으로 매우 안정하며 뛰어난 전도체로서 구리보다 약 100배가량 더 많은 전류를 흐르게 할 수 있다. 또한 이는 상대적으로 가벼운 원소인 탄소만으로 이루어져 1차원 혹은 2차원 나노패턴을 가공하기가 매우 용이하다. 투명도는 가시광선 영역에서 약 98%정도이며 유연성을 가지고 있다. 이의 특성을 사용하여 디스플레이(display), 투명 전극, 전자 소자, 반도체의 집적도 상승효과 등으로 활용하는 방법에 대해서 많은 연구들이 진행되고 있다.[109, 111~114] 하지만 그래핀의 띠틈(band gap)을 활용하기 어렵다는 단점이 있으며 보통 이를 제로 밴드 갭(zero band gap) 물질이라 한다. 띠틈의 크기에 따라서 물질을 도체, 반도체, 부도체로 분류하는데 도체는 보통 띠틈이 없고 반도체는 띠틈이 작으며 부도체는 띠틈이 크다. 이러한 띠틈을 잘 활용할 수 있어야 소자로써 활용성이 커지지만 그래핀은 이의 특성 때문에 최근에는 반도체 소자보다 전극으로써 사용성을 더 염두에 두고 있는 추세이다.

II-2. 응력, 변형률, 푸아송 비

II-2-가. 응력과 변형률

응력은 물체가 외부의 힘을 받아 변형(deformation)을 일으킨 물체의 내부에 발생하는 단위 면적당 힘이다. 또는 외력에 저항하여 물체의 형태를 그대로 유지하기 위해 물체 내에 생기는 내력, 변형력이라고도 한다. 여기서 어떤 재료의 중심축에 수직방향으로 작용하는 힘에 의한 응력(stress) 즉, 재료 표면의 법선 방향으로 작용하므로 법선응력 또는 수직응력이라고도 하며 여기에는 방향에 따라 인장응력과 압축응력이 있다.

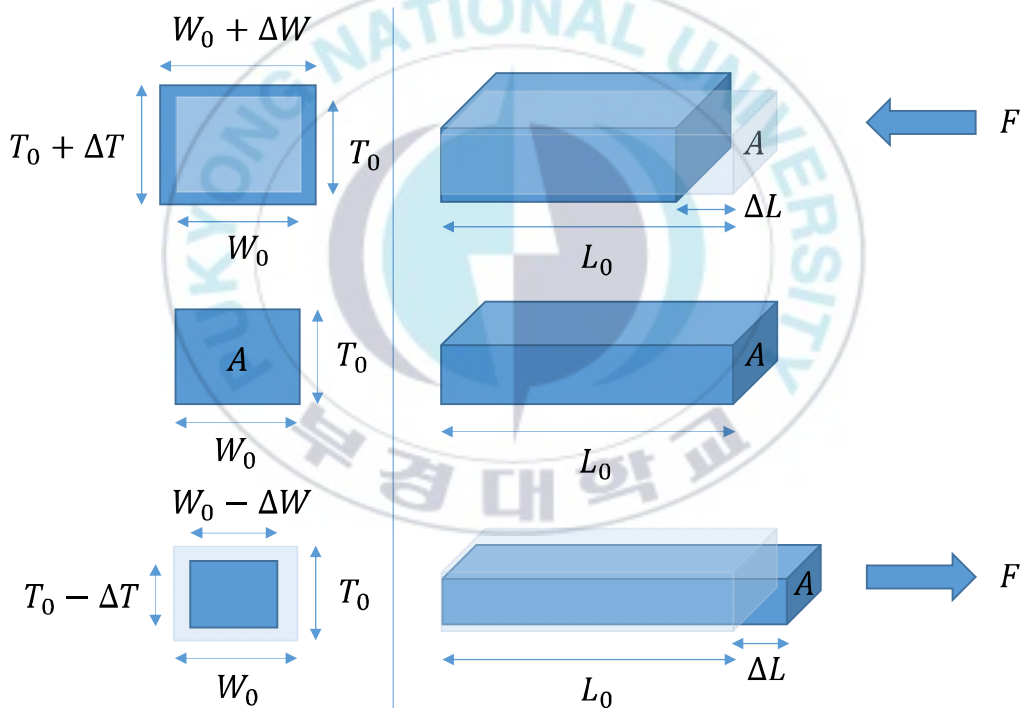


Fig. II-4 Tensile and compressive deformation behavior of an object.

Fig. II-4처럼 길이가 L_0 인 기다란 막대가 있다고 가정하여 이 막대의 한쪽 끝을 고정하고 다른 쪽 끝을 막대의 방향으로 힘의 크기 F 만큼의 인장 또는 압축력을 가하게 되면 막대의 길이가 변하게 되는 변형이 발생된다. 이때 막대

의 변형은 응력에 의해 일어나는 것이며, 이는 막대의 단면에 작용하는 단위 면적당 힘이므로 막대 단면의 면적을 A 라고 하였을 때 막대에 가해지는 응력은 $\sigma = \pm \frac{F}{A}$ 가 된다. 이때 힘 F 만큼의 인장에 의한 응력 σ 는 인장응력(tensile stress)이라고 하고 보통 (+)부호로 나타내며, F 라는 힘으로 압축에 의해 발생하는 응력 σ 는 압축응력 (compressive stress)이라 하고 보통 (-)부호로 구별하여 나타낸다.

구조물이나 기계를 구성하는 재료는 강체가 아니므로 하중에 대해서 생기는 응력에 의해 변형이 발생된다. 이 변형의 양은 응력의 크기가 동일하더라도 물체의 형상 및 크기에 따라 달라진다. Fig. II-4에서 길이 L_0 인 막대에 인장력 또는 압축력 F 가 작용하면, 길이는 축방향으로 ΔL 만큼 변형되어 $L = L_0 + \Delta L$ 이 된다. 이때 축방향의 변형률(strain)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_L = \pm \frac{\Delta L}{L}$$

변형률의 단위는 mm/mm 이며 무차원이다. 막대에 가하는 힘과 변형된 길이는 탄성한계 내에서 비례한다는 것이 훅의 법칙(Hooke's Law)이며, 이로 인해 가해진 힘 F 와 막대의 늘어난 길이 ΔL 의 관계는 다음과 같다.

$$F = k\Delta L \text{ (단, } k \text{는 비례상수)}$$

위 식의 양변을 막대의 길이 L 과 단면적 A 로 나누게 되면 다음과 같이 된다.

$$\frac{F}{AL} = \frac{k\Delta L}{AL} \Rightarrow \sigma = E\varepsilon$$

여기서 E 는 탄성계수(modulus of elasticity)이며, 물질의 고유한 성질이다.

II-2-나. 푸아송 비

Fig. II-4와 같이 길이가 L_0 인 막대에 축방향으로 인장력 F 를 인가하면 막대 재료는 축방향으로는 길이가 늘어나지만 가로방향으로는 길이가 줄어든다. 반대로 압축력이 작용하면 축방향으로 줄어드는 변형이 발생되지만 가로방향으로는 길이가 늘어난다. 이렇게 축방향으로 변형이 일어날 때 가로방향으로도 변형이 일어나게 되는데, 여기서 가로방향 변형율을 축방향 변형율로 나눈 것이 푸아송 비(Poisson's ratio)이며, 주로 ν 로 표기한다. 즉, 응력이 가해지지 않은 재료의 원형과 변형된 형태를 비교한 후 이를 상수로 나타낸 것이다.

$$\nu = -\frac{\text{가로방향 변형율}}{\text{축방향 변형율}} = -\frac{\mp \Delta \varepsilon_y}{\pm \Delta \varepsilon_x} = -\frac{\mp \Delta \varepsilon_z}{\pm \Delta \varepsilon_x}$$

푸아송 비는 축변형률과 가로변형률을 이용하여 산정하며, 그 범위는 $0 < \nu < 0.5$ 이다. $\nu=0.5$ 일 때는 변형이 일어나도 체적이 일정해진다. 사용된 막대의 재료가 등방성인 경우 위와 같은 관계가 성립하게 되며, 이방성일 경우에는 성립하지 않는다. 식 앞에 음의 부호(-)가 붙는 것은, 축방향 변형율이 양수일 경우 즉 인장일 경우 가로방향 변형율은 항상 음수이고, 축방향 변형율이 음수일 경우 즉 압축일 경우 가로방향 변형율은 항상 양수이므로 가로방향 변형율을 축방향 변형율로 나눈 값은 음수이기 때문에 최종적인 값을 양수로 만들어주기 위한 것이다.

II-3. 보의 처짐과 스트레인

외팔보는 기계적 장치로서 널리 사용되며, 이를 센서와 같이 활용하여 다양한 소자 및 장치들로 응용이 되고 있다. 본 논문에서 제작된 센서의 성능을 평가하기 위하여 간단한 기계적 장치인 외팔보를 주로 사용하였다. 외팔보에 발생하는 스트레인이 외팔보에 부착되어 있는 센서에 충분히 전달이 되며, 외팔보와 센서는 충분히 긴밀하게 접촉되어 있다고 가정하였다. Fig. II-5와 같이 한쪽 면이 고정단이며 반대쪽은 자유단으로 되어 있는 길이 L 의 외팔보가 있다고 가정하자. 여기서 x 지점에 작용하는 모멘트와 대칭면 내에 굽힘 작용을 받는 보의 탄성선의 미분방정식은 다음과 같다.

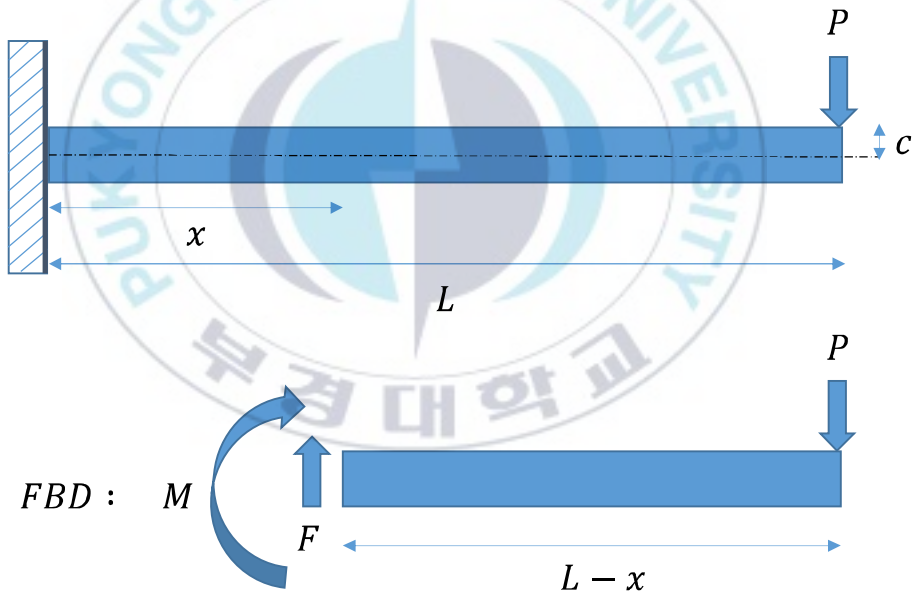


Fig. II-5 The deflection of the cantilever beam and its F.B.D.

$$M = -P(L - x) \quad (2.1)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (2.2)$$

(2.1)식을 (2.2)식에 대입한 후 양변에 적분 하게 되면 다음 식과 같이 나타나게 된다.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M = P(L-x) \Rightarrow EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2} P(L-x)^2 + C_1 \quad (2.3)$$

고정단에서 x 는 0, $\theta = \frac{dy}{dx}$ 는 0 이므로 C_1 은 $\frac{1}{2} PL^2$ 가 된다.

위 식(2.3)을 한 번 더 적분하게 되면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI y = \frac{1}{6} P(L-x)^3 + \frac{1}{2} PL^2 x + C_2 \quad (2.4)$$

고정단에서 x 는 0, 처짐 y 는 0이므로 C_2 는 $-\frac{1}{6} PL^3$ 이 된다. 식 (2.4)에 C_2 를 대입한 후 y 에 대한 식으로 다시 쓰게 되면 다음 식 (2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \frac{Px^2}{6EI} (3L-x) \quad (2.5)$$

여기서 x 가 L 일 때 최대 처짐은 자유단 끝에서 생기며 y_L 는 다음 식과 같다.

$$y_L = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2.6)$$

보에 작용하는 굽힘 응력은 $\sigma = -\frac{Mc}{I}$ 이며, 여기서 M 은 굽힘 모멘트, I 는 단

면2차모멘트이며, c 는 외팔보의 두께의 절반이다. 이때 발생하는 x 지점의 스트레인은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P(L-x)c}{IE} \quad (2.7)$$

(2.6)식을 P 에 대해 정리한 후 식(2.7)에 대입하여 다시 쓰게 되면 x 지점에서 발생하는 스트레인은 다음 식과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{3c(L-x)}{L^3} y_L \quad (2.8)$$

따라서, 위 식을 이용하면 이후 실시할 실험에서 자유단 끝에 임의의 처짐을 발생시켜 주었을 때 센서 부착부위의 중심에 대한 스트레인을 구할 수 있다.

II-4. 전왜성과 센서 감도

대부분의 금속은 전기적 저항을 가지고 있으며, 이의 저항 값은 물체의 종류와 구조에 따라 달라진다. 금속 도체의 저항은 크게 5가지 요소에 의해 구성되어 지는데, 재료, 길이, 단면적, 온도, 떠틈 이다. 재료는 각 물질마다 다른 고유 저항 값을 가지고 있으며, 이는 재료 내에 존재하는 자유 전자 수에 의존하기 때문이다. 떠틈은 전기가 흐르기 위한 최소한의 에너지 수준이며, 이것 역시 재료의 고유 특성중 하나이다. 대부분의 도체는 온도가 올라갈수록 저항 값이 커지는데, 이는 온도가 올라가면 도체 내부의 분자 운동이 활발해져 전하의 흐름을 방해하기 때문이다. 온도가 같고 재료가 같은 도체라 하더라도 도체의 크기나 모양에 따라 저항이 바뀌는데, 저항 값은 도체의 길이에 비례하고 단면적에 반비례한다. 따라서 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.9)$$

여기서 L 은 도체의 길이, A 는 도체의 단면적이며 ρ 는 비저항으로 물체의 고유한 성질이다. 일반적으로 많이 사용되는 스트레인 게이지는 도체에 응력을 가하였을 때, 도체의 형상이 변하게 되고 이로 인해 저항 값이 변하는 성질을 이용하는 것이다. 다음 Fig. II-6과 같은 육면체의 도체가 있다고 가정하고 이의 양단에 인장력을 가하게 되면 길이는 $L = L_0 + \Delta L$, 폭은 $W = W_0 + \Delta W$, 두께는 $T = T_0 + \Delta T$ 가 된다. 도체의 전기저항 변화율은 변형

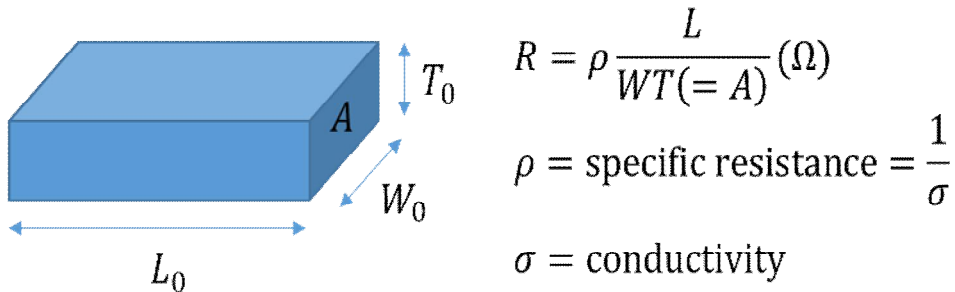


Fig. II-6 Schematic diagram of a hexagonal conductor.

율과 온도에 기인하는 성분의 합으로 이루어져있지만, 여기에서 온도에 의한 변화는 무시하였다. 따라서 도체의 전기저항 변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{composites} = \frac{\rho L}{WT}$$

$$dR_{composites} = \frac{L}{WT}d\rho + \frac{\rho}{WT}dL - \frac{\rho L}{W^2 T}dW - \frac{\rho L}{WT^2}dT$$

$$\left(; \frac{dW}{W} = \varepsilon_W = -\nu\varepsilon_L, \frac{dT}{T} = \varepsilon_T = -\nu\varepsilon_L \right)$$

$$\frac{dR_{composites}}{R_{composites}} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_L + \nu\varepsilon_L + \nu\varepsilon_L = (1+2\nu)\varepsilon_L + \frac{d\rho}{\rho}$$

여기서 게이지 율(Gauge Factor, G.F)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G.F = \frac{\frac{dR_{composites}}{R_{composites}}}{\frac{dL_{composites}}{L_{composites}}} = \frac{\frac{dR_{composites}}{dR}}{\varepsilon_L} = (1+2\nu) + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon_L} \quad (2.10)$$

위 식에서 확인 할 수 있듯이 게이지 율에 영향을 미치는 것은 2가지로 구분할 수 있다. 저항체의 기하학적인 변형에 의한 영향인 $(1+2\nu)$ 와 재료의 물

성 변화에 의한 영향 $\frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon_L}$ 이다. 대부분의 탄성물질에서 푸아송 비는 0.1 ~ 0.5

사이의 값을 갖는다. 따라서 일반 금속 스트레인 게이지의 센서 감도에 영향을 크게 미치는 부분은 기하학적인 변형에 의한 영향이다. 하지만 반도체 스트레인 게이지의 경우 게이지 율이 100 이상으로서 이는 물성 변화에 의한 영향이 훨씬 크게 미침을 알 수 있다.

II -5. Percolation threshold

전기 전도도 측면에서 탄소 나노 튜브는 종횡비가 매우 크기 때문에 이를 사용한 복합체 내부에서 3차원적으로 균일한 분산이 이루어졌을 경우 탄소 나노 튜브에 의한 전도성 길목이 형성되어 전기전도도가 급격히 증가하는 percolation threshold 지점이 형성된다. 다시 말하면 전류가 원활하게 흐르기 위하여 전기를 흘리려는 길목의 처음부터 끝까지 전도성 물질들로 연결되어 있는 것이 좋다.

Fig. II-7(a)에서 볼 수 있는 것처럼 폴리머 기지재료 내에 탄소 나노 튜브가 분산되어 있다고 생각해보자. 기지재료 내에 탄소 나노 튜브의 함량이 점점 많아지게 되면 Fig. II-7(b)와 같이 탄소 나노 튜브 간에 터널링 효과가 나타나게 된다. 이때 튜브간 접촉 거리는 약 5nm 이내에서 전자 호핑(hopping)이 이루어져 전기적 전도성을 나타낼 수 있다. 여기서 함량이 점점

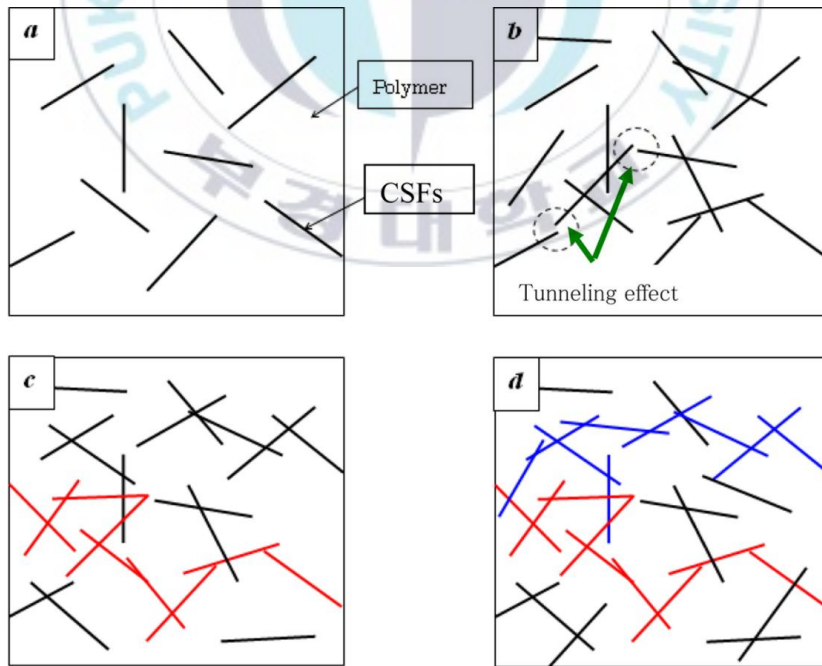


Fig. II-7 Percolation process in conductive composites. [84]

더 많아지게 되면 Fig. II-7-(c)의 적색 경로와 같이 전기 전도 경로가 형성된다. 따라서 Fig. II-8의 c지점에서 확인 할 수 있는 것처럼 전기전도도가 급격하게 증가하는 현상을 보여준다. 이러한 과정을 percolation process라 하며, 이 단계에서 필러 입자의 부피분율을 percolation threshold라 한다. 마지막 단계에서 폴리머 기지재료에 필러 입자를 더 추가하면 Fig. II-7-(d)와 같이 전기 전도성 네트워크를 형성하는 많은 전기 전도 경로가 구성될 수 있고, 복합체의 전기 전도도는 Fig. II-8의 d지점처럼 일정수준 포화치 까지 도달하게 된다.[84, 115~119]

Percolation threshold는 복합재 내부 필러 입자인 탄소 나노 튜브의 종횡비에 따라 다르지만 통상 다중벽 탄소 나노 튜브의 경우 1~2wt%, 단일벽 탄소 나노 튜브는 0.05~0.1wt% 함량에서 발생된다. 튜브의 종횡비가 클수록 percolation threshold가 더 빠르게 나타나는데, 이는 내부 필러가 서로 겹치게 될 확률이 증가하기 때문이다.

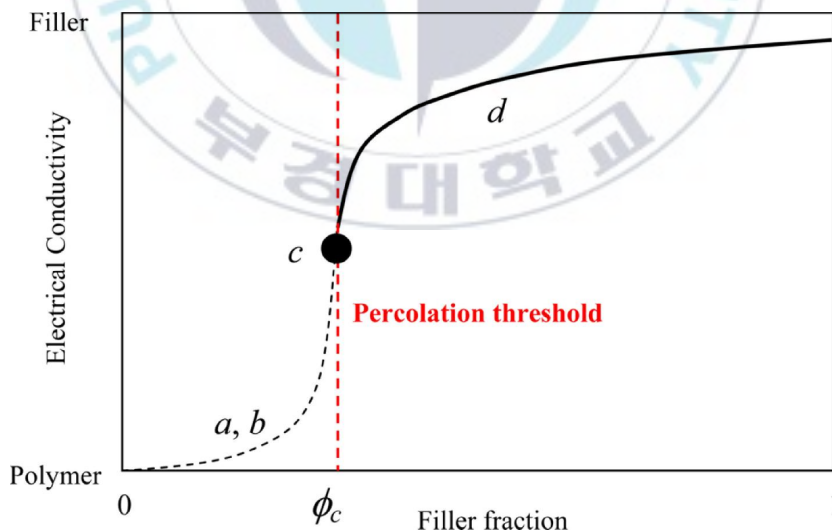


Fig. II-8 Electrical conductivity of conductive composites as a function of filler. [84]

Ⅲ. 탄소 나노 기반 복합재료 제작

Ⅲ-1. 탄소 나노 재료 분산

탄소 나노 재료를 사용하여 복합재료를 제작하는 방법은 매우 다양하다. 똑같은 재료를 사용하여 복합재료를 제작하더라도 배합률, 분산시간, 농도 등이 각 연구 그룹들마다 다르며, 이에 따라 제작된 복합재료 센서의 특성이 각기 달라진다. 특히 복합재료 제작 과정 중 가장 중요한 것은 분산단계이다. 탄소 나노 튜브는 1~100nm의 직경을 가지면서 최대 수십 cm까지의 길이로 합성될 수 있으며, 이들을 엮어 실타래처럼 뽑아내는 기술도 연구되었다.[120~122] 탄소 나노 튜브는 열화학 기상증착법이나 아크방전 법을 주로 사용하여 대량생산하며, 이러한 합성 과정에서 탄소 나노 튜브 입자간 응집현상이 발생한다. 응집은 μm 수준에서 나노 튜브가 각각의 입자로서 다른 입자들과 얹혀있는 물리적 응집과, nm 수준에서 반 데르 발스(Van der Waals)힘과 같은 표면 인력($\sim 950 \text{ meV/nm}$)에 응집되는 화학적 응집이 있다. 이러한 응집현상은 이의 응집 성질이 유지된 채로 복합재료화 시켰을 경우 기계적 강도와 전도 특성을 유발하는 네트워크 구조형성을 방해하여 복합재료의 특성을 저해시키는 원인이 된다. 상당한 시간동안 탄소 나노 튜브가 연구되어 왔지만, 고분자 기지재료(matrix)에 나노 재료가 완벽히 분산되지 않는 문제는 항상 이어져왔다.[123] 따라서 이를 해결하기 위해 효과적인 분산 방법을 기초 수준에서부터 실제 공정 수준에 이르기 까지 초음파 처리, 산 처리를 통한 탄소 나노 재료 외부 표면 기능화, 정전기적 분산, 각종 용매, 계면 활성제 사용 같은 이를 해결하고자 하는 연구가 끊임없이 이어지고 있다.

본 연구에서는 용매와 초음파 처리를 사용하여 탄소 나노 소재를 분산시키는 방법을 이용하였으며, 추가적으로 필요할 시 페이스트 믹서를 사용하여 2차 분산까지 실시하였다. 분자 단위의 단위 소자 등 다양한 응용분야에서 탄

소 나노 튜브를 적용하기 위해서는 용액 상에서 다루는 것이 매우 유용하다. 주로 탄소 나노 튜브를 분산시키는 최적의 용매는 amide 계열이며, 여기에는 N,N-dimethylformamide (DMF), N-methylpyrrolidone (NMP)등이 있다.[124, 125] 하지만 이들은 유독성 물질로써 최근에는 그 사용을 자제하는 분위기가 형성되어있다. 따라서 본 연구에서는 DMF나 NMP보다 비교적 독성이 적은 소량의 메틸렌 클로라이드(methylene chloride)를 주로 사용하였다.

용매를 사용하여 분산하는 방법은 탄소 나노 튜브 고유의 성질을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 적절한 초음파 처리를 통해 길이를 보전할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 용매에 계면 활성제를 사용하여 분산을 좀 더 효과적으로 실시할 수도 있다. 계면 활성제의 역할은 탄소 나노 튜브 표면에 효과적으로 코팅되어 정전기적 반발력이나 스테릭(steric) 반발력을 유도하여 분자간의 힘인 반 데르 발스 인력을 극복하는 것이다.[126, 127] 하지만, 이후 공정에서 계면활성제를 완전하게 제거하는 것은 어려우며, 이로 인해 계면활성제가 복합재료에 불순물로 작용할 수 있기 때문에 본 논문에서는 실행된 연구 전체에서 배제하였다.

III-2. 탄소 나노 복합재료 제작 기법

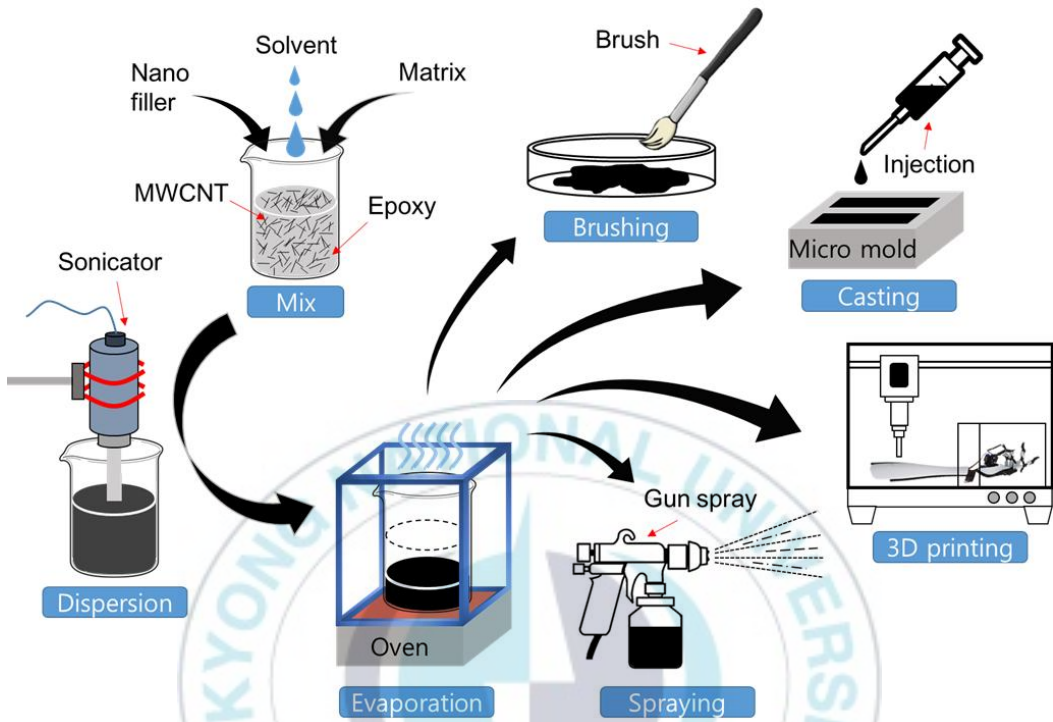


Fig. III-1 Composites fabrication process using carbon nano materials and its application technique.

본 연구에서 주로 사용한 센서 최종 제작 기법은 Fig. III-1에서 볼 수 있듯이 브리싱(brushing), 분무(spraying), 몰드(mold), 3D 프린팅(3D printing)으로 크게 4가지이다. 각 기법별로 장단점이 있으며, 최근에는 3D 프린팅이나 스프레이 기법이 많이 연구되고 있다.[23, 93, 94, 128~131]

먼저 전통적인 제작 방법인 몰드 방법은 복합재료를 제작하는 특수 장치, 장비가 없을 경우 사용자가 원하는 정확한 형태로 제작 및 추가 가공이 용이한 장점이 있다. 따라서 이를 통해 제작된 복합재료는 이의 특성을 거시적으로 확인하기 편하다. 하지만, 복합재료 제작 공정에서 포함되어지는 기포가 주로 문제가 된다. 복합재료에 사용된 내부 필러의 함량이 많거나 기지재료로

사용된 폴리머의 성질등과 같은 요인에 의해 기포 제거가 잘 이루어 지지 않게 되며, 이들이 잘 해결되지 않을 경우 제작된 복합재료 간의 특성차이가 발생되는 단점이 있다.

브러싱(brushing) 기법은 탄소 나노 복합재료를 제작할 경우 실질적으로 거의 사용되지 않는다. 제작에 사용되는 브러시의 종류 또는 도포하는 사람의 솜씨에 따라 제작되는 복합재료의 성질이 달라지기 때문이다. 또한, 브러시의 특성상 복합재료 표면이 고르지 못하며 두께 조절이 힘들어 내부 기포로 인한 오차가 발생할 가능성이 크다. 하지만, 이 기법은 기존의 센서가 부착되기 어렵거나 불가능한 협소한 지점에 대해 손쉽게 도포하여 센서로 적용시킬 수 있으며, 정밀도는 떨어지더라도 대상 구조물의 대략적인 경향을 파악하기에 알맞다.[132]

분무(spraying) 기법은 많은 연구 그룹들에 의해 사용되고 있으며, 복잡한 형상을 가진 대면적의 구조물에 적용이 용이한 방법이다. 복합재료 제작 과정에서 증발이 쉽게 발생하는 용매를 사용할 경우 분무를 실시할 때 대부분 증발되기 때문에 이후 과정인 탄소 나노 혼합액의 경화가 빠르게 진행될 수 있다. 또한 이 방식은 용매가 어느 정도 증발되면서 폴리머와 탄소 나노 재료를 목표지점에 적층 및 코팅을 쏘듯이 빠르게 흩뿌리게 되므로 미세 기포는 어느 정도 포함되나 마이크로 사이즈의 기포는 잘 발생하지 않는다. 분무 기법을 사용하는 사용자의 숙련도나 분무 되는 순간 탄소 나노 혼합액의 양에 의해 두께 조절이 힘들어 제작된 복합재료 간의 특성에서 오차가 발생하게 된다. 하지만 분무되는 혼합액의 양 또는 기계적으로 분무 장치의 움직임을 정량적으로 제어가 가능할 경우 이들 제작에서 일관성을 유지할 수 있다.

3D 프린팅 기법은 4차 산업혁명이 대두되면서 이에 3D프린터의 활용의 언급으로 인해 많이 연구되고 있는 방법이다. 기존의 적층형 3D프린팅으로 제작된 구조물들은 단순 구조물 형태로서, 주로 케이싱(casing)으로 활용이 많이 되고 있다. 탄소 나노 복합재료를 3D 프린팅을 사용하여 제작할 경우 수요자가

원하는 성능, 원하는 형태의 힘/변형 센서 및 기능성 구조물의 자가 제작이 가능해지며, 이를 활용한 다양한 기술들이 수요자들에 의해 대중적으로 개발될 수 있다. 하지만, 적층형 3D 프린터 재료로 사용되는 상용 전도성 필라멘트의 종류가 제한적이다. 그러기에 사용자가 원하는 특성의 복합재료를 만들기 위해서 전도성 필라멘트를 직접 제작하여야 하는데[129], 이는 앞서 탄소 나노 혼합액을 만드는 과정보다 복잡하고 까다롭기 때문에 쉽게 접근하기 어렵다. 또한, 적층형 3D 프린팅 방식은 필라멘트(filament)를 고온으로 녹여 적층시키기 때문에, 이의 고열로 인하여 필라멘트 내의 탄소 나노 재료가 열 손상을 입게 되어 복합재료 특성 저하 및 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문의 3장 압력센서 에서 3D 프린터를 이용하여 압력 센서를 위한 기계적 구조물을 제작하였으며, 감응 재료로 전도성 필러 기반의 필라멘트를 사용하지 않고 이를 탄소 나노 혼합액으로 대체하여 실험을 실시하였다.

IV. 탄소 나노 기반 복합재료 센서

IV-1. 브러시 기법 활용 토크 센서

IV-1-가. 허브-스포크 타입 토크 센서 모델링 및 구조해석

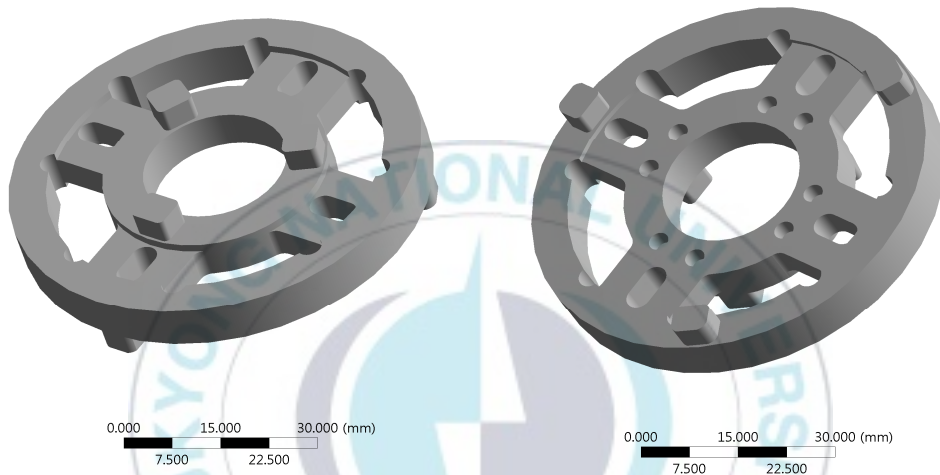


Fig. IV-1 Hub-spoke type joint torque sensor body modeling using ANSYS.

토크(torque) 센서는 주로 로봇(robot) 분야에서 사용되고 있으며, 이를 제어하기 위해서 많은 방법들이 사용되고 있다. 기존에 모터 인가 전류를 사용하는 방법이 많이 사용되었으나 이는 매니퓰레이터(manipulator)의 응답속도 및 정확도에 한계가 있었다. 또한 6축 힘/토크 센서도 많이 활용 되었으나 힘/토크 성분을 직접 측정할 수 있는 장점을 가지고 있지만 센서 내부구조의 복잡함, 제작 과정에서의 숙련도 요구 등의 문제가 있다. 이들 문제점을 개선하기 위하여 허브-스포크(hub-spoke) 형상의 다양한 토크 센서가 활용되고 있다.

금속 타입 스트레인게이지는 6축 힘/토크 센서, 허브-스포크 타입 토크 센서 등에 많이 활용되고 있다. 하지만 반복적인 작업에서 손상을 입기 쉬우며 작은 크기 또는 복잡한 형상에 부착하기 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라

A: Static Structural
 Equivalent Elastic Strain
 Type: Equivalent Elastic Strain
 Unit: mm/mm
 Time: 1

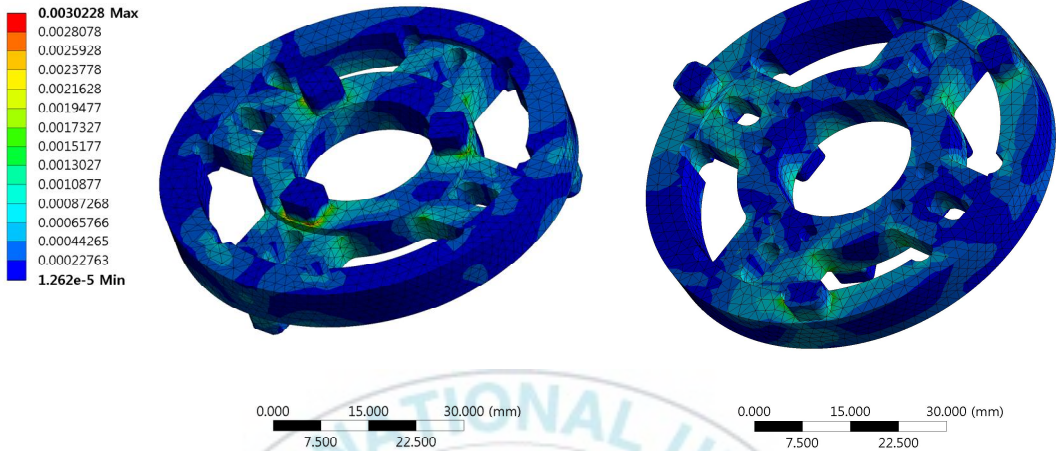


Fig. IV-2 FE(Finite Element) analysis to install MWCNT strain sensor electrodes.

서 본 실험에서는 기존의 상용 스트레인 게이지가 가지는 문제점을 해결하고자 탄소 나노 기반 스트레인 게이지를 활용하여 허브-스포크 타입의 토크센서를 제작하고 실험을 실시하였다.

허브-스포크 타입의 토크센서의 최외곽 지름은 66mm이다. 총 4개의 스포크가 있으며, 토크가 가해졌을 때 본체를 잡아주기 위한 돌출부가 내부 링에 3개, 외부 링에 3개로 구성되어 있다. ANSYS-Workbench를 사용하여 모델링을 실시하였으며 이를 Fig. IV-1에 나타내었다. 이후 탄소 나노 기반 스트레인 게이지를 적정 지점에 부착하기 위하여 ANSYS를 이용하여 허브-스포크 타입 토크센서 본체에 토크가 가해졌을 경우 스트레인이 많이 발생하는 지점을 Fig. IV-2와 같이 확인하였다. 내, 외부 링 돌출부를 고정시키고 본체를 회전시켰을 때 각 스포크 옆면 에서 스트레인이 다른 부분에 비해서 많이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 스포크 옆면부에 탄소 나노 기반 스트레인 게이지를 적용하여 실험을 진행하였다.

IV-1-나. 탄소 나노 기반 스트레인 센서 특성 실험

IV-1-나-(1). 실험 장치 구성 및 방법

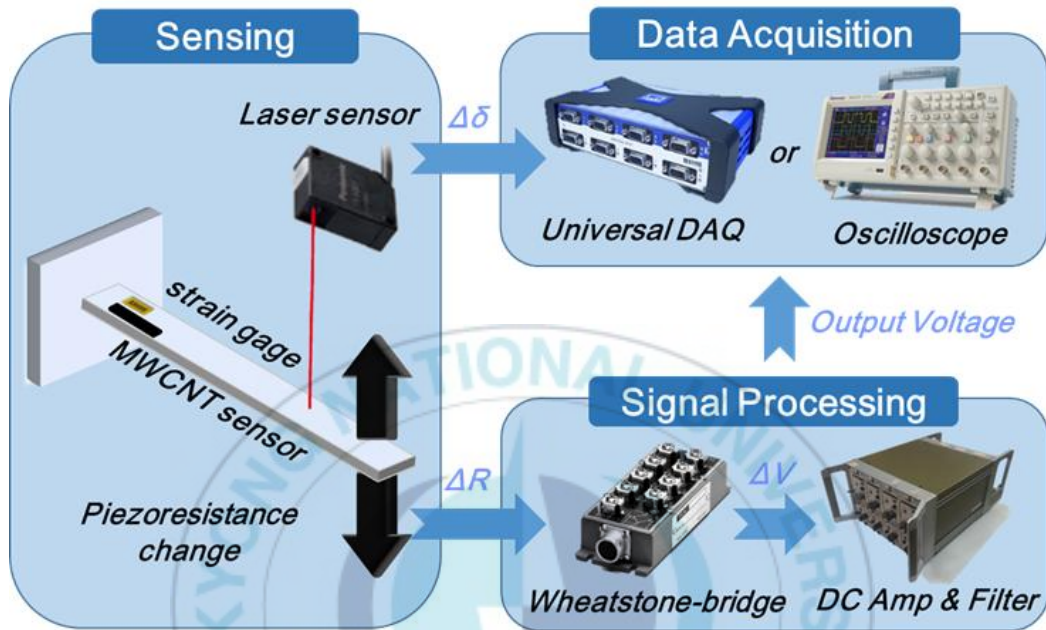


Fig. IV-3 Experiment setup for piezoresistive characteristics of the strain sensor electrodes.

MWCNT/epoxy 센서 전극 샘플의 전왜 특성을 확인하기 위하여 Fig. IV-3과 같이 장치를 구성하여 실험을 실시하였다. 상용 포일 스트레인 게이지 (CAS, AP-11-S30N-120)와 MWCNT/epoxy 센서 전극을 외팔보 고정단으로 부터 일정 거리 떨어진 곳에 부착하였다. 외팔보 자유단 끝에 인위적으로 변형을 가하고 이를 레이저 센서(Laser sensor, KEYENCE, IL-300)를 사용하여 측정하였다. 측정된 변위는 간단한 수식을 통해 센서 부착부에 발생하는 스트레인으로 환산하여 사용하였다. 센서 부착부에 스트레인이 발생하였을 때, MWCNT/epoxy 센서 전극이 가지는 전왜성으로 인해 센서 전극 자체 저항의 변화가 발생하게 된다. MWCNT/epoxy 센서 전극의 저항의 변화는 휘스톤 브릿지 박스

(Whetstone-bridge box, San-ei Instruments, N4297)를 통해 미소 전압 출력으로 나오게 되며 이는 DC 앰프(DC amp, San-ei, N5901)을 거쳐 약 50dB로 증폭, 100Hz 로우-패스 필터링(Low-pass filtering) 되었다. 증폭된 센서의 출력전압 신호 데이터는 오실로스코프(Oscilloscope, TekTronix, TDS2014B) 또는 DAQ(Data acquisition, HBM, MX840A)장치를 통해 취득하였다.



IV-1-나-(2). 전왜 특성 실험 결과

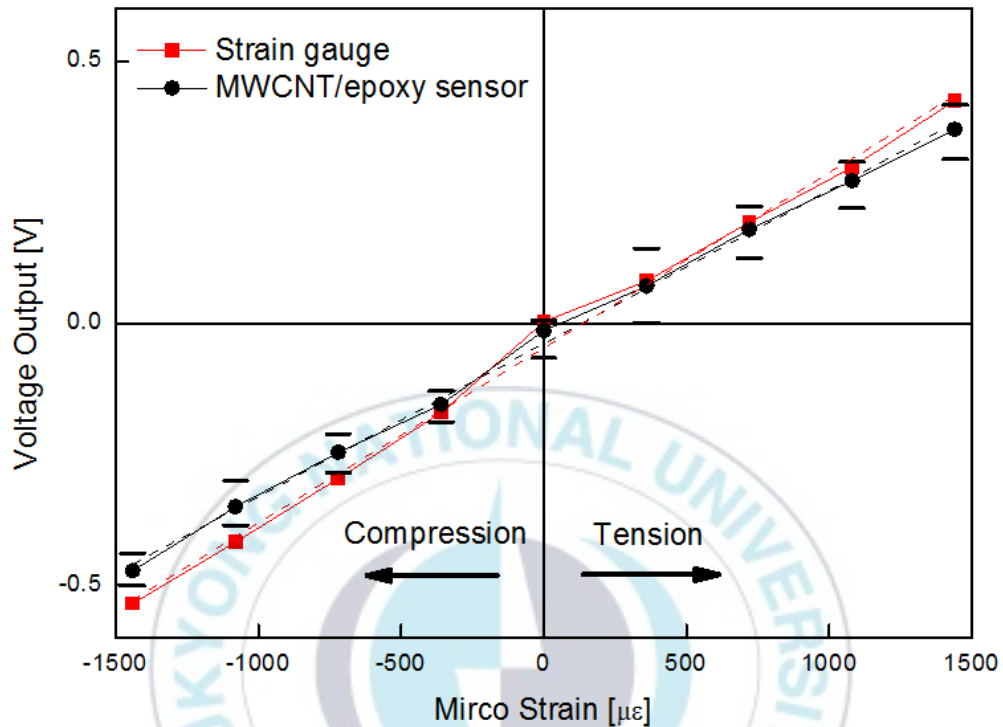


Fig. IV-4 Characteristics of the MWCNT/epoxy electrode and strain gauge with respect to strain variation under tension and compression.

MWCNT/epoxy 센서 전극과 포일 타입 스트레인 게이지를 동시에 사용하여 전왜 특성 비교 실험을 실시하였으며 그 결과를 Fig. IV-4에 표시하였다. 그래프 중앙을 기점으로 좌측은 압축력, 우측은 인장력이 작용한 경우이다. MWCNT/epoxy 센서 전극의 출력 전압 값은 동일조건에서 8번 반복 측정 후 이를 평균화하여 나타내었으며 위아래로 최대, 최소값을 표기하였다. 이는 상용 포일 타입 스트레인 게이지의 게이지 율은 약 2.1이며 MWCNT/epoxy 센서도 이와 비슷한 경향임을 보여준다. 또한, MWCNT/epoxy 센서 전극은 경질(hardening)의 폴리머인 에폭시를 사용하였기 때문에 압축, 인장에 대해 방향성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

IV-1-다. 탄소 나노 기반 토크 센서 센싱 특성 실험

IV-1-다-(1). 센서 적용 방법 및 실험 장치 구성

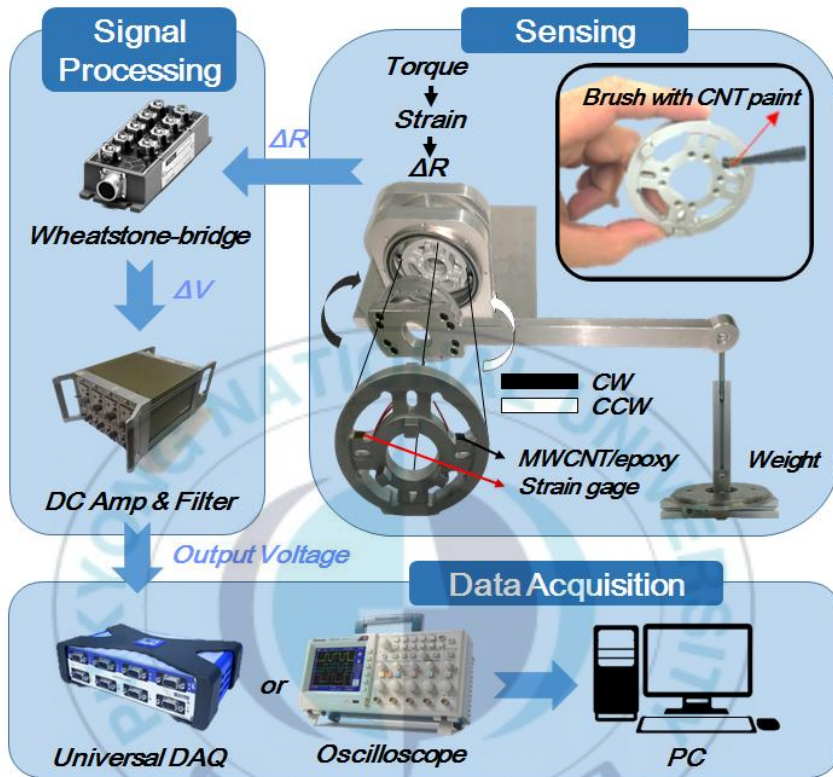


Fig. IV-5 Experimental setup for torque measurement.

센서 본체부 스포크 한쪽 옆면에 에폭시와 MWCNT기반의 혼합액(emulsion)을 붓을 이용하여 도포한 후 경화시켜 주었다. 제작된 센서의 신호를 받기 위해 센서 전극 양 끝에 전도성 은(silver) 에폭시와 접착(adhesive) 에폭시를 이용하여 전선을 연결하였다. 상용 스트레인 게이지와 센서 신호 비교를 위해 반대쪽 스포크에 옆면에 포일 스트레인 게이지를 부착하였다. 완성된 탄소 나노 기반 스포크 타입 조인트 토크 센서는 Fig. IV-5에서 볼 수 있는 것처럼 실험 장치에 결합되었다. 실험에서 가해진 토크는 외팔보 형태의 끝단에 무게 추를

이용하여 생성되었으며 토크의 크기는 0Nm부터 48Nm 까지 12Nm 단위로 시계방향, 시계반대방향으로 가해졌다. 토크 센서에 토크가 가해지면 토크 센서의 스포크에 스트레인 발생된다. 구조물에 발생된 스트레인은 스포크에 접촉되어 있는 스트레인 게이지, 탄소 나노 기반 센서 전극에 각각 전달되며 이들이 가지고 있는 전왜성으로 인해 이들 센서의 저항이 변하게 된다. 센서 저항의 변화는 휘스톤 브릿지 박스(San-ei, N4297)를 통해 미소 전압으로 출력되며, 이를 증폭기와 필터(San-ei, N5901)를 거쳐 약 50dB로 증폭되며 100Hz 로우-패스 필터링 시켰다. 증폭된 센서의 출력전압 신호 데이터는 오실로스코프(TekTronix, TDS2014B) 또는 DAQ(Data acquisition, HBM, MX840A)장치를 통해 취득하였다.



IV-1-다-(2). 탄소 나노 기반 토크 센서 센싱 실험 결과

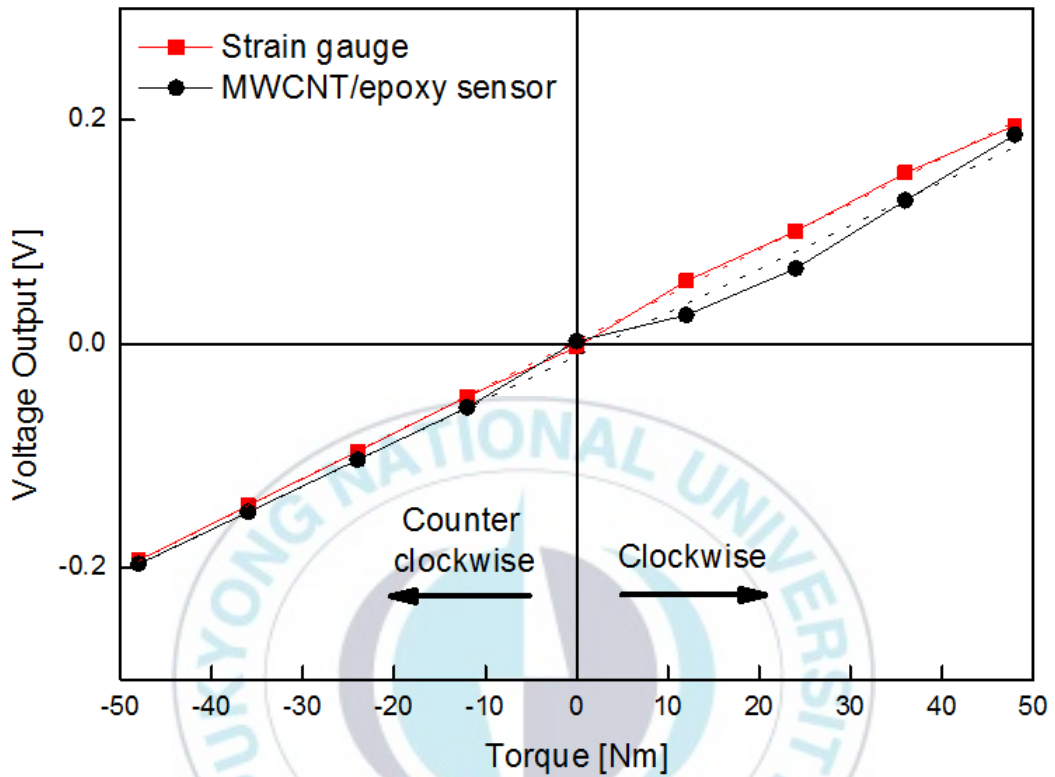


Fig. IV-6 Voltage outputs of the MWCNT/epoxy electrode and the foil strain gauge under torque variation.

MWCNT/epoxy 센서와 포일 스트레인 게이지 출력신호는 Fig. IV-6과 같이 시계방향, 역시계방향 토크에 대해 두 센서 모두 양호한 선형성을 보여주고 있다. MWCNT/epoxy 센서의 감도는 약 $3.9[\text{mV}/\text{Nm}]$ 로 측정되었으며, 스트레인 게이지의 감도는 약 $4.1[\text{mV}/\text{Nm}]$ 로 측정되었다. 하지만 인장방향으로 토크가 가해지는 시계방향에서 MWCNT/epoxy 센서의 출력 전압은 약간 왜곡된 응답을 보였다. 이러한 부분은 탄소 나노 기반 복합재료 제조 공정상의 결함에 기인한 것으로 추측된다. 붓을 사용하여 직접 도포한 작은 사이즈의 센서 전극은 온전한 형상의 고체 전극으로 형성되기에는 불완전함을 가지고 있다. 이러

한 결함은 인장이 가해질 때 센서 전극에 가해지는 토크 전달을 방해 할 수 있으며 결과적으로 비선형적인 응답을 유발하게 된다. CNT기반의 센서 전극의 전왜성은 복합재료 내부의 필러의 접촉조건에 기인하여 발생한다. 따라서 안정적인 제작 공정이 확립이 되면 이러한 약간의 비선형적인 요소를 보완할 수 있을 것이다.



IV-2. 몰드 기법 활용 압력 센서

IV-2-가. 단순 몰드법 활용 탄소 나노 기반 압력 센서

IV-2-가-(1). 압력 센서 제작

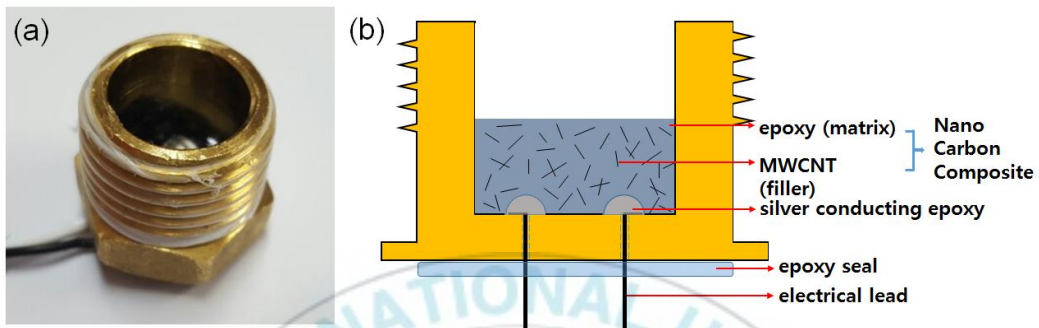


Fig. IV-7 The pipe plug type pressure cap sensor based on the MWCNT/epoxy nano composite.

압력센서에서 압력을 전기저항의 변화로 감지할 센서 전극부를 구성하는 탄소 나노 기반 복합재료는 나노 복합소재 몰드 공정으로 제작하였다. 나노 필러(filler)인 MWCNT(Hanhwa chemical, CM-280)는 기지재료인 액상의 에폭시(Kukdo chemical, YD-128)를 용매인 염화메틸(methyl chloride)과 혼합시킨 후 초음파 분쇄기(Sonicator, Branson, 450)를 이용하여 용매 내에 균일하게 분산시켜 나노 분산액을 준비하였다. 제작된 센서에서 충전재의 함량은 센서감도와 상관관계 실험결과를 기반으로 감도가 급격히 변화되는 2wt%(weight percent) 부근을 최적 함량비로 선정하여 압력 센서를 제작하였다. 분산된 용액은 프로그래머블 오븐(programmable oven)에 넣어 용매를 증발시킴으로써 제작에 적절한 농도로 조절한 후 경화제를 섞어준 뒤 진공 오븐 내에서 50°C 조건에서 30분간 탈포시켰다. 용매증발, 탈포 과정을 거치지 않고 몰드방식으로 센서를 제작할 경우 건조 응고 단계에서 용매가 끓어오르며 기공(void)이 MWCNT/epoxy 센서 내 외부에 발생해 센서의 전기적 성능 및 기계적 성능을

저해시키기 때문에 이는 몰드식 센서 제작 방법에서 필수적인 단계이다. 이후 센서 본체가 될 파이프 플러그 캡(pipe plug cap) 내부에 적당량을 도포시킨 후 건조 응고시켜 센서의 전극부를 형성시켰다. 제작된 파이프 플러그 타입 압력 센서는 Fig. IV-7 (a)와 같다. 센서 전극부에 압력이 가해졌을 때 이것이 가진 전왜성으로 인해 발생하는 저항의 변화를 측정하기 위하여 파이프 플러그 캡 외부에 전선(electrical lead)을 관통시킨 후 센서 전극부와 전선 끝이 맞닿는 부위를 전도성 에폭시(Elcoat, P-100)를 이용하여 표면에 접합시켰다. 연결된 전극과 플러그 사이 틈새는 에폭시 접착제를 사용하여 기밀을 유지하도록 하였다. 파이프 플러그 타입 압력 센서의 전체 구성도는 Fig. IV-7 (b)에 나타내었다.



IV-2-가-(2). 압력 센서 실험 장치 구성 및 방법

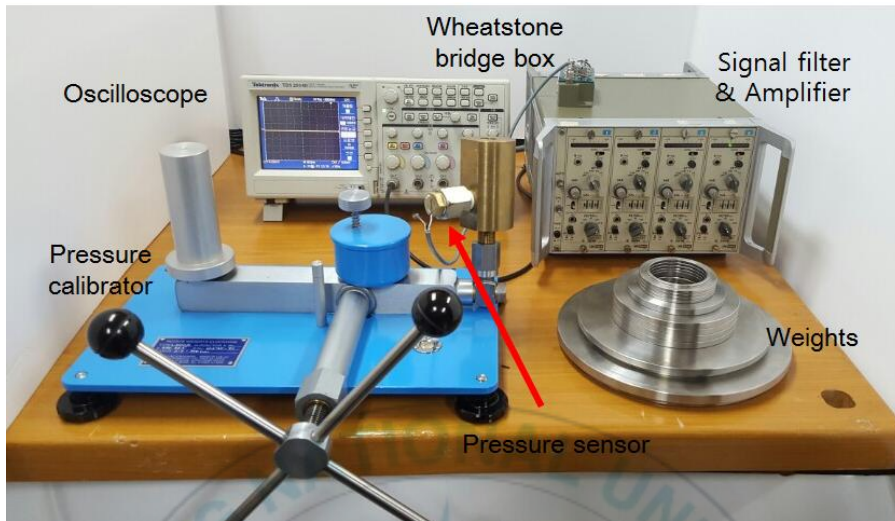


Fig. IV-8 Experimental setup for pressure sensing characteristics.

탄소 나노 기반 압력센서에 가해지는 압력 변화에 따른 전왜특성을 압력 교정에 이용되는 정밀 분동식 압력교정기(pressure calibrator, Pressurements LTD, L1500)를 이용하여 Fig. IV-8과 같이 실험 장치를 구성하였다. 센서 출력 특성은 무게 추를 이용하여 압력을 조절하면서, 전기 신호로 계측할 수 있도록 외부의 신호처리 시스템과 함께 구성되어 있다. 실험 압력은 분동식 압력교정기 전면부의 레버를 이용하여 내부 유압로의 압력을 상단의 환봉에 장착된 추의 무게를 이용하여 정밀하게 제어할 수 있다. 교정기의 압력 변화는 탄소 나노 복합재료가 가지는 전왜성으로 인하여 센서 내부에 장착된 전극의 저항 변화를 발생시킨다. 이러한 저항의 변화는 휘스톤 브릿지 박스(Wheatstone bridge box, San-ei Instruments, N4297)를 통해 미소 전압 출력으로 나오게 되며 이를 DC 앰프(DC amp, San-ei Instruments, N5901)을 거쳐 약 40dB로 증폭, 10Hz 로우-패스 필터링 시켰다. 증폭된 센서의 출력 전압 신호 데이터는 오실로스코프(Oscilloscope, TekTronix, TDS2014B)를 통해 취득하였다.

IV-2-가-(3). 압력 센서 센싱 실험 결과

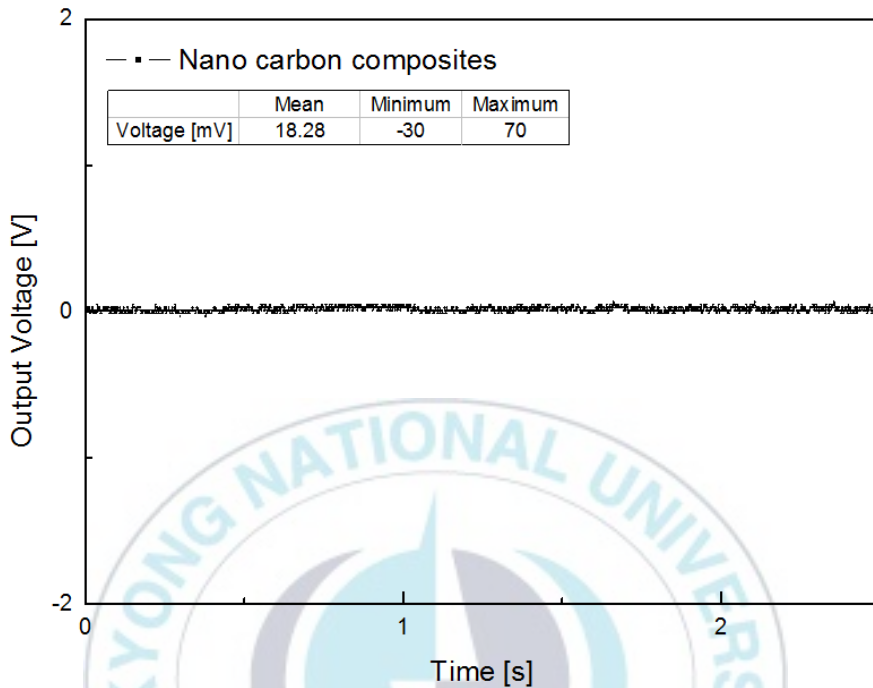


Fig. IV-9 Output voltage response of MWCNT/epoxy composites without load(zero drift test).

먼저 제작한 센서의 신호 안정성을 확인하기 위하여 실험 장치에 센서를 결합한 후 센서의 제로드리프트를 확인하였다. Fig. IV-9에서 확인할 수 있듯이 0mV를 기준으로 무부하시 센서 신호의 떨림은 하한 -30mV부터 상한 70mV 정도였으며, 평균 약 18mV의 변동을 확인할 수 있었다. 이는 신호처리 과정에 따라 차이가 날 수 있지만 본 결과를 토대로 추후 실험을 실시하기에 문제가 없다 판단하였다.

제작한 센서의 압력 변화에 따른 출력전압의 변화를 조사하기 위하여 유압 분동식 압력 교정기에 0kPa부터 8000kPa까지 500kPa 단위로 증가시키며 해당 조건의 출력 저항을 수차례 걸쳐 측정하였다. 반복 실험의 결과는 매 회 유사하게 나왔으며 그 중 한 결과를 Fig. IV-10에 도시하였다. 가해지는 압력

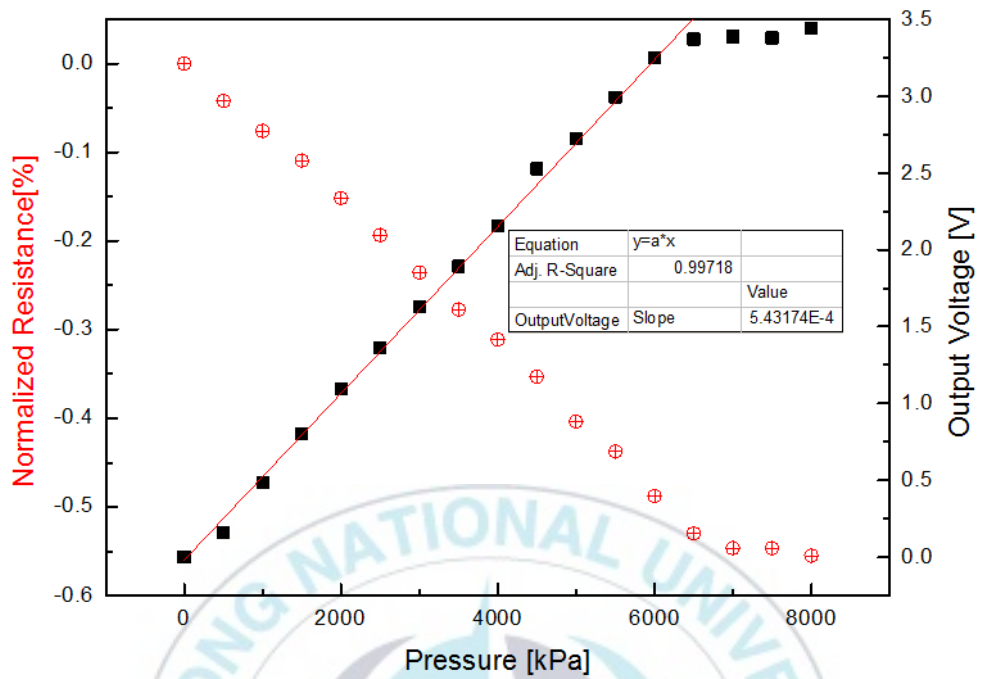


Fig. IV-10 Experiment of the pressure sensor voltage output and its resistance change of MWCNT/epoxy electrode under static pressure.

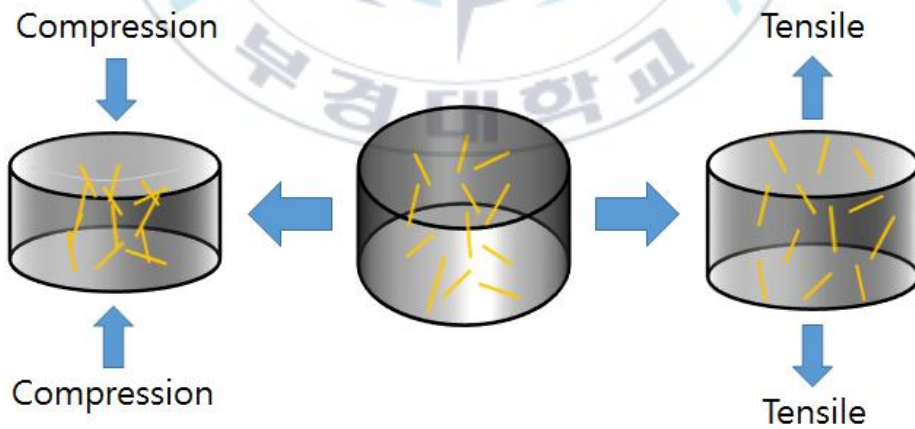


Fig. IV-11 Schematic illustration of carbon nano composites piezoresistivity mechanism.

이 점점 커질수록 탄소 나노 복합소재의 저항 변화는 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 탄소 나노 복합재료가 가지는 전왜 메커니즘에 기인한 것으로 Fig. IV-11과 같이 수직방향으로 센서에 압력이 작용할 때 MWCNT/epoxy 복합재료 내부에 갇혀있는 탄소 나노 필러들의 사이간격이 좁아지며 필러 접촉 조건이 활발하게 이루어지기 때문이다. 즉, 전도성을 가진 필러들의 거리가 가까워져 탄소 나노 복합재료의 전기전도성이 향상되는 것이다. 또한 이를 신호처리 시스템을 통하여 전압으로 변환하여 Fig. IV-10에 도시하였다. MWCNT/epoxy 전왜성을 이용한 압력센서는 0~6000kPa 영역의 압력 범위에서 양호한 선형적 전압 출력 특성을 보였다. 이러한 압력 측정 범위는 일반적으로 고압센서의 압력 측정 범위인 700~3500kPa 영역 이상에도 적용이 가능함을 보여준다. 하지만 약 6500kPa 이상의 조건에서는 압력이 증가하더라도 센서의 전기적 특성이 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 파이프 플러그 캡 내부에 탄소 나노 복합소재가 갇혀있으면서 센서 상부에 압력이 가해져오기 때문에 기지재료(matrix)가 변형될 수 있는 공간적 한계 및 복합소재 내부에 갇혀있는 필러가 더 이상 좁혀질 수 없는 단계에 도달했기 때문이라 추측된다. 따라서 이 이상의 압력이 가해졌을 경우 내부 필러의 기본 배열이 깨져 전기적 저항이 일정한 방향을 가지지 않게끔 움직이게 된다.

IV-2-나. 3D 프린팅 구조물 몰드 탄소 나노 기반 압력 센서

IV-2-나-(1). 3D 프린팅 구조물 기반 압력 센서 제작

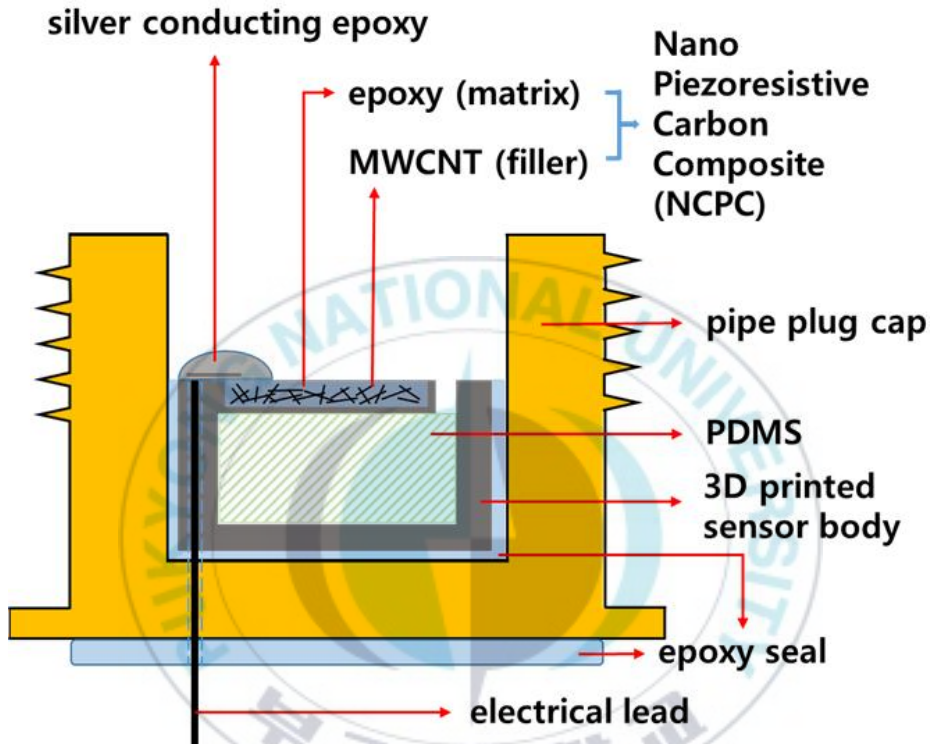


Fig. IV-12 Schematic diagram of 3D printed cantilever type pressure sensor based on nano carbon composite.

적용대상의 압력을 더 넓은 범위에서 계측하기 위하여 압력에 의한 변형이 쉽게 발생하는 구조물과 이 변형을 정량적인 전기신호로 변환해 줄 수 있는 센서 전극을 설계하고 제작하여 실험을 실시하였다. 압력 센서의 전극은 3D 프린터(3D printer, Flashforge USA, Dreamer)를 활용하여 몰드(mold)식 외팔보 형태의 소형 구조물을 제작하였으며, 몰드 내부에 탄소 나노 혼합액을 이용하여 변형을 전기적 저항 변화로 측정 가능하도록 Fig. IV-12와 같이 설계 제작하였다.

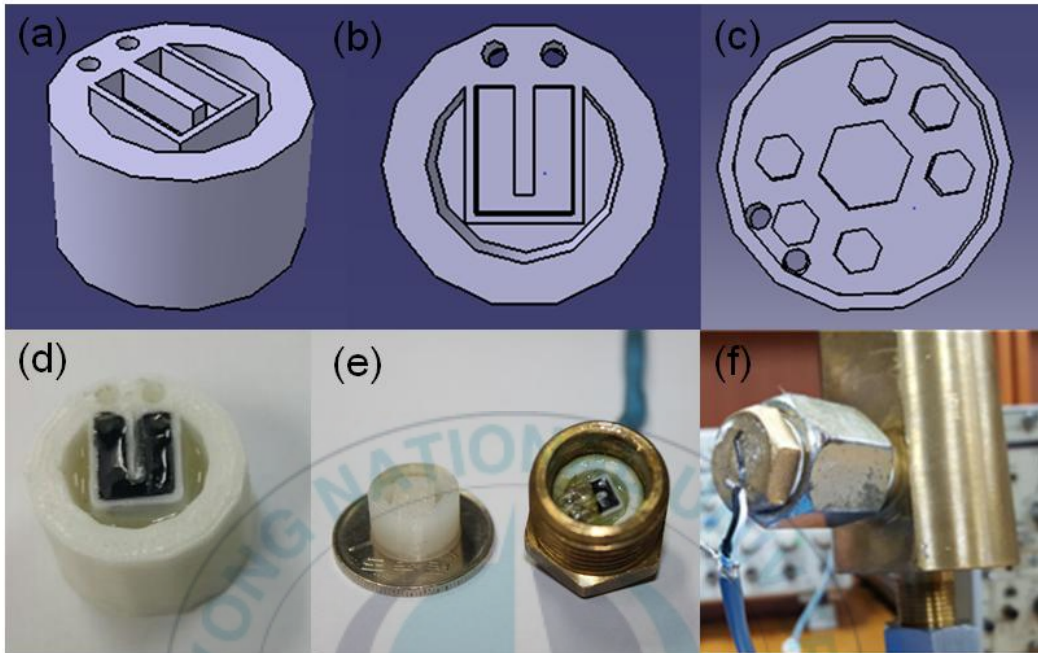


Fig. IV-13 The pressure sensor design by using CATIA(outer diameter: 14.5mm, height 9mm): (a) the sensor body; (b) the top side with the cantilever; (c) the bottom side with 2 electrode holes; (d) cantilever sensor electrode filled with nano carbon composite (black) in the ABS sensor body (white); (e) the sensor body plugged in the piper end cap; and (f) the sensor installation on a pressure standard jig on the calibrator.

탄소 나노 혼합액 제작 공정은 IV-2-가-(1)절과 동일하게 이루어졌다. 센서 본체부는 Fig. IV-13 (a)~(c)와 같이 설계 프로그램 CATIA를 이용하여 설계하였다. 압력 센서는 설치 시에 배관 시스템에 쉽게 장착하기 위해 파이프 플러그 캡(pipe plug cap) 형태로 제작하였으며, 상용 제품을 센서 케이싱(casing)으로 활용하였다. 따라서 압력 센서 본체부의 크기와 형태는 파이프 플러그 캡에 삽입이 충분히 가능한 형상과 크기로 설계되었다. 본체부 중앙부분은 비어있으며 본체부 내벽에는 센서 상부에 압력이 가해졌을 때 변형이 발생하는 외팔보 구조물을 위치시켰다. 외팔보는 몰드(mold)형식으로 제작하여 탄소 나노

혼합액을 채워 경화시켜 전왜성을 지닐 수 있도록 하였다. 외팔보 전극의 양 끝단에 2개의 전기 도선을 연결하기 위하여 Fig. IV-13 (b)와 같이 ‘ㄷ’자 형상으로 설계하였으며 센서 몸체 전체를 관통하는 2개의 전기 도선 통과 구멍을 형성시켰다. 센서 본체의 하단에는 Fig. IV-13 (c)와 같이 몸체를 관통하는 2개의 전기도선이 케이싱인 파이프 플러그 캡 바깥쪽으로 통과하기 위한 빈 공간을 형성하였으며, 센서 상부에서 압력이 가해졌을 때 이러한 빈 공간에 의해 센서 몸체부가 변형되는 것을 막기 위한 지지대를 총 7군데 제작하였다. Fig. IV-12는 케이싱인 파이프 플러그 캡에 3D프린터로 제작된 ABS수지의 센서 몸체와 외팔보 전극 몰드 내부에 탄소 나노 혼합액을 채우고 전극을 연결시켜 완성시킨 센서의 구성도를 도시하고 있다. 센서 본체부의 외팔보 아래 공간에는 유연성을 지닌 PDMS(polydimethylsiloxane)를 채워 넣어 고압력에 대해 ABS 수지로 제작된 외팔보 전극을 보호하였다. 센서의 전기적 저항의 변화는 케이싱 외부에 전기 도선을 관통시킨 후 이를 탄소 나노 기반 복합재료 전극 끝부분에 전도성 에폭시(Elcoat, P100)를 이용하여 연결시켜 출력할 수 있도록 하였다. 센서 본체부를 케이싱에 삽입시킨 후 그 틈새에 접착성 에폭시를 침투시켜 기밀을 유지하도록 제작하였다. Fig. IV-13 (d), (e)에 제작 완료된 센서의 사진을 도시하였으며, Fig. IV-13 (f)에서 정밀 분동식 압력교정기(pressure calibrator, Pressurements LTD, L1500)에 장착한 모습을 확인할 수 있다.

IV-2-나-(2). 3D 프린팅 기반 압력 센서 센싱 실험 결과

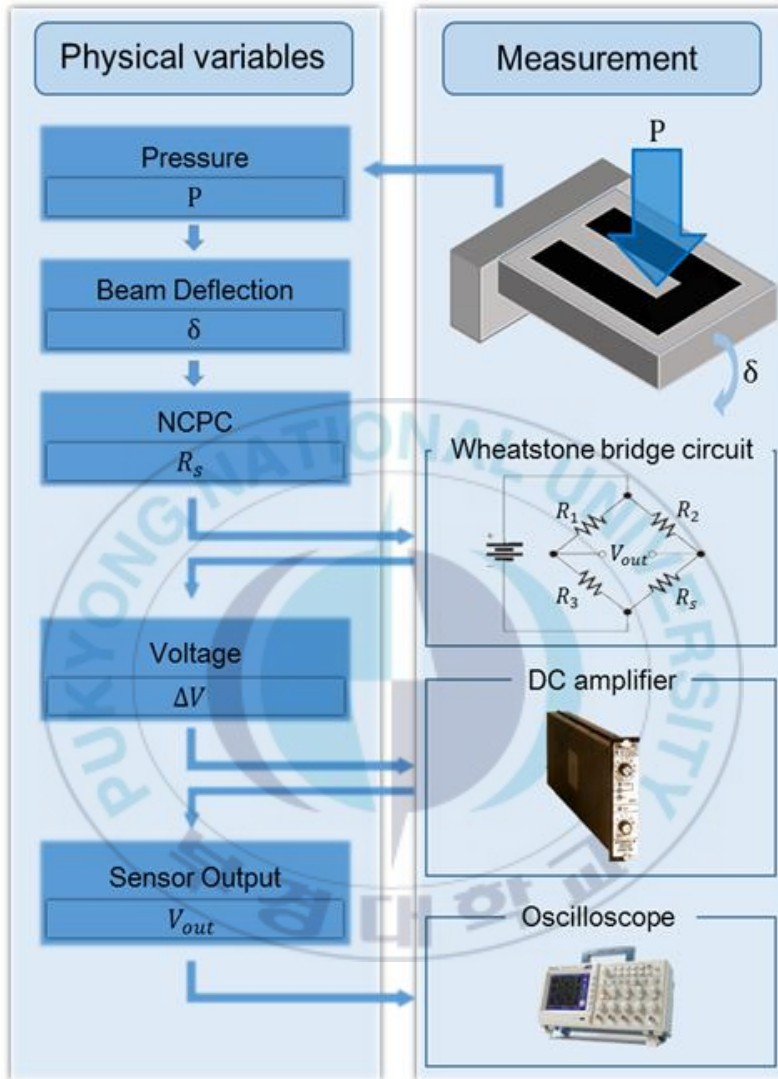


Fig. IV-14 Schematic illustration for the signal processing of the 3D printed pressure sensor based on nano carbon composite.

실험 장치 구성은 IV-2-가-(2)와 동일하며 IV-2-가-(3)절에서 센서에 가해지는 압력에 대해 발생하는 변형의 형태와는 다르게 3D 프린팅 구조물을 활용한 센서에 가해지는 압력(P)는 Fig. IV-14에 도시한 바와 같이 소형 외팔보 구조

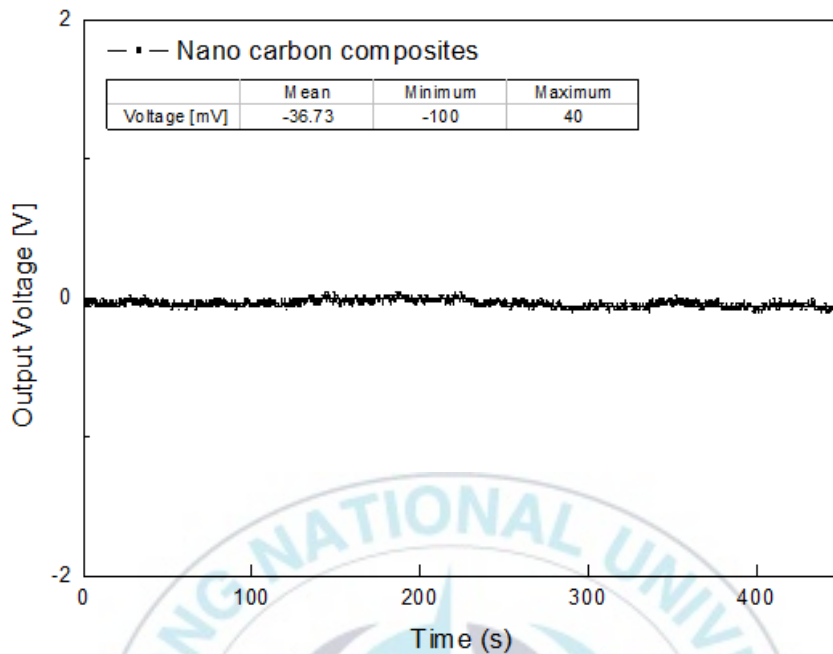


Fig. IV-15 Output voltage response of 3D printed cantilever electrode without load(zero drift test).

물의 변형을 유발시키며 이는 연속적으로 탄소 나노 기반 복합재료로 제작된 전극의 전기저항 변화를 유도한다.

안정된 압력계측을 위해서는 제작된 센서로부터 장시간 안정된 출력전압을 얻어야 하며 Fig. IV-14의 신호처리 과정을 거쳐 Fig. IV-15와 같은 출력 전압 신호를 얻어 내었다. 압력 센서에 압력을 인가하지 않은 무부하 상태에서 약 400초가량 전압을 측정하여 신호를 획득하였다.

압력 변화에 따른 압력 센서의 출력 전압의 변화는 유압 분동식 교정기에 0kPa부터 16,500kPa까지 500kPa 단위로 증가시키며 해당 조건의 출력 전압을 확인하였다. 벌크 타입(bulk type)의 센서는 IV-2-가-(3)절의 실험결과와 마찬가지로 약 6,500kPa 이상의 압력 단위에서 출력 전압 신호가 포화되는 것을 Fig. IV-16에서 확인할 수 있다. 하지만 3D 프린팅 구조물을 활용한 압력센서의 경우 포화 상태에 도달하지 않고 선형적으로 출력 전압이 따라가는 것뿐

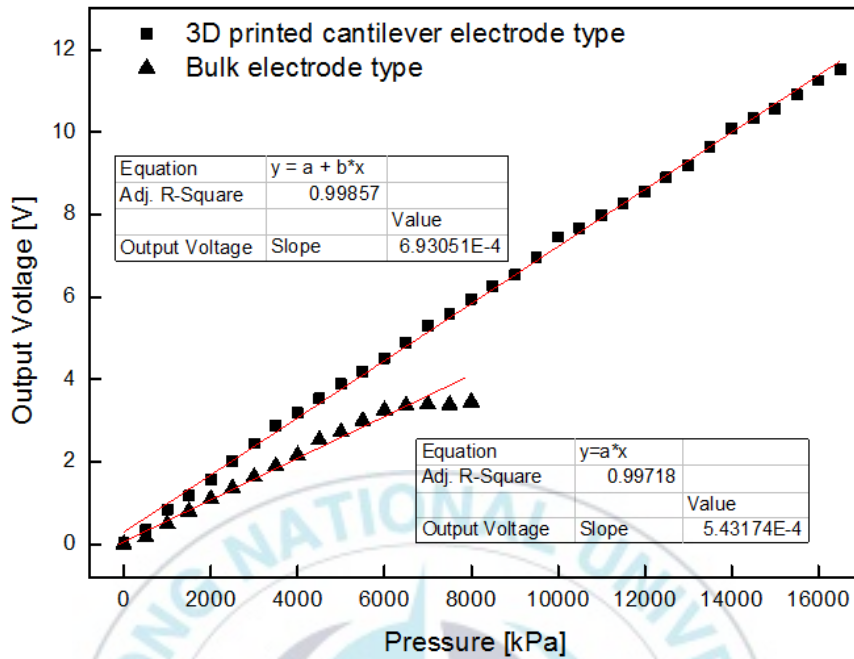


Fig. IV-16 Experiment of the 3D printed cantilever electrode type and bulk electrode type pressure sensor voltage outputs under static pressure.

만 아니라 벌크 타입 압력 센서보다 약 200% 이상 더 높은 압력 범위인 16,500kPa까지 측정 가능함을 확인 할 수 있다. 이는 외팔보 구조물을 활용하여 압력에 대해 변형이 발생하기 쉬운 환경을 만들어 주었기 때문이다. 더 높은 압력 단계에서의 실험은 실험기기의 성능한계와 안전성 문제로 인해 실시하지 못하였으며 향후 이러한 문제점들에 대해서 보완이 된다면 더 높은 압력 측정까지 가능할 것으로 추측된다.

IV-3. 분무 기법 활용 충격 센서

IV-3-가. 분무 방식을 활용한 하이브리드 필러 복합재 센서 제작

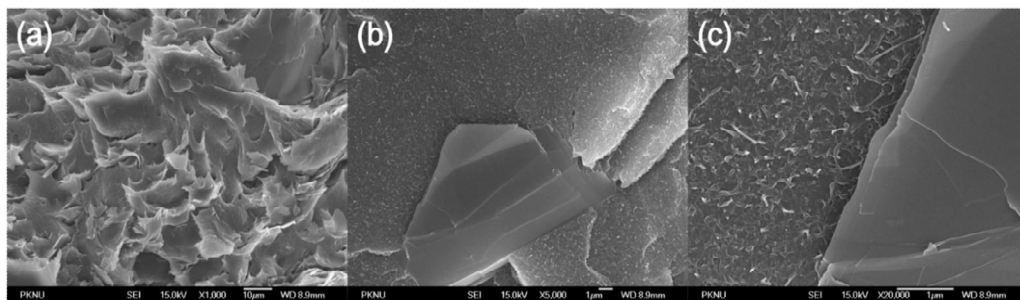


Fig. IV-17 Morphology of the multi-walled carbon nanotube (MWCNT)/exfoliated graphite nano-platelets (xGnP)/polystyrene (PS) hybrid type smart paint sensor.

3가지 유형의 스마트 페인트 센서인 MWCNT/epoxy, xGnP/Polystyrene, MWCNT/xGnP/Polystyrene를 나노 복합재 제작 공정을 통해 제조하였다. 탄소 나노 필러는 기지재료인 에폭시 또는 폴리스티렌과 같은 폴리머와 함께 전부 3wt%의 비율로 혼합되었다. 이들 혼합액은 디메틸포름아미드 또는 메틸렌클로라이드를 사용하여 용해되었으며 초음파 분산기(sonicator)를 사용하여 약 40W로 30분간 분산이 실시되었다. 분산된 용액은 오븐에 넣어 용매를 증발시킴으로써 제작에 적절한 농도로 조절한 후 분무 방식(spraying method)을 통해 감지해야 할 부분에 골고루 분사하여 스마트 페인트 센서 층을 제작하였다. 분사된 페인트 센서 층은 자연 경화, 오븐 또는 열풍기 등을 이용하여 경화시켰다. 센서의 전기신호를 계측기로 받기 위해 센서 양 끝단에 전선을 고정하고 이를 에폭시를 사용하여 센서와 연결함과 동시에 접촉저항을 최소화 시켰으며, 전선 이탈 방지를 위하여 접착 에폭시를 사용하여 단단하게 고정하였다. Fig. IV-17은 MWCNT/xGnP/PS 센서 샘플의 FE-SEM 촬영 이미지이다. 탄소 나노 필러들을 고분자 폴리머 내에 균일하게 분산시키는 것은 매우 중요한 일이다. 탄소 나노 필러가 잘 분산되지 않으면 필러가 응집되어 있어 전도성

이 높게 나타나는 핫 스팟(hot spot)과 낮은 필러의 분포로 인해 전도성이 나타나지 않는 콜드 스팟(cold spot)이 센서 자체의 전기적 성능을 저해시키는 결과를 초래하기 때문이다. 위 그림에서 볼 수 있듯이 제작된 MWCNT/xGnP/PS 센서의 필러 분포는 나노 복합재 제작 공정을 통해 심각하게 응집되지 않고 적절하게 분산되었다는 것을 확인 할 수 있다.



IV-3-나. 충격 센서 기초 특성 실험

IV-3-나-(1). 실험 장치 구성 및 방법

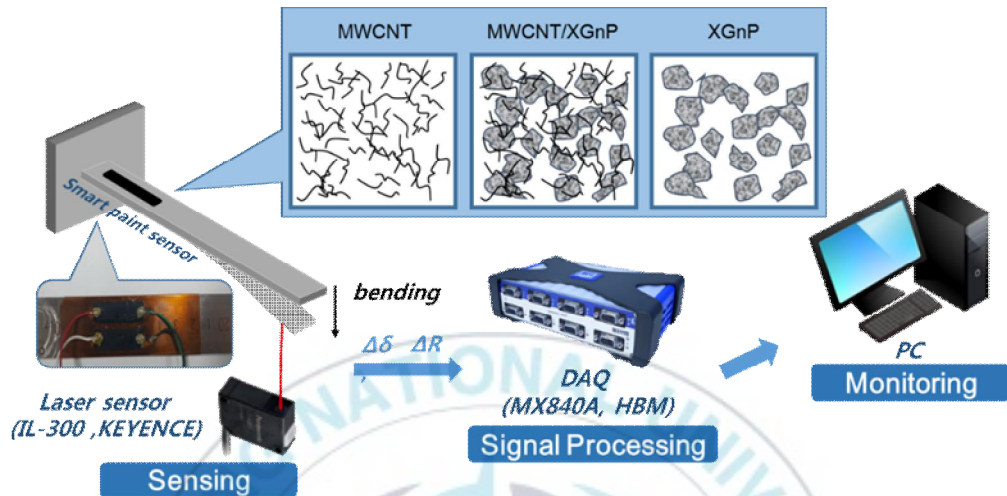


Fig. IV-18 Experimental setup of the piezoresistivity model of the sensors.

Fig. IV-18은 앞서 제작한 3가지 타입의 페인트 센서 (MWCNT/epoxy, xGnP/PS, MWCNT/xGnP/PS)의 전왜 특성을 알아보기 위한 실험장치 구성이다. 센서의 크기는 30 x 10 x 1 mm (길이 x 폭 x 두께)이며 이들을 외팔보에 구조물 접착용 에폭시를 사용하여 긴밀하게 부착하였다. 외팔보 자유단 끝에 임의로 변위를 가하여 레이저 센서(laser sensor, Keyence Co., IL-300)를 이용하여 측정하였으며 이의 변위 정보를 활용하여 간단한 변위-스트레인 식을 사용해 센서 중심에서 발생하는 스트레인으로 환산하였다. 외팔보에 굽힘이 발생했을 때 센서에 스트레인이 발생되고 이의 전왜성으로 인해 스트레인에 따른 센서 저항의 변화를 DAQ(Data acquisition, HBM Co., QuantumX-MX-840A)와 멀티미터(multimeter)를 통해 취득하였다.

IV-3-나-(2). 필러에 따른 센서 감도 실험 결과

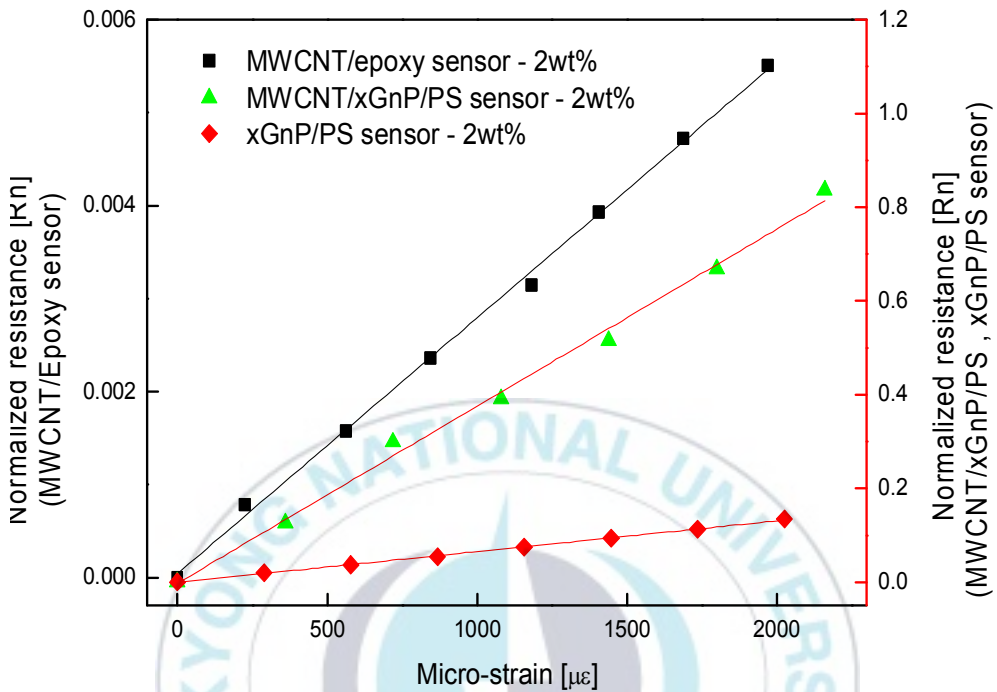


Fig. IV-19 Normalized resistance change due to strain of the nanocarbon-based strain sensors.

MWCNT/epoxy, xGnP/PS, MWCNT/xGnP/PS 센서에 변형을 가해 이에 따라 센서에 가해지는 스트레인에 따른 저항의 변화를 Fig. IV-19에 나타내었으며 좌측 Y축은 MWCNT/xGnP/PS 센서 저항의 변화이며 우측 Y축은 xGnP/PS, MWCNT/epoxy 센서 저항의 변화이다. 이들 센서의 감도는 각각 2.7, 61, 375 이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 두 가지 종류의 필러를 사용한 하이브리드 페인트 센서의 감도가 가장 높은 것을 확인 할 수 있다.

IV-3-다. 충격 에너지 센싱 실험

IV-3-다-(1). 실험 장치 구성 및 방법

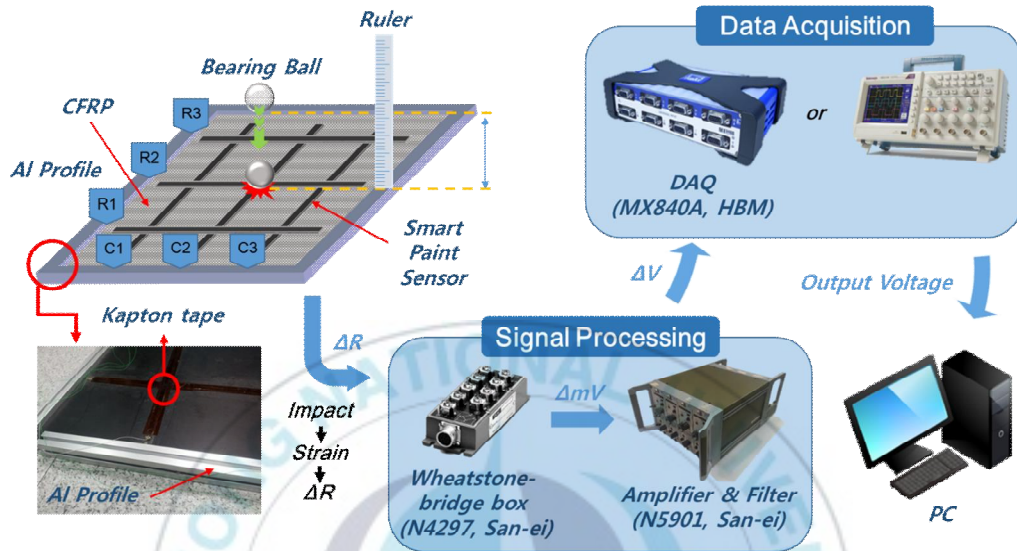


Fig. IV-20 Schematic diagram of the experiment setup for ball drop impact sensing of the smart paint sensors.

페인트 충격 센서의 충격 감지 성능을 확인하기 위하여 Fig. IV-20과 같이 실험장치가 구성되었다. 2장에서 기초특성실험 실시 결과 가장 감도가 높았던 MWCNT/xGnP/PS 센서를 분무 방식으로 탄소 강화 플라스틱(CFRP, Carbon fiber-reinforced plastic, 1000 x 1000 x 3mm) 패널(panel)위에 3 x 3 그리드(grid) 형태로 분사하였다. 그리드의 크기는 300 x 300mm이며, 센서의 크기는 900 x 10 x 1 mm 이다. 그림과 같이 R행에 있는 센서와 C열에 있는 센서는 동시에 제작할 경우 교차하는 지점에서 센서가 서로 도전되어 센서 신호에 서로 방해가 된다. 따라서 분사는 C1, C2, C3 열에 대해 먼저 실시되었으며, 경화 후 그 위를 캡톤 테이프(kapton tape)로 보호 하였다. 이후 R1, R2, R3 행에 대해 분사가 실시되었으며 C열과 마찬가지로 마무리 하였다. 경화 및 보호된 행과

열 센서들의 전기적 신호를 얻기 위하여 센서 양끝에 도선이 실버 에폭시를 이용하여 연결되었으며 그 위를 접착 에폭시로 보호 층을 생성하였다. 충격 실험을 실시 할 시 충격 에너지가 CFRP와 지면의 접촉으로 인해 제대로 센서에 전달되지 않을 수 있기 때문에 CFRP 패널의 4면은 알루미늄 프로파일(aluminum profile)로 고정되었으며, CFRP는 지면에서 약 10mm 띄워졌다. 센서별 센서에 가해주는 충격 에너지는 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 kg의 쇠구슬을 CFRP 패널위로부터 150mm 높이에서 자유낙하 시켜 발생시켰다. 쇠구슬을 사용한 이유는 충격 실험 시 충격을 가해주는 물체는 어느 부위로 떨어져도 CFRP 패널과 접촉면이 균일하기 때문이다. 접촉면이 균일하지 않을 경우 접촉하는 순간에 다중접촉으로 인해 출력 값이 산발적으로 나오거나 간섭 받는 경우가 발생할 수 있다. 충격 에너지는 위치에너지-운동에너지 식으로부터 도출해 냈으며 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} f \cdot \Delta t &= m(v_1 - v_0) \\ mgh_0 &= \frac{1}{2}mv_1^2 \\ v_1 &= \sqrt{2gh_0} \end{aligned} \quad (4.1)$$

여기서 $f \cdot \Delta t$ 는 충격에너지이며, m 은 쇠구슬의 무게, v_0 는 쇠구슬의 초기 속도, v_1 은 충격 순간의 낙하속도, h_0 는 쇠구슬의 초기 위치, g 는 중력가속도이다. 이다. 쇠구슬의 최대 위치에너지가 최대운동에너지로 변환될 때 시스템의 에너지가 보존된다고 가정하면 충격에너지는 다음 식과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$f \cdot \Delta t = m\sqrt{2gh_0} \quad (4.2)$$

실제 충격 실험의 경우 고속카메라를 활용한 에너지 손실을 고려하여 실제 발생하는 충격 에너지를 사용지만, 본 실험에서 수행된 충격 시험은 쇠구슬로 CFRP에 충격 에너지를 가하였을 때 에너지 손실이 없다고 가정하였다. 쇠구슬이 CFRP 패널 위에 떨어졌을 때, CFRP 패널에 스트레인이 발생하게 된다. 발생한 스트레인은 페인트 센서에 전달되며 페인트 센서가 가진 전왜성으로 인해 센서의 저항이 변하게 된다. 센서 저항의 변화는 휘스톤 브릿지(Wheatstone bridge, San-ei, N4297)을 통해 미소전압의 변화로 변환시켰으며 증폭기와 필터(San-ei, N5901)을 통해 60dB로 증폭, 10Hz로 로우-패스 필터링(Low-pass filtering) 되었다. 이후 이를 DAQ(Data acquisition, HBM Co., QuantumX-MX-840 A) 또는 오실로스코프를 통해 취득하였다.



IV-3-다-(2). 실험 결과

IV-3-다-(2)-(가). 최소 감지 충격 에너지 센싱 결과

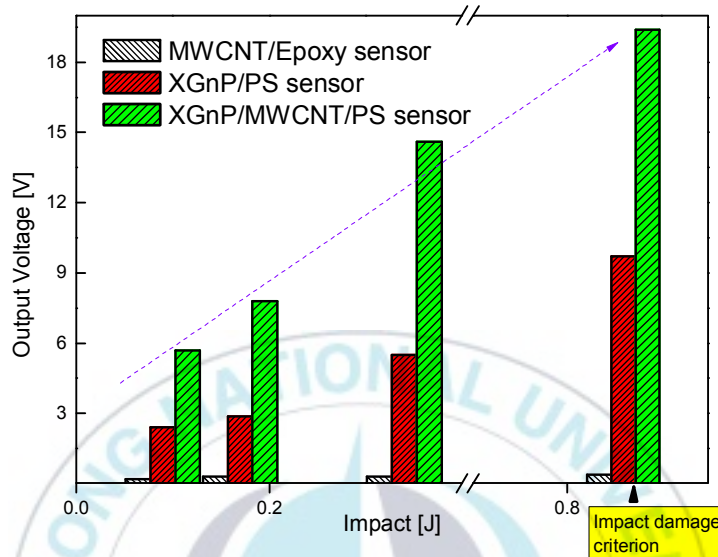


Fig. IV-21 Output voltages of the smart paint sensors due to impact energy change.

Fig. IV-21은 MWCNT/epoxy, xGnP/PS, xGnP/MWCNT/PS 충격 센서에 가해지는 충격 에너지에 따른 센서 출력 전압을 나타낸 것이다. 각 센서는 CFRP 패널 위에 한 개의 그리드만 형성 되었으며 이에 대해 실험을 실시하였다. 3가지 종류의 센서의 출력 전압은 가해지는 충격 에너지가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이들은 적당한 선형성을 가지고 있으며 감도가 높음을 확인 할 수 있다. 본 연구에서 수행된 충격 실험은 에너지 손실이 없다고 가정하였다. 하지만 실제로 적용되는 충격 에너지는 에너지 손실로 인해 이론값보다 작을 것이며, 이는 실제 실험에서 가해진 충격 에너지는 손상 기준 충격 에너지 보다 훨씬 더 낮은 에너지 레벨이라 할 수 있다. 따라서 이는 실제 에너지 손실을 고려하였을 때 최소 감지 충격 에너지보다 훨씬 낮은 에너지 레벨에서 탄소 나노 기반 센서들이 충격 감응이 가능하다는 것을 나타낸다.

그러므로 이의 결과와 Fig. IV-19의 결과를 통해 MWCNT/xGnP/PS 센서가 충격 감지에서 효과적인 성능을 가지고 있을 것이라 판단하였다. 따라서 CFRP 패널 위에 MWCNT/xGnP/PS 센서를 C1~C3, R1~R3로 제작하여 이후 실험을 실시하였다. 이들 센서의 감도는 탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재료내의 필러들의 접촉 거동에 기인한다. 위 결과에 따른 접촉 거동에 대한 메커니즘 분석 부분은 IV-3-라 절에 따로 기술하였다.



IV-3-다-(2)-(나). 충격 에너지에 따른 센서 신호

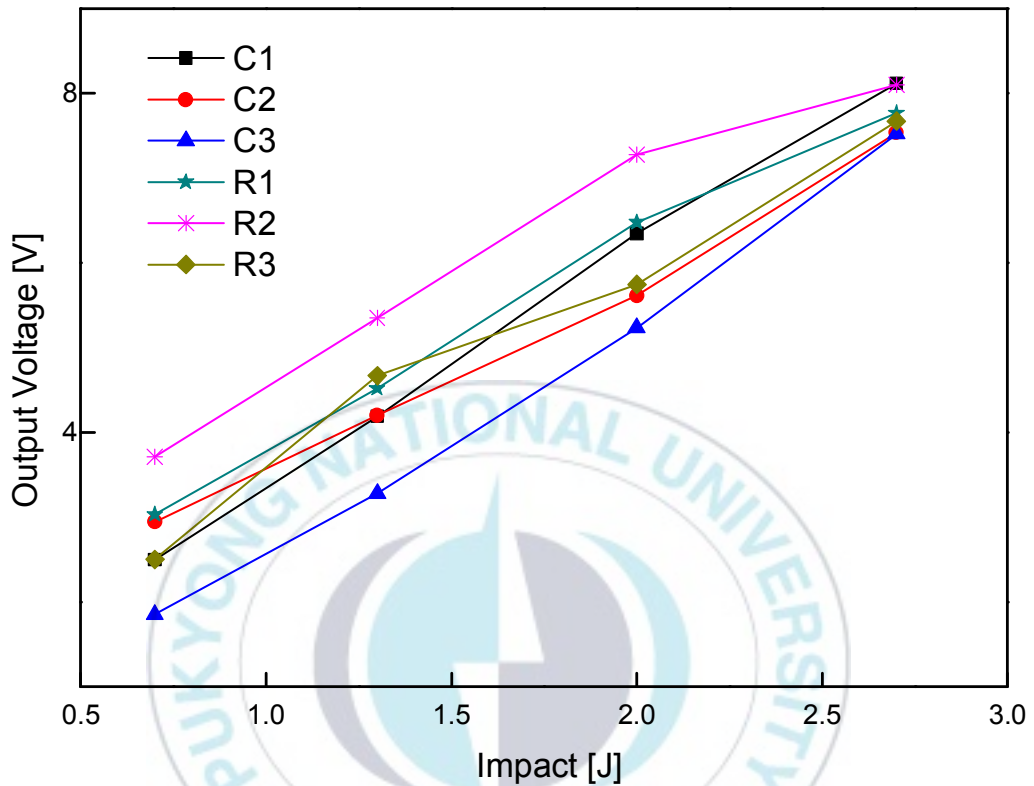


Fig. IV-22 Output voltages of the MWCNT/xGnP/PS grid sensor due to changes of impact energy.

제작된 6개 장축의 MWCNT/xGnP/PS 충격 센서 (C1~C3, R1~R3)에 충격 에너지를 0.7, 1.3, 2.0, 2.7J로 점차 증가시키며 센서에 가하였을 때 각 열과 행에 있는 센서들의 출력전압을 Fig. IV-22에 나타내었다. 증폭과 로우패스 필터링은 약 45dB과 10Hz로 주었다. 앞선 실험과 마찬가지로 센서에 충격을 가하였을 때 접촉면을 균일하게 유지하기 위하여 쇠구슬이 사용되었다. 쇠구슬의 무게는 0.85kg으로써 자유낙하 시키는 높이를 각각 다르게 하여 충격 에너지 레벨에 변화를 주었다. 반복 횟수는 각각 7회씩 실시하였으며, 측정치의 최댓

값과 최솟값을 제외한 나머지 5개 값의 평균을 산출하여 나타내었다. 충격 에너지레벨이 증가됨에 따라 각 센서의 출력전압이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며 어느 정도 선형성을 가지고 있다. 똑같은 에너지 레벨에서 각 센서의 출력 전압 값이 다른 것을 볼 수 있는데, 이는 센서를 제작할 때 사람이 직접 시행하는 분무 방식을 사용하였기 때문에 센서의 형태가 일정하지 않아 생기는 오차로 인한 특성 차이이다. 또한 C열과 R행의 센서 제작이 동일한 배치(batch)가 아니기 때문에 발생하는 오차가 있을 수 있다. 특정한 장비 또는 장치를 사용하여 일정량 분무 할 수 있는 시스템을 구축하고 센서 제작 공정을 정형화 시킨다면 이들의 오차는 줄어들 수 있을 것이다.



IV-3-다-(2)-(다). 충격 위치에 따른 센서 신호

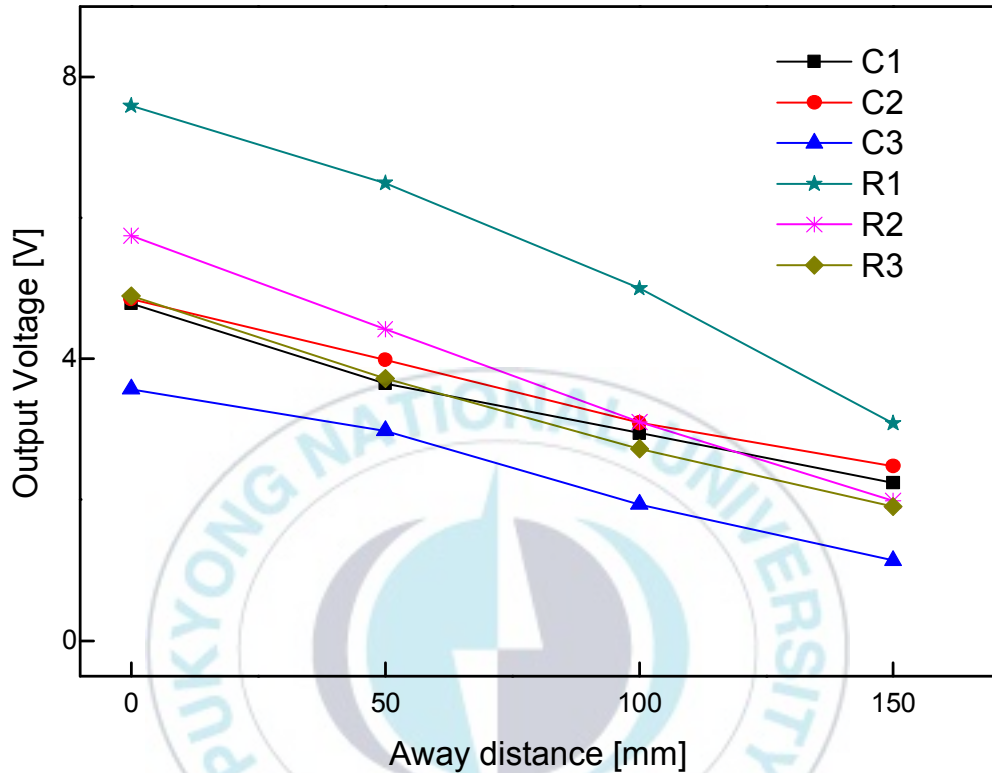


Fig. IV-23 Output voltages of the MWCNT/xGnP/PS grid sensor due to changes of impact location.

충격 위치 판별 가능성을 확인하기 위하여 센서 중심으로부터 충격 위치를 변화시켜 가며 센서 출력 전압을 확인하였다. 패널 위에 센서로 그린 그리드 사이의 메시 간격은 300mm이다. 각 센서의 중심으로부터 50mm 간격으로 0~150mm까지 실험을 실시하였으며 CFRP 패널에 가해진 충격 에너지는 동일하다. 반복 횟수는 각각 7회씩 실시하였으며, 측정치의 최대값과 최소값을 제외한 나머지 5개 값의 평균을 산출하여 나타내었다. Fig. IV-23에서 확인할 수 있듯이 센서 중심으로부터 충격 위치가 멀어짐에 따라 MWCNT/xGnP/PS 충격 센서(C1~C3, R1~R3)의 출력 전압 값이 센서 마다 크기의 차이는 있지만 전체

적으로 감소하는 경향을 확인 할 수 있다. 또한 출력 전압 값의 크기가 앞선 실험과 차이가 있는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 실험도중 잦은 충격으로 인해 센서에 균열(crack)이 발생하였고 이를 보수하는 과정에서 생긴 오차이다. 페인트 형태로써 센서에 손상이 발생할 시 재도포를 통해 보수가 가능하지만, 그로 인해 센서의 두께가 증가하기 때문에 센서 저항의 감소 및 특성이 변할 수 있다.



IV-3-라. 다차원 탄소 나노 동소체 복합재료 전왜성 메커니즘

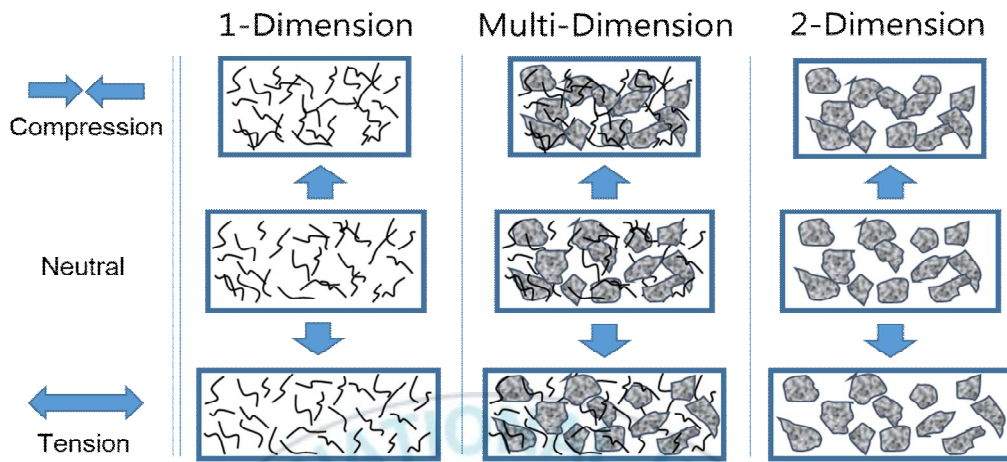


Fig. IV-24 Schematic illustration of the piezoresistive mechanism of 1-, 2-, and multi-dimensional nanocarbon composites under tensile and compressive stresses.

탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재료의 전왜성은 탄소 나노 동위 원소의 유형에 의존한다. Fig. IV-24는 탄소 나노 재료 기반 복합소재에 인장력과 압축력이 작용할 때 복합소재내의 탄소 나노 필러들이 어떻게 움직이는지 간단히 나타낸 것이다. 무부하 상태에서 복합재료 내의 필러가 적절하게 분산되어 있다고 가정할 때, 복합재료는 특정한 전기적 저항 값을 나타낸다. 여기서 복합재료에 압축력이 작용할 때 복합재료 내부의 탄소 필러들 간의 거리가 가까워지며 복합재료의 전도성이 좋아진다. 반대로 인장력이 작용할 경우 복합재료 내부의 탄소 필러들 간의 거리가 멀어지며 복합재료의 전도성이 나빠진다. 따라서 복합재료 내부의 개별 충전재 사이의 물리적 공간은 외부의 하중 조건으로 인해 변할 수 있으며, 이는 전자 터널링의 변화를 유도할 수 있다. 앞선 실험들에서 MWCNT 필러만으로 제작된 센서와 xGnP 필러만으로 제작된 센서보다 MWCNT와 xGnP를 동시에 사용하여 제작된 센서의 감도가 훨씬 큰

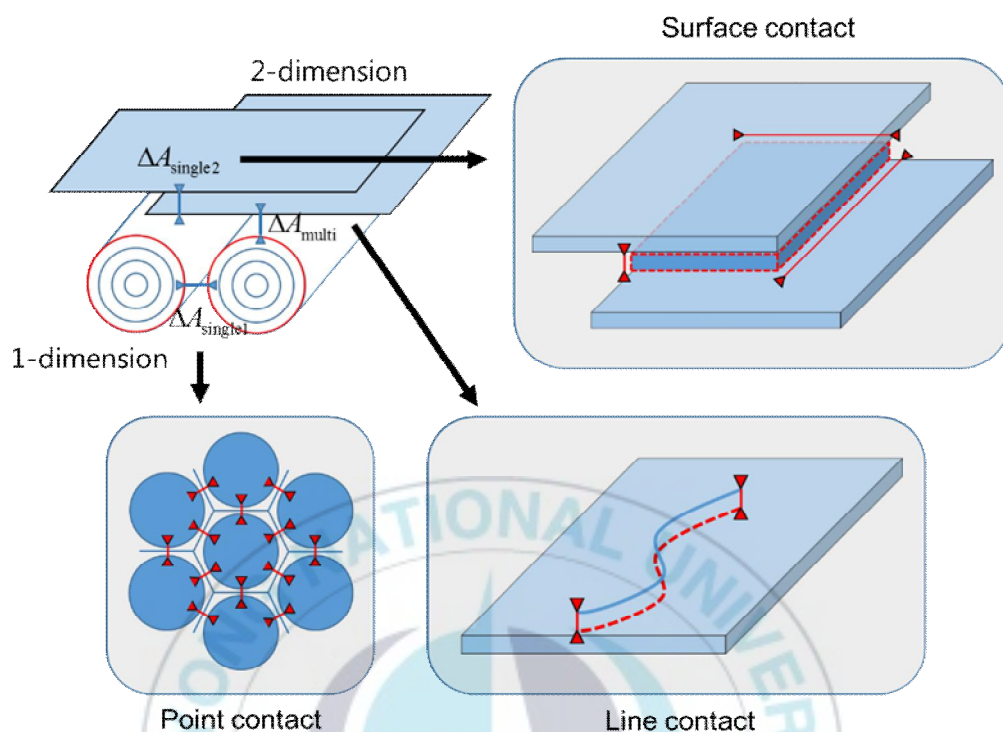


Fig. IV-25 Effect of contact conditions for piezoresistive mechanisms of nanocarbon allotropes with different dimensional forms.

것을 확인하였다. 이는 전자 터널링의 변화는 탄소 나노 동소체 차원의 형태가 전기적 접촉 조건에 지배적으로 영향을 끼친다고 볼 수 있다.

Fig. IV-25는 서로 다른 차원의 형태를 갖는 탄소 나노 동소체의 전왜성 메커니즘에 대한 접촉 조건을 보여주는 탄소 나노 필러 접촉 모델이다. 1차원 탄소 나노 필러, 즉 폴리머 기지재료 내의 탄소 나노 튜브 간에는 위 그림 좌측 하단과 같이 대부분 점접촉으로 전기적 터널을 형성시킨다. 폴리머 기지재료 내의 2차원 탄소 나노 필러인 그래핀 간에는 우측 상단과 같이 대부분 면접촉으로 전기적 터널을 형성시키게 된다. 또한 1차원 탄소 나노필러와 2차원 탄소 나노필러 간에는 우측 하단과 같이 선접촉의 전기적 터널을 형성시킨다. 따라서 MWCNT와 xGnP와 같이 서로 다른 크기의 탄소 나노 동소체가 동시

에 복합재료 내에 형성되어 있는 경우 복합재료에 외부의 어떠한 하중조건이 가해졌을 때 탄소 나노 동소체간 점접촉, 선 접촉, 면 접촉이 동시에 일어나게 되며 이로 인해 다양한 저항 변화의 가능성이 더 높게 나타나는 것이다. 탄소 나노 복합재료의 전기적 저항은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{composites} = R_{filler} + R_{tunnel} + R_{contact} \quad (4.3)$$

여기서 R_{filler} 는 복합재료 센서 내의 필러가 가지고 있는 고유 저항이며, R_{tunnel} 은 복합재료 센서 내의 필러 사이 간 전기적 터널링 저항(tunneling resistance)이다. 그리고 $R_{contact}$ 은 복합재료 센서 내의 필러의 직접적 접촉으로 생기는 저항이다. 식 (4.3)을 일반적으로 사용되는 게이지 팩터 식에 대입하면 다음과 같이 식 (4.4)로 나타낼 수 있다.

$$G.F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = \frac{R_N}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta R_{filler} + \Delta R_{tunnel} + \Delta R_{contact}}{R_{filler} + R_{tunnel} + R_{contact}}}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

여기서 ε 은 센서에 발생하는 스트레인이며, R_N 은 센서 기준 저항에 대한 저항의 변화량, ΔR_{filler} 는 복합재료 센서에 스트레인 발생했을 때 필러 고유 저항의 변화량, ΔR_{tunnel} 은 복합재료 센서에 스트레인이 발생했을 때 내부 필러 사이 간 전기적 터널링 저항의 변화량, $\Delta R_{contact}$ 는 복합재료 센서 내의 필러의 직접적 접촉의 변화로 발생하는 저항 변화량이다. 위 과정에서 탄소 나노 재료 기반 복합재료의 전왜성의 주된 원인에 대하여 몇 가지 가정을 하였다. 하나는 변형이 센서에 가해질 때, 기지재료 내 필러 자체의 변형으로 인한 저항변화와 다른 하나는 필러간의 간격변화 이다. 탄소 나노 개별 필러 자체는

외력이 발생하여도 변화 자체가 크지 않기 때문에 다른 필러 사이의 효과 보다는 매우 작을 것이다. 따라서 탄소 나노 개별 필러 자체 변화에 의한 저항 변화는 매우 작을 것이라 판단하였다.

$$\Delta R_{filler} \ll \Delta R_{contact}, \Delta R_{tunnel}$$

따라서 탄소 나노 기반 복합재료의 저항의 변화는 다음 식과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\Delta R_{composites} \approx \Delta R_{tunnel} + \Delta R_{contact} \quad (4.5)$$

이로 인한 전왜효과를 알아보기 위해 터널링 효과에 의한 저항은 다음 식 (4.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{tunnel} = \frac{h^2 d}{A e^2 \sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi d}{h} \sqrt{2m\lambda}\right) \quad (4.6)$$

여기서 h 는 플랑크 상수이며, d 는 필러 사이의 거리, A 는 필러 사이 터널에 대한 단면적, e 는 전하량, m 은 전자의 질량, λ 는 기지재료의 전위장벽이다.

복합재에 스트레인이 발생될 때 영향 받는 변수인 d 와 A 를 제외한 나머지 e, m, λ, h 는 센서가 제작되고 센싱 시스템이 결정되었을 때 상수로 취급할 수 있다. 따라서 식(4.6)은 식(4.8)과 같이 상수 C_1 과 C_2 를 이용하여 다시 나타낼 수 있다.

$$C_1 = \frac{h^2}{e^2 \sqrt{2m\lambda}}, C_2 = \frac{4\pi \sqrt{2m\lambda}}{h} \quad (4.7)$$

$$R_{tunnel} = C_1 \frac{d}{A} \exp(C_2 d) \Rightarrow \Delta R_{tunnel} = C_1 \frac{\Delta d}{\Delta A} \exp(C_2 \Delta d) \quad (4.8)$$

식 (4.5)에서 $\Delta R_{contact}$ 는 필러의 직접 접촉 상태와 관련이 있다. 하지만 이를 규정하는 것은 정량적으로 나타내기에는 매우 복잡하며 힘들다. 따라서 여기서는 단순 비례관계로써 식 (4.9)와 같이 나타내었다.

$$R_{contact} \propto k A_{contact} \Rightarrow \Delta R_{contact} \propto \Delta k \Delta A_{contact} \quad (4.9)$$

여기서 Δk 는 직접 접촉하는 필러의 수의 변화이고, $\Delta A_{contact}$ 는 필러 사이의 접촉 면적의 변화이다. 따라서 단일 탄소 나노 필러로만 구성된 전왜성 기반 센서의 감도는 다음 식(4.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G.F_{sole1} = \frac{\frac{\Delta R_{tunnel} + \Delta R_{contact}}{R_{filler} + R_{tunnel} + R_{contact}}}{\varepsilon} = \frac{R_{N-sole1}}{\varepsilon} \quad (4.10)$$

서로 다른 차원의 탄소 나노 동소체 필러를 사용한 전왜성 기반 센서의 감도는 다음 식(4.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G.F_{multi} \propto \frac{R_{N-sole1} + R_{N-sole2} + R_{N-multi}}{\varepsilon} \quad (4.11)$$

식(4.10)과 식(4.11)로 부터 다음 식(4.12)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$G.F_{sole} < G.F_{multi} \quad (4.12)$$

앞서 기술한 내용을 바탕으로 서로 다른 크기의 서로 다른 필러로 구성된 탄소 나노 복합재료 센서는 센서 내부의 다양한 접촉 상황으로 인해 센서의 감도를 최대화 할 수 있다. 하지만 필러의 거동을 모두 예측하고 센서 성능을 좌우하는 핵심 요소를 제어하는 것은 최종 사용자 입장에서 너무 복잡 할 수 있다. 따라서 센서 성능을 결정하기 위한 센서 설계 문제에 대한 연구를 실시 하였다.



V. 탄소 나노 복합재 센서 형상에 따른 전왜 특성

V-1. 탄소 나노 튜브 기반 복합재료 센서 제작

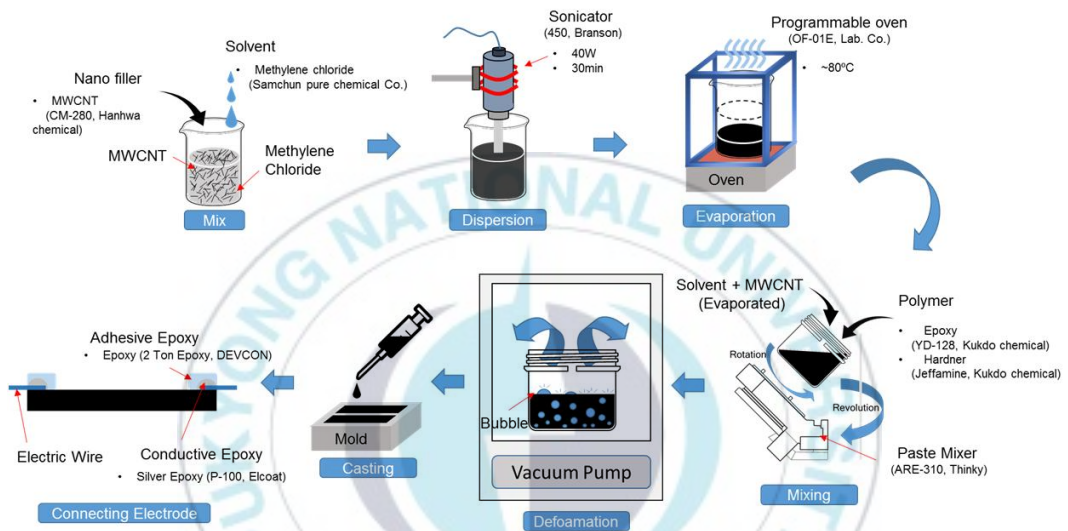


Fig. V-1 Schematic diagram of precision molding process using carbon nanotube.

탄소 나노 재료를 기반으로 하는 복합재료 센서의 형상별 성능 및 센서 설계에서 형상이 센서에 끼치는 영향을 확인하기 위하여 센서를 제작하여 실험을 실시하였다. 탄소 나노 재료 기반 복합재료 센서의 제작에서 발생할 수 있는 오차들을 최대한 줄이기 위하여 전통적인 복합재료 제작 방식인 몰드 방식을 사용하였다. 먼저 탄소 나노 튜브(Hanhwa chemical, CM-280)와 메틸렌클로라이드(methylene chloride, Samchun pure chemical Co.)를 혼합하였다. 혼합된 용액은 초음파 분쇄기(sonicator, Branson, 450)를 이용해 약 40W로 30분간 1차 분산되었다. 이는 적절한 농도로 다음 공정으로 넘기기 위해 프로그래머블 오븐(programmable oven, Lab. Co., OF-01E)에서 약 80°C온도로 증발되었다. 적정

한 농도로 맞추어진 혼합액은 페이스트 믹서(paste mixer, Thinky, ARE-310)을 사용하여 에폭시(epoxy, Kukdo chemical, YD-128), 경화제(hardner, Kukdo chemical, Jeffamine)과 함께 2200rpm으로 3분간 혼합 및 분산되었으며, 2000rpm으로 2분간 1차 탈포가 진행되었다. 페이스트 믹서에서 진행된 1차 탈포 과정에서 미세 기포까지 탈포시키지 못하기 때문에 1차 탈포된 혼합액은 진공 오븐에서 0기압으로 50°C에서 약 10분간 2차 탈포 및 몰드에 주입하기 알맞은 농도로 조절되었다. 2차 탈포된 혼합액은 주사기를 사용하여 실리콘 몰드(silicon mold)에 주입되었다. 실리콘 몰드는 폭(8, 10, 12mm), 길이(30, 40, 50mm), 두께(0.6, 1.2, 2.4, 3, 3.6mm)로 준비되었으며, 각 사이즈별 몰드는 두 개씩 제작되었다. 몰드에 주입된 혼합액은 완전경화되기 전 잔여 용매를 충분히 증발시키기 위하여 상온에서 24시간 놔두었으며, 이후 프로그래머블 오븐에서 약 80°C로 2시간 경화가 진행되었다. 제작된 센서 전극의 전기적 신호를 확인하기 위하여 센서 전극 양 끝단에 전선을 전도성 은 에폭시(silver epoxy, Elcoat, P-100)을 이용하여 접촉 저항을 최소화하여 부착한 후 그 위를 접착용 에폭시(adhesive epoxy, DEVCON, 2 Ton epoxy)로 고정하였다.

V-2. 실험 장치 구성 및 실험 방법

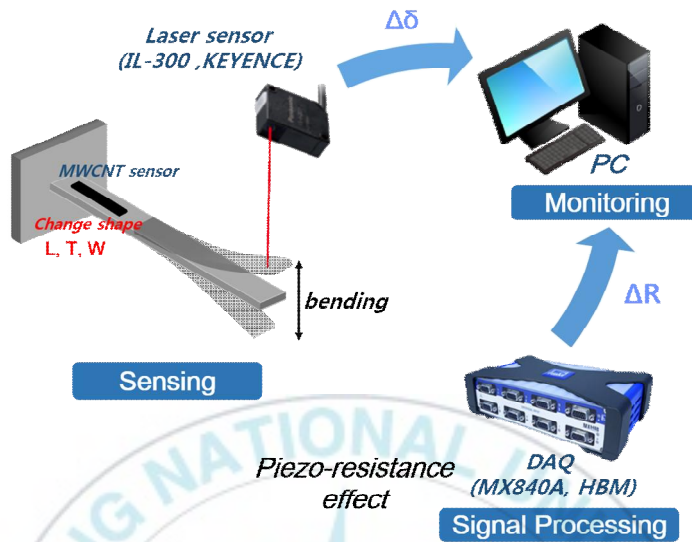


Fig. V-2 Experimental setup for carbon nano-based sensor sensitivity characteristics.

전왜성을 가지고 있는 탄소 나노 기반 복합재 스트레인 센서의 게이지팩터를 알아보기 위하여 Fig. V-2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 탄소 나노 복합재 센서는 길이 300mm, 폭 25mm, 두께 2mm의 스틸 캔틸레버 상부에 접착 에폭시로 긴밀하게 접착되었다. 실험을 위해 부착된 센서의 위치는 모든 센서 샘플의 중심이 캔틸레버의 고정단으로부터 50mm 떨어진 곳에 위치하게 하였다. C클램프를 활용하여 캔틸레버 한쪽 끝을 고정단으로 구성하였으며, 반대 쪽은 자유단으로써 자유단 끝부분에 임의로 -140mm~140mm 범위에서 20mm 단위로 변위를 가하였다. 캔틸레버 자유단에 끝에 변위가 가해지면 캔틸레버 상부에 부착되어 있는 센서에 스트레인이 발생하게 되며 이는 센서의 전왜성으로 인해 센서 저항의 변화로 나타나게 된다. 센서 저항의 변화는 DAQ(HBM, MX-840A)를 통하여 측정, 취득하였으며 센서에 발생된 스트레인은 자유단 끝 변위에 따른 임의의 지점 스트레인 환산 식을 통해 구하였다.

V-3. 실험 결과

V-3-가. 탄소 나노 기반 복합재 센서의 percolation threshold

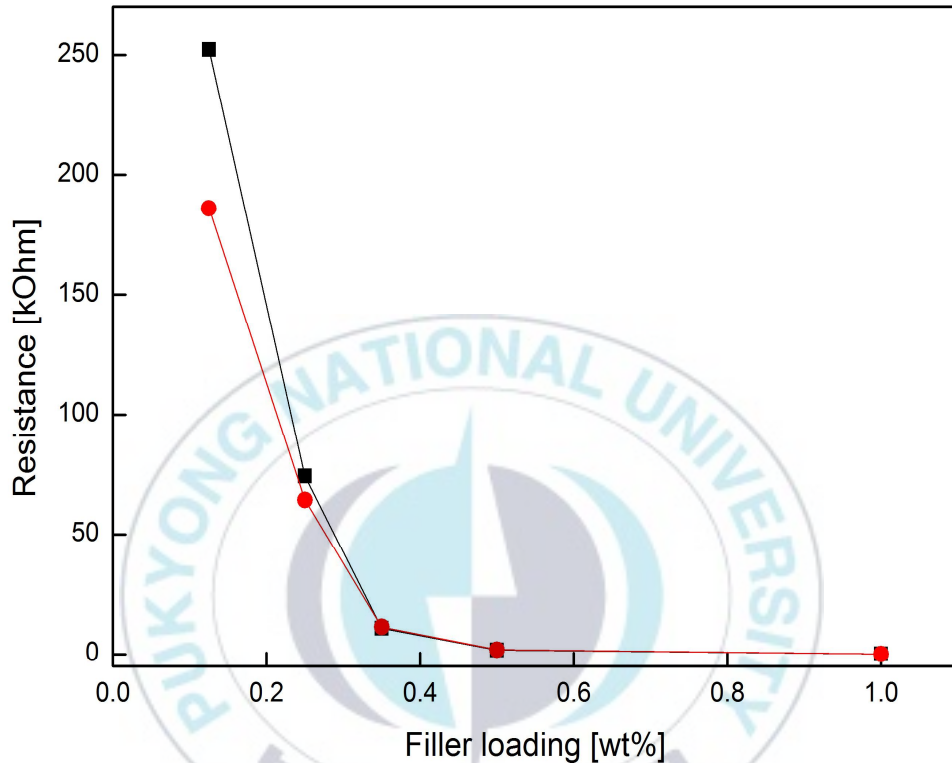


Fig. V-3 Percolation threshold of MWCNT/epoxy sensor.

본 실험에서 주로 사용될 복합재료의 적정 percolation threshold를 알아보기 위해 복합재료 센서 제작 과정에서 탄소 나노 튜브와 에폭시의 비율을 0.125wt%, 0.25wt%, 0.35wt%, 0.5wt%, 1wt%로 바꾸어가면서 센서의 저항을 측정해보았다. 센서의 샘플은 각 wt%마다 두개씩 제작하였으며 이를 Fig. V-3에 나타내었으며, 탄소 나노 튜브 함량에 따른 센서 저항의 변화가 약 0.2~0.5wt% 부근에서 기울기가 급격하게 변하는 것을 확인 할 수 있다. 탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재료 센서를 제작할 때 투입되는 필러의 함량이 적을수록 복합재료 내부에 분산되어 있는 필러의 위치 및 방향이 다양하게

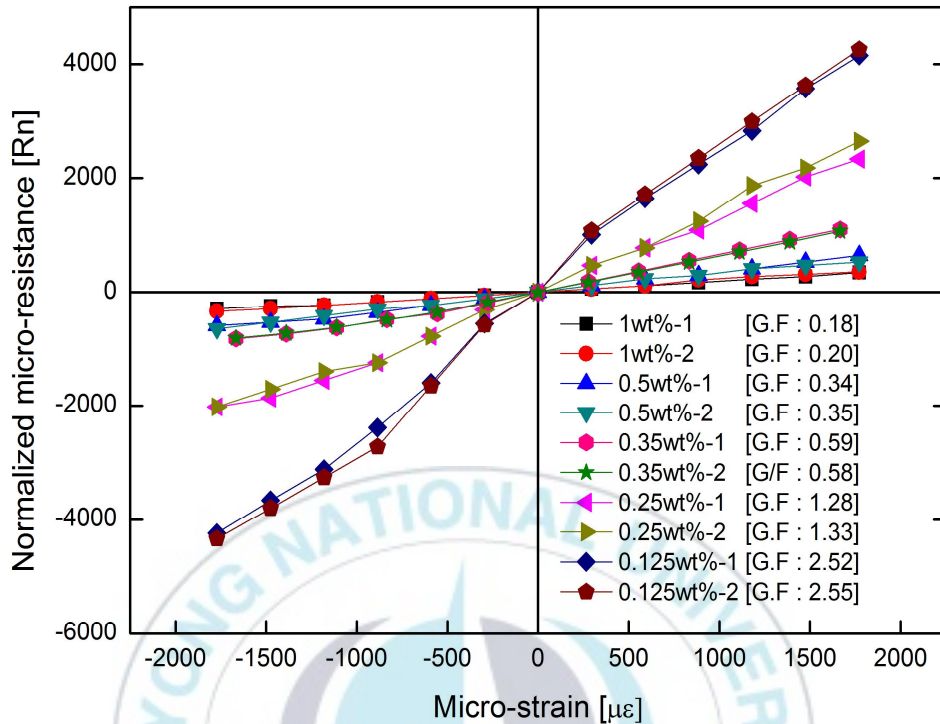


Fig. V-4 Sensitivity of MWCNT/epoxy sensor according to content.

나타날 수 있기 때문에 Fig. V-3에서 볼 수 있는 것처럼 함량이 적은 약 0.4wt%이하 지점부터 제작된 샘플에서 기본저항의 오차가 어느 정도 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. V-4은 탄소 나노 튜브를 기반으로 한 복합재 센서의 감도를 나타낸 그래프이다. 복합재료 내 탄소 나노 필러 함량을 달리하면서 각 두개씩 제작하여 측정하였다. 그래프 및 그래프 우측하단 도표에서 확인 할 수 있듯이 함량이 적어짐에 따라 센서의 감도가 급격하게 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 앞서 언급하였듯이 복합재료 내 필러의 다양한 위치, 방향 때문에 각 함량 당 두 센서의 감도가 크진 않지만 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 또한 필러 함량 1wt%의 경우 센서 감도 차이가 0.5wt%, 0.35wt%에 비해 나는 것을 확인할 수 있다. 탄소 나노 튜브는 복합재료화 시키거나 사용될 때 이들이 가지고

있는 반데르발스 결합에 의한 응집(aggregation)을 모종의 과정으로 해결하게 된다. 하지만 복합재료 제작 공정 과정에서 재응집(reaggregation) 될 가능성이 있는데, 함량이 높을수록 재응집 될 가능성이 커진다. 따라서 복합재 내부의 필러 함량이 많을 때도 오차가 발생할 수 있기 때문에 이후 실험을 실시할 복합재료 센서는 기본 저항의 오차 및 센서 감도의 오차를 줄이기 위하여 0.35wt%와 0.5wt% 경우에 대하여 제작되었다.



V-3-나. 센서 형상에 따른 센서 감도 특성

V-3-나-(1). 센서 길이에 따른 센서 감도 특성

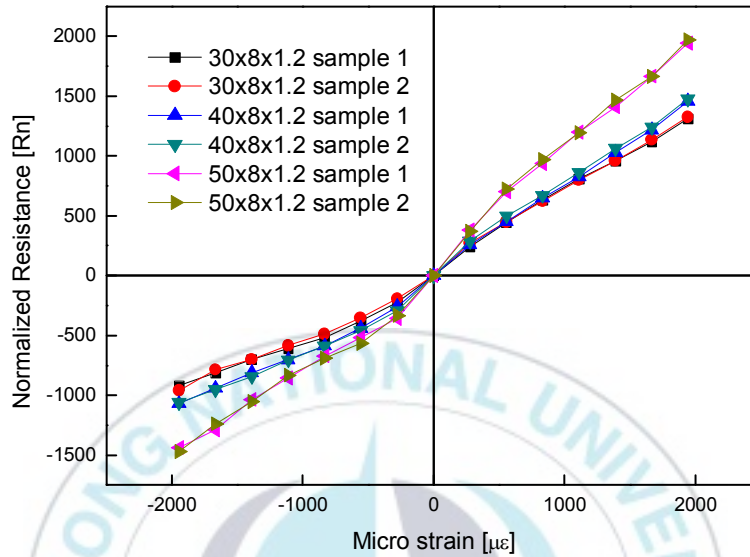


Fig. V-5 Sensitivity change according to 0.35wt% sensor length (width 8mm, thickness 1.2mm fixed).

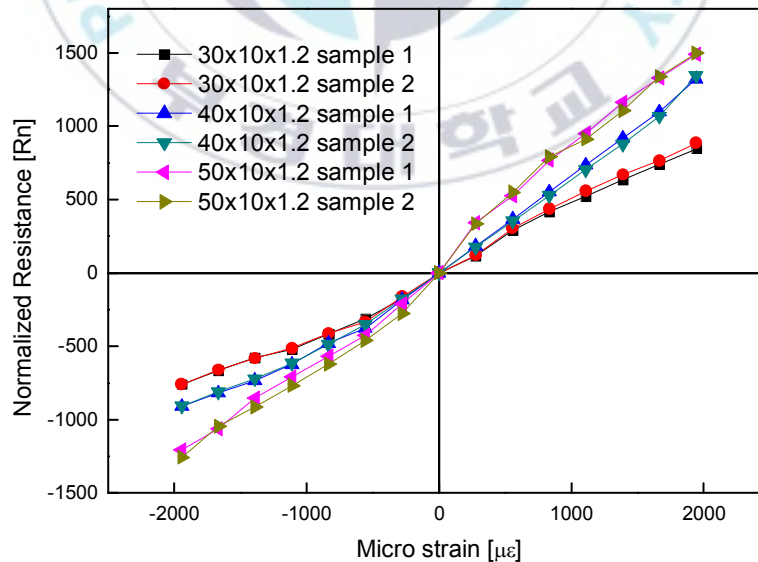


Fig. V-6 Sensitivity change according to 0.35wt% sensor length (width 10mm, thickness 1.2mm fixed).

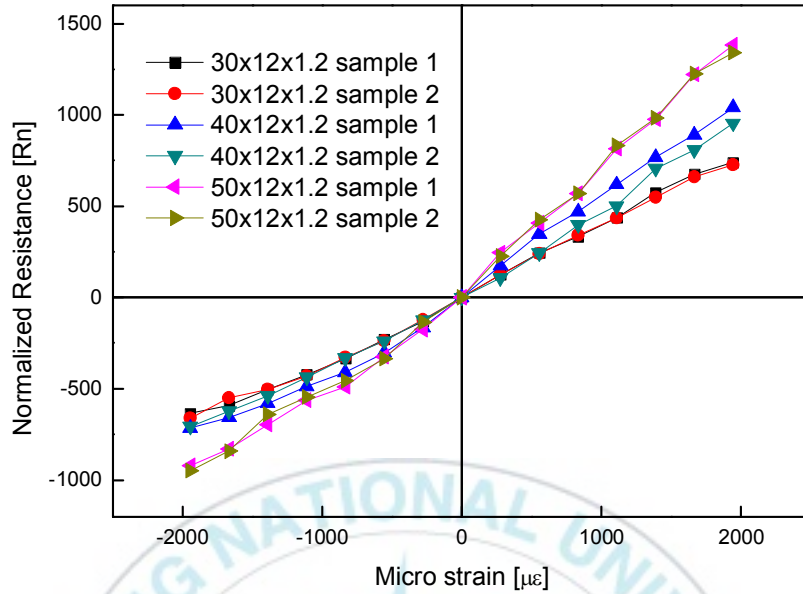


Fig. V-7 Sensitivity change according to 0.35wt% sensor length (width 12mm, thickness 1.2mm fixed).

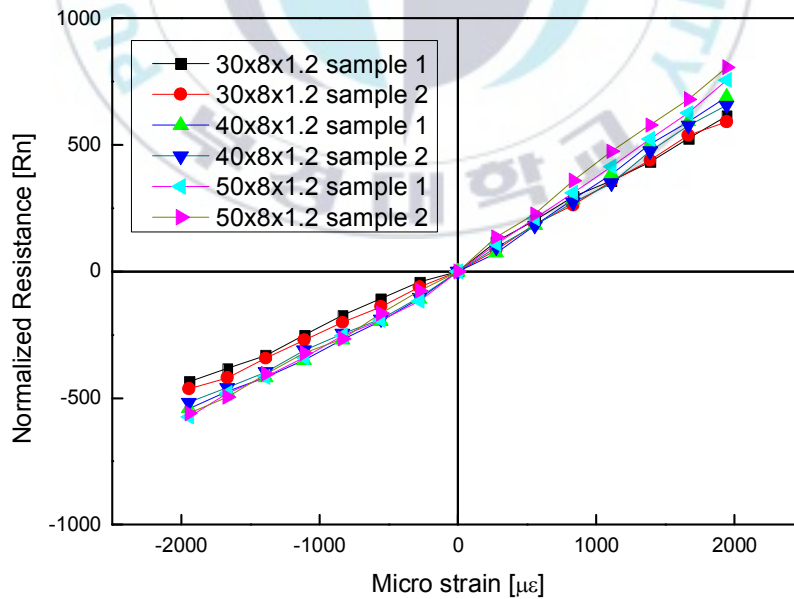


Fig. V-8 Sensitivity change according to 0.5wt% sensor length (width 8mm, thickness 1.2mm fixed).

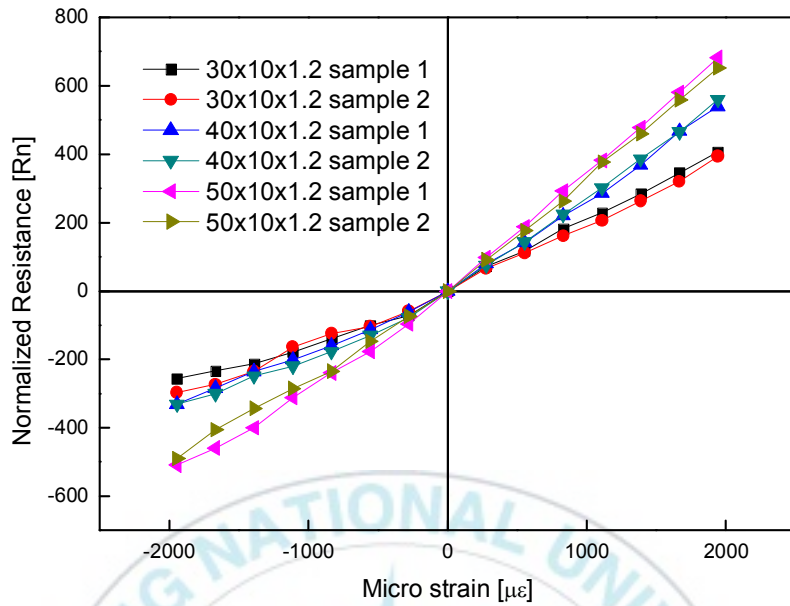


Fig. V-9 Sensitivity change according to 0.5wt% sensor length (width 10mm, thickness 1.2mm fixed).

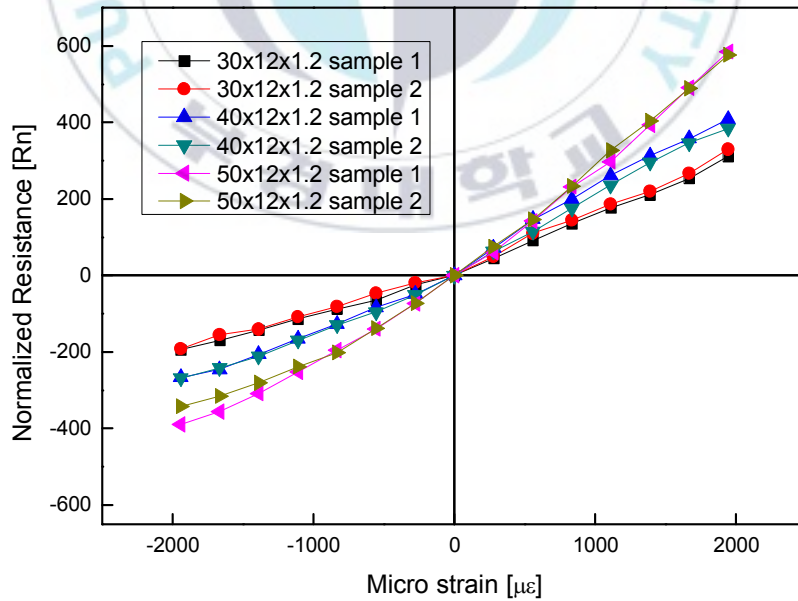


Fig. V-10 Sensitivity change according to 0.5wt% sensor length (width 12mm, thickness 1.2mm fixed).

탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재료 센서의 길이에 따른 센서 감도 특성을 확인하기 위하여 실험을 실시하였다. 실험이 실시된 센서 샘플의 함량은 0.35wt%, 0.5wt%이며 센서의 두께는 모두 1.2mm로 고정시켰다. Fig. V-5, 6, 7과 Fig. V-8, 9, 10에서 확인 할 수 있듯이 센서 폭은 8mm, 10mm, 12mm로 각각 고정시키고, 센서의 길이를 30mm, 40mm, 50mm로 변화시켜가며 센서 감도를 확인해 보았다. 0.35wt%와 0.5wt% 함량으로 센서를 제작한 경우 모두 비슷한 결과를 얻었다. 센서의 길이가 길어질수록 동일 스트레인에 대하여 저항의 변화가 큰 것을 확인 할 수 있다. 이는 탄소 나노 재료 기반 복합재 센서의 길이가 센서의 감도와 상관이 있으며 센서를 설계하는 요소 중 하나가 될 수 있음을 나타낸다.

외팔보에서 자유단 끝단에 변위가 발생했을 경우 외팔보에 부착된 센서의 중심 지점에서 일어나는 스트레인은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{3c(L-a)}{L^3}y(L) \quad (5.1)$$

여기서 c 는 부재의 중심에서부터의 높이, L 은 부재의 길이, a 는 외팔보의 고정단에서 센서 중심까지의 거리, $y(L)$ 은 외팔보의 끝단에 가해진 변위이다. 위의 식을 일반적인 게이지 팩터 식에 대입하게 되면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$G.F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{3c(L-a)}{L^3}y(L)} \quad (5.2)$$

일반적으로 사용되는 포일 타입 상용 스트레인 게이지는 센서의 형상이 여러

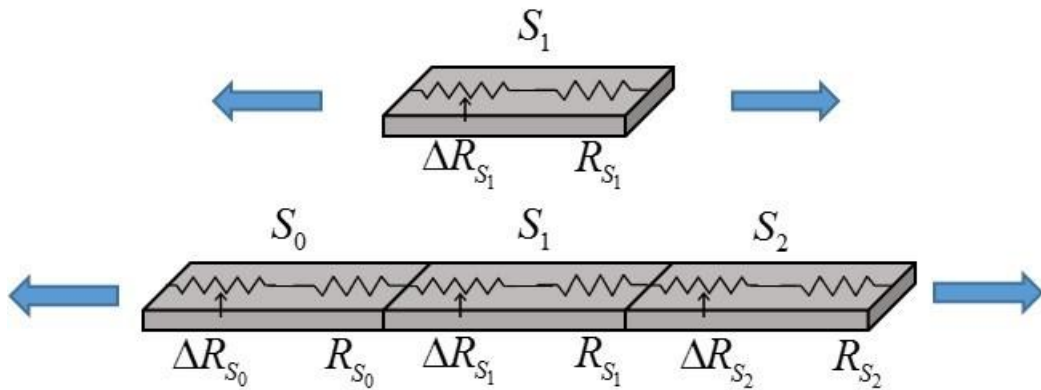


Fig. V-11 Schematic diagram of carbon nano tube sensor unit chain.

개의 그리드로 이루어져 있으며, 각 그리드에 일어나는 변형량을 평균화 시켜 감도를 구하게 된다. 이에 반해 본 연구에서 제작된 탄소 나노 기반 복합재료 센서는 포일 타입 스트레인 게이지와 다르게 단일 그리드를 가지는 형상으로 제작 되었으며, 금속선을 주로 사용하는 상용 스트레인 게이지와 달리 폴리머를 기지재료로 사용하는 탄소 나노 기반 복합재료 센서는 제작 공정마다 전기적 저항이 동일하지 않기 때문에 정확한 방법으로 센서의 감도를 상정할 수 없다.

탄소 나노 재료 기반 복합재료는 일반적인 금속과 다르게 센서 내부 모든 공간이 전도성이 높게 나타나지 않는다. 폴리머 내에 산재되어 있는 탄소 나노 튜브가 전도성 길을 만들어 주게 되는데, 탄소 나노 재료 기반 복합재료 센서가 단일 유닛, 그리고 이러한 단일 유닛이 여러 개로 구성되어 존재한다고 가정하여 Fig. V-11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 단일 유닛 부분에서 일어나는 스트레인에 대한 기준 저항 대비 저항의 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G.F = \frac{\frac{\Delta R_{s_1}}{R_{s_1}}}{\varepsilon_{s_1}} \quad (5.3)$$

마찬가지로 Fig. V-11아랫부분의 단일 유닛 여러 개가 연결되어 있는 그림에서 스트레인이 발생했을 때 스트레인에 대한 기준 저항 대비 저항의 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G.F = \frac{\frac{\Delta R_{s_0}}{R_{s_0}}}{\varepsilon_{s_0}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_1}}{R_{s_1}}}{\varepsilon_{s_1}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_2}}{R_{s_2}}}{\varepsilon_{s_2}} \quad (5.4)$$

Table V-1 MWCNT/epoxy sensor resistance by sensor shape

T=1.2 (mm)	L=30 W=8	L=40 W=8	L=50 W=8	L=30 W=10	L=40 W=10	L=50 W=10	L=30 W=12	L=40 W=12	L=50 W=12
Sample 1 (kΩ)	11.20	15.47	19.08	9.47	11.37	14.33	6.97	9.14	11.31
Sample 2 (kΩ)	11.45	15.64	19.43	8.63	10.89	14.10	6.92	9.64	12.28

Table. V-1에서 볼 수 있는 것처럼 센서의 길이에 비례해서 센서의 저항이 비슷한 경향을 가지고 증가함을 확인 할 수 있다. 이로 말미암아 각 동일 공정상에서 동일한 규격으로 제작된 탄소 나노 기반 복합재 센서는 단일 유닛 당 저항이 비슷하며 본 연구에서는 동일하다고 가정을 하였다. 따라서 각 단일 유닛 파트의 저항은 동일하며 각 부위에 인가되는 스트레인만큼 저항의 변화량이 발생하기 때문에 센서 라인 전체의 스트레인에 대한 저항의 변화량

즉, 탄소 나노 기반 복합재 센서 길이 변화에 대한 감도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 G.F_{CNT-composites} &= \frac{\frac{\Delta R_{s_0}}{R_{s_0}}}{\varepsilon_{s_0}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_1}}{R_{s_1}}}{\varepsilon_{s_1}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_2}}{R_{s_2}}}{\varepsilon_{s_2}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_3}}{R_{s_3}}}{\varepsilon_{s_3}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_4}}{R_{s_4}}}{\varepsilon_{s_4}} + \dots \quad (5.5) \\
 &= \frac{\sum_{n=s_o}^{s_s} \frac{\Delta R_n}{R_n}}{\sum_{n=s_o}^{s_s} \frac{3c(L-n)}{L^3} y(L)} = \frac{\sum_{n=s_o}^{s_s} \frac{\Delta R_n}{R_n}}{\sum_{n=s_o}^{s_s} \varepsilon_n} (R_{s_o} = R_{s_1} = \dots = R_{s_s})
 \end{aligned}$$



V-3-나-(2). 센서 두께에 따른 센서 감도 특성

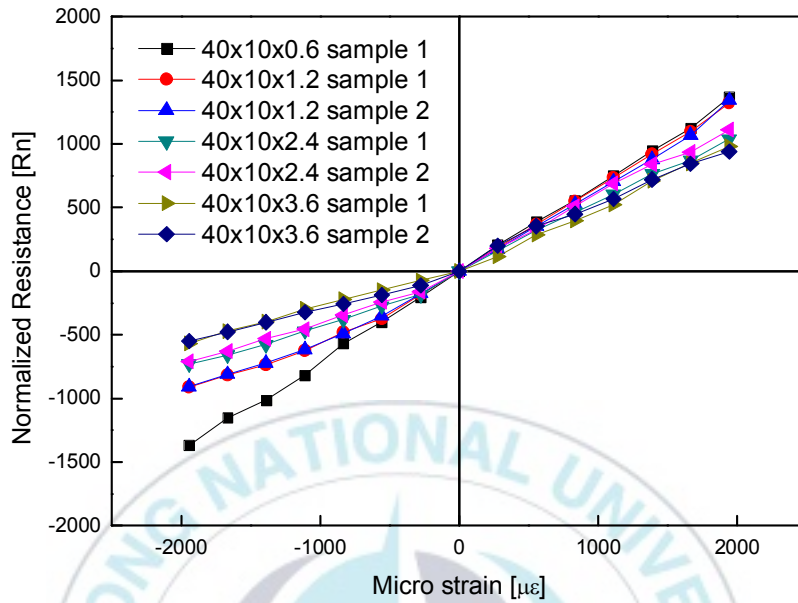


Fig. V-12 Sensitivity change according to 0.35wt% sensor thickness (width 10mm, length 40mm fixed).

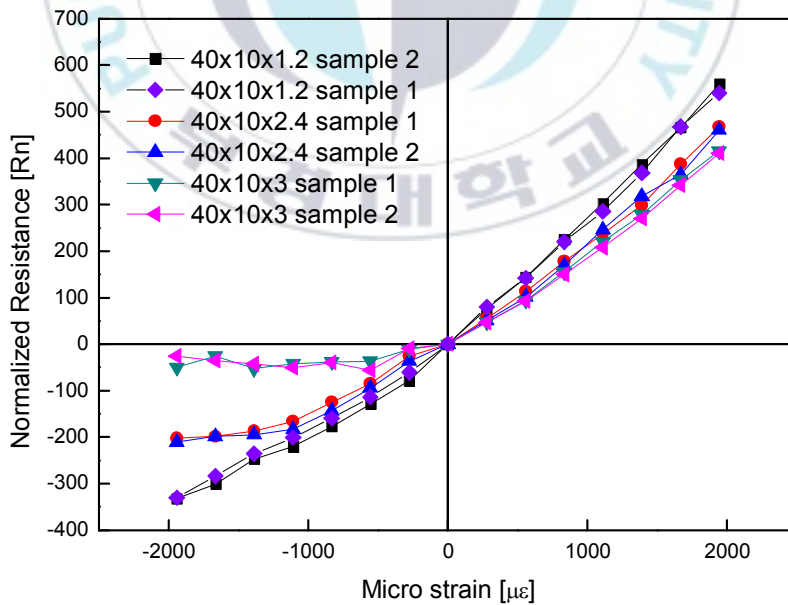


Fig. V-13 Sensitivity change according to 0.5wt% sensor thickness (width 10mm, length 40mm fixed).

탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재료 센서의 두께에 대한 센서 감도 특성에 대해 알아보기 위하여 실험을 실시하였으며 이를 그래프로 나타냈다. Fig. V-12 는 복합재료 내 탄소 나노 필러 함량이 0.35wt%이며, Fig. V-13은 0.5wt%이다. 함량 0.35wt% 센서의 길이는 40mm, 폭은 10mm로 고정되었으며, 두께는 0.6mm, 1.2mm, 2.4mm, 3.6mm로 변화시켰다. 함량 0.5wt% 센서도 길이는 40mm, 폭은 10mm로 고정되었으며. 두께는 1.2mm, 2.4mm, 3mm로 변화시켰다. 위의 Fig. V-12와 Fig. V-13에서 확인 할 수 있듯이 센서의 두께가 두꺼워 질수록 감도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 길이에 대한 실험 결과에서는 센서의 단위 유닛이 많아질수록 센서의 감도가 증가하는 경향을 보였는데, 마찬가지로 두께가 두꺼워 질수록 센서의 단위 유닛이 증가하게 되지만 본 실험의 결과는 이와 정반대 결과가 나왔다. 따라서 이의 원인을 규명하기 위하여 ANSYS-Workbench를 이용하여 외팔보 형태와 센서를 모사한 뒤 센서 및 외팔보에 발생되는 스트레인을 확인하였다.

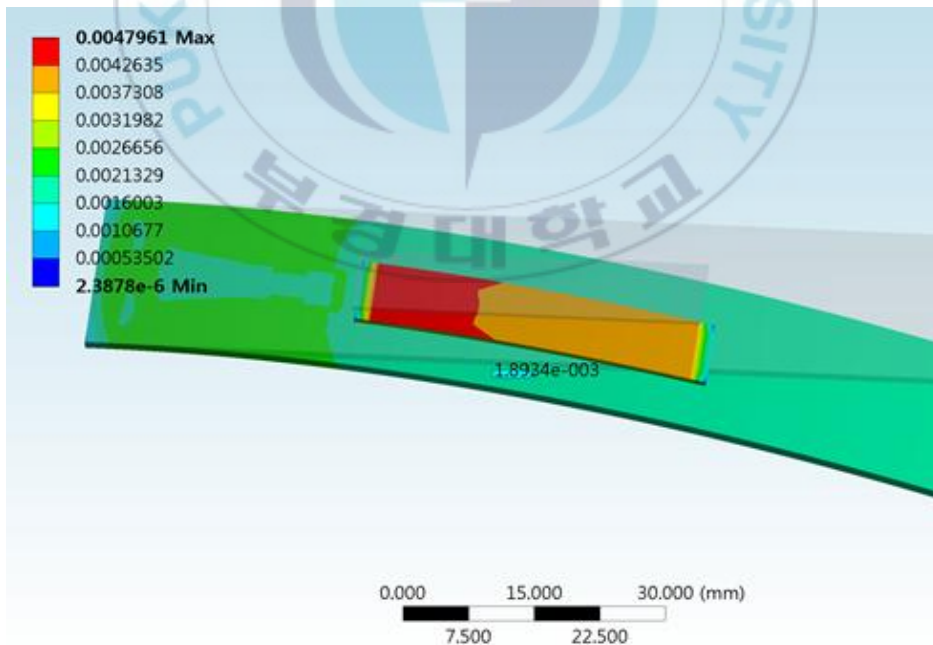


Fig. V-14 Structural analysis of cantilever with sensor using ANSYS-FEM (length 40mm, width 10mm, thickness 0.6mm).

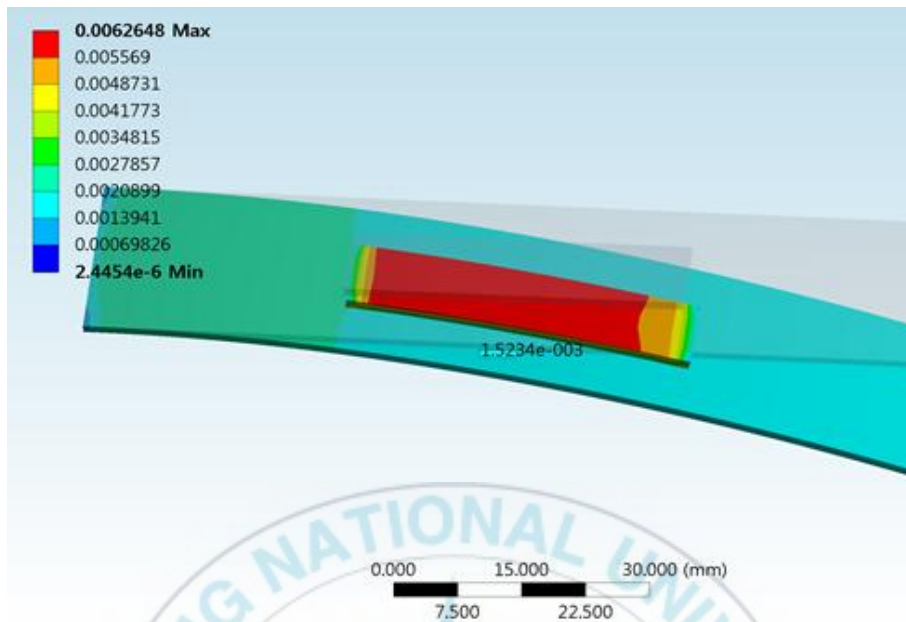


Fig. V-15 Structural analysis of cantilever with sensor using ANSYS-FEM (length 40mm, width 10mm, thickness 1.2mm).

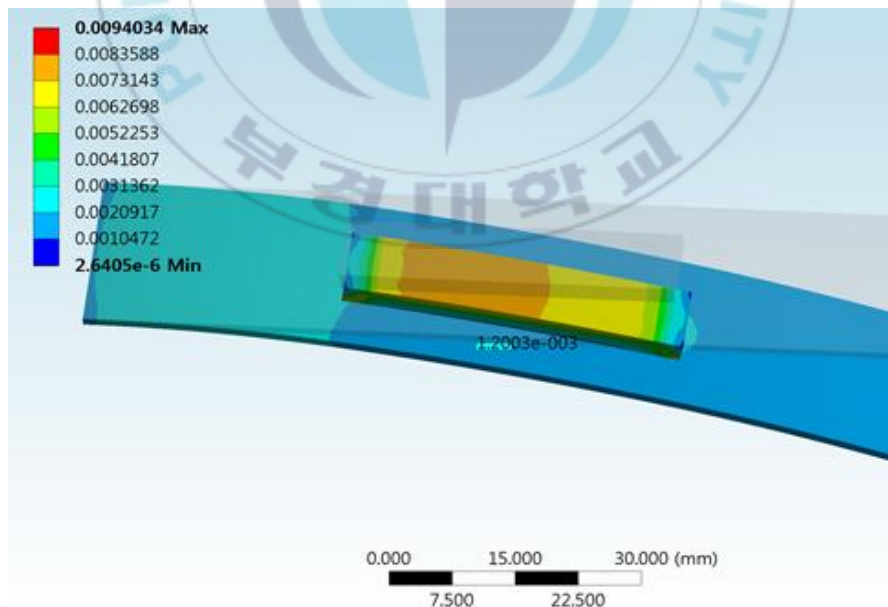


Fig. V-16 Structural analysis of cantilever with sensor using ANSYS-FEM (length 40mm, width 10mm, thickness 2.4mm).

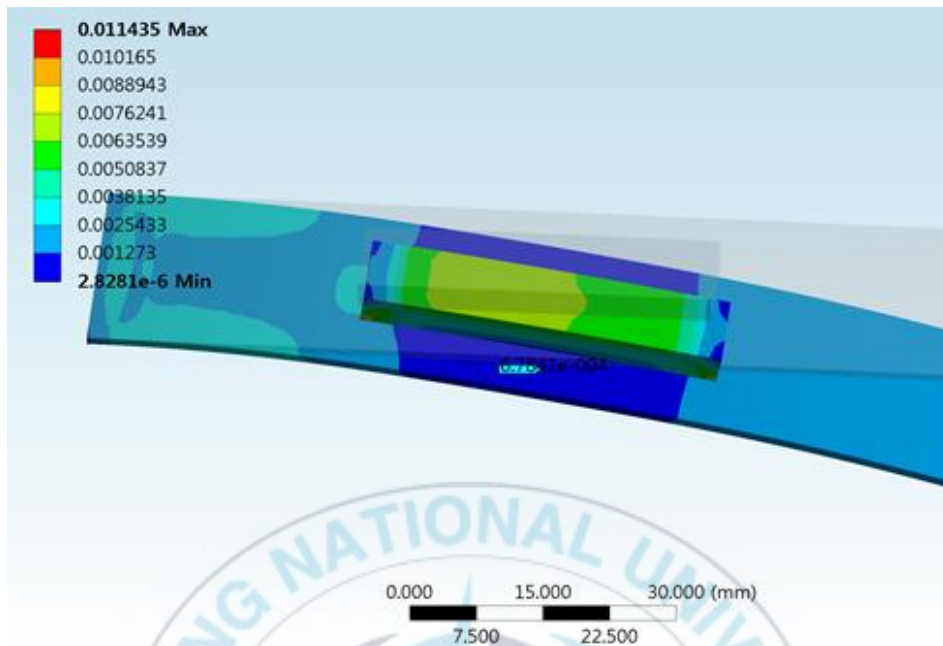


Fig. V-17 Structural analysis of cantilever with sensor using ANSYS-FEM
(length 40mm, width 10mm, thickness 3.6mm).

Fig. V-14 ~ V-17은 ANSYS 구조해석을 통한 결과 화면이다. 외팔보 형상과 센서 형상 및 센서 부착위치는 실제와 똑같이 구현하였으며, 외팔보 한쪽 끝은 고정하였고 다른 한쪽 끝은 임의로 변위 $-140\text{mm} \sim 140\text{mm}$ 를 가하였다. 형상 전체는 두개의 솔리드로 구성되었으며 외팔보의 형상 작동방식은 Material, 센서의 형상 작동방식은 Frozen을 사용하였다. 또한 외팔보의 물성치는 실제 사용된 외팔보의 물성치인 스테인리스 스틸을 사용하였으며, 센서의 물성치는 ANSYS의 library에서 제공되는 에폭시 복합재료를 사용하였다. 외팔보 끝단에 140mm 의 변위를 가하였을 때 센서 중심과 일치하는 외팔보에 발생하는 스트레인 $1944\mu\epsilon$ 이다. 하지만 위 그림에서 확인할 수 있듯이 해석상 발생하는 스트레인의 값은 이에 못 미치는 값들이다. 이를 표로 나타내면 다음 Table과 같이 나타낼 수 있다.

Table V-2 Strain generated at sensor attachment point of based material according to sensor thickness

	Theory	t = 0.6mm	t = 1.2mm	t = 2.4mm	t = 3.6mm
Micro-strain	1944 $\mu\epsilon$	1893 $\mu\epsilon$	1523 $\mu\epsilon$	1200 $\mu\epsilon$	678 $\mu\epsilon$

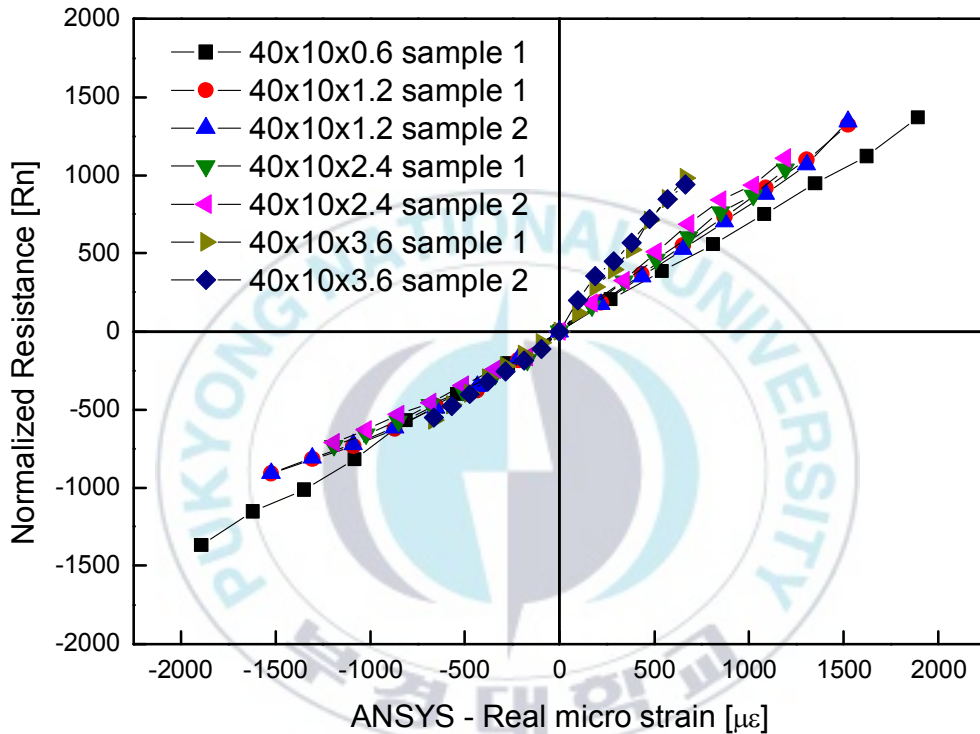


Fig. V-18 Changes in 0.35wt% sensor resistance to strain generated in based material obtained by ANSYS-FEM.

이를 토대로 앞서 나왔던 Fig. V-12 와 V-13의 그래프를 다시 그려보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. V-18 과 V-19 에서 볼 수 있듯이 앞선 Fig. V-12 와 V-13 그래프와 반대의 결과가 나온다는 것을 확인 할 수 있다. 외팔보에 부착된 센서의 두께가 두꺼워질수록 외팔보의 변형이 발생하는 것을 방해하기 때문에 실제 스트

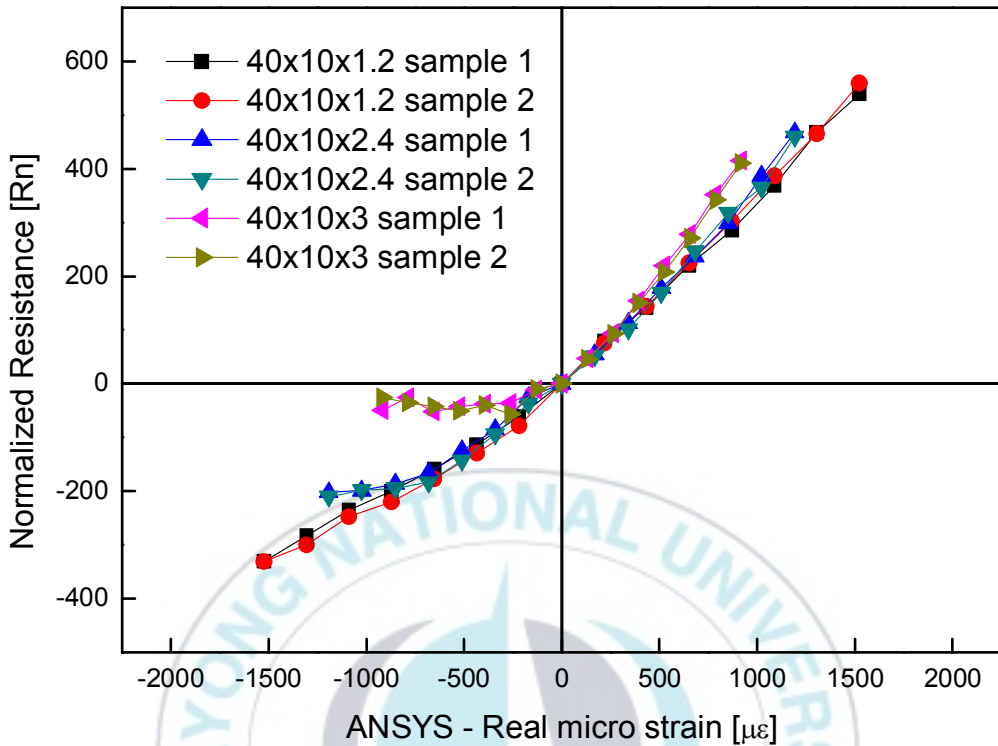


Fig. V-19 Changes in 0.5wt% sensor resistance to strain generated in based material obtained by ANSYS-FEM.

레인 값이 나오지 않는 것이다. 따라서 센서의 두께는 두꺼워질수록 센서의 감도는 증가하나 모재에 실제 발생해야 될 스트레인을 저해시키는 결과를 초래하게 된다. 또한 그림 Fig. V-18 에서 인장과 압축을 비교하였을 때 센서의 두께가 두꺼워질수록 비선형적인 경향을 보이고 있다. 이는 인장과 압축을 외팔보에 가하였을 때 외팔보에 부착되어 있는 센서의 두께로 인해 인장과 압축에서 전달되는 스트레인이 차이가 나기 때문이다. Fig. V-19에서 인장과 압축 부분에서 비선형적인 거동을 보임과 동시에 두께가 두꺼워질수록 압축에서 저항의 변화가 나타나지 않는 포화현상을 보여주고 있다. 이는 몰드식 압력센서에서 나타난 현상과 비슷하다. 압력 센서의 경우 한정된 공간 안에 있기 때문에 폴리머가 더 이상 변하지 않는 원인과 필러 사이의 거리가 더 이상 좁혀지

지 않는 원인이 같이 존재하였지만 본 연구의 경우 외팔보에 센서 아랫면만 접촉되어 있어 이를 한정된 공간 요인이 작용했다고 보기는 어려우며 따라서 필터 사이의 한정된 거리 요인이 주를 이룬다고 볼 수 있다.

센서 인장 시 복합재료가 견딜 수 있는 만큼 늘어나게 되며 그 내부에 존재하는 필터들 사이 간격이 늘어남에 따라 일정 수준까지 전기적 저항이 늘어날 수 있다. 하지만 압축 시에는 센서에 내부 필터 함량이 많거나 동일함량일 경우 필터의 종횡비가 작을 때 필터의 간격이 더 이상 좁아지지 않는 포화현상이 더 빨리 발생하게 된다.



V-3-나-(3). 센서 폭에 따른 센서 감도 특성

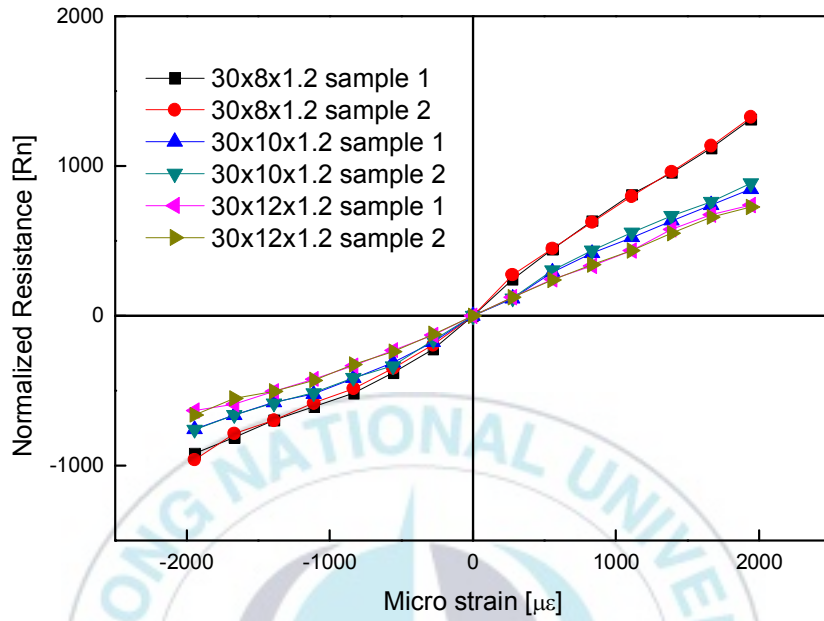


Fig. V-20 Sensitivity change according to 0.35wt% sensor width (length 30mm, thickness 1.2mm fixed).

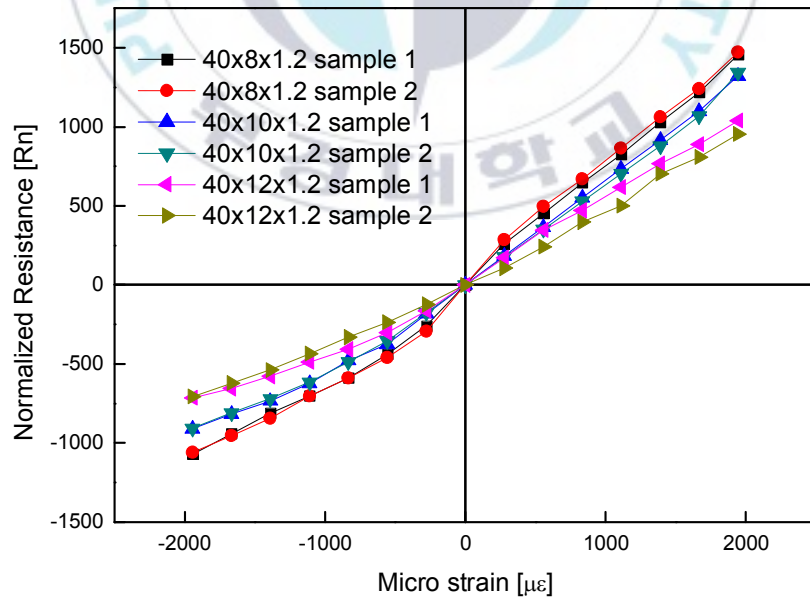


Fig. V-21 Sensitivity change according to 0.35wt% sensor width (length 40mm, thickness 1.2mm fixed).

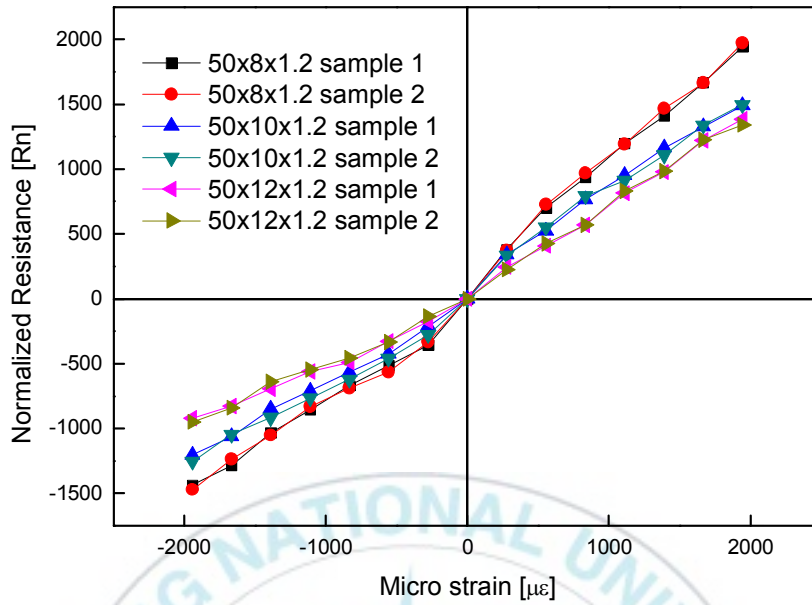


Fig. V-22 Sensitivity change according to 0.35wt% sensor width (length 50mm, thickness 1.2mm fixed).

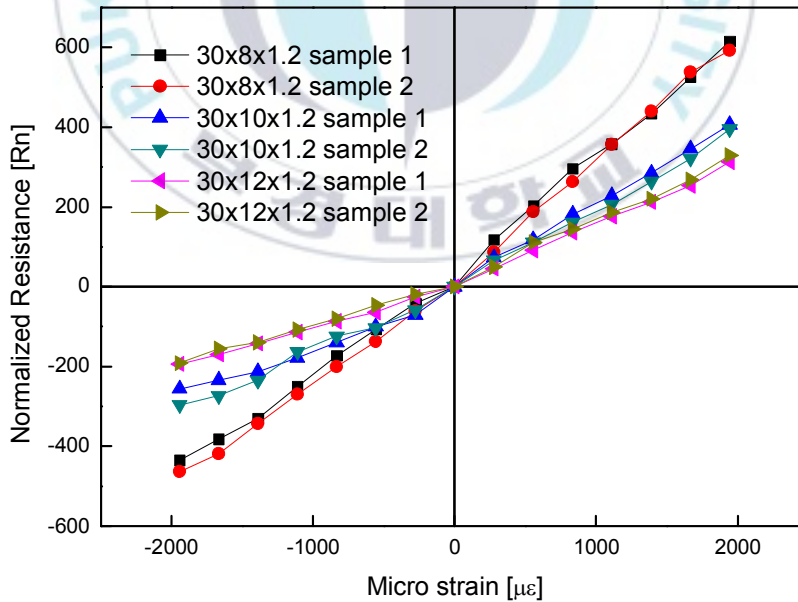


Fig. V-23 Sensitivity change according to 0.5wt% sensor width (length 30mm, thickness 1.2mm fixed).

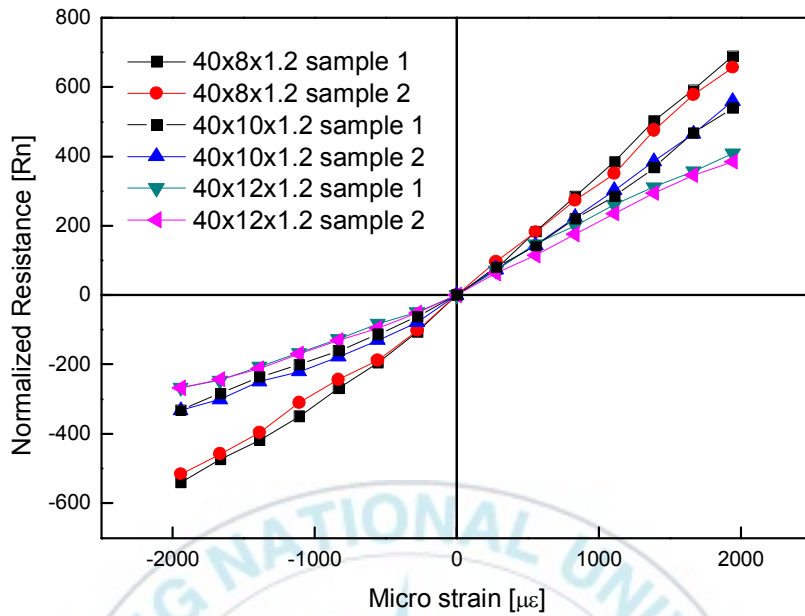


Fig. V-24 Sensitivity change according to 0.5wt% sensor width (length 40mm, thickness 1.2mm fixed).

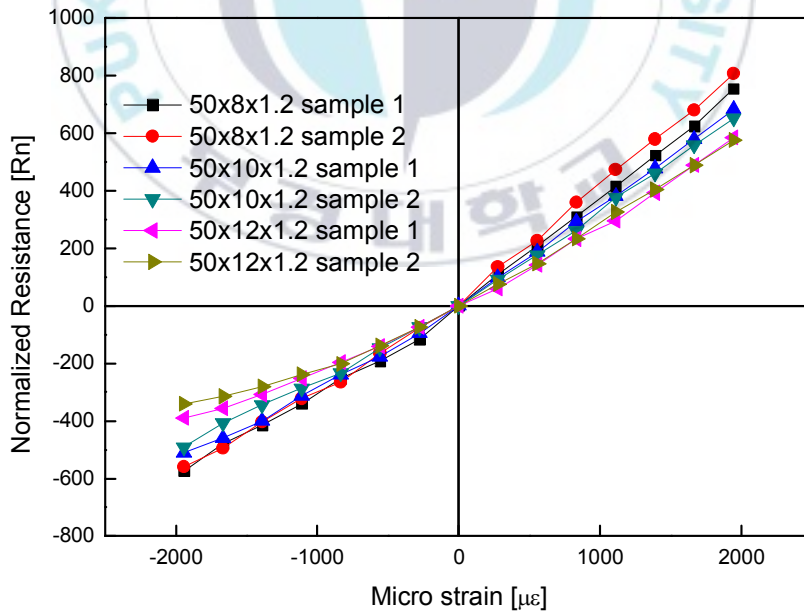


Fig. V-25 Sensitivity change according to 0.5wt% sensor width (length 50mm, thickness 1.2mm fixed).

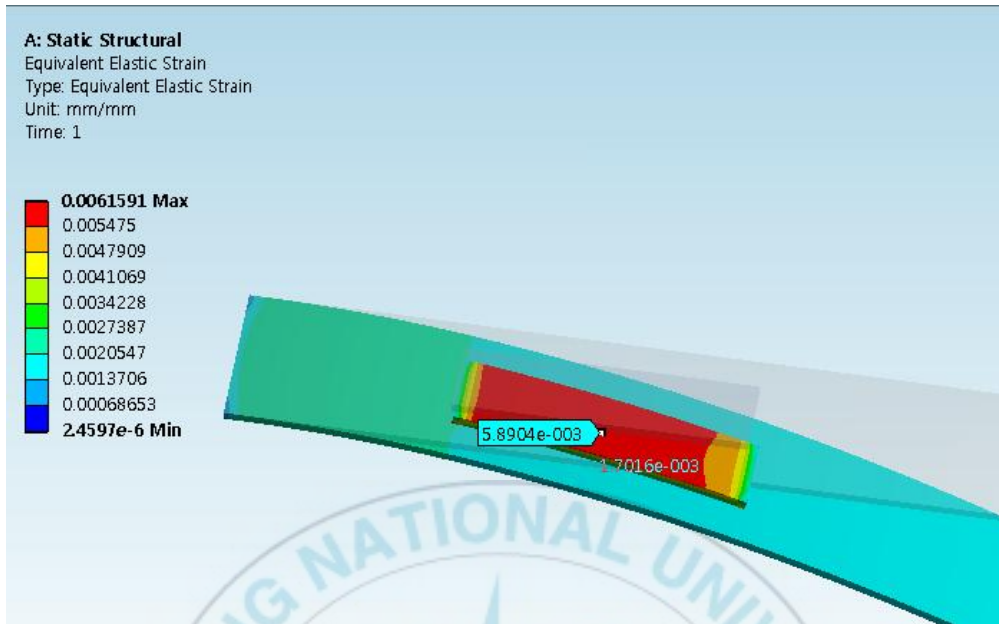


Fig. V-26 Structural analysis of cantilever with sensor using ANSYS-FEM (length 40mm, width 12mm, thickness 1.2mm).

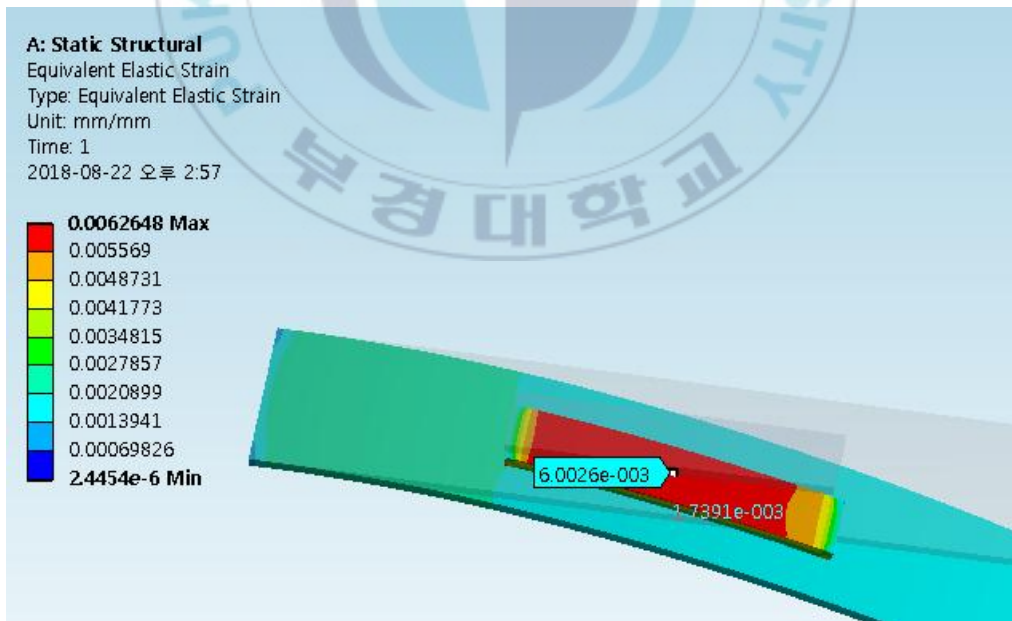


Fig. V-27 Structural analysis of cantilever with sensor using ANSYS-FEM (length 40mm, width 10mm, thickness 1.2mm).

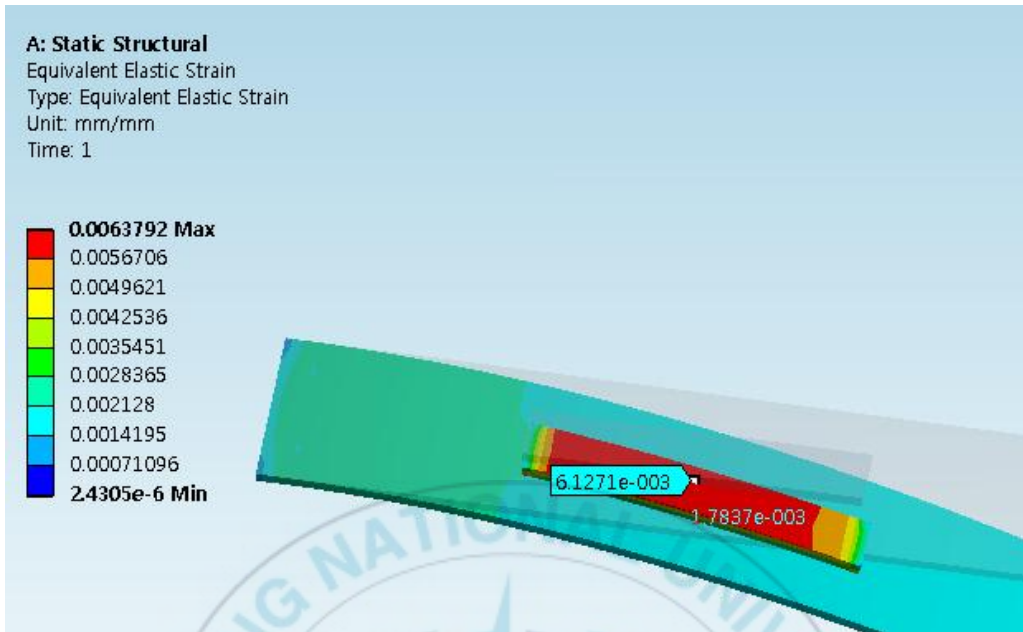


Fig. V-28 Structural analysis of cantilever with sensor using ANSYS-FEM (length 40mm, width 8mm, thickness 1.2mm).

Table V-3 Strain due to sensor thickness generated in sensor and cantilever

Strain	Sensor shape (mm)	40 x 8 x 1.2 (L x W x T)	40 x 10 x 1.2 (L x W x T)	40 x 12 x 1.2 (L x W x T)
Cantilever		1783 $\mu\epsilon$	1739 $\mu\epsilon$	1701 $\mu\epsilon$
Strain sensor (CNT composite)		6127 $\mu\epsilon$	6002 $\mu\epsilon$	5890 $\mu\epsilon$

탄소 나노 재료 기반 복합재료 센서의 폭에 따른 센서의 감도 특성에 대해 알아보기 위해 센서의 두께는 1.2mm로 통일하였으며, 길이는 30mm, 40mm, 50mm로 각각 고정 후 폭을 8mm, 10mm, 12mm로 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 센서의 함량은 0.35wt%, 0.5wt% 이다, 각 센서 샘플당 2개씩 제작 및 실험하였으며, 이를 그림 Fig. V-20~V-22 와 V-23~V-25 에 나타냈다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 센서의 길이 30mm, 40mm, 50mm일

때 센서의 폭이 작아짐에 따라 센서의 감도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. ANSYS-Workbench를 통하여 실제 외팔보와 센서 위치, 센서 형상을 구현한 후 외팔보 끝단에 -140mm 변위를 가하였을 때 센서의 중심 및 센서 중심위치의 외팔보에 발생하는 스트레인을 Fig. V-26~V-28과 같이 알아보았으며 이의 결과로 나온 수치를 Table. V-3에 정리하였다. 센서의 폭이 줄어들수록 외팔보에 더 많은 스트레인이 발생하며, 이로 인해 외팔보에 변형이 발생될 때 센서에 더 많은 스트레인이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 센서의 폭이 커짐에 따라 외팔보에 센서가 부착되어 있는 지점에서 스트레인이 발생하는 것을 방해하게 되며, 이로 인해 실제 발생되어야 하는 외팔보의 스트레인이 발생되지 않는 것이다.



V-4. 센서 형상에 따른 센서 스트레인 및 감도의 상관관계

앞서 실험한 센서 형상에 따른 센서 감도의 실험결과에서 센서 길이가 길수록, 두께가 두꺼울수록, 폭이 좁을수록 센서 감도가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 센서에 스트레인이 더 잘 발생하며 이로 인해 내부 필러의 움직임이 원활해지기 때문이다. 또한 복합재 내부에 존재하는 필러의 함량이 적을수록 센서의 감도가 증가함도 확인할 수 있었는데, 마찬가지로 내부 필러의 움직임이 이에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 앞선 이론적 배경의 전왜성에서 최종적으로 나오는 식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\nu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \Rightarrow G.F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1+2\nu) + \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

위식은 일반적인 금속 스트레인 게이지에서 나타나는 전왜성효과를 나타낸 것이다. 반도체 형식을 사용한 스트레인 게이지의 전왜성효과를 나타내는 식은 다음 식(5.6) 과 같다.

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\nu)\varepsilon + \pi\sigma \Rightarrow G.F = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = 1+2\nu + \pi E \quad (5.6)$$

여기서 π 는 길이 방향의 압저항 계수로서 결정체의 방향에 의존하는 값이며, E 는 탄성계수이다. 반도체 기반 센서가 응력을 받을 경우 나타나는 저항변화는 치수변화에 의한 저항변화와 응력효과에 의한 저항변화의 합이 된다. 반도체형 센서 전왜효과는 치수변화에 의한 효과보다 압저항계수 및 응력에 대한 효과가 지배적이다. 탄소 나노 튜브는 이들의 원통형 구조에 따라 도체성과 반도체성으로 나뉘지만, 실제 이를 선택적으로 생산하기는 쉽지 않다. 따라서

대부분의 탄소 나노 튜브 분말에는 도체성과 반도체성이 혼합되어 있다. 또한 본 연구에서 사용된 비스페놀A(bisphenol-A)형 에폭시는 결정성이 낮다. 따라서 탄소 나노 재료 기반의 복합재료는 도체에 의한 전왜 효과와 반도체에 의한 효과를 동시에 받는다. 실리콘과 같은 결정형 반도체 압저항 효과는 응력이 가해졌을 때 결정의 격자 변형이 에너지 밴드(energy band) 구조에 변형을 일으키게 되고, 그로 인해 캐리어(carrier)가 움직이게 된다. 따라서 응력에 의해 캐리어의 이동도와 분포가 변하게 되어 저항이 변하게 된다. 반면, 탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재료의 압저항 효과는 반도체 기지재료 내 전도성의 탄소 나노 필러가 있으며 이들 탄소 나노 필러 사이의 거리로 인해 저항이 변하게 된다.

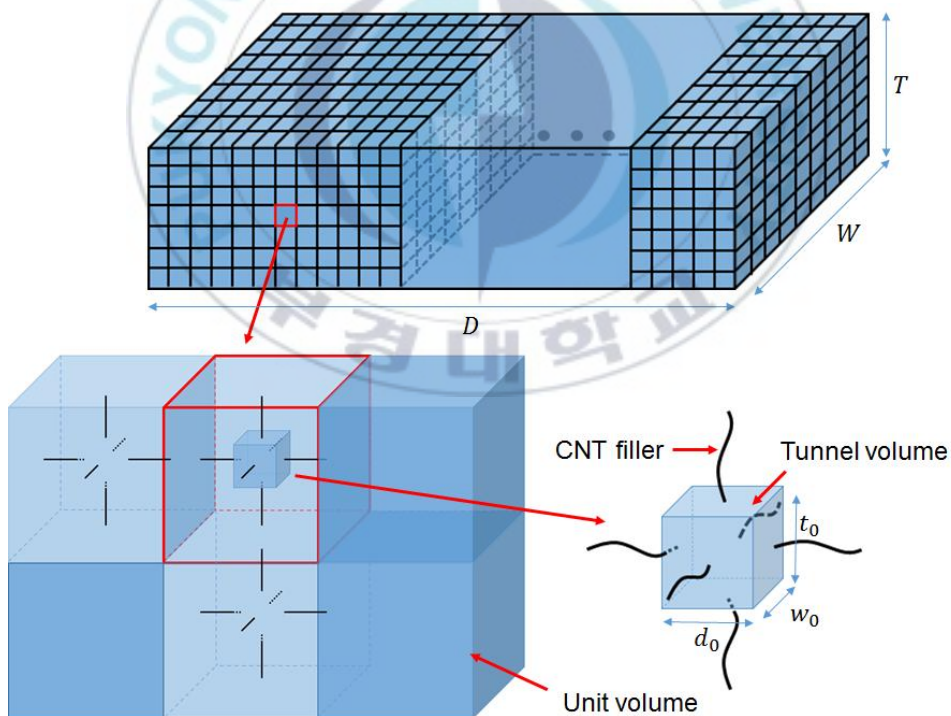


Fig. V-29 Schematic diagram of unit volume configuration inside a carbon nanotube-based composites sensor.

Fig. V-29는 탄소 나노 튜브 기반 복합재료 센서의 전왜 메커니즘을 부피 유닛 단위로 나누어 표현한 것이다. 탄소 나노 재료 기반 복합재료는 제작 공정 중 뭉쳐있는 탄소 나노 튜브의 반데르발스 결합을 초음파 또는 직접적인 물리력을 가해 분산시켜 준 뒤 기지재료인 폴리머와 혼합된다. 여기서, 탄소 나노 튜브가 폴리머 기지재료 내 최적으로 분산되어 있다고 가정할 경우 Fig. V-29의 좌측 하단과 같이 어떤 단위 공간 안에 일정량만큼 포함되게 된다. 적절하게 분산되어 있는 전도성을 가진 탄소 나노 튜브의 사이에는 이들 필러 간의 전기적 흐름을 방해하게 되는 폴리머 공간이 생성되게 된다. 전도성 필러가 포함된 복합재료의 전체 전도성은 다음과 같은 식을 통해서 나타낼 수 있다.

$$C_c = C_f V_f + C_m V_m = C_f V_f + C_m (1 - V_f) \quad (5.7)$$

여기서 C_c 는 복합재료의 전도성이며, C_f 는 내부 필러의 전도성, V_f 는 필러의 부피율, C_m 은 기지재료의 전도성, V_m 은 기지재료의 부피율이다. 여기서 내부 필러의 부피율이 높아지게 되면 상대적으로 기지재료의 부피율이 작아진다. 이 두 요소의 비율은 Fig. V-29 우측 하단에서 볼 수 있는 것처럼 전기가 통할 수 있는 공간, 즉 전기 터널 공간의 크기 V_{tunnel} 을 좌우하게 되며 다음과 같은 관계를 가지게 된다. 또한, 동일 함량의 경우 탄소 나노 튜브의 종횡비와 V_{tunnel} 의 관계는 비례한다. 하지만 본 연구에서는 한 종류의 탄소 나노 튜브만을 사용하였기에 이에 대해 나타나는 효과는 고려하지 않았다.

$$V_f \propto \frac{1}{V_{tunnel}} ; V_{tunnel} = d_0 w_0 t_0 ; V_{tunnel} \propto A \cdot R_{CNT} \text{ (if, same wt\%)}$$

따라서 복합재료에 포함되는 필러 함량에 따라 초기 필러간의 거리 또는 초기 전기 터널 공간의 규격 d_0, l_o, t_0 이 정해지며, 이로 인해 센서 초기 저항의 크기가 결정된다. 앞서 설명하였던 충격센서 설명의 식 (4.4)에서 일부를 다시 보게 되면, 다음과 같다.

$$G.F_{CNT-composites} = \frac{\frac{\Delta R_{composites}}{R_{composites}}}{\varepsilon} = \frac{R_N}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta R_{filler} + \Delta R_{tunnel} + \Delta R_{contact}}{R_{filler} + R_{tunnel} + R_{contact}}}{\varepsilon} \quad (4.4)$$

여기서, ΔR_{filler} 의 영향은 상대적으로 ΔR_{tunnel} 과 $\Delta R_{contact}$ 보다 매우 적다고 하였으며 다음 식 (4.5)와 같다고 표현하였다.

$$\Delta R_{composites} \approx \Delta R_{tunnel} + \Delta R_{contact} \quad (4.5)$$

또한, 이번 장에서 복합재료 내의 필러가 최적으로 분산되어 있다고 하였으므로, $\Delta R_{contact}$ 의 영향 또한 거의 없는 것으로 간주하였다. 따라서 탄소 나노 튜브를 기반으로 한 복합재료의 저항변화 메커니즘은 필러간의 터널링 저항 변화가 지배적이라 볼 수 있으며, 식 (4.5)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\Delta R_{composites} \approx \Delta R_{tunnel} \quad (5.8)$$

제작된 복합재료 센서 내부의 두 필러간의 전기적 저항은 다음 식 (4.6)과 같다.

$$R_{tunnel} = \frac{h^2 d}{A e^2 \sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi d}{h} \sqrt{2m\lambda}\right) \quad (4.6)$$

여기서 x축 방향으로 임의의 스트레인 ε_x 가 발생하였을 때 저항의 변화 $\Delta R_{tunnel-x}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta R_{tunnel-x} = \frac{h^2(d_0 + d_0\varepsilon_x)}{(w_o - w_o\nu\varepsilon_x)(t_0 - t_0\nu\varepsilon_x)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(d_0 + d_0\varepsilon_x)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (5.9)$$

이때 x축 방향에 작용하는 스트레인 ε_x 에 대한 y, z축의 저항변화는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta R_{tunnel-y} = \frac{h^2(w_o - w_o\nu\varepsilon_x)}{(d_0 + d_0\varepsilon_x)(t_0 - t_0\nu\varepsilon_x)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(w_o - w_o\nu\varepsilon_x)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (5.10)$$

$$\Delta R_{tunnel-z} = \frac{h^2(t_0 - t_0\nu\varepsilon_x)}{(w_o - w_o\nu\varepsilon_x)(d_0 + d_0\varepsilon_x)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(t_0 - t_0\nu\varepsilon_x)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (5.11)$$

여기서 ν 는 폴리머 기지재료의 푸아송 비이다. 탄소 나노 튜브 복합재료 센서는 측정하고자 하는 축에 전극을 연결함으로써 각각 다른 전기적 저항의 변화를 얻을 수 있다. 전극이 x축 방향으로 연결이 되었다고 가정하면, x축 방향으로 인장과 압축이 발생될 때 x축으로 저항은 exp의 기울기로 늘어나고 y축과 z축의 저항은 exp의 기울기로 줄어들게 되며, x축 전극 연결 방향에 의해 $\Delta R_{tunnel-x}$ 가 지배적인 항이 된다. 따라서 탄소 나노 복합재료를 스트레인 센서로 활용할 시 전극 연결 방향은 측정하고자 하는 방향, 즉 여기서는 길이 방향으로 활용하는 것이 좋으며 이로 인해 더 나은 감도를 확보할 수 있다. 마찬가지로 탄소 나노 복합재료 센서를 단순 압축에 대한 압력센서로 활용할 경우 z축 방향으로 힘을 주로 받게 되며 ε_z 가 발생한다. 이에 대한 각 축방향

의 저항변화는 다음과 같다.

$$\Delta R_{tunnel-x} = \frac{h^2(d_o + d_o\nu\varepsilon_z)}{(w_0 + w_0\nu\varepsilon_z)(t_0 - t_0\varepsilon_z)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(d_o + d_o\nu\varepsilon_z)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (5.12)$$

$$\Delta R_{tunnel-y} = \frac{h^2(w_0 + w_0\nu\varepsilon_z)}{(d_o + d_o\nu\varepsilon_z)(t_0 - t_0\varepsilon_z)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(w_0 + w_0\nu\varepsilon_z)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (5.13)$$

$$\Delta R_{tunnel-z} = \frac{h^2(t_0 - t_0\varepsilon_z)}{(w_0 + w_0\nu\varepsilon_z)(d_o + d_o\nu\varepsilon_z)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(t_0 - t_0\varepsilon_z)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (5.14)$$

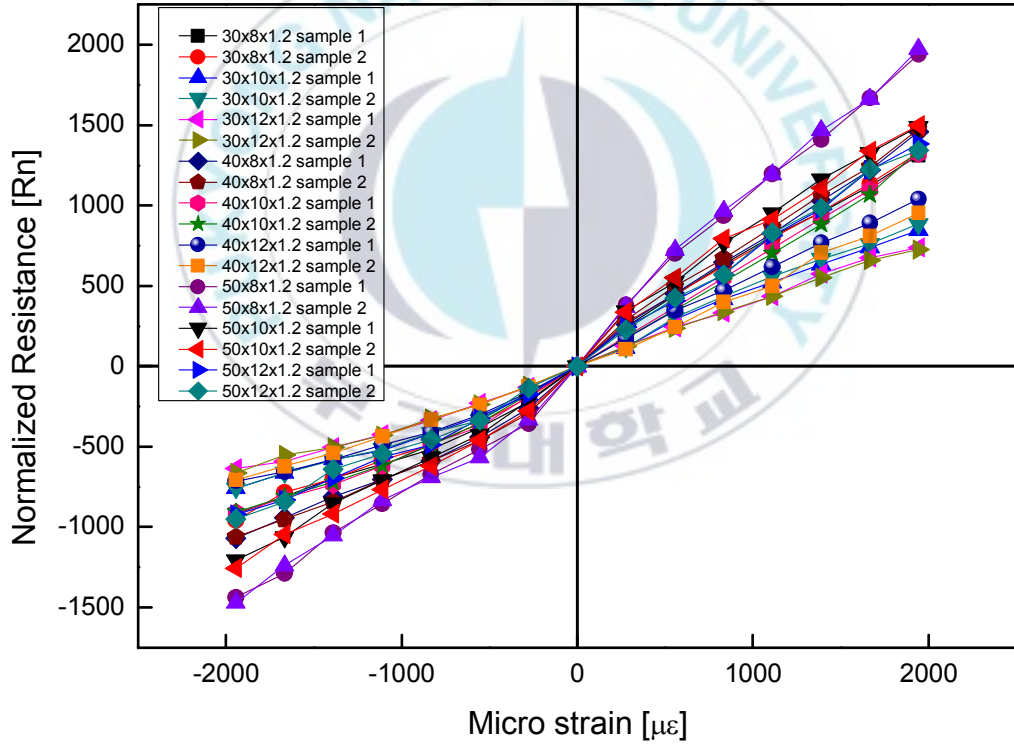


Fig. V-30 0.35wt% sensor sensitivity comparison according to shape.

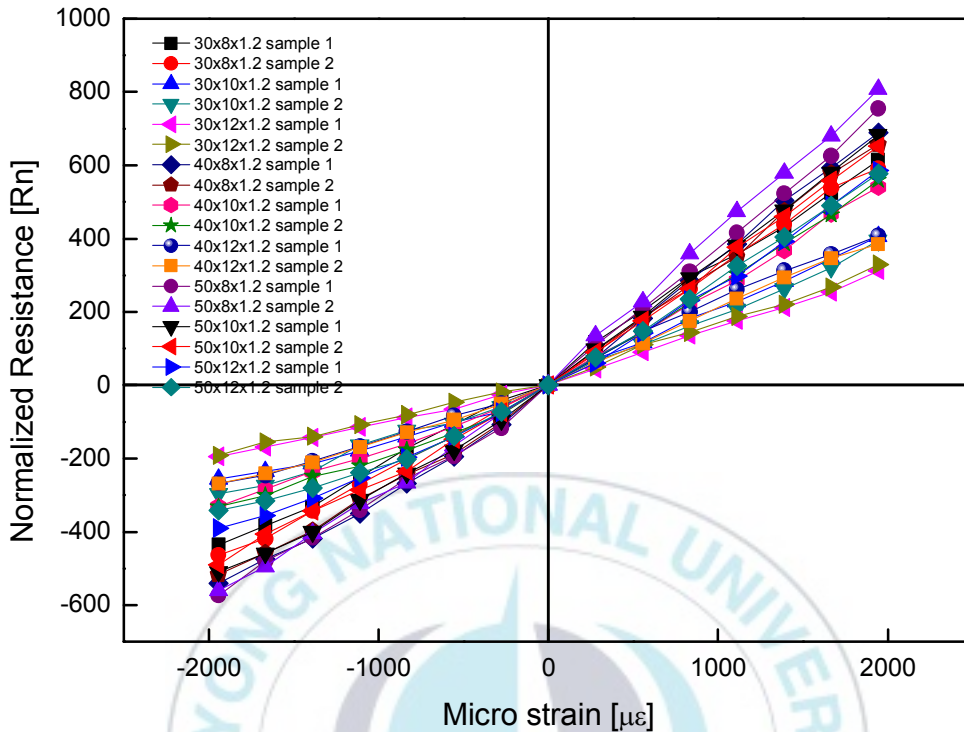


Fig. V-31 0.5wt% sensor sensitivity comparison according to shape.

이때도 역시 센서 전극 연결 방향은 힘이 작용하는 방향인 z축 방향으로 하는 것이 좋으며, 올바른 활용을 할 수 있을 것이다.

앞의 센서 형상에 대한 감도에서 센서에 변형이 더 잘 발생하는 구조가 형성되어야 감도가 높아진다고 언급했었다. 이는 센서에 발생하는 스트레인이 전기 터널 공간에서 필러간의 거리를 규정시키기 때문이다. 다음 Table. V-4는 앞선 실험에서 외팔보에 임의의 변위 -140mm ~140mm를 가하였을 때 제작된 탄소 나노 튜브 복합재료 센서 샘플들에 발생하는 스트레인의 최대, 최소값을 ANSYS-Workbench로 구하여 이를 제작된 센서 샘플들 간의 상대감도 순위를 비교해 본 것이다. 그래프 및 표에서 확인할 수 있듯이 센서에 발생하는 최대스트레인이 클수록 센서의 감도가 증가하였다. 앞서 V-3-나-(1)절의 식 (5.5)처럼 센서 감도는 센서 단위 유닛 파트에 발생하는 스트레인에 대한 기준

저항 대비 저항변화량의 총합이라고 언급하였다. 또한 탄소 나노 튜브만을 사용하여 제작된 탄소 나노 복합재료 센서 저항의 변화는 전기적 터널의 변화에서 비롯된다고 하였다.

Table V-4 Maximum and minimum strain according to sensor shape

L x W x T (mm)	Maximum strain ($\mu\epsilon$)	Minimum strain ($\mu\epsilon$)	Relative maximum strain ranking	Relative sensitivity ranking (0.35wt%)	Relative sensitivity ranking (0.5wt%)
30 x 8 x 1.2	6226.8	1102.7	6	5*	4
30 x 10 x 1.2	6104	1087.8	8	8	8
30 x 12 x 1.2	5989.7	1075.7	9	9	9
40 x 8 x 1.2	6379.2	1095.2	3	3	2*
40 x 10 x 1.2	6264.8	1082.7	5	5*	6
40 x 12 x 1.2	6159.1	1071.1	7	7	7
50 x 8 x 1.2	6528.1	1084.8	1	1	1
50 x 10 x 1.2	6422.9	1073.6	2	2	2*
50 x 12 x 1.2	6326.6	1064.8	4	4	5

$$\begin{aligned}
 G.F_{CNT-composites} &= \frac{\frac{\Delta R_{s_0}}{R_{s_0}}}{\epsilon_{s_0}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_1}}{R_{s_1}}}{\epsilon_{s_1}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_2}}{R_{s_2}}}{\epsilon_{s_2}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_3}}{R_{s_3}}}{\epsilon_{s_3}} + \frac{\frac{\Delta R_{s_4}}{R_{s_4}}}{\epsilon_{s_4}} + \dots \quad (5.5) \\
 &= \frac{\sum_{n=s_0}^{s_s} \frac{\Delta R_n}{R_n}}{\sum_{n=s_0}^{s_s} \frac{3c(L-n)}{L^3} y(L)} = \frac{\sum_{n=s_0}^{s_s} \frac{\Delta R_n}{R_n}}{\sum_{n=s_0}^{s_s} \epsilon_n} (R_{s_0} = R_{s_1} = \dots = R_{s_s})
 \end{aligned}$$

식 (5.5)과 식 (5.8)을 조합하게 되면 다음 식 (5.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
G.F_{CNT-composites} &= \frac{\frac{\Delta R_{tunnel-s_0}}{R_{tunnel-s_0}}}{\varepsilon_{s_0}} + \frac{\frac{\Delta R_{tunnel-s_1}}{R_{tunnel-s_1}}}{\varepsilon_{s_1}} + \frac{\frac{\Delta R_{tunnel-s_2}}{R_{tunnel-s_2}}}{\varepsilon_{s_2}} + \dots \\
&= \frac{\sum_{n=s_0}^{s_s} \frac{\Delta R_{tunnel-n}}{R_{tunnel-n}}}{\sum_{n=s_0}^{s_s} \varepsilon_n} (R_{tunnel-s_0} = R_{tunnel-s_1} = \dots = R_{tunnel-s_s})
\end{aligned} \tag{5.15}$$

위 식에서 볼 수 있는 것처럼 센서 단위 유닛마다 미소구간 대비 터널링 저항 변화가 각각 발생된다. 하지만, 센서에 동일 변형이 가해지더라도 센서 형상에 따라 유닛 구간마다 동일 스트레인이 발생하는 것이 아니기 때문에 센서의 감도가 바뀌게 되는 것이다. x축으로 센서가 ε_x 만큼 임의의 스트레인이 양의 방향, 음의 방향으로 발생되었을 때 x축의 한 지점의 단위 터널 저항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta R_{tunnel-x(tension)} &= \frac{h^2(d_0 + d_0\varepsilon_x)}{(w_o - w_o\nu\varepsilon_x)(t_0 - t_0\nu\varepsilon_x)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(d_0 + d_0\varepsilon_x)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \\
\Delta R_{tunnel-x(compression)} &= \frac{h^2(d_0 - d_0\varepsilon_x)}{(w_o + w_o\nu\varepsilon_x)(t_0 + t_0\nu\varepsilon_x)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(d_0 - d_0\varepsilon_x)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right)
\end{aligned}$$

여기서 인장 시 최대스트레인이 발생하는 지점은 위 식의 $\exp$ 항의 효과로 다른 지점에 비해 저항의 변화가 크게 변화된다. 반대로 압축 시 최대스트레인이 발생하는 지점 또한 $\exp$ 항의 효과로 인해 다른 지점에 비해 빠르게 전도성이 통하게 되는 길이 형성된다. 따라서 최대 스트레인이 발생하는 단위 유닛 지점은 다른 지점의 단위 유닛보다 효과가 크게 나타나며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

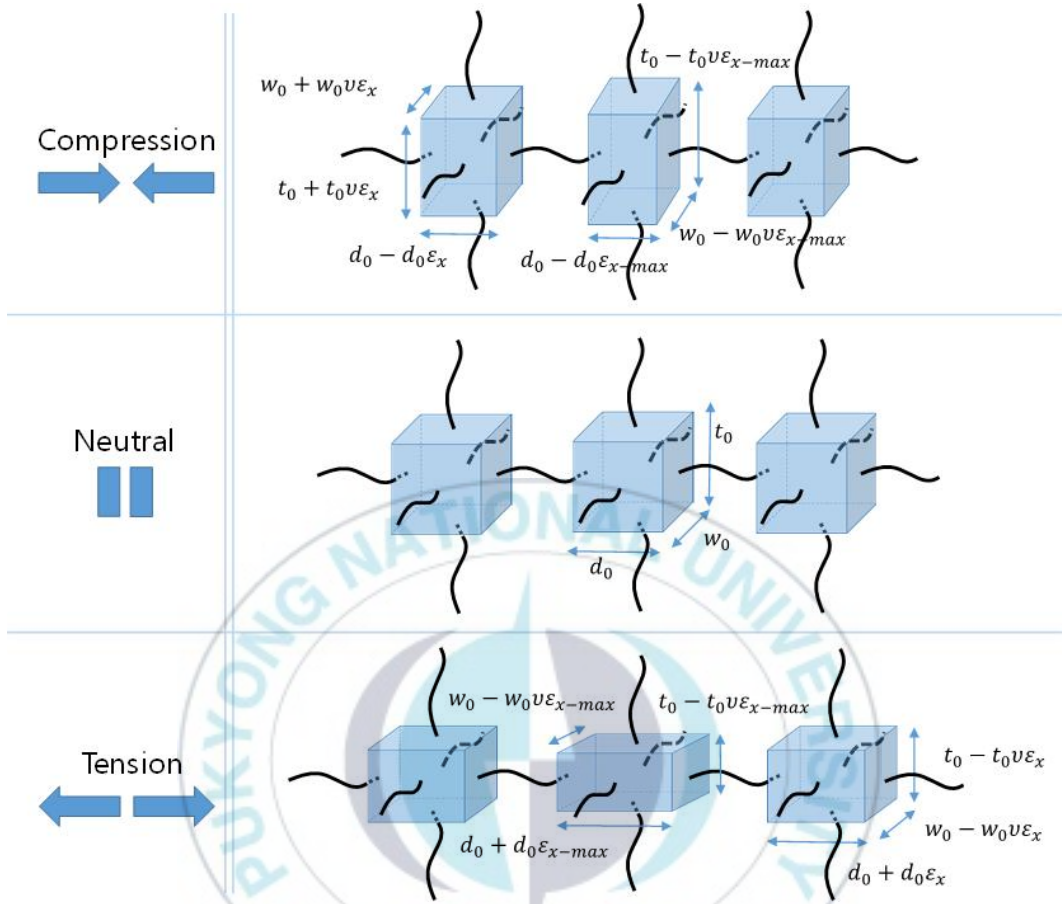


Fig. V-32 Change in unit volume of carbon nanotube composites due to tension and compression.

$$\Delta R_{tunnel-max\ strain} \gg \Delta R_{tunnel-standard\ strain} \quad (5.16)$$

따라서, 탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재료 센서의 감도 특성은 센서에 임의의 변형이 가해질 때 센서에 발생될 수 있는 최대 발생 스트레인의 크기에 좌우된다.

Table V-5 Comparison of sensor width to length ratio and strain

L x W x T (mm)	$\alpha = \frac{L}{W}$	Relative α ranking	Maximum strain ($\mu\epsilon$)	Relative maximum strain ranking
30 x 8 x 1.2	3.75	6	6226.8	6
30 x 10 x 1.2	3	8	6104	8
30 x 12 x 1.2	2.5	9	5989.7	9
40 x 8 x 1.2	5	2*	6379.2	3
40 x 10 x 1.2	4	5	6264.8	5
40 x 12 x 1.2	3.33	7	6159.1	7
50 x 8 x 1.2	6.25	1	6528.1	1
50 x 10 x 1.2	5	2*	6422.9	2
50 x 12 x 1.2	4.16	4	6326.6	4

Table. V-5는 센서 형상의 폭에 대한 길이의 비를 α 로 나타내고 이를 최대 발생 스트레인과 비교해본 것이다. 이 비율이 높은 정도에 따라 최대 발생 스트레인이 비례해서 커지며, 이에 따른 센서 감도가 Fig. V-30, Fig. V-31, Table. V-4에서 볼 수 있는 것처럼 상대적으로 큰 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 센서 형상에서 비율 α 는 센서 감도와 상관관계가 있다고 할 수 있다. 다음은 II장의 굽힘 응력에 대해 한 지점 x에 발생하는 스트레인에 관한 (2.7)식을 제작한 센서의 형상에 대해 나타낸 것이다.

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_{composites}}{E_{composites}} = \frac{P(L-x)c}{IE_{composites}} \quad (5.17)$$

여기서 형상이 본 연구에서 제작된 센서의 형상처럼 사각 단면의 경우 단면 2차 모멘트는 다음과 같다.

$$I = \frac{WT^3}{12} \quad (5.18)$$

식 (5.18)을 식 (5.17)에 대입하면 다음 식 (5.19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_x = \frac{12P(L-x)c}{WT^3 E_{composites}} \quad (5.19)$$

여기서 힘 P는 모재가 변형하는 임의의 지점 y로 변형 될 때 가해지는 힘이다. 모재가 y 지점까지 변형이 되었을 때, 센서의 형상에 관계없이 센서는 동일하게 변형이 된다. 이때 센서의 형상이 모재에 작용하는 힘P에 끼치는 영향이 미비하다고 가정하였다. 따라서 제작된 센서의 두께가 동일하면 임의의 지점 x에서 발생하는 스트레인도 폭에 반비례하며 길이에 비례하게 된다. 위 식 (5.19)를 x축 방향 임의의 지점에 스트레인 ε_x 가 발생하였을 때 저항의 변화 $\Delta R_{tunnel-x}$ 식(5.9)에 대입하여 정리하면 다음 식 (5.20)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 주요 변수를 제외한 센서가 제작될 때 정해지는 e, m, λ , h, E 는 상수로 취급하였다.

$$\Delta R_{tunnel-x} = \frac{h^2(d_0 + d_0\varepsilon_x)}{(w_o - w_o\nu\varepsilon_x)(t_0 - t_0\nu\varepsilon_x)e^2\sqrt{2m\lambda}} \exp\left(\frac{4\pi(d_0 + d_0\varepsilon_x)}{h}\sqrt{2m\lambda}\right) \quad (5.9)$$

$$C_1 = \frac{h^2}{e^2 \sqrt{2m\lambda}}, \quad C_2 = \frac{4\pi \sqrt{2m\lambda}}{h}, \quad C_3 = \frac{12}{E_{composites}}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= C_3 \frac{P(L-x)c}{WT^3} = C_3 \frac{L}{W} \frac{Pc}{T^3} - \frac{x}{W} \frac{Pc}{T^3} = C_3 \left(\frac{L}{W} - \frac{x}{W} \right) \frac{Pc}{T^3} \\ &= C_3 \frac{L}{W} \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{Pc}{T^3} \end{aligned}$$

$$\Delta R_{tunnel-x} =$$

$$C_1 \frac{(d_0 + d_0 C_3 \frac{L}{W} (1 - \frac{x}{L}) \frac{Pc}{T^3})}{(w_0 - w_0 v C_3 \frac{L}{W} (1 - \frac{x}{L}) \frac{Pc}{T^3}) (t_0 - t_0 v C_3 \frac{L}{W} (1 - \frac{x}{L}) \frac{Pc}{T^3})} \exp(C_2 (d_0 + d_0 C C_3 \frac{L}{W} (1 - \frac{x}{L}) \frac{Pc}{T^3}))$$

(; $\alpha = \frac{L}{W}$, $\beta = (1 - \frac{x}{L}) \frac{Pc}{T^3}$)

$$\Delta R_{tunnel-x} = C_1 \frac{(d_0 + C_3 \alpha \beta d_0)}{(w_0 - w_0 v C_3 \alpha \beta) (t_0 - t_0 v C_3 \alpha \beta)} \exp(C_2 (d_0 + d_0 C_3 \alpha \beta)) \quad (5.20)$$

$$(; \alpha = \frac{L}{W} , \beta = (1 - \frac{x}{L}) \frac{Pc}{T^3})$$

$$\begin{aligned}
G.F_{CNT-composites} &= \frac{\frac{\Delta R_{tunnel-S_0}}{R_{tunnel-S_0}}}{\varepsilon_{tunnel-S_0}} + \frac{\frac{\Delta R_{tunnel-S_1}}{R_{tunnel-S_1}}}{\varepsilon_{tunnel-S_1}} + \frac{\frac{\Delta R_{tunnel-S_2}}{R_{tunnel-S_2}}}{\varepsilon_{tunnel-S_2}} + \dots \\
&= \sum_{n=S_0}^{S_s} \frac{\frac{\Delta R_{tunnel-n}}{R_{tunnel-n}}}{\varepsilon_{tunnel-n}}, R_{tunnel-S_0} = R_{tunnel-S_1} = \dots = R_{tunnel-S_s} \\
&= \sum_{n=S_0}^{S_s} \left(\frac{C_1 \frac{(d_n + C_3 \alpha_n \beta_n d_n)}{(w_n - w_n \nu C_3 \alpha_n \beta_n)(t_n - t_n \nu C_3 \alpha_n \beta_n)} \exp(C_2(d_n + d_n C_3 \alpha_n \beta_n))}{C_1 \frac{d_n}{w_n t_n} (C_2 d_n)} \right) \frac{1}{\varepsilon_n} \\
&(\alpha_n = \frac{L_n}{W_n}, \beta_n = (1 - \frac{n}{L_n}) \frac{P c_n}{T_n^3}, C_1 = \frac{h^2}{e^2 \sqrt{2m\lambda}}, C_2 = \frac{4\pi \sqrt{2m\lambda}}{h}, C_3 = \frac{12}{E_{composites}})
\end{aligned}$$

따라서, 센서의 폭에 대한 길이의 비 α 는 센서 저항의 변화에 대해 영향을 충분히 미치는 것을 알 수 있다. 또한, 센서의 두께가 충분히 두꺼워질 경우 모재가 임의의 지점 y 로 변형될 때 가해지는 힘 P 에 대해 유의미한 영향을 끼치게 되며 식(5.20)의 β 항에 의해 P , c , T 변수가 센서에 발생하는 스트레인에 큰 영향을 미치게 된다. 하지만, V-3-나-(2)절에서 언급한 바와 같이 센서의 두께가 두꺼워질수록 비선형성이 증가하며, 모재에 발생하는 실제 스트레인을 왜곡할 가능성이 커지므로 탄소 나노 복합재 센서의 두께는 최대한 얇게 제작하는 것이 좋으며, 따라서 이에 대해서는 고려하지 않아도 된다.

VI. 결론

본 연구에서는 탄소 나노 동소체인 탄소 나노 튜브, 그래핀과 폴리머 에폭시 또는 폴리스티렌을 활용하여 이들이 가지는 전왜성을 토대로 다양한 형태의 센서와 이의 제작 기법 및 활용 방안에 대해 연구하였다. 또한, 이들 탄소 나노 동소체가 지닌 나노 사이즈에서의 특성을 마이크로, 매크로 스케일에서 활용하기 위한 센서 설계 방안에 대해 연구하였다. 폴리머 에폭시는 구조용 재료로서 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 제작 공정이 간편하기 때문에 본 연구에서 주로 채택하였다. 탄소 나노 재료와 폴리머를 활용한 복합재 센서는 기본적으로 액상 상태이기 때문에, 브러싱, 몰딩, 분무, 3D 프린팅, 실크 스크린 방법 등 다양한 방식으로 제작이 가능하며 사용자가 원하는 곳에 목적에 맞게끔 설치가 가능하다.

생산과정에서 이의 스펙들이 일관성 있게 제작되는 일반적인 상용 센서에 반해 탄소 나노 재료를 기반으로 하는 센서는 일반적인 센서와는 다르게 사용자가 원하는 형태, 원하는 특성을 위해 직접 관여해서 사용해야 한다. 이러한 특성 때문에 제작될 탄소 나노 기반 센서의 특성을 예측하며, 목적에 맞게끔 설계하는 것은 매우 중요하다. 이와 관련하여 센서의 형상 및 함량에 따라 센서를 제작하고 이의 감도 특성을 확인하였다. 탄소 나노 재료를 기반으로 복합재료 센서를 제작할 경우 두께를 두껍게 제작하면 감도는 좋아지지만 실제 발생하는 스트레인을 제대로 반영할 수 없다. 탄소 나노 튜브 복합재 센서의 폭은 작아질수록 모재의 변형을 방해하지 않으며 이로 인해 센서에 스트레인이 잘 발생되어 센서의 감도가 높아진다. 또한 센서의 길이가 길어질수록 각 단위 유닛 저항의 변화가 많아져 감도가 높아진다. 이를 통해 탄소 나노 복합재료 기반 센서는 최대한 얇게, 폭은 좁게, 길이는 긴 형태로 활용하는 것이

좋다는 것을 알 수 있다. 또한 사용자는 폭에 대한 길이 비 α 를 활용하여 목적에 맞는 센서 특성을 활용할 수 있다. 탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합 재료 센서의 감도 특성은 센서에 임의의 변형이 가해질 때 센서에 발생될 수 있는 최대 발생 스트레인의 크기에 좌우됨을 실험을 통해 알 수 있었으며, 이를 유발하기 위한 적절한 센서 형상 설계가 필요하다. 통해 형상에 따른 감도 특성 실험에서 사용된 탄소 나노 튜브의 종횡비는 약 12,000으로 일반적인 탄소 나노 튜브에 비해 매우 긴 편에 속한다. 동일 함량의 종횡비가 각기 다른 탄소 나노 튜브로 센서를 제작할 경우 종횡비가 긴 탄소 나노 튜브를 사용할 때 압축에 의한 포화현상 발생 구간을 지연시킬 수 있지만, 반대로 인장 시에 탄소 나노 튜브 간 간격이 더 빨리 벌어지므로 인장을 주었을 때 비선형 구간이 앞당겨지게 된다. 따라서 인장과 압축에 대해 어느 범위까지 사용할 것인가를 고려하여 탄소 나노 재료의 종횡비를 고려해야 한다. 일반적인 상용 센서와 같이 탄소 나노 재료를 기반으로 한 복합재 센서도 열 특성을 가지고 있다. 하지만 탄소 나노 재료의 종류, 형태에 따라 각기 다른 특성을 보인다. 탄소 나노 튜브의 경우 생산 시 형태에 따라 도체성과 반도체성을 지니는데, 이를 선별해서 생산하기는 쉽지 않다. 따라서 향후 이를 구별하여 양산이 가능해지면 이들을 사용한 복합재 센서의 열 특성 또한 쉽게 분석이 가능해질 것이다.

VII. 참고문헌

서 론

- [1] R. E. Smalley, R. E. Smalley's web, <http://cohesion.rice.edu/naturalsciences/smalley>
- [2] R. Salvado, C. Lopes, L. Szojda, P. Araujo, M. Gorski, F. J. Velez, J. C. Gomez and R. Krzywon (2015), "Carbon Fiber Epoxy Composites for both Strengthening and Health Monitoring of Structures", *Sensors*, Vol. 15, No. 5, pp. 10753~10770
- [3] B. G. Cho, S. H. Hwang, Y. B. Park (2016), "Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube/Carbon Fiber/Polycarbonate Multiscale Hybrid Composites", *Composites Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 269~275
- [4] B. Arash, H. S. Park and T. Rabczuk (2015), "Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Polymer Nanocomposites: A Coarse-grained Model", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 80, pp. 92~100
- [5] M. Mirzaei and Y. Kiani (2016), "Free Vibration of Functionally Graded Carbon-nanotube-reinforced Composites Plates with Cutout", *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 7, pp. 511~523
- [6] A. Allaoui, S. Bai, H. M. Cheng and J. B. Bai (2002), "Mechanical and Electrical Properties of a MWNT/epoxy Composite", *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 1993~1998
- [7] X. Wang and D. D. L. Chung (1997), "Piezoresistive Behavior of Carbon Fiber in Epoxy", *Carbon*, Vol. 35, No. 10~11, pp. 1649~1651
- [8] K. P. Sau, T. K. Chaki and D. Khastgir (1998), "The Change in Conductivity

of a Rubber-carbon black Composites Subjected to Different Modes of Pre-strain”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 29, Issue 4, pp. 363~370

[9] P. T. Hoang and T. Liu (2016), “Diazonium Salt Treated Single-walled Carbon Nanotube Thin Films with High Piezoresistive Sensitivity”, Vol. 250, pp. 106~113

[10] B. F. Goncalves, J. Oliveira, P. Costa, V. Correia, P. Martins, G. Botelho, S. K. Mendez (2017), “Development of Water-based Printable Piezoresistive Sensors for Large Strain Applications”, Composites Part B: Engineering, Vol. 112, pp. 344~352

[11] O. Kanoun, C. Muller, A. Benchirouf, A. Sanli, T. N. Dinh, A. A. Hamry, L. Bu, C. Gerlach and A. Bouhamed (2014), “Flexible Carbon Nanotube Films for High Performance Strain Sensors”, Sensors, Vol. 14, Issue 6, 10042~10071

[12] H. Palaza, C. Garzon and M. Rojas (2016), “Elastomeric Ethylene Copolymers with Carbon Nanostructures having Tailored Strain Sensor Behavior and Their Interpretation based on the Excluded Volume Theory”, Polymer International, Vol. 65, Issue 12, pp. 1441~1448

[13] J. E. Dusek, M. S. Triantafyllou and J. H. Lang (2016), “Piezoresistive Foam Sensor Arrays for Marine Applications”, Sensors and Actuators A. Vol. 248, pp. 173~183

[14] B. R. Loyola, V. L. Saponara and K. J. Loh (2010), “In situ Strain Monitoring of Fiber-reinforced Polymers using embedded Piezoresistive Nanocomposites”, Journal of Materials Science, Vol. 45, Issue 24, pp. 6786~6798

[15] J. K. Pandey, K. R. Reddy, A. K. Mohanty and M. Misra (2015), “Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application - Volume B: Carbon Nanotube Based Polymer Composites”, ISBN 978-3-642-45229-1, pp. 57

7~597, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

[16] D. J. Cohen, D. Mitra, K. Peterson and M. M. Maharbiz (2012), “A Highly Elastic, Capacitive Strain Gauge Based on Percolating Nanotube Networks”, *Nano Letters*, Vol. 12, No. 4, pp. 1821~1825

[17] W. Qiu, Q. Li, Z. K. Lei, Q. H. Qin, W. L. Deng and Y. L. Kang (2013), “The Use of a Carbon Nanotube Sensor for Measuring Strain by Micro-Raman Spectroscopy”, *Carbon*, Vol. 53, pp. 161~168

[18] W. Xu and M. G. Allen (2013), “Deformable Strain Sensors Based on Patterned MWCNTs/Polydimethylsiloxane Composites”, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 51, Issue, 20, pp. 1505~1512

[19] J. L. Abot, M. R. G. Rubio, J. C. Anike, C. Y. Kiyono, L. A. M. Mello, V. F. Cardoso, R. L. S. Rosa, D. A. Kuebler, G. E. Brodeur, A. H. Alotaibi, M. P. Coene, L. M. Coene, E. Jean, R. C. Santiago, F. H. A. Oliveira, R. Rangel, G. P. Thomas, K. Belay, L. W. da Silva, R. T. Moura, A. C. Seabra and E. C. N. Silva (2018), “Foil Strain Gauges Using Piezoresistive Carbon Nanotube Yarn: Fabrication and Calibration”, *Sensors*, Vol. 18, Issue 2, 464

[20] M. Amjadi, Y. J. Yoon and I. Park (2015), “Ultra-stretchable and Skin-mountable Strain Sensors using Carbon Nanotubes-Ecoflex Nanocomposites”, *Nanotechnology*, Vol. 26, No. 37. 375501

[21] J. Lee, M. Lim, J. Yoon, M. S. Kim, B. Choi, D. M. Kim, D. H. Kim, I. Park and S. J. Choi (2017), “Transparent, Flexible Strain Sensor Based on a Solution-Processed Carbon Nanotube Network”, *ACS Applied Material and Interfaces*, Vol. 9, No. 31, pp. 26279~26285

[22] J. Sebastian, N. Schehl, M. Bouchard, M. Boehle, L. Li, A. Lagounov and K. Lafdi (2014), “Health Monitoring of Structural Composites with embedded Carbon Nanotube coated Glass Fiber Sensors”, *Carbon*, Vol. 66, pp. 191~200

- [23] A. Ferreira, S. L. Mendez (2016), "Piezoresistive Response of Spray-printed Carbon Nanotube/Poly(vinylidene fluoride) Composites", *Coposites Part B: Engineering*, Vol. 96, pp. 242~247
- [24] N. Hu, T. Itoi, T. Akagi, T. Kojima, J. Xue, C. Yan, S. Atobe, H. Fukunaga, W. Yuan, H. Ning, Surina, Y. Liu and Alamusi (2013), "Ultrasensitive Strain Sensors made from Metal-coated Carbon Nanofiller/Epoxy Composites", *Carbon*, Vol. 51, pp. 202~212
- [25] A. Sanli, A. Benchirouf, C. Muller and O. Kanoun (2017), "Piezoresistive Performance Characterization of Strain Sensitive Multi-walled Carbon Nanotube-Epoxy Nanocomposites", *Sensors and Actuators A*, Vol. 254, pp. 61~68
- [26] H. Meeuw, C. Viets, W. V. Liebig, K. Schulte and B. Fiedler (2016), "Morphological Influence of Carbon Nanofillers on the Piezoresistive Response of Carbon Nanoparticle/Epoxy Composites under Mechanical Load", *European Polymer Journal*, Vol. 85, pp. 198~210
- [27] W. Obitayo and T. Liu (2012), "A Review: Carbon Nanotube-Based Piezoresistive Strain Sensors", *Journal of Sensors*, Vol. 2012, 652438
- [28] X. Ma, Y. Dong and R. Li (2017), "Monitoring Technology in Composites using Carbon Nanotube Yarns based on Piezoresistivity", *Materials Letters*, Vol. 188, pp. 45~47
- [29] X. Li, C. Levy and L. Elaadil (2008), "Multiwalled Carbon Nanotube Film for Strain Sensing", *Nanotechnology*, Vol. 19, 045501
- [30] I. Baldoli, M. Masilli, F. Cecchi and C. Laschi (2017), "Development and Characterization of a Multilayer Matrix Textile Sensor for Interface Pressure Measurements", *Smart Materials and Structures*, Vol. 26, No. 10, 104011
- [31] B. Joseph, C. Changyong, A. B. Martin, D. F. Aaron (2017), "Noninvasive Material Thickness Detection by Aerosol Jet Printed Sensors Enhanced Through M

etatic Carbon Nanotube Ink”, IEEE Sensors Journal, Vol. 17, No. 14, pp. 4612~4618

[32] N. T. Dinh and O. Kanoun (2015), “Temperature-Compensated Force/Pressure Sensor Based on Multi-Walled Carbon Nanotube Epoxy Composites”, Sensors, Vol. 15, pp. 11133~11150

[33] J. Jung, J. H. Yun, I. Kim and S. E. Shim (2013), “Rubber Composites with Piezoresistive Effects”, *Elasomers and Composites*, Vol. 48, No. 1, pp. 76~84

[34] L. Wang, X. Wang and Y. Li (2012), “Relation Between Repeated Uniaxial Compressive Pressure and Electrical Resistance of Carbon Nanotube Filled Silicone Rubber Composite”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, Issue 2, pp. 268~274

[35] K. Lee, J. A. Lee, K. Lee and S. S. Lee (2010), “Fabrication and Characterization of Transparent Piezoresistors Using Carbon Nanotube Film”, *Transactions Korean Society of Mechanical Engineering A*, Vol. 34, No. 12, pp. 1857~1863

[36] J. Zha, B. Zhang, R. K. Y. Li and Z. Dang (2016), “High-Performance Strain Sensors based on Functionalized Graphene Nanoplates for Damage Monitoring”, *Composites Science and Technology*, Vol. 123, pp. 32~38

[37] L. M. Chiacchiarelli, M. Rallini, M. Monti, D. Puglia, J. M. Kenny and L. Torre (2013), “The role of Irreversible and Reversible Phenomena in the Piezoresistive Behavior of Graphene Epoxy Nanocomposites Applied to Structural Health Monitoring”, *Composites Science and Technology*, Vol. 80, pp. 73~79

[38] Y. Wei, S. Chen, X. Dong, Y. Lin and L. Liu (2017), “Flexible Piezoresistive Sensors based on “Dynamic Bridging Effect” of Silver Nanowires toward Graphene”, *Carbon*, No. 113, pp. 395~403

[39] S. Bae, Y. Lee, B. K. Sharma, H. Lee, J. Kim and J. Ahn (2013), “Graphene-based Transparent Strain Sensor”, *Carbon*, No. 51, pp. 236~242

- [40] K. Krishnamoorthy, K. Jeyasubramanian, M. Premanathan, G. Subbiah, H. S. Shin and S. J. Kim (2014), "Graphene Oxide Nanopaint", Carbon, No. 72, pp. 328~337
- [41] T. T. Tung, M. J. Nine, M. Krebsz, T. Pasinszki, C. J. Coghlan, D. N. H. Tran and D. Losic (2017), "Recent Advances in Sensing Applications of Graphene Assemblies and Their Composites", Advanced Functional Materials, Vol. 27, Issue 46, 1702896
- [42] Q. Mi, Q. Wang, S. Zang, G. Mao, J. Zhang and X. Ren (2018), "RGO-coated Elastic Fibres as Wearable Strain Sensors for Full-scale Detection of Human Motions", Smart Materials and Structures, Vol. 27, 015014
- [43] S. Chun, Y. Kim, H. Jin, E. Choi, S. Lee and W. Park (2014), "A Graphene Force Sensor with Pressure-amplifying Structure", Carbon, No. 78, pp. 601~608
- [44] S. Hwang, H. W. Park and Y. Park (2013), "Piezoresistive Behavior and Multi-directional Strain Sensing Ability of Carbon Nanotube-Graphene Nanoplatelet Hybrid Sheets", Smart Materials and Structures, Vol. 22, 015013
- [45] S. Hwang, H. W. Park, Y. Park, M. Um and J. Byun (2013), "Electromechanical Strain Sensing using Polycarbonate-impregnated Carbon Nanotube-Graphene Nanoplatelet Hybrid Composite Sheets", Composites Science and Technology, Vol. 89, pp. 1~9
- [46] S. Zhang, H. Zhang, G. Yao, F. Liao, M. Gao, Z. Huang, K. Li and Y. Lin (2015), "Highly Stretchable, Sensitive, and Flexible Strain Sensors based on Silver Nanoparticles/Carbon Nanotubes Composites", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 652, pp. 48~54
- [47] D. D. Nguyen, Y. Lai and N. Tai (2014), "Enhanced Field Emission Properties of a Reduced Graphene Oxide/Carbon Nanotube Hybrid Film", Diamond and Related Materials, Vol. 47, pp. 1~6

- [48] Y. Oh, D. Suh, Y. Kim, J. Choi and S. Baik (2008), "Carbon Nanotube Incorporated Conductive Pastes", The Korean Society of Mechanical Engineer Conference, pp. 1908-1912
- [49] A. S. Patole, S. P. Patole, S. Jung, J. Yoo, J. An and T. Kim (2012), "Self Assembled Graphene/Carbon Nanotube/Polystyrene Hybrid Nanocomposite by in situ Microemulsion Polymerization", European Polymer Journal, Vol. 48, pp. 252~259
- [50] K. Chun, Y. Oh, J. Rho, J. Ahn, Y. Kim, H. R. Choi and S. Baik (2010), "Highly Conductive, Printable and Stretchable Composite Films of Carbon Nanotubes and Silver", Nature Nanotechnology, Vol. 5, pp. 853~857
- [51] V. I. Roldughin, V. V. Vysotskii (2000), "Percolation Properties of Metal-filled Polymer Films, Structure and Mechanisms of Conductivity", Progress in Organic Coating, Vol. 39, pp. 81~100
- [52] J. Li and S. Zhang (2009), "Finite-size Scaling in Stick Percolation", Physical Review E, Vol. 80, 040104
- [53] W. Bauhofer and J. Z. Kovacs (2009), "A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites", Composites Science and Technology, Vol. 69, Issue 10, pp. 1486~1498
- [54] I. Alig, P. Potschke, D. Lellinger, T. Skipa, S. Pegel, G. R. Kasaliwal and T. Villmow (2012), "Establishment, Morphology and Properties of Carbon Nanotube Networks in Polymer Melts", Polymer. Vol. 53, Issue 1, pp. 4~28
- [55] C. Calberg, S. Blacher, F. Gubbles, F. Brouers, R. Deltour and R. Jerome (1999), "Electrical and Dielectric Properties of Carbon Black filled Co-continuous Two-phase Polymer Blends", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 32, No. 13, pp. 1517~1525
- [56] Q. Zhang and D. Chen (2004), "Percolation Threshold and Morphology of C

composites of Conducting Carbon Black/Polypropylene/EVA”, Journal of Materials Science, Vol. 39, pp. 1751~1757

[57] C. Micaela, C. Alessandro, S. M. Imran, J. P. Vitthal and T. Alberto (2014), “Electrical Conductivity Phenimena in and Epoxy Resin-carbon-based Materials Composite”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 61, pp. 108~114

[58] Y. Y. Huang, J. E. Marshall, C. Gonzalez-Lopez and E. M. Terentjev (2011), “Variation in Carbon Nanotube Polymer Composite Conductivity from the Effects of Processing, Dispersion, Aging and Sample Size”, Materials Express, Vol. 1, No. 4, pp. 315~328

[59] L. Bu, J. Steitz and O. Kanoun (2010), “Influence of Processing Parameters on Properties of Strain Sensors based on Carbon Nanotube Films”, 7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, ISBN 978-1-4244-7534-6, IEEE

[60] K. Liu, K. Jiang, C. Feng, Z. Chen and S. Fan (2005), “A Growth Mark Method for Studying Growth Mechanism of Carbon Nanotube Arrays”, Carbon, Vol. 43, pp. 2850~2856

[61] M. Golshadi, L. K. Wright, I. M. Dickerson, M. G. Schrlau (2016), “High-Efficiency Gene Transfection of Cells Through Carbon Nanotube Arrays”, Small, Vol. 12, Issue 22, pp. 3014~3020

[62] X. Y. Zhang, L. D. Zhang, G. H. Li and L. X. Zhao (2001), “Template Synthesis of Well-graphitized Carbon Nanotube Arrays”, Materials Science and Engineering A. Vol. 308, Issue 1-2, pp. 9~12

[63] J. Li, C. Papadopoulos and J. M. Xu (1999), “Highly-ordered Carbon Nanotube Arrays for Electronics Applications”, Applied Physics Letters, Vol. 75, No. 3, pp. 367~369

- [64] C. Li, Y. Cui, G. Tian, Y. Shu, X. Wang, H. Tian, Y. Yang, F. Wei and T. Ren (2015), "Flexible CNT-array Double helices Strain Sensor with High Stretchability for Motion Capture", *Scientific Reports*, Vol. 5, 15554
- [65] X. Yang, Z. Y. Zhou, F. Z. Zheng, M. Zhang, J. Zhang and Y.G. Yao (2009), "A High Sensitivity Single-walled Carbon-nanotube-array-based Strain Sensor for Weighing", *Transducers 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, ISBN 978-1-4244-4193-8m IEEE
- [66] J. G. Simmons (1963), "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film", *Journal of Applied Physics*, Vol. 34, No. 6, pp. 1793~1803
- [67] R. Ram, M. Rahaman and D. Khastgir (2015), "Electrical Properties of Polyvinylidene Fluoride (PVDF)/Multi-walled Carbon Nanotube (MWCNT) Semi-transparent Composites: Modelling of DC Conductivity", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 69, pp. 30~39
- [68] C. Bonavolonta, C. Camerlingo, G. Carotenuto, S. De Nicola, A. Longo, C. Meola, S. Boccardi, M. Palomba, G. P. Pepe and M. Valentino (2016), "Characterization of Piezoresistive Properties of Graphene-supported Polymer Coating for Strain Sensor Applications", *Sensors and Actuators A*, Vol. 252, pp. 26~34
- [69] N. Hu, Y. Karube, C. Yan, Z. Masuda, H. Fukunaga (2008), "Tunneling Effect in a Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposite Strain Sensor", *Acta Materialia*, Vol. 56, pp. 2929~2936
- [70] N. Hu, Y. Karube, M. Arai, T. Watanabe, C. Yan, Y. Li, Y. Liu and H. Fukunaga (2010), "Investigation on Sensitivity of a Polymer/Carbon Nanotube Composite Strain Sensor", *Carbon*, Vol. 48, pp. 680~687
- [71] X. Zhang, Y. Pan, Q. Zheng and X. Yi (2000), "Time Dependence of Piezoresistance for the Conductor-Filled Polymer Composites", *Journal of Polymer Science*

e Part B: Polymer Physics, Vol. 38, Issue 21, pp. 2739~2749

[72] A. Sanli, C. Muller, O. Kanoun, C. Elibol and M. F. X. Wagner (2016), “Piezoresistive Characterization of Multi-walled Carbon Nanotube-epoxy based Flexible Strain Sensitive Films by Impedence Spectroscopy”, *Composites Science and Technology*, Vol. 122, pp. 18~26

[73] F. Panozzo, M. Zappalorto, M. Quaresimin (2017), “Analytical Model for the Prediction of the Piezoresistive Behavior of CNT modified Polymer”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 109, pp. 53~63

[74] Y. A. Saffar, O. Aldraihem and A. Baz (2012), “Smart Paint Sensor for Monitoring Structural Vibrations”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 4, 045004

[75] B. Bourlon, C. Miko, L. Forro, D. C. Glattli and A. Bachtold (2004), “Determination of the Intershell Conductance in Multiwalled Carbon Nanotubes”, *Physical Review Letters*, Vol. 93, No. 17, 176806

[76] R. Liu, Z. Xu, J. Yin, J. Huang, D. Liu and G. Xie (2016), “A Coupled Mechanical and Electrical Model Concerning Piezoresistive Effect of CFRP Materials”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 96, pp. 125~135

[77] M. Knite, V. Teteris, A. Kiploka and J. Kaupuz (2004), “Polyisoprene-Carbon Black Nanocomposites as Tensile Strain and Pressure Sensor Materials”, *Sensors and Actuators A*, Vol. 110, pp. 142~149

[78] D. J. Bae, K. S. Kim, Y. S. Park, E. K. Suh, K. H. An, J. Moon, S. C. Lim, S. H. Park, Y. H. Jeong and Y. H. Lee (2001), “Transport Phenomena in an Anisotropically Aligned Single-wall Carbon Nanotube Film”, *Physical Review B*, Vol. 64, 633401

[79] M. Park, H. Kim and J. P. Youngblood (2008), “Strain-dependent Electrical Resistance of Multi-walled Carbon Nanotube/Polymer Composite Films”, *Nanotechn*

ology, Vol. 19, No. 5, 055705

[80] Y. Shimamura, T. Yasuoka and A. Todoroki (2007), “Strain Sensing by Using Piezoresistivity of Carbon-Nanotube/Flexible-Epoxy Composite”, 16th International Conference on Composite Materials

[81] Z. Li, P. Dharap, S. Nagarajaiah, E. V. Barrera and J. D. Kim (2004), “Carbon Nanotube Film Sensors”, *Advanced Materials*, Vol. 16, No. 7, pp. 640~643

[82] P. Dharap, Z. Li, S. Nagarajaiah and E. V. Barrera (2004), “Nanotube Film based on Single-wall Carbon Nanotubes for Strain Sensing”, *Nanotechnology*, Vol. 15, pp. 379~382

[83] R. Rahman, S. Soltanian and P. Servati (2016), “Coupled Effects of Film Thickness and Filler Length on Conductivity and Strain Sensitivity of Carbon Nanotube/Polymer Composite Thin Film”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 77~87

[84] Alamusi, N. Hu, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu and J. Li (2011), “Piezoresistive Strain Sensors Made from Carbon Nanotubes Based Polymer Nanocomposites”, *Sensors*, Vol. 11, No. 11, pp. 10691~10723

[85] B. M. Lee and K. J. Loh (2015), “A 2D Percolation-based Model for Characterizing the Piezoresistivity of Carbon Nanotube-based Films”, *Journal of Materials Science*, Vol. 50, Issue 7, pp. 2973~2983

[86] B. M. Lee and K. J. Loh (2017), “Carbon Nanotube Thin Film Strain Sensors: Comparison between Experimental Tests and Numerical Simulations”, *Nanotechnology*, Vol. 28, No. 15, 155502

[87] Y. Zare and K. Y. Rhee (2017), “Tensile Modulus of Polymer/CNT Nanocomposites by Effective Volume Fraction of Nanoparticles as a Function of CNT Properties in the Network”, *Polymer Advanced Technologies*, Vol. 28, No. 11, pp. 1448~1452

- [88] T. Takeda, Y. Shindo, F. Narita and Y. Mito (2009), "Tensile Characterization of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Composites as Cryogenic Temperatures: Experiments and Multiscale Simulations", *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 3, pp. 436~445
- [89] C. Micaela, R. Massimo, S. M. Imran and T. Alberto (2016), "Conductivity in Carbon Nanotube Polymer Composites: A Comparison between Model and Experiment", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 87, pp. 237~242
- [90] J. H. Kong, N. Jang, S. Kim and J. Kim (2014), "Simple and Rapid Micropatterning of Conductive Carbon Composites and its Applications to Elastic Strain Sensors", *Carbon*, No. 77, pp. 199~207
- [91] D. Wang and D. D. L. Chung (2013), "Through-thickness Piezoresistivity in a Carbon Fiber Polymer-matrix Structural Composites for Electrical-resistance-based Through-thickness Strain Sensing", *Carbon*, No. 60, pp. 129~138
- [92] A. Bouchalkha, K. Alhammadi and H. O. Helal (2015), "Carbon Nanotube Strain Gauge Design and Calibration", 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, ISBN 978-1-4799-7431-3, IEEE
- [93] X. Wang, J. Sparkman and J. Gou (2017), "Strain Sensing of Printed Carbon Nanotube Sensors on Polyurethane Substrate with Spray Deposition Modeling", *Composites Communications*, Vol. 3, pp. 1~6
- [94] D. Lee, H. P. Hong, C. J. Lee, C. W. Park and N. K. Min (2011), "Microfabrication and Characterization of Spray-coated Single-wall Carbon Nanotube Film Strain Gauges", *Nanotechnology*, Vol. 22, 455301
- [95] Y. Huang, S. Huang, C. Hsu, R. Chao and T. K. Vu (2012), "Design and Fabrication of Single-Walled Carbon Nanonet Flexible Strain Sensors", *Sensors*, Vol. 12, pp. 3269~3280

관련 이론

- [96] S. Iijima and T. Ichihashi (1993), “Single-Shell Carbon Nanotubes of 1-nm diameter”, *Nature*, Vol. 363, pp. 603~605
- [97] I. Rafique, A. Kausar, Z. Anwar and B. Muhammad (2016), “Exploration of Epoxy Resins, Hardening Systems and Epoxy/Carbon Nanotube Composite Designed for High Performance Materials: A Review”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 55, Issue 3, pp. 312~333
- [98] D. S. Bethunge, C. H. Klang, M. S. De vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez and R. Reyer (1993), “Cobalt-catalysed Growth of Carbon Nanotubes with Single-atomic-layer Walls”, *Nature*, Vol. 363, pp. 605~607
- [99] A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tomanek, J. E. Fischer, R. E. Smalley (1996), “Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes”, *Science*, Vol. 273, Issue 5274, pp. 483~487
- [100] A. Galano (2010), “Carbon Nanotubes: Promising Agents against Free Radicals”, *Nanoscale*, Vol. 2, No. 3, pp. 373~380
- [101] L. Forro and C. Schonenberger (2001), “Physical Properties of Multi-wall Nanotubes”, *Topics in Applied Physics*, Vol. 80, pp. 329~391
- [102] M. Endo, K. Takeuchi, K. Kobori, K. Takahashi, H. W. Kroto and A. Sarkar (1995), “Pyrolytic Carbon Nanotubes from Vapor-grown Carbon-fibers”, *Carbon*, Vol. 33, No. 7, pp. 873~881
- [103] Z. F. Ren, Z. P. Huang, J. W. Xu, J. H. Wang, P. Bush, M. P. Siegal and P. N. Provencio (1998), “Synthesis of Large Arrays of Well-Aligned Carbon Nanotubes on Glass”, *Science*, Vol. 282, No. 5391, pp. 1105~1107
- [104] C. Bower, W. Zhu, S. Jin and O. Zhou (2000), “Plasma-induced Alignment

- of Carbon Nanotubes”, *Applied Physics Letters*, Vol. 77, No. 6, pp. 830~832
- [105] J. Yu, E. G. Wang and X. D. Bai (2001), “Electron Field Emission from Carbon Nanoparticles prepared by Microwave-plasma Chemical-vapor Deposition”, *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 15, pp. 2226~2228
- [106] V. P. Dravid, X. Lin, Y. Wang, X. K. Wang, A. Yee, J. B. Ketterson and R. P. H. Chang (1993), “Buckytubes and Derivatives: Their Growth and Implications for Buckball Formation”, *Science*, Vol. 259, No. 5101, pp. 1601~1604
- [107] C. H. Yoon and H. S. Lee (2007), “Carbon Nanotube Composite”, *Polymer Science and Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 4~7
- [108] B. Garg, T. Bisht and Y. C. Ling (2014), “Graphene-Based Nanomaterials as Heterogeneous Acid Catalysts: A Comprehensive Perspective”, *Molecules*, Vol. 19, No. 9, pp. 14582~14614
- [109] C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar and J. Hone (2008), “Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene”, *Science*, Vol. 321, No. 5887, pp. 385~388
- [110] X. Li, W. Cai, J. An, S. Kim, J. Nah, D. Yang, R. Piner, A. Velamakanni, I. Jung, E. Tutuc, S. K. Banerjee, L. Colombo and R. S. Ruoff (2009), “Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils”, *Science*, Vol. 324, Issue 5932, pp. 1312~1314
- [111] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao and C. N. Lau (2008), “Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene”, *Nano Letters*, Vol. 8, No. 3, pp. 902~907
- [112] K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, K. Hone, P. Kim and H. L. Stormer (2008), “Ultrahigh Electron Mobility in Suspended Graphene”, *Solid State Communications*, Vol. 146, pp. 351~355
- [113] M. D. Stoller, S. Park, Y. Zhu, J. An and R. S. Ruoff (2008), “Graphene-B

ased Ultracapacitors”, Nano Letters, Vol. 8, No. 10, pp. 3498~3502

[114] D. A. Dikin, S. Stankovich, E. J. Zimney, R. D. Piner, G. H. B. Dommett, G. Evmenenko, S. T. Nguyen and R. S. Ruoff (2007), “Preparation and Characterization of Graphene Oxide Paper”, Nature, Vol. 448, pp. 457~460

[115] J. K. W. Sandler, K. E. Kirk, I. A. Kinloch, M. S. P. Shaffer and A. H. Windle (2003), “Ultra-low Electrical Percolation Threshold in Carbon-nanotube-epoxy Composites”, Polymer, Vol. 44, Issue 19, pp. 5893~5899

[116] J. Sandler, M. S. P. Shaffer, T. Prasse, W. Bauhofer, K. Schulte and A. H. Windle (1999), “Development of a Dispersion Process for Carbon Nanotubes in an Epoxy Matrix and the Resulting Electrical Properties”, Polymer, Vol. 40, Issue 21, pp. 5967~5971

[117] E. Kymakis (2006), “Electrical Properties of Single-wall Carbon Nanotube-polymer Composite Films”, Journal of Applied Physics, Vol. 99, 084302

[118] Z. Ounaies, C. Park, K. E. Wise, E. J. Siochi and J. S. Harrison (2003), “Electrical Properties of Single Wall Carbon Nanotube Reinforced Polyamide composites”, Composites Science and Technology, Vol. 63, Issue 11, pp. 1637~1646

[119] N. Hu, Z. Masuda, G. Yamamoto, H. Fukunaga, T. Hashida and J. Qiu (2008), “Effect of Fabrication Process on Electrical Properties of Polymer/Multi-wall Carbon Nanotube Nanocomposites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 39, Issue 5, pp. 839~903

탄소 나노 기반 복합재료 제작

- [120] S. H. Kim, C. S. haines, N. Li, K. J. Kim, T. J. Mun, C. Choi, J. Di, Y. J. Oh, J. P. Oviedo, J. Bykova, S. Fang, N. Jiang, Z. Liu, R. Wang, P. Kumar, R. Qiao, S. Priya, K. Cho, M. Kim, M. S. Lucas, L. F. Drummy, B. Maruyama, D. Y. Lee, X. Lepro, E. Gao, D. Albarq, R. O. Robles, S. J. Kim and R. H. Baughman (2017), “Harvesting Electrical Energy from Carbon Nanotube Yarn Twist”, *Science*, Vol. 357, pp. 773~778
- [121] J. Park and K. Lee (2012), “Carbon Nanotube Yarn”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 277~287
- [122] X. Zhang, K. Jiang, C. Feng, P. Liu, L. Zhang, J. Kong, T. Zhang, Q. Li and S. Fan (2006), “Spinning and Processing Continuous Yarn from 4-Inch Wafer Scale Super-Aligned Carbon Nanotube Arrays”, *Advanced Materials*, Vol. 18, pp. 1505~1510
- [123] D. S. So, J. H. Seo, I. H. Lee and J. H. Han (2005), “R&D Trend and Information Analysis of Dispersion of Carbon Nanotube”, *Prospective of Industrial Chemistry*, Vol. 8, No. 5
- [124] P. J. Boul, J. Liu, E. T. Mickelson, C. B. Huggman, L. M. Ericson, I. W. Chiang, K. A. Smith, D. T. Colbert, R. H. Hauge, J. L. Margrave and R. E. Smalley (1999), “Reversible Sidewall Functionalization of Buckytubes”, *Chemical Physics Letters*, Vol. 310, Issues 3-4, pp. 367~372
- [125] J. Liu, M. J. Casavant, M. Cox, D. A. Walters, P. Boul, W. Lu, A. J. Rimberg, K. A. Smith, D. T. Colbert and R. E. Smalley (1999), “Controlled Deposition of Individual Single-walled Carbon Nanotubes on Chemically Functionalized Templates”, *Chemical Physics Letters*, Vol. 303, Issues 1-2, pp. 125~129
- [126] G. S. Duesberg, J. Muster, V. Krstic, M. Burghard and S. Roth (1998), “C

hromatographic Size Separation of Single-wall Carbon Nanotubes”, Applied Physics A, Vol. 67, Issue 1, pp. 117~119

[127] Z. Jin, L. Huang, S. H. Goh, G. Xu and W. Ji (2000), “Characterization and Nonlinear Optical Properties of a Poly(acrylic acid)-surfactant-multi-walled Carbon Nanotube Complex”, Chemical Physics Letters, Vol. 332, Issues 5-6, pp. 461~466

[128] K. Gnanasekaran, T. Heijmans, S. van Bennekom, H. Woldhuid, S. Wijnja, G. de With and H. Griedrich (2017), “3D Printing of CNT-and Graphene-based Conductive Polymer Nanocomposites by fused Deposition Modeling”, Applied Materials today, Vol. 9, pp. 21~28

[129] S. F. A. Acquah, B. E. Leongardt, M. S. Nowotarski, J. M. Magi, K. A. Chambliss, T. E. S. Venzel, S. D. Delekar and L. A. Al-Hariri (2006), “Carbon Nanotubes and Graphene as Additives in 3D Printing”, University of Massachusetts Amherst, Chemistry Department Faculty Publication Series, Chapter 8

[130] M. Abshirini, M. Charara, Y. Liu, M. Saha and M. C. Altan (2018), “3D printing of Highly Stretchable Strain Sensors Based on Carbon Nanotube Nanocomposites”, Advanced Engineering Materials, Vol. 20, Issue 9, Early view

[131] S. Y. Kim and I. Kang (2017), “A Study on the Development of a Novel Pressure Sensor based on Nano Carbon Piezoresistive Composites by Using 3D Printing”, Transaction Korean Society of Mechanical Engineering A, Vol. 41, No. 3, pp. 187~192

[132] S. Y. Kim, S. H. Park, B. G. Choi, I. H. Kang, S. W. Park, J. W. Shin, J. H. Kim, W. K. Baek, K. T. Lim, Y. Kim, J. Song and I. Kang (2018), “Development of a Spoke Type Torque Sensor Using Painting Carbon Nanotube Strain Sensors”, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 18, pp. 1782~1786