



# 압력 센서용 탄소 나노 튜브 폴리머 복합체의 필러 함량과 종횡비에 따른 압저항 특성

유종찬<sup>†</sup> · 김동영<sup>†</sup> · 이동관 · 남건우 · 박성훈\*

승실대학교 기계공학과

## Piezoresistive Characteristics of Carbon Nanotube Polymer Composites with Different Filler Content and Aspect Ratio for Pressure Sensors

Jongchan Yoo<sup>†</sup>, Dong-Young Kim<sup>†</sup>, Dong-Kwan Lee, Kunwoo Nam, and Sung-Hoon Park\*

Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Republic of Korea.

**Abstract:** Polymer composites enriched with conductive fillers hold immense potential for flexible pressure sensors, because of the remarkable piezoresistive effect they possess. Research on polymer composite pressure sensors has been actively ongoing because of their flexibility and high electrical resistance performance. This paper presents a comprehensive comparison of the piezoresistive characteristics of conductive composites for pressure sensors, focusing on the influence of carbon nanotube (CNT) content and aspect ratio. Polymer composites with conductive fillers, specifically CNTs, have demonstrated significant potential for pressure sensing applications based on the piezoresistive effect. By systematically varying the CNT concentration and aspect ratio, we investigated the impact of these parameters on the piezoresistive behavior of the composites. A pressure in the range of 0-200 kPa was applied to the conductive composite, and resistance change due to pressing was measured. The best performing samples were evaluated in 150 cycle tests to verify repeatability and durability. Experimental analysis and characterization revealed the intricate relationship between CNT content, aspect ratio, and the resulting piezoresistive properties. Through this study, we aim to enhance understanding of how CNT concentration and aspect ratio influence the performance of CNT/PDMS composites as pressure sensors, thereby facilitating the development of optimized sensing materials for various pressure sensing applications.

(Received 8 June, 2023; Accepted 5 July, 2023)

**Keywords:** carbon nanotube, piezoresistive, aspect ratio, content, polymer composite

### 1. 서 론

최근에 압력센서는 운동 감지[1-3], 건강 모니터링[4, 5] 및 촉각 감지 피부[6]와 같은 유망한 응용 분야에서 큰 관심을 받았다. 이러한 이유로 착용 가능하고 유연한 압력 센서에 대한 수요가 증가하고 있다. 따라서, 기존 금속 센서의 대안으로 전도성 고분자 복합체로 만든 유연한 압력 센서에 대한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다[7-9].

또한 탄소 나노 재료가 복합체 제작에서 전도성 필러로 많이 사용되고 있다[10].

전도성 고분자 복합체 연구에서 감지 원리에 따라 압력 센서를 압전 효과(piezoelectric effect)[11, 12], 커패시터 효과[13, 14] 및 압저항 효과(piezoresistive effect)[15, 16] 등으로 구분된다. 그 중에서 압저항 효과를 기반으로 한 복합체 압력 센서는 제조가 용이하고 감도가 높기 때문에 일반적으로 사용되고 있다[17]. 압저항 효과는 기계적 변형을 받을 때 전기 저항의 변화로 정의된다. 충전제의 형태, 농도 및 분산이 복합체 압력 센서의 전기적 특성에 큰 영향을 미친다[18, 19].

탄소 나노튜브(CNT)는 높은 종횡비와 나노 단위의 치수를 가진 원통형 탄소 구조물로, 우수한 기계적 특성과 전

<sup>†</sup>These authors contributed equally to this work

- 김동영, 이동관: 석사과정, 유종찬, 남건우: 연구원, 박성훈: 교수

\*Corresponding Author: Sung-Hoon Park

[Tel: +82-2-820-7021, E-mail: leopark@ssu.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

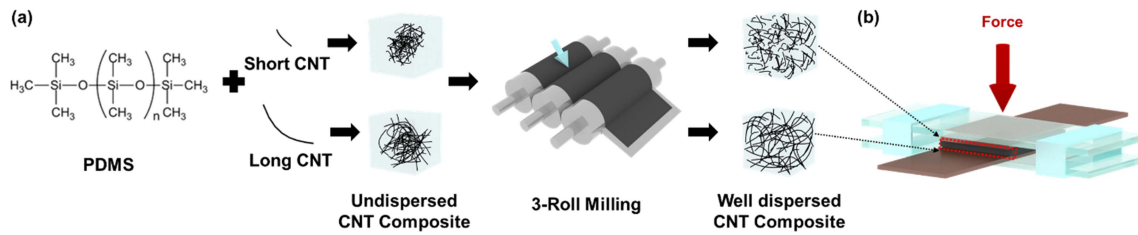


Fig. 1. Scheme of (a) fabrication process using 3-roll-milling of CNT/PDMS composite, (b) pressure experimental setup

기계적 특성을 통해 유망한 탄소 나노 재료이다[20]. CNT를 보강재로 사용하여 복합체를 만들게 되면, 모재의 기계적 강도와 강성을 향상시킬 수 있어서 압력 센서뿐만 아니라 항공우주[21], 자동차[22] 및 전자 산업[23]과 같은 다양한 분야에서 큰 관심을 받고 있다. 하지만, CNT 기반 복합체의 압축력에 대한 성질은 여전히 불분명하며, 이에 대한 연구는 이러한 재료의 설계 및 최적화에 있어서 중요한 역할을 한다.

CNT를 포함한 복합체에서의 압축 특성은 다른 재료와 차이가 있는 독특한 특징을 보인다. CNT는 높은 인장 강도와 강성을 가진 탁월한 내재적 기계적 특성을 가지고 있지만, 압축력에 대한 반응은 더 복잡하다. CNT가 압축을 받게 되면 길이 방향으로 구부러지거나 변형되고 기계적 거동의 변화가 일어나게 된다[24]. 압축에 의해 발생하는 현상은 복합체의 전체적인 전기적 특성에 큰 영향을 미치게 된다[25]. 이러한 특성으로 복합체는 압력에 따라 전기적 특성이 변화하고, 압력을 감지하는 센서로 이용될 수 있다.

본 논문에서는 CNT 복합체에서 CNT의 길이에 따른 압축 경향성에 대한 포괄적인 분석을 제시한다. CNT는 모두 다중벽 탄소나노튜브가 사용되었으며, 중형비에 따라 L-CNT(Low aspect ratio- CNT), M-CNT(Medium aspect ratio-CNT), 그리고 H-CNT(High aspect ratio-CNT)로 명명하였다. CNT를 분산시키기 위한 방법으로 3롤 밀링(3-roll-milling) 방법[26]이 사용되었으며, 균일하게 분산되었음을 주사 전자 현미경을 통해 확인하였다. CNT의 단일 가닥의 길이 비교와 분산 정도는 주사전자현미경 이미지를 통해 제시하였고, CNT의 길이와 함량에 따른 압축 경향을 보여주는 압축 실험을 진행하였다. 마지막으로 반복 실험의 비교와 압축 과정의 메커니즘에 대한 탐구가 진행되었다. 이를 통해, 이 연구는 CNT의 압축 거동을 설명하고 복합체의 압력에 대한 전기적 특성의 변화를 비교함으로써 다양한 산업에서 탄소 나노튜브 복합체의 잠재력을 활용하고 이해하는데 중요한 발판 역할을 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료

복합체의 기반이 되는 고분자 매트릭스는 PDMS (Polydimethylsiloxane) (Sylgard 184, Dow Corning, Midland, MI, USA)를 사용하였다. 각 L-CNT, M-CNT, 그리고 H-CNT는 한화나노텍사의 CM-95, CM-130, 그리고 CM-250을 사용하였다. 평균 직경은 각각 10-15 nm, 10-15 nm, 그리고 12-18 nm이다.

### 2.2 CNT/PDMS 복합체의 제작 과정

CNT/PDMS 복합체를 제작하기 앞서 매트릭스 속의 전도성 필러를 분산시킬 필요가 있다. PDMS의 프리폴리머(파트 A)와 경화제(파트 B)를 10:1의 중량비로 혼합한 후, 나노 필러를 첨가한다. 이후, 대화사의 페이스트 믹서에 넣고 500 rpm에서 30초, 1500 rpm에서 90초의 조건에서 1차 분산을 시켜준다. 그 다음, 인텍사의 3롤 밀링 장비를 사용하여 고분자 내의 필러들을 강력한 전단력을 사용하여 고르게 분산시켜준다[27]. 그림 1(a)는 이 과정을 보여주는 간단한 개략도이며, 이로 인해 CNT의 길이도 감소함을 나타낸다[26].

분산이 완료된 복합체 페이스트를 QMESYS사의 핫-프레스 장비를 사용하여 열과 압력을 가해 경화시킨다. 150°C와 15 MPa의 조건에서 1시간동안 열과 압력을 가하며, 1 mm 두께의 평평한 필름 형태의 샘플을 얻는다. 그런 다음, 압력에 의한 저항 변화를 측정하기 위해 1.5 × 1.5 cm<sup>2</sup>의 크기로 제작하였다.

### 2.3 분산도 및 전기적, 압저항 특성 측정

제작한 CNT/PDMS 복합체 필름 내 CNT의 분산 정도를 확인하기 위해 복합체의 단면을 주사 전자 현미경(Gemini SEM 300, ZEISS)을 사용하였다. 복합체의 단면은 액체 질소를 이용하여 파단시켜 그 단면적을 촬영하였으며, 장비의 가속 전압은 5 kV로 유지되었다.

CNT의 중형비에 따라 L,M,H-CNT 3종류와 함량에 따라 1,3,5 wt.%의 9가지 다른 샘플의 저항을 측정하였다. 각 시편의 크기는  $50 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 으로 동일하며, 접촉 저항을 줄이고 전기적 특성을 정확하게 측정하기 위해 UV 에칭과 은 페이스트를 사용하였다. 처음에는 시편을 UV 오존 챔버 장비(JSE)에서 300초 동안 표면 처리되어 전극과의 접촉을 향상시켰다. 다음으로, 은 페이스트를 시편 양 끝에 전극으로 적용하였다. 전극을  $120^\circ\text{C}$ 의 조건에서 1시간 동안 경화한 후, Keithley DMM 7510 멀티미터를 사용하여 이차점 측정 방법으로 저항을 측정하였다.

압력에 의한 복합체의 압저항 경향을 측정하기 위해, 기관에 부착된 두 개의 구리 테이프를 전극으로 사용하여 그 사이에 샘플을 배치하였다. 그러나, 샘플과 전극 사이의 접촉 저항으로 인해 정확하고 순수한 압저항 효과를 보기 어렵다[28]. 이를 해결하기 위해 500 g의 무게추를 올려 기관과 기관 사이에 테이프로 밀폐하여 전극과 복합체가 확실하게 접촉하도록 하였다[24]. 압력-센싱 과정을 측정하기 위해서, 실시간 저항 측정은 Keithley DMM 장비를 이용하였으며, 동시에 로드셀이 부착된 XYZ 3D 스트레칭장비(남일광학기기)를 사용하여 압력을 가하였다. 1 mm/min의 속도 조건으로 0-200 kPa까지의 압력을 가하였다. 이렇게 가한 압력에 대한 복합체의 저항 변화를 측정하였다. 또한, 복합체의 내구성 및 반복성을 확인하기 위해 진행된 반복 실험은 1 mm/min의 속도로 0-40 kPa의 범위로 150회 사이클로 진행되었다. 그림 1(b)는 복합체의 측정을 위해 샘플 플링된 모습을 보여주는 개략도이며, 이를 통해 측정 과정에서의 샘플의 배치와 측정 방법 등을 이해할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

CNT는 그래핀이 둥글게 말린 원기둥 형태의 1차원 구조를 갖고 있다. 이 구조는 원기둥의 밑 및 윗면적에 비해 매우 긴 높이를 가지며, 중형비(길이/지름 비율)가 매우 크다는 특징을 갖는다[29, 30]. 이러한 중형비의 크기 때문에 CNT는 매우 긴 섬유 형태를 이루며, 단일 가닥을 얻기 위해서는 반데르발스 인력으로 인한 다발 형태를 깨기 위해 강한 초음파 처리[31] 혹은 강한 전단력으로 CNT들의 결합을 끊는 3 roll-milling 공법이 필요하다[26].

그림 2 (a)-(c)는 주사 전자 현미경을 이용하여 3가지의 다른 중형비를 갖는 CNT의 단일 가닥을 촬영한 이미지이다. CNT는 반데르발스 인력으로 인한 다발 형태를 갖기 때문에 단일 가닥을 얻기 위해서는 이 인력을 깨기 위한 강한 초음파를 가해주어야 한다[32]. 소량의 CNT를 50

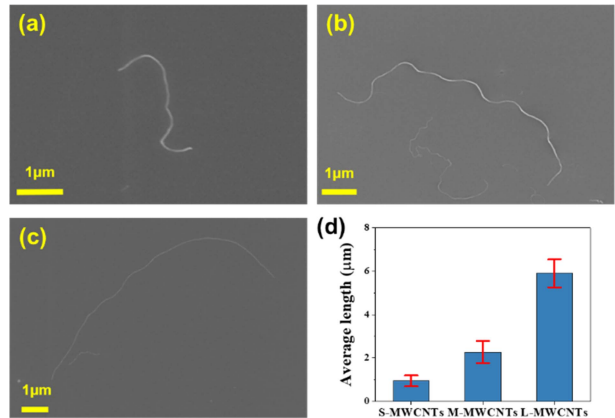


Fig. 2. SEM images showing a single strand of CNT (a) L-CNT, (b) M-CNT, (c) H-CNT and (d) the average length of all CNTs

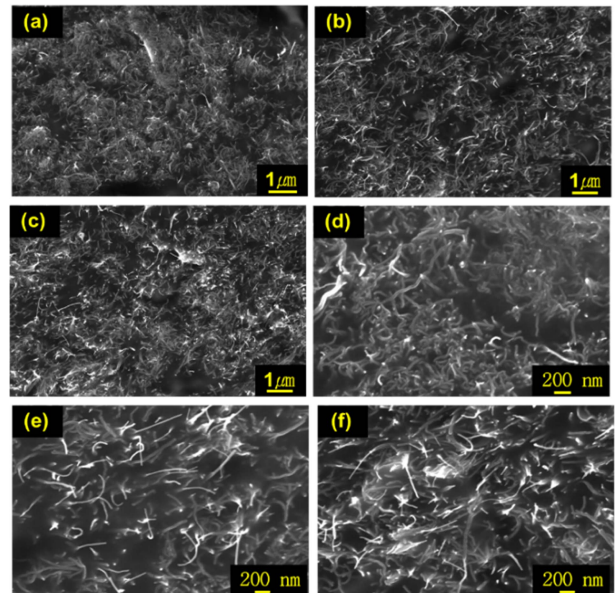


Fig. 3. SEM images: CNT/PDMS composite 5 wt.% of low magnification (a) L-CNT, (b) M-CNT, (c) H-CNT, high magnification (d) L-CNT, (e) M-CNT and (f) H-CNT

mL 클로로포름 용액에 넣고 30분간 초음파 처리를 진행하였다. 이후, 실리콘 웨이퍼의 표면에 올려놓고 1500 rpm에서 80초간 스핀 코팅 처리를 진행하였다. 스핀 코팅이 완료된 실리콘 웨이퍼를 주사 전자 현미경을 이용하여 촬영하였으며, 각 CNT의 단일 가닥의 평균 길이에 대한 분포는 그림 (d) 그래프에 나타내었다.

그림 3은 함량 5 wt.%의 CNT/PDMS 복합체의 단면적을 주사 전자 현미경으로 촬영한 사진이다. 그림 2(a)-(c)는 저배율, 그림 2(d)-(f)는 고배율을 측정된 사진이다. 이 사진을 통해 CNT가 길이와 관계없이 3롤 밀링을 통해 응

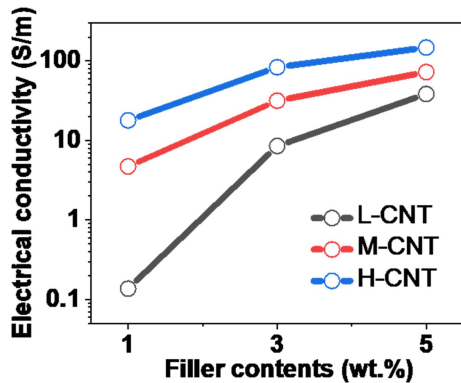


Fig. 4. Electrical conductivity data of CNT/PDMS composite

집되지 않고 고르게 분산되었음을 확인할 수 있다. 특히, 가장 높은 함량인 5 wt.%의 복합체에서 훌륭한 분산도를 보여줌으로써 낮은 함량의 1 및 3 wt.%의 복합체도 분산이 잘 되었음을 유추할 수 있다[32].

CNT의 길이와 종횡비가 커질수록 CNT 간의 접합점이 많아지며, 이는 복합체의 전기적 네트워크 형성과 관련이 있다. 특히, 압력에 의해 CNT 사이의 거리가 감소하게 되어 전도성 네트워크 형성에 유리해지므로 전기적 물성에 큰 영향을 미친다[30, 33] 압저항 효과를 관찰하기 전에, CNT/PDMS 복합체의 전기전도도를 조사하는 것이 필요하다. 그림 4는 CNT의 길이와 함량에 따른 9가지 경우에 대한 전도성 복합체의 전기전도도를 보여준다. 외력이 가해지지 않은 상태에서는 복합체의 CNT끼리 접촉이 많을수록 전기적 네트워크 형성 확률이 높아 전기전도도가 높아진다. 따라서 그림 4의 결과는 CNT의 함량이 높고 나노 필러의 길이가 길수록 전도성 네트워크 형성이 더 많이 발생한다는 것을 입증한다.

그러나 압저항 효과를 고려할 때는 조금 다른 관점이 필요하다. 외력에 의해 복합체가 압축되면 CNT 사이의 거리가 매우 짧아지며, 이로 인해 전기전도도가 상승한다[24].

이러한 경우 초기 상태와 압축된 상태에서의 전도도 및 저항 변화가 클수록 민감도가 좋다고 할 수 있으며, 상대적으로 저함량의 복합체에서 이 효과가 극대화된다. 또한, CNT의 길이가 너무 짧으면 충분히 가까워져서 접합점이 형성되지 않기 때문에 종횡비도 민감도에 대한 중요한 파라미터로 작용하게 되는데, 자세한 내용은 그림 5에서 후술하겠다.

실시간 저항 측정 실험에서는 필러의 함량과 CNT의 종횡비에 따라 CNT/PDMS 복합체에 가해지는 압력에 따른 저항의 변화를 측정하였다. 그림 5는 CNT 3종에 대해 1 wt.% (그림 5(a)), 3 wt.% (그림 5(b)), 5 wt.% (그림 5(c))의 함량의 복합체를 0-200 kPa의 압력에 대한 실시간 저항을  $R/R_0$ 로 나타낸 그래프이다. 이 때,  $R$ 은 실시간 저항을 의미하며,  $R_0$ 는 초기 저항을 의미한다.

폴리머 복합체에 압력을 가하면 저항이 감소하는 이유는 2가지로 설명할 수 있다. 첫째로, 전극과 복합체 사이의 공극이 외력에 의해 줄어들어 완벽한 접촉이 이루어지기 때문이다. 정규화 저항값은 초기 저항과 현재 저항의 상대적인 값이므로, 전극과 샘플이 완전한 접촉을 갖지 않은 상태에서 측정한 저항 변화는 압력 센서의 민감도라고 해석하기는 어렵다. 둘째로, 압저항 효과 때문이다. 압력이 일정 수준에 도달하면 전극과 복합체 사이에 완전한 접촉이 형성되며, 이후 저항 변화는 지배적인 요인은 압저항 효과가 된다. 이 상태에서의 압력을 공칭 압력이라고 한다[24].

본 연구에서는 폴리머 복합체의 압저항 효과의 경향을 보기 위함으로, 500 g의 힘을 가한 상태에서 테이프를 고정시켜 첫번째 문제를 최소화하였다. 그 후, 로드셀을 사용하여 샘플에 압력을 가하였다.

압저항 효과의 동안, 주요한 저항 변화의 원인은 전도 경로의 형성과 필러 사이의 거리가 가까워지는 것이다[34]. 이에 따라 본 연구에서 제작된 모든 폴리머 복합체는 압력에 의해 저항이 감소함을 보여준다. 먼저 함량의 관점에서, CNT의 길이와 관계없이 동일한 종류의 CNT로 제작

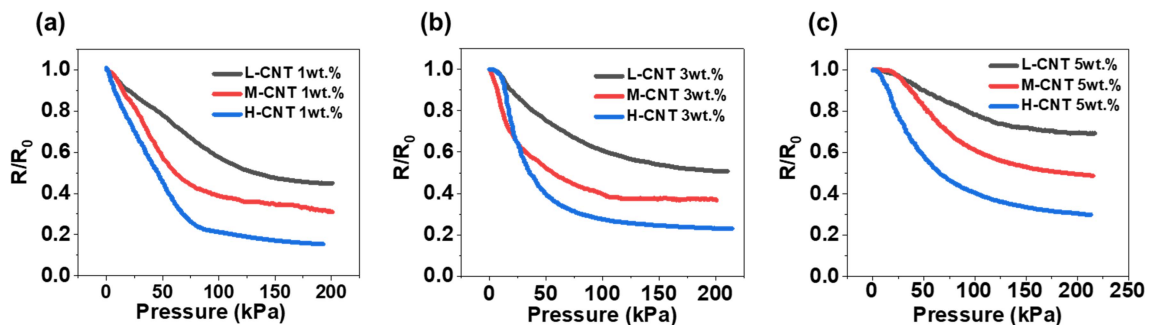
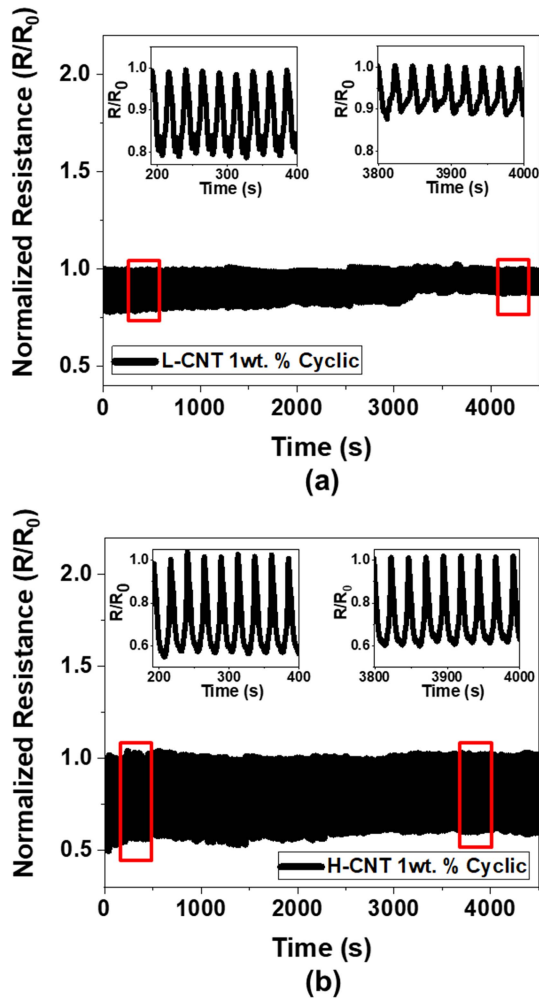


Fig. 5. Piezoresistive properties of L-CNT/PDMS, M-CNT/PDMS, H-CNT/PDMS in (a) 1wt.%, (b) 3 wt.% and (c) 5 wt.%



**Fig. 6.** Normalized resistance ( $R/R_0$ ) change under 150 cycle tests at 40 kPa (a) 1 wt.% L-CNT/PDMS and (b) 1 wt.% H-CNT/PDMS composite

된 복합체의 저항 민감도는 CNT의 함량이 적을수록 우수함을 그림 5 (a),(b),(c)의 동일한 색상 데이터를 통하여 알 수 있다(검정 : L-CNT, 빨강 : M-CNT, 파랑 : H-CNT). 이는, 함량이 적을수록 외력이 가해지기 전에는 필러들끼리 접촉할 수 있는 경우의 수가 적어 압력에 의해 새로운 접합점이 많이 발생한다는 것을 의미한다. 반면, 함량이 많을수록 초기 상태에서 필러의 접합점이 이미 많이 형성되었기 때문에, 함량이 적은 것에 비해 상대적으로 더 적은 새로운 접합점이 발생하므로 민감도는 낮아진다[24].

CNT의 종횡비의 관점에서는, CNT의 길이가 길수록 민감도가 우수하다. 그림 5 (a),(b),(c)에서 각각 H-CNT/PDMS 복합체가 가장 높은 민감도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는, 동일한 함량 조건에서 압력이 증가함에 따라 각 필러들 사이의 물리적인 거리가 짧아져 접합점의

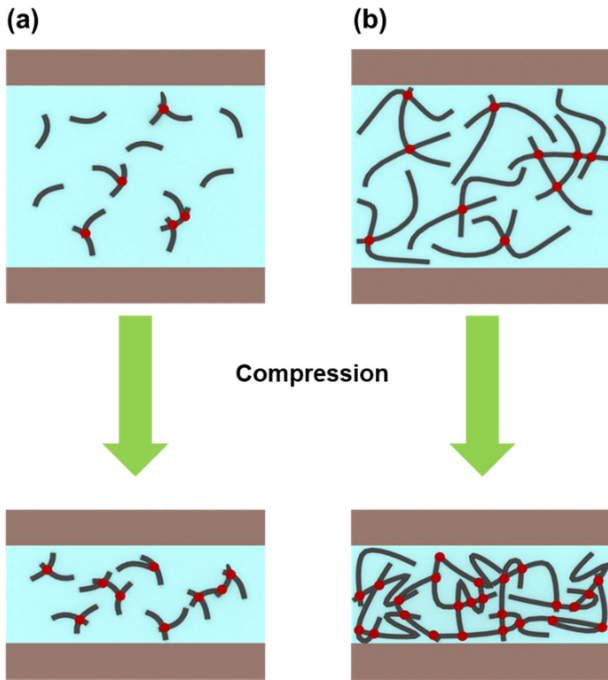
증가율이 CNT의 길이가 길수록 더 높기 때문이다. 이 연구에서 언급하는 민감도는 결국 초기 상태와 비교한 상대적인 값이므로, 초기 조건에서의 증가율이 중요하다고 할 수 있다. 또한 길이가 짧은 CNT의 경우 압력이 가해졌을 때 기존의 전기적 네트워크가 끊어질 가능성이 높다. 반면에 길이가 긴 CNT의 경우 기존의 네트워크가 끊어지더라도 높은 표면적으로 인해 다시 연결될 가능성이 높다.

반복성은 폴리머 복합체를 압력 센서로 사용될 수 있는지 확인하기 위해 주요한 요소이다[35]. 이를 확인하기 위해 동일한 힘을 반복적으로 가하고, 저항 변화율이 처음과 끝에서 비슷하게 유지되는지 확인해야 한다[36]. CNT의 길이에 따른 복합체의 반복성을 확인하기 위해 연속적인 압력 주기에서 로딩-언로딩 실험을 50회의 사이클 이후 40 kPa에서 수행하였다. 그림 6은 민감도가 가장 높은 저항량에서 가장 긴 CNT와 가장 짧은 CNT 복합체를 1 mm/min의 속도로 총 150회 반복하여 압축한 결과를 보여준다.

CNT는 압력이 가해졌을 때 높은 유연성을 보여 손상없이 휘어지고 탄성있게 돌아오는 특성이 있다. 이러한 특성으로 인해 CNT가 함유된 복합체에서 압력이 가해지면 CNT의 휘어짐 또는 이동이 발생한다. 길이가 긴 CNT가 포함된 복합체에서는 압력이 가해졌을 때 CNT의 휘어짐이 더 많이 발생하며, 안정적인 반복성을 얻게 된다. 그림 6(a)는 L-CNT/PDMS 1wt.% 복합체의 반복 실험 결과이다. 초기와 후반 구간에서의 저항 변화 구간이 다르다는 것을 알 수 있다. 눌러주는 회수가 증가할수록 저항 변화는 불안정해진다. 반면, 그림 6(b)는 H-CNT/PDMS 1wt.% 복합체의 반복 실험 결과이며, 150회의 사이클 동안 저항 변화 범위가 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.

이전 실험 결과를 기반으로, CNT/PDMS 폴리머 복합체에서 압력에 의한 저항 변화의 메커니즘을 설명하기 위한 도식을 그림 7에 표현하였다. 나노 필러의 함량에 따라 압력에 의한 필러 간 접합점 차이가 있으며, 저항량의 경우 압력이 가해지기 전에는 접합점이 많이 없고 압력에 의해 필러 간 물리적 거리가 짧아져 더 많은 접합점이 형성되어 압저항 효과가 뛰어나다[37]. 그러나, 본 논문에서는 CNT의 길이에 따라서 전기적 네트워크 형성 정도가 복합체의 내부에서 어떻게 변화하는지 설명하고자 한다. 동일한 함량의 CNT를 가진 L-CNT 및 H-CNT/PDMS 복합체는 압력을 받기 전과 후의 모습을 각각 그림 7(a)와 (b)에 나타내었으며, 빨간 점은 필러간의 접합점을 나타낸다.

먼저, 그림 7(a)는 저항량의 L-CNT/PDMS 복합체의 경우를 보여준다. 함량이 적고 필러의 길이도 짧기 때문에 초기 접합점이 적다. 외력에 의해 복합체의 두께가 줄어들



**Fig. 7.** Schematic of the adhesion mechanism of CNTs before / after pressure of (a) L-CNT/PDMS and (b) H-CNT/PDMS

면서 필러 간의 접합점이 증가한다. 그림 7(b)는 저함량의 H-CNT/PDMS 복합체의 경우로, 압력을 받기 전에 어느 정도 전기적 네트워크를 형성하지만, CNT의 길이가 길기 때문에 압력에 의해 새로운 접합점이 형성될 가능성이 크다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 중형비가 다른 CNT/PDMS 복합체의 압저항 특성에 대해 비교 분석하였다. CNT/PDMS 복합체는 3롤 밀링 공법을 사용하여 CNT를 복합체 내부에 고르게 분산시켰으며, 이를 전자 주사 현미경을 통하여 확인하였다. CNT의 길이와 함량에 따라 총 9가지 경우의 복합체의 전기전도도를 측정하였고, 길이가 길고 함량이 많을수록 전기전도도가 높아짐을 확인하였다.

그러나, 압저항 효과를 고려할 때는 폴리머 복합체의 민감도는 CNT의 중형비가 클수록 그리고 CNT의 함량이 낮을수록 좋은 것으로 나타났다. 이는 압력이 증가함에 따라 복합체 내부의 필러들 사이의 물리적 거리가 짧아져 새로운 접합점이 생성되어 민감도가 증가한다는 것을 의미한다. 이때 접합점의 증가율이 커질수록 새로운 전기적 네트워크 형성되는데, 초기 접합점이 적은 저함량이나 압력에 의해 새로운 접합점 상승률이 큰 긴 CNT가 높은 민감도를 갖

게 된다.

동일한 함량에서 CNT의 길이만 다른 복합체들의 민감도를 비교한 결과, H-CNT/PDMS가 가장 민감하였으며, CNT의 길이가 같을 때 저, 중, 고함량에서는 저함량이 가장 민감하다는 것을 확인하였다. 이러한 장점이 센서의 내구성 및 반복성과도 연관이 있음을 확인하기 위해 저함량에서 L-CNT/PDMS와 H-CNT/PDMS 복합체를 150회 반복하여 저항을 측정하였다. 반복 실험 결과, L-CNT/PDMS 복합체는 약 100회 이후에 민감도가 확연히 감소하는 것을 보였지만, H-CNT/PDMS 복합체는 150회까지 균등한 저항 변화를 나타냈다. 본 연구를 통해 비교 분석한 결과는 향후 CNT를 이용한 폴리머 형태의 압력 센서에서 나노 필러를 선정하는 데 중요한 가이드라인을 제시한다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2020년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2C1013489).

#### REFERENCES

1. K. Kim, M. Jung, S. Jeon and J. Bae, *Smart Materials and Structures* 28, 065019 (2019).
2. J. Meyer, P. Lukowicz and G. Troster, *2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, 69, IEEE,
3. G. Ge, Y. Cai, Q. Dong, Y. Zhang, J. Shao, W. Huang and X. Dong, *Nanoscale* 10, 10033 (2018).
4. Z. Lou, S. Chen, L. Wang, K. Jiang and G. Shen, *Nano Energy* 23, 7 (2016).
5. S. Sikarwar, Satyendra, S. Singh and B. C. Yadav, *Photonic Sensors* 7, 294 (2017).
6. C. G. Núñez, W. T. Navaraj, E. O. Polat and R. Dahiya, *Advanced Functional Materials* 27, 1606287 (2017).
7. J. Li, R. Bao, J. Tao, Y. Peng and C. Pan, *Journal of Materials Chemistry C* 6, 11878 (2018).
8. D. Maddipatla, B. B. Narakathu, M. M. Ali, A. A. Chlahawi and M. Z. Atashbar, *2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1-4, IEEE,
9. D.-Y. Kim and S.-H. Park, *Korean Journal of Metals and Materials* 60, 237 (2022).
10. M. Xu, Y. Gao, G. Yu, C. Lu, J. Tan and F. Xuan, *Sensors and Actuators A: Physical* 284, 260 (2018).
11. J. Chun, K. Y. Lee, C. Y. Kang, M. W. Kim, S. W. Kim and

- J. M. Baik, *Advanced Functional Materials* 24, 2038 (2014).
12. Z. Chen, Z. Wang, X. Li, Y. Lin, N. Luo, M. Long, N. Zhao and J.-B. Xu, *Acs Nano* 11, 4507 (2017).
13. B. Puers, E. Peeters, A. Van Den Bossche and W. Sansen, *Sensors and Actuators A: Physical* 21, 108 (1990).
14. M.-X. Zhou, Q.-A. Huang, M. Qin and W. Zhou, *Journal of microelectromechanical systems* 14, 1272 (2005).
15. A. V. Tran, X. Zhang and B. Zhu, *IEEE Transactions on industrial electronics* 65, 6487 (2017).
16. S.-E. Zhu, M. Krishna Ghatkesar, C. Zhang and G. Janssen, *Applied Physics Letters* 102, 161904 (2013).
17. M. Farhath and M. F. Samad, *Journal of Computational Electronics* 19, 310 (2020).
18. O.-N. Hur, J.-H. Ha and S.-H. Park, *Materials* 13, 2431 (2020).
19. H. Kim, S.-K. Hong, J.-K. Ryu and S.-H. Park, *Materials* 13, 2598 (2020).
20. S. K. Soni, B. Thomas and V. R. Kar, *Materials Today Communications* 25, 101546 (2020).
21. S. Rawal, J. Brantley and N. Karabudak, *2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 13, IEEE,
22. S. P. Subadra, S. Yousef, P. Griskevicius and V. Makarevicius, *Polymer testing* 86, 106480 (2020).
23. X. Zang, Q. Zhou, J. Chang, Y. Liu and L. Lin, *Microelectronic Engineering* 132, 192 (2015).
24. J. Yoo, D.-Y. Kim, H. Kim, O.-N. Hur and S.-H. Park, *Materials* 15, 1213 (2022).
25. A. C. Katageri and B. Sheeparamatti, *International Journal of Engineering Research and* 4, 27 (2015).
26. J.-H. Ha, S.-E. Lee and S.-H. Park, *Materials* 12, 3823 (2019).
27. S.-k. Hong, D. Kim, S. Lee, B.-W. Kim, P. Theilmann and S.-H. Park, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 77, 142 (2015).
28. R. Ramalingame, Z. Hu, C. Gerlach, D. Rajendran, T. Zubkova, R. Baumann and O. Kanoun, *Journal of Sensors and Sensor Systems* 8, 1 (2019).
29. R. Ghasempour and H. Narei, *Carbon nanotube-reinforced polymers*, pp.1-2, Elsevier, Place Published (2018).
30. J. Li, P. C. Ma, W. S. Chow, C. K. To, B. Z. Tang and J. K. Kim, *Advanced Functional Materials* 17, 3207 (2007).
31. Y. Y. Huang and E. M. Terentjev, *Polymers* 4, 275 (2012).
32. B.-H. Kang, O.-N. Hur, S.-K. Hong and S.-H. Park, *Korean Journal of Metals and Materials* 60, 694 (2022).
33. M. Menon, A. N. Andriotis, D. Srivastava, I. Ponomareva and L. A. Chernozatonskii, *Physical review letters* 91, 145501 (2003).
34. J.-S. Kim and G.-W. Kim, *Sensors* 17, 229 (2017).
35. D. S. Gunasekara, Y. He, S. Fang, L. Zhao, H. Liu and L. Liu, *Applied Physics A* 126, 789 (2020).
36. N. Lee, R. S. Goonetilleke, Y. S. Cheung and G. M. So, *Microsystem technologies* 7, 55 (2001).
37. R. Yu, T. Xia, B. Wu, J. Yuan, L. Ma, G. J. Cheng and F. Liu, *ACS applied materials & interfaces* 12, 35291 (2020).