

CNT/PDMS 압저항 센서의 M자 이상전도도에 관한 연구

오현우*, 백승원°, 권주역*

A Study on M-pattern Abnormal Conductivity of CNT/PDMS Piezoresistance Sensor

Hyun-Woo Oh*, Seung-Won Baek°, Joo-Yeok Kwon*

요약

본 논문은 탄소나노튜브와 PDMS 복합체를 혼합하여 피에조 저항 센서를 벌크 타입으로 제작하고 압력을 가할 때 전도도 특성이 M자 패턴을 보이며 비정상적인 M자 패턴을 분석한다. 벌크 타입의 피에조 저항 센서에 압력을 가할 때 센서 내부에서 변화되는 전도도의 특성을 분석하기 위해서는 3차원의 퍼콜레이션 네트워크를 통해 분석한다. 압력이 가해짐에 따른 M자 패턴과 같은 비정상적인 전도도 특성은 두 가지의 원인으로 인해 나타난다고 볼 수 있다. 첫째, 벌크 타입 센서에 압력이 가해지면 기존에 퍼콜레이션을 형성하고 있는 인접한 CNT-CNT 간의 거리가 멀어지면서 손실되는 경우이다. 둘째는 압력이 점점 가해짐에 따라 벌크 타입 센서는 배부름 현상을 겪게 되고 이로 인해 퍼콜레이션 네트워크를 형성하고 있던 CNT간의 거리가 멀어져 전도도가 비정상적인 변화를 보이게 된다. 본 논문에서는 CNT의 고른 분산과 선형을 통해 비정상적인 전도도 M자 패턴을 감소시키는 방법을 제안한다.

Key Words : Bulk Type, M-Pattern, Piezoresistive Sensor, Soft Sensor, Conductivity

ABSTRACT

In this paper, we try to analyze the abnormal conductivity phenomenon of the M pattern of the bulk type CNT/PDMS piezoresistance sensor. In order to analyze this pattern, the flow of conductivity inside the piezoresistive sensor is investigated through the 3D percolation network. The abnormal variation of conductivity is explained by two phenomenon. When pressure is applied to the sensor, (1) CNT deformation occurs due to the distance of the CNT-CNT approaching. (2) As the distance between CNT-CNT due to bulging becomes distant, the tunneling breaks. We also propose a method to vertically aligning CNTs to prevent M-shaped pattern.

I. 서론

4차 산업에 들어서면서 센서라이제이션이라는 말이 나올 정도로 모든 분야에서 센서의 사용이 증가하

고 있고 이에 따라 센서 기술이 급속히 발전하고 있으며, 그 중요도 또한 증가하고 있다. 차세대 스마트 센서는 온도센서, 바이오센서, 위치 센서, 압력센서 등 다양한 분야에 걸쳐서 사용되고 있고 압력 센서의 경

※ 본 연구는 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임. (2017-0-00052, “휴먼 감각 감지 및 진단을 위한 초감각 스마트 물리센서 원천 기술/하이브리드 복합체 로드셀 소프트센서 원천기술”)

• First Author : (ORCID:000-0002-4887-2356)Hyper-connected Basic Technology Research Division, hyunwoo@etri.re.kr, 정회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-8337-6091)Hyper-connected Basic Technology Research Division, bsw30850@etri.re.kr, 학생회원

* (ORCID:0000-0002-0430-957X)Hyper-connected Basic Technology Research Division, kgy30849@etri.re.kr, 학생회원

논문번호 : 201806-C-042-SE, Received May 25, 2018; Revised September 19, 2018; Accepted September 26, 2018

우 한 가지의 센서가 아닌 축전 용량 압력 센서, 광학 압력 센서, 압전 센서, 압저항 센서 등 여러 가지의 기능별 센서로 활용된다. 그중에서도 압력을 가할 때 전도도가 변하는 압저항 센서는 많은 분야에서 이용하고 있다¹⁻³⁾.

압저항 센서가 여러 분야에서 사용됨에 따라 그 기능과 기술이 고도로 발달하고 있다. 특히 탄소나노튜브(CNT: Carbon Nano Tube)의 발견 이후 CNT의 뛰어난 물성을 이용한 많은 센서들을 연구하고 있고, 간단한 공정을 통해 성형성이 쉬운 고분자를 기저 재료로 사용하여 CNT-고분자 복합체 압저항 센서의 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁾. 하지만 압력이 증가할수록 전도도가 증가하는 Thin Type 센서⁵⁾와는 다르게 Bulky Type 센서의 경우 전도도가 압력을 가할수록 증가했다가 일정 압력이상으로 올라가면 감소하고 다시 압력을 낮추면 증가했다가 일정 압력 이하로 가해주면 감소하는 M자형 전도도 패턴이 발견된다.

압저항 센서에 있어서 전도도는 중요한 역할을 하고 있고 활발히 연구되고 있는 Thin Type 압저항 센서와는 다르게 Bulky Type의 압저항 센서는 거의 연구가 되고 있지 않으며, 모든 분야에 있어서 센서를 적용하려면 Thin Type 센서 뿐만 아니라 Bulk Type 센서에 대한 기계적 및 전기적 특성 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Bulky Type CNT-고분자 복합체 압저항 센서의 M자 전도도 패턴을 보이고 전도도가 일정 압력 이상에서 비례하지 않는 이유를 비교 분석한다.

II. 실험방법 및 Modeling

기존 압저항 센서에 관한 연구는 Thin Type 압저항 센서의 연구에 편중되어 있고⁵⁾ 압력에 따른 내부 변화를 고려하고 있지 않으며 압력에 따른 전도도가 정비례하는 결론만을 제시하고 있다. 본 논문에서 다루고 있는 이슈는 Bulky Type 압저항 센서가 보이는 M자 패턴의 이상 전도도에 관한 것으로써, 이상 패턴에 대한 이슈와 새로운 모델을 제시하려 한다⁶⁻⁷⁾.

2.1 샘플 제작

본 논문에서 사용된 CNT는 Thermal Chemical Vapor Deposition (TCVD) 방법으로 합성된 다중벽 탄소나노튜브(MR99, 카본나노텍)로 순도는 95% 이상이며 직경은 50~300nm, 길이는 10~30μm이다. 기저 재료로 사용하는 중합체 고분자는 Polydimethylsiloxane (PDMS, Sylgard184, Dow-coming Co.)이다. 샘플

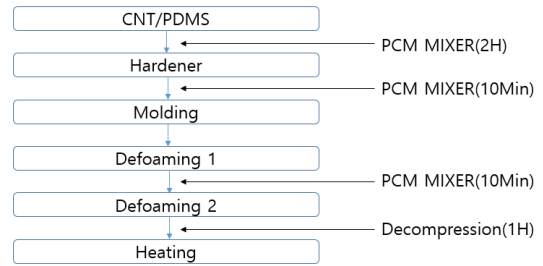


그림 1. 샘플 제조 방법
Fig. 1. Method of manufacturing sample

제조 방법은 그림 1에 나타나 있다.

먼저 CNT와 PDMS를 CNT 기준 0.3, 0.4, 0.5, 0.6wt%에 맞추어 준비한다. 이 둘을 세라믹 볼과 함께 원심분리기 PCM(Planetary Centrifugal Mixer)에 넣어 2시간 동안 교반을 시킨 후 PDMS경화제(Sylgard 184 B, Dow-coming Co.)를 넣어 주고 다시 원심분리기 PCM에서 10분 동안 추가 교반 시켜준다.

혼합된 복합체는 2.5×3cm 원통형 몰드(mold)에 넣고 원심분리기 PCM에서 기포 제거를 1차적으로 시켜준 후 데시케이터에서 다시 1시간 동안 기포 제거를 시켜준다. 그 후 70℃의 온열 건조기에서 1시간 동안 경화시켜준다. 그림 2는 모든 과정에 의해 제작된 Bulky Type 복합체의 모습이다.

완성된 복합체는 투명한 PDMS에 검은색 CNT가 전체적으로 분산되어 검은색을 띠고 있으며 PDMS 때문에 고무와 같은 특성을 지니고 있어 손으로 눌렀을 때 압축되었다가 힘을 제거하면 다시 원래의 모습으로 돌아온다. CNT 함량이 높을수록 단단해져 같은 압력으로 누를 때 0.6wt%의 복합체의 변형률이 가장 낮다.

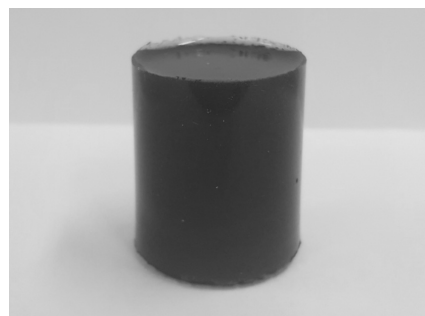


그림 2. CNT/PDMS 복합체
Fig. 2. CNT/PDMS Composite

2.2 Percolation Network Modeling

Bulky Type 센서가 보이는 M자 패턴의 이상 전도

도의 원인을 알기 위해서는 CNT/PDMS 복합체 내부에서 어떻게 전도도가 흐르는지에 대해 알아야 한다. 그림 3(a)는 CNT/PDMS 복합체 내부에 CNT의 배열을 그 위치와 방향 그리고 길이가 Uniform 분포를 따르며 무작위로 배치되는 것을 나타낸 것이다.

기존 연구의 경우 $L_x \times L_y \times L_z$ 안의 CNT는 무작위 분포와 직선임을 가정하고 전도도를 계산하기 위해서는 그림 3(b)와 같이 모든 CNT를 위치, 방향, 길이 관점에서 무작위 분포를 따르는 퍼콜레이션 네트워크(Percolation network)를 구하는 좌표 모델로 나타내야 한다⁸⁾. 그림 3(b)의 CNT를 i 번째 CNT라고 하였을 때, CNT는 길이 l_i 와 Z축과의 각도 θ_i 와 X축과의 각도 ϕ_i 를 통해 나타내며 시작점 (X_1, Y_1, Z_1) 은 $L_x \times L_y \times L_z$ 의 각각의 길이에 무작위 위치에서 시작된다. X_1 의 경우 $X_1 = L_x \times Random$ 과 같이 표현되며 Random은 0에서 1사이의 수이다. Y_1, Z_1 역시 같은 방법으로 표현된다.

θ_i 와 ϕ_i 역시 각각 $\cos^{-1}(2 \times Random - 1)$ 와

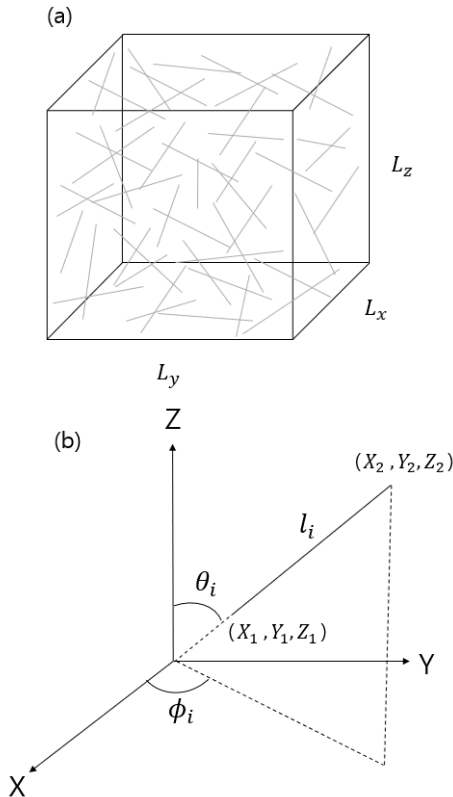


그림 3. CNT 배열
Fig. 3. CNT Alignment

$2\pi \times Random$ 으로 표현 가능하다. l_i 는 와이블 분포(Weibull Distribution)를 통해 나타내며 수식 (1)과 같다.

$$l_i = F^{-1}(Random) \quad (1)$$

수식 (1)에서 $F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$ $x \geq 0$ 는 다음과 같이 나타낸다. a 는 표준편차 b 는 형상모수를 나타낸다. (X_2, Y_2, Z_2) 는 (X_1, Y_1, Z_1) 으로부터 거리가 l_i 만큼, 각도는 θ_i, ϕ_i 만큼 떨어진 점이기에 때문에 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$\begin{aligned} X_2 &= X_1 + l_i \sin \theta_i \cos \phi_i \\ Y_2 &= Y_1 + l_i \sin \theta_i \sin \phi_i \\ Z_2 &= Z_1 + l_i \cos \theta_i \end{aligned} \quad (2)$$

이렇게 무작위로 배열된 CNT/PDMS 복합체 내에서 전도도의 이동은 다음과 같이 2가지의 영향을 받는데 (1) CNT 내부의 저항 (2) CNT 사이의 터널링 현상이다. 하지만 이 방법은 Bulky Type 압저항 센서 전도도를 구하는 방법으로 적합하지 않다. 그 이유는 그림 4는 0.3wt% CNT/PDMS 복합체 센서의 내부 SEM 이미지를 나타낸 것으로 실제 CNT는 직선이 아닌 다양한 형태로 존재하기 때문에 기존의 연구에서 배열되어 있는 CNT에서는 직선임을 가정하므로 CNT의 변형이 일어난 것으로 계산이 되기 때문에 계산 모델 복합체 내부의 저항은 실제 복합체 내부보다 크게 계산 될 것이다.

또한 Bulk Type 압저항 센서는 압력을 가하면 옆으로 부푸는 그림 5와 같은 벌지(Bulging) 현상이 Thin Type 압저항 센서보다 심하기 때문에 압력에 따

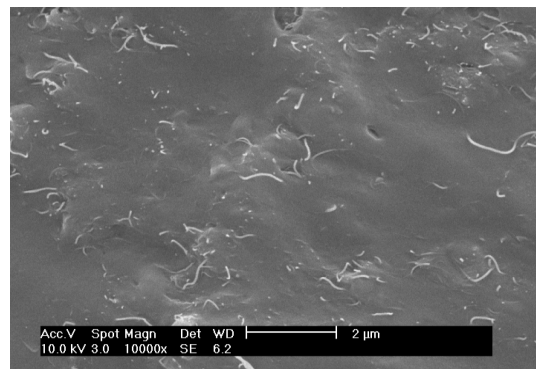


그림 4. CNT 0.3wt% 센서 SEM 이미지
Fig. 4. SEM image CNT 0.3wt% sensor

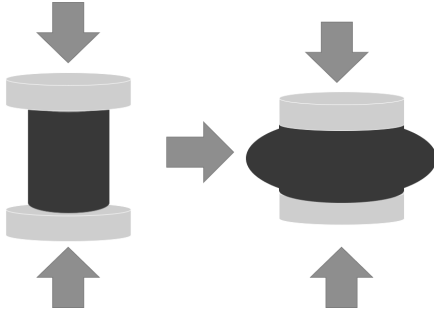


그림 5. 벌지 현상
Fig. 5. Bulging phenomenon

큰 CNT간의 거리 대한 모델링이 추가적으로 필요하다. 따라서 본 논문은 간단한 모델링을 통해서 CNT/PDMS 복합체 내부의 전도도를 살펴보고자 한다.

전도도는 두 가지에 의해서만 변하기 때문에 $R = R_{cnt} + R_{tunnel}$ 라고 할 수 있다. Bulky Type은 압력을 가해 주면 그림 6과 같이 변형될 수 있고 너무 많은 변형이 이루어지면 파괴까지 될 수 있기 때문에 R_{cnt} 저항값은 감소하지 않고 오직 증가만 할 수 있다. 터널링 현상 저항의 경우 수식 (3)과 같이 정의되며^[10], e 와 h 는 각각 전하량과 플랑크 상수를 나타낸 것이며 M 은 전도대역의 총 개수이고 Γ 는 전자 전달 확률을 나타낸 것이다. Γ 는 거리에 따라 전달 확률이 달라진다.

$$R_{tunnel} = \frac{h}{2e^2} \frac{1}{M\Gamma} \quad (3)$$

수식 (4)는 Γ 를 거리에 따른 확률을 나타낸 식으로써, m_e 는 전자의 질량, d_{vdw} 는 반데르발스 거리, d_{cutoff} 는 터널링이 가능한 최대 길이를 나타낸다. 또한, W_{cnt} , W_{poly} , W'_{cnt} 는 각각 CNT의 일함수, 고분자의 일함수, 변형된 CNT의 일함수를 나타낸 것이다. 그리고 W'_{cnt} 는 수식(5)와 같이 구할 수 있다. 수식 (5)에서 r 은 일함수의 변형된 비율이다. 변형을 ε 은

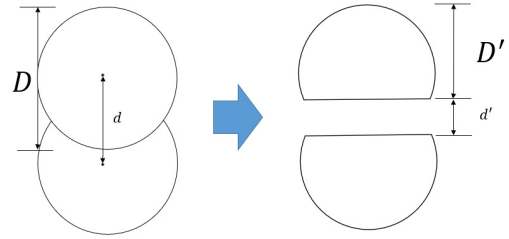


그림 6. CNT-CNT 변형
Fig. 6. CNT-CNT deformation

수식(6)과 같다. 수식 (6)에 D' 은 변형된 CNT의 지름, d 는 CNT간의 거리, d' 은 변형 후의 CNT의 거리를 나타낸다.

$$W'_{cnt} = W_{cnt} + re \quad (5)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{D'}{D} \quad D' = \frac{1}{2}(d - d' + D) \quad (6)$$

압력을 가해주면 CNT-CNT 사이의 간격은 줄어들어 터널링 현상이 쉽게 형성되기 때문에 저항값은 감소한다^[11]. 즉 CNT가 변형이 일어날 수 있는 일정 이상 압력에서는 CNT 변형에 의해 내부 저항은 증가하지만 터널링에 의해 저항은 감소한다. 기존 연구로부터 복합체 내의 CNT는 터널링에 의한 저항보다 변형에 의한 저항이 큰 영향을 받는다^[12].

III. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

압축 실험은 그림 7과 같은 실험 환경에서 600N까지 힘을 가했으며 센서 측정값은 아두이노(Arduino) 보드를 통해 출력값을 받아들이며 랩뷰(Labview)로 나타내었다. Bulky Type 센서의 초기 저항값에 따라 R_2 값은 수 $K\Omega \sim$ 수 $M\Omega$ 을 사용해서 측정을 한다. 그림 8은 압저항 센서에 대해 가해지는 힘에 따른

$$\Gamma = \begin{cases} \exp\left(\frac{-d}{h/\sqrt{8m_e W'_{cnt}}}\right) & 0 < d \leq D + d_{vdw} \\ \exp\left(\frac{-(d-D)}{h/\sqrt{8m_e W'_{cnt}}}\right) & D + d_{vdw} < d \leq D + 2d_{vdw} \\ \exp\left(\frac{-(d-D-2d_{vdw})}{h/\sqrt{8m_e (W'_{cnt} - W_{poly})}} + \frac{-2d_{vdw}}{h/\sqrt{8m_e W'_{cnt}}}\right) & D + 2d_{vdw} < d \leq d_{cutoff} \end{cases} \quad (4)$$

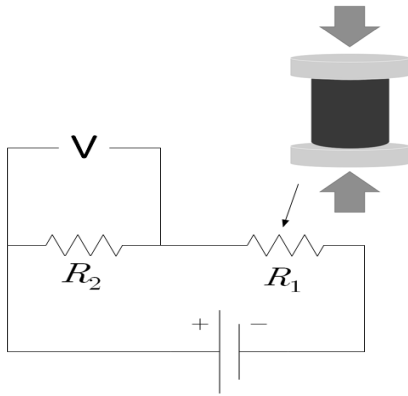


그림 7. 압축 실험
Fig. 7. Compression experiment

ADC(mV) 전압 값을 나타낸다. CNT의 양이 상대적으로 많은 0.6 wt%에서 가장 높은 전도도를 보였고 상대적으로 적은 0.3 wt%에서 가장 낮은 전도도를 보였다. 모든 샘플에서 ADC값이 증가했다가 일정 압력 이상 증가하면 감소하고 다시 증가하는 M자 패턴을 보이고 있다.

CNT/PDMS 복합체는 탄성이 있는 센서 샘플로 제작이 된다. 탄성이 있다는 것은 압축이 될 때에는 반발력이 있기 때문에 서서히 압축이 되는 반면 릴리즈가 될 때에는 압축시보다 빠르게 복원이 되는 특성이 있다. 따라서, 릴리즈 시에 wt%별 샘플들의 ADC 감소가 빠르게 떨어지게 되고 감소폭이 비슷하게 나타난다. 이는 상용 박막 센서에서 압력이 증가할수록 ADC값이 증가하는 압저항 센서의 전도도 패턴과 부합하지 않는다. 그림 9는 0.3 wt%로 제조된 동일한 센서 샘플을 이용하여 동일한 압력을 가할 때 두 가지의 실험을 하였다. 첫째, 기존 실험 방법과 동일하게 센서 샘플이 벌지(Bulge)되도록 하고 ADC 값의 변화

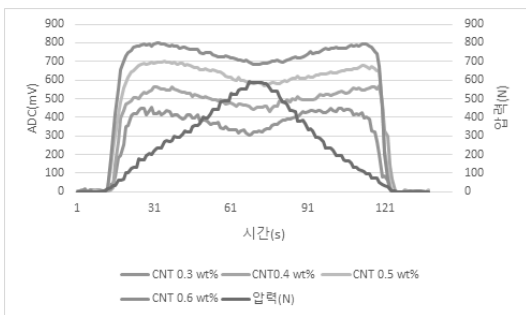


그림 8. 측정 결과
Fig. 8. Result of measurement

를 측정하였고, 두 번째 방법은 플라스틱 원통에 샘플을 넣고 벌지 현상이 없도록 하고 동일한 압력을 가했을 때 ADC 값의 변화를 측정하였다.

벌지 현상이 일어나도록 측정할 때에는 200N까지는 벌지가 되지 않는 안정적인 ADC 값이 출력된다. 하지만 200N이상 400N 또는 600N의 힘을 가할 때에는 벌지 현상에 의해 ADC 값이 M자 패턴을 보인다. 반면, 벌지 현상이 없도록 원통에 샘플을 넣고 측정을 하게 되면 600N의 힘이 가해질 때에도 M자 패턴이 발생되지 않는다. 이로써 M자 패턴은 200N이상의 힘이 가해질 때 벌지 현상에 의해 나타나는 전도도임을 알 수 있다.

3.2 결과분석

초기 약 200N까지 전도도가 급격히 증가하는 현상은 CNT-CNT간의 거리가 가까워져 증가한다. 앞의 이론에서 보았던 것과 같이 CNT가 가까워질수록 터널링이 일어날 확률이 증가하기 때문에 결과적으로 터널링으로 생기는 저항은 감소한다. 이는 압저항 센서가 작동하는 원리에 부합한다. 하지만 일정 압력 이상 힘이 가해지면 증가해야할 전도도가 감소하는 원인은 두 가지이다. 첫째, 거리가 가까워져 터널링 현상이 잘 일어나지만 반데르발스 거리보다 가까워지기 시작하면 CNT는 변형이 되고 변형에 따른 CNT의 내부 저항이 증가함에 따라 전도도가 감소하는 것이다.

또 다른 원인은 Bulky Type의 압저항 센서에 압력을 가해주면 벌지(Bulge)현상에 따라 그림 10과 같이 CNT의 거리가 점점 더 멀어지다 터널링 최대 거리인 d_{cutoff} 이상의 거리가 되면 네트워크가 끊어진다. 압력을 다시 감소시킬 때 전도도가 증가하는 현상은 압력을 증가시킬 때 전도도가 감소하는 것의 역순이다. 변형되었던 CNT들이 다시 원래의 형태로 되돌아가고 벌지 현상 역시 줄어들기 때문에 터널링에 의한 전도도가 증가하고 일정 압력보다 압력이 줄어들면 CNT-CNT의 거리가 증가하기 때문에 터널링 현상이

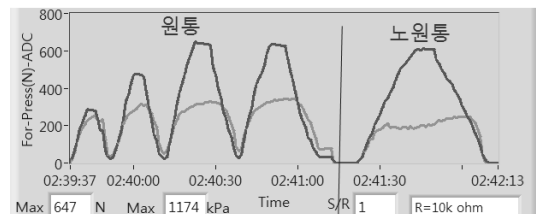


그림 9. 벌지와 벌지 없이 측정 결과 비교
Fig. 9. Comparison of with bulging and without bulging measurement

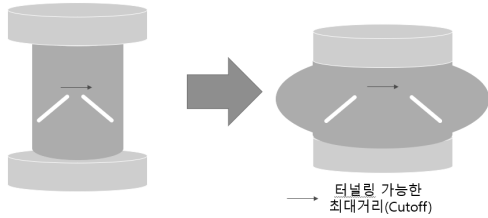


그림 10. 벌지 현상 내의 d_{Cutoff} 거리 변화
 Fig. 10. d_{Cutoff} distance variation in bulging phenomenon

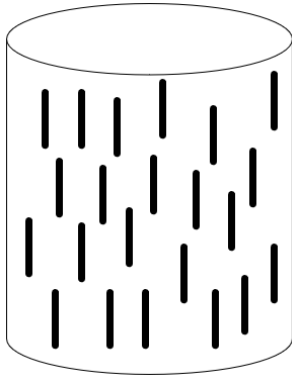


그림 11. 이상적인 복합체 내의 CNT 배열
 Fig. 11. Ideal CNT Alignment of CNT composite

적어져 전도도가 감소하게 된다.

벌지 현상을 설명하는 그림 10의 모델은 CNT-CNT간 터널링을 단순화한 모델이다. 실제 CNT/PDMS 복합체는 그림 4의 SEM 사진에서처럼 랜덤 네트워크를 형성하는 무수히 많은 CNT들로 구성된다.

이들 CNT들 중에 전도성을 띄기 위해서는 CNT가 완전히 붙어 있거나 또는 터널링이 가능한 수준의 거리만큼 떨어져 있어야 한다. 그런데 압축 실험에 있어서 관심이 있는 것은 터널링이 가능한 수준만큼 떨어져 있던 CNT-CNT가 압력이 가해짐에 따라 벌지 현상이 발생되고 벌지 현상에 의해 CNT-CNT간 거리가 터널링이 불가능한 거리가 되는 상황에 관심이 있는 것이다. 따라서, 그림 10의 모델은 대표적인 CNT-CNT 터널링이 가능한 모델에서 벌지 현상에 의해 CNT-CNT간 거리가 멀어져 M자 패턴이 나온다는 것을 설명하는 것이다.

IV. 결론 및 향후 연구 내용

본 논문은 간단한 공정을 거쳐서 만든 Bulky Type CNT/PDMS 복합체의 이상 전도도에 대해 고찰한다.

M자 패턴 전도도의 원인은 압력에 따른 CNT의 변형에 의한 저항 변화와 복합체의 벌지 현상을 통한 CNT-CNT 사이의 거리가 멀어져 네트워크가 끊겨 전도도에 변화가 생기는 것에 있다.

이를 해결하기 위해 앞으로의 연구는 그림 11과 같이 복합체 내부의 CNT들이 한 방향으로 배열되어 압력을 계속 가해도 CNT의 변형이 최소화 하면서 CNT의 거리는 점점 더 가까워지는 복합체 센서를 개발해야 한다. 이러한 배열을 위해 기존 CNT의 응집을 막는 분산 기술에서 CNT를 한 방향으로 정렬시킬 수 있는 배열 기술을 접목한 새로운 분산 기술이 필요하다. 또한 기존의 퍼콜레이션 네트워크(percolation network) 모델링에서 벌지 현상에 따른 CNT-CNT 간의 거리 변화를 추가하여서 Bulky Type의 새로운 모델링을 연구해야 한다.

Reference

- [1] R. J. Tak, "Characteristics analysis and fabrication of integrated piezoresistive temperature & humidity sensors," *J. KIISR*, vol. 19, no. 2, pp. 31-36, 2014.
- [2] Y.-H. Jeon and H. C. Kim, "Design and fabrication of 2mm×2mm sized piezoresistive accelerometers," *J. IEIE*, vol. 52, no. 2, pp. 83-88, 2015.
- [3] S. Oh and D. Park, "Vehicular sensor applications of piezoelectric and piezoresistive materials," *Auto J.*, vol. 38, no. 5, pp. 30-33, 2016.
- [4] Z. Wang and X. Ye, "A numerical investigation on piezoresistive behaviour of carb on nanotube/polymer composites: Mechanism and optimizing principle," *Nano Technol.*, vol. 24, no. 26, art. no. 265704, 2013.
- [5] J. Park, Y. Lee, J. Hong, M. Ha, Y.-D. Jung, H. Lim, S. Y. Kim, and H. Ko, "Giant tunneling piezoresistance of composite elastomers with inter locked microdome arrays for ultrasensitive and multimodal electronic skins," *ACS Nano*, vol. 8, no. 5, pp. 4689-4697, 2014.
- [6] H.-M. So, J. W. Sim, J. Kwon, J. Yun, S. Baik, and W. S. Chang, "Carbon nanotube

based pressure sensor for flexible electronics,” *Materials Res. Bulletin*, vol. 48, no. 12, pp. 5036-5039, Dec. 2013.

- [7] H. Liu, W. Huang, J. Gao, K. Dai, G. Zheng, C. Liu, C. Shen, X. Yan, J. Guo, and Z. Guo, “Piezoresistive behavior of porous carbon nanotube - thermo plastic polyurethane conductive nanocomposites with ultrahigh compressibility,” *Applied Phys. Lett.*, vol. 108, no. 1, art. no. 011904, 2016.
- [8] N. H. Alamusi, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu, and J. Li, “Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites,” *Sensors*, vol. 11, no. 11, pp. 10691-10723. 2016.
- [9] W. S. Bao, S. A. Meguid, Z. H. Zhu, Y. Pan, and G. J. Weng, “Effect of carbon nanotube geometry upon tunneling assisted electrical network in nanocomposites,” *J. Applied Phys.*, vol. 113, no. 23, art. no. 234313, 2013.
- [10] N. Hu, Y. Karube, C. Yan, Z. Masuda, and H. Fukunaga, “Tunneling effect in a polymer/carbon nanotube nanocomposite strain sensor,” *Acta Materialia*, vol. 56, no. 13, pp. 2929-2936, Aug. 2008.
- [11] W. S. Bao, S. A. Meguid, Z. H. Zhu, and M. J. Meguid, “Modeling electrical conductivities of nanocomposites with aligned carbon nanotubes,” *Nanotechnology*, vol. 22, no. 48, art. no. 485704, 2011.
- [12] S. Gong, Z. H. Zhu, and E. I. Haddad, “Modeling electrical conductivity of nanocomposites by considering carbon nanotube deformation at nanotube junctions,” *J. Applied Phys.*, vol. 114, no. 7, art. no. 074303, 2013.

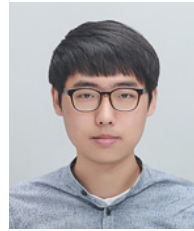
오 현 우 (Hyun-Woo Oh)



1999년 2월 : 아주대학교 정보통신공학부 학사
 2001년 2월 : 아주대학교 정보통신대학원 컴퓨터공학과 석사
 2012년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사
 2001년 1월~현재 : 한국전자통신연구원 초연결원천연구본부 책임연구원, Project Leader

<관심분야> 소프트웨어, 웨어러블 스마트디바이스, 상황인지 플랫폼, 실감미디어 서비스 플랫폼, Giga Korea 서비스 플랫폼, 홈네트워크 시스템

백 승 원 (Seung-Won Back)



2013년 3월~현재 : 전북대학교 신소재공학부 학사과정
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

권 주 역 (Joo-Yeok Kwon)



2018년 8월 : 한양대학교 자원환경공학과 학사
 2018년 9월~현재 : 한양대학교 자원환경공학과 석사과정
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 재료공학