



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

공학 석사학위논문

정전력을 이용한

탄소나노튜브 시트 기반 에너지 수집 소자

**Carbon nanotube Sheet Based Energy
Harvesting Device using Electrostatic Force**

2014년 2월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

송혜린

정전력을 이용한 탄소나노튜브 시트
기반 에너지 수집 소자

Carbon nanotube Sheet Based Energy
Harvesting Device using Electrostatic Force

지도교수 김 용 협

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 2월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

송혜린

송혜린의 공학석사 학위논문을 인준함

2014년 2월

위원장 여재익 (인)

부위원장 김용협 (인)

위원 김현진 (인)

국문 초록

에너지 수집이란 태양열, 풍력, 열 에너지, 운동 에너지 등 외부 에너지원으로부터 에너지를 포획하는 과정을 말한다. 외부에서 인가되는 에너지를 전기적 에너지로 효과적으로 변환시키는 것이 에너지수집소자 관련 연구의 주된 관심이다. 본 논문은 탄소나노튜브를 활용한 에너지 수집 소자의 특성과, 성능에 관한 연구이다.

탄소나노튜브는 직경이 수 나노미터이며, 종횡비가 매우 큰 튜브 형태의 탄소 동소체이다. 탄소나노튜브는 뛰어난 전기적, 기계적 물성을 가진 재료로써, 이를 다양한 분야에 응용하려는 시도가 이어지고 있다.

본 연구에서는 2차원 구조물인 탄소나노튜브 시트를 제작하여 연구에 활용하고자 하였으며, 일축 정렬된 탄소나노튜브를 수십 μm 두께의 얇은 필름 형태로 제작하였다. 대전된 물체가 탄소나노튜브 시트 근처에서 일정 거리 간격을 두고 이동함으로써 발생하는 전기적 변화를 이용하여, 이를 에너지 수집소자로써 활용하고자 하였다.

본 논문에서 제안한 에너지 수집 소자는 정전기력을 이용하여 탄소나노튜브 표면의 쿨롱장을 요동시키고, 자유 전하 운반자의 이동을 유도함으로써 전류를 발생시켰다. 이를 통해 효과적인 에너지 수집이 가능함을 실험적으로 증명하였고, 탄소나노튜브 시트의 에너지 수집 재료로써 응용 가능성을 제시하였다.

키워드 : 탄소나노튜브, 탄소나노튜브 시트, 자유 전하 운반자 드래그,
에너지 수집, 정전력

학번 : 2012-20675

목차

국문초록	i
목 차	iii
List of Figures	v
List of Tables	vii
1 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 논문의 구성	2
2 연구배경	3
2.1 탄소나노튜브 (Carbon nanotube, CNT)	3
2.2 탄소나노튜브 시트 (Carbon nanotube sheet, CNT sheet)	7
2.2.1 탄소나노튜브 시트의 물성	8
2.3 정전기 (static electricity)	9
2.4 나노탄소재료를 활용한 에너지 수집 소자	12
3 실험방법	13
3.1 탄소나노튜브 시트 기반 에너지 수집 소자 제작	13
3.1.1 탄소나노튜브 합성	13
3.1.2 탄소나노튜브 시트 제작	17
3.1.3 에너지 수집 소자 제작	20

3.2	에너지 수집 과정	20
4	결과 및 논의	22
4.1	에너지 수집소자 특성	22
4.1.1	유도 전압	22
4.1.1.1	거리에 따른 영향	24
4.1.1.2	대전량에 따른 영향	26
4.1.1.3	탄소나노튜브 시트의 겹수에 따른 영향	28
4.1.1.4	드래그 속도에 따른 영향	31
4.1.2	출력 전력	34
4.2	이종 재료와 에너지 수집 특성 비교	36
4.3	에너지 수집 메커니즘	39
5	결론	45
	참고문헌	46
	Abstract	47

List of figures

- 그림 2.1 단일벽 탄소나노튜브와 다중벽 탄소나노튜브
- 그림 2.2 카이랄성에 따른 탄소나노튜브의 다양한 구조
- 그림 2.3 탄소나노튜브의 카이랄성을 설명하는 벡터 성분
- 그림 2.4 탄소나노튜브 시트의 광학사진
- 그림 2.5 물질의 대전열 순서
- 그림 2.6 음으로 대전된 물체의 접근에 의한 도체 내부의 전하 이동
- 그림 3.1 탄소나노튜브 성장을 위한 공정 개념도
- 그림 3.2 화학기상증착법을 통한 탄소나노튜브 성장 과정
- 그림 3.3 시간에 따른 탄소나노튜브의 성장 과정
- 그림 3.4 다중벽 탄소나노튜브의 TEM 이미지
- 그림 3.5 탄소나노튜브 시트의 Dry spinning process 개념도
- 그림 3.6 인출된 탄소나노튜브 시트의 SEM 이미지
- 그림 3.7 탄소나노튜브 시트를 확대한 SEM 이미지
- 그림 3.8 탄소나노튜브 시트 기반 에너지 수집 소자 제작 과정의 개념도
- 그림 3.9 에너지 수집을 위한 실험 세팅 개념도
- 그림 3.10 실험에 사용한 정전 전압계의 광학 사진
- 그림 4.1 대전된 물체의 움직임에 따른 에너지 수집 소자의 전압 변화
- 그림 4.2 거리에 따른 유도전압 그래프

- 그림4.3 대전량의 절대값에 대한 유도전압 그래프
- 그림4.4 탄소나노튜브 시트 겹수에 따른 면저항 그래프
- 그림4.5 탄소나노튜브 시트 겹수에 따른 유도전압 그래프
- 그림4.6 드래그 속도에 따른 유도 전압 그래프
- 그림4.7 드래그 속도에 따른 유도 전류 그래프
- 그림4.8 드래그 속도에 따른 출력 전력 그래프
- 그림4.9 금속 박편 기반의 에너지 수집 소자와 성능 비교
- 그림4.10 정전력으로 인해 유도되는 탄소나노튜브와 금속 내부의 전자의 이동 모식도
- 그림4.11 음전하로 대전된 물체를 사용한 메커니즘 규명 실험 모식도
- 그림4.12 Case 1과 Case 2에 대한 전압 신호 그래프
- 그림4.13 양전하로 대전된 물체를 사용한 메커니즘 규명 실험 모식도
- 그림4.14 Case 3과 Case 4에 대한 전압 신호 그래프
- 그림4.15 정전기의 기계적 움직임에 의해 전류가 생성되는 메커니즘
- 그림4.16 Case 1에 대한 전압 신호 그래프

List of tables

- 표 1. 탄소나노튜브의 전기적, 기계적 물성
- 표 2. 탄소나노튜브 시트의 물성
- 표 3. 드래그 속도에 따른 에너지 수집 소자의 성능

1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

에너지 수집이란 외부 에너지원으로부터 에너지를 포획하여 저장하는 과정을 말한다. 외부에서 인가되는 에너지를 전기적 에너지로 효과적으로 변환시키는 것이 에너지수집소자 관련 연구의 주된 관심이다.

본 논문에서는 나노탄소재료를 기반으로 구성된 에너지 수집 소자를 제작하여 인가되는 외부 에너지원으로부터 전기적 에너지를 발생시키는 연구를 수행하였다. 나노탄소재료는 다른 재료들에서는 찾아볼 수 없었던 그 고유의 특이성으로 인하여, 발견된 이후 이 재료들을 기반으로 한 에너지 수집 소자에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 그러나 기존에 보고된 연구들은 태양에너지[1], 풍력 에너지[2], 열 에너지[3], 운동 에너지[4] 등을 이용한 연구 결과들이 대부분이다. 탄소나노튜브가 정전기에 매우 민감하게 반응하는 성질[5]을 이용하여, 정전력을 외부 에너지원으로 사용하고자 한다.

본 논문에서는 탄소나노튜브 시트를 이용한 새로운 개념의 에너지 수집소자를 제안한다. 기존의 에너지 수집 소자에 비해 비교적 간단한 방법으로 소자 제작이 가능하며, 효과적으로 에너지 수집을 할 수 있는 에너지 수집 소자를 제시한다.

1.2 논문의 구성

본 논문은 총 5개의 장으로 구성되어 있다. 1장은 ‘서론’으로 본 논문을 제안한 동기와 배경에 대해 소개한다. 2장은 ‘연구 배경’으로 본 논문에서 제작한 소자를 구성하는 재료와 외부 에너지원에 대해 서술한다. 재료의 특징을 서술하고, 본 논문에서 제작한 에너지 수집소자의 동기를 기술한다. 3장은 ‘실험 방법’으로 에너지 수집 소자를 제작하는 방법과, 소자의 성능을 확인하기 위한 과정 등을 자세하게 서술한다. 4장은 ‘결과 및 논의’로 본 논문에서 제안한 에너지 수집 소자의 성능을 다양한 장비를 사용하여 측정한 결과를 제시하고, 이에 대해 서술한다. 5장은 ‘결론’으로 본 논문에서 제안한 에너지 수집 소자의 특징을 요약하며 마무리 짓는다. 또한 이외에도 국문초록, 영문초록, 목차, List of figures, List of tables 및 참고문헌을 포함하고 있다.

2 장 연구 배경

2.1 탄소나노튜브 (Carbon nanotube, CNT)

탄소는 다양한 형태의 동소체로 존재하고 있다. 그 중, 탄소나노튜브는 직경이 수 나노 미터이고 종횡비가 큰 실린더 형태의 탄소 동소체로써 1991년 Sumio Iijima 박사가 발견한 이후 탄소나노튜브 고유의 뛰어난 물성으로 인해 많은 연구자들의 관심의 대상이 되었으며 현재도 활발한 연구가 진행되고 있다.

탄소나노튜브는 탄소 원자가 육각형의 벌집 구조로 배열되어 있고, 원자간 sp^2 결합을 이루고 있는 그래핀이 말린 원통구조의 나노 탄소 구조물이며, 튜브를 구성하는 겹수에 따라 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWNT)와 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube, MWNT)가 존재한다.

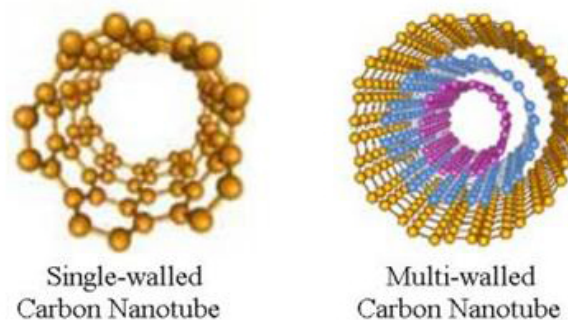
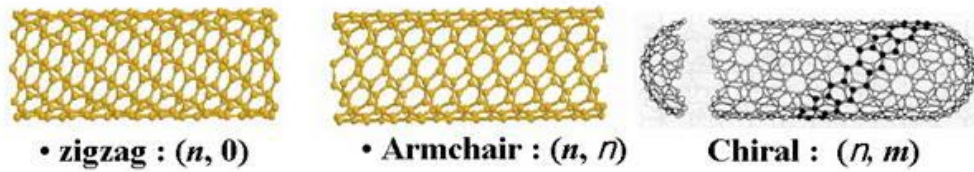


그림 2.1 단일벽 탄소나노튜브와 다중벽 탄소나노튜브



(n, m) : chirality

그림 2.2 카이랄성에 따른 탄소나노튜브의 다양한 구조

탄소나노튜브는 말린 형태, 즉 카이랄성(Chirality)에 따라 Zigzag, Armchair, Chiral 로 분류되고, 각각의 구조에 따라 도체 또는 반도체적 성질을 가지고 있다는 점에서 다른 재료와 구별되는 특이성을 갖는다. Chiral 탄소나노튜브는 zigzag와 Armchair가 혼합된 구조이며, 이 세가지 구조는 카이랄 벡터(Chiral Vector)를 통해 나타낼 수 있다.

그림 2.3에서와 같이, 카이랄 벡터는 \vec{C}_h 같으며, 단위벡터 \vec{a}_1 와 \vec{a}_2 에 의해 표현된다.

$$\vec{C}_h = n \vec{a}_1 + m \vec{a}_2 \quad (n, m = \text{정수}) \quad (1)$$

2차원의 그래핀이 말리는 카이랄 벡터 방향에 따라 탄소나노튜브의 형상이 결정되며, Zigzag 구조의 경우 $m=0$, Armchair 구조의 경우 $n=m$, Chiral 구조의 경우에는 서로 다른 n, m 값을 가진다.

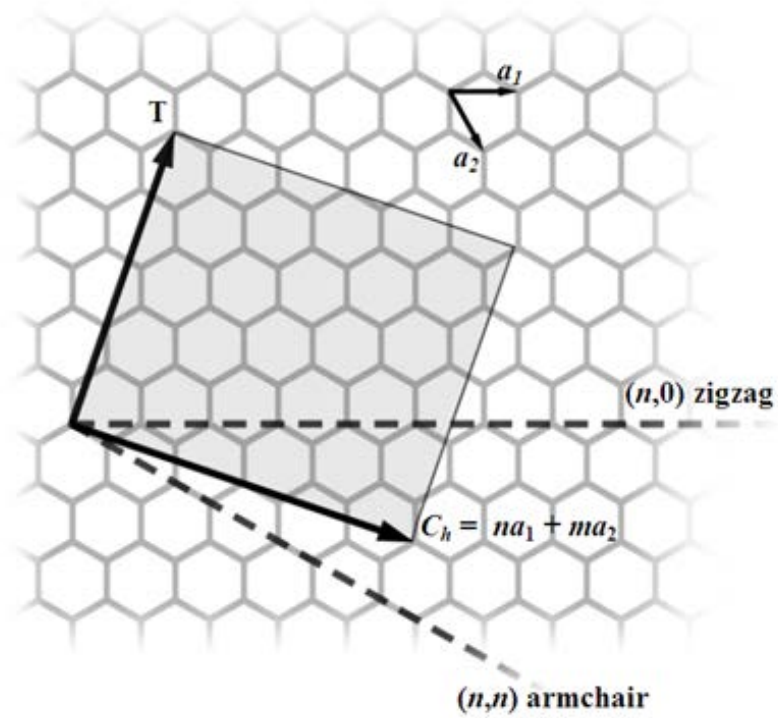


그림 2.3 탄소나노튜브의 카이랄성을 설명하는 벡터 성분

탄소나노튜브는 뛰어난 전기적, 기계적 물성치를 가지고 있으며, 구조적 특징으로 인해 넓은 표면적을 가지고 있다. 이러한 특성으로 인해 기존 재료들의 응용에 있어 존재하는 한계점들을 탄소나노튜브를 사용하여 대체하려는 노력을 하고 있다. 표 1은 탄소나노튜브의 전기적, 기계적 물성치를 나타낸 것이다.

Electrical Property	Conductivity	$\sim 10^6 \text{ S/cm}$
	Mobility	$1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
	Max current density	10^9 A/cm^2
Mechanical Property	Young' s modulus	$\sim 1 \text{ TPa}$
	Max tensile strength	$\sim 100 \text{ GPa}$
	Thermal conductivity	$\sim 1800 - 6000 \text{ W/mK}$

표 1. 탄소나노튜브의 전기적, 기계적 물성

2.2 탄소나노튜브 시트 (Carbon nanotube sheet, CNT sheet)

탄소나노튜브 시트는 2차원의 탄소나노튜브 구조물을 말한다. 특히, 본 논문에서 제작한 탄소나노튜브 시트는 탄소나노튜브 가닥들이 서로 얽혀서 결합되어 있어, 유기적으로 연결된 구조이다. 탄소나노튜브 시트는 비등방성 구조를 가지며, 시트를 구성하는 가닥들이 한 방향으로 일정하게 정렬되어 있다. 한 겹의 탄소나노튜브 시트는 약 20 μm 의 두께를 가지며, 광학적으로 85% 이상의 투과도를 가진다. 또한 탄소나노튜브가 얽혀있어 네트워크를 이루고 있으므로, 전기적으로 도체이며 65 $\text{k}\Omega/\text{sq}$ 의 면저항값을 갖는다. 나노탄소재료로 이루어져 있어 초경량이며, 밀도가 1.5 mg/cm^3 로, 공기와 유사한 밀도를 갖는다.

탄소나노튜브 시트는 free-standing이 가능한 물질이며, 그림 2.4는 탄소나노튜브 시트가 두 금속 와이어 사이에 부유되어 있는 광학사진이다.

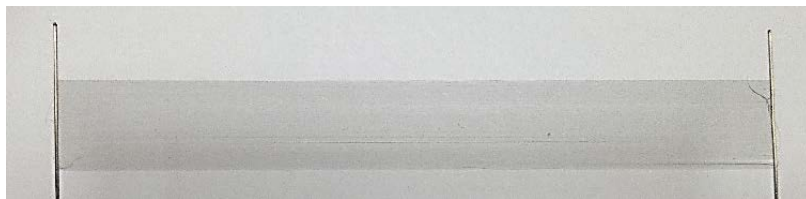


그림 2.4 탄소나노튜브 시트의 광학사진

2.2.1 탄소나노튜브 시트의 물성

Density	1.5 mg/cm³
Areal density	1~3 μg/cm²
Thickness	20 μm
Sheet resistance	65 kΩ/sq
Elastic Modulus	11.52 MPa
Strength	205.8 kPa
Specific Strength	137.2 MPa/(g/cm³)

표 2. 탄소나노튜브 시트의 물성

2.3 정전기 (Static electricity)

본 연구에서는 정전기를 이용하여 에너지 수집에 대한 연구를 수행하였다. 정전기란 전하가 정지 상태로 있어 전하의 분포가 시간적으로 변화하지 않는 전기를 말하며, 마찰에 의해 발생된다. 정전기는 대전된 물체의 표면에 음전하와 양전하의 형태로 존재한다.

Triboelectric series

Materials	Polarity	
Acetate	+	
Glass	+	
Nylon	+	
Lead		
Aluminum	+	
Paper		-
Polyurethane	+	
Cotton		-
Steel	+	
Hard Rubber	+	
Acetate Fiber		-
Epoxy Glass	+	
Nickel, Copper, Silver		-
UV Resist	+	
Stainless Steel		-
Synthetic Rubber	+	
Acrylic		-
Polystyrene Foam	+	
Polyurethane Foam		-
Polyester		-
Polyethylene		-
Polypropylene		-
PVC(Vinyl)		-
TEFLON		-

그림 2.5 물질의 대전열 순서

정전기를 효과적으로 발생시키기 위해 대전열 (Triboelectric series)을 사용하여 본 연구에서 사용할 물질을 선택하였다. 그림 2.5에서, 마찰이 일어날 경우 테플론(Teflon)이 가장 음전하를 잘 띠는 물질임을 확인 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 테플론 표면을 양전하를 잘 띠는 물질과 마찰시킴으로써 음전하를 테플론 표면에 대전시켰다.

물체에 대전체를 가까이 가져가면 대전체와 가까운 부분은 대전된 표면에 존재하는 전하와 대비되는 성질을 갖는 반대 전하가 인력으로 인해 끌려오게 되고, 대전체와 먼 부분은 대전된 표면과 같은 전하가 척력으로 인해 밀려나게 된다. 그림 2.6에서 도시되어 있듯이, 전도체의 경우 자유 전자와 같은 자유 전하 운반자가 물질 내에서 직접적인 이동이 가능하지만, 부도체의 경우 전기력의 영향으로 쌍극자(Dipole)가 정렬된다.

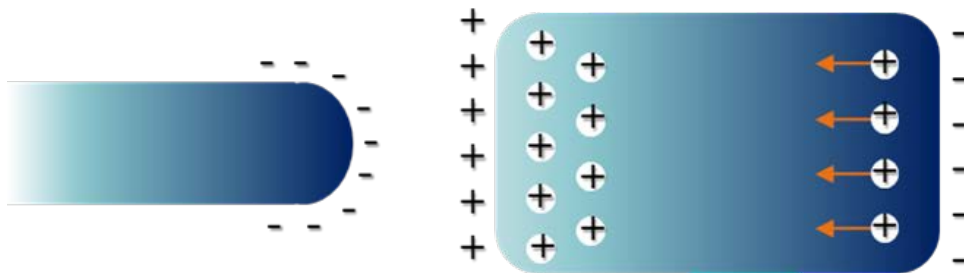


그림 2.6 음으로 대전된 물체의 접근에 의한 도체 내부의 전하 이동

탄소나노튜브는 정전기에 의해 변형이 가능한 재료로 알려져 있다. 정전기장과 탄소나노튜브의 표면 전하 사이의 쿨롱힘에 의한 작용으로 인해 변형이 발생하게 되며, 탄소나노튜브 시트의 경우 대전된 물질에 의해 시트 전면이 휘어지며 펄럭이는 현상을 관찰할 수 있다.

2.4 나노탄소재료를 활용한 에너지 수집 소자

나노탄소재료를 활용한 에너지 수집 소자에 대한 연구는 탄소나노튜브와 그래핀이 발견된 이후 지속적으로 수행되어오고 있다. 에너지 수집 소자란, 외부 에너지원으로부터 에너지를 포획하여 이를 전기적 에너지로 변환하는 장치를 말한다. 태양 에너지, 열 에너지, 풍력 에너지, 기계적 에너지 등을 외부 에너지원으로 이용한 나노탄소재료 기반의 에너지 수집소자가 보고되어오고 있으며, 태양 전지, 열전지, 압전소자 등이 그 대표적인 예이다.

또한, 본 논문에서 다루고 있는 에너지 수집 소자와 같이 나노탄소재료의 자유 전하 운반자의 드래그 이동을 유도하여 에너지 수집에 이용하는 연구가 진행되어오고 있다. 그 예로, 용액을 나노탄소재료 표면 위에 흘려줌으로써 용액 내에 존재하는 이온들이 나노탄소재료 내부의 자유 전하 운반자의 이동을 유도하여 전기적 에너지를 발생시키는 연구들이 있다 [6,7,8,9]. 이온화된 용액의 흐름을 에너지로 사용하여 에너지 수집 소자의 경우, 유도전압이 수십 μV , 유도전류가 수십 μA 이하의 수준으로 보고되고 있다.

본 연구는 자유 전하 운반자를 이동시키는 구동력으로 정전력을 사용 하였으며, 마찰력 등으로 인해 발생하는 구조적 손상을 최소화하여 에너지를 얻을 수 있는 방법이다. 따라서 기존에 고안된 용액을 이용한 자유 전하 운반자 드래그 에너지 수집에 비해, 더 많은 장점을 가질 것으로 예상된다.

3. 실험방법

테플론 막대 표면의 대전량은 정전 전압계 (Electrostatic voltmeter)를 사용하여 정량화하였다. 정전 전압계의 표면 전하 감지부와 테플론 표면까지의 거리가 2cm 일 때, -8.3 kV로 대전된 것을 확인하였으며 모든 실험은 정량적으로 대전된 물체를 이용하여 실험을 진행하였다.

3.1 탄소나노튜브 시트 기반 에너지 수집 소자 제작

탄소나노튜브 기반의 에너지 수집 소자 단면에 정전력이 균일하게 작용하도록 일정한 폭과 두께를 갖는 탄소나노튜브 시트가 필요하다. 이 장에서는 탄소나노튜브를 합성하여 탄소나노튜브 시트를 만들고, 이를 이용하여 에너지 수집소자를 제작하는 과정을 설명하였다.

3.1.1 탄소나노튜브 합성

화학기상증착 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 방법을 이용하여 탄소나노튜브를 합성하였다. 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하여, RF sputtering 을 통해 20nm 두께의 알루미늄 박막을 증착 후 E-beam evaporation 을 통해 철을 5nm 두께로 증착하였다.

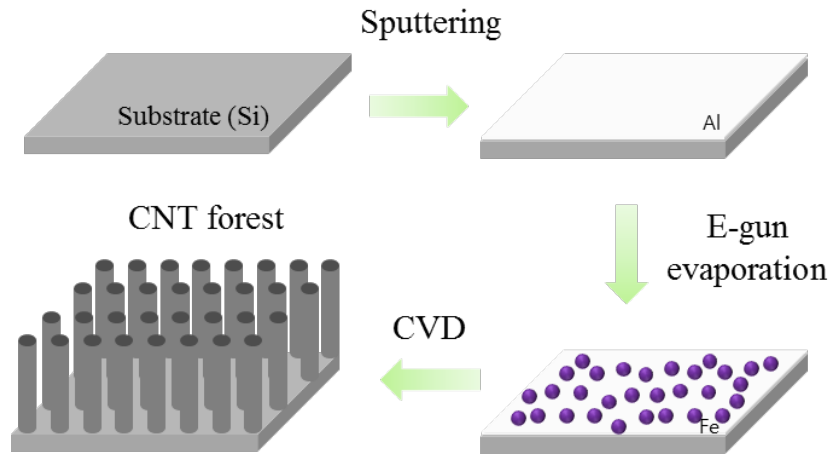


그림 3.1 탄소나노튜브 성장을 위한 공정 개념도

이후, 철이 증착된 기판을 화학 기상 증착기의 튜브 안에 퀴츠 보트(Quartz boat)를 이용하여 넣고 진공 분위기를 만든다. 아르곤(Ar) 가스와 수소(H_2) 가스를 캐리어(carrier) 가스로 사용하고, 아세틸렌(C_2H_2) 가스를 고온에서 흘러줌으로써 열분해 시켰다. 탄소나노튜브는 $680\text{ }^\circ\text{C}$ 에서 10분동안 580 sccm 의 아세틸렌 가스 흘러줌으로써 성장시켰다.

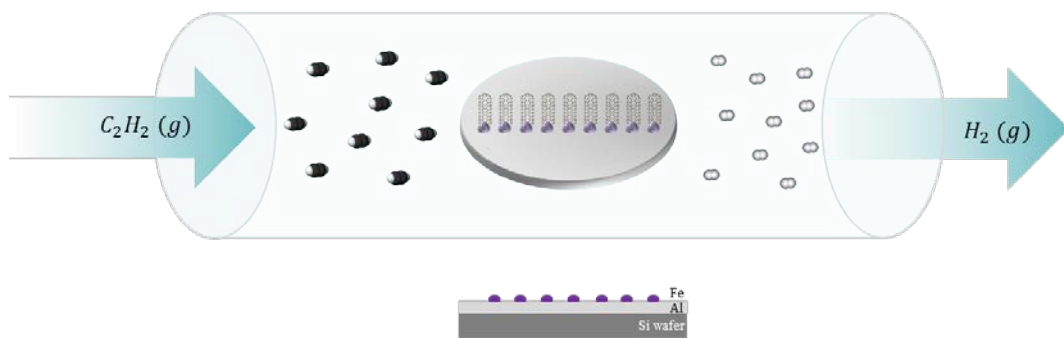


그림 3.2 화학기상증착법을 통한 탄소나노튜브 성장 과정

그림 3.2와 같이, 아세틸렌 가스가 튜브 내에 주입되어 고온에서 열분해 과정이 일어난다. 탄소와 수소로 분해된 아세틸렌 가스는 수소는 튜브 밖으로 배출되고, 기판 위에 증착된 철이 촉매역할을 하여 분해된 탄소가 철 촉매 안으로 확산된다. 확산된 탄소의 양이 증가함에 따라 탄소가 과포화상태에 이르게 되면 철 촉매의 바깥으로 성장하게 된다. 그림 2.9는 시간이 지남에 따라 철 촉매에서 탄소나노튜브가 성장하는 과정을 개략적으로 나타낸 그림이다.

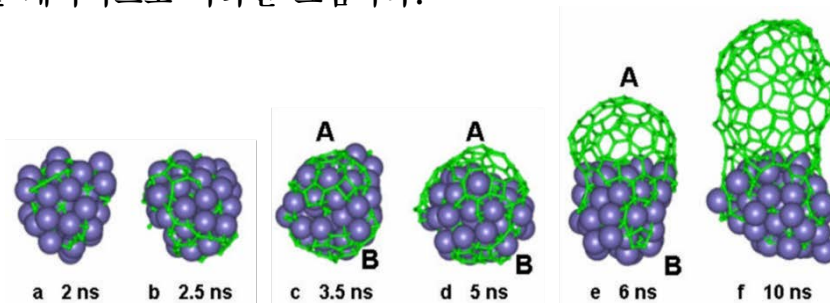


그림 3.3 시간에 따른 탄소나노튜브의 성장 과정

이렇게 합성된 탄소나노튜브 표면에는 금속 촉매와 비정질 탄소가 잔류한다. 그림3.4의 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM) 이미지 에서 탄소나노튜브의 표면에 불순물들이 존재하는 것을 확인 할 수 있고, 합성된 탄소나노튜브는 8~9겹의 벽으로 이루어져 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 탄소나노튜브는 다중벽 탄소나노튜브이며, 도체적 성질을 갖는다.

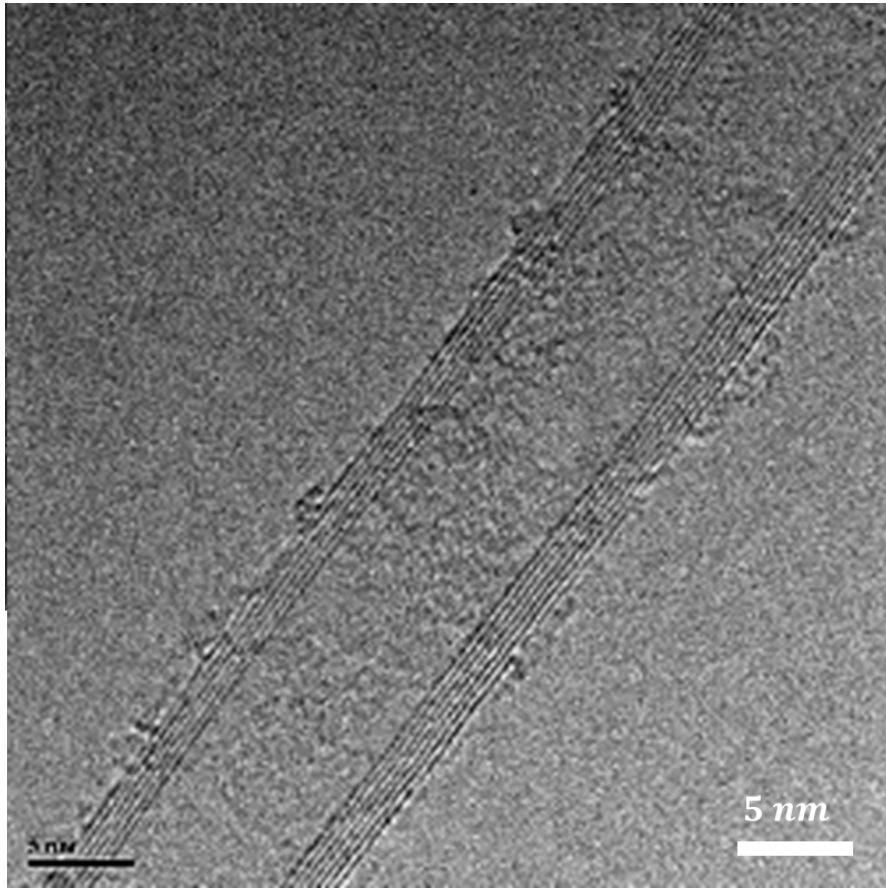


그림 3.4 다중벽 탄소나노튜브의 TEM 이미지

3.1.2 탄소나노튜브 시트 제작

본 연구에서는 방적이 가능한 탄소나노튜브(spinnable Carbon nanotube)를 합성하여 사용하였으며, 이는 탄소나노튜브들이 서로 얽혀있어 연속적으로 연결된 긴 줄(string)을 형성할 수 있다. 유기적으로 연결된 1차원의 긴 가닥들이 모여 2차원의 면을 형성할 수 있으며, 이것이 탄소나노튜브 시트(Carbon nanotube sheet)이다. 탄소나노튜브 시트는 화학기상증착법으로 합성된 탄소나노튜브 포레스트로부터 Dry spinning process를 통해 제작하였다. Dry spinning process는 날카로운 팁을 이용하여 탄소나노튜브 포레스트의 가장자리를 끌어당기면, 얽혀있는 탄소나노튜브들이 연속적으로 인출됨으로써 시트를 형성하는 공정을 말한다. 그림 3.5는 Dry spinning process 중 탄소나노튜브들이 인출되는 것을 개략적으로 나타낸 그림이다. 탄소나노튜브 사이가 연결되어 있어 연속적으로 인출되는 것이 가능하다.

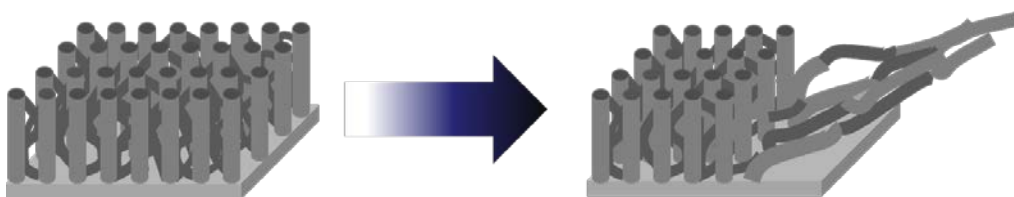


그림 3.5 탄소나노튜브 시트의 Dry spinning process 개념도

그림 3.6에서는 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 통해 탄소나노튜브 포레스트로부터 탄소나노튜브 가닥들이 인출되어 나오는 것을 확인하였으며, 그림 3.7은 인출된 탄소나노튜브 가닥들을 확대한 사진이다. 이를 통해 일축 정렬된 탄소나노튜브 시트가 연속적으로 끌려나올 수 있는 이유를 구조적으로 확인할 수 있다.

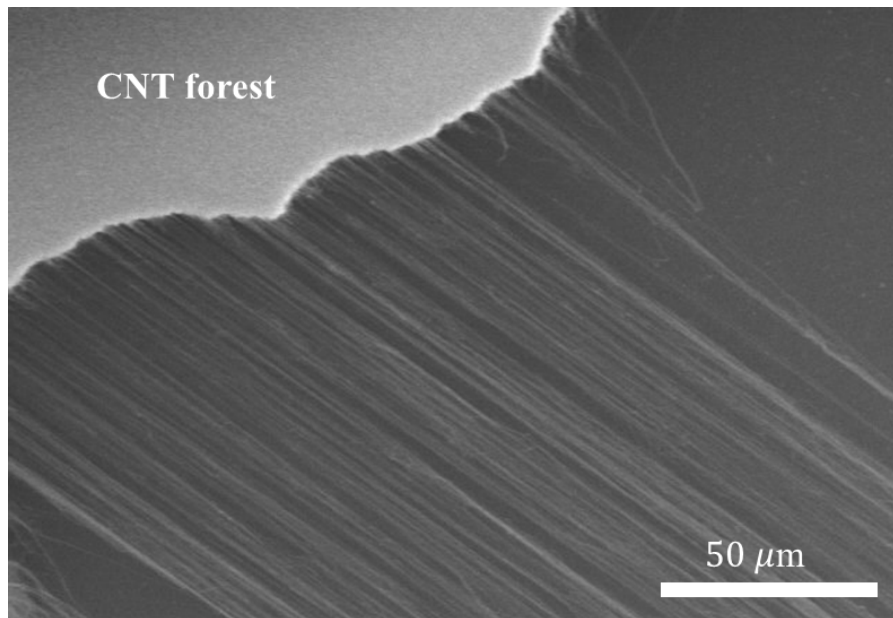


그림 3.6 인출된 탄소나노튜브 시트의 SEM 이미지

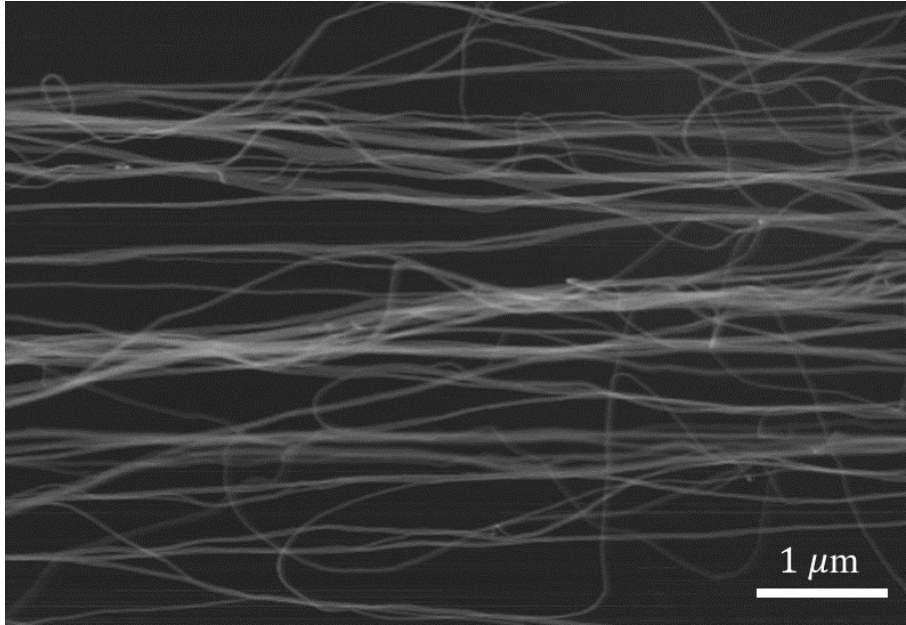


그림 3.7 탄소나노튜브 시트를 확대한 SEM 이미지

3.1.3 에너지 수집 소자 제작

Dry spinning process를 통해 인출된 탄소나노튜브 시트를 구리 와이어에 부유 시킴으로써 전극에 연결하였다. 본 연구에서 사용된 탄소나노튜브 시트는 길이가 6 cm, 폭이 1 cm 이며, 단순 적층 방법을 통해 여러겹의 시트를 제작할 수 있다. 본 연구에서 제작한 에너지 수집 소자는 기존의 연구들에서 수행되었던 방법에 비해 매우 간단한 방법으로 에너지 수집소자를 제작할 수 있다는 것이 특징이다.

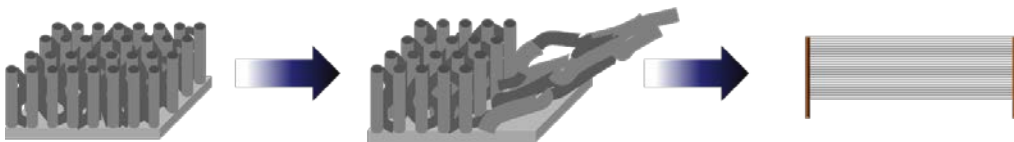


그림 3.8 탄소나노튜브 시트 기반 에너지 수집 소자 제작 과정의 개념도

3.2 에너지 수집 과정

그림 3.9는 탄소나노튜브 시트 기반의 에너지 수집소자의 에너지 수집 과정을 위한 실험 세팅 개념도이다. 음전하로 대전된 테플론 막대는 원판 디스크판에 고정되어 있고, 디스크판은 모터에 연결되어 원운동을 한다. 원운동을 할 때, 탄소나노튜브 시트의 표면과 가장 근접하게 되는 거리를 거리 변수로써 사용하였다.

탄소나노튜브 시트는 공기와 비슷한 밀도를 가지는 재료로, 테플론이 움직이면서 발생하는 바람의 영향을 최소화하고, 구조적으로 손상되는 것을 막기 위해 wind shield를 사용하였다.

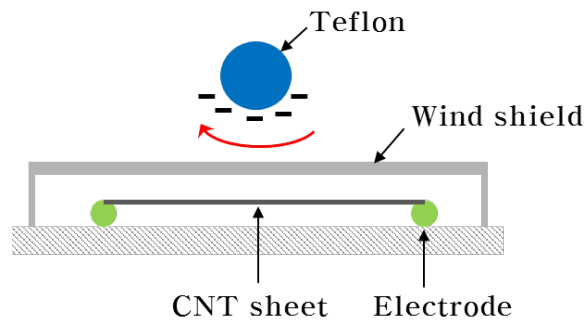


그림 3.9 에너지 수집을 위한 실험 세팅 개념도

테플론 막대는 모직물로 마찰시켜 대전시켰으며, 대전된 양은 정전 전압계 (Trek model 542, electrostatic voltmeter)를 이용하여 매 실험에 있어 정량화된 테플론 막대를 사용하였다.



그림 3.10 실험에 사용한 정전 전압계의 광학 사진

4. 결과 및 논의

4장에서는 제작한 탄소나노튜브 시트 기반 에너지 수집소자의 성능을 평가하고, 그 결과에 대해 논의할 것이다.

4.1 에너지 수집 소자 특성

정전기를 이용한 탄소나노튜브 시트 기반 에너지 수집 소자 성능을 평가하기 위해, 유도되는 전압과 전류를 측정하였고, 이를 통해 전력을 계산하였다. 디지털 멀티미터 (Keithley model 2000 multimeter) 를 사용하여 전압과 저항을 측정 하였으며, 피코암미터 (Keithley model 6485 picoammeter)를 사용하여 전류를 측정하였다. 또한 유도되는 전력이 정전기로 인해 유도되는 것인지를 확인하기 위하여 여러가지 변수를 사용하여 소자의 성능을 평가하였다.

4.1.1 유도 전압

그림 4.1에서, 대전된 테플론 막대가 정지한 상태(0~2.5초)에서 움직임이 발생할 때(2.5초~)전압 신호가 바뀌는 것을 볼 수 있다. 대전된 물체가 정지한 상태에서는 전압 신호에 변화가 없어 유도 전압(Induced Voltage)이 발생하지 않고, 탄소나노튜브 시트 표면

근처에 대전된 물체가 이동할 때 유도전압이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 물체의 이동속도에 따라 유도전압이 비례하여 증가한다는 것을 실험적으로 확인하였다. 대전된 테플론 막대와 탄소나노튜브 시트 표면 사이의 거리는 0.1 cm 이며 약 98 mm/s (67 rpm) 의 속도로 이동할 때(2.7초~10초), 발생하는 유도전압은 90 μV 이고, 30 mm/s (20 rpm) 의 속도로 이동할 때(14~29초)에 발생하는 유도전압은 30 μV 임을 확인할 수 있다. 테플론 막대를 원판 디스크에 고정시켜 모터를 이용해 기계적인 움직임을 발생시켜, 전압 신호가 사인(sine)파 모형으로 변하게 된다.

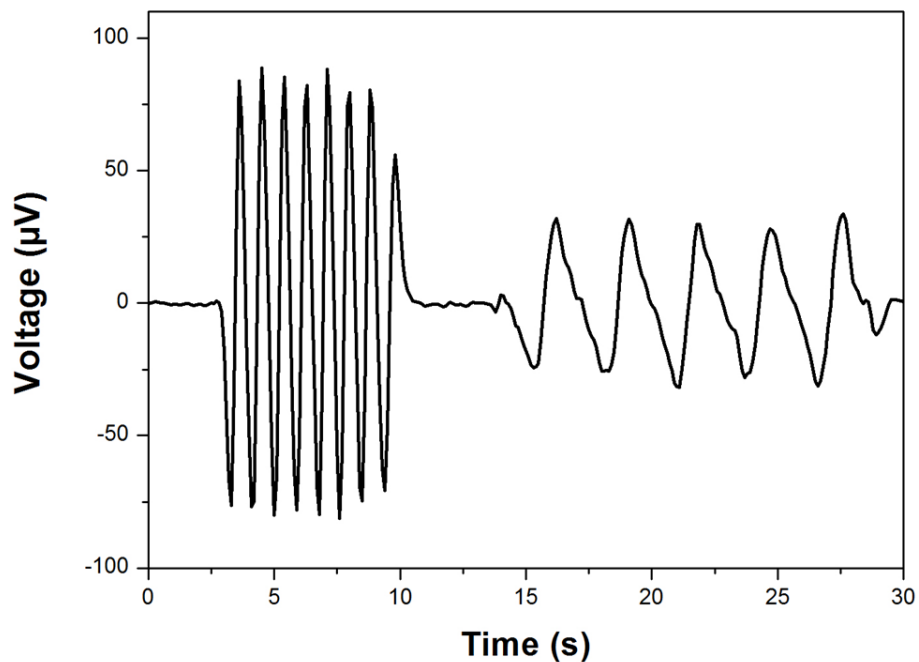


그림 4.1 대전된 물체의 움직임에 따른 에너지 수집 소자의 전압 변화

4.1.1.1 거리에 따른 영향

전하를 가지는 두 물체 사이에 작용하는 힘은 쿨롱의 법칙(Coulomb's law)에 따라 식(2)와 같고, 거리(r)와 전하량(q), 유전율(ϵ)의 함수이다.

$$F = (q_1q_2)/4\pi\epsilon r^2 \quad (2)$$

4.1.1.1장에서는 탄소나노튜브 시트와 대전된 테플론 사이의 거리가 증가할 때 유도되는 전압이 감소하는 결과에 대해 설명한다. 대전량이 일정할 때 한 겹으로 구성된 탄소나노튜브 시트 표면에서부터 테플론 막대 사이의 거리는 0.1 cm 부터 2.5 cm 까지, 0.1 cm 간격으로 실험을 진하였으며, 테플론 막대의 이동속도는 약 97 mm/s (67 rpm)로 이동하였고, -8.3 kV 로 대전된 막대를 사용하여 동일한 조건하에서 실험을 진행하였다. 그림 4.2에서 도시되어 있듯이, 거리가 0.1 cm 만큼 떨어져 있을 때 95.14 μ V 의 유도전압을 얻었고, 거리가 2.5 cm 만큼 떨어져 있을 때 28.04 μ V 의 유도전압을 얻어, 유도전압이 거리의 제곱(r^2) 에 반비례하여 감소함을 확인하였다.

탄소나노튜브 시트와 대전된 물체 사이의 거리가 증가함에 따라 유도전압이 감소하는 이유는, 두 물체 사이에 작용하는 힘이 감소하여, 테플론 막대가 움직이는 방향에 따라 이동하는 탄소나노튜브 시트 표면의 자유 전하 운반자들이 약한 힘으로 끌어당겨지게 된다. 이에 따라 탄소나노튜브 시트 표면의 자유 전하 운반자들의 이동이 더디지게 되고, 강한 힘으로 끌어당겨질 때보다 끌려가는 자유 전하 운반자의

개수가 상대적으로 줄어들게 되어 더 작은 유도전압이 발생된다.

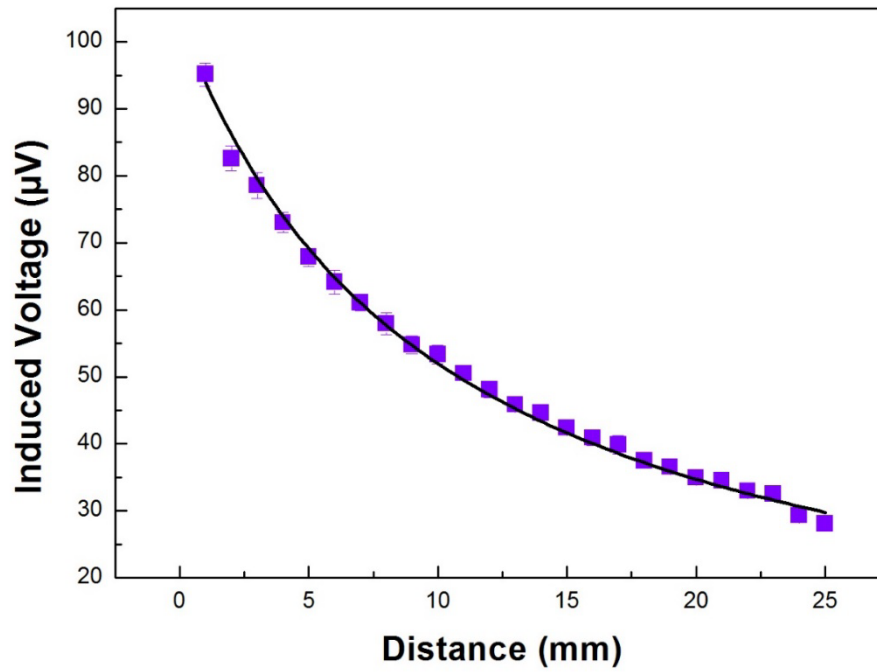


그림 4.2 거리에 따른 유도전압 그래프

4.1.1.2 대전량에 따른 영향

식(2)에서, 대전된 두 물체 사이에 작용하는 힘은 전하량에 비례한다는 것을 알 수 있다. 테플론 막대를 마찰시키는 정도를 조절하여 대전량을 제어하였다. 대전량은 정전 전압계를 사용하여 측정하였으며, 정전 전압계의 감지부와 Teflon 표면까지의 거리가 2cm 일 때, 측정되는 값을 표기하였다. 각 실험에서 한 겹의 탄소나노튜브 시트와 테플론 사이의 거리는 0.1cm로 일정하였고, 테플론 막대의 이동속도는 97 mm/s (67 rpm) 로 동일한 조건을 사용하였다.

그림 4.3에서 도시되어 있듯이, -1.3 kV, -2.6 kV, -3.8 kV, -4.2 kV, -5 kV, -6 kV, -7.7 kV, -8.5 kV로 대전된 테플론 막대를 사용하였다. 대전량은 -1.3 kV로 대전된 테플론을 사용하였을 때 9 μ V의 유도전압을 얻었고, -8.5 kV로 대전된 테플론을 사용하였을 때 83 μ V의 유도전압을 얻었다. 그림 4.3에서는 대전량의 절대값을 x축으로, 유도전압을 y축으로 설정하여 도시하였고, 대전량의 절대값이 커질수록 유도전압이 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

대전된 두 물체 사이에 작용하는 전하량(q)에 비례하여 쿨롱힘이 증가하므로, 대전량의 절대값이 증가할수록 탄소나노튜브 시트 내의 자유 전하 운반자가 더 강한 힘으로 끌어당겨지게 된다. 이에 따라 탄소나노튜브 시트 표면의 자유 전하 운반자의 이동이 증가하므로 큰 대전량을 갖는 물체를 사용할 때, 큰 유도전압을 얻을 수 있다.

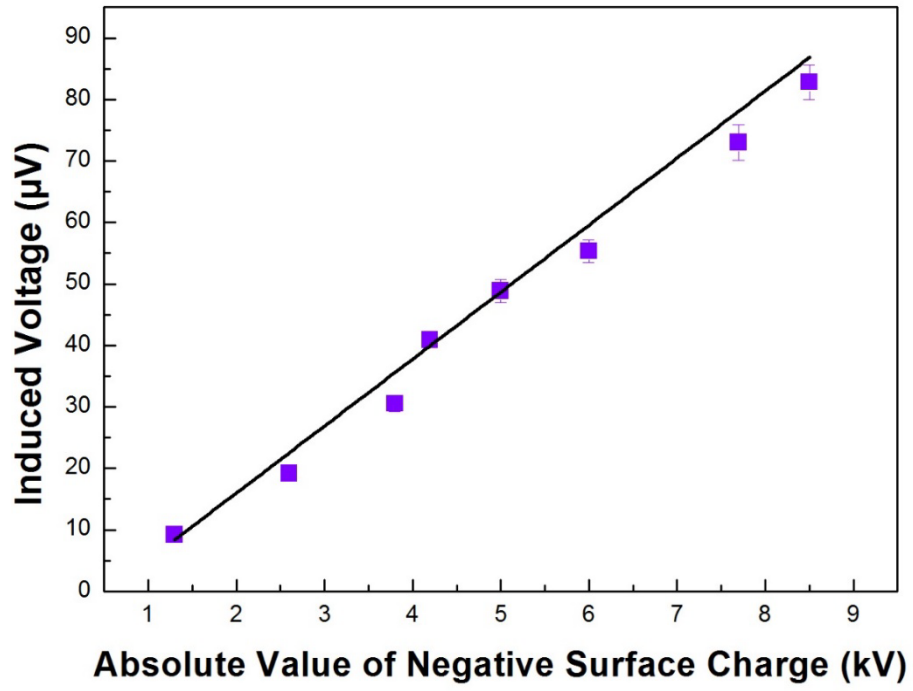


그림 4.3 대전량의 절대값에 대한 유도전압 그래프

4.1.1.3 탄소나노튜브 시트의 겹수에 따른 영향

탄소나노튜브 시트는 단순 적층 방법을 통해 여러 겹으로 적층할 수 있으며, 이를 통해 전기적 특성을 조절할 수 있다. 그림 4.4에서 도시되어 있듯이 한 겹의 탄소나노튜브 시트의 경우, 면저항이 $65 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ 이고, 두 겹으로 구성된 탄소나노튜브 시트의 경우 면저항이 약 50% 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 탄소나노튜브 네트워크 사이의 빈 공간을 적층된 시트가 채움으로써 탄소나노튜브간의 전기적 통로가 증가함에 따라 나타나는 결과이며, 더 많은 층의 시트를 적층 할수록 면저항이 점진적으로 줄어든다.

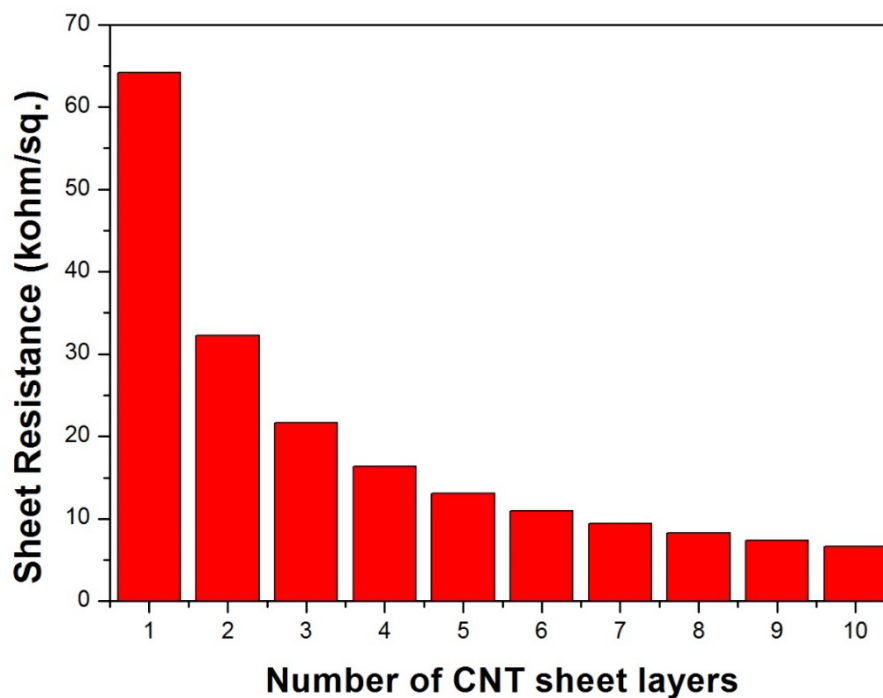


그림 4.4 탄소나노튜브 시트 겹수에 따른 면저항 그래프

1겹, 2겹, 10겹으로 적층된 탄소나노튜브 시트를 사용하여 3가지 성능을 평가하였으며, 각각의 시트는 저항이 10.69 k Ω , 5.38 k Ω , 1.1 k Ω 이다. 각 실험에서 탄소나노튜브 시트와 테플론 사이의 거리는 0.1cm로 일정하였고, 테플론 막대의 이동속도는 100 mm/s (70 rpm)로 이동하였으며 -8.3 kV 로 대전된 테플론 막대를 사용하여 동일한 조건하에서 실험을 진행하였다.

그림 4.5는 시트의 겹 수가 증가함에 따라 유도전압이 감소하는 것을 도시하고 있다. 1겹의 시트는 약 100 μ V의 유도전압을 얻는 반면, 2겹의 시트의 경우 약 30 μ V, 10겹의 시트의 경우 10 μ V 이하의 유도전압이 얻어졌다.

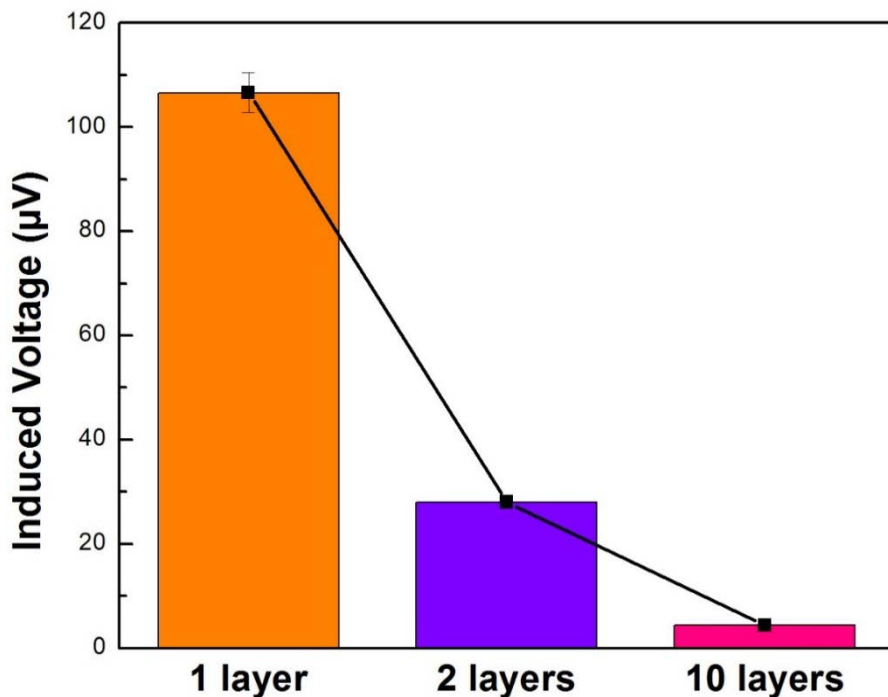


그림 4.5 탄소나노튜브 시트 겹수에 따른 유도전압 그래프

적층된 시트의 접수가 증가함에 따라, 전기적 통로가 증가하여 전하 운반자가 이동할 수 있는 통로가 증가하는 결과를 초래한다. 이에 따라 정전력에 의해 이끌려오는 자유 전하 운반자가 이동할 수 있는 경로가 확장됨과 동시에 산란(scattering)될 확률 또한 커지게 된다. 따라서 자유 전하 운반자들의 구배(gradient)가 효과적으로 일어나지 못하게 되고, 이는 유도 전압의 감소로 이어진다. 따라서 적층된 시트의 접수가 적을수록, 더 큰 유도 전압이 발생하게 된다.

4.1.1.4 드래그 속도에 따른 영향

대전된 물체가 시트의 표면에서 일정한 거리만큼 떨어져 탄소나노튜브 시트가 배열된 방향으로 이동하게 되는데, 본 연구에서는 이때 대전된 물체가 이동하는 속도를 드래그 속도라고 지칭하였다. 최소 15 mm/s 부터 100 mm/s 까지 드래그 속도를 변화시키며, 유도되는 전압과 전류를 측정하였다. 한 겹의 탄소나노튜브 시트와 테플론 사이의 거리는 0.1 cm로 일정하고, -8.3 kV로 대전된 테플론 막대를 사용하였다.

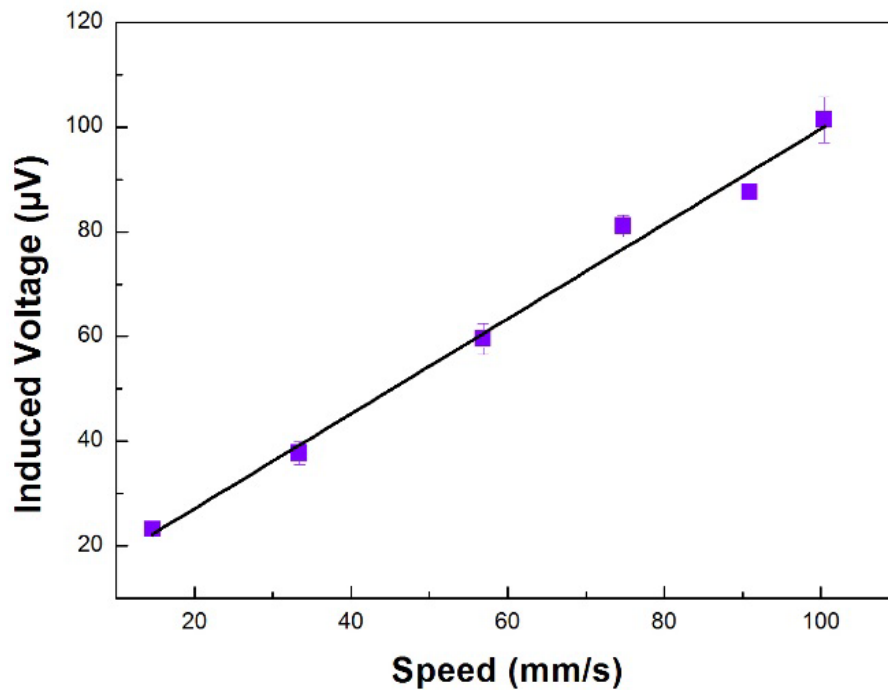


그림 4.6 드래그 속도에 따른 유도 전압 그래프

그림 4.6에서 도시되어 있듯이, 드래그 속도가 증가함에 따라 유도 전압이 선형적으로 비례하여 증가한다. 드래그 속도가 15 mm/s 일 때, 23 μ V 의 유도전압이 얻어졌으며, 100 mm/s 일 때, 101.4 μ V 의 유도전압이 얻어졌다.

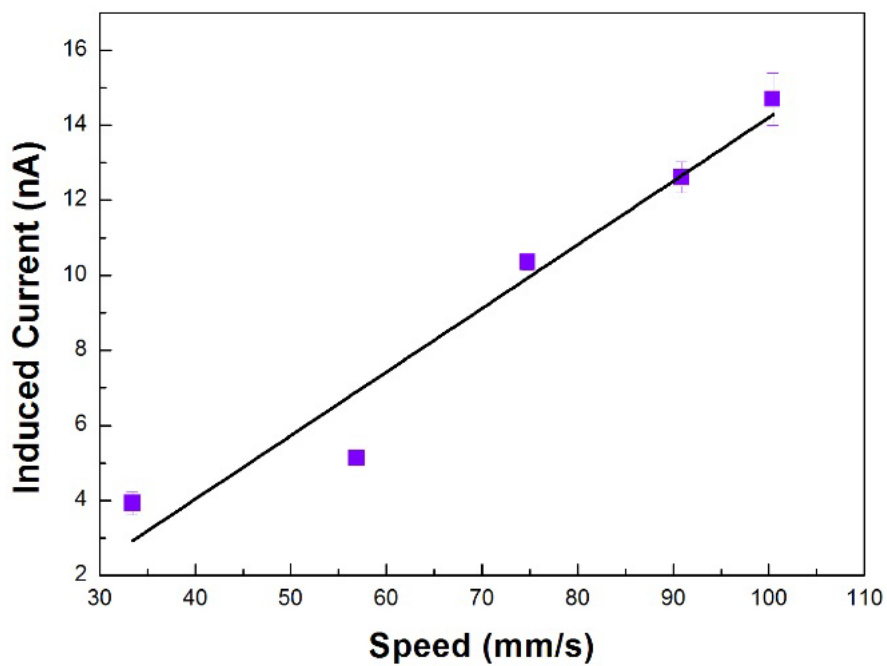


그림 4.7 드래그 속도에 따른 유도 전류 그래프

그림 4.7 에서 도시되어 있듯이, 드래그 속도가 증가함에 따라 유도 전류가 선형적으로 비례하여 증가한다. 드래그 속도가 30 mm/s 일 때 3.9 nA의 유도 전류가 얻어졌고, 100 mm/s 로 이동할 때 14.7 nA의 유도전류가 얻어진다.

전류는 단위 시간 동안 흐르는 전하의 양을 말한다. 드래그 속도가 빨라짐에 따라 정전력으로 인해 발생하는 자유 전하 운반자의 이동 속도가 빨라지고, 단위 시간 동안 흐르는 전하의 양이 증가하여 전류의 증가로 이어진다. 전압과 전류는 옴의 법칙에 따라 비례하므로, 유도전압이 증가함에 따라 유도 전류도 증가하게 된다.

4.1.2 출력 전력

에너지 수집 소자의 출력 전력은 유도전압과 유도 전류의 곱으로 얻어졌으며, 식(2)와 같다.

$$P = VI \quad (2)$$

드래그 속도가 33 mm/s, 57 mm/s, 75 mm/s, 90 mm/s, 100 mm/s 일 때, 유도 전압과 유도 전류를 측정하여 두 가지 변수를 이용해 출력 전력을 계산하였다. 한 겹의 탄소나노튜브 시트와 테플론 사이의 거리는 0.1 cm로 일정하고, -8.3 kV로 대전된 테플론 막대를 사용하였다. 드래그 속도에 따른 출력 전력은 표 3에 나타나 있으며, 탄소나노튜브 시트 기반의 에너지 수집소자의 최대 출력 전력은 1.49×10^{-12} W 이고, 최대 전력밀도는 $2.46 \times 10^{-9} W/m^2$ 이다.

드래그 속도 (mm/s)	유도 전압 (μV)	유도 전류 (nA)	출력 전력 (pW)
33	37.74	3.92	0.15
57	59.51	5.12	0.31
75	81.07	10.34	0.84
90	87.50	12.60	1.10
100	101.36	14.69	1.49

표 3. 드래그 속도에 따른 에너지 수집 소자의 성능

출력 전력은 유도전압과 유도전류의 곱이므로, 드래그 속도에 따라 선형적으로 증가하는 유도전압과 유도전류로 인해 출력 전력은 2차식에 비례하여 비선형적으로 증가하게 된다. 그림 4.8을 통해 드래그 속도에 대해 비선형적으로 출력 전력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

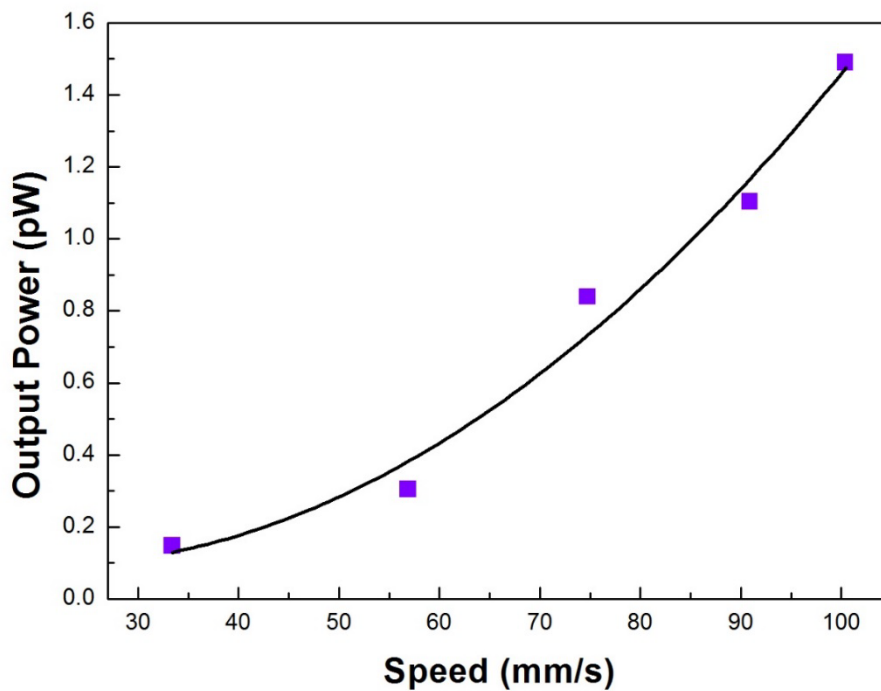


그림 4.8 드래그 속도에 따른 출력 전력 그래프

4.2 이종 재료와 에너지 수집 특성 비교

정전력을 이용한 에너지 수집 소자의 재료로써, 탄소나노튜브 시트의 적합성을 검증하기 위해 탄소나노튜브 시트와 두께가 유사한 금속 박편을 사용하여 에너지 수집에 대한 성능을 평가하였다. 비교를 위해 한 겹으로 구성된 탄소나노튜브 시트와 두께가 유사한 25 μm 두께의 구리 박편을 사용하였으며, 탄소나노튜브 시트/구리 박편 표면에서부터 테플론 사이의 거리는 0.1 cm로 일정하였고 -8.3 kV로 대전된 테플론 막대를 사용하였다. 드래그 속도가 약 100 mm/s 일 때, 탄소나노튜브 시트는 100 μV 이상의 유도 전압을 얻은 반면 금속 박편은 전압이 유도되지 않았다 (그림 4.9).

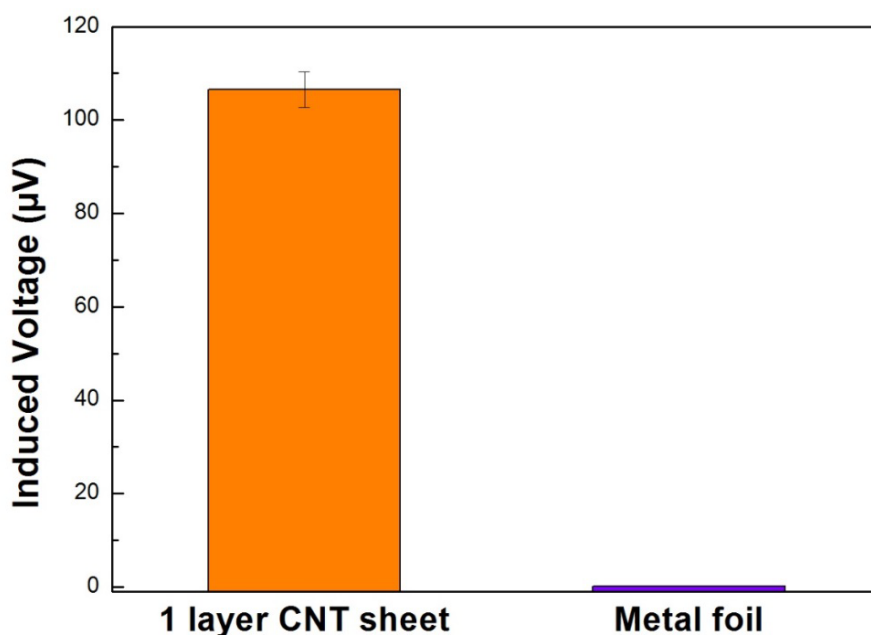


그림 4.9 금속 박편 기반의 에너지 수집 소자와 성능 비교

대전된 물체가 에너지 수집 소자 표면 근처에서 이동할 때, 대전된 물체의 표면에 있는 전하와 에너지 수집 소자 표면에 존재하는 자유 전하 운반자 사이에 힘으로 인해 대전된 물체가 이동하는 방향에 대해 자유 전하 운반자의 움직임이 발생하게 된다. 자유 전하 운반자의 움직임으로 인해 전류가 흐르게 되는데, 이 때 자유 전하 운반자의 이동은 전체 운반자 개수에 따라 영향을 받는다. 탄소나노튜브는 자유 전하 운반자 밀도(free charge carrier density)가 $n_{e,CNT} \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 금속의 자유 전하 운반자 밀도가 $n_{e,metal} \approx 10^{28} \text{ cm}^{-3}$ 로, 탄소나노튜브가 금속에 비해 단위 부피당 10^{10} 배 적은 수의 운반자를 가지고 있다. 자유 전하 운반자가 더 많은 경우, 이동하는 운반자의 경로를 방해하는 또 다른 운반자가 무수히 많이 존재하여 자유 전하 운반자의 이동을 더디게 한다. 따라서 자유 전하 운반자는 대전된 물체가 이동한 방향으로 운동을 저지당하여, 전류를 효과적으로 발생시키기 어렵다.

2.1장에서 서술하였듯이 탄소나노튜브는 탄소 원자 한 층으로 구성된 그래핀이 말린 형태로써 다중벽 탄소나노튜브의 벽(wall)안에 존재하는 자유 전하 운반자는 수평 방향으로만 이동이 가능하다. 탄소나노튜브에 존재하는 자유 전하 운반자가 정전력에 의해 이동하게 되면 한 쪽 전극으로 자유 전하 운반자들이 이동하게 될 것이다. 운반자가 전자라고 가정할 경우에 전자가 이동하여 비워진 공간을 정공이라고 가정할 수 있다. 만약 전자가 탄소나노튜브의 벽 사이를 수직방향으로 이동 할 수 있다면 전자가 계속하여 정공의 자리를 채워 수평상에서 전자의 농도 구배가 낮아질 수 있지만, 전자의 수직방향 이동이 불가 하므로 전자의 농도 구배가 일어나 인해 효과적으로 전류를

생산할 수 있다. 금속의 경우, 전자의 이동으로 인해 생성된 정공이 무수히 많은 전자들로 인해 채워지므로 전자의 농도 구배를 형성하기 어렵다. 이러한 이유로 같은 힘의 정전력에 대해 탄소나노튜브가 금속에 비해 더욱 효과적으로 에너지 수집을 할 수 있게 된다.

그림 4.10은 탄소나노튜브와 금속에서 정전력으로 인해 유도되는 전자의 이동을 나타내고 있다.

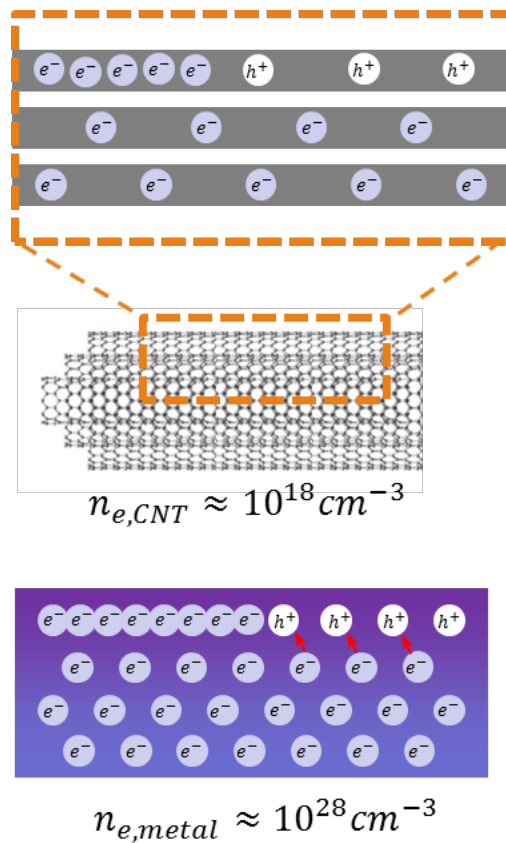


그림 4.10 정전력으로 인해 유도되는 탄소나노튜브와 금속 내부의 전자의 이동 모식도

4.3 에너지 수집 메커니즘

4.3장에서는 에너지 수집에 대한 메커니즘을 설명한다. 정전기로 인해 발생하는 힘은 두 물체의 전하의 부호가 같으면 척력이 작용하고, 전하의 부호가 다르면 인력이 존재하게 된다. 따라서 대전된 전하의 부호에 따라 이동하는 자유 전하 운반자의 종류가 달라질 것으로 예측할 수 있으며, 음전하로 대전된 테플론 막대와 양전하로 대전된 유리 막대를 사용하여 에너지 수집에 대한 메커니즘을 밝혀내고자 하였다. 한 겹으로 구성된 탄소나노튜브 시트 기반의 에너지 수집 소자를 사용하였으며, 테플론 막대는 -8.3 kV , 유리막대는 $+1\text{ kV}$ 로 대전시켰다.

그림 4.12는 음전하로 대전된 테플론 막대를 사용하여, 이동 방향에 따른 전압 신호를 나타내고 있다. 그림 4.11의 Case 1은 디지털 멀티미터의 음극에 연결된 전극(오른쪽 전극)의 표면에서부터 양극에 연결된 전극(왼쪽 전극)쪽으로 테플론 막대를 이동시켜 전압 신호를 관찰한 경우이고, Case 2는 양극에 연결된 전극의 표면에서부터 음극에 연결된 전극쪽으로 테플론 막대를 이동시킨 경우이다. Case 1의 경우 테플론 막대의 이동이 시작될 때에 전압 신호가 마이너스(-) 방향으로 나타나는 것을 볼 수 있으며, 막대의 이동이 끝나면 다시 0으로 값이 회복되는 것을 볼 수 있다. Case 1과 반대방향으로 테플론 막대를 이동한 Case 2의 경우에는 전압 신호가 플러스(+) 방향으로 나타나는 것을 볼 수 있으며, Case 1 과 마찬가지로 막대의 이동이 끝나면 다시 0으로 값이 회복되는 것을 볼 수 있다. 이 결과를 통해 대전된 물체의 이동방향에 따라 발생하는 전압 신호가 달라짐을 알 수 있다.

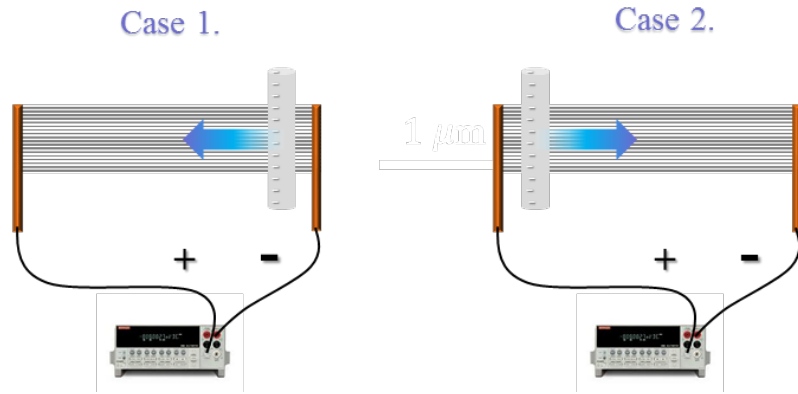


그림 4.11 음전하로 대전된 물체를 사용한 메커니즘 규명 실험 모식도

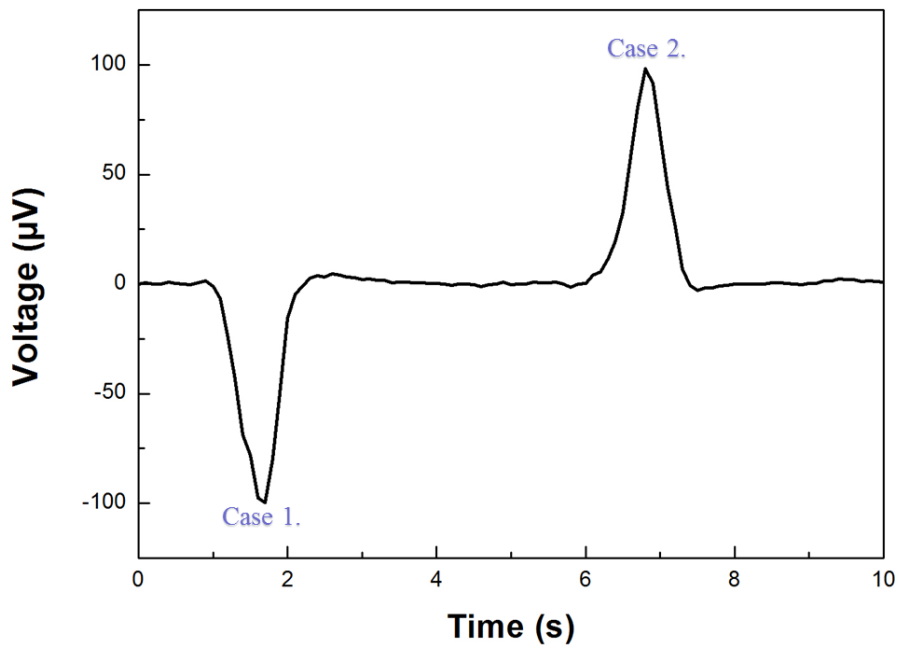


그림 4.12 Case 1과 Case 2에 대한 전압 신호 그래프

이를 통해 같은 조건 하에서 표면에 음전하를 가지는 물체와 양전하를 가지는 물체를 이동시킨다면, 서로 반대되는 전압신호를 발생시킬 것이라는 것을 유추할 수 있다. 이를 확인하기 위해 Case 3과 Case 4와 같이, 서로 다른 방향으로 표면에 양전하를 가지는 유리 막대를 이동하는 실험을 수행하였다. Case 3의 경우, Case 1의 경우와 마찬가지로 디지털 멀티미터의 음극에 연결된 전극(오른쪽 전극)의 표면에서부터 양극에 연결된 전극(왼쪽 전극)쪽으로 유리 막대를 이동시켜 전압 신호를 관찰하였다. Case 4의 경우에는, Case 2의 경우와 마찬가지로 양극에 연결된 전극의 표면에서부터 음극에 연결된 전극쪽으로 유리 막대를 이동시켰다.

그림 4.14에 도시되어 있듯이, Case 3의 경우 테플론 막대의 이동이 시작될 때에 전압 신호가 마이너스(-) 방향으로 나타나는 것을 볼 수 있으며, 막대의 이동이 끝나면 다시 0으로 값이 회복되는 것을 볼 수 있다. Case 4의 경우에는 전압 신호가 플러스(+) 방향으로 나타나는 것을 볼 수 있으며, Case 3과 반대되는 신호가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Case 1과 Case 3, Case 2와 Case 4는 각각 같은 방향으로 이동하고 있으나, 대전된 전하의 종류가 음전하와 양전하로 각각 다르다. 그러나 그림 4.12, 4.14를 통해 각각을 비교해보면, Case 1과 Case 3, Case 2와 Case 4의 전압의 신호가 다르다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 같은 방향으로 대전된 물체가 이동을 하더라도 대전된 전하의 부호에 따라 발생하는 전압의 신호가 반대로 발생한다.

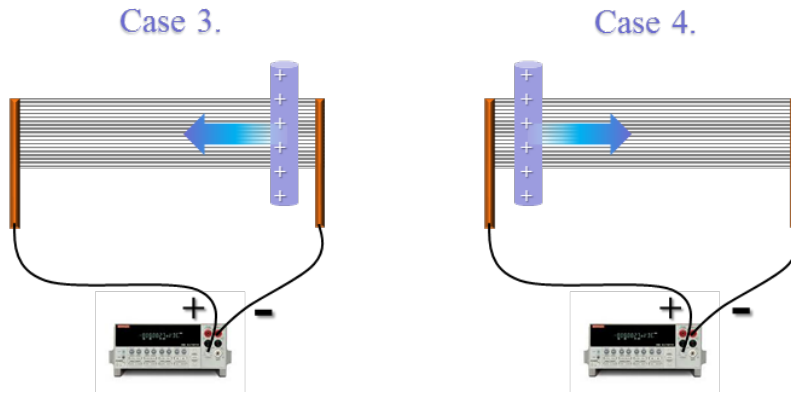


그림 4.13 양전하로 대전된 물체를 사용한 메커니즘 규명 실험 모식도

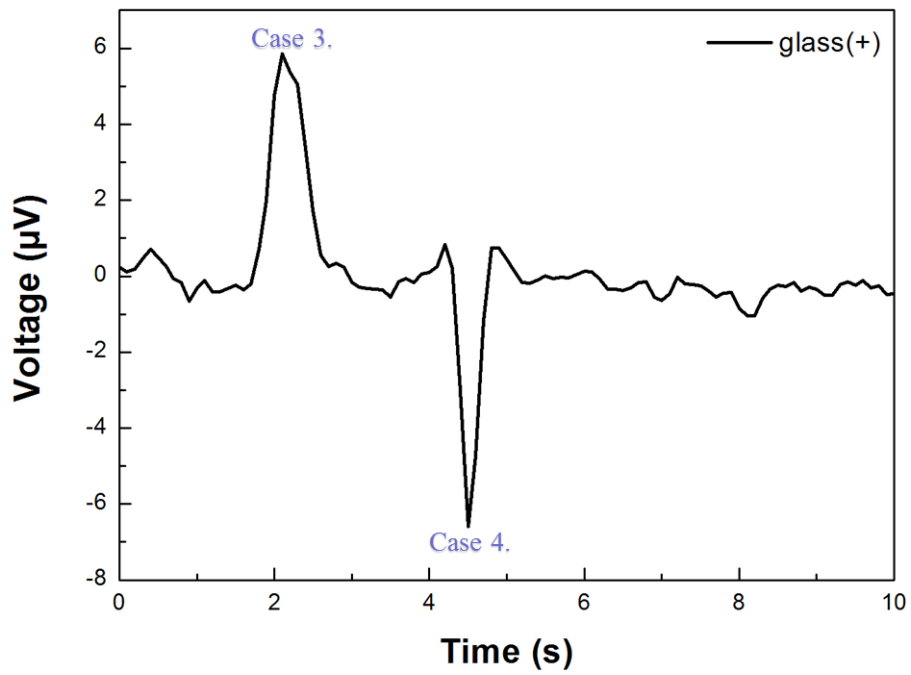


그림 4.14 Case 3과 Case 4에 대한 전압 신호 그래프

그림 4.12, 4.14를 통해 전압의 신호가 대전된 전하의 종류와 드래그 방향에 따라 달라짐을 볼 수 있다. 이를 통해 탄소나노튜브 시트에 존재하는 자유 전하 운반자가 대전된 전하의 종류에 따라 이동하는 방향이 달라짐을 유추할 수 있다. 그림 4.11과 같이 음으로 대전된 테플론 막대가 이동하는 경우(Case 1과 같다), 테플론 막대가 탄소나노튜브 시트 표면에 접근함에 따라 음전하를 띠는 전자와 테플론 사이에 척력이 발생하게 되어 전자는 테플론 막대의 이동 방향과 반대 방향으로 이동하게 되고, 반대로 정공은 테플론 막대의 이동 방향과 같은 방향으로 이동하게 된다. 따라서 전류는 테플론 막대가 이동한 방향과 같은 방향으로 흐르게 되고, 전류는 양극에서 음극으로 흐르게 되므로 테플론 막대의 이동이 시작된 쪽이 양극이 된다. 그러나 양극과 음극이 각각 디지털 멀티미터에 상반되는 극으로 연결되어 있어, 마이너스(-) 방향으로 신호가 발생하게 된다 (그림 4.16).

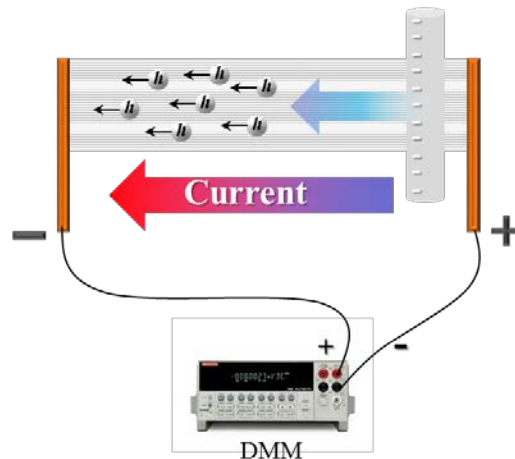


그림 4.15 정전기의 기계적 움직임에 의해 전류가 생성되는 메커니즘

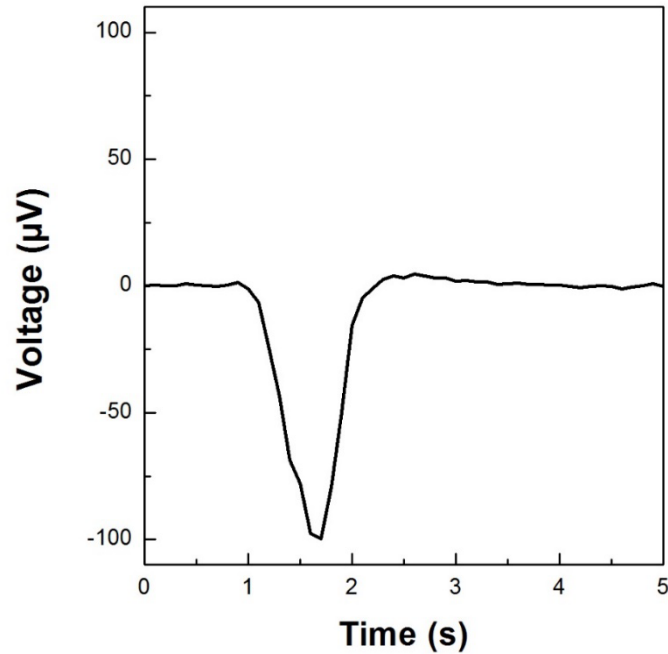


그림 4. 16 Case 1에 대한 전압 신호 그래프

결론적으로, 정전력으로 인해 탄소나노튜브 시트 내에 존재하는 자유 전하 운반자의 이동을 유도할 수 있으며, 자유 전하 운반자의 이동으로 인해 시트 표면에서 운반자의 농도 구배가 일어나 전류가 흐르는 것을 실험적으로 증명하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 에너지 수집 소자는 자유 전하 운반자 드래그에 의해 에너지가 수집되는 현상으로 그 메커니즘을 설명할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 탄소나노튜브 시트를 기반으로 한 에너지 수집 소자에 대해 보고하였다. 표면에 전하를 가지는 대전된 물체의 이동을 통해 탄소나노튜브 시트 내에 존재하는 자유 전하 운반자의 드래그를 유도하였고, 최대 $101.36 \mu\text{V}$ 의 유도전압과 14.69 nA 의 유도전류, 단위 면적당 $2.61 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ 의 전력이 발생한다. 다양한 실험 장비를 이용해 도출한 실험 결과를 통해 에너지 수집 소자의 성능을 평가하였으며, 에너지 수집 메커니즘에 대한 이론적인 근거를 제시하였다.

본 연구는 정전력으로 구동되는 에너지 수집 소자으로써 탄소나노튜브 시트의 응용 가능성을 제시하였다. 또한 탄소나노튜브의 전기적 특이성을 이용하여 기존에 보고된 나노탄소 재료 기반의 에너지 수집소자와는 차별화된 새로운 개념의 에너지 수집 소자를 제안하였으며, 금속과 같이 다른 물질에서는 찾아볼 수 없었던 탄소나노튜브 시트의 새로운 성질에 대해 보고했다는 점에서 의의가 있다.

참고문헌

- [1] Lu, L., Xu, T., Chen, W., Lee, J. M., Luo, Z., Jung, I. H & Yu, L. (2013). The Role of N-Doped Multiwall Carbon Nanotubes in Achieving Highly Efficient Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells. *Nano letters*.
- [2] Kang, et al. "Acoustic energy harvesting using nanotube sheet flutter", *NSTI* (2012)
- [3] Kang, T. J., Fang, S., Kozlov, M. E., Haines, C. S., Li, N., Kim, Y. H. & Baughman, R. H. (2012). Electrical Power From Nanotube and Graphene Electrochemical Thermal Energy Harvesters. *Advanced Functional Materials*, 22(3), 477-489..
- [4] Hu, C. J., Lin, Y. H., Tang, C. W., Tsai, M. Y., Hsu, W. K., & Kuo, H. F. (2011). ZnO-Coated Carbon Nanotubes: Flexible Piezoelectric Generators. *Advanced Materials*, 23(26), 2941-2945.
- [5] Poncharal, P., Wang, Z. L., Ugarte, D., & de Heer, W. A. (1999). Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes. *Science*, 283(5407), 1513-1516.
- [6] Persson, B. N. J., Tartaglino, U., Tosatti, E., & Ueba, H. (2004). Electronic friction and liquid-flow-induced voltage in nanotubes. *Physical Review B*, 69(23), 235410.
- [7] Král, P., & Shapiro, M. (2001). Nanotube electron drag in flowing liquids. *Physical review letters*, 86(1), 131-134.
- [8] Lee, S. H., Jung, Y., Kim, S., & Han, C. S. (2013). Flow-induced voltage generation in non-ionic liquids over monolayer graphene. *Applied Physics Letters*, 102, 063116.
- [9] Huang, W., Wang, G., Gao, F., Qiao, Z., Wang, G., Tao, L. & Sun, L. (2014). Power generation from water flowing through three-dimensional graphene foam. *Nanoscale*.

Abstract

A various researches about energy harvesting system have been conducted due to the global energy crisis. Above all, researches on energy harvesting using nano materials for self-powered nano/microsystems are being actively carried out.

In the present study, we have developed a simple energy harvesting system by utilizing super aligned carbon nanotube(CNT) sheet. A layer of CNT sheet is suspended by a pair of metal wire electrodes. We used Teflon rod which has greatest tendency of gathering electrons on its surface. When the Teflon rubbed by wool which is one of the materials that have tendency of gathering holes, then Teflon becomes negatively charged. When the negatively charged object sweeps over the surface of CNT sheet, electrostatic force fluctuates Coulombic field of CNT sheet. So, free charge carriers in CNTs are attracted by electrostatic force. This mechanical movement makes current flow, therefore CNT sheet acts as current source.

The induced voltage proportionately increases depending on the rotary speed of rod, and inversely proportional to the distance between charged object and CNT sheet. By observing this experimental results, we confirmed that CNT sheet is a current source, and driving force of this system is electrostatic force. This phenomenon appears only in CNT sheet, not in heterogeneous materials like metals. Interesting and valuable facts of CNT sheet is revealed by this research.

This system shows that the mechanical movement of charged objects can be effectively converted into electrical energy. In this paper, we suggest new concept energy harvesting device using electrostatic force, and it has significance in new possibility of CNT sheet for energy harvesting research areas.

Key words : Carbon nanotube(CNT), CNT sheet, Free charge carrier drag,
Energy harvesting, Electrostatic force

Student number : 2012-20675