

습식 식각을 이용한 MWCNT-PMDS 변형을 센서 전극 생성에 관한 연구

정라희* · 황희윤*†

Electrode Fabrication of MWCNT-PDMS Strain Sensors by Wet-etching

La-Hee Jung*, Hui-Yun Hwang*†

ABSTRACT: This paper investigated the electrical properties of multiwall carbon nanotube reinforced polydimethylsiloxane (CNT-PDMS) strain sensors with copper electrodes on the wet-etched surface. MWCNT-PDMS strain sensors were fabricated according to the wt% of MWCNT. Surfaces on the electrode area were wet-etched with various etching duration and silver epoxy adhesives were spread on the wet-etched surface. Finally, we attached the copper electrodes to the MWCNT-PDMS strain sensors. We checked the electric conductivities by the two-probe method and sensing characteristics under the cyclic loading. We observed the electric conductivity of MWCNT-PDMS strain sensors increased sharply and the scattering of the measured data decreased when the surface of the electrode area was wet-etched. Initial resistances of MWCNT-PDMS strain sensors were inversely proportion to wt% of MWCNT and the etching duration. However, the resistance changing rates under 30% strain increased as wt% of MWCNT and the etching duration increased. Decreasing rate of the electric resistance change after 100 repetitions was smaller when wt% of MWCNT was larger and the etching duration was short. This was due to the low initial resistance of the MWCNT-PDMS strain sensors by the wet-etching.

초 록: 본 논문에서는 습식 식각으로 제작된 구리 전극을 가진 다중벽 탄소나노튜브 PDMS 복합재료 변형을 센서의 전기적 특성을 고찰하였다. MWCNT의 질량분율에 따라 MWCNT-PDMS 변형을 센서를 제작한 후, 전극 부착 표면을 습식 식각한 후 은-에폭시 전도성 접착제를 이용하여 구리 박판을 부착하였다. 2-프로브 방법으로 변형을 센서의 전기 전도성을 측정된 결과, 초기 저항은 MWCNT 함량과 식각 시간에 반비례하였지만 30% 변형률에 대한 저항 변화율은 MWCNT 함량과 식각 시간에 비례하였다. 100회 반복 하중 시험 후 저항 변형률 감소는 MWCNT 함량이 증가할수록 식각 시간이 짧아질수록 상대적으로 작게 나타났다. 이는 식각에 의해 MWCNT-PDMS 변형을 센서의 초기 저항 감소에 기인한 것으로 판단된다.

Key Words: 다중벽 탄소나노튜브(Multiwall carbon nanotube), 폴리디메틸실록산(Polydimethylsiloxane), 변형률 센서(Strain sensor), 습식식각(Wet etching)

1. 서 론

탄소나노튜브(Carbon nanotube, CNT)는 원기둥 모의 구조를 가지는 탄소 동소체로서 기계 및 전기적 특성이 매우 우수하여 금속, 세라믹, 고분자 소재와 혼합하는 방식으로

다양한 분야에 응용되고 있다[1,2]. 특히 고분자 소재 혹은 탄성 중합체와 같이 유연한 소재에 CNT를 혼합하면 유연하면서도 전기 전도성을 가져 센서나 구동기 등에 활용하기에 매우 적합한 소재를 제작할 수 있다[3]. 대표적인 예로는 CNT와 폴리디메틸실록산(Polydimethylsiloxane,

PDMS)를 혼합하여 제작한 변형률 센서를 들 수 있다. CNT-PDMS 변형률 센서는 넓은 변형률 측정 범위, 우수한 감도 특성 등으로 많은 연구가 수행되어왔다[4,5]. CNT-PDMS 변형률 센서는 전기적 신호 전달을 위해 표면에 전극을 부착해야 하는데, 대부분의 연구자들은 페인트 센서의 저항 변화를 측정하기 위하여 은 페이스트, 동 박판 등을 부착하여 전극으로 활용하고 있다. 일반적으로 CNT-PDMS 변형률 센서의 표면은 모재 재료로 덮여 있으며, 부착된 전극은 CNT-PDMS 변형률 센서의 CNT 네트워크와 직접 접촉하지 않게 된다. 실험실 연구 단계에서는 구조물에 전극을 설치한 후, 그 위에 CNT-PDMS 변형률 센서를 제작하는 방법으로 전극과 모재의 접촉 저항을 줄이고 CNT 네트워크와의 직접 접촉을 유도하는 등의 방법을 적용하고 있지만, 실제 구조물에 적용하는데 한계가 있다[6,7]. 실제로 전기 전도성 물체의 경우 이런 방법의 적용이 어렵기 때문에 센서 제작 후 전극을 부착해야 한다. PDMS는 전기 절연체이자 접착이 어려운 소재라는 한계로 인해, 실버페이스트나 구리 테입 형태의 전극이 쉽게 떨어지며 큰 접촉 저항을 가지는 경우가 대부분이다[8-10].

한편, CNT-PDMS 복합재료의 표면 식각을 통해 모재인 PDMS를 식각하여 CNT 네트워크를 노출시킴으로써 접촉 저항과 복합재료의 전기적 특성 변화를 유도하고자 하는 연구도 진행되었다[11-17]. 이들 연구에서는 테트라-*n*-부틸 암모늄 플루오라이드(Tetra-*n*-butylammonium fluoride, TBAF), 메틸피롤리돈(N-Methyl-2-pyrrolidone, NMP), 디메틸포름아마이드(N,N-Dimethylformamide, DMF), 트리플루오로아세트산(Trifluoroacetic acid), 황산(Sulfuric acid), 수산화 나트륨(Sodium hydroxide) 등의 에칭액을 사용하였으며, 에칭시간에 따른 표면 형태 변화, 전기전도도, 접촉저항, 전기화학적 임피던스 변화를 관찰하였다.

본 연구에서는 습식 식각 기법을 이용하여 CNT-PDMS 변형률 센서의 표면을 처리함으로써, CNT 네트워크와 전극 사이의 접촉 저항 감소와 이를 통한 변형률 센서의 전기적 특성 변화에 대해 고찰하였다. 이를 위하여 선행 연구에서 표면 개질 특성이 상대적으로 우수한 TBAF-NMP 에칭 솔루션을 이용하였으며, 다중벽 탄소나노튜브(Multiwall carbon nanotubes, MWCNT)의 함량과 에칭 시간에 따른 영향을 실험적으로 분석하였다.

2. 재료 및 실험

2.1 MWCNT-PDMS 변형률 센서 제작

MWCNT-PDMS 변형률 센서 제작을 위해 다중벽 탄소나노튜브(CNT Regular, Carbon Nano-material Technology Co., Ltd., Korea)과 PDMS(Sylgard 184, Cow Corning, USA)를 사용하였다. Table 1과 2는 사용된 재료의 사양을 나타낸다.

Table 1. Specification of MWCNTs

Property	Unit	Value
Diameter	nm	5~20
Length	mm	~10
Density	g/cm ³	0.04~0.08
Aspect Ratio		>500
Specific surface area	m ² /g	130~160

Table 2. Specification of Sylgard 184

Property	Unit	Value
Viscosity (Part A)	cP	5175
Viscosity (Mixed)	co	3500
Specific Gravity (Cured)	-	1.04
Cure Time at 25 °C	hrs	48
At 100°C	min	35

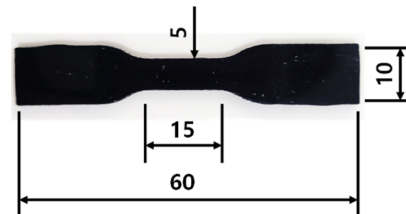


Fig. 1. Photograph of the fabricated MWCNT-PDMS strain sensor

MWCNT와 PDMS 주제를 질량비(1, 2, 3 wt%)에 따라 혼합한 후, 3분 밀(EXAKT50, EXAKT Technologies, Inc., Germany)을 이용하여 분산하였다. 분산은 20 μm 간격에서 회전속도비 1:1.8:3.3으로 4회 진행한 후, 10 μm 간격에서 회전속도비 50:90:165으로 5회 진행하였다. 이 후, PDMS 경화제를 추가하여 2분간 수작업으로 혼합한 후, 고속회전교반기(ARM-310, Thinky Co., Japan)를 이용하여 2000 rpm에서 2분간 추가 혼합 과정을 진행하였다. MWCNT-PDMS 혼합물은 10분간 진공탈포를 거친 후 금형에 주입하여 상온에서 48시간 경화 후 60도에서 2시간 추가 경화를 진행하여 제작을 완료하였다. 변형률 센서는 전기전도도 측정용 평판 샘플과 센서 특성 측정용 덤벨 샘플 두 가지로 제작하였으며 Fig. 1에 제작된 덤벨형 MWCNT-PDMS 변형률 센서 샘플을 제시하였다.

2.2 습식 식각 및 전극 부착 방법

전극 부착 부위의 모재인 PDMS만을 선택적으로 식각하여 CNT 네트워크와 전극 사이의 접촉 저항을 줄이고자 습식 식각 기법을 적용하였다. 식각액은 NMP(Sigma-Aldrich, USA)와 TBAF(Sigma-Aldrich, USA)를 3:1로 혼합하여 사용하였다[11]. MWCNT-PDMS 변형률 센서 샘플의 전극 부착 부위에 식각액을 떨어뜨린 후 일정 시간을 유지한 후에 NMP

용액과 증류수 세척하고 60도에서 1시간 건조하였다. 식각 시간은 0, 1, 2, 3분을 적용하였다.

식각된 표면에 은 함유 이액형 전도성 에폭시 접착제 (ELCOAT A-200, CANS, Japan)를 도포하고 동 박판을 부착한 후 150도에서 20분 처리하여 전기적 신호 측정용 전극을 제작하였다.

2.3 특성 평가 방법

주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 습식 식각에 따른 MWCNT-PDMS 변형율 센서 표면의 변화를 관찰하였다. SEM은 SNE-4500M(SEC Co. Ltd., Korea)을 활용하였으며, 인가 전압은 5 kV이다.

표면 식각에 의한 접촉 저항이 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전기전도도와 반복 하중 하에서 저항 변형율을 측정하였다. 전기 전도도 측정용 MWCNT-PDMS 변형율 센서 샘플은 25 mm × 25 mm × 1 mm 크기의 판형으로 제작하였다. 전기 전도도(σ)는 2-프로브 방식으로 측정된 저항(R)과 샘플의 면적(A) 및 두께(t)를 이용하여 식 (1)로 계산하였다.

$$\sigma = \frac{t}{RA} \quad (1)$$

변형율 센서로서의 특성은 초기 저항(R_0)과 변형율 인가에 따른 전기저항 변화(ΔR)의 비인 전기저항 변화율($\Delta R/R_0$)로 평가하였다. Fig. 2에 제시된 것과 같이 덤벨형 MWCNT-PDMS 변형율 센서 샘플을 최대 용량 100 N, 최대 인가 변위 50 mm, 최대 속도 5 mm/s 성능을 가진 소형 재료 시험기에 장착하고, 0~30%의 인장 변형율을 0.2%/s의 속도로 반복 인가하였다.

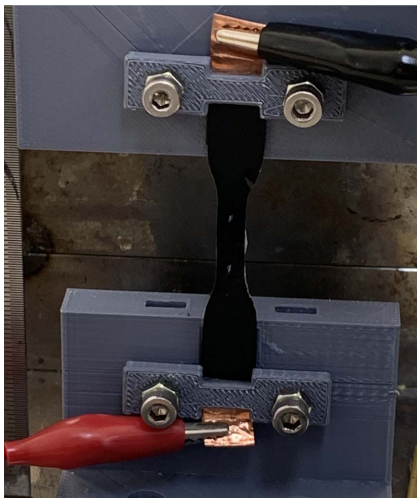


Fig. 2. Test setup for measuring sensor performance

3. 실험 결과

3.1 습식 식각에 따른 표면 변화

Fig. 3과 4는 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 습식 식각에 따른 표면 변화를 관찰한 SEM 사진이다. 좌측은 1000배, 우측은 5000배의 배율로 기준 길이는 각 그림에 표기하였다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이, 식각하지 않은 상태의 MWCNT-PDMS 변형율 센서 표면은 PDMS가 불균일하게 덮혀 있으며, 5000배 확대한 경우에도 MWCNT는 거의 관찰되지 않았다. 따라서 MWCNT-PDMS 변형율 센서 내부의 CNT 네트워크와 부착된 전극 간의 접촉은 충분하지 않을 것이라 판단된다. 하지만 1분 이상의 습식 식각을 한 경우 표면을 덮고 있는 PDMS 층이 제거되면서 비교적 균일한 표면을 보이고 있으며, 확대 사진에서 MWCNT가 잘 관찰되고 있다. 식각 시간이 길어짐에 따라 MWCNT 주변부의 PDMS 제거가 더 많이 일어나 표면의 패임이 더 많이 관찰되었으나, 노출된 MWCNT의 정도에는 큰 차이가 없었다.

Fig. 4는 식각 시간 2분일 때 CNT 함량 증가에 따른 표면

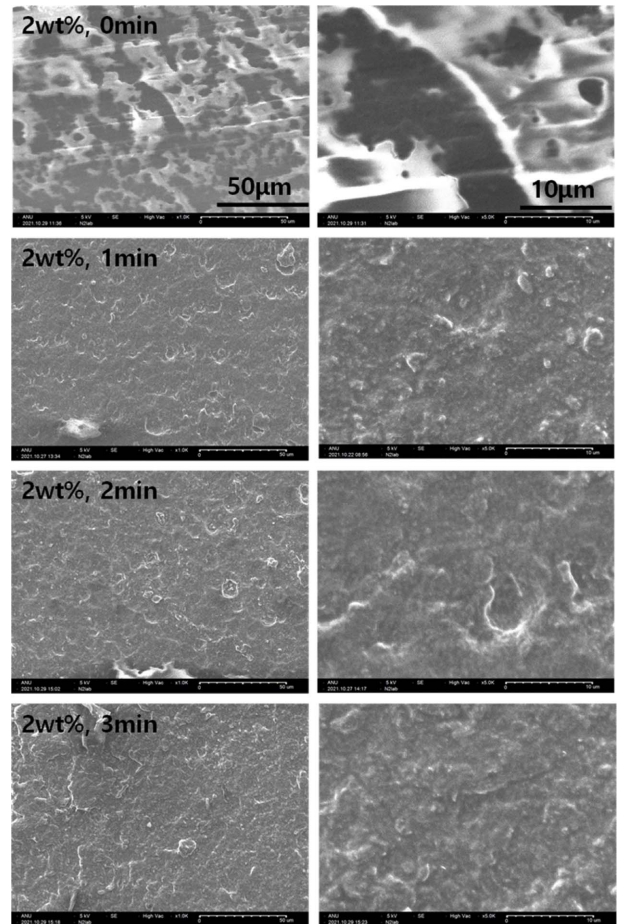


Fig. 3. SEM images of MWCNT-PDMS strain sensor surfaces with 2wt% CNT according to the etching duration (Left: ×1000, Right: ×5000)

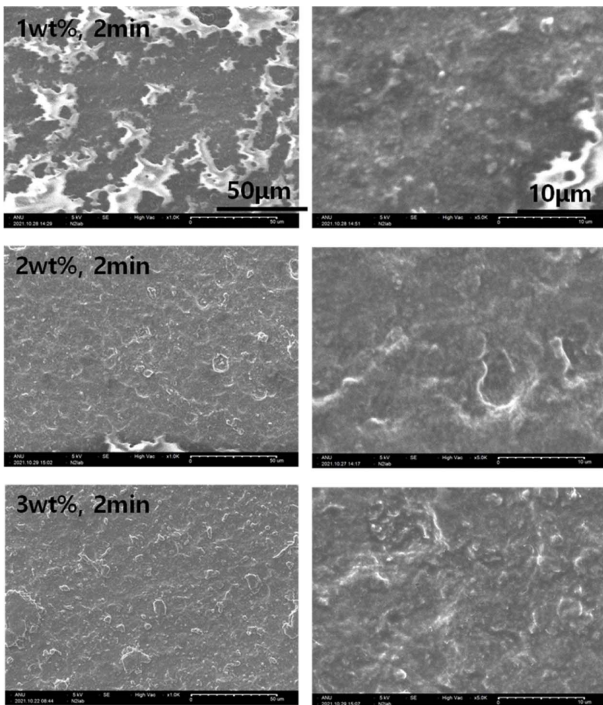


Fig. 4. SEM images of MWCNT-PDMS strain sensor surfaces with 2 min of the etching duration according to the CNT contents (Left: $\times 1000$, Right: $\times 5000$)

변화를 나타낸다. 1 wt%의 경우 2분의 식각에도 표면 층에 PDMS가 불규칙하게 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 2 wt%와 3 wt%는 표면 식각이 충분히 진행되어 불규칙하게 덮혀 있는 PDMS가 관찰되지 않았다. 이러한 영향은 전기 전도도 결과에서도 확인할 수 있다.

3.2 습식 식각에 따른 전기 전도도 변화

Fig. 5는 2-프로브 방식으로 측정된 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 전기 전도도를 나타낸다. MWCNT 함량이 1 wt%인 경우, 전극 부위 표면 식각을 하지 않았을 때 평균 전기 전도도는 $1.75 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ 이었지만, 식각을 1분, 2분, 3분 동안 했을 때 평균 전기 전도도는 $1.73 \times 10^{-2} \text{ S/m}$, $1.26 \times 10^{-1} \text{ S/m}$, $1.98 \times 10^{-1} \text{ S/m}$ 으로 식각에 의해 전기 전도도는 100배 이상 증가하였다. MWCNT 함량이 2 wt%인 경우, 전극 부위 표면 식각을 하지 않았을 때 평균 전기 전도도는 $6.11 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ 이었지만, 식각을 1분, 2분, 3분 동안 했을 때 평균 전기 전도도는 $9.81 \times 10^{-1} \text{ S/m}$, $1.09 \times 10^0 \text{ S/m}$, $1.39 \times 10^0 \text{ S/m}$ 으로 식각에 의해 전기 전도도는 20배 이상 증가하였다. MWCNT 함량이 3 wt%인 경우, 전극 부위 표면 식각을 하지 않았을 때 평균 전기 전도도는 $3.94 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ 이었지만, 식각을 1분, 2분, 3분 동안 했을 때 평균 전기 전도도는 $1.46 \times 10^0 \text{ S/m}$, $1.75 \times 10^0 \text{ S/m}$, $2.00 \times 10^0 \text{ S/m}$ 으로 식각에 의해 전기 전도도는 5배 이상 증가하였다. 식각하지 않은 표면에 전극을 부착한 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 CNT 함량에 따른 전

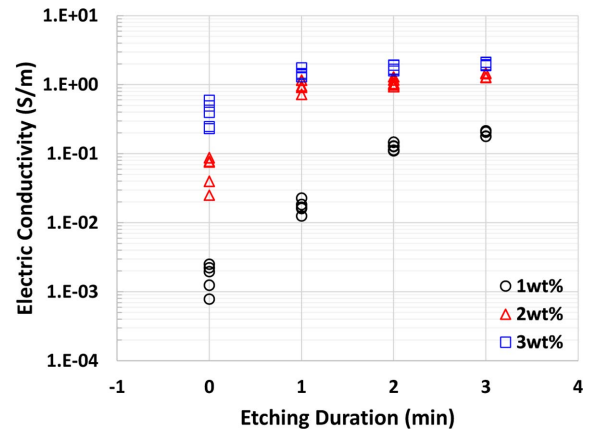


Fig. 5. Electric conductivity of MWCNT-PDMS strain sensors with respect to wt% of MWCNT and etching duration

기 전도도는 선행 연구 결과의 범위에 포함되는 수준으로 유의하다고 판단된다[18,19].

식각 시간에 따른 전기 전도도 증가 경향은 CNT 함량에 따라 다르게 관찰되었다. CNT 함량이 1 wt%일 경우 식각 시간이 증가함에 따라 전기 전도도도 증가하였으며, 2분에서 3분으로 증가할 때 전기 전도도 증가율이 완만해졌다. 그러나 2 wt%와 3 wt%는 1분의 식각만으로도 전기 전도도가 충분히 증가하였으며, 그 이상의 식각 시간에 대해서는 완만히 증가하는 경향을 보였다. CNT 함량과 식각 시간에 따른 전기 전도도 변화는 SEM 관찰 결과와 경향을 비슷하여 유의미하다고 판단된다.

주목할 만 것은 고려한 모든 CNT 함량에 대해 식각 전의 전기 전도도의 분산이 평균값의 40% 이상으로 매우 크게 나타난데 비해, 3분 식각 후에는 평균 값의 5% 수준으로 작아졌다는 것이다. 즉, MWCNT-PDMS 변형율 센서 표면이 CNT 네트워크와 접하는 정도가 제작된 상태에서는 차이가 많지만, 식각을 통해 표면의 PDMS를 제거하게 되면 CNT가 표면으로 노출됨에 따라 CNT 네트워크와의 접촉에 대한 제작 상태의 영향이 상대적으로 적어 변형율 센서 간의 편차를 줄일 수 있다고 판단할 수 있다.

3.3 습식 식각에 따른 센서 특성 변화

Fig. 6은 MWCNT 함량이 3 wt%이고 1분간 식각하여 제작한 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 30% 변형율을 반복하여 가하였을 때 저항 변화를 나타낸다. 초기 저항(R_0)은 약 7.8 k Ω 이었으며 30% 변형율을 가하였을 때의 저항은 약 9.1 k Ω 로 증가하여 1.1 k Ω 의 저항 변화(ΔR)가 관찰되었다. 초기 저항 변화율($\Delta R/R_0$)은 16.7%였으나, 100회 반복 후의 저항 변화율은 11.5%로 5.2% 감소하였다. 이는 일반적인 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 특징을 나타낸다고 판단된다[7].

Fig. 7은 CNT 함량과 식각 시간에 따른 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 초기 전기저항과 30% 변형율 인가에 따른

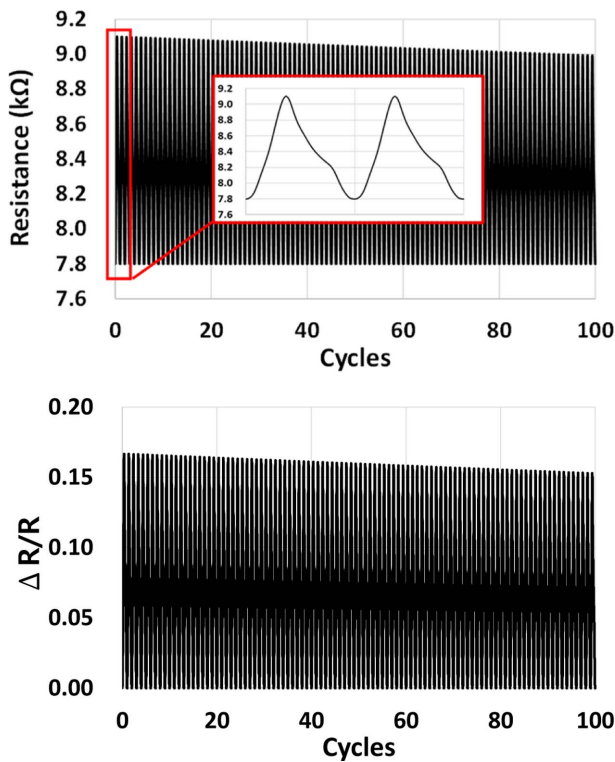


Fig. 6. Electric resistance change and its rate of MWCNT-PDMS strain sensors with 1 wt% of MWCNT and 1 min etching

저항 변화율을 나타낸다. 초기 저항은 CNT 함량이 증가할수록, 식각 시간이 길어질수록 작아지는 경향을 확인할 수 있었다. CNT 함량 증가에 따른 저항 감소는 선행 연구[7-9]에서 보고된 결과와 유사하며, 식각 시간 증가로 인한 전기 저항 감소는 SEM 측정 결과에서 확인하였듯이 식각 시간이 길어짐에 따라 표면에 노출된 MWCNT의 증가로 인하여 전극과 CNT 네트워크 사이의 접촉이 커졌기 때문으로 판단된다. 식각 시간 증가에 따른 저항 감소는 CNT 함량이 작을수록 크게 나타났는데, CNT 함량이 작은 경우 표면의 PDMS로 인해 CNT 네트워크와 전극의 접촉이 상대적으로 적을 수밖에 없지만 식각을 통해 접촉 정도의 향상이 더 많은 영향을 미쳤기 때문으로 예상된다. 식각은 전극 부착 영역에서의 접촉 저항을 줄이는 효과는 있지만, 변형에 의해 센서 저항 변화에는 영향을 주지 않는다. 따라서, 센싱 영역에서의 저항은 결정되어 있으며, 전극 영역에서의 식각 시간을 늘려 접촉 저항을 줄이더라도 센싱 영역의 저항 수준으로 수렴될 것으로 예상된다. 다만, 본 연구에서 고려한 식각 시간은 초기 저항이 계속 감소하는 것으로 볼 때, 수렴될 정도의 충분한 시간이 아니기 때문이라고 판단된다.

한편, 변형을 인가에 따른 저항 변화율은 CNT 함량과 식각 시간에 비례하였다. CNT 함량에 따른 저항 변화율은 분산, MWCNT 전처리 등에 따라 증가하거나 감소하는 서로 다른 결과들이 보고되고 있으나, CNT 함량이 작은 영역에

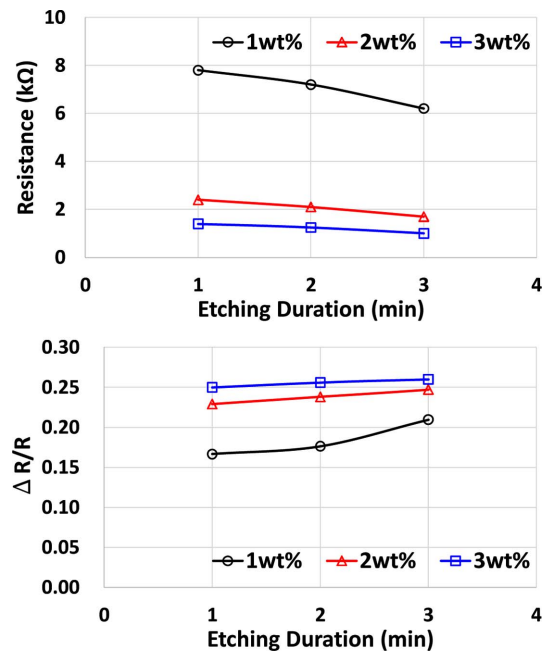


Fig. 7. Electric resistance change and its rate of MWCNT-PDMS strain sensors according to wt% of MWCNT and etching duration

서는 CNT 함량이 증가할 수록 저항 변화율이 증가하는 경향을 보이고 있어 본 연구 결과가 유의미하다고 판단된다 [14,17,19]. 전극 영역은 고정되어 있기 때문에 변형에 의한 CNT 네트워크의 정렬, 미끄러짐 등 저항 변화의 원인은 전극 영역의 식각에 영향을 받지 않는다. 하지만 식각을 통해 전극과 CNT 네트워크 간의 접촉 저항이 감소함으로써 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 초기 저항이 낮아졌기 때문에 식각 시간이 길어짐에 따른 MWCNT-PDMS 변형율 센서의 저항 변화율이 증가한 것으로 판단된다. 즉, 동일 CNT 함량에 동일 변형율이 가해지면 저항 변화는 동일하지만 초기 저항이 작아져 저항 변화율이 증가하는 것으로 관찰되는 것이다.

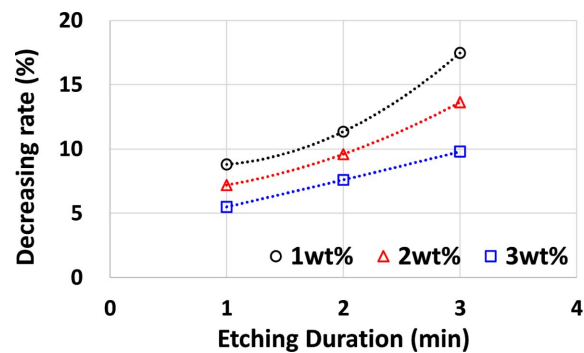


Fig. 8. Decreasing rate of electric resistance change of MWCNT-PDMS strain sensors under repeated loadings according to wt% of MWCNT and etching duration

Fig. 8은 100회 반복 시험 후에 MWCNT-PDMS 변형을 센서 저항 변화율의 변화를 나타낸다. 반복 시험이 진행될수록 PDMS의 히스테리시스와 MWCNT와 PDMS 간의 미끄러짐으로 인해 CNT 네트워크의 변형이 적어져 동일한 변형율에서 저항 변화가 작게 나타나게 된다[7]. 이런 현상은 Fig. 6에서도 관찰되며, 이로 인해 변형을 센서의 저항 변화율이 감소하게 되는 것이다. 저항 변화율 감소는 CNT 함량이 클수록 상대적으로 작게 관찰되었는데, 이는 PDMS의 히스테리시스로 인한 MWCNT 미끄러짐의 영향이 상대적으로 작기 때문으로 판단된다.

또한, 고려된 모든 CNT 함량에 대해 식각 시간이 증가하는 경우 반복 시험에 의한 MWCNT-PDMS 변형을 센서 저항 변화율 감소가 크게 나타났다. 이는 Fig. 7의 저항을 변화 결과를 설명한 이유로 설명이 가능하다. 동일한 CNT 함량에 대해서 반복 시험에 의해 PDMS의 히스테리시스나 CNT 네트워크의 변화는 식각 시간에 영향을 받지 않는다. 하지만 MWCNT-PDMS 변형을 센서의 초기 저항은 식각 시간이 길어짐에 따라 작아지기 때문에, 동일한 저항 변화 감소가 상대적으로 MWCNT-PDMS 변형을 센서의 저항 변화율에 큰 영향을 주기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면 식각 기법을 이용하여 MWCNT-PDMS 변형을 센서의 전극을 생성하였을 때, MWCNT-PDMS 변형을 센서의 표면 변화, 전기 전도도 및 센서 성능 변화를 실험적으로 관찰하였다. 표면 식각은 CNT 네트워크를 덮고 있던 PDMS 층을 제거함으로써 CNT를 표면으로 노출시켰으며, 부착된 전극과 CNT 네트워크의 접촉 저항을 줄일 수 있다. CNT 함량이 증가할수록 짧은 시간의 식각으로도 접촉 저항을 충분히 낮출 수 있었으며, MWCNT-PDMS 변형을 센서의 전기 전도도 향상과 초기 저항 감소 효과를 얻을 수 있었다. MWCNT-PDMS 변형을 센서의 저항 변화율과 반복 시험에 의한 저항 변화율 감소 모두 식각 시간에 비례하였는데, 이는 표면 식각으로 인한 MWCNT-PDMS 변형을 센서의 초기 저항 감소 때문인 것으로 판단된다.

본 연구 결과에 따르면, TBAF-NMP 식각액을 이용하여 2분 정도 전극 영역의 MWCNT-PDMS 변형을 센서 표면을 식각한 후 전극을 부착하면, MWCNT-PDMS 변형을 센서의 성능 (저항 변화율)과 내구성 (저항 변화율 감소) 모두 개선이 가능하므로 MWCNT-PDMS 변형을 센서의 전극 부착을 위한 표면 처리로 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 안동대학교 기본연구지원사업으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Wang, X., Li, Q., Xie, J., Jin, Z., Wang J., Li, Y., Jiang, K., and Fan, S., "Fabrication of Ultralong and Electrically Uniform Single-Walled Carbon Nanotubes on Clean Substrates," *Nano Letters*, Vol. 9, No. 9, 2009, pp. 3137-3141.
2. Shulaker, M.M., Hills, G., Patil, N., Wei, H., Chen, H.Y., Wong, H.S.P., and Mitra, W., "Carbon Nanotube Computer," *Nature*, Vol. 501, 2013, pp. 526-530.
3. Kim, S.Y., Kim, H.H., Choi, B.G., Kang, I.H., Lee, I.Y., and Kang, I.P., "A Study on Piezoresistive Characteristics of Smart Nano Composites based on Carbon Nanotubes for a Novel Pressure Sensor," *Journal of Drive and Control*, Vol. 13, No. 1, 2016, pp. 43-48.
4. Kang, I.P., and Kim, K.H., "Nano-Carbon Strain Sensors for the Development of the Sensing Devices of the Fourth Industrial Revolution," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 42, No. 2, 2018, pp. 185-194.
5. Han, D.Y., Kang L.H., Thayer, J., and Farrar, C., "Sensitivity Measurement of the Piezoelectric Paint Sensor according to the Poling Electric Field," *Composites Research*, Vol. 27, No. 4, 2014, pp. 146-151.
6. Chen, J., Yu, Q., Cui, X., Dong, M., Zhang, J., Wang, C., Fan, J., Zhu Y., and Guo, Z., "An Overview of Stretchable Strain Sensors from Conductive Polymer Nanocomposites," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 7, 2019, pp. 11710-11730.
7. Amjadi, M., Yoon, Y.J., and Park, I., "Ultra-stretchable and Skin-mountable Strain Sensors using Carbon Nanotubes-Ecoflex Nanocomposites," *Nanotechnology*, No. 26, 2015, Paper No. 375501.
8. Kim, J.H., Hwang, J.Y., Hwang, H.R., Kim, H.S., Lee, J.H., Seo, J.W., Shin, U.S., and Lee, S.H., "Simple and Cost-effective Method of Highly Conductive and Elastic Carbon Nanotube/Polydimethylsiloxane Composite for Wearable Electronics," *Scientific Reports*, Vol. 8, 2018, Paper No. 1375.
9. Du, J., Wang, L., Shi, Y., Zhang, F., Hu, S., Liu, P., Li, A., and Chen, J., "Optimized CNT-PDMS Flexible Composites for Attachable Health-Care Device," *Sensors*, Vol. 20, 2020, Paper No. 4523.
10. Nankali, M., Nouri, N.M., Navidbakhsh, M., Malek, N.G., Amindehghan, M.A., Shatoori, A.M., Karimi, M., and Amjadi, M., "Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensors Based on Carbon Nanotube-Elastomer Nanocomposites: The Effect of Environmental Factors on Strain Sensing Performance," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 8, 2020, pp. 6185-6195.
11. Balakrishnan, B., Patil, S., and Smela, E., "Patterning PDMS using a Combination of Wet and Dry Etching," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, 2009, Paper ID. 047002.
12. Tegmeier, K., Aluso, P., Lenarz, T., and Doll, T., "Residual Rubber Shielded Multi Walled Carbon Nanotube Electrodes for Neural Interfacing in Active Medical Implants," *Physics in Medicine*, Vol. 1, 2016, pp. 8-19.
13. Tegmeiere, K., Borrmann, F., and Doll, T., "Wet-etch Induced Changes in Impedance of Carbon Nanotube-Silicone Rubber

- Electrode Materials for Active Implants,” *Procedia Engineering*, Vol. 16, 2016, pp. 1168-1171.
14. Lee, S.U., Jee, S.S., Park, H., Park, S.H., Han, I., and Mizusaki, S., “Large Reduction in Electric Contact Resistance of Flexible Carbon Nanotube/Silicone Rubber Composites by Trifluoroacetic Acid Treatment,” *Composites Science and Technology*, Vol. 143, 2017, pp. 98-105.
 15. Han, S.H., and Hwang, H.Y., “Fabrication of Microstructures with Nanocomposites by Capillary Effects,” *Composites Research*, Vol. 31, No. 4, 2018, pp. 171-176.
 16. Han, S.H., *Development of Fabrication Process of Micro-Nano Hierarchical Structures for Synthetic Dry Adhesives*, MS Thesis, Andong National University, 2018.
 17. Jung, Y., Jung, K.K., Kim, D.H., Kwak, D.H., Ahn, S., Han, J.S., and Ko, J.S., “Flexible and Highly Sensitive Three-axis Pressure Sensors Based on Carbon Nanotube/Polydimethylsiloxane Composite Pyramid Arrays,” *Sensors and Actuators: A. Physical*, Vol. 331, 2021, Paper No. 113034.
 18. Zeng, Y., Li, Y., Li, Z., Wang, Y., Dai, K., Zheng, G., Liu, C., and Shen, C., “The Effect of Filler Dimensionality on the Electro-mechanical Performance of Polydimethylsiloxane Based Conductive Nanocomposites for Flexible Strain Sensors,” *Composites Science and Technology*, Vol. 139, 2017, pp. 64-73.
 19. Mulembo, T., Nagai, G., Tamagawa, H., Nitta, T., and Sasaki, M., “Conductive and Flexible Multi-walled Carbo Nanotube/Polydimethylsiloxane Composites Made with Naphtahalene/Toluene Mixture,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, No. 44, 2019, Paper ID 48167.